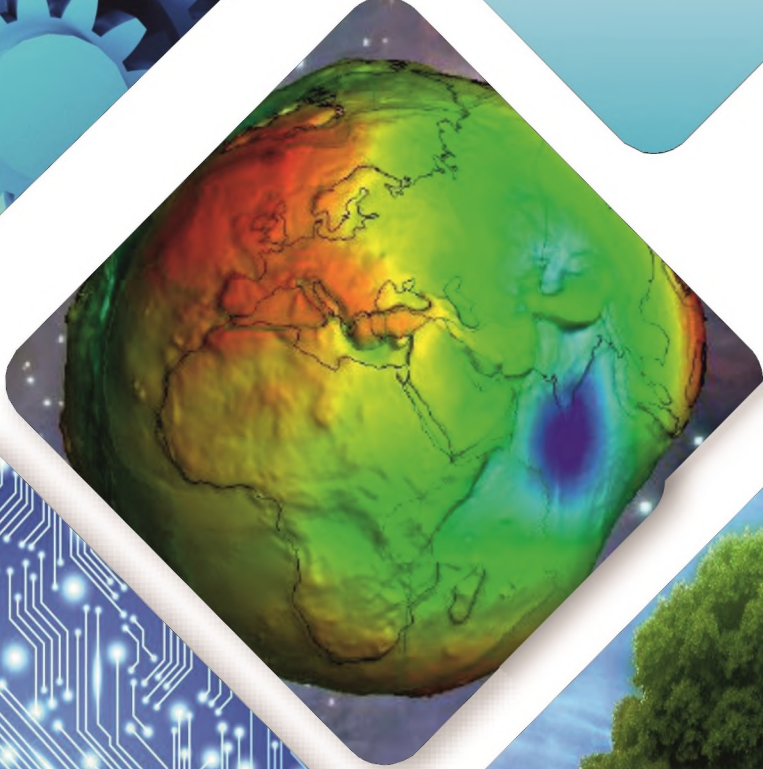




Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

Konya Journal of Engineering Sciences



(KONJES)
E-ISSN: 2667-8055



2022 - Cilt: 10 - Sayı: 2
2022 - Volume: 10 - Issue: 2

**KONYA JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES (KONJES)
KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**

HAKEMLİ DERGİDİR

OWNER/SAHİBİ

Owner on Behalf of Engineering and Natural Sciences Faculty of Konya Technical University **Prof. Dr. Halil Kür ad ERSOY**
Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Halil Kür ad ERSOY**

Chief Editor/Şef Editör

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI

Editors/Editörler

Prof. Dr. Halife KODAZ

Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN

Section Editors/Alan Editörleri

Prof. Dr. A. Afşin KULAKSIZ

Prof. Dr. Hsran ÖZKAN

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

Assoc. Prof. Dr. Alpaslan YARAR

Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN

Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM

Assist. Prof. Dr. Alper DÖYEN

Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN

Assist. Prof. Dr. Muhammed Arif EN

Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof. Dr. Ferruh YILDIZ, Konya Technical University

Prof. Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe University

Prof. Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University

Prof. Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University

Prof. Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University

Prof. Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University

Prof. Dr.-Ing. Rudolf STAIGER, Bochum University of Applied Sciences

Prof. Dr. Chryssy POTSIOU, National Technical University of Athens

Prof. Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University

Prof. Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University

Prof. Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

Prof. Dr. Ali BERKTAY

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

Assist. Prof. Dr. İsmail KOC

Dr. Emel Zeray OZTURK

Res. Assist Emir Ali DINSEL

Res. Assist. Aybüke BABADAG

Correspondance Address/ Yazışma Adresi

Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekanlığı
42075-Kampüs, Selçuklu, Konya-TURKEY

Tel : 0 332 223 88 18

Fax : 0 332 241 06 35

E-mail : konjes@ktun.edu.tr

Web : <http://dergipark.org.tr/konjes>

Editorial Board/Yayın Kurulu

Ahmet Afsin Kulaksiz, Konya Technical University, TURKEY

Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA

Ashok K. Mishra, Clemson University, USA

Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY

Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA

Demetrio Fuentes Ferrera, University of Castilla-La Mancha, SPAIN

Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE

Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY

Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA

Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN

Ihsan Ozkan, Konya Technical University, TURKEY

John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA

Kerim Kocak, Konya Technical University, TURKEY

Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA

Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA

Mohd Arif Wani, California State University, USA

Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN

Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN

Sanchoy K. Das, New Jersey Institute of Technology, USA

Selim Dogan, Konya Technical University, TURKEY

Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA

Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN

Vladimir Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY

Alpaslan Yarar, Konya Technical University, TURKEY

Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA

Cihan Varol Sam Houston State University, USA

Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA

Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC

Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM

Halil Kursad Ersoy, Konya Technical University, TURKEY

Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA

Huseyin Devenci, Konya Technical University, TURKEY

Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA

Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN

Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA

Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS

Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT

Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA

Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA

Saadettin Erhan Kesen, Konya Technical University, TURKEY

Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY

Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC

Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN

Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND

Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Konya Journal of Engineering Sciences
(KONJES)

ISSN 2667 – 8055 (Elektronik)

Cilt	10	Haziran	2022	Sayı	2
Volume	10	June	2022	Issue	2

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

MEVSİMSSEL DEĞİŞİMLERİN HASSAS NOKTA KONUMLAMAYA ETKİSİ

The Effect of Seasonal Changes on Precise Point Positioning

Sercan BÜLBÜL, Cevat İNAL, Burhaneddin BİLGİN 274-286

KETENCİK [*Camelina sativa* (L.) Crantz] YAĞI BİYODİZELİNİN ve KARIŞIM YAKITLARININ FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Investigation of the Physicochemical Properties of Camelina [*Camelina sativa* (L.) Crantz] Oil Biodiesel and its Fuel Blends

Tanzer ERYILMAZ, Seda ŞAHİN, Murat ERTUĞRUL, Sadiye Ayşe ÇELİK 287-300

EXAMINING THE EFFECT OF GENERATOR LOAD SHARING PRACTICES ON GREENHOUSE GAS EMISSIONS FOR A SHIP

Bir Gemi İçin Jeneratör Yük Paylaşımı Uygulamalarının Sera Gazı Emisyonları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Kenan YİĞİT (English) 301-311

INTERVAL TYPE-2 FUZZY RULE-BASED BWM APPROACH FOR SUSTAINABLE SUPPLIER SELECTION

Sürdürülebilir Tedarikçi Seçimi için Aralık Tip-2 Bulanık Kural Tabanlı BWM Yaklaşımı

Müslüm ÖZTÜRK, Belkız TORĞUL, Turan PAKSOY (English) 312-336

OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS OF ALUMINIUM 6013-T6 ALLOY IN THE TURNING PROCESS

Alüminyum 6013-T6 Alaşımlarının Tornalama İşlemlerinde Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu Seçil EKŞİ, Çetin KARAKAYA (English) 337-345

RULMANLARDA TİTREŞİM VERİLERİNDEN DURUM İZLEME VE ARIZA TEŞHİSİ İÇİN DERİN ÖĞRENME YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

Application of Deep Learning Method for Condition Monitoring and Fault Diagnosis from Vibration Data in Bearings

Nurhan GÜRSEL ÖZMEN, Yunus Emre KARABACAK 346-365

DETERMINATION OF OPTIMAL CONJUGATE GRADIENT METHOD FOR GEOMETRY FITTING

Geometri Uydurma için En İyi Eşlenik Gradyan Yönteminin Tespit Edilmesi

Kadir KIRAN (English) 366-375

SULAMA KANALLARINDA VORTEKS TÜRBİNLERİN SCADA İLE ENERJİ ÜRETİM KONTROLÜNÜN VERİMLİLİK ÜZERİNE ETKİSİ

The Effect of Energy Production Control with Scada of Vortex Turbines in Irrigation Channels on Efficiency

Muzaffer YÜCEL 376-387

GELENEKSEL YÖNTEMLERLE ÜRETİLEN KAPASİTANS TABANLI KENDİNDEN SENSÖRLÜ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT

Capacitance-Based Self-Sensing Cement-Based Composite Produced by Traditional Methods

Murat ÖZTÜRK 388-395

KALP HASTALIĞI TEŞHİSİNDE YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİNİN KULLANIMI VE KARŞILAŞTIRILMASI

The Utilization and Comparison of Artificial Intelligence Methods in the Diagnosis of Cardiac Disease

Onur ÜNLÜ, Hüma ÜNLÜ, Yılmaz ATAY 396-411

ULTRA YÜKSEK BASINÇTA ÇALIŞAN KALIN CİDARLI SİLİNDİRLERİN TASARIMINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN SAYISAL VE ANALİTİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

Numerical and Analytical Investigation of the Parameters Affecting the Design of Ultra High Pressure Thick Wall Cylinders

Mevlüt AYDIN, Mevlüt TÜRKÖZ, Yusuf Furkan YAPAN 412-424

BETON BORULARIN ZEMİN YÜKLERİ ALTINDA TASARIMLARI

Designs of Concrete Pipes Under Ground Loads

Taha ORTAKCI, Fatih SAKA 425-441

KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİNE AİT BİNALAR İÇİN ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ ARTIRMAYA YÖNELİK ÖRNEK BİR ÇALIŞMA

A Case Study on Increasing Energy Efficiency for Buildings of the Faculty of Engineering and Natural Sciences of Konya Technical University

Gülin GENÇOĞLU KORKMAZ, Ahmet SAMANCI 442-456

KARBON FİBER TAKVİYELİ GRAFİT ve PTFE KATKILI POLİ-ETER-ETER-KETON (PEEK) POLİMER KOMPOZİTİN TRİBOLOJİK PERFORMANSLARINA KAYMA HIZININ ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

Determination of the Effect of Sliding Speed on Tribological Performances of Carbon Fiber Reinforced, Graphite and PTFE Filled Poly-ether-ether-ketone (PEEK) Polymer Composite

Ahmet MASLAVİ, Hüseyin ÜNAL, Salih Hakan YETGİN 457-467

ASSESSMENT OF INSTALLED POWER FOR INCLINED BELT CONVEYORS USING GENETIC ALGORITHM AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Eğimli Bant Konveyörlerde Kurulu Gücün Genetik Algoritma ve Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Tahmini

Ekin KÖKEN (English) 468-478

ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE GES BAĞLANDIKTAN SONRA REAKTİF/AKTİF GÜÇ ORANININ YSA İLE BELİRLENMESİ

Detection of Reactive / Active Power Ratio by ANN after Connection GES in Industrial Facilities

Emine İŞİN, Nurettin ÇETİNKAYA 479-494

ZEMİN STABİLİZASYONUNDA BAZALT FİBER VE UÇUCU KÜL KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Investigation of Basalt Fiber and Fly Ash Use in Soil Stabilization

Onur SARAN, Atila DEMİRÖZ 495-511

ESNEK ÜSTYAPILARDA KALICI DEFORMASYON VE YORULMAYA BAĞLI MEKANİSTİK BİR MODELLEME VE DUYARLILIK ANALİZİ

A Mechanistic Modeling and Sensitivity Analysis Based on Permanent Deformation and Fatigue for Flexible Pavements

Fatma ÇARKANAT, Sinem BOZATLI, Yavuz ABUT 512-523



MEVSİMSEL DEĞİŞİMLERİN HASSAS NOKTA KONUMLAMAYA ETKİSİ

¹Sercan BÜLBÜL , ²Cevat İNAL , ³Burhaneddin BİLGİN 

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

¹sbulbul@ktun.edu.tr, ²cinal@ktun.edu.tr, ³bbilgen@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 16.11.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 23.02.2022)

ÖZ: Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP), tek bir GNSS alıcısıyla hassas uydu yörünge ve saat bilgilerini kullanarak santimetre doğruluğunda konum bilgisi sağlayan bir yöntemdir. Son zamanlarda bu yöntem pek çok bilimsel çalışmaya konu olmaktadır. Bu çalışmada, mevsimlerin PPP konum belirleme doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla kuzey yarım kürede yer alan yüksek enlem (KIR8 (İsveç), NYA2 (Norveç)), orta enlem (ANKR(Türkiye), DLF1(Hollanda)) ve ekvatorial bölgede (NKLG(Gabon), SIN1(Singapur)) bulunan Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service: IGS) istasyonları seçilmiştir. Seçilen istasyonlara ait 365 gün 24 saat 30 saniyelik RINEX verileri çözümlerde kullanılmak üzere elde edilmiştir. 01.12.2019-30.11.2020 tarihleri arasında elde edilen veriler çözümlerin yapılabildiği web tabanlı PPP servislerinden CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS ile değerlendirilmiştir. Web tabanlı servislerden elde edilen koordinatların hassasiyetlerini araştırmak amacıyla her ay için ortalama koordinat değerleri kullanılarak karesel ortalama hatalar (KOH) hesaplanmış, daha sonra mevsimlere bağlı doğrulukları ortaya koymak için istasyonların IGS'den temin edilen bilinen koordinatları kullanılarak konum ortalama hataları hesaplanmıştır. Aynı istasyonlar ve servisler için farklı mevsimlerde elde edilen konum ortalama hataları Bartlett testi ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonunda ANKR istasyonu hariç diğer istasyonlarda konum ortalama hatalarının uyum içinde olduğu, konum doğruluklarının mevsimlerden ziyade kullanılan servislere bağlı olduğu ve en iyi sonuçların MagicGNSS ile elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: IGS, online-PPP, CSRS-PPP, MagicGNSS, APPS

The Effect of Seasonal Changes on Precise Point Positioning

ABSTRACT: Precise Point Positioning (PPP) is a method that provides centimeter-level positioning accuracy using precise satellite orbit and clock products with a single GNSS receiver. Recently, this method has been the subject of many scientific studies. In this study, International GNSS Service (IGS) stations located in high latitude (KIR8 (Sweden), NYA2 (Norway)), mid-latitude (ANKR (Turkey), DLF1 (Netherlands)) and equatorial region (NKLG (Gabon), SIN1 (Singapore)) in northern hemisphere were selected to investigate the effect of seasons on position accuracy of PPP. RINEX data of 365 days 24 hours 30 seconds of selected stations were obtained to be used in solutions. The data obtained between 01.12.2019 and 30.11.2020 were evaluated with CSRS-PPP, MagicGNSS and APPS, which are web-based PPP services where solutions can be made within the specified date range. In order to investigate the precisions of the coordinates obtained from the web-based services, root mean square errors (RMSE) were calculated using the average coordinate values for each month, and then the 3D RMSE were calculated using the known coordinates of the stations obtained from IGS to reveal seasonal accuracies. The 3D RMSE obtained for the same stations and services in different seasons were compared with the Bartlett test. At the end of the comparison, it was seen that the 3D RMSE were in agreement at the other stations, except for the ANKR

station, the positioning accuracy was dependent on the used services rather than seasons, and the best results were obtained with MagicGNSS.

Keywords: IGS, online-PPP, CSRS-PPP, MagicGNSS, APPS

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçmişten günümüze bilim dünyasında yaşanan önemli gelişmeler günümüz yaşam şartlarına kolaylık sağlamakla birlikte jeodezik, jeodinamik ve kadastral amaçlarla konum belirleme alanında da daha doğru ve daha güvenilir sonuçların elde edilmesine olanak sağlamıştır. İlk yapay uydu olan Sputnik-1 uydusunun 04 Ekim 1957 tarihinde uzaya fırlatılmasıyla uzay jeodezisi, jeodezi bilimi içerisinde yer almaya başlamış ve böylece uydu jeodezisinin temelleri atılmıştır (Kahveci ve Yıldız, 2017). İlerleyen süreçte, hesaplama tekniği ve elektronik biliminin gelişmesiyle uzay çalışmalarının hız kazanması sonucu Global Konum Belirleme Sistemleri (GNSS) günlük yaşam içerisine girmiştir.

GNSS ölçmelerine dayalı olarak konum bilgileri hem mutlak hem de bağıl yöntemlerle elde edilebilmektedir. Bağıl konum belirleme uygulamalarında en az iki GNSS alıcısına gereksinim duyulurken, mutlak konum belirlemede tek bir GNSS alıcısı ile konumlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Uluslararası kuruluşlar tarafından üretilen hassas uydu yörünge ve saat bilgilerinin ulaşılabilir olması ve tek bir GNSS alıcısı ile nokta konumlarının hesaplanmasına imkân veren algoritmaların geliştirilmesi mutlak konum belirleme yöntemlerinden biri olan Hassas Nokta Konumlama (PPP) yönteminin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. PPP yönteminin geçmişi 1976 yılına kadar gitmektedir. Fakat 1990'lı yıllarda Uluslararası GNSS Servisi'nin (IGS) yüksek kaliteli GNSS verilerini yayınlamaya başlamasından sonra yaygınlaşmaya başlamıştır (<https://igs.org/network/>). 1976 yılında Anderle, (1976)'nin Doppler etkisinden yararlanarak uydu yörüngesini 2 metre doğruluk ile hesaplayabildiği çalışma yüksek bir doğruluk taşımamasına rağmen, PPP kavramının ilk kez ortaya çıkışına neden olmuştur. 1990'lı yıllarda hassas uydu yörünge ve saat bilgilerine erişilebilmiş, 1997 yılında çift frekanslı alıcıların çıkması ile iyonosferden kaynaklanan hatalar modellenenmiştir (Xu ve diğ., 2011). Aynı yıl, Zumberge ve diğ. (1997) tarafından kod ve taşıyıcı faz gözlemleri birlikte kullanılarak PPP yönteminin teorik temeli verilmiştir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, uzun gözlem sürelerinde statik PPP yönteminin neredeyse bağıl konum belirleme yönteminin hassasiyetine yaklaştığını göstermiştir. Yigit ve diğ. (2016), PPP yönteminin yüksek duyarlık istenen çalışmalarda ölçü süresine bağlı konum belirleme performansını hem GPS ölçüleri hem de GPS+GLONASS ölçülerini kullanarak araştırmıştır. Alçay (2016), farklı gözlem sürelerinde GPS-PPP ve GPS+GLONASS-PPP yöntemlerinin konum belirleme performanslarını, Gelişkan ve diğ. (2018) ise PPP tekniğinin deformasyon belirlemede kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bahadır ve Nohutçu (2019), ilk sivil tabanlı navigasyon sistemi olan Galileo uydu takımının Türkiye için tek başına PPP yöntemindeki performansını, Özdemir ve Gülal (2019), web tabanlı PPP yazılımlarının konum doğruluklarını, Erdoğan ve diğ. (2017), GPS kinematik ölçü sonrası değerlendirme şeklinde gerçekleştirilen PPP (Post Process PP-PPP) ve gerçek zamanlı PPP (Real Time RT-PPP) çözümlerinin doğruluklarını, Alçay ve Atiz (2021) ise farklı yazılımlar kullanarak RT-PPP yönteminin performansını araştırmışlardır.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar incelendiğinde, genel olarak PPP ölçü süresinin göz önüne alındığı ancak mevsimsel etkilerin çok az ilgi gördüğü görülmektedir. Bu çalışmada ise mevsimsel değişimlerin PPP yöntemine ve web tabanlı PPP servislerinin doğruluğuna etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, kuzey yarım kürede bulunan yüksek enlem bölgesi, orta enlem bölgesi ve ekvatorial bölgede seçilen ikişer adet IGS istasyonlarına ilişkin ardışık 365 gün 24 saat ve 30 saniyelik Alıcıdan Bağımsız Veri Değişim Formatı (RINEX) verileri kullanılmıştır. Daha sonra tüm veri setleri web tabanlı servislerden The Canadian Spatial Reference System-PPP (CSRS-PPP), MagicGNSS ve The Automatic Precise Positioning Service (APPS) kullanılarak değerlendirilmiştir. Seçilen IGS istasyonlarına ait günlük koordinat verileri hem aylara hem de mevsimlere göre gruplandırılmış ve bilinen koordinat değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu karşılaştırmalar sonucunda mevsimlerin, web tabanlı PPP servislerinin değerlendirme sonuçlarına nasıl bir etkisi olduğu ortaya konulmuştur.

MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

PPP Yöntemi ve Web Tabanlı PPP Servisleri (PPP Method and Web-based PPP Services)

PPP yönteminde, tek bir GNSS alıcısı kullanılarak cm/mm seviyelerinde doğruluğa ulaşmak amaçlanmaktadır. Son yıllarda gelişen teknoloji ve geliştirilen algoritmalar sayesinde bu amaca adım adım ulaşılmaya çalışılmaktadır. PPP yöntemi sıfır fark (zero difference) yönteminin özel bir durumu olup, Diferansiyel GPS ve Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK) gibi konum belirleme yöntemlerinden farklı olarak sabit istasyona ve neticesinde eş zamanlı gözleme gereksinim duymamaktadır (Alçay, 2019; Cai ve Gao, 2013; Soycan, 2012). PPP yöntemi IGS, Avrupa Uluslararası Yörünge Belirleme Merkezi (CODE), Jet Propulsion Laboratuvarı (JPL) gibi merkezlerden yayınlanan GNSS uydularına ait uydu yörünge ve saat düzeltmelerini kullanarak tek bir GNSS alıcısının konumunun hassas bir şekilde belirlenmesine dayanmaktadır (Ebner, 2008; Pan ve diğ., 2014). Sadece RINEX verileriyle gözlem süresine bağlı olarak cm mertebesinde konumlama gerçekleştirilebilmektedir (Alçay ve diğ., 2013). Ancak konum bilgisinin yüksek doğrulukla elde edilebilmesi için PPP'ye etki eden bazı etkilerin (phase wind-up, ocean tide vb) dikkate alınması gerekmektedir (Kouba ve Héroux, 2001).

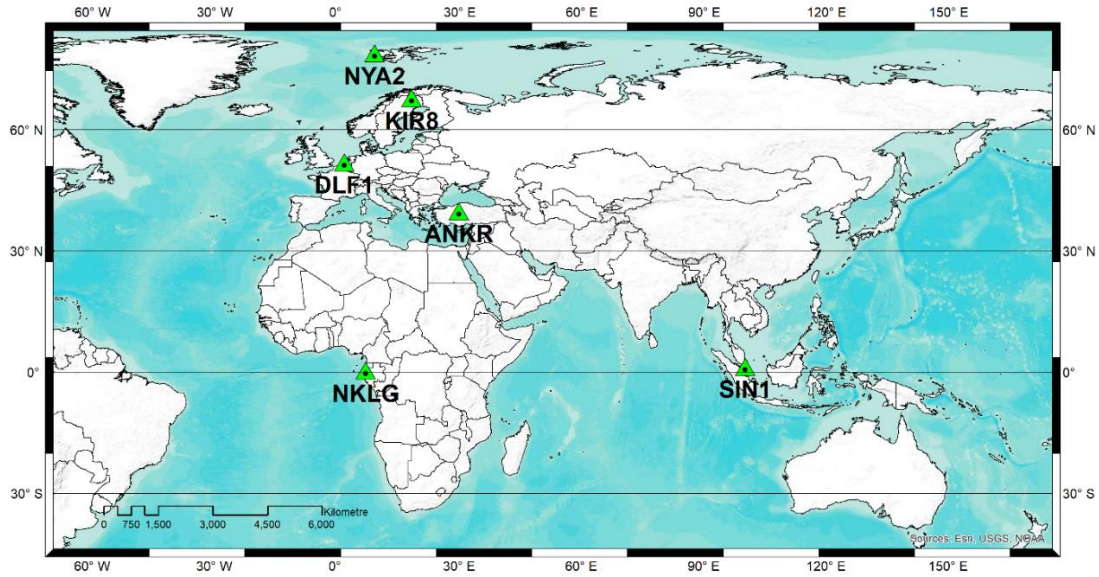
Günümüzde son gelişmelerle birlikte PPP yöntemi ile hem RT hem de PP ile konum belirlenebilmektedir (Soycan, 2012). Elde edilen ham ölçü verilerinin değerlendirilmesi için; RT-PPP'de anlık düzeltme verilerini alabilen RTKLIB, BNC vb. yazılımlar, PP-PPP ile konum belirlemede düzeltmeler anlık olarak alınmadığından akademik yazılımlar (Bernese, GIPSY- OASIS, GNSS-Lab Tool-gLAB vb.) veya web tabanlı servisler (CSRS-PPP, MagicGNSS, APPS, GAPS vb.) kullanılabilir. CSRS-PPP, 2003 yılında NRCan (Natural Resources Canada) kuruluşunun sağladığı web tabanlı GNSS değerlendirme servisedir. Diğer web tabanlı değerlendirme servislerinde olduğu gibi basit bir ara yüz ile kullanıcılara hizmet sunmaktadır. Sistem, tek veya çift frekanslı alıcılara toplanmış statik ya da kinematik gözlem verilerinin (GPS, GLONASS) çözümlerinin, North American Datum-1983 (NAD83) ya da The International Terrestrial Reference Frame (ITRF) datumunda elde edilmesine olanak vermektedir (Choy ve diğ., 2013; Dawidowicz ve Krzan, 2014). Ek bir seçenek olarak kullanıcılara kendi ölçüm yaptıkları istasyona ait okyanus yükleme dosyalarını tanımlama imkânı sağlamaktadır. CSRS-PPP kullanıcılara web tabanlı değerlendirme hizmeti verirken arka planda NRCan-PPP yazılımı ile çözüm yapmaktadır. CSRS-PPP sonuç (final), hızlı (rapid) ya da çok hızlı (ultra rapid) uydu efemeris bilgilerinden en uygununu kullanmaktadır (Erol, 2021). Ekim 2020 itibariyle CSRS-PPP servisinde bir güncelleme gerçekleştirilmiş ve 1 Ocak 2018 ve sonrasında toplanan verilerin değerlendirilmesinde geleneksel PPP algoritmasından, PPP-AR (Ambiguity Resolution) algoritmasına geçilmiştir. PPP-AR algoritması ile faz başlangıç belirsizliği kesirli olarak belirlenmeyip tam sayı olarak kestirilmektedir. Ayrıca bu güncelleme ile RINEX versiyon 3 (v.3) veri formatı da çözümlenmeye başlanmıştır. Mart 2021'de yapılan diğer bir güncelleme ile CSRS-PPP, yüksek frekanslı statik verileri otomatik olarak 30 saniyelik kayıt aralığına indirmektedir. Bundan, yalnızca beklenen 30 saniyelik aralıkların en az %75'inin mevcut olduğu hem kod hem de faz ölçülerini içeren çift frekanslı statik veriler etkilenmekte, diğer veriler etkilenmemektedir (<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca>).

MagicGNSS, 2008 yılında İspanya'da GMV (Innovation solutions) tarafından geliştirilen web tabanlı bir GNSS veri değerlendirme servisedir. Bu servisin ücretsiz olan e-posta hizmeti (magicppp@gmv.com) aracılığıyla GPS ve GLONASS verileri değerlendirilebilirken, belirli bir ücret ödeyerek kayıt yaptıran kullanıcılar GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou ve QZSS uydularından alınan verileri de değerlendirebilmektedir. Statik ve kinematik değerlendirme seçeneklerine sahip servis, IGS ve GMV'nin ürettiği uydu yörünge ve saat ürünlerini kullanarak gönderilen çift frekanslı GNSS verilerini değerlendirmektedir. Verilerin değerlendirilmesi sonucunda; PPP koordinatları, değerlendirme işlemine ait pek çok istatistiksel bilgiyi de içeren rapor ve grafikler, e-posta ile kullanıcılara kısa bir süre içerisinde gönderilmektedir (Uçarlı ve diğ., 2021).

APPS, NASA JPL tarafından işletilen web tabanlı bir GPS değerlendirme servisi. Servis JPL tarafından üretilen gerçek zamanlı, günlük ve haftalık GPS yörünge ve saat bilgilerini kullanmaktadır. APPS, sadece GPS uydularından alınan çift frekanslı verileri değerlendirerek GIPSY 6.4 bilimsel yazılımı ile statik veya kinematik (kayıtlı kullanıcılar için) yöntemlerle PPP koordinatlarını hesaplamaktadır. Veriler, servisin web sayfası aracılığıyla veya e-posta/FTP ile gönderilebilmektedir. Değerlendirme aşamasında NASA JPL tarafından üretilen hassas uydu yörünge ve saat ürünlerinden (real-time, ultra rapid, rapid ve final) yararlanılmaktadır. Yüksek doğruluklu hassas uydu yörünge ve saat düzeltmeleri haftalık periyotlarda üretilerek yayınlanmakta olup, en yüksek doğruluk için bu sürenin beklenmesi gerekmektedir (Alkan ve diğ., 2017, Uçarlı ve diğ., 2021). APPS tarafından gönderilen sonuçlar ITRF datumunda olup diğer ek veriler ile kullanıcılara sunulmaktadır.

Çalışma Alanı ve Yöntem (Study Area and Method)

Bu çalışmada, mevsimlerin PPP üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla kuzey yarım kürede yüksek enlem (KIR8, NYA2), orta enlem (ANKR, DLF1) ve ekvatorial bölgede (NKLG, SIN1) bulunan IGS istasyonları kullanılmıştır (Şekil 1). Seçilen istasyonlara ait bilgiler Çizelge 1’de verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan istasyonlara ait 01.12.2019-30.11.2020 tarihleri arasındaki 24 saatlik 30 saniye kayıt aralıklı RINEX verileri temin edilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan IGS istasyonları

Figure 1. IGS stations used in the study

Çizelge 1. Kullanılan istasyonlara ait tanımlayıcı bilgiler*Table 1. Descriptive information of the stations used*

İstasyon	Ülke	Enlem (°)	Boylam (°)	Yükseklik (m)	Uydular	Alıcı	Anten
KIR8	İsveç	67.878	21.060	498.00	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+SBAS	TRIMBLE ALLOY	LEIAR25.R
NYA2	Norveç	78.930	11.859	82.00	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+IRNSS+SBAS	SEPT POLARX5	JAVRINGANT_G5T
ANKR	Türkiye	39.888	32.759	975.00	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+SBAS	LEICA GR30	LEIAR10
DLF1	Hollanda	51.986	4.387	76.00	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+SBAS	TRIMBLE NETR9	LEIAR25.R3
NKLG	Gabon	0.354	9.672	31.00	GPS+GLO+GAL+BDS+SBAS+IRNSS	SEPT POLARX5	TRM59800.00
SIN1	Singapur	1.343	103.679	93.00	GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+SBAS	TRIMBLE NETR9	LEIAR25.R3

365 gün 24 saat ve 30 saniyelik RINEX verileri PPP tekniği için geliştirilmiş olan web tabanlı servislerden CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS kullanılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme stratejisi Çizelge 2’de verilmektedir.

Çizelge 2. Kullanılan değerlendirme stratejileri*Table 2. Used processing strategy*

Bilgi	Web tabanlı PPP Servisleri		
Servis	CSRS-PPP	magicGNSS	APPS
Kurum	Natural Research Canada (NRCan)	GMV Innovation Solution	Jet Propulsion Laboratory (JPL)
Referans Çerçevesi	ITRF08	ITRF08	ITRF08
Anten Bilgileri	IGS	IGS	IGS
Uydu yörünge ve saat kayıklıkları	IGS Final	IGS Final	JPL Final
Yükseklik açısı	10°	10°	10°
GNSS Sistemi	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS	GPS
Yazılım	NRCan-PPP	Magic GNSS 5.3	GIPSY v. 6.2
Mod	Statik	Statik	Statik
Frekans	Çift	Çift	Çift
Belirsizlik çözümü	Fixed	Fixed	Fixed

Web tabanlı servislerden elde edilen kartezyen koordinatların (X, Y, Z) yılın her ayındaki hassasiyetlerini incelemek amacıyla aylara ilişkin KOH hesaplanmıştır. KOH’un hesaplanmasında her bir aya ait kesin koordinatlar kullanılmıştır. n kesin değerlerin hesaplanmasında kullanılan koordinat sayısını ve X_i, Y_i, Z_i her ayın günlerine ait koordinatları göstermek üzere, ilgili aya ait kesin koordinatlar (X_a, Y_a, Z_a) ;

$$X_a = \frac{[X_i]}{n}, \quad Y_a = \frac{[Y_i]}{n}, \quad Z_a = \frac{[Z_i]}{n} \quad a = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (1)$$

denklemleri, kesin ve her bir güne ait koordinatlar arasındaki farklar;

$$V_{X_i} = X_i - X_a, \quad V_{Y_i} = Y_i - Y_a, \quad V_{Z_i} = Z_i - Z_a \quad (2)$$

denklemleri, koordinat bileşenleri yönündeki KOH ise;

$$m_{X_i} = \pm \sqrt{\frac{[V_{X_i}V_{X_i}]}{n-1}}, \quad m_{Y_i} = \pm \sqrt{\frac{[V_{Y_i}V_{Y_i}]}{n-1}}, \quad m_{Z_i} = \pm \sqrt{\frac{[V_{Z_i}V_{Z_i}]}{n-1}} \quad (3)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Koordinat bileşenleri yönündeki KOH'dan yararlanılarak nokta konumlarına ilişkin KOH;

$$m_{3P} = \pm \sqrt{m_{X_i}^2 + m_{Y_i}^2 + m_{Z_i}^2} \quad (4)$$

denklemleri ile elde edilmiştir. Web tabanlı servislerin farklı mevsim koşulları altında sağladığı konum ortalama hatalarını hesaplamak amacıyla PPP servisleri ile elde edilen koordinatlar her bir istasyon için bilinen koordinat değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, (<http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER52/STA/>) web adresinden alınan 2010.00 epoğundaki gerçek koordinatlar;

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{T_0} \\ Y_{T_0} \\ Z_{T_0} \end{bmatrix} + (T - T_0) \cdot \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

denklemleri kullanılarak ölçü epoğuna kaydırılmıştır. Denklem (5)'te; X_{T_0} , Y_{T_0} , Z_{T_0} IGS istasyonlarının 2010.00 epoğundaki güncel koordinat değerlerini, T ölçü epoğunu, T_0 referans epok olan 2010.00 epoğunu, V_X , V_Y , V_Z istasyonların 2010.00 epoğundaki hızlarını göstermektedir. Her bir ölçü gününde web tabanlı PPP servislerinden elde edilen koordinatlar (X_i , Y_i , Z_i) ile ölçü epoğundaki koordinatlar arasındaki farklar alınarak gerçek hatalar;

$$\varepsilon_{X_i} = X_i - X_T, \quad \varepsilon_{Y_i} = Y_i - Y_T, \quad \varepsilon_{Z_i} = Z_i - Z_T \quad (6)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Koordinat eksenleri yönündeki karesel ortalama hatalar (KOH);

$$m_{X_i} = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_{X_i}\varepsilon_{X_i}]}{n}}, \quad m_{Y_i} = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_{Y_i}\varepsilon_{Y_i}]}{n}}, \quad m_{Z_i} = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_{Z_i}\varepsilon_{Z_i}]}{n}} \quad (7)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (7)'de n , elde edilen ardışık gerçek hata sayısını göstermektedir. İstasyonlara ait konum ortalama hatası;

$$m_{3P} = \pm \sqrt{m_{X_i}^2 + m_{Y_i}^2 + m_{Z_i}^2} \quad (8)$$

denklemleri ile elde edilmiştir.

Normal dağılımlı iki ölçü grubunun varyanslarının istatistiksel olarak uyumlu olup olmadığının test edilmesinde Fisher dağılımı kullanılırken, ölçü gruplarının sayısının ikiden fazla olduğu durumlarda Bartlett testi kullanılır. Bu nedenle aynı istasyonlara ait aynı yazılım ve farklı mevsimlerdeki varyansların istatistiksel olarak birbirleri ile karşılaştırılmasında Bartlett testinden yararlanılırken sıfır hipotezi;

$$H_0 = E(m_1^2) = E(m_2^2) = \dots = E(m_k^2) = \sigma_0^2 \quad (9)$$

şeklinde ileri sürülmüş ve ölçü gruplarının varyansları hesaplanırken f_i serbestlik derecesi olmak üzere,

$$M = [f_i] \ln\left(\frac{[f_i m_i^2]}{[f_i]}\right) - [f_i \ln(m_i^2)] \quad (10)$$

$$C = 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\left[\frac{1}{f_i} \right] - \frac{1}{[f_i]} \right) \quad (11)$$

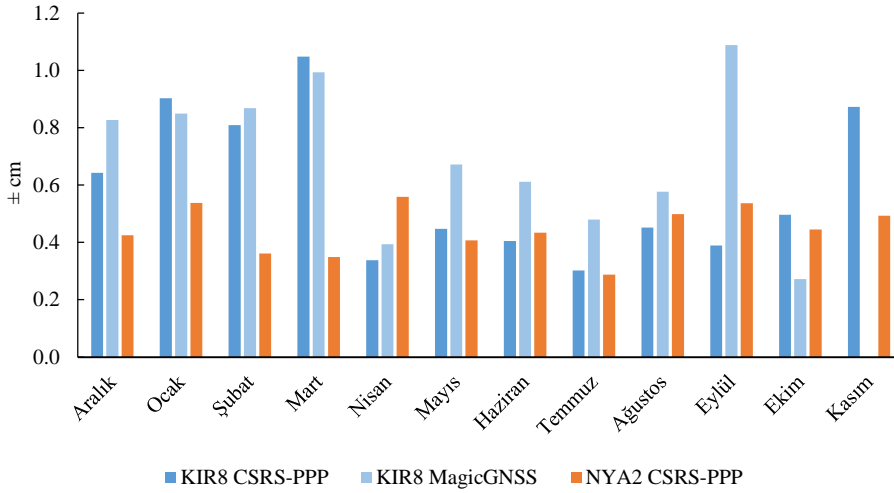
denklemlerinden yararlanarak test büyüklüğü;

$$\chi^2 = \frac{M}{C} \quad (12)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. $1 - \alpha$ istatistik güven aralığında ve $k - 1$ serbestlik derecesine karşılık $\chi^2_{k-1,1-\alpha}$ sınır değeri χ^2 tablosundan alınmıştır. $\chi^2 < \chi^2_{k-1,1-\alpha}$ ise sıfır hipotezi kabul edilmiş ve ölçü gruplarının varyanslarının eşit olduğu sonucuna varılmıştır (Lim ve Loh, 1996; Ott, 1998; Zar, 1999).

BULGULAR (RESULTS)

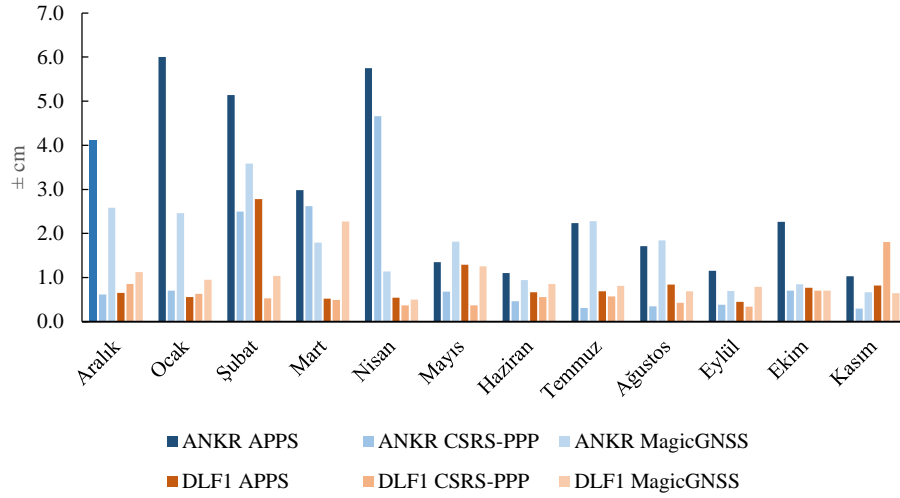
Seçilen istasyonların 365'er günlük RINEX verileri web tabanlı PPP servislerinden CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS kullanılarak işlenmiş ve her güne ait koordinatlar elde edilmiştir. Koordinatlar elde edildikten sonra her mevsim için o mevsimdeki ayların kendi içinde ortalama koordinatları ve bunlara dayalı olarak KOH Denklem (1) - (3) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (4) ile nokta konumlarına ilişkin KOH hesaplanmış ve yüksek enlem bölgesindeki istasyonlar için Şekil 2'de, orta enlem bölgesindeki istasyonlar için Şekil 3'te, ekvatorial bölgede yer alan istasyonlar için Şekil 4'te grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Yüksek enlem bölgesindeki istasyonlara ait KOH

Figure 2. RMSE for the stations in high-latitude region

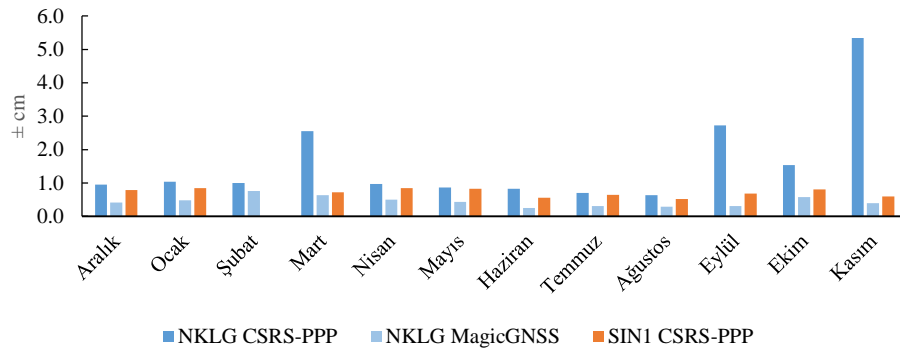
Şekil 2'de, yüksek enlem bölgesinde, APPS ile hem KIR8 hem de NYA2 istasyonlarında, MagicGNSS ile NYA2 istasyonunda çözümlerin elde edilemediği görülmektedir. İstasyonlarda KOH $\pm 0.3 - \pm 1.0$ cm arasında değişmektedir. NYA2 istasyonunda elde edilen KOH'un genellikle KIR8'e göre daha küçük olması, koordinatların tekrar edilebilirliklerinin daha iyi seviyede olduğunu göstermektedir. KIR8 istasyonunda ise kış ve ilkbahar mevsimlerini kapsayan Aralık, Ocak, Şubat ve Mart aylarında tekrar edilebilirliklerin kötüleşmesi nedeniyle KOH değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Orta enlem bölgesindeki istasyonlara ait KOH

Figure 3. RMSE for the stations in mid-latitude region

Şekil 3, orta enlem bölgesindeki istasyonlarda KOH'un; APPS için $\pm 0.3 - \pm 6.0$ cm arasında, CSRS-PPP için $\pm 0.3 - \pm 4.7$ cm arasında, MagicGNSS içinse $\pm 0.5 - \pm 3.6$ cm arasında değiştiğini ve genel olarak ANKR istasyonunda daha yüksek olduklarını göstermektedir. ANKR istasyonu kış ve ilkbahar mevsimlerinden etkilenmiş ve bu nedenle Aralık, Ocak, Şubat ve Mart aylarını kapsayan dönemlerde koordinatlarının tekrar edilebilirlik seviyeleri düşük seyretmiştir. DLF1 istasyonunda ise yılın tüm aylarında daha tutarlı koordinat değerlerinin elde edildiği ve dolayısıyla KOH'un ANKR istasyonuna göre daha küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Ekvatorial bölgedeki istasyonlara ait KOH

Figure 4. RMSE for the stations in equatorial region

Ekvatorial bölgede NKLK istasyonunda APPS ile, SIN1 istasyonunda ise hem APPS hem de MagicGNSS ile sonuçlar elde edilememiştir. Şekil 4'te KOH'un genel olarak $\pm 0.2 - \pm 1.5$ cm arasında değiştiği, sadece Mart, Eylül ve Kasım aylarında bir sıçrama olduğu görülmektedir. Ekvatorial bölgede her iki istasyon için de koordinatların tekrar edilebilirliklerinin iyi seviyede olduğu söylenebilir. CSRS-PPP servisinin NKLK istasyonunda Mart, Eylül, Ekim ve Kasım aylarındaki mevsimsel değişimlerden etkilendiği ve buna bağlı olarak KOH'un yükseldiği görülmüştür.

Web tabanlı servislerin mevsimlere bağlı doğruluğunu incelemek için istasyonların web adresinden temin edilen bilinen koordinatları Denklem (5) ile ölçü epoğuna kaydırılmış ve elde edilen koordinatlarla karşılaştırılmıştır. Bu amaçla mevsimlere ilişkin KOH bilinen koordinatlara dayalı olarak Denklem (6) ve (7) yardımıyla elde edilmiştir. KIR8 ve NYA2 istasyonlarında yılın her bir mevsimi için koordinat bileşenleri yönündeki KOH Çizelge 3'te, ANKR ve DLF1 istasyonlarına ait olan koordinat bileşenleri

yönündeki KOH Çizelge 4'te, NKLK ve SIN1 istasyonlarına ait koordinat bileşenleri yönündeki KOH ise Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 3. KIR8 veNYA2 istasyonları için koordinat bileşenleri yönündeki KOH (cm)

Table 3. RMSE (cm) in the direction of the coordinate components for stations KIR8 and NYA2

İstasyonlar	Servisler	APPS			CSRS-PPP			MagicGNSS		
	Mevsimler	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
KIR8	Kış	Sonuç alınamamıştır.			±8.2	±5.3	±6.1	±6.9	±4.4	±5.3
	İlkbahar				±7.9	±5.0	±6.9	±7.7	±4.3	±4.9
	Yaz				±7.6	±4.7	±6.6	±7.3	±3.9	±5.7
	Sonbahar				±8.0	±5.1	±6.7	±6.6	±4.0	±5.2
NYA2	Kış				±5.8	±0.9	±14.0	Sonuç alınamamıştır.		
	İlkbahar				±5.8	±0.7	±13.9			
	Yaz				±5.8	±0.9	±14.4			
	Sonbahar				±5.6	±1.3	±14.9			

Çizelge 3 incelendiğinde; KIR8 ve NYA2 istasyonlarının yüksek enlem bölgesinde olması dolayısıyla, bu istasyonlara ait 24 saatlik RINEX verilerinin APPS ile çözümlenemediği, KIR8 istasyonuna ait koordinat eksenleri yönündeki KOH'un $\pm 3.9 - \pm 8.2$ cm arasında değiştiği, MagicGNSS'in daha iyi sonuçlar verdiği ve NYA2 istasyonunda koordinat eksenleri yönündeki en iyi karesel ortalama hatanın ± 0.7 cm ile ilkbahar aylarında m_y koordinat bileşeninde elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4. ANKR ve DLF1 istasyonları için koordinat bileşenleri yönündeki KOH (cm)

Table 4. RMSE (cm) in the direction of the coordinate components for stations ANKR and DLF1

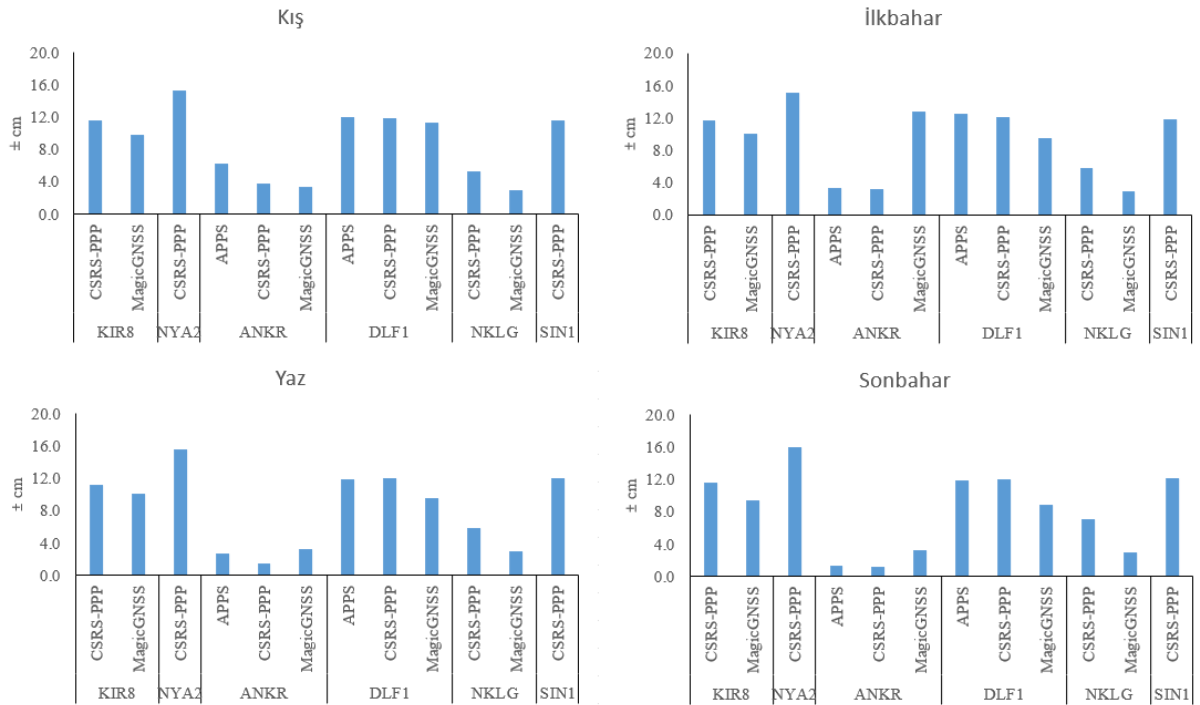
İstasyonlar	Servisler	APPS			CSRS-PPP			MagicGNSS		
	Mevsimler	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
ANKR	Kış	±4.0	±3.0	±3.7	±3.4	±1.0	±1.1	±2.0	±1.7	±2.0
	İlkbahar	±2.6	±1.7	±1.2	±1.8	±1.8	±2.0	±2.5	±8.3	±9.3
	Yaz	±2.0	±1.1	±1.5	±0.9	±0.9	±0.7	±2.4	±1.6	±1.6
	Sonbahar	±0.7	±1.1	±0.4	±0.6	±0.9	±0.3	±2.5	±0.7	±1.9
DLF1	Kış	±7.4	±8.0	±4.9	±7.6	±7.9	±4.5	±6.3	±8.5	±4.2
	İlkbahar	±7.9	±8.2	±5.4	±7.6	±8.0	±4.9	±6.1	±6.4	±3.3
	Yaz	±7.0	±7.8	±5.6	±7.1	±7.9	±5.4	±5.8	±6.5	±3.9
	Sonbahar	±7.3	±7.8	±5.1	±7.7	±7.9	±4.8	±5.5	±6.1	±3.2

Çizelge 4'te orta enlem bölgesinde bulunan istasyonların 24 saatlik RINEX verilerinin web tabanlı üç PPP yazılımı ile değerlendirilebildiği görülmektedir. ANKR istasyonu genel anlamda DLF1'e göre koordinat eksenleri yönünde daha iyi karesel ortalama hatalara sahiptir. Her iki istasyonda da genellikle yaz aylarında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5. NKLG ve SIN1 istasyonları için koordinat bileşenleri yönündeki KOH (cm)*Table 5. RMSE (cm) in the direction of the coordinate components for stations NKLG and SIN1*

İstasyonlar	Servisler Mevsimler	APPS			CSRS-PPP			MagicGNSS					
		m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z			
NKLG	Kış	Sonuç alınamamıştır.			±0.8	±3.9	±3.5	±0.6	±2.3	±1.8			
	İlkbahar				±1.5	±4.2	±3.7	±0.8	±2.3	±1.8			
	Yaz				±0.6	±4.2	±3.9	±0.4	±2.2	±1.9			
	Sonbahar				±3.4	±4.7	±3.9	±0.5	±2.4	±1.7			
SIN1	Kış				Sonuç alınamamıştır.			±11.2	±2.4	±1.1	Sonuç alınamamıştır.		
	İlkbahar							±11.7	±1.5	±1.1			
	Yaz							±11.8	±1.6	±1.1			
	Sonbahar							±11.9	±2.2	±0.8			

Ekvatorial bölgede bulunan NKLG ve SIN1 istasyonlarına ait 24 saatlik RINEX verilerinin değerlendirilmesinde (Çizelge 5), diğer enlem bölgelerinde bulunan istasyonlardan farklı olarak CSRS-PPP servisinde X koordinat eksen yönünde yaklaşık olarak ±11 cm civarında KOH elde edilmiştir. Koordinat eksenleri yönündeki KOH elde edildikten sonra konum ortalama hataları (m_{3p}) Denklem (8) ile hesaplanmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir.

**Şekil 5.** Mevsimlere göre gruplandırılmış konum ortalama hataları*Figure 5. 3D RMSE grouped by four season*

Konum ortalama hatalarını içeren Şekil 5 değerlendirildiğinde, en kötü sonuçlar yüksek enlem bölgesinde bulunan KIR8 ve NYA2 istasyonlarında elde edilmiş, en iyi sonuçlara ise orta enlem bölgesinde bulunan ANKR istasyonunda ulaşılabilmektedir. Doğruluk açısından ANKR istasyonunu ekvatorial bölgede bulunan NKLG ve orta enlem bölgesinde bulunan DLF1 istasyonları izlemiştir. Ekvatorial bölgede bulunan SIN1 istasyonunda ise sadece CSRS-PPP yazılımı ile sonuçlar elde edilebilmiş ve bunların DLF1 istasyonundaki sonuçlara benzer oldukları görülmüştür. Mevsimsel etkiler dikkate alındığında, tüm

istasyonlarda yaz ve sonbahar mevsimlerinde genel anlamda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Web tabanlı servisler açısından bir karşılaştırma yapıldığında, tüm bölgelerde CSRS-PPP ile sonuç elde edilebilirken, diğer servisler ise bazı bölgelerde sonuç vermemiştir. Genel olarak en iyi sonuçlar MagicGNSS ile elde edilirken bu durum CSRS-PPP tarafından takip edilmiştir. Aynı istasyonlara ait aynı yazılım ve farklı mevsimlerdeki KOH'un istatistiksel olarak birbirleri ile karşılaştırılmasında (9)-(12) denklemlerinden yararlanılarak χ^2 test büyüklükleri hesaplanmış ve Çizelge 6'da verilmiştir. Test büyüklükleri $\chi^2_{k-1,1-\alpha} = \chi^2_{3,0.95}=7.815$ sınır değeri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç alınamayan servisler "-" sembolü ile gösterilmiştir.

Çizelge 6. İstasyonların aynı servis farklı mevsimlerdeki istatistiksel karşılaştırması

Table 6. Statistical comparison of stations in the same service in different seasons

Servis İstasyon	APPS	CSRS-PPP	MagicGNSS
KIR8	-	0.211	0.688
NYA2	-	0.355	-
ANKR	184.661*	153.507*	297.963*
DLF1	0.404	0.034	6.180
NKLG	-	7.798	0.073
SIN1	-	0.255	-

* anlamlı test büyüklüğü

Çizelge 6 incelendiğinde, dört mevsimin daha belirgin yaşandığı orta enlem bölgesinde bulunan ANKR istasyonunda konum ortalama hataları üzerinde mevsimlerin istatistiksel olarak etkili olduğu ancak orta enlem bölgesinde bulunan DLF1 istasyonunun ise yüksek enlem bölgesine yakın seviyelerde olmasından dolayı mevsimlerin konum ortalama hataları arasında istatistiksel olarak bir fark oluşturmadığı görülmektedir. Yüksek enlem ve ekvatorial bölgede bulunan diğer istasyonlarda ise konum ortalama hataları yıl boyunca birbirleri ile istatistiksel olarak uyumludur.

SONUÇ VE TARTIŞMALAR (CONCLUSION and DISCUSSIONS)

PPP tekniği tek bir GNSS alıcısı ile cm mertebesinde nokta konumlamaya imkan veren bir yöntemdir. Gerçekleştirilen çalışmada, mevsimsel etkilerin web tabanlı PPP servisleri ile elde edilen statik PPP koordinatlarının doğruluğunu ne oranda etkilediği araştırılmıştır. Bu amaçla, yüksek enlem bölgesinde bulunan KIR8 ve NYA2, orta enlem bölgesinde bulunan ANKR ve DLF1 ve ekvatorial bölgede bulunan NKLG ve SIN1 istasyonları seçilmiştir. Seçilen istasyonlara ait 01.12.2019-30.11.2020 tarihleri arasındaki 365 gün 24 saat ve 30 saniyelik RINEX verileri temin edilmiştir. Daha sonra tüm veri setleri web tabanlı servislerden CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS kullanılarak değerlendirilmiştir. Seçilen IGS istasyonlarına ait günlük koordinat verileri aylara göre gruplandırılmış ve hassasiyetleri incelenmiştir. Yüksek enlem bölgesindeki KOH karşılaştırıldığında; NYA2 istasyonunda KIR8 istasyonundan daha hassas sonuçların elde edildiğini göstermiştir. Orta enlem bölgesindeki ANKR istasyonda Aralık, Ocak, Şubat ve Mart aylarını kapsayan dönemlerde koordinatlarının tekrar edilebilirlik seviyelerinin düşük olduğu, DLF1 istasyonunun ise yıl bazında tekrar edilebilirliğinin daha iyi olduğu belirlenmiştir. Ekvatorial bölgede ise her iki istasyon için de koordinatların tekrar edilebilirliklerinin iyi seviyede oldukları görülmüştür.

Web tabanlı PPP servislerinden elde edilen koordinatlar mevsimlere göre gruplandırılmış ve bilinen koordinat değerleriyle karşılaştırılarak X, Y ve Z koordinat eksenleri yönündeki karesel ortalama hatalar ve konum ortalama hataları hesaplanmıştır. Kış ve ilkbahar mevsimlerinde elde edilen konum ortalama hatalarının yaz ve sonbahar mevsimlerine göre daha yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür. Farklı enlem bölgelerinde seçilen tüm istasyonlarda da benzer durumun gözlemlenmesi kış ve ilkbahar aylarında toplanan GNSS gözlemlerinin daha sağlıklı olduğunu göstermektedir. Ancak, farklı mevsimlerde elde edilen konum ortalama hatalarının genel olarak birbirine çok yakın değerlerde

seyretmesi mevsimsel etkilerin konum doğruluklarını anlamlı seviyede değiştirmediklerine işaret etmektedir. Bu durumu doğrulamak için aynı istasyonlarda farklı mevsimlerde aynı yazılımlardan elde edilen KOH birbirleriyle istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Web tabanlı yazılımların mevsimsel etkilere ve enlem bölgelerine karşı çözümleme başarıları incelendiğinde, CSRS-PPP üç farklı bölgede ve dört farklı mevsimde de sonuç verirken, diğer yazılımlar bazı durumlarda sonuç verememiştir. Bütün yazılımların sonuç verdiği durumlar incelendiğinde en iyi sonuçları MagicGNSS'in verdiği görülmüştür. Ancak orta enlem bölgesinde istasyona bağlı olarak en iyi sonucu veren web tabanlı servisler değişmektedir.

Bu karşılaştırmalar sonucunda ANKR istasyonu hariç diğer istasyonlarda konum ortalama hatalarının uyum içinde olduğu, konum doğruluklarının mevsimlerden ziyade kullanılan servislere bağlı olduğu ve en iyi sonuçların MagicGNSS ile elde edildiği görülmüştür. Her durumda KOH değerleri ± 16 cm'nin altında kalmaktadır. Mevsimsel etkilerin enlem bölgelerine bağlı olarak sonuçları çok az etkilediği, aynı istasyon noktasında farklı mevsimlerde yapılan ölçüler aynı servisle değerlendirilirse sonuçların genel anlamda istatistik olarak aynı olduğu görülmüştür.

Web tabanlı PPP servislerinin ekonomik olması, verilerin değerlendirilmesi için yazılım satın almaya gerek olmaması, hızlı ve kolay sonuç üretmesi, zaman ve maliyet açısından avantajdır. Sistemin dezavantajı değerlendirme sürecinde anten yüksekliği, istasyon seçimi gibi seçenekler dışında müdahale edilememesi, internet hızına ve veri setinin boyutuna bağlı olarak sonuçların elde edilme sürecinin uzaması ve bölgeye/zamana bağlı olarak çözüm yapamaması olarak söylenebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Gerçekleştirdiğimiz çalışmada, IGS tarafından sağlanan RINEX verileri kullanıldığı için IGS'e, RINEX verilerinin çözümlenmesinde kullanılan web tabanlı yazılımlardan CSRS-PPP için Natural Resources Canada (NRCAN), Geodetic Survey Division'a, MagicGNSS için GMV'ye ve APPS için NASA-Jet Propulsion Laboratory'ye teşekkür ederiz.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (DECLARATION OF CONFLICT INTEREST)

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alçay, S., 2016, "Farklı Gözlem Sürelerinde GPS-PPP ve GPS/GLONASS-PPP Yöntemlerinin Konum Belirleme Performanslarının İncelenmesi", *AKÜ Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 16, Sayı 2, ss. 292-302.
- Alçay, S., 2019, "Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP) Yönteminin Konum Belirleme Performansının Doğruluk ve Hassasiyet Bakımından İncelenmesi", *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 8, Sayı 1, ss. 121- 133.
- Alçay, S., Atiz, Ö. 2021, "Farklı Yazılımlar Kullanılarak Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (RT-PPP) Yönteminin Performansının İncelenmesi", *Geomatik*, Cilt 6, Sayı 1, ss. 77-83.
- Alçay, S., Yiğit, C. Ö., Ceylan, A., 2013, "CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS web tabanlı yazılımların statik PPP modüllerinin karşılaştırılması", *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt 5, Sayı 1, ss. 1- 12.
- Alkan, R.M., Ozulu, İ.M., İlçi, V., 2017, "Klasik GNSS Veri Değerlendirme Yazılımlarına Alternatif Olarak Web-tabanlı Online Değerlendirme Servisleri", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 17, Sayı 2, ss. 603-619.
- Anderle, R. J., 1976, "Point Positioning Concept Using Precise Ephemeris", *Proc. Int. Geodetic Symp. On Satellite Doppler Positioning*, 12-14 October 1976, Las Cruces, New Mexico, ss. 47-75.
- Bahadır, B., Nohutcu, M., 2019, "Galileo Temelli Hassas Nokta Konumlama Yönteminin Performans Değerlendirmesi: Türkiye Örneği", *Harita Dergisi*, Cilt 85, Sayı 162, ss. 1-11.

- Cai, C., Gao, Y., 2013, "GLONASS-Based Precise Point Positioning and Performance Analysis", *Advances in Space Research*, Cilt 51, Sayı 3, ss. 514-524.
- Choy S, Zhang S, Lahaye, F., Héroux, P., 2013, "A Comparison Between GPS-only and Combined GPS+GLONASS Precise Point Positioning", *Journal of Spatial Science*, Cilt 58, Sayı 2, ss. 169-190.
- Dawidowicz, K., Krzan, G., 2014, "Coordinate Estimation Accuracy of Static Precise Point Positioning Using on-line PPP Service, a Case Study", *Acta Geod Geophys*, Cilt 49, ss. 37-55.
- Ebner, R., 2008, *Validation and application of free-online and commercial post-processing PPP packages*, Graz University of Technology, Institute of Navigation and Satellite Geodesy, Doktora Tezi, Graz.
- Erdoğan, B., Karlıtepe, F., Öcalan, T., 2017, "GPS Kinematik PPP'nin Gerçek Zamanlı PPP (RT-PPP) Çözümleri ile Karşılaştırılması Üzerine Bir Çalışma", 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 3 - 6 May 2017, Ankara.
- Erol, T., 2021, "Web tabanlı CSRS-PPP uygulamasının farklı uydu sistemleri üzerindeki performansı", *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, Cilt 8, Sayı 1, ss. 41-56.
- Gelişkan, Ş., İnal, C., Bülbül, S., 2018, "The Comparison of Accuracies of Results Obtained from Bernese v5.2 Software and Web-Based PPP Services", *Presented at the FIG International Congress 2018*, İstanbul.
- Kahveci, M., Yıldız, F., 2017, *Global Konum Belirleme Sistemleri Teori-Uygulama*, Nobel Yayın Dağıtım, 8. Baskı, Ankara, 1-3.
- Kouba, J., Héroux, P., 2001, "Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products", *GPS Solutions*, Cilt 5, ss. 12-28.
- Lim, T. S., Loh, W. Y., 1996, "A Comparison of Tests of Equality of Variances", *Computational Statistics and Data Analysis*, Cilt 22, ss. 287-301.
- Ott, L., 1998, *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis*, Third Edition, PWS-Kent Publishing Company.
- Özdemir, E. G., Güllal, V. E., 2019, "İnternet Tabanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (PPP) Yazılımlarının İrdelenmesi ve Belirsizlik Analizi" *Presented at the 17. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı (THBTK)*, 25 - 27 Nisan 2017, Ankara.
- Pan, L., Cai, C., Santerre, R., Zhu, J., 2014, "Combined GPS/GLONASS Precise Point Positioning with Fixed GPS Ambiguities", *Sensors*, Cilt 14, ss. 17530-17547.
- Soycan, M., 2012, "A Quality Evaluation of Precise Point Positioning within the Bernese GPS Software Version 5.0", *Arab J Sci Eng.*, Cilt 37, ss. 147-162.
- Uçarlı, A. C., Demir, F., Erol, S., Alkan, R. M., 2021, "Farklı GNSS Uydu Sistemlerinin Hassas Nokta Konumlama (PPP) Tekniğinin Performansına Etkisinin İncelenmesi" *Geomatik*, Cilt 6, Sayı 3, ss. 247-258.
- Xu, C., Wang, J., Gao, J., Wang, J., Hu, H., 2011, "Precise Point Positioning and its application in mining deformation monitoring", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Cilt 21, ss. 499-505.
- Yigit, C.Ö., Kızıllarslan, M., Çalışkan, E., 2016, "GPS-PPP ve GPS/GLONASS-PPP Yöntemlerinin Konum Belirleme Performanslarının Ölçü Süresine Bağlı Olarak Değerlendirilmesi", *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt 8, Sayı 1, ss. 22-39.
- Zar, J. H., 1999, *Biostatistical Analysis*, New Jersey: Prentice Hall Inc. Simon and Schuster, A Viacom Company.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins M. M., Webb, F. H., 1997, "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Cilt 102, ss. 5005-5017.



KETENCİK [*Camelina sativa* (L.) Crantz] YAĞI BİYODİZELİNİN ve KARIŞIM YAKITLARININ FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

¹Tanzer ERYILMAZ , ²Seda ŞAHİN , ³Murat ERTUĞRUL , ⁴Sadiye Ayşe ÇELİK

¹Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Yozgat, TÜRKİYE

²Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

³Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Yozgat, TÜRKİYE

⁴Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Konya, TÜRKİYE

¹tanzer.eryilmaz@bozok.edu.tr, ²sedabacak@selcuk.edu.tr, ³murat.ertugrul@bozok.edu.tr,

⁴sacelik@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 11.10.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 23.02.2022)

ÖZ: Son yıllarda, bitkisel yağların biyoyakıt kaynağı olarak biyodizel üretimi için kullanılması, yağlı tohumlu bitkilerin önemini artmasını sağlamıştır. Biyodizel üretiminde kullanılabilecek potansiyel bitkilerden birisi de ketenciktir [*Camelina sativa* (L.) Crantz]. Brassicacea familyası içerisinde yer alan tek yıllık bir bitki olan ketencik, yaygın olarak bilinen 6 *Camelina* türünden (*C. sativa*, *C. laxa*, *C. rumelica*, *C. microcarpa*, *C. hispida* ve *C. anomala*) biridir. Bu çalışmada, ketencik tohumlarından vidalı pres vasıtasıyla ketencik ham yağı elde edilmiş ve bu yağın yağ asidi bileşenleri incelenmiştir. Biyodizel üretimi, ketencik ham yağından, transesterifikasyon yöntemi ile iki aşamalı olarak (B100) gerçekleştirilerek, ketencik biyodizeli hacimce farklı oranlarda %20 (B20), %7 (B7) ve %2 (B2) dizel yakıtı ile harmanlanmıştır. Bu yakıtların, fizikokimyasal özellikleri; (kinematik viskozite, yoğunluk, su içeriği, kalorifik değer, parlama noktası, bulutlanma noktası, soğuk filtre tıkanma noktası, bakır şerit korozyonu, renk) B100 saf biyodizel yakıtı için EN 14214, B20 yakıtı için EN 16709, B7 ve B2 yakıtları için ise EN 590 standartlarına göre karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, ketencik biyodizeli (B100) ve karışım yakıtlar (B20, B7 ve B2) dizel motorlarda modifiye edilmeden kullanılabilecek yakıt özelliklerine sahip olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Ketencik, Tohum yağı, Yağ asidi, Biyodizel, Karışım yakıt

Investigation of the Physicochemical Properties of Camelina [*Camelina sativa* (L.) Crantz] oil Biodiesel and its Fuel Blends

ABSTRACT: In recent years, the use of vegetable oils in biodiesel production has led to an increase in the importance of oilseed plants. Camelina [*Camelina sativa* (L.) Crantz] is one of the potential plants that can be used in biodiesel production. Camelina is an annual plant in the Brassicacea family and one of the 6 widely known *Camelina* species (*C. sativa*, *C. laxa*, *C. rumelica*, *C. microcarpa*, *C. Hispida*, and *C. anomala*). In this study, camelina crude oil was obtained from camelina seeds with the help of a screw press and the fatty acid components of this oil were investigated. Biodiesel production (B100) was carried out from camelina crude oil in two stages by transesterification method, and camelina biodiesel was blended with diesel fuel of 20% (B20), 7% (B7) and 2% (B2) at different volumes. The physicochemical properties of these fuels including; (kinematic viscosity, density, water content, calorific value, flash point, cloud point, cold filter plugging point, copper strip corrosion, color) were determined and compared to EN 14214 for B100 pure biodiesel fuel, EN 16709 for B20 fuel, and EN 590 for B7 and B2

fuels. According to the results obtained, it can be said that camelina biodiesel (B100) and blended fuels (B20, B7 and B2) have fuel properties that can be used in diesel engines without being modified.

Keywords: *Camelina, Seed oil, Fatty acid, Biodiesel, Fuel blends*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada, nüfus artışıyla birlikte enerjiye olan talebinde artması, fosil kökenli yakıtlara ait rezervlerinde azalıyor olması ve fosil kökenli yakıtların yanması sonucu atmosferde karbondioksit seviyesinin artışına etki ederek birçok çevresel etkilere sebep olması gibi nedenlerle, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili araştırmalara yönelim artmıştır.

Alternatif enerji kaynaklarının hem yenilenebilir hem de çevreci olması, ayrıca her ülkenin kendi iklim koşullarına bağlı olarak kendi enerjisini sağlayabiliyor olması, Türkiye gibi birçok ülkenin enerjide dışa bağımlılığını azaltmak için çok büyük bir fırsat sunmaktadır (Bilgili ve diğ., 2019).

Tüm dünyada yaygınlaşmaya devam eden ve kullanımı giderek artan biyodizel, Üçüncü Milenyumun Yakıtı olarak bilinmektedir. Şu anki durumda Avrupa ve Amerika'da ticari olarak biyodizel üretimi yapılmakta ve satılmaktadır. Almanya, Avusturya, İtalya ve Fransa Avrupa'nın bu alandaki aktif ülkelerdir. Biyodizelin yaygınlaşmamasındaki en önemli etkenler, hammaddenin temin edilememesi ve hammadde maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Biyodizelin petrol kökenli dizel yakıt ile rekabet edebilmesi için öncelikle, biyodizel hammaddesinin düşük maliyetle elde edilmesi gerekmektedir (Öğüt ve Oğuz, 2006; Oğuz ve diğ., 2012).

Brassicacea familyasında yer alan ve genel olarak bilinen 6 *Camelina* türünden (*C. sativa*, *C. laxa*, *C. rumelica*, *C. microcarpa*, *C. hispida* ve *C. anomala*) biri olan ketencik [*Camelina sativa* (L.) Crantz] tek yıllık bir bitkidir. Ketencik; Türklerde M.S. 1000 yıllarında "Mayıl ve Mayec" ismiyle anılmış, son zamanlarda ise "yalancı keten", "Alman susamı", "Sibirya yağlı tohumu" gibi farklı isimlerle de adlandırılmaktadır (Kurt ve Seyis, 2008; Koç ve Önder, 2012; Yılmaz ve diğ., 2014).

Son yıllarda, ABD'nin Montana eyaletinde ketencik biyoyakıt ve biyo-yağlayıcılık için, üretimi yapılmaktadır. Hammadde olarak ketencik kullanılan bir biyoyakıt, ilk defa 30 Ocak 2009 yılında Japon hava yolları tarafından uçak yakıtı olarak kullanılmıştır. Yarım saatlik bir deneme uçuşunda kullanılan yakıtın %50'si geleneksel Jet-A (Kerosene) uçak yakıtı, %50'si ise biyoyakıttır. Kullanılan biyoyakıtın içerisindeki ketencik yağının oranı %84, jatropha yağı %16'dan az ve alg yağı oranı %1'den azdır (Koç ve Önder, 2012).

Yıldız ve Özçelik (2021) çalışmalarında, ham *Camelina sativa* yağından biyodizel elde etmek için transesterifikasyon yöntemi kullanmışlardır. *Camelina sativa* biyodizelini %7 (B7), %20 (B20) ve %50 (B50) oranlarında Eurodizel ile harmanlamışlardır. Dört zamanlı, dört silindirli, Common-rail yakıt sistemli, turboşarjlı ve su soğutmalı motora sahip bir araçta şasi dinamometresi kullanarak araç performans ölçümlerini yapmışlardır. Araç şasi dinamometre testi ile, farklı hızlarda araç performansı ve egzoz emisyonlarını ölçmüşlerdir. En yüksek moment değeri B7 yakıtında 80 km/h ile elde edilirken, maksimum motor gücü B7 yakıtında 160 km/h ile elde ettiklerini bildirmişlerdir. B100 yakıtının ortalama motor gücü ve maksimum motor torkunun eurodizel yakıtına kıyasla %3,28 ve %10,21 azaldığını belirtmişlerdir. Karışımların içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla, özgül yakıt tüketimi değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Egzoz emisyon ölçümlerinin sonuçlarına bakıldığında, *Camelina sativa* biyodizeli ve yakıt karışımının Eurodizel yakıtına göre CO, CO₂ ve HC değerlerini azalttığını ancak NO_x değerlerini arttırdığını bildirmişlerdir.

Yılancılar (2020) çalışmasında, ketencik tohumu yağından transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretmiş ve bazı yakıt özelliklerini ölçerek Avrupa Birliği (EN 14214) ve Amerika (ASTM D6751) biyodizel standartları ile karşılaştırmıştır. Ayrıca ketencik yağı metil esterine farklı oranlarda yüksek karbonlu alkol (pentanol) ilavesinin dizel motor performansı ve is emisyonu oluşumu üzerindeki etkisini incelemiştir. Motor deneylerini, dizel (D100), biyodizel yakıtı (B100), %10 pentanol katkılı biyodizel yakıtı (B90P10) ve %20 pentanol katkılı biyodizel yakıtı (B80P20) olmak üzere dört farklı yakıt ile tam yük değişken devirde gerçekleştirmiştir. Biyodizel yakıtına pentanol ilavesi ile motor

performansında iyileşme belirlenirken, pentanol oranının artmasıyla performans değerlerinde düşüş olduğunu belirtmiştir. Pentanolün oksijen içeriğinin yüksek olması is emisyonlarını düşürmede bir miktar etkili olduğu da belirtmiştir.

Yang (2016) çalışmasında, asit sayısı, kinematik viskozite, parlama noktası, toplam gliserol içeriği, kükürt içeriği ve mono-, di- ve trigliseritler dâhil olmak üzere, elde edilen ketencik biyodizelinin yakıt özelliklerinin çoğunun ASTM D6751 ve EN 14214'teki standartları ile iyi bir uyum içinde olduğunu bildirmiştir. Setan sayısı değerinin (49.7) ASTM D6751'e göre uygun olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, ketencik biyodizelinin yüksek oranda çoklu doymamış yağ asidi metil esterlerinden kaynaklanan zayıf oksidasyon stabilitesi gösterdiğini tespit etmiştir.

Ketencik tohumlarında bulunan yağ miktarı %25-45 arasındadır. Ketencik yağının %57'si çoklu doymamış yağ asitleri (Omega-3 ve Omega-6) olmak üzere, %90'ı doymamış yağ asitlerinden oluşmaktadır. Ketencik yağının, %2-6 oranında toksik bir yağ asidi olan erusik içermesi sebebiyle insan beslenmesinde yemeklik yağ olarak kullanımını kısıtlamaktadır. Toprak istekleri açısından çok seçici olmamakla birlikte, tuzluluğa ve kuraklığa dayanıklı olması yönüyle de birçok yağlı tohumlu bitkilere göre toleransı daha fazladır. Yazlık ekilen bir bitki olsa bile, kışın karla kaplı olmadığı durumlarda -10/-14°C'ye kadar dayanabilmektedir (Yılmaz ve diğ., 2014).

Genel olarak bitki boyu 25-100 cm arasında değişmektedir. Bitki dallanması tek gövde şeklinde olmaktadır (Koç ve Önder, 2012).

Ketencik bitkisi makineli hasada elverişli bir bitkidir. Son zamanlarda geliştirilen yeni çeşitler tohum dökmeye daha dayanıklıdır. Çeşide, çevre ve iklim koşullarına, yetiştirme tekniklerine göre farklılık göstermekle birlikte, yazlık ekimlerde 150-300 kg da⁻¹, kışık ekimlerde 300-400 kg da⁻¹ civarında verim alınmaktadır (Kurt ve Seyis, 2008; Koç ve Önder, 2012).

Hasatta tohumdaki nem içeriği %11'i geçmemelidir. Güvenli depolama için, hasat sonrası kurutma gereklidir. Depolama nemi %8'in altında olmalıdır (Zubr, 1997).

Ketencik tohumlarından yağ elde etmek için, presleme sırasındaki sıcaklık yaklaşık 100°C'ye kadar çıkabilmektedir. Presleme ile elde edilen ketencik yağı karakteristik bir tada ve sarı renge sahiptir. İnsan tüketimi için ve kozmetikte uygulamadan önce yağın koku giderme yoluyla iyileştirilmesi gerekmektedir (Zubr, 1992). Koku gidermeden, nötralizasyon, zambak giderme, ağartma vb. gerekli değildir ve yağın kalitesi üzerinde olumsuz etkileri vardır. Yağın basit rafine edilmesi enerji ve masraf tasarrufunun yanında, kirli su, kirli ağartma toprağı vb. atık yan ürünleri de önlemektedir.

Tohumların preste yağı alındıktan sonra geriye kalan yan ürün küspe, önemli bir ekonomik değere sahiptir. Ketencik küspesi yaklaşık %10 yağ, %45 ham protein, %13 lif, %5 mineral ve minör vitaminlerden oluşmaktadır (Zubr, 1993).

Ketencik yağı; kozmetik sanayiinde, deterjan ve sabun yapımında, tokoferollerin elde edilmesinde, balık yağı yerine ve hayvan besleme rasyonlarında kullanılmaktadır (Yılmaz ve diğ., 2014).

Ketencik yağı, vejetasyon süresinin kısa olması sebebiyle üretici için üretim çeşitlendirilmesindeki getirisinin yüksek olması, münavebe sisteminde yer alıyor olması, yabancı ot rekabetinde başarılı olması, toprak isteklerinin fazla olmaması nedenleriyle, yağ bitkileri içerisinde önemli bir güce sahip olup enerji yakıtı (biyojet) olarak kullanılmasındaki önemini artırmaktadır (Göre ve Kurt, 2017).

Motorinde %32 olan yağ film oluşturma başarısı, motorine %1 oranında biyodizel karıştırılarak %65'e, karışım oranının %20'ye çıkarılmasıyla ise %93'lere ulaşmaktadır (Öğüt, 2005). Avrupa'da biyodizelin dizel yakıtla karışım oranı genellikle en fazla %7'dir. Ancak karışım yüzdelerinin daha yüksek olduğu bölgeler de bulunmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya ve Endonezya gibi ülkelerde ise karışım oranları %20'ye kadar kullanılmaktadır (Sirviö ve diğ., 2018).

Kalitesi yüksek olan, yemeklik olarak kullanılabilen bitkisel yağların biyodizel için hammadde olarak kullanılması, biyodizelin maliyetinin motorinden daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Biyodizel üretiminde mümkün olduğunca gıda niteliği taşımayan yerel kaynaklardan elde edilen yağların kullanılması, verimliliğin artırılması, ürün çeşitliliği ve sürdürülebilirlik önem arz etmektedir. Bu nedenlerden dolayı çalışmada, biyodizel hammaddesi olarak ketencik ham yağı seçilmiştir.

Tohum ve yağ verimi, yağ asidi kompozisyonu ve yağın yakıtla ilişkili özellikleri, çeşit ve çevre koşullarından etkilenen özelliklerdir (Eryılmaz ve diğ. 2014a). Çalışmalarda, daha önce Yozgat ekolojik şartlarında yetiştirilen ketencik tohum yağlarından üretilen biyodizel çalışmalarına rastlanmamıştır.

Çalışmanın amacı, ketencik ham yağından transesterifikasyon yöntemiyle 2 aşamalı olarak biyodizel üretimi gerçekleştirilerek, ketencik yağı biyodizelinin (B100) ve karışım yakıtların hacimce, B20 (%20 ketencik biyodizel+%80 motorin), B7 (%7 ketencik biyodizel+%93 motorin) ve B2 (%2 ketencik biyodizel+%98 motorin), fizikokimyasal özelliklerinin analiz sonuçlarının incelenmesidir. B100 yakıtı için EN 14214 standardına, B20 Yakıtı için EN 16709'a ve B7, B2 yakıtları için ise EN 590 standardına uygunluğu araştırılmıştır.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Araştırmada kullanılan ketencik tohumları (Şekil 1), Gövdecili/Yozgat köyünde bulunan Oğuzhan Çiftliğinden temin edilmiştir. Metil alkol (CH_3OH) ve katalizör olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak biyodizel sentezlenmiştir.



Şekil 1. Ketencik [*Camelina sativa* (L.) Crantz] tohumları

Figure 1. *Camelina* [*Camelina sativa* (L.) Crantz] seeds

Ketencik Tohumundan Vidalı Pres Yardımıyla Ham Yağ Elde Edilmesi (Obtaining the Crude Oil from Camelina Seeds via Screw Press)

Ketencik tohum yağı, Oğuzhan çiftliğinde bulunan 3.5 kW elektrik motoruna sahip, 12 mm küspe çıkış ağzı bulunan, Amerika menşeli KERN&KRAFT markalı bir vidalı pres kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 2).

Biyodizel Üretimi (Biodiesel Production)

Çalışmada kullanılan ketencik yağı biyodizelinin bazı yakıt özellikleri; kinematik viskozite, yoğunluk, kalorifik değer, su içeriği, parlama noktası, renk, bulutlanma noktası, soğuk filtre tıkanma noktası, akma noktası, bakır şerit korozyonu, çizelge 1'de verilen cihaz ve çalışma yöntemlerine göre belirlenmiştir.



Şekil 2. Ketencik tohumlarından vidalı preste yağ elde edilmesi

Figure 2. Extraction of oil from camelina seeds via screw press

Çizelge 1. Test cihazlarının özellikleri

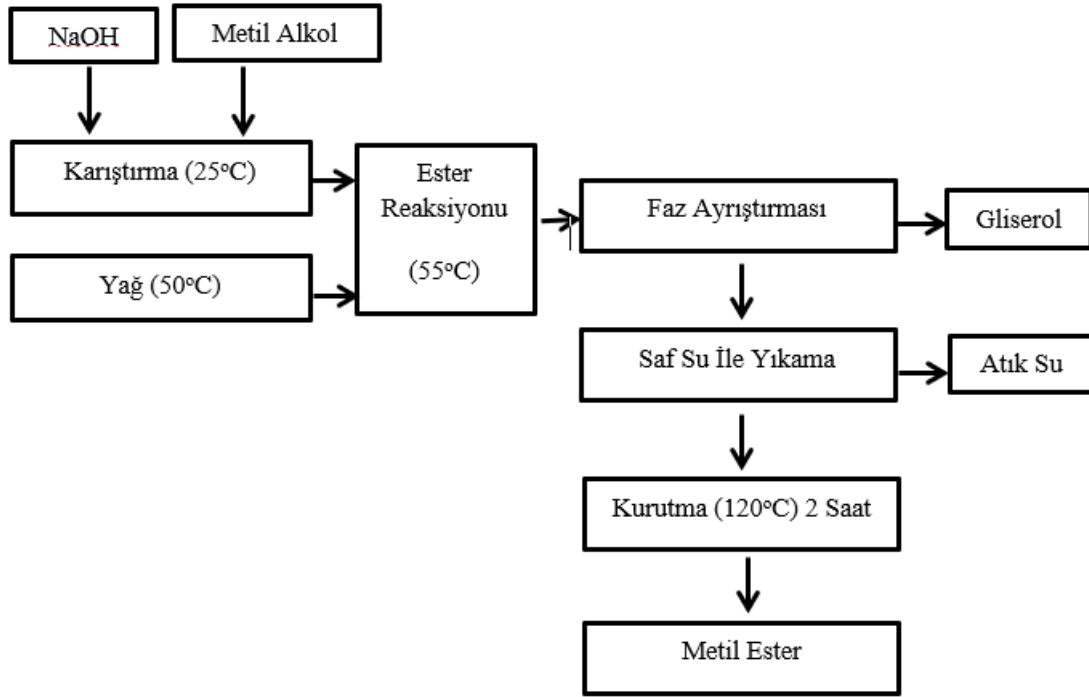
Table 1. Properties of test devices

Yakıt Özelliği	Cihazlar	Ölçülebilir aralık	Birim	Ölçüm doğruluğu	Üretici	Standart
Yoğunluk	Kem Kyoto DA-130N	0.0000 - 2.0000	g cm ⁻³	±0.0001	Kem Kyoto Elektronik, Japonya	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Kinematik viskozite	Koehler K23377	Ortam sıcaklığı - 150	°C	±0.01	Koehler Instrument Company, US	EN ISO 3104
Parlama noktası	Koehler K16270	Ortam sıcaklığı- 370	°C	±0.01	Koehler Instrument Company, USA	EN ISO 2719 EN ISO 3679
Su içeriği	Kem Kyoto MKC-501	10µg- 100mg	µg	±0.01	Kem Kyoto Elektronik, Japonya	EN ISO 12937
Kalorimetre	IKA C 200	0-40.000	J	±0.0001	IKA, UK	DIN 51900
Soğuk filtre tıkanma noktası	Tanaka AFP-102	-60 °C'ye kadar soğutucu ile	°C	±0.01	Tanaka Scientific Limited, Japonya	ASTM D6379
Bulutlanma ve akma noktaları	Koehler K46000	-80 ila (+20)	°C	±0.01	Koehler Instrument Company, USA	ASTM D97 ASTM D2500
Bakır şerit korozyon	Koehler K 25330	0-190	°C	±0.01	Koehler Instrument Company, USA	EN ISO 2160
Renk tayini	Lovibond PFX195	0.5 - 8	birim	±0.0004	Lovibond, Germany	ASTM D1500

Ketencik [*Camelina sativa* (L.) Crantz] tohumları ham yağından biyodizel üretimi transesterifikasyon yöntemiyle, sıcaklık ayarlı, problu ısıtıcılı manyetik karıştırıcı ile Şekil 3'te verilen

akış diyagramına göre iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Oğuz ve diğ. (2015) çalışmalarında, kolza tohum yağından tek ve iki aşamalı olarak ürettikleri biyodizellerin; yoğunluk, kinematik viskozite, parlama noktası, bulutlanma ve akma noktaları, donma noktası, soğuk filtre tıkanma noktası, bakır şerit korozyon, kalorifik değer ve su muhtevalarını analiz ederek karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yaptıkları karşılaştırma sonucunda iki aşamalı üretimi yapılan kolza biyodizelinin yoğunluk, kinematik viskozite, parlama noktası, kalorifik değer, su içeriği yakıt özelliklerinin tek aşamalı üretimden elde edilen analiz sonuçlarına göre daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Ketencik tohumu ham yağı biyodizel üretilmeden önce filtre edilerek içerisindeki yabancı maddeler giderilmiştir. Alkol olarak metanol (CH_3OH) ve katalizör olarak NaOH kullanılmıştır.



Şekil 3. Biyodizel üretim süreci akış diyagramı

Figure 3. Process flow diagram for biodiesel production

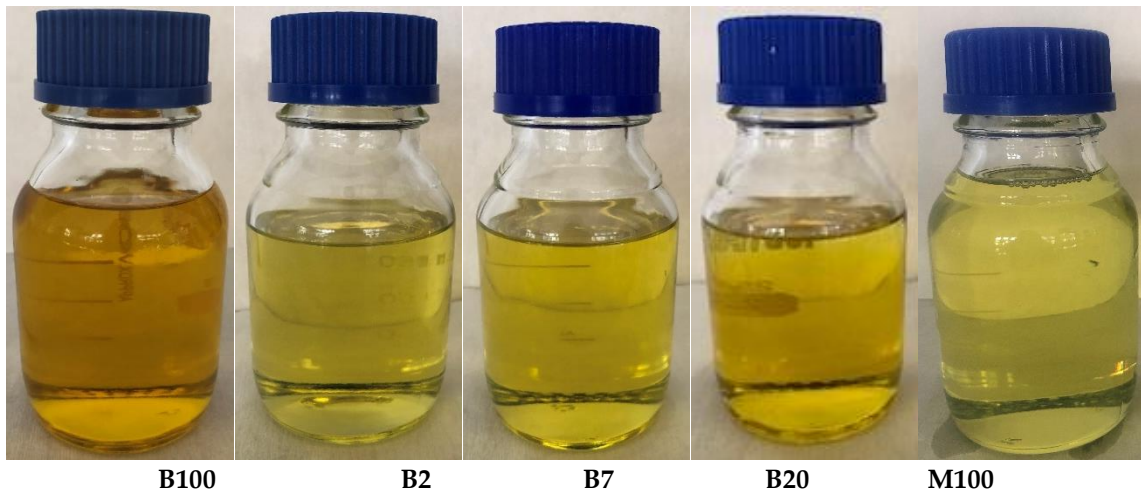
İki aşamada gerçekleştirilen reaksiyon için toplamda ham yağın %20'si (200 mL) oranında metil alkol (CH_3OH) (Merck, $d=0.791-0.792$ kg/l) ve her bir litre yağ için 3,5g NaOH'ın (Merck) kullanılmıştır. Birinci reaksiyonda, 1000 mL ketencik ham yağından üretilen biyodizel için, toplamda kullanılacak olan metil alkolün (CH_3OH) %75'i olan 150 mL metil alkol ve toplamda kullanılacak olan katalizörün (Merck) %50'si (1.75g) NaOH manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırılarak metoksit elde edilmiştir. Ketencik ham yağı 55°C 'ye ısıtılmış ve üzerine metoksit ilave edilmiştir. Karıştırıcı devri 1000 d.d⁻¹ ayarlanmış ve 90 dakika boyunca karıştırılmıştır. Manyetik karıştırıcı ve ısıtıcı kapatılarak, yağın içerisindeki gliserolün çökmesi için 2 saat beklenmiş ve gliserol ayrıştırılmıştır. Daha sonra ikinci aşamaya geçilmiştir.

İkinci reaksiyonda, kalan %25 (50mL) metil alkol (CH_3OH) ve %50 (1.75g) NaOH manyetik karıştırıcıda çözülmesi sağlanarak metoksit elde edilmiştir. Birinci reaksiyonu tamamlanan Ketencik biyodizeli ısıtıcı manyetik karıştırıcıda tekrar 55°C 'ye ısıtılmış, karıştırma devam ederken üzerine metoksit ilave edilmiş ve sıcaklık sabit tutularak 60 dakika boyunca karıştırılmıştır. Sonra karıştırıcı ve ısıtıcı kapatılmıştır. Tekrar gliserolün çökmesi için 2 saat dinlendirilmiş ve çöken gliserol ayrıştırılmıştır. Ketencik ham biyodizelinin sıcaklığı 75°C 'ye kadar yükseltilmiş ve ham biyodizel içerisinde kalan metil alkol (CH_3OH) alınmıştır. Ketencik yağı ham biyodizeli içerisinde kalan gliserolün çökmesi için 15 saat beklenmiş ve gliserol alınmıştır. Daha sonra ketencik yağı biyodizelinin pH değerine ölçülmüş, reaksiyon bazik karakterli olduğu için, nötr duruma gelene kadar mistleme (pülverize şeklinde

püskürterek) yöntemi ile saf su kullanılarak yıkamaya tabi tutulmuştur (Eryılmaz ve diğ., 2014b; Cesur ve diğ., 2021).

Yıkama yapmanın amacı; elde edilen biyodizelin içinde reaksiyona girmeyen alkol, kalan yağ asitleri, Na⁺, K⁺ iyonları, katalizör madde ve ayrışma sırasında içerisinde kalma olasılığı olan gliserolün uzaklaştırılmasıdır (Eryılmaz, 2009). Yıkama aşamasında biyodizel sıcaklığı 50°C ve yıkama için kullanılan saf suyun sıcaklığı da 50°C olmak üzere biyodizelin pH'sı nötr duruma gelene kadar mistleme yöntemi ile saf su kullanılarak yıkanmıştır. Yıkama işleminin tamamlanmasından sonra suyun çökmesi için 12 saat beklenmiş ve çöken atık su ayrıştırılmıştır. Çöken suyu alınan ham biyodizel, problu ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 120°C'de 120 dakika kurutma işlemine tabi tutularak, bünyesindeki suyun uzaklaştırılması sağlanmıştır. Böylece Ketencik [*Camelina sativa* (L.) Crantz] yağı biyodizeli üretimi gerçekleştirilmiştir (Özgün ve Eryılmaz 2018; Cesur ve diğ., 2021). Daha sonra ise karışım yakıtları hazırlanmıştır. B2 yakıt numunesi, hacimce %2 ketencik biyodizel ve %98 dizel karışımından, B7 yakıt numunesi, hacimce %7 ketencik biyodizel ve %93 dizel karışımından ve B20 yakıt numunesi ise, hacimce %20 ketencik biyodizel ve %80 dizel karışımından oluşmaktadır. Dizel yakıtlarda kükürt, motorda yağlayıcılık özelliğini artırmaktadır. Dizel yakıtta kükürt oranı 10ppm'in (2-7ppm) altına çekildiğinden, motorda yağlayıcılık özelliğini artırmak için B2 ve B7 yakıtları kullanılmaktadır. Düşük oranlarda biyodizel kullanımı motorun ömrünü azaltmamaktadır (Schumacher ve diğ. 2003). B20 yakıtı ise egzoz emisyonlarında CO₂ oranını %80'lere varan oranlarda azaltmaktadır. Türkiye'de de kullanımı geçerli olan EN590 Dizel Standardı'na göre Avrupa'da kullanılan dizel yakıtlar hacimce %7'ye kadar biyodizel içerebilmektedir. Bununla birlikte dünyada biyodizel içeriği hacimce %20 olan yakıtlar ulaşımda kullanılmaktadır (Tüpraş, 2022). Bu özelliklerden dolayı, ketencik biyodizelinin dizel yakıtı ile hacimce %2 (B2), %7 (B7) ve %20 (B20) oranlarda harmanlanmıştır.

Şekil 4'te üretimi yapılan; ketencik biyodizeli (B100) ve B2, B7, B20 karışım yakıtları ile referans yakıt olarak motorin (M100) görülmektedir.



Şekil 4. Yakıtlar
Figure 4. Fuels

Yağ Asidi Bileşenleri Tayini (Determination of Fatty Acid Components)

Ketencik yağı ve biyodizeli öncelikle metilleme işlemine tabi tutularak yağ asitleri elde edilmiştir. Metilleme işlemi Avrupa Farmakopesinde belirtilen yöntemle yapılmıştır. Metilleme işlemi sonrasında ketencik yağı ve biyodizeli yağ asidi bileşenleri, GC-MS (Gaz Kromatografi- Kütle Spektroskopisi) cihazı ile tespit edilmiştir.

Öncelikle tartılan 450 mg (0.45 gr) yağ numunesi 50 mL'lik balon jöjeye alınır. Daha sonra 12 mL 0.5 N metanollü NaOH üzerine ilave edilir. Su banyosunda (yaklaşık 80°C sıcaklıkta) yağ damlacıkları

çözeltiyeye karıştıncaya kadar çalkalanarak karanlık ortamda bekletilir. Sabunlaşma oluşunca karışım su banyosundan alınır. Üzerine 20 mL BF₃/MeOH ilave edilir ve bunzen bekinde kaynatılır. Kaynama başlayınca karışım bunzen bek alevinden alınır. Soğuduktan sonra doymuş NaCl çözeltisi ile balon jolenin 50 mL çizgisine kadar tamamlanır. Bu esnada üst kısımda biriken yağ damlacıklarını almak için 1 mL hekzan ilave edilir, kapağı kapatılan balon joje 10-15 kez ters düz edilir. Faz ayrımı gerçekleştirildikten sonra en üst kısım alınarak vialye aktarılır ve GC-MS'e okutulmak üzere verilir.

Çizelge 2. Kromatografik şartlar (European Pharmacopoeia Sixth Edition, 2007)

Table 2. Chromatographic conditions

Gaz Kromatografisi Kütle Spektrometresi	
Cihaz	Agilent 6890N Network GC system combined with Agilent 5973 Network Mass Selective Detector (GC-MS)
Kolon	Agilent 19091N-136 (HP Innovax Capillary; 60.0 m x 0.25 mm x 0.25 m)
Taşıyıcı Gaz	Helyum
Akış Hızı	1.2 mL min ⁻¹
Enjeksiyon Hacmi	1 µl
Split Oranı	30:1
Enjektör Sıcaklığı	250°C

Çizelge 3. Sıcaklık programı (Orhan ve diğ., 2013)

Table 3. Temperature program

Sıcaklık (°C)	Artış Oranı (°C/dak)	Tutulma Zamanı (dak)	Total Zaman (dak)
60	----	1.0	1.0
185	10	1.0	14.5
200	5	10.00	27.5
220	5	20	51.5

BULGULAR (RESULTS)

Yakın gelecekte, karayolu ve deniz taşımacılığında, ev ısıtmasında, tarımsal faaliyetler gibi alanlarda sera gazı emisyonlarının azaltılması uygulamalarına daha fazla önem verilmelidir. Günümüzde termik motorlar ham petrol türevi yakıtlar için tasarlanmakta ve yenilenebilir enerji kullanımının gereksinimlerini karşılamak için sıvı yenilenebilir yakıtlar ham petrol türevi yakıtlarla harmanlanmaktadır. Bir yandan çevresel nedenler, bir yandan da yakıt standartlarına uygunluk, diğer bir taraftan da tarımsal ihtiyaçlar nedeniyle, biyodizel ve dizel yakıtların farklı karışım oranları giderek daha önem kazanmaktadır.

Ketencik yağı ve biyodizeline ait yağ asitleri kompozisyonu Çizelge 4'te görülmektedir. Ketencik yağının ve biyodizelinin yağ asidi bileşenleri birbirine yakın oranlarda belirlenmiştir. Her ikisinde de doymuş yağ asitlerinden en yüksek palmitik asit ve stearik asit tespit edilmiş olup sırasıyla yağda %5.85 ve %2.59; biyodizelde ise %5.78 ve %2.62 olarak belirlenmiştir. Doymamış yağ asitlerinden ise en yüksek linolenik asit belirlenmiş ve yağda %42.27 ve biyodizelde %42.60 olarak bulunmuştur. Erusik asit oranı yüksek olan yağlar, yemeklik olarak tercih edilmezken sanayide kullanılabilir. Bu durum göz önüne alındığında erusik asit değerleri incelendiğinde ise ketencik yağında %0.66, ketencik biyodizeline ise %0.71 oranında belirlenmiştir. Çizelge 5'te doymuş yağ asitleri, Çizelge 6'da doymamış yağ asitleri ayrı olarak verilmiştir. Toplamda doymuş yağ asitlerinin miktarı ketencik yağında %10.03; ketencik biyodizeline %9.96'dır. Toplamda doymamış yağ asitlerinin miktarı ketencik yağında %89.95; ketencik biyodizeline %89.85'dir.

Çizelge 4. Ketencik yağı ve biyodizeli yağ asidi bileşenleri (%)*Table 4. Fatty acid components of Camelina oil and biodiesel (%)*

Yağ Asidi Bileşenleri (%)	Ketencik yağı	Ketencik biyodizeli
Miristik Asit (C14:0)	0.05	0.046
Palmitik Asit (C16:0)	5.85	5.78
Palmitoleik Asit (C16:1)	0.10	0.091
Heptadekanoik /Margarik Asit (C17:0)	0.02	0.03
Heptadesanoik/Margoleik Asit (C17:1)	0.02	0.018
Stearik Asit (C18:0)	2.59	2.62
Oleik Asit (C18:1)	21.93	21.63
Linoleik Asit (C18:2)	21.23	21.12
Linolenik Asit (C18:3)	42.27	42.60
Araşidik Asit (C 20:0)	1.28	1.26
Cis-11,14-Eikosadienoik Asit (C20:2)	1.22	1.24
Cis-8,11,14-Eikosadienoik Asit (C20:3)	2.01	2.13
Cis-5,8,11,14,17-Eikosadienoik Asit (C20:5)	0.27	0.07
Behenik Asit (22:0)	0.24	0.23
Erusik Asit(C22:1)	0.66	0.71
Cis-13,16-docosadienoik Asit (C22:2)	0.09	0.105
Nervonik Asit (C24:1)	0.15	0.14
TOPLAM	99.98	99.82

Çizelge 5. Ketencik yağı ve biyodizelinin doymuş yağ asitlerinin gruplandırması (%)*Table 5. Classification of saturated fatty acids of camelina oil and biodiesel (%)*

Doymuş Yağ Asitleri		
Numune Adı	Ketencik Yağı	Ketencik Biyodizeli
Miristik Asit (C14:0)	0.05	0.046
Palmitik Asit (C16:0)	5.85	5.78
Heptadekanoik/MargarikAsit (C17:0)	0.02	0.03
Stearik Asit (C18:0)	2.59	2.62
Araşidik Asit (C 20:0)	1.28	1.26
Behenik Asit (C22:0)	0.24	0.23
Toplam	10.03	9.966

Çizelge 6. Ketencik Yağı ve Biyodizelinin Doymamış Yağ Asitleri Gruplandırması (%)*Table 6. Classification of unsaturated fatty acids of camelina oil and biodiesel (%)*

Doymamış Yağ Asitleri		
Numune Adı	Ketencik Yağı	Ketencik Biyodizeli
Palmitoleik Asit (C16:1)	0.10	0.091
Heptadesanoik/ Margoleik Asit (C17:1)	0.02	0.018
Oleik Asit (C18:1)	21.93	21.63
Linoleik Asit (C18:2)	21.23	21.12
Linolenik Asit (C18:3)	42.27	42.60
Cis-11,14-Eikosadienoik Asit (C20:2)	1.22	1.24
Cis-8,11,14-Eikosadienoik Asit (C20:3)	2.01	2.13
Cis-5,8,11,14,17-Eikosadienoik Asit (C20:5)	0.27	0.07
Erusik Asit(C22:1)	0.66	0.71
Cis-13,16-docosadienoik Asit (C22:2)	0.09	0.105
Nervonik Asit (C24:1)	0.15	0.14
Toplam	89.95	89.854

Çelik (2017) tarafından yapılan tez çalışmasında bazı tohumların sabit yağlarının yağ asitleri kompozisyonları incelenmiştir. Buna göre ketencik yağının yağ asitleri kompozisyonu incelendiğinde 6 adet doymuş yağ asidi bileşeni, 11 adet de doymamış yağ asidi bileşenleri tespit edilmiştir.

Samsun'da 2014-2016 yıllarında yapılan çalışmada, ketencik yağının yağ asitleri kompozisyonları belirlenmiştir. Bu çalışmaya göre palmitik asit oranı %6.28-7.35; stearik asit oranı %2.43-2.77 arasında tespit edilmiştir. Doymamış yağ asitlerinden ise en yüksek linolenik asit tespit edilmiş olup %36.07-40.13 aralığında belirlenmiştir. Erusik asit ise %0.38-0.60 arasında belirlenmiştir (Göre ve Kurt, 2017).

Ketencikte yapılan diğer çalışmalarda; palmitik asit oranının %5.89-7.04 (Katar ve diğ., 2012) ve %5.04-6.20 (Arslan ve diğ., 2014), stearik asit oranının %2.50-2.98 (Katar ve diğ., 2012) ve %2.60-2.88 (Arslan ve diğ., 2014), linolenik asit oranı %27.00-34.70 (Budin ve diğ., 1995), %35 (Agegnehu ve Honermeier, 1997), %24.86-32.26 (Katar ve diğ., 2012) ve %25.41-34.28 (Arslan ve diğ., 2014) ve erusik asit içeriğinin %0.00-4.00 (Budin ve diğ., 1995), %0.18-5.3 (Sampath, 2009), %2.87-3.49 (Katar ve diğ., 2012) oranlarında tespit edildiği bildirilmiştir.

Yaptığımız çalışmada ketencik yağı ve biyodizelinin yağ asitleri kompozisyonunun literatürle uyumlu olduğu ve biyodizel ve yağının yağ asitleri arasında bariz bir fark bulunmadığı belirlenmiştir.

Ketencik Biyodizeli ve Karışım Yakıtların Fizikokimyasal Özellikleri (Physicochemical Properties of Camelina [*Camelina sativa* (L.) Crantz] oil Biodiesel and its Fuel Blends)

B2 yakıt numunesi, hacimce %2 ketencik biyodizel ve %98 dizel karışımından, B7 yakıt numunesi, hacimce %7 ketencik biyodizel ve %93 dizel karışımından ve B20 yakıt numunesi ise, hacimce %20 ketencik biyodizel ve %80 dizel karışımından oluşmaktadır.

Çizelge 7, seçilen yakıtların kalite parametrelerini göstermektedir. Ketencik biyodizeli B100 EN 14214'e, B7 ve B2 karışım yakıtlar EN 590'a ve B20 karışım yakıtı ise EN 16709 standartlarına göre yakıt kaliteleri belirlenmiştir.

Çizelge 7. Ketencik yağı biyodizelinin ve karışım yakıtların fizikokimyasal özellikleri

Table 7. Physicochemical properties of camelina oil biodiesel and its fuel blends

Özellik/Yakıtlar	B100	B2	B7	B20	M100	EN 14214		EN 590		EN 16709	
						Min	Max	Min	Max	Min	Max
Kinematik viskozite (mm ² s ⁻¹) (40 °C'de)	4.32	2.99	3.05	3.16	2.97	3.50	5.00	2.00	4.50	2.00	4.62
Yoğunluk (kg m ⁻³) (15 °C'de)	881.7	832.3	834.2	841.5	831.5	860	900	820	845	820	860
Su içeriği (mg kg ⁻¹)	243	52	63	80	48	-	500	-	200	-	260
Kalorifik değer (Mj kg ⁻¹)	41.39	46.81	46.06	44.89	46.83	38		42.8		-	
Parlama noktası (°C)	165	72	74	81	68	>101		>55		>55	
Bulutlanma Noktası (°C)	-3.7	-5.8	-5.2	-4.3	-13.9	< -3		< -10 soğuk iklim		-	
Soğuk Filtre Tıkanma Noktası (°C)	-4	-18	-17	-16	-22	< -10		< -20 soğuk iklim		< -20	
Akma Noktası (°C)	-6.4	-18.5	-17.5	-17	<-20	-		-		-	
Bakır şerit korozyon, 3h 50°C'de (°C)	1a	1a	1a	1a	1a	Sınıf 1		Sınıf 1		Sınıf 1	
Renk	2.0	1.2	1.4	1.6	1.0	-	-	-	-	-	-
Açıklama						B100		B7 ve B2		B20	

Çizelge 7'deki özellikler, başka araştırmalarda rapor edilen özelliklerle benzerlik göstermiştir (Fröhlich ve Rice, 2005; Moser ve Vaughn, 2010; Wu ve Leung, 2011; Soriano ve Narani, 2012; Ciubota-Rosieet ve diğ., 2013; Özçelik ve diğ., 2015; Yang ve diğ., 2016; Sirviö ve diğ., 2018). Bütün yakıtlarda karışım oranına bağlı olarak biyodizel oranı arttıkça kinematik viskozite, yoğunluk, su içeriği, parlama noktası, bulutlanma noktası, soğuk filtre tıkanma noktası, akma noktası ve renk değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Literatürdeki çalışmaların çoğunda, biyodizelin kinematik viskozite ve yoğunluk değerlerinin motorinden daha yüksek olması sebebiyle, karışım oranındaki artışla birlikte bu değerlerin arttığı görülmüştür. Depolama, taşıma gibi süreçlerde oldukça önem arz eden parlama noktası motorinden daha fazla olduğu için, karışım yakıtlarında biyodizel oranının artması daha güvenli yakıt kullanımı sağlamaktadır. Kalorifik değerde ise biyodizelin kalorifik değeri motorine kıyasla daha düşük olduğundan karışım oranına bağlı olarak azalmalar meydana gelmiş ve başka araştırmalarda rapor edilen özelliklerle benzerlik göstermiştir (Moser ve Vaughn, 2010; Soriano ve Narani, 2012; Ciubota-Rosieet ve diğ., 2013; Sirviö ve diğ., 2018). Bakır şerit korozyonu değerleri ise tüm yakıtlarda 1a olarak tespit edilmiş ve Ciubota-Rosieet ve diğ., 2013'le benzerlik göstermiştir. Soğuk filtre tıkanma noktası standartta belirtilen tarihlerde (16 Nisan'dan 30 Eylül'e kadar: 0°C; 1 Mart'tan 15 Nisan'a kadar ve 1 Ekim 15 Kasım: -10°C; 16 Kasım'dan itibaren Şubat ayının sonuna kadar: -20°C'dir) 16 Nisan'dan 30

Eylül'e kadar: 0°C'yi bütün yakıtlarda sağlamış, diğer tarihlerde sağlamamıştır (Çizelge 7). Bu sonuçlar, bazı araştırmalarda rapor edilen özelliklerle benzerlik göstermiştir (Fröhlich ve Rice, 2005; Moser ve Vaughn, 2010; Soriano ve Narani, 2012; Ciubota-Rosieet ve diğ., 2013).

Ketencik biyodizelinin parlama noktası, yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri aspir, ayçiçeği ve soya biyodizelleriyle benzerlik göstermiş olup, kanola biyodizeline kıyasla parlama noktasının daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Yaşar, 2020). Soğukta akış özellikleri ayçiçeği ve soya yağı biyodizellerine benzer değerlerde iken, palm biyodizeline göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Yaşar, 2020; Özgür, 2017).

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Enerji bitkisi olarak da bilinen, önemli bir endüstriyel yağ bitkisi olan ketencik bitkisinin enerjide olan dışa bağımlılığın azalmasına imkan sağlayacağı için üretim desenine alınması ve üretim miktarının artırılarak üzerinde çalışılması gereken yağlı tohumlu bir bitkidir.

Ketencik ham yağından üretilen biyodizelin (B100) sırasıyla; linolenik asit %42.27; %42.60, oleik asit %21.93; %21.63, linoleik asit %21.23; %21.12 tespit edilmiştir. Toplamda doymamış yağ asitlerinin miktarı yüksek oranda görülmüş olup, ketencik yağı ve biyodizeli sırasıyla; %89.95 ve %89.854 tespit edilmiştir. Toplamda doymuş yağ asitleri ise, ketencik yağı %10.03, biyodizeli ise %9.966 olarak tespit edilmiştir. Ketencik yağında ve biyodizelinde tanımlanan diğer yağ asitleri çok düşük miktarlarda tespit edilmiştir.

Yaptığımız çalışmada ketencik yağı ve biyodizelinin yağ asitleri kompozisyonunun literatürlerle uyumlu olduğu ve biyodizel ve yağın yağ asitleri arasında bariz bir fark bulunmadığı belirlenmiştir.

Çalışmada, ketencik ham yağından üretilen biyodizelin (B100) ve B20, B7, B2 yakıt karışımlarının kalitesi ile ilişkili parametreler araştırılmıştır. B100 biyodizeli (EN 14214) ve bu yakıttan oluşturulan B20 yakıtı EN 16709 ve B7, B2 yakıtları EN 590 standartlarında belirtilen gereksinimleri karşılayıp karşılamadığı incelenmiştir.

Tüm yakıt numuneleri için analiz edilen fizikokimyasal özellikler (B100, B20, B7 ve B2) sırasıyla; kinematik viskozite ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$) (40 °C'de) 4.32; 3.16; 3.05; ve 2.99, yoğunluk (kg m^{-3}) (15 °C'de) 881.7; 841.5; 834.2 ve 832.3, su içeriği (mg kg^{-1}) 243; 80; 63 ve 52, kalorifik değer (Mj kg^{-1}) 41.39; 44.89; 46.06 ve 46.81, parlama noktası (°C) 165; 81; 74 ve 72, bulutlanma noktası (°C) (-3.7); (-4.3); (-5.2) ve (-5.8), soğuk filtre tıkanma noktası (°C) (-4); (-16); (-17) ve (-18), akma noktası (°C) (-6.4); (-17); (-17.5) ve (-18.5), bakır şerit korozyonu (3h 50°C'de) bütün yakıtlarda 1a ve renk (ASTM D1500) 2.0; 1.6; 1.4 ve 1.2 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ketencik ham yağından üretilen biyodizel (B100) ve B20, B7, B2 yakıt karışımlarının yakıt kaliteleri, motorinin yakıt kalitesine yakın değerler göstermiş olup, motorine en yakın değerler B2 yakıtında elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre ketencik biyodizeli (B100) ve karışım yakıtlar B20, B7, B2 dizel motorlarda herhangi bir modifikasyona gerek kalmadan kullanılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Agegehu, M., Honermeier, B., 1997, "Effects of Seeding Rate and Nitrogen Fertilization on Seed Yield, Seed Quality and Yield Components of False Flax (*Camelina sativa* L.)", *Die Bodenkultur*, Cilt 48, Sayı 1.
- Arslan, Y., Subaşı, İ., Katar, D., Kodaş, R., Kervanoğlu, H., 2014, "Farklı Azot ve Fosfor Dozlarının Ketencik Bitkisi (*Camelina Sativa* (L.) Crantz)'nin Bazı Bitkisel Özellikleri Üzerine Olan Etkisinin Belirlenmesi", *Anadolu Tarım Bilim. Derg.*, Cilt 29, Sayı 3, ss. 231-239.
- Bilgili, M.E., Sevilmiş, U., Seydoşoğlu, S., Kahraman, Ş., Sevilmiş, D., 2019, "Ketencik Biyodizelinin Eldesi İle Özellikleri ve Kullanım Alanları", *Ziraat Mühendisliği*, Sayı 367, ss. 36-53.
- Budin, J. T., Brene, W. M., Putnam, D. H., 1995, "Some Composition Alproperties of Camelina (*Camelina sativa* L. Crantz) Seeds and Oils", *Journal of the American Oil Chemists 'Society*, Cilt 72, ss. 309-315.

- Cesur, C., Eryılmaz, T., Uskutoğlu, T., Doğan, H., Coşke Şenkal, B., Alınak Sezer, S., 2021, "Haşhaş Tohum (*Papaver somniferum* L.) Yağının Biyodizel Yakıt Özelliklerinin Belirlenmesi", *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 9, Sayı 3, ss. 797-808, ISSN: 2667-8055 (Elektronik), DOI: 10.36306/konjes.869723.
- Ciubota-Rosie, C., Ruiz, J. R., Ramos, M.J., Pérez, Á., 2013, " Biodiesel from *Camelina sativa*: a Comprehensive Characterisation", *Fuel*, Cilt 105, 572-577.
- Council of Europe, European Pharmacopoeia Sixth Edition, 2007, Strasbourg: France.
- Çelik, Z. G., 2017, *Sağlıklı Beslenmede Kullanılan Bazı Tohumların Sabit Yağlarının Mukayeseli Fitokimyasal Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Bezmialem Vakıf Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eryılmaz, T., 2009, *Hardal Yağı Biyodizelinde Farklı Karışım Oranlarının Dizel Motorlarda Performansa Etkisi*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Eryılmaz, T., Cesur, C., Yeşilyurt, M. K., Aydın, E., 2014a, "Aspir (*Carthamus tinctorius* L.), Remzibey-05 Tohum Yağı Metil Esteri: Potansiyel Dizel Motor Uygulamaları için Yakıt Özellikleri", *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, Cilt 1, Sayı 1, ss. 85-90.
- Eryılmaz, T., Yeşilyurt, M. K., Cesur, C., Yumak, H., Aydın, E., Çelik, S. A., Yıldız, A. K., 2014b, "Yozgat İli Şartlarında Yetiştirilen Aspir (*Carthamus tinctorius* L.) Dinçer Çeşidinden Üretilen Biyodizelin Yakıt Özelliklerinin Belirlenmesi", *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University, JAFAG*, Cilt 31, Sayı 1, ss. 63-72.
- Fröhlich, A., Rice, B., 2005, "Evaluation of *Camelina sativa* Oil as a Feedstock for Biodiesel Production" *Industrial Crops Products*, Cilt 21, ss. 25-31.
- Göre, M., Kurt, O., 2017, "Farklı Ketencik [*Camelina sativa* (L.) Crantz.] Genotiplerinin Ham Yağ Oranları ve Yağ Asitleri Kompozisyonlarının Belirlenmesi", *KSÜ Doğa Bil. Derg.*, Cilt 20, Özel Sayı, ss. 201-205.
- Katar, D., Arslan, Y., Subaşı, İ., 2012, "Ankara Ekolojik Koşullarında Farklı Ekim Zamanlarının Ketencik (*Camelina sativa* (L.) Crantz) Bitkisinin Yağ Oranı ve Bileşimi Üzerine Olan Etkisinin Belirlenmesi", *Tekirdağ Ziraat Fakültesi*, Cilt 9, Sayı 3, ss. 84-90.
- Koç, N., Önder, M., 2012, "Biyodizel Hammaddesi olarak Ketencik", *Biyoyakıt Dünyası*, Cilt 16, ss. 8-12.
- Kurt, O., Seyis, F., 2008, "Alternatif Yağ bitkisi: Ketencik [*Camelina sativa* (L.) Crantz]", *J. of Fac. of Agric., OMU*, Cilt 23, Sayı 2, ss. 116-120.
- Moser, B. R., Vaughn, S. F., 2010, "Evaluation of Alkyl Esters from *Camelina sativa* Oil as Biodiesel and as Blend Components in Ultra Low-Sulfur Diesel Fuel", *Bioresource Technology*, Cilt 101, ss. 646-653.
- Oğuz, H., Ögüt, H., Gökdoğan, O., 2012, "Türkiye Tarım Havzaları Üretim ve Destekleme Modelinin Biyodizel Sektörüne Etkisinin İncelenmesi", *Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der. / Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech.*, Cilt 2 Ek:A, Sayı 2, ss. 77-84.
- Oğuz, H., Özcan, M., Yağcı, M., Özkan, A. O., 2015, "Automation of the Two Stage Biodiesel Production Process", *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, Cilt 4, Sayı 4, ss. 254-260.
- Orhan, İ. E., Şenol, F. S., Öztürk, N., Çelik, S. A., Pular, A., Kan, Y., 2013, "Phytochemical Contents and Enzyme Inhibitory and Antioxidant Properties of *Anethum graveolens* L. (dill) Samples Cultivated Under Organic and Conventional Agricultural Conditions", *Food and Chemical Toxicology*, Cilt 59, ss.96-103.
- Ögüt, H., 2005, "Tarımsal Üretimde Biyoyakıt Kullanım İmkanları", *Uluslararası Çalıştay, Biyoyakıtlar ve Türkiye (Biyodizel-Biyoetanol)*, Konya.
- Ögüt, H., Oğuz, H., 2006, *Üçüncü Milenyumun Yakıtı Biyodizel*, Yayın No: 745 Nobel Yayın Dağıtım ISBN: 975-591-730-6, II. Baskı 190.
- Özçelik, A. E., Aydoğan, H., Acaroğlu, M., 2015, "Determining the Performance, Emission and Combustion Properties of Camelina Biodiesel Blends", *Energy Conversion and Management*, Cilt 96, ss. 47-57.

- Özgün, A. K., Eryılmaz, T., 2018, "A Comparative Study of Engine Performance and Exhaust Emissions of Biodiesel and Its Blends Produced from Waste Cooking Oil and Neutralized Waste Cooking Oil", *International Journal of Automotive Engineering and Technologies, IJAET*, Cilt 7, Sayı 3, ss. 88-97.
- Özgür, C., 2017, "Palm Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarının Yakıt Özelliklerinin Tahmini", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 32, Sayı 1, ss. 81-88.
- Sampath, A., 2009, *Chemical Characterization of Camelina Seed Oil*, The Degree of Master of Science, New Brunswick, New Jersey. 180.
- Schumacher, L. G., Van Gerpen, J., Adams, B. T., 2003, "Diesel fuel injection pump durability test with low level biodiesel blends." *2003 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.*
- Sirviö, K., Heikkilä, S., Help, R., Niemi, S., Hiltunen, E., 2018, "Properties of Local Produced Animal-fat Based Biodiesel and Its Blend With Fossil Fuel", *Agronomy Research*, Cilt 16, Sayı 1, ss. 1237-1246, <https://doi.org/10.15159/AR.18.083>
- Soriano Jr., N. U., Narani, A., 2012, "Evaluation of Biodiesel Derived from *Camelina sativa* Oil", *J. Am. Oil Soc.*, Cilt 89, ss. 917-923.
- Tüpraş, 2022, <https://www.tupras.com.tr/ozel-yakitlar>, Erişim 10.01.2022.
- Wu, X., Leung, D., 2011, "Optimization of Biodiesel Production from Camelina Oil Using Orthogonal Experiment", *Applied Energy*, Cilt 88, ss. 3615-3624.
- Yang, J., 2016, *Evaluating The Feasibility of Biodiesel Production from Camelina Sativa*, Dalhousie University, Master Thesis.
- Yang, J., Caldwell C., Corscadden, K., He, Q. S., Li, J., 2016, "An Evaluation of Biodiesel Production from Camelina sativa Grown in Nova Scotia", *Industrial Crops and Products*, Cilt 81, ss. 162,168.
- Yaşar, F., 2020, "Comparison of fuel properties of biodiesel fuels produced from different oils to determine the most suitable feedstock type", *Fuel*, Cilt 264, ss. 116817.
- Yılandıcılar, M. S., 2020, *Ketencik yağı metil esterine pentanol ilavesinin dizel motor performans parametrelerine etkisinin incelenmesi*, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84.
- Yıldız, M. M., Özçelik, A., 2021, "Investigation of the effects of camelina sativa biodiesel and eurodiesel blends on vehicle performance and emissions", *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, Cilt 10, Sayı 1, ss. 74-82.
- Yılmaz, G., Kınay, A., Ayıışı, S., 2014, "Ketencik (*Camelina sativa*) Bitkisinin Tanıtımı ve Yetiştiriciliği", *Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı*, 28-29 Mayıs, Samsun.
- Zubr, J., 1992, "New Vegetable Oil for Food Application", *Agro Food Industry Hi-tech*, Cilt 7, Sayı 8, ss. 24-26.
- Zubr, J., 1993, "New Source of Protein for Laying Hens", *Food Compounder*, ss. 23-25.
- Zubr, J., 1997, "Oil-Seed Crop: *Camelina sativa*", *Industrial Crops and Products*, Cilt 6, ss. 113-119.



EXAMINING THE EFFECT OF GENERATOR LOAD SHARING PRACTICES ON GREENHOUSE GAS EMISSIONS FOR A SHIP

Kenan YİĞİT

*Yıldız Technical University, Faculty of Naval Architecture and Maritime, Marine Engineering Department,
Istanbul, TURKEY
kyigit@yildiz.edu.tr*

(Geliş/Received: 11.01.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 04.03.2022)

ABSTRACT: In this paper, the issue of efficient operation of generators, which is one of the energy efficiency parameters in ship electricity systems, is discussed in terms of greenhouse gas emissions. In order to meet the same power needs on a bulk carrier ship, three different load sharing situations are assessed in which the other generator is run synchronously when the active generators reach 40%, 60%, and 80% load ratios. Thus, CO₂, CH₄, and N₂O emissions from generators for each practice are analyzed depending on fuel consumption. The results show that emissions vary for certain power needs in each situation. Also, there was no change in emissions for some power needs in three situations. In addition, it was estimated that up to 22% emission reductions could be achieved, depending on the power needs of the ship, if the generators were run at an 80% load ratio instead of 40%.

Keywords: Ship, Electrical energy, Diesel generator, Greenhouse gas emissions

Bir Gemi İçin Jeneratör Yük Paylaşımı Uygulamalarının Sera Gazı Emisyonları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

ÖZ: Bu makalede, gemi elektrik sistemlerinde enerji verimliliği parametrelerinden biri olan jeneratörlerin verimli çalıştırılması konusu sera gazı emisyonları açısından değerlendirilmiştir. Bir dökme yük gemisinde aynı güç ihtiyacını karşılamak için devredeki jeneratörün %40, %60 ve %80 yüklenme oranlarına ulaştığında diğer jeneratörün senkron olarak devreye alındığı üç farklı yük paylaşımı durumu ele alınmıştır. Böylece her bir durum için jeneratörlerden kaynaklanan CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonları yakıt tüketimine bağlı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, emisyonların her durum için belirli bir güç ihtiyacında değiştiğini göstermiştir. Ayrıca, her üç durumda da bazı güç ihtiyaçları için emisyonlarda herhangi bir değişim olmamıştır. Ek olarak, jeneratörlerin %40 yerine %80 yük oranında çalıştırılması durumunda gemideki güç ihtiyacına bağlı olarak %22'ye kadar emisyon azaltımı sağlanabileceği tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gemi, Elektrik enerjisi, Dizel jeneratör, Sera gazı emisyonları

1. INTRODUCTION

The increase in global energy demand day by day causes a rise in greenhouse gas (GHG) emissions in the maritime sector, as in other sectors. The GHGs, including carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) from shipping (international, domestic, fishing) increased 9.6% from the years of 2012 to 2018 (MEPC 75/7/15, 2020). In other words, equivalent CO₂ emissions have raised from 977 million tons to 1076 million tons during this time. In addition, CO₂ release, which is one of the main greenhouse gas sources, was 962 million tons in 2012 in the maritime sector and reached 1056 million tons in 2018. CO₂ increased by 9.3% in seven years (MEPC 75/7/15, 2020). The maritime sector was also responsible for

around 2.9% of global anthropogenic CO₂ emissions in 2018 (Kramel *et al.*, 2021). The International Maritime Organization (IMO) makes various regulations, develops measurement techniques, and encourages energy efficiency activities in order to adopt more environmentally friendly approaches on ships. Because, IMO targets include decreasing CO₂ emissions per transport work by at least 40% by 2030 and 70% by 2050 compared to 2008 (IMO, 2021). For these reasons, various techniques such as the Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI), Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), and Energy Efficiency Design Index (EEDI) have been developed by IMO to assist the decrease CO₂ emissions and increase the energy efficiency of shipping (Fan *et al.*, 2020).

Ships have different energy efficiency potentials in many areas, such as electric, mechanic, and design. All kinds of energy efficiency activities that can be applied on board can indirectly contribute to reducing the environmental impact of ships. In this context, it is possible to use energy efficiently with various investments, such as improving efficiency in main and auxiliary machinery with waste heat recovery systems, improving efficiency in lighting systems with high-efficiency lamps, and improving efficiency in energy production with renewable energy. In addition, it is possible to provide energy efficiency in the existing system by developing operational strategies such as determining the best route and the most appropriate speed, taking into account the delivery time, economic and environmental parameters (Greenvoyage, 2021). One of the operational strategies on ships is to run generators effectively. Thus, the power needs of ships can be met with less fuel and indirectly GHG emissions can be decreased. Various studies have been carried out on marine diesel generators in the literature. Cuculić *et al.* (2016) analyzed the dynamic behavior of the generator set in the event of a failure on ships. They modeled the generator set and examined the sudden collapse of one of the running generators in the simulation environment. Nasrudin and Syafiquddin (2016) studied a power management design for synchronous operation of generator set on ships. They concluded that the significant parameters involved in the power management system design are frequency, terminal voltage, thrust, fast load reduction time, inertial time constant, and slew rate limit. Tarnapowicz and Matuszak (2017) investigated the effect of power factor determination on energy efficiency in a generator set on ships. They stated that the load factor of auxiliary engines should be defined by considering the efficiency of the generator and the excessive power factor of the engine relative to the generator. Başhan and Demirel (2018) identified the critical operational failures in order to contribute to the planned maintenance and repair of generator set on the ship. They stated that the most common causes of faults in generators are fuel, combustion, lubrication, and cooling systems. Başhan *et al.* (2018) carried out an economic analysis of the crane operations on a ship. They calculated the cost of using a crane at low generator loads on a ship. For this reason, they recommended the use of loaders in the port so that the generators are not operated at low capacities. Ekmekçioğlu (2019) estimated the total emissions from ships at Izmir and Mersin ports in Turkey, taking into account the movements, propulsion capacities, and power need of ships. Between September 2017 and September 2018, a total of about 45321 and 102330 tons of CO₂ emissions were calculated in Izmir and Mersin Ports, respectively. Kökkülünk (2019) performed the energy and exergy analysis of a turbocharged generator set at different loads for a ship. The highest exergy potentials were found at maximum load in exhaust gases and cooling water, respectively. Lu (2019) investigated the optimization of the load sharing and its effect on fuel consumption for a hybrid ship model with a generator set and energy storage system. It was emphasized that the storage system could reduce the connection and disconnection frequency of generator sets. Perabo and Zadeh (2020) studied a real-time simulation model to test the electric power system on a ship. They concluded that Hardware-in-the-Loop testing is a suitable methodology for testing and validating complex control systems. Yücel *et al.* (2020) performed the analytical and numerical vibration analysis on the generator set foundations with pipe profiles on ship. They determined the optimal design of the generator base, which acts as a vibration damper. Kuzu *et al.* (2021) examined the impacts of ship emissions for Bandırma Port in Turkey based on ship activities. Particulate matter (PM₁₀), nitrogen oxides (NO_x), sulphur dioxide (SO₂), and carbon monoxide (CO) emissions were calculated as about 182, 7997, 1682, and 240 tons for the year of 2018, respectively. Yiğit (2021a, 2021b) studied the effect of the operating capacity of a ship's generators on fuel consumption. It was emphasized that operating the generators at optimum loads improves fuel

consumption. Yücel (2021) determined the effect of vibration on the generator set of a ship using the operational modal analysis method. It was stated that this method could provide a significant advantage in examining the effects of generator vibrations on the ship structure.

As it can be seen from previous studies, marine diesel generators have been evaluated from different perspectives. To the best of the author's knowledge, the effect of generator load sharing on GHG emissions has not been adequately studied for ships. This issue is critical both for more efficient power production and for reducing GHGs from ships. Because in the daily working routines on a ship, marine diesel generators may not always be commissioned at optimum conditions. Commissioning of generators at low capacities may indirectly affect GHGs. Therefore, in this study, the effect of load sharing of marine diesel generators on GHGs was examined. As a result of the fuel burned for electricity generation in diesel generators, GHG emissions are formed as well as other air pollutants. GHGs are defined as CO₂, CH₄, N₂O, hydrofluorocarbons (HFCs), perfluorocarbons (PFCs), and sulphur hexafluoride (SF₆) under United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 2021). However, HFCs, PFCs, and SF₆ are not related to fuel burning but to fugitive emissions (MEPC 75/7/15, 2020). For that reason, the changes of CO₂, CH₄, and N₂O emissions from generators depending on the fuel consumption were analyzed. Thus, it is aimed to contribute to the literature on environmental efficiency of generators in the maritime field.

2. MATERIAL AND METHOD

The power need on ships is generally provided by marine diesel generators. One or more generators are run to produce electricity on ships. Therefore, the efficient operation of the generators is critical for energy efficiency. One of the important parameters for generators is the consumption rate. It depends on the generator load. Therefore, it can be estimated how much fuel the generator should use for electricity production and which load ratio the generator consumes less fuel (Rith *et al.*, 2016). Consumption rates may differ depending on the characteristics of each diesel generator. At the same time, the consumption curves of generators are likely to show similarities in general terms. This situation can be expressed in Figure 1 (Wpowerproducts, 2021).

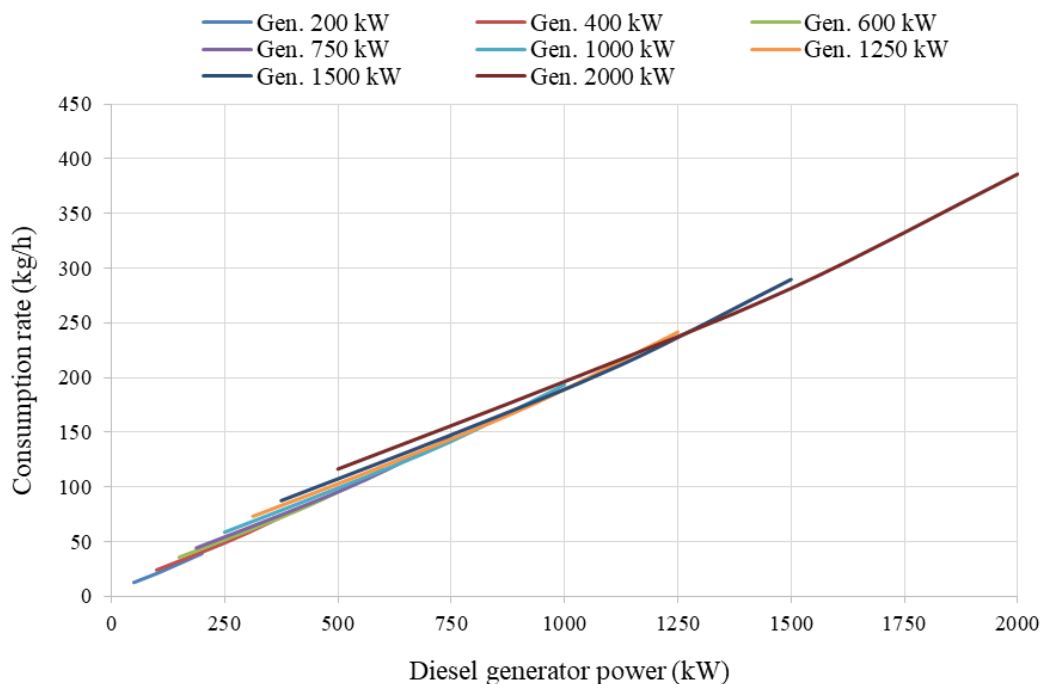


Figure 1. Consumption rate curves for different diesel generators

Figure 1 indicates the approximate fuel consumption of generators based on capacity and load ratio. It can be said that running generators at low loads increases fuel consumption, while running generators at optimum loads decreases fuel consumption. In general, the consumption rate is specified in the test catalog for certain load ratio of generators. The consumption rate corresponding to the uncertain load can be estimated by regression analysis, taking into account the polynomial functions. The polynomial function of the relationship between the consumption rate and the generator power can be represented as follows (Gan *et al.* 2015).

$$CR (P_i) = a_n(P_i)^n + a_{n-1}(P_i)^{n-1} + \dots + a_1(P_i) + a_1 \quad (1)$$

Here, CR is the consumption rate (kg/h), P_i is the output power of the i th diesel generator (kW), a is the polynomial coefficients, and n is the degree of polynomial. Thus, the total fuel consumption of the generators can be expressed as follow:

$$FC = \sum_{i=1}^N CR (P_i) \times t \quad (2)$$

Here, FC is total fuel consumption needed for electricity production (kg), t is the operating hour of the i th diesel generator (h), N is the number of active generator.

Total GHG emissions from generators can also be estimated as follow (EEA, 2019).

$$E_j = FC \times EF_j \quad (3)$$

Here, E_j is the total emission from generators (g), EF_j is the fuel-based emission factor (kg/ton), and j is the emission type. For the calculations, it was assumed that the ship uses marine diesel oil (MDO) as a fuel for power production. Therefore, emission factors were taken as 3206 kg/ton for CO_2 , 0.05 kg/ton for CH_4 , and 0.18 kg/ton for N_2O (MEPC 75/7/15, 2020).

In this study, the power system of a bulk carrier ship was taken into account. The ship's power needs are met by three identical 400 kW diesel generators. The specified consumption rates for generators were taken from literature (Başhan and Kökkülünk, 2020). As a result of the regression analysis, the consumption rate corresponding to the different powers of the generators was also obtained with a quadratic polynomial function:

$$CR (P_i) = (2 \times 10^{-5})(P_i)^2 + (1651 \times 10^{-4})(P_i) + 12.35 \quad (4)$$

In addition, the total fuel consumption of the generators for the load sharing situations was analyzed with (2). GHG emissions corresponding to fuel consumption were also estimated with (3). Thus, the situation of commissioning generators at three different load capacities for the same power needs on the ship was discussed, and its effect on GHGs was evaluated. The method used to determine the load sharing situations in the study can be summarized as follows: in the first, second, and third situations, the primary allowable load ratio on generators was set at 40% (160 kW), 60% (240 kW), and 80% (320 kW) of their rated output (400 kW), respectively. If the first generator is insufficient to supply the necessary power, the second generator is run and the power is provided equally by the two generators. When the two generators reach the maximum allowable load ratio of their nominal capacities, the third generator is also run to meet the higher power needs. Thus, the total power is provided equally by the three generators. The load sharing situations of generators based on the maximum allowable load ratio and the typical power distribution of the electrical system of a ship can also be illustrated in Figure 2.

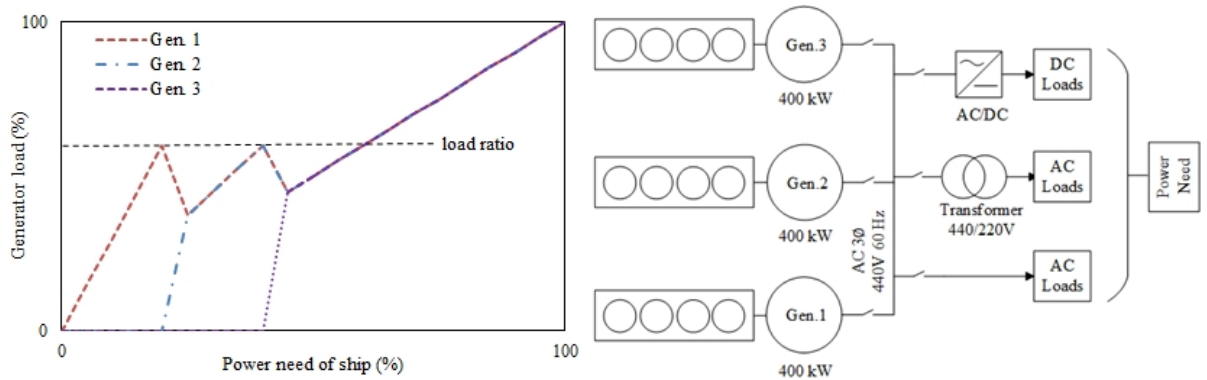


Figure 2. Load sharing of diesel generators and power system architecture of a ship

As a result, GHG emissions from the generators were analyzed for the same power need in each load sharing situation depending on the fuel consumption.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The maximum allowable load ratio affects the load sharing of the generators according to the power needs of the ship. Therefore, the consumption rate varies depending on the load ratio and the power need. The changes in the consumption rate per generator for the three situations are given in Figure 3.

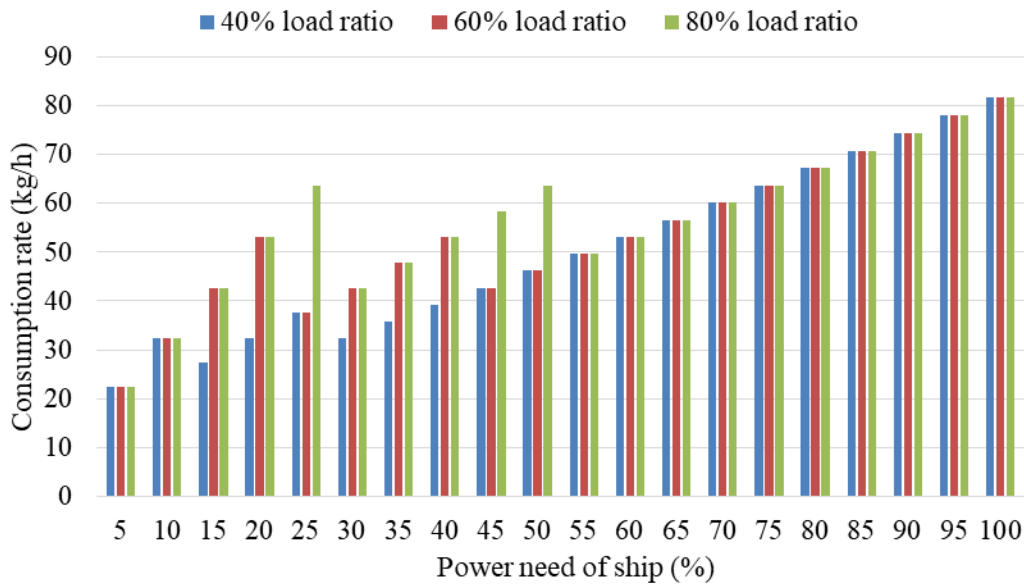


Figure 3. Consumption rate per generator

According to Figure 3, when the power need was 5% (60 kW) or 10% (120 kW) of the total capacity (1200 kW), the consumption rates were similar in all three situations. It was 22 kg/h and 32 kg/h, respectively. Because only one generator was run to meet power need. When the power need was 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95%, or 100% (between 660 kW and 1200 kW), the consumption rates were also similar in all three situations. It was 50 kg/h, 53 kg/h, 57 kg/h, 60 kg/h, 64 kg/h, 67 kg/h, 71 kg/h, 74 kg/h, 78 kg/h, and 82 kg/h, respectively. Because all the generators were active. On the other hand, when the power need was between 15% (180 kW) and 50% (600 kW), the consumption rate per generator was different in the three situations. In this range, it showed an increasing trend, then a decreasing trend, finally a rising trend. Because different number of generators were run depending on the load sharing situation and power need. When the power need was 15% of total capacity, the consumption rate was

27 kg/h for a load ratio of 40% and 43 kg/h for load ratios of 60% and 80%. While the power necessity was 20% (240 kW), it was 32 kg/h for a load ratio of 40% and 53 kg/h for load ratios of 60% and 80%. When the need of power was 25% (300 kW), it was 38 kg/h for load ratios of 40% and 60%, and 64 kg/h for a load ratio of 80%. While the necessity of power was 30% (360 kW), it was 32 kg/h for a load ratio of 40% and 43 kg/h for load ratios of 60% and 80%. When the power need was 35% (420 kW), it was 36 kg/h for a load ratio of 40% and 48 kg/h for load ratios of 60% and 80%. While the power necessity was 40% (480 kW), it was 39 kg/h for a load ratio of 40% and 53 kg/h for load ratios of 60% and 80%. When the need of power was 45% (540 kW), it was 43 kg/h for load ratios of 40% and 60%, and 58 kg/h for a load ratio of 80%. While the necessity of power was 50% (600 kW), the consumption rate was 46 kg/h for load ratios of 40% and 60%, and 64 kg/h for a load ratio of 80%.

The total fuel consumption of the generators, depending on the load sharing situations and the power need of the ship, is also illustrated in Figure 4.

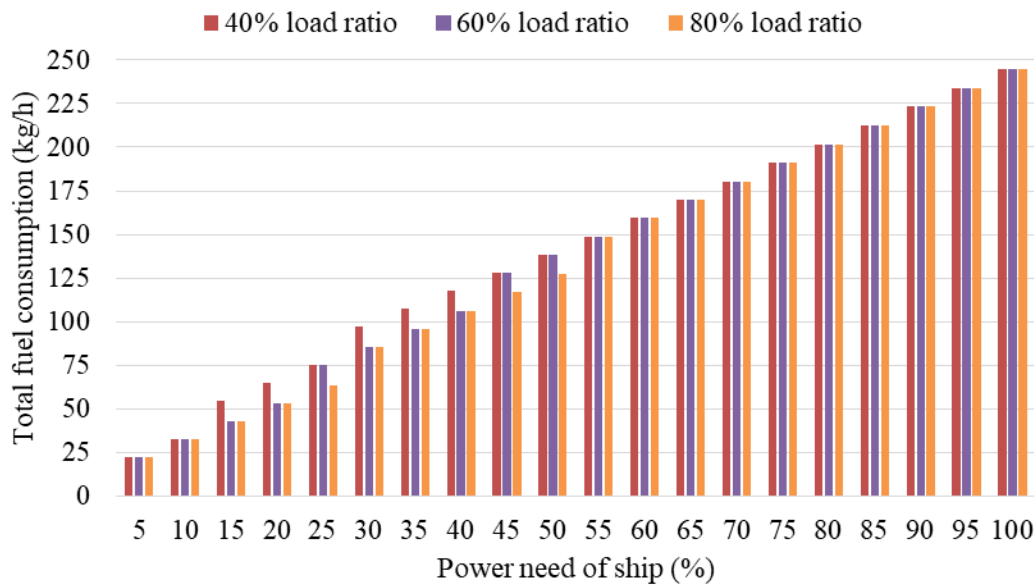


Figure 4. Total fuel consumption of the generators

According to Figure 4, when the power need was between 5 – 10% and 55 – 100% of total capacity, the total fuel consumption of the generators was similar in all three situations. It was between 22 – 32 kg/h and 149 – 245 kg/h, respectively. On the other hand, when the power need was between 15% and 50% of total capacity, total fuel consumption varied between 43 kg/h and 139 kg/h depending on the load sharing situations.

The change in the fuel consumption of generators also indirectly affects the amount of GHGs. Total GHGs from the generators, depending on the load sharing situations and the power need of the ship, are also demonstrated in Figure 5 and Figure 6.

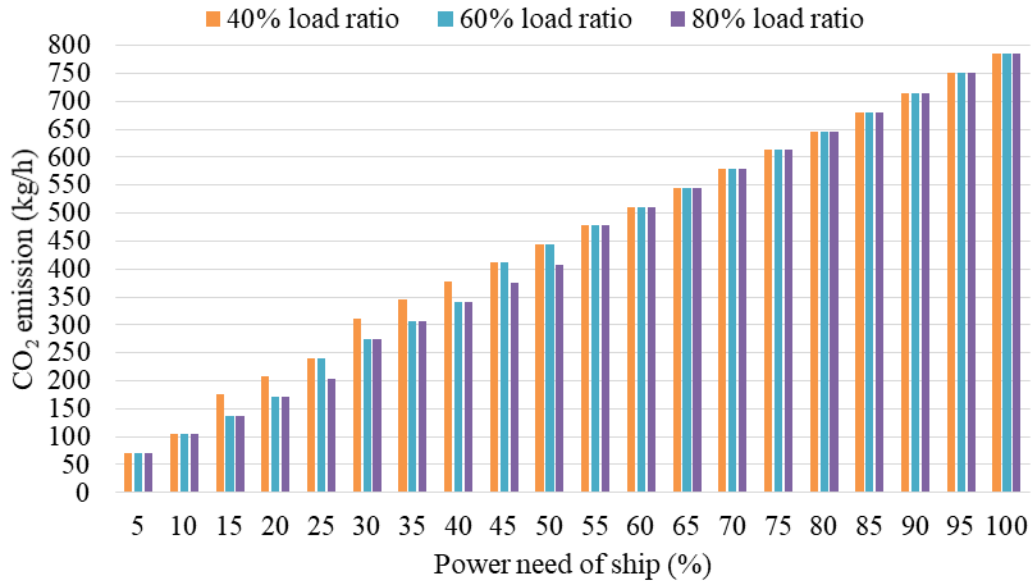


Figure 5. Total CO₂ emission from the generators

According to Figure 5, when the power need was between 5 – 10% and 55 – 100% of total capacity, the total CO₂ emissions from the generators were similar in all three situations. The hourly total CO₂ emissions were 72 kg at 5% and 104 kg at 10% of the total capacity. CO₂ was also 477 kg at 55%, 511 kg at 60%, 545 kg at 65%, 578 kg at 70%, 612 kg at 75%, 647 kg at 80%, 681 kg at 85%, 715 kg at 90%, 750 kg at 95%, and 785 kg at 100% of total capacity. On the other hand, when the power need was 15% of total capacity, the hourly total CO₂ emission was 176 kg for a load ratio of 40% and 137 kg for load ratios of 60% and 80%. While the power necessity was 20%, it was 208 kg for a load ratio of 40% and 170 kg for load ratios of 60% and 80%. When the need of power was 25%, CO₂ was 241 kg for load ratios of 40% and 60%, and 204 kg for a load ratio of 80%. While the necessity of power was 30%, it was 312 kg for a load ratio of 40% and 274 kg for load ratios of 60% and 80%. When the power need was 35%, CO₂ was 345 kg for a load ratio of 40% and 307 kg for load ratios of 60% and 80%. While the power necessity was 40%, it was 378 kg for a load ratio of 40% and 341 kg for load ratios of 60% and 80%. When the need of power was 45%, CO₂ release was 411 kg for load ratios of 40% and 60%, and 374 kg/h for a load ratio of 80%. While the necessity of power was 50%, the hourly total CO₂ emission was 444 kg for load ratios of 40% and 60%, and 408 kg for a load ratio of 80%.

In addition, total CH₄ and N₂O emissions depending on the load sharing situations are given in Figure 6.

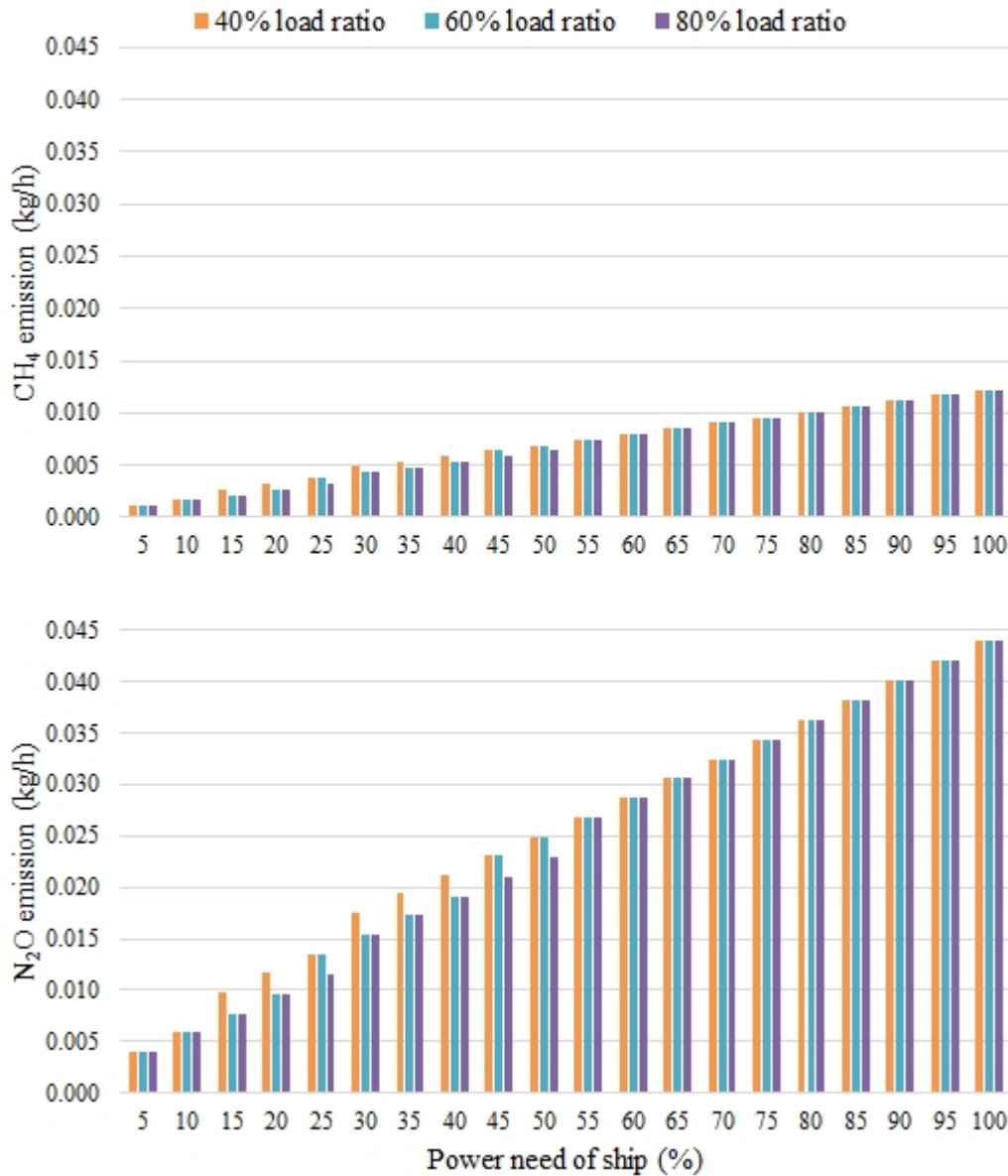


Figure 6. Total CH₄ and N₂O emissions from the generators

Figure 6 shows that CH₄ and N₂O emissions were also similar between 5 – 10% and 55 – 100% of total capacity at three load ratio situations. On the other hand, when the power need was between 15% and 50%, the emissions of CH₄ and N₂O were also different in the three situations. Estimated emissions are very low compared to CO₂. CH₄ varied between 5 – 10% of the total capacity from 0.001 to 0.002 kg/h. When the power was between 15 – 50% of its total capacity, it carried out between 0.003 – 0.007 kg/h. Hourly emissions in this range were slightly different for each load ratio situation. While the power requirement was also between 55 – 100% of the total capacity, the amount of CH₄ was between 0.007 – 0.012 kg/h. In addition, N₂O changed between 5 – 10% of the total capacity from 0.04 to 0.06 kg/h. It realized as between 0.010 – 0.025 kg/h when the power capacity was between 15 – 50%. Hourly emissions in this range were slightly various for the three load ratio situations. For the power capacity of 55 – 100%, the amount of N₂O was also between 0.025 – 0.044 kg/h.

The results show that the load sharing ratio affects GHG emissions from generators when the power needs of a selected ship are between 15% and 50% of the total capacity. While maximum GHGs from generators were realized at a 40% load ratio, minimum GHGs occurred at an 80% load ratio. Changes in

GHGs are also given in Table 1 when the primarily maximum allowable load ratio on generators is set to 60% and 80% instead of 40%.

Table 1. The decrease of GHGs compared to 40% load ratio

Power need of ship		60% load ratio				80% load ratio			
%	kW	%	CO ₂ (kg/h)	CH ₄ (kg/h)	N ₂ O (kg/h)	%	CO ₂ (kg/h)	CH ₄ (kg/h)	N ₂ O (kg/h)
15	180	22	39	0.001	0.002	22	39	0.001	0.002
20	240	18	38	0.001	0.002	18	38	0.001	0.002
25	300	0	0	0.000	0.000	15	37	0.001	0.002
30	360	12	38	0.001	0.002	12	38	0.001	0.002
35	420	11	38	0.001	0.002	11	38	0.001	0.002
40	480	10	37	0.001	0.002	10	37	0.001	0.002
45	540	0	0	0.000	0.000	9	36	0.001	0.002
50	600	0	0	0.000	0.000	8	36	0.001	0.002

Table 1 indicates that GHG reductions are achieved for some power needs on the ship at 60% and 80% load ratio practices of generators compared to 40%. It can be said that maximum GHG reduction is achieved when the power need is 15% of the total capacity. The decrease in GHGs was 22% for both situations. In addition, an 80% load ratio application in generators provided more GHG savings than 60%.

As a result, it is possible to state that operating marine diesel generators as close to their nominal capacities as possible will contribute to the decrease of emissions. Thus, this awareness can contribute to the IMO's efforts to decrease GHG emissions and the effects of climate change from shipping.

4. CONCLUSIONS

In this paper, the effect of efficient operation of marine diesel generators on greenhouse gas emissions is emphasized. The changes in CO₂, CH₄, and N₂O resulting from three different generator load sharing practices under the same power need are estimated for a bulk carrier ship. The load ratio of the generators is set at 40%, 60%, and 80%, respectively. Thus, when the active generators reach the defined load ratio, the next generator starts to run synchronously. In this way, it aims to estimate greenhouse gas emissions that may occur as a result of possible load sharing situations among the generators on a ship. The results show that there are no emission changes for each load sharing situation when the power need is between 0 – 15% and 50 – 100% of the ship's total capacity. Because in order to meet these power needs on the ship, either a single generator or all generators must be activated. On the other hand, when the power need is between 15% and 50% of the total capacity, the load sharing ratio of generators affects emission releases. Because the same power need can be met with different generator numbers in these intervals. The maximum greenhouse gas emission saving was 22% for 60% and 80% load ratio practices compared to 40% while the power need was 15% of the total capacity. When the power need was 20% of the total capacity, the saving rates were also 18% in both situations. It can also be stated that an 80% load ratio application in generators will save more greenhouse gases in some power needs compared to a 60% load ratio. For this reason, providing the power need by operating the generators at optimum capacity as much as possible will contribute to the reduction of greenhouse gas emissions on the ship. Thus, a certain rate of improvement can be achieved in the ship's electrical system.

REFERENCES

- Başhan, V., Demirel, H., 2018, "Evaluation of critical operational faults of marine diesel generator engines by using DEMATEL method", *Journal of ETA Maritime Science*, 6(2), 119-128.
- Başhan, V., Çakır, M., Sönmez, H.İ., 2018, "Bir dökme yük gemisi kreyn operasyonunun maliyet etkinliği ve emisyon analizi", *Journal of Eta Maritime Science*, 6(1), 27-36.
- Başhan, V., Kökkülünk, G., 2020, "Exergoeconomic and air emission analyses for marine refrigeration with waste heat recovery system: a case study", *Journal of Marine Engineering & Technology*, 19(3), 147-160.
- Cuculić, A., Ćelić, J., Prenc, R., 2016, "Marine diesel-generator model for voltage and frequency variation analysis during fault scenarios", *Pomorski zbornik*, 51(1), 11-24.
- EEA, 2019, European Environment Agency, EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2019, <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019> (access date: 12 November 2021).
- Ekmekçioğlu, A., 2019, "Ship emission estimation for Izmir and Mersin international ports-Turkey", *Journal of Thermal Engineering*, 5(6), 184-195.
- Fan, A., Yan, X., Bucknall, R., Yin, Q., Ji, S., Liu, Y., ... Chen, X., 2020, "A novel ship energy efficiency model considering random environmental parameters", *Journal of Marine Engineering & Technology*, 19(4), 215-228.
- Gan, L.K., Shek, J.K., Mueller, M.A., 2015, "Hybrid wind-photovoltaic-diesel-battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: A case study in Scotland", *Energy Conversion and Management*, 106, 479-494.
- Greenvoyage, 2021, Energy efficiency technologies information portal, <https://greenvoyage2050.imo.org/energy-efficiency-technologies-information-portal/> (access date: 15 November 2021).
- IMO, 2021, International Maritime Organization, Initial IMO GHG strategy, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx> (access date: 15 November 2021).
- Kökkülünk, G., 2019, "Energy and exergy analyses of a bulk carrier diesel generator for different loads", *Journal of ETA Maritime Science*, 7(1), 43-50.
- Kramel, D., Muri, H., Kim, Y., Lonka, R., Nielsen, J.B., Ringvold, A.L., ... Strømman, A.H., 2021, "Global shipping emissions from a well-to-wake perspective: the MariTEAM model", *Environmental science & technology*, 55(22), 15040-15050.
- Kuzu, S.L., Bilgili, L., Kiliç, A., 2021, "Estimation and dispersion analysis of shipping emissions in Bandırma Port, Turkey", *Environment, Development and Sustainability*, 23(7), 10288-10308.
- Lu, Y., 2019, *Optimal scheduling and loadsharing of a hybrid power plant with gensets and battery banks*, Master's thesis, NTNU.
- MEPC 75/7/15, 2020, Reduction of GHG Emissions from Ships, Fourth IMO GHG Study 2020 – Final report.
- Nasrudin, I., Syafiquddin, C.S.M., 2016, "Design study of power management system for parallel operation of generator set of a ship's diesel electric power plant", *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 20(1), 1-11.
- Perabo, F., Zadeh, M.K., 2020, "Modelling of a shipboard electric power system for hardware-in-the-loop testing", *IEEE Transportation Electrification Conference & Expo*, 69-74.
- Rith, M., Biona, J.B.M., Gitano-Briggs, H.W., Sok, P., Gonzaga, J., Arbon, N., Maglaya, A.B., 2016, "Performance and emission characteristics of the genset fuelled with dual producer gas-diesel", *DLSU Research Congress*, 7-9.
- Tarnapowicz, D., Matuszak, Z., 2017, "Impact of the ship generating sets' power factor on the determination of the load factor in auxiliary engine", *58th International Conference of Machine Design Departments*, 6 - 8 September, Prague, Czech Republic.
- UNFCCC, 2021, United Nations Framework Convention on Climate Change, Glossary of climate change acronyms and terms, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/glossary-of-climate-change-acronyms-and-terms> (access date: 15 December 2021).

- Wpowerproducts, 2021, Diesel fuel consumption chart, <https://www.wpowerproducts.com/power-generation-resources/diesel-fuel-consumption-chart/> (access date: 10 November 2021).
- Yiğit, K., 2021a, "A study for the improvement of operating capacity in marine generators", *5th International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 21)*, 18-21 November, Konya, Turkey, 192-194.
- Yiğit, K., 2021b, "An examination of optimal operating schedule of ship generators", *2nd International Congress on Ship and Marine Technology (GMO-SHIPMAR 2021)*, 16-18 September, Istanbul, Turkey, 581-585.
- Yücel, A., Arpacı, A., Akpolat, E., Merve, E., Özdemir, U., 2020, "Boru profilli gemi jeneratör kaidelerinin titreşim açısından analitik ve sayısal analizi", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 600-616.
- Yücel, A., 2021, "Bir dizel gemi jeneratörünün operasyonel modal analizi", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(1), 224-233.



INTERVAL TYPE-2 FUZZY RULE-BASED BWM APPROACH FOR SUSTAINABLE SUPPLIER SELECTION

¹Müslüm ÖZTÜRK , ²Belkız TORĞUL , ³Turan PAKSOY 

¹ Kilis 7 Aralık University, Department of Computer Technologies, Kilis, TURKEY

² Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering, Konya, TURKEY

³ Necmettin Erbakan University, Faculty of Aviation and Space Sciences, Department of Aviation Management, Konya, TURKEY

¹mozturk@kilis.edu.tr, ²btorgul@ktun.edu.tr, ³tpaksoy@erbakan.edu.tr

(Geliş/Received: 04.09.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 23.02.2022)

ABSTRACT: Fuzzy logic is a theory based on human-specific approximate reasoning. Therefore, fuzzy logic applications can bring simple and more effective solutions to situations that classical methods cannot overcome. The type-1 fuzzy set is a set, which has a continuous (crisp) membership degree to which a membership degree between 0 and 1 is assigned, and is characterised by membership functions. Type-2 fuzzy sets, which have the power to express uncertainty better, are expressed by membership functions, where the membership degrees of each element belonging to that set also specify a fuzzy set. Therefore, type-2 fuzzy sets allow us to include the membership functions uncertainty in fuzzy set theory. Using expert knowledge and using sensitivity of human to reflect the level of the decision maker influence is expressed as a fuzzy rule based system. Recently, it has been seen that fuzzy rules are frequently used together with multi-criteria decision making (MCDM) methods. Again, combining fuzzy rules with type-2 fuzzy numbers is also found. In this study, the Best Worst Method (BWM), one of the MCDM methods, has been integrated with fuzzy rules based interval type-2. The developed hybrid method was defined as Interval Type-2 Fuzzy Rule-Based BWM (IT2 FRB BWM). The proposed hybrid method has an important place when there are alternatives with similar ranking positions. Thus, even if there is a small difference in each alternative, it will show the difference better (more sensitively). This makes the proposed hybrid method forceful and unique. The proposed approach has been applied to a sustainable supplier selection problem comparatively with the BWM. The results show that the IT2 FRB BWM approach is more successful in ordering alternatives than the classical BWM method.

Keywords: BWM, Interval Type-2 Fuzzy Sets, MCDM, Rule-Based System, Supplier Selection, Sustainability

Sürdürülebilir Tedarikçi Seçimi için Aralık Tip-2 Bulanık Kural Tabanlı BWM Yaklaşımı

ÖZ: Bulanık mantık, insana özgü yaklaşık akıl yürütmeye dayalı bir teoridir ve uygulamaları, klasik yöntemlerin içinden çıkamadığı durumlara daha etkili ve basit çözümler sunabilmektedir. Tip-1 bulanık küme, 0 ile 1 arasında bir üyelik derecesi atanmış sürekli (keskin) bir üyelik derecesine sahip olan ve üyelik fonksiyonları ile karakterize edilen bir kümedir. Belirsizliği daha iyi ifade etme gücüne sahip olan Tip-2 bulanık kümeler, o kümedeki her elemana ait üyelik derecelerinin de bir bulanık küme işaret ettiği üyelik fonksiyonları ile belirtilir. Bu sayede Tip-2 bulanık kümeler, bulanık küme teorisine üyelik fonksiyonları belirsizliğini dâhil etmemize izin verir. Uzman bilgisinin kullanılması ve karar verici etkisinin düzeyini yansıtmak için insan duyarlılığının kullanılması bulanık kural tabanlı bir sistem olarak ifade edilmektedir. Son zamanlarda bulanık kuralların çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri ile birlikte sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Yine bulanık kuralların Tip-2 bulanık sayılarla birleştirilmesi de mevcuttur.

Bu çalışmada, ÇKKV yöntemlerinden biri olan En İyi En Kötü Yöntemi (BWM), Aralık Tip-2'ye dayalı bulanık kurallarla bütünleştirilmiştir. Geliştirilen hibrit yöntem Aralık Tip-2 Bulanık Kural Tabanlı BWM Yaklaşımı olarak tanımlanmıştır. Önerilen hibrit yöntem, özellikle benzer sıralama konumlarına sahip alternatifler olduğunda bir etki faktörüne sahip olduğundan önemlidir. Nitekim her alternatifte küçük bir fark olsa bile farkı daha iyi (daha hassas) göstererek önerilen yöntemi güçlü ve benzersiz kılmaktadır. Önerilen yaklaşım, BWM ile karşılaştırılmalı olarak sürdürülebilir bir tedarikçi seçimi problemine uygulanmıştır. Sonuçlar, IT2 FRB BWM yaklaşımının klasik BWM yöntemine göre alternatifleri sıralamada daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: BWM, Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler, ÇKKV, Kural Tabanlı Sistem, Tedarikçi Seçimi, Sürdürülebilirlik

1. INTRODUCTION

Businesses have to supply the best quality product with the best cost and present it to the customers quickly in order to be able to sustain their existence in an increasingly competitive environment every day. Therefore, the oppression to create value for organizations and to find better ways to distribute this value to customers is increasing in today's competitive world. Businesses are looking for efficient methods to regulate management strategies and maintain competitive advantage because they face competitive market pressures such as globalization in competition and cooperation, diversifying in customer demands and shortening of product life cycle. For example, operations of the material requirements planning and the institutional resource planning are used to integrate resources. The aim of these tools is to decrease response time and increase customer satisfaction to meet customer demands. The managerial ability of each firm depends on the coordination and integration of complex business relationships between supply chain members (Chen and Huang, 2006). If we do not consider the selection and evaluation of successful suppliers in a competitive environment, it will be extremely difficult to control any production process at low cost, high quality and acceptable time.

Companies are facing new challenges that not only are the best economic performers but also require them to be more environmentally and socially responsible. As a result, firms are moving from a traditional business-related economic perspective to a more sustainable business model that consistent with notion of the triple bottom line (TBL) and includes three interconnected dimensions in their operations: economy, environment and society. Sustainability means integration of environmental and social dimensions with economic thinking. The sustainability perspective has evolved from within companies to supply chains perspective (Azevedo *et al.*, 2017). Sustainable supply chain management is increasingly focused by practitioners and researchers due to legal regulations, increased competitive pressure and awareness of social and environmental issues (Carter and Easton, 2011). Although managers recognize that the integration of sustainability into their supply chain is an opportunity, they rarely take this into account in tactical management decisions (Ikram *et al.*, 2020). Businesses must have effective communication not only among individual firms but also throughout the supply chain as a way to sharing the same sustainability principles with all relevant firms. As a result, suppliers, manufacturers, distributors and all other members act together for improving their TBL performance in the context of a sustainable supply chain (Azevedo *et al.*, 2017). Therefore, working with sustainable suppliers is a basis for businesses to make the entire supply chain sustainable. Decisions on sustainable practices have multi-level characteristics because TBL dimensions could be divided into hierarchical variables. For this reason, MCDM is recommended to deal with decisions involving multiple criteria simultaneously (Ikram *et al.*, 2020).

Supplier selection is a complex MCDM process that pays regard to qualitative/quantitative factors together to select competent suppliers (Guo & Li, 2014; Kannan *et al.*, 2013; Karaöz *et al.*, 2019; Özgen *et al.*, 2008; Sanayei *et al.*, 2008). This complexity arises from uncertain and uncontrolled factors, which are uncertain and may contradict with each other. Many decision making problems and solutions are too complex to be identified by quantitative numbers. Thanks to the fuzzy set theory, data classification is carried out with limits that cannot be precisely defined. Thus, the fuzzy set theory simulates human logic

by using a mathematical model and a solution to real-world problems can be provided in accordance with the thinking style of human (Bostancı *et al.*, 2017; Yilmaz *et al.*, 2001). Earlier times, supplier selection problems often focused on issues such as product cost, product delivery time, and product quality for supplier companies regardless of issues such as fuzzy rule base based on expert opinions and type-2 fuzzy sets being robust for handling uncertainty. The MCDM has taken considerable attention in solution of optimization problems recently (Awasthi *et al.*, 2011; Shidpour *et al.*, 2013; Şengül *et al.*, 2015). In the traditional MCDM problem formulations, human judgments are reflected by precise numbers. Besides, in common practical situations, the data might not be precise or the decision-makers may not be able to assign precise numerical values to the assessment (Kahraman *et al.* 2014). Some evaluation criteria are qualitative and subjective, making it tough for the decision-maker to state his/her preferences using precise numerical values (Tseng *et al.*, 2008). Traditional MCDM methods aren't effective enough in dealing with the uncertain or ambiguous nature of linguistic assessments (Kahraman *et al.*, 2003). The BWM, which has been used frequently recently, is a multi-criteria technique that makes comparisons using only two pairs of comparison vectors. Although BWM is both time-advantageous and offers more reliable results in controlling consistency, traditional BWM may not adequately deal with the vagueness and uncertainty present in many decision-making problems.

In type-1 fuzzy sets, a membership degree is defined with a membership function, which is valued in the interval $[0,1]$ for each element (Zadeh, 1965). Zadeh (1975) introduced the type-2 fuzzy set as an extension of the type-1 fuzzy set. Membership degrees of type-2 fuzzy sets are themselves fuzzy sets. They are quite helpful in situations in which it is hard to determine an accurate membership function for fuzzy sets (Karnik & Mendel, 2001). Therefore, if type-1 fuzzy sets are considered as the first-rank approach to real-world uncertainties, type-2 fuzzy sets could be seen as a second-rank approach to uncertainty. That is, type-1 fuzzy set membership functions are two-dimensional, whereas type-2 fuzzy set membership functions are three-dimensional, which provides supplemental degrees of freedom to directly model uncertainties (Kahraman *et al.*, 2014).

IT-2 fuzzy sets are an especial kind of classic type-2 fuzzy sets. All secondary membership functions of the IT-2 fuzzy sets take a crisp value like 1 instead of a function. Hence, secondary membership functions do not carry distinctive information in IT-2 fuzzy sets, and only use of boundary values of primary membership functions is enough in type-2 fuzzy logic operations. Therefore, IT-2 fuzzy sets are often used in general type 2 fuzzy systems, due to ease of calculation (Mendel *et al.*, 2006). Because of this reason, we used IT-2 fuzzy sets for rule based approach in this study and integrated with the BWM as it produces faster, more consistent and more reliable results by requiring less comparison data than other MCDM methods.

In this study, an IT-2 rule based BWM approach is developed and introduced into the literature for the first time. We can summarize the paper contributions to the literature as follows:

- The BWM and range type-2 fuzzy numbers and expert opinions (rule base) were included in the selection and a systematic analysis of the interdependencies existing between sustainable supplier criteria and expert opinions was made.
- As a result of the study, it has been seen that the proposed approach is successfully applied to sustainable supplier selection problems.
- It was observed that many of the previous studies used MCDM methods with IT-2 fuzzy sets but ignored rule base, which based on expert opinions. With this study, an integrated approach IT2 FRB BWM was presented for companies to make a more flexible, easier and more objective supplier assessment and expert opinions were included in their selection problem. Thus, it is expected that our hybrid approach will set an example for other similar applications and will contribute to the literature in this direction.
- There is no previous study using BWM with IT-2 fuzzy rule based systems and this study is the first in this field.

- The most important contribution of the paper to the literature is to offer a new solution with hybrid (IT2 FRB BWM) approach, which takes into account the objective and subjective data together, and quickly resolves with easy procedures.

1.1. Brief review of the literature

Within the sustainable supplier selection context, there are a lot of approaches in the literature based on various MCDM methods, implemented singly or combined with a wide variety of techniques in different forms. Regarding methods used individually in sustainable supplier selection, the most frequently used is TOPSIS (Nourmohamadi Shalke *et al.* (2018); TOPSIS, Mohammed (2019); Fuzzy-TOPSIS and Li *et al.* (2019); TOPSIS with Rough Set Theory) followed by AHP (Khoshfetrat *et al.* (2020); AHP, Laosirihongthong *et al.* (2019); Fuzzy-AHP, Xu *et al.* (2019); AHP Sort II with Interval Type-2 Fuzzy Sets) with their fuzzy versions. Apart from these, other individual methods: ANP, Ghadimi *et al.* (2017); VIKOR, Demir *et al.* (2018); ELECTRE, Lu *et al.* (2018); TODIM, Qin *et al.* (2017); DEA, Zarbakhshnia and Jaghdani (2018); DEMATEL, Song *et al.* (2017) have also been used frequently (Schramm *et al.*, 2020).

As for MCDM methods based on the integration of different techniques; Tavana *et al.* (2017) provided a novel integrated MCDM approach using ANP, QFD, AHP, WASPAS, MOORA and COPRAS to sustainable supplier selection problems. Yazdani *et al.* (2017) put forwarded an integrated approach using DEMATEL, QFD and COPRAS for green supplier selection. Zhou and Xu (2018) proposed an integrated decision making method using DEMATEL, ANP and FVIKOR for sustainable supplier selection. Yıldızbaşı *et al.* (2020) evaluated four automotive suppliers in terms of social sustainability using FAHP and FTOPSIS. Simic *et al.* (2021) introduced an integrated CRITIC and MABAC based type-2 neutrosophic model for public transportation pricing system selection.

BWM, one of the MCDM methods, primarily determines the best and worst criteria and only makes comparisons between these criteria and other criteria, thus using only two pairwise comparison vectors generated based on two opposite references (best and worst) in a single optimization model. Methods using a single vector, such as SMART, cannot control the consistency of pairwise comparisons, although they are time advantageous in the case of a lot of data based on pairwise comparisons. Methods using a full matrix, such as AHP, provide the ability to check the consistency of pairwise comparisons but are time-inefficient if there is a lot of data. BWM, on the other hand, stands in the middle according to the methods in both structures. In other words, it provides the opportunity to check the consistency of pairwise comparisons, while at the same time it is a time-efficient method in the case of large amounts of data (Rezaei, 2020). These conveniences motivate researchers to implement BWM instead of other MCDM methods.

In the current literature, the BWM was used in integration with different methods on sustainable supplier selection such as Gupta and Barua (2017) and Lo *et al.* (2018); BWM- Fuzzy-TOPSIS, Cheraghali and Farsad (2018); BWM- Revised Multi-Choice Goal Programming, Bai *et al.* (2019); BWM- Grey-TODIM, Ghoushchi *et al.* (2019); Fuzzy-BWM- Piecewise linear values function and H.C. Liu *et al.* (2019); BWM- Alternative Queuing (Schramm *et al.*, 2020). Although there are studies on supplier selection using BWM with Interval type-2 fuzzy numbers by Wu *et al.* (2019) and Qin and Liu (2019), there are no previous works on sustainable supplier selection using BWM with IT-2 fuzzy rule based system. Therefore, a summary of closely related studies in the literature of the three methods we have applied for this paper is presented below.

The current studies in the literature on IT-2 fuzzy sets, Rule-based system and BWM for selection problems are summarized in Table 1.

As shown in Table 1, there is no previous study using the combination of BWM, rule-based system and IT-2 fuzzy sets. The novelty of our study is that it gives a different perspective to the evaluation of supplier alternatives with a new integrated approach that uses all three together and contributes to the literature.

Table 1. Summary of previous research on rule-based systems, interval type-2 fuzzy sets and BWM methods for selection (supplier) processes

Author / Authors	Methodology	Application Area
Chai <i>et al.</i> (2012)	Rule-Based Superiority and Inferiority Ranking Approach under Intuitionistic Fuzzy Environments	Supplier selection
Macioł <i>et al.</i> (2013)	Rule Based Reasoning Systems, AHP	Supplier evaluation and classification
Paul (2015)	Rule-Based Fuzzy Inference System	Supplier selection for managing supply risks in supply chain
Kadaifci <i>et al.</i> (2019)	Fuzzy Rule-Based System, AHP based on Absolute Measurement	Container transshipment terminal selection
Rafigh <i>et al.</i> (2021)	Fuzzy Rule-Based Multi-Criterion Approach	Cooperative green supplier selection problem
Yaakob <i>et al.</i> (2015)	IT-2 - Fuzzy Rule based System Approach using TOPSIS	Selection of alternatives
Kahraman <i>et al.</i> (2014)	IT-2 Fuzzy Sets, AHP	Supplier selection
Keshavarz Ghorabae <i>et al.</i> (2014)	IT-2 Fuzzy Sets, COPRAS	Supplier selection problems
Heidarzade <i>et al.</i> (2016)	IT-2 Fuzzy Sets, Distance measure, Hierarchical clustering	Supplier selection
Zhong and Yao (2017)	IT-2 Fuzzy Sets, ELECTRE	Supplier selection
Mousakhani <i>et al.</i> (2017)	IT-2 Fuzzy Sets, TOPSIS	Green supplier selection
Qin <i>et al.</i> (2017)	IT-2 Fuzzy Sets, TODIM	Green supplier selection
Xu <i>et al.</i> (2019)	IT-2 Fuzzy Sets, AHPSort II	Sustainable supplier selection
P. Liu <i>et al.</i> (2019)	IT-2 Fuzzy Sets, QFD, Partitioned Bonferroni mean operator	Green supplier selection
Alikhani <i>et al.</i> (2019)	IT-2 Fuzzy Sets, VIKOR, DEA	Strategic supplier selection under sustainability and risk criteria
Bera <i>et al.</i> (2021)	IT-2 Fuzzy Sets, TOPSIS	Supplier selection
Yucesan <i>et al.</i> (2019)	IT-2 Fuzzy Sets, BWM, TOPSIS	Green supplier selection
Wu <i>et al.</i> (2019)	IT-2 Fuzzy BWM and VIKOR	Green supplier selection
Qin and Liu (2019)	IT-2 Fuzzy BWM and COPRAS	Emergency material supplier selection problem
Celik <i>et al.</i> (2021)	IT-2 Fuzzy BWM-TODIM	Green supplier selection
Hoseini <i>et al.</i> (2022)	IT-2 Fuzzy BWM-TOPSIS	Resilient supplier selection problem
Rezaei <i>et al.</i> (2015)	BWM	Supplier segmentation process for supplier evaluation
Rezaei <i>et al.</i> (2016)	BWM	Supplier selection problem for a food supply chain
Gupta and Barua (2017)	BWM, Fuzzy TOPSIS	Green supplier selection
Cheraghalipour and Farsad (2018)	BWM, Revised Multi-Choice Goal Programming	Sustainable supplier selection and order allocation problem
Lo <i>et al.</i> (2018)	BWM, Fuzzy TOPSIS and Fuzzy multi objective linear programming	Green supplier selection and order allocation problem
Aboutorab <i>et al.</i> (2018)	ZBWM method by integrating Z-numbers	Supplier development problem
Haeri and Rezaei (2019)	BWM, Fuzzy gray cognitive methods, Gray relational analysis method	Green supplier selection
Govindan <i>et al.</i> (2019)	BWM- COPRAS	Sustainable third-party reverse logistics providers selection
Gan <i>et al.</i> (2019)	Fuzzy BWM and the Modular TOPSIS	Resilient supplier selection problem
H. C. Liu <i>et al.</i> (2019)	BWM, Interval-valued intuitionistic uncertain linguistic sets, Alternative queuing method	Sustainable supplier selection
Aijun <i>et al.</i> (2019)	Interval-valued pythagorean hesitant fuzzy BWM group decision-making	Third-party reverse logistics providers selection
Pamucar <i>et al.</i> (2019)	BWM-WASPAS-MABAC model based on interval rough numbers	Assessment of third-party logistics provider
Garg and Sharma (2020)	BWM - VIKOR	Sustainable outsourcing partners selection
Javad <i>et al.</i> (2020)	BWM, Fuzzy TOPSIS	Green supplier selection
Kannan <i>et al.</i> (2020)	BWM, Interval VIKOR	Sustainable circular supplier selection
Ecer and Pamucar (2020)	Fuzzy BWM, Fuzzy CoCoSo, Bonferroni functions	Sustainable supplier selection
Amiri <i>et al.</i> (2021)	Fuzzy BWM, SAW	Sustainable supplier selection
Fallahpour <i>et al.</i> (2021)	Fuzzy DEMATEL- BWM- ANP	Sustainable-resilient supplier selection problem
Kazemitash <i>et al.</i> (2021)	Rough BWM	Green supplier selection

The remaining paper is structured as follows: General type 2 and IT-2 fuzzy sets and BWM method are presented and after all, the proposed IT-2 fuzzy rule based BWM approach and adopted solution approach are explained in Section 2. In Section 3, numerical data based on application study are given and this study is conducted for sustainable supplier selection problem by testing the proposed approach. Section 4 presents the analysis results of the application study, and Section 5 gives in the general discussion and conclusion.

2. METHODOLOGIES

2.1. General type-2 and interval type-2 fuzzy sets

In this section, a number of type 2 fuzzy sets and IT-2 fuzzy sets definitions are concisely explained (Awasthi *et al.*, 2011).

A type-2 fuzzy set \check{A} in the universe of discourse X is represented by a type-2 membership function $\mu_{\check{A}}$, indicated as follows (Zadeh, 1975):

$$\text{Definition 2.1.1. } \check{A} = \left\{ (x, u), \mu_{\check{A}}(x, u) / \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1], 0 \leq \mu_{\check{A}}(x, u) \leq 1 \right\} \quad (1)$$

Where J_x indicates an interval $[0, 1]$. \check{A} is represented as follows (Mendel *et al.*, 2006):

$$\check{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\check{A}}(x, u) / (x, u) \quad (2)$$

Where $J_x \subseteq [0, 1]$ and \int indicates union over all acceptable x and u .

Let \check{A} be a type-2 fuzzy set in X represented by $\mu_{\check{A}}$. If all $\mu_{\check{A}}(x, u) = 1$, then \check{A} is called an interval type-2 fuzzy set (Buckley, 1985). \check{A} is regarded as a specific state of a type-2 fuzzy set, represented as follows (Mendel *et al.*, 2006):

$$\check{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1 / (x, u) \quad (3)$$

Where $J_x \subseteq [0, 1]$.

Arithmetic operations of trapezoidal IT-2 fuzzy sets are presented in following (Senturk *et al.*, 2017).

Definition 2.1.2. The upper and the lower membership function of an IT-2 fuzzy set are both type-1 membership functions (Mendel *et al.*, 2006).

$$\tilde{A}_i = (\tilde{A}_i^U, \tilde{A}_i^L) = \left((a_{i1}^u, a_{i2}^u, a_{i3}^u, a_{i4}^u; h_1(\tilde{A}_i^U), h_2(\tilde{A}_i^U)), (a_{i1}^l, a_{i2}^l, a_{i3}^l, a_{i4}^l; h_1(\tilde{A}_i^L), h_2(\tilde{A}_i^L)) \right) \quad (4)$$

Where \tilde{A}_i^U and \tilde{A}_i^L are type-1 fuzzy sets, $a_{i1}^u, a_{i2}^u, a_{i3}^u, a_{i4}^u, a_{i1}^l, a_{i2}^l, a_{i3}^l, a_{i4}^l$ are the reference points of the IT-2 fuzzy set \tilde{A}_i^U , $h_j(\tilde{A}_i^U)$ indicates the membership value of $a_{i(j+1)}^u$ in \tilde{A}_i^U while $1 \leq j \leq 2$, $h_j(\tilde{A}_i^L)$ indicates the membership value of $a_{i(j+1)}^l$ in \tilde{A}_i^L while $1 \leq j \leq 2$, $h_1(\tilde{A}_i^U) \in [0, 1]$, $h_2(\tilde{A}_i^U) \in [0, 1]$, $h_1(\tilde{A}_i^L) \in [0, 1]$, $h_2(\tilde{A}_i^L) \in [0, 1]$, $1 \leq i \leq n$.

In Figure 1 as an example, it is shown that $h_1(\tilde{A}_i^L)$ is equal to $h_2(\tilde{A}_i^L)$ described with the label h_L and $h_1(\tilde{A}_i^U)$ equals $h_2(\tilde{A}_i^U)$, described with the label h_U and $a_{i1}^u, a_{i2}^u, a_{i3}^u, a_{i4}^u, a_{i1}^l, a_{i2}^l, a_{i3}^l, a_{i4}^l$ are illustrated as; $a_1^u, a_2^u, a_3^u, a_4^u, a_1^l, a_2^l, a_3^l, a_4^l$ (Türk *et al.*, 2014).

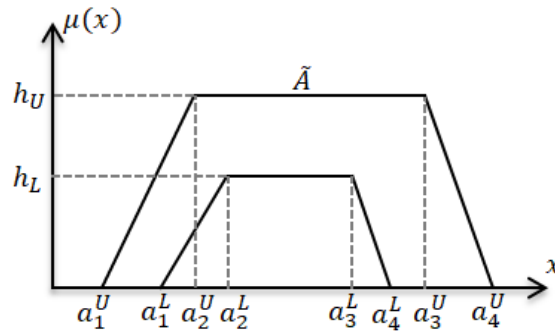


Figure 1. \tilde{A}^U, \tilde{A}^L of the IT-2 fuzzy set \tilde{A}

Addition and multiplication from algebraic operations used in this paper are defined as follows for \tilde{A}_1 and \tilde{A}_2 (Mendel *et al.*, 2006);

$$\tilde{A}_1 = (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) = (a_{11}^u, a_{12}^u, a_{13}^u, a_{14}^u; h_1(\tilde{A}_1^U), h_2(\tilde{A}_1^U)), (a_{11}^l, a_{12}^l, a_{13}^l, a_{14}^l; h_2(\tilde{A}_1^L), h_1(\tilde{A}_1^L)) \tag{5}$$

and

$$\tilde{A}_2 = (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) = (a_{21}^u, a_{22}^u, a_{23}^u, a_{24}^u; h_1(\tilde{A}_2^U), h_2(\tilde{A}_2^U)), (a_{21}^l, a_{22}^l, a_{23}^l, a_{24}^l; h_1(\tilde{A}_2^L), h_2(\tilde{A}_2^L)) \tag{6}$$

Definition 2.1.3. The addition operation is:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 \oplus \tilde{A}_2 &= (\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) \oplus (\tilde{A}_2^U, \tilde{A}_2^L) \\ &= \left(\left(a_{11}^u + a_{21}^u, a_{12}^u + a_{22}^u, a_{13}^u + a_{23}^u, a_{14}^u + a_{24}^u; \min(h_1(\tilde{A}_1^U), h_1(\tilde{A}_2^U)), \min(h_2(\tilde{A}_1^U), h_2(\tilde{A}_2^U)) \right), \right. \\ &\quad \left. \left(a_{11}^l + a_{21}^l, a_{12}^l + a_{22}^l, a_{13}^l + a_{23}^l, a_{14}^l + a_{24}^l; \min(h_1(\tilde{A}_1^L), h_1(\tilde{A}_2^L)), \min(h_2(\tilde{A}_1^L), h_2(\tilde{A}_2^L)) \right) \right) \end{aligned} \tag{7}$$

(Mendel *et al.*, 2006).

Definition 2.1.4. Multiplying a fuzzy set by a constant k is:

$$k\tilde{A}_1 = k(\tilde{A}_1^U, \tilde{A}_1^L) = (ka_{11}^u, ka_{12}^u, ka_{13}^u, ka_{14}^u; h_1(\tilde{A}_1^U), h_2(\tilde{A}_1^U)), (ka_{11}^l, ka_{12}^l, ka_{13}^l, ka_{14}^l; h_1(\tilde{A}_1^L), h_2(\tilde{A}_1^L)) \tag{8}$$

(Türk *et al.*, 2014).

2.2. Best worst method (BWM)

The BWM, introduced by Rezaei in 2015, is an MCDM method, which requires fewer comparison data, provides more reliable, more consistent results compared to current MCDM methods (Rezaei, 2015).

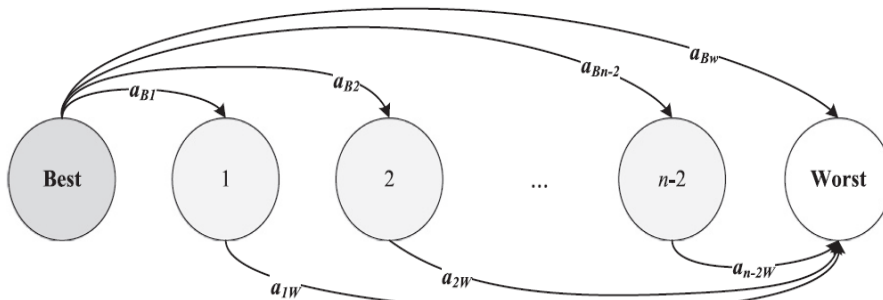


Figure 2. Reference comparisons (Rezaei, 2015)

The BWM steps are given below (Rezaei, 2015, 2016; Rezaei *et al.*, 2016; Rezaei *et al.*, 2015);

Step 1. Determining a decision criteria set. N criteria, which are effective for the decision problem are identified by the decision maker $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$.

Step 2. Determining the best and the worst (most and least important) criteria.

Step 3. Determining the best criterion preference over all the other criteria, using a number between 1 and 9. The resulting best-to-others (BO) vector should be: $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$, where a_{Bj} denotes the best criterion B preference over criterion j , and it is explicit that $a_{BB} = 1$.

Step 4. Determining all the criteria preference over the worst criterion, using a number between 1 and 9. The resulting others-to-worst (OW) vector should be: $A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T$, where a_{jW} denotes the criterion j preference over the worst criterion W , and it is explicit that $a_{WW} = 1$.

Step 5. Finding the optimal weights ($W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*$).

The goal is to identify the optimal criteria weights, such that the maximum absolute differences $|\frac{W_B}{W_j} - a_{Bj}|$ and $|\frac{W_j}{W_w} - a_{jW}|$ for all j is minimized, and it could be converted to the following minimax model:

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{W_j}{W_w} - a_{jW} \right| \right\} \quad (9)$$

s.t.

$$\sum_j W_j = 1 \quad (10)$$

$$W_j \geq 0, \quad \forall j, j = 1, 2, \dots, J \quad (11)$$

Model (9)-(11) is converted to a linear optimization model as follows:

$$\min \xi^L \quad (12)$$

$$|W_B - a_{Bj}W_j| \leq \xi^L, \quad \forall j, j = 1, 2, \dots, J \quad (13)$$

$$|W_j - a_{jW}W_w| \leq \xi^L, \quad \forall j, j = 1, 2, \dots, J \quad (14)$$

$$\sum_j W_j = 1 \quad (15)$$

$$W_j \geq 0, \quad \forall j, j = 1, 2, \dots, J \quad (16)$$

Solving Model (12)-(16), $W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*$ and ξ^{L*} are obtained.

For linear model, ξ^{L*} is considered as a consistency indicator of the comparisons, and ξ^{L*} values close to zero indicate a high level of consistency.

The normalized scores of the alternatives are obtained using Eq. (17).

$$X_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij}}{\max\{X_{ij}\}}, & \text{if } x \text{ is positive (such as quality),} \\ 1 - \frac{X_{ij}}{\max\{X_{ij}\}}, & \text{if } x \text{ is negative (such as price).} \end{cases} \quad (17)$$

The final aggregate score per alternative (V_i) could be calculated with the optimal criteria weights (W_j) and the normalized the alternatives scores on the different criteria (X_{ij}) as shown in Eq. (18).

$$V_i = \sum_j W_j X_{ij} \quad (18)$$

2.3. Interval type-2 fuzzy rule based BWM (IT2 FRB BWM) approach:

The BWM (Rezaei, 2015) which had been presented in five-step above, was developed by us and presented as an IT2 FRB BWM approach consisting of eight steps. The first five steps of the proposed

method (the steps of BWM) are explained above and the remaining three steps (recommended by us) are explained below.

Step 6. Calculating the normalized performance value (NV_i) of each alternative;

At this stage, each V_i value calculated in Eq. (18) should be normalized as shown in Eq. (19) to ensure that they are between 0 and 1.

$$NV_i = V_i / \max_i V_i \tag{19}$$

Step 7: The premise (Λ) and result (χ) matrices

A premise matrix is calculated as shown in Eq. (20).

$$\Lambda = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{mn} \end{bmatrix} \tag{20}$$

Where, the X_{ij} value is a linguistic label of each alternative, representing the decision maker's opinion according to the criteria. Firstly, a value is obtained in Step 7 for each alternative, which are defined by the decision makers. Once NV_{ik} (NV_i * σ_k) for each alternative defined by each decision-maker is got, this value is used to assign the result of alternative rules according to the fuzzy set with higher membership in Table 2, which is prepared by consulting experts in the field. The matrix of the results is then defined as seen in Eq. (21).

Table 2. Linguistic Labels for Alternative Levels

Linguistic variables	Trapezoidal interval type-2 fuzzy scales
Very Bad (VB)	(0.04,0.1,0.15,0.20;1,1)(0.05,0.12,0.14,0.17;0.8,0.8)
Bad (B)	(0.20,0.26,0.34,0.40;1,1)(0.24,0.28,0.36,0.38;0.8,0.8)
Medium (M)	(0.40,0.46,0.54,0.60;1,1)(0.44,0.48,0.50,0.58;0.8,0.8)
Good (G)	(0.60,0.66,0.74,0.80;1,1) (0.63, 0.70, 0.76, 0.78;0.8,0.8)
Very Good (VG)	(0.80,0.85,0.95,1.00;1,1) (0.83,0.88,0.91,0.97;0.8,0.8)

$$X = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_m \end{bmatrix} \tag{21}$$

Where, Y_k is an expression based on a linguistic term that shows the system output based on Table 2 of the significance level of the alternative founded in Eq. (19). For this reason, the If-Then rules of the premise and result matrices in Eq. (20) and (21) can be written as follows:

If C₁=X₁₁ **and** C₂=X₁₂ **and**.... **and** C_{1n}=X_{1n} **then** A₁=Y₁

If C₁=X₂₁ **and** C₂=X₂₂ **and** **and** C_{2n}=X_{2n} **then** A₁=Y₂

•
•
•

If $C_1=X_{m1}$ and $C_2=X_{m2}$ and....and $C_{mn}=X_{mn}$ then $A_1=Y_m$

Step 8: The final score of each alternative (F_i) is given in Eq. (22).

$$F_i = \lambda_i * \Omega_i \quad (22)$$

Where, the λ_i in Eq. (21) is the crisp value of summed (aggregated) membership function of the output, and λ_i is calculated using Eq. (23).

$$\lambda_i = \frac{\sum_{k=1}^K \alpha_{ik}}{K} \quad (23)$$

Where, $\alpha_{ik} \in Y_k$ is the maximum output membership. The IT2 FRB BWM approach will be used to obtain a better ranking in this example. This method is especially important in that it is an effect multiplier when there are alternatives with similar ranking positions. This method will show difference better (more sensitive), even if there is a small difference in every alternative. In order to calculate the influence value (Ω_i) in general, a marginal proximity coefficient with a maximum membership degree which is given in Eq. (24) below is used.

$$\Omega_i = \frac{\sum_{k=1}^K (NV_i * \sigma_k)}{K} \quad (24)$$

σ_k is the influence degree of each decision-maker and takes values between 0 and 1. After calculating λ_i and Ω_i values, F_i is calculated using Eq. (22). Then, the ranking order of whole alternatives could be designated from the value of F_i . Where, the alternative having higher value of F_i is specified as the best alternative.

3. AN APPLICATION STUDY

In this section, proposed IT2 FRB BWM approach is implemented to a sustainable supplier selection problem. The decision model of the problem is presented in Figure 3. The implementation process consists two stages; In the first stage, the criteria and alternatives for the problem were determined in line with the BWM and the evaluation process was initiated by the committee consisting of experts. In the next stage, the fuzzy rule-based system in the direction of three experts' evaluations with the weights obtained by BWM was applied and the alternatives were more precisely ordered.

3.1. Decision Model

Top managers of an auto part manufacturing company responsible for production, finance and marketing want to identify the most suitable sustainable suppliers for them. After the preliminary screening, company managers identified five potential suppliers for further evaluation and then, they evaluated alternatives on the sustainability factor. These evaluations were determined by the common opinions of the decision-makers in consultation with the committee. Sustainability is a holistic approach contain economic, environment and social dimensions. In determining the sustainable supplier selection criteria, previous studies (Awasthi *et al.*, 2018; Büyüközkan and Çifçi, 2012; Ecer and Pamucar, 2020; Govindan *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2019; Luthra *et al.*, 2017; Memari *et al.*, 2019; Rashidi and Cullinane 2019) have been considered in this field. Nine criteria in total including three criteria from each dimensions,

were determined under the three dimensions of sustainability for evaluation. The nine criteria with their descriptions are given in Table 3.

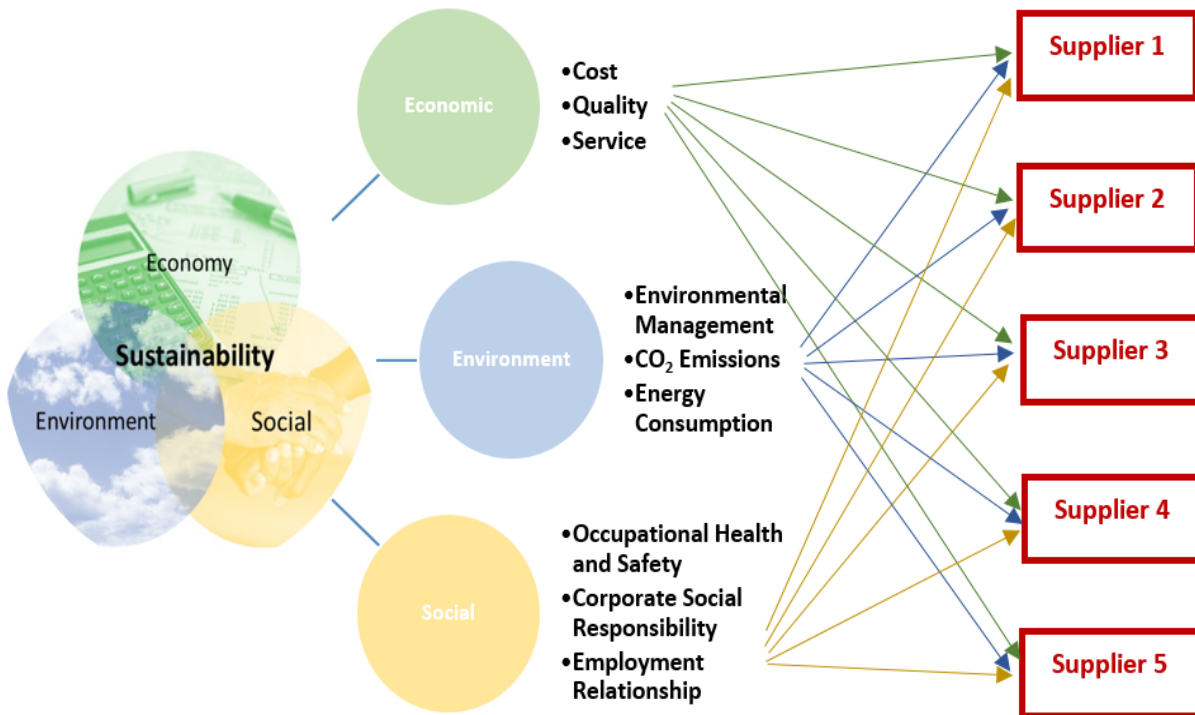


Figure 3. Hierarchical Structure of the Decision Problem

Table 3. Sustainable supplier selection criteria with their definitions

Criteria Name	Code	Definitions
Cost	C1	Cost is a monetary valuation incurred in the production and delivery of a good or service. / Unit product cost identified by potential suppliers.
Quality	C2	Quality is defined as the product performance, durability and meet the quality specifications. / The ratio of the quality product numbers to the total number of products.
Service	C3	Service can include supply ability, lead-time, delivery time, flexibility, communication, location, and transportation. / The ratio of the on time delivered product numbers to the total number of products.
Environmental Management	C4	The supplier's responsibility to perform recovery operations, minimize damage and possess environmental certificates such as environmental policies, ISO-14000. / The performance level of environmental responsibility by suppliers.
CO ₂ Emissions	C5	The treatment and quantity control of hazardous emissions such as CO, CO ₂ , SO ₂ , NH ₃ , and HC ₁ . / The amount of CO ₂ emission that occurs when the unit product is supplied.
Energy Consumption	C6	The controls and the reduce efforts to energy consumption, and use renewable energy. / The amount of energy consumption that occurs when the unit product is supplied.
Occupational Health and Safety	C7	The reviews and practices aimed at ensuring the protection of employees with laws and regulations and communiqués. / The ability to provide occupational health and safety by potential suppliers.
Corporate Social Responsibility	C8	The business attitude that effort to fulfill responsibilities towards society in areas such as education, environment, health and culture. / The level of fulfillment of social responsibility by potential suppliers.
Employment Relationship	C9	The supplier's labor relations - relationship between management, workforce and stakeholders./ The level of fulfillment of employment terms and conditions by potential suppliers.

3.2. Application of IT2 FRB BWM approach

In this section, the applicability of IT2 FRB BWM methodology in sustainable supplier selection is shown step by step. The decision problem aim is choosing the best of five alternative suppliers, taking into account nine criteria.

Step 1. The evaluation process was started by creating an expert committee and the criteria and alternatives of the problem were determined.

Step 2. The best criterion is the most important one, while the worst criterion is the least important one in sustainable supplier selection on the basis of decision-maker(s) opinion. As a result of consultations with experts, the best criterion was determined as Quality (C2) and the worst criterion was determined as Corporate Social Responsibility (C8) for sustainable supplier selection problem.

Step 3. The best criterion preference over all the other criteria (BO vector) was determined.

Step 4. The all the criteria preferences over the worst criterion (OW vector) was determined.

The pair-wise comparison vectors for the criteria are as exhibited in Table 4.

Table 4. Pair-wise comparison vectors.

BO	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Best objective functions: C2	2	1	3	5	6	6	7	9	7
OW	Worst objective functions: C8								
C1						8			
C2						9			
C3						7			
C4						5			
C5						4			
C6						4			
C7						2			
C8						1			
C9						2			

Step 5. The optimal weights were calculated. When the decision variables are written according to the Eq. (12)-(16), the final version of the model is as follows;

$$\min \xi^L \tag{25}$$

$$|W_2 - a_{2j}W_j| \leq \xi^L, \quad \forall j, j = 1, 2, \dots, 9 \tag{26}$$

$$|W_j - a_{j8}W_8| \leq \xi^L, \quad \forall j, j = 1, 2, \dots, 9 \tag{27}$$

$$\sum_{j=1}^9 W_j = 1 \tag{28}$$

$$W_j \geq 0, \quad \forall j, j = 1, 2, \dots, 9 \tag{29}$$

The above model that variables are weight values and target is consistency value (ξ) was solved with the General Algebraic Modeling System (GAMS) 23.3 software, a high level programming language used for solving modeling and optimization problems, and the weights minimizing consistency (ξ) were calculated as follows:

$w_1 = 0.196, w_2 = 0.324, w_3 = 0.131, w_4 = 0.078, w_5 = 0.065, w_6 = 0.065, w_7 = 0.056, w_8 = 0.028, w_9 = 0.056$ and $\xi^L = 0.068$. These weights will be used to obtain criteria weighted supplier performance scores by multiplying with the supplier performance scores in Table 6.

The comparisons prove a very-high consistency since the consistency indicator (ξ^L) value is close to zero. As it can be seen from the results of criteria weights above, in terms of the expert committee, the most important criterion is Quality, followed by Cost and Service for supplier selection.

The following steps have been implemented to establish the supplier selection framework.

Firstly, the supplier performances on the all different criteria are defined by decision-maker expertise. Likert scale (nine-point: 1-very low to 9-very high) is used for the qualitative criteria such as social sustainability, and objective measures (\$, ratio, kg, etc.) are used for other criteria such as cost. The ratio for quality is calculated by dividing the quality product numbers by the sum of product numbers and the ratio for service is calculated by dividing the on time delivered product numbers by the sum of product numbers. The decision matrix is demonstrated in Table 5.

Table 5. Decision Matrix of supplier performances.

Unit	\$/unit	Ratio (%)	Ratio (%)	Likert scale	kg/unit	kWh/unit	Likert scale	Likert scale	Likert scale
Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Suppliers									
S1	97	75	86	5	1.62	0.05	9	8	7
S2	90	70	75	4	1.85	0.06	7	5	6
S3	88	60	70	4	1.77	0.04	6	7	4
S4	99	90	80	8	1.43	0.08	5	6	5
S5	95	85	90	6	1.65	0.07	4	7	6
Criteria Weights	0.196	0.324	0.131	0.078	0.065	0.065	0.056	0.028	0.056

Then, the supplier scores are normalized using Eq. (17). The normalized scores are summarized in Table 6.

Table 6. Normalized Decision Matrix.

	<i>Economic</i>			<i>Environment</i>			<i>Social</i>		
Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Suppliers									
S1	0.03	0.83	0.96	0.63	0.12	0.38	1.00	1.00	1.00
S2	0.10	0.78	0.83	0.50	0.00	0.25	0.78	0.63	0.86
S3	0.12	0.67	0.78	0.50	0.04	0.50	0.67	0.88	0.57
S4	0.01	1.00	0.89	1.00	0.23	0.00	0.56	0.75	0.71
S5	0.05	0.94	1.00	0.75	0.11	0.13	0.44	0.88	0.86
Criteria Weights	0.196	0.324	0.131	0.078	0.065	0.065	0.056	0.028	0.056

Finally, weighted normalized scores given in Table 7 and overall scores given in Table 8 of the suppliers are found using Eq. (18).

Table 7. Weighted Normalized Decision Matrix.

	<i>Economic</i>			<i>Environment</i>			<i>Social</i>		
Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Suppliers									
S1	0.006	0.270	0.125	0.049	0.008	0.024	0.056	0.028	0.056
S2	0.020	0.252	0.109	0.039	0.000	0.016	0.044	0.018	0.048
S3	0.024	0.216	0.102	0.039	0.003	0.033	0.037	0.025	0.032
S4	0.002	0.324	0.116	0.078	0.015	0.000	0.031	0.021	0.040
S5	0.010	0.306	0.131	0.059	0.007	0.008	0.025	0.025	0.048

Table 8. Outranking of Alternative Suppliers.

Supplier	Scores	Ranks
S1 (V ₁)	0.622	2
S2 (V ₂)	0.545	4
S3 (V ₃)	0.510	5
S4 (V ₄)	0.627	1
S5 (V ₅)	0.618	3

According to the results presented in Table 8, the ranking of the suppliers in the order are S4, S1, S5, S2 and S3.

Step 6. Calculating the normalized performance value of each alternative (NV_i);

The calculated performance values of alternatives in Table 8 should be normalized before being matched to the linguistic labels in Table 2. As an instance in this paper; according to the score values calculated for our five supplier alternatives, V₄ = 0.627 is the maximum value; Using Eq. (19), normalized performance values of each alternative are calculated as follows:

$$NV_1 = 0.622 / 0.627 = 0.992 \tag{30}$$

$$NV_2 = 0.545 / 0.627 = 0.869 \tag{31}$$

$$NV_3 = 0.510 / 0.627 = 0.813 \tag{32}$$

$$NV_4 = 0.627 / 0.627 = 1 \tag{33}$$

$$NV_5 = 0.618 / 0.627 = 0.985 \tag{34}$$

Step 7: The premise (Λ) and result (χ) matrices;

Each decision maker has the t matrix of each premise and the result.

$$\text{If } \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ R_m \end{matrix} \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{mn} \end{bmatrix} \text{Then } \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_m \end{bmatrix} \tag{35}$$

Where, a rule has a form that is shown below;

If X₁₁=VS and X₁₂=VS and X₁₃=VS and X₁₄=VS and..... and X_{1n}=VS then Y₁=VG.

Here, since the influence degree of all decision-makers is 1, the NV_i value could be matched to the linguistic labels in Table 2 for all alternatives. Because NV_{ik} would be equals NV_i. For example; if NV₁ = 0.992 then Y₁ in Table 2 belongs to the VS (Very Good) interval type 2 fuzzy set. Likewise, NV₂ = 0.869 belongs to VG (Very Good), NV₃ = 0.813 belongs to VG (Very Good), NV₄ = 1 belongs to VG (Very Good) and NV₅ = 0.985 belongs to VG (Very Good) IT-2 fuzzy set. Alternative levels of alternatives corresponding to calculated NV_i values are given in Table 9.

Table 9. Calculated NV_i Values for Alternatives and Alternative Levels

	Interval Type-2 Fuzzy Values of Calculated NV_i Values	Alternative Levels of Calculated NV_i Values
S1 (NV_1)	0.992	VG
S2 (NV_2)	0.869	VG
S3 (NV_3)	0.813	VG
S4 (NV_4)	1	VG
S5 (NV_5)	0.985	VG

Step 8: Final Scores (F_i);

The final score (F_i) is calculated for each alternative by using Eq. (22). For example, assuming that the three rules R1, R2, R3 from three decision-makers (using Table 10) operate for S1 alternative, the final score (F_1) for the S1 alternative is calculated as follows:

Table 10. A Sample Rule Base generated by Expert Decision Makers

R1	If C1=VG And C2=VG And C3=VG And C4=VG And C5=VG And C6=VG And C7=VG And C8=VG And C9=VG Then S1=VG
R2	If C1=VG And C2=G And C3=G And C4=VG And C5=VG And C6=M And C7=M And C8=VG And C9=G Then S1=VG
R3	If C1=M And C2=G And C3=VG And C4=VG And C5=M And C6=VG And C7=M And C8=VG And C9=G Then S1=VG
R4	If C1=M And C2=M And C3=B And C4=VB And C5=M And C6=M And C7=B And C8=M And C9=M Then S1=M
R5	If C1=VG And C2=VG And C3=VG And C4=VG And C5=VG And C6=VG And C7=VG And C8=VG And C9=VG Then S2=VG
R6	If C1=VG And C2=G And C3=VG And C4=G And C5=VG And C6=G And C7=VG And C8=VG And C9=VG Then S2=VG
R7	If C1=VG And C2=G And C3=G And C4=VG And C5=M And C6=VG And C7=VG And C8=VG And C9=VG Then S2=VG
R8	If C1=G And C2=G And C3=G And C4=G And C5=M And C6=VG And C7=G And C8=VG And C9=G Then S2=G
R9	If C1=G And C2=VG And C3=VG And C4=G And C5=VG And C6=G And C7=VG And C8=M And C9=VG Then S3=VG
R10	If C1=VG And C2=G And C3=G And C4=VG And C5=VG And C6=G And C7=VG And C8=M And C9=VG Then S3=VG
R11	If C1=VG And C2=VG And C3=G And C4=M And C5=M And C6=G And C7=VG And C8=VG And C9=VG Then S3=VG
R12	If C1=G And C2=G And C3=M And C4=G And C5=M And C6=VG And C7=G And C8=G And C9=G Then S3=G
R13	If C1=VG And C2=VG And C3=VG And C4=G And C5=G And C6=VG And C7=VG And C8=M And C9=VG Then S4=VG
R14	If C1=VG And C2=M And C3=VG And C4=B And C5=VG And C6=G And C7=VG And C8=VG And C9=VG Then S4=VG
R15	If C1=M And C2=VG And C3=G And C4=VG And C5=M And C6=G And C7=VG And C8=G And C9=VG Then S4=VG
R16	If C1=M And C2=G And C3=M And C4=G And C5=M And C6=VG And C7=G And C8=G And C9=M Then S4=G
R17	If C1=M And C2=G And C3=G And C4=VG And C5=VG And C6=G And C7=VG And C8=VG And C9=G Then S5=VG
R18	If C1=M And C2=VG And C3=VG And C4=B And C5=VG And C6=VG And C7=VG And C8=G And C9=VG Then S5=VG
R19	If C1=VG And C2=VG And C3=M And C4=G And C5=VG And C6=G And C7=VG And C8=VG And C9=M Then S5=VG
R20	If C1=M And C2=G And C3=B And C4=B And C5=VB And C6=M And C7=G And C8=B And C9=B Then S5=B

R1: If C1=VG And C2=VG And C3=VG And C4=VG And C5=VG And C6=VG And C7=VG And C8=VG And C9=VG Then S1=VG

R2: If C1=VG And C2=G And C3=G And C4=VG And C5=VG And C6=M And C7=M And C8=VG And C9=G Then S1=VG

R3: If C1=M And C2=G And C3=VG And C4=VG And C5=M And C6=VG And C7=M And C8=VG And C9=G Then S1=VG

To calculate λ_1 value by using Eq. (23); the each rule output for the S1 alternative is as follows.

$$\mathbf{R1: VG} = (0.799, 0.849, \mathbf{0.949}, 0.999; 1, 1) (0.829, 0.879, 0.909, 0.969; 0.8, 0.8)$$

$$\mathbf{R2: VG} = (0.649, 0.705, \mathbf{0.792}, 0.848; 1, 1) (0.680, 0.739, 0.783, 0.825; 0.8, 0.8)$$

$$\mathbf{R3: VG} = (0.596, 0.653, \mathbf{0.739}, 0.796; 1, 1) (0.630, 0.684, 0.722, 0.773; 0.8, 0.8)$$

Then, the λ_1 value is calculated as follows for S1 alternative:

$$\lambda_1 = \frac{0.949+0.792+0.739}{3} = 0.827 \quad (36)$$

Also, the value of Ω_1 is calculated by using Eq. (12).

Also, given that the value of each rule is R1: 0.992 R2: 0.992 R3: 0.992 for each S1 alternative ($NV_1=0.992$) in step 6. Again, since the influence level of all decision-makers is 1, the Ω value would be equal to the NV_i value.

$$\Omega_1 = 0.992 \quad (37)$$

Finally, I_1 is calculated using Eq. (24) as below:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1 * \Omega_1 \\ &= 0.827 * 0.992 \\ &= 0.820 \text{ calculated as.} \end{aligned} \quad (38)$$

A similar procedure is applied for all other alternatives. The rules worked out and the calculated rule outputs for all alternatives are given in Table 11. Final score values calculated for all alternatives are given in Table 12. Afterwards, the ranks of all alternatives can be determined from the value of I_i . The best alternative is the one whose final score (I_i) is high.

The comparison of the ranking values of BWM and proposed IT2 FRB BWM approach is given in Table 13.

Table 11. Proposed IT2 FRB BWM Approach Supplier Selection Ranking Results

Alternatives	Activated Rule Value	Interval Type-2 Fuzzy Value of Rule Output	Calculated λ Value
S1	R1	(0.799,0.849, 0.949 ,0.999;1,1)(0.829,0.879,0.909,0.969;0.8,0.8)	0.820
	R2	(0.649,0.705, 0.792 ,0.848;1,1)(0.680,0.739,0.783,0.825;0.8,0.8)	
	R3	(0.596,0.653, 0.739 ,0.796;1,1)(0.630,0.684,0.722,0.773;0.8,0.8)	
S2	R5	(0.799,0.849, 0.949 ,0.999;1,1)(0.829,0.879,0.909,0.969;0.8,0.8)	0.876
	R6	(0.706,0.760, 0.851 ,0.906;1,1)(0.736,0.795,0.839,0.880;0.8,0.8)	
	R7	(0.682,0.737, 0.827 ,0.882;1,1)(0.713,0.771,0.814,0.857;0.8,0.8)	
S3	R9	(0.720,0.774, 0.866 ,0.920;1,1)(0.750,0.807,0.847,0.894;0.8,0.8)	0.848
	R10	(0.684,0.739, 0.828 ,0.884;1,1)(0.714,0.774,0.820,0.859;0.8,0.8)	
	R11	(0.703,0.756, 0.849 ,0.903;1,1)(0.734,0.787,0.821,0.876;0.8,0.8)	
S4	R13	(0.759,0.811, 0.908 ,0.959;1,1)(0.790,0.842,0.876,0.931;0.8,0.8)	0.819
	R14	(0.610,0.664, 0.755 ,0.810;1,1)(0.644,0.691,0.724,0.784;0.8,0.8)	
	R15	(0.650,0.705, 0.795 ,0.850;1,1)(0.683,0.734,0.768,0.825;0.8,0.8)	
S5	R17	(0.606,0.663, 0.748 ,0.805;1,1)(0.638,0.697,0.742,0.783;0.8,0.8)	0.802
	R18	(0.668,0.721, 0.815 ,0.868;1,1)(0.701,0.749,0.782,0.841;0.8,0.8)	
	R19	(0.696,0.749, 0.842 ,0.896;1,1)(0.728,0.779,0.811,0.869;0.8,0.8)	

Table 12. Supplier Selection Rank Final Scores for the Proposed IT2 FRB BWM Approach.

	λ	Ω	Γ
S1	0.820	0.992	0.813
S2	0.876	0.869	0.761
S3	0.848	0.813	0.689
S4	0.819	1	0.819
S5	0.802	0.985	0.790

Table 13. Comparison of BWM and IT2 FRB BWM Approach.

Alternatives	BWM Method		IT2 FRB BWM Method	
	Weights	Ranks	Weights	Ranks
S1	0.622	2	0.813	2
S2	0.545	4	0.761	4
S3	0.510	5	0.689	5
S4	0.627	1	0.819	1
S5	0.618	3	0.790	3
Maximum Value of Weights the Alternatives	S4=0.627		S4=0.819	
Minimum Value of Weights the Alternatives	S3=0.510		S3=0.689	
Significance of the Distinction	S4-S3=0.627-0.510=0.117		S4-S3=0.819-0.689=0.130	

4. ANALYSIS OF RESULTS

In this study, The BWM method has been expanded to IT2 FRB BWM. Then alternatives are listed by both methods. We solved the same problem using IT2 FRB BWM approach to compare its results with results of Rezaei's BWM. The obtained results with both methods are as in Table 13.

As it could be seen from Table 13, both methods found the same results as ranking. However, according to BWM method, IT2 FRB BWM method allows us make pairwise comparisons under

uncertainty and define the membership functions with greater flexibility. This flexibility is reflected in the results with a greater distinction. In BWM method, the significance of the distinction is $0.627-0.510 = 0.117$ while it is $0.819-0.689 = 0.130$ for IT2 FRB BWM approach.

The fuzzy rule-based system has been used in integration with AHP and TOPSIS methods for decision-making problems before. BMW is based on pairwise comparison like AHP, but it makes fewer pairwise comparisons and produces more consistent results (Rezaei, 2015). In addition to being used to find the importance (weight) of the criteria, it can also be used to evaluate alternatives according to criteria such as TOPSIS in cases where objective criteria are not available (Rezaei, 2020). In this direction, the use of the fuzzy rule-based system, used in previous studies, with BMW in this study has increased its performance by providing more consistency and reliability, and especially ensuring efficiency in terms of time and ease of use.

5. DISCUSSION AND CONCLUSION

5.1. Implications for theory

Supply chain management comprises all steps of the product life cycle, from designing, manufacturing and distribution to the product utilization by end-users and the disposal of the product at the end of its useful life. Here, the suppliers' role can't be ignored. In light of all, supplier selection criteria should be redesigned by companies, taking into account customer requirements and environmental norms. Therefore, the main goal of this study is to solve the problem of evaluating and rating suppliers using an integrated formulation.

Due to increasing oppressions and conditions of competition in recent years, businesses need a well-designed supply chain network to be able to gain advantage and survive in a competitive market environment. The importance of IT2 FRB BWM approach proposed in supplier selection problems for firms and organizations in the selection and ranking of alternatives is emphasized in this study. Given the studies on the use of IT-2 fuzzy rule-based systems, it is seen that the studies mostly have been done using type-1 and type-2 fuzzy methods without having fuzzy rule-base. When many of the studies have been done are examined, the same problem has been addressed both using of the type-1 and the type-2 fuzzy logic methods. As a result, it was seen that use of type-2 fuzzy sets instead of type-1 fuzzy sets provides more rational and realistic results in supplier selection problems for firms and organizations. It is also seen that the use of type-2 fuzzy logic sets by firms and organizations is more flexible, appropriate and effective than the classical logic sets for supplier selection problems in the environment where there are many criteria and alternatives but lack of information and high uncertainty.

In BWM method are partially inadequate in membership functions defining because, it is not possible to model uncertainty and vagueness sufficiently. The IT2 FRB BWM approach overcomes this problem by incorporating uncertainty into BWM. Thus, a flexible definition possibility was provided to decision-makers. In this study, Rezaei's BWM is extended using IT-2 fuzzy rule-based sets. Because IT-2 membership functions can generate significant differences in results compared to BWM.

The main purpose of proposed method; It could be summarized as being able to see the evaluation scores of the suppliers, to understand the weaknesses of the suppliers and to reach a logical decision for the future plans by the management of the company. With this proposed integrated study, we tried to create a basis for companies / firms to develop good relations with their partners in order to reduce their weaknesses. Thus, the capability to model the performance of supplier on a set of criteria will suggest the company initiate a talent development analysis for efficient management competencies. We believe that the proposed model is sufficiently robust and can be easily applied in applications MCDM problems. With this study, managers can create their decision structures more effectively and determine the relative importance of supplier qualifications. Effective evaluation of suppliers enables to improve suppliers' performance and behavior regarding their poor qualities, and also gives stronger suppliers more opportunities to take all applications to the next level.

5.2. Implications for practice

In this paper, Fuzzy Rule-Based BWM approach depending type-2 fuzzy sets was presented for the first time. Type-2 linguistic scales were developed to be utilized in the proposed approach and a flexible identification opportunity was provided for decision makers to evaluate the problem under consideration.

Considering the literature studies, Fuzzy MCDM methods were applied to supplier selection problems by many authors in comparison with traditional MCDM methods, and as a result, it was observed that fuzzy MCDM methods were more successful than traditional MCDM methods. It has been also observed that combining fuzzy rules with decision-making methods has been put forward by many researchers in the literature studies. Whereas, combining fuzzy rules with type-2 fuzzy numbers is a novel approach. In this study, BWM, one of the MCDM methods, was integrated among fuzzy rules based on interval type-2. It is important to include expert knowledge along with the type-2 fuzzy numbers in the selection problem, and this is one of the major advantages of the proposed method. Another advantage of this approach is that it incorporates expert knowledge into the traditional MCDM method BWM through rule-based systems with type-2 fuzzy numbers and successfully applies to the supplier selection problem. That method is especially important as it has an impact multiplier when there are alternatives with similar ranking positions. This method will show the difference better (more sensitively) even if there is a slight difference in each alternative. This makes the proposed method important and unique. The biggest disadvantage of the proposed approach is that the type-2 based fuzzy rules are limited to the proposed fuzzy rule-based BWM. Another disadvantage of our method is that the study is limited to nine criteria, five alternatives and three experts. In future studies, different rankings can be obtained for alternatives by increasing the number of criteria, alternatives and experts. Once again, other limitation of the proposed approach is that the input data expressed in linguistic terms is based upon the decision-maker(s)'s opinions and experiences and therefore includes subjectivity.

In this study, the supplier selection problem for firms and organizations in an environment with lots of criteria and alternatives was addressed with the classical BWM and the proposed IT2 FRB BWM approach. It was seen that the selection problems to be solved by using rule based systems, were more effective (see Table 12). The IT2 FRB BWM approach, which is proposed with nine criteria and five alternatives for the best supplier selection, is used within the scope of the paper. As a result of the application, while alternative rankings both of BWM and the proposed IT2 FRB BWM approach did not change; In the proposed IT2 FRB BWM approach, the significance of the distinction in the ordering of the alternatives was higher than in the BWM method (see Table 13).

The result shows that IT2 FRB BWM approach is more successful than classical BWM method sort alternatives. It is also seen that the IT2 FRB BWM approach does not only provide useful ways of handling MCDM problems more flexibly and intelligently, but also it provides expert knowledge much more in the selection of alternatives. In addition, this study has the feature of being the first study to integrate rule-based IT-2 fuzzy numbers with the BWM and to handle this approach in supplier selection process.

For future research, the suppliers could be evaluated on different criteria in view of paradigms such as agile, global, resilient and especially smart, as we are in the age of industry 4, besides or outside the sustainability. Additionally, the developed FRB-BWM approach using IT-2 fuzzy numbers could be extended in different fuzzy environments such as intuitionistic, neutrosophic and pythagorean.

REFERENCES

- Aboutorab, H., Saberi, M., Asadabadi, M.R., Hussain, O., and Chang, E., 2018, "ZBWM: The Z-number extension of Best Worst Method and its application for supplier development", *Expert Systems with Applications*, 107, 115-125, doi:10.1016/j.eswa.2018.04.015.
- Aijun, L., Ji, X., Lu, H., and Liu, H., 2019, "The selection of 3PRLs on self-service mobile recycling machine: Interval-valued pythagorean hesitant fuzzy best-worst multi-criteria group decision-making", *Journal of cleaner production*, 230, doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.257.

- Alikhani, R., Torabi, S.A., and Altay, N., 2019, "Strategic supplier selection under sustainability and risk criteria", *International Journal of Production Economics*, 208, 69-82, doi:10.1016/j.ijpe.2018.11.018.
- Amiri, M., Hashemi-Tabatabaei, M., Ghahremanloo, M., Keshavarz-Ghorabae, M., Zavadskas, E.K. and Banaitis, A., 2021, "A new fuzzy BWM approach for evaluating and selecting a sustainable supplier in supply chain management", *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 28(2), 125-142, doi:10.1080/13504509.2020.1793424.
- Awasthi, A., Chauhan, S., and Omrani, H., 2011, "Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems", *Expert Syst. Appl.*, 38, 12270-12280, doi:10.1016/j.eswa.2011.04.005.
- Awasthi, A., Govindan, K., and Gold, S., 2018, "Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach", *International Journal of Production Economics*, 195, 106-117, doi:10.1016/j.ijpe.2017.10.013.
- Azevedo, S.G., Carvalho, H., Ferreira, L.M., and Matias, J.C.O., 2017, "A proposed framework to assess upstream supply chain sustainability", *Environment, Development and Sustainability*, 19(6), 2253-2273, doi:10.1007/s10668-016-9853-0.
- Bai, C., Kusi-Sarpong, S., Badri Ahmadi, H., and Sarkis, J., 2019, "Social sustainable supplier evaluation and selection: a group decision-support approach", *International Journal of Production Research*, 57(22), 7046-7067, doi:10.1080/00207543.2019.1574042.
- Bera, A.K., Jana, D.K., Banerjee, D., and Nandy, T., 2021, "A group evaluation method for supplier selection based on interval type-2 fuzzy TOPSIS method", *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 12(1), 1-26.
- Bostancı, B., Yılmaz Bakır, N., Doğan, U., and Koçak Güngör, M., 2017, "Bulanık karar verme teknikleri ile CBS destekli konut memnuniyeti araştırması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 1193-1208, doi:10.17341/gazimmfd.369540.
- Buckley, J.J., 1985, "Ranking alternatives using fuzzy numbers", *Fuzzy Sets and Systems*, 15(1), 21-31, doi:[https://doi.org/10.1016/0165-0114\(85\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0165-0114(85)90013-2).
- Büyüközkan, G., and 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, doi:10.1016/j.eswa.2011.08.162.
- Carter C.R., and Easton, P.L., 2011, "Sustainable supply chain management: evolution and future directions", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41(1), 46-62, doi:10.1108/09600031111101420.
- Celik, E., Yucesan, M. and Gul, M., 2021, "Green supplier selection for textile industry: a case study using BWM-TODIM integration under interval type-2 fuzzy sets", *Environ Sci Pollut Res*, 28, 64793-64817, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13832-7>.
- Chai, J., Liu, J.N.K., and Xu, Z., 2012, "A New Rule-Based SIR Approach To Supplier Selection Under Intuitionistic Fuzzy Environments", *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 20(03), 451-471, doi:10.1142/S0218488512500237.
- Chen, C.T., and Huang, S.F., 2006, "Order-fulfillment ability analysis in the supply-chain system with fuzzy operation times", *International Journal of Production Economics*, 101(1), 185-193, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.05.003>.
- Cheraghalipour, A., and Farsad, S., 2018, "A bi-objective sustainable supplier selection and order allocation considering quantity discounts under disruption risks: A case study in plastic industry", *Computers & Industrial Engineering*, 118, 237-250, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.041>.
- Demir, L., Akpınar, M.E., Araz, C., and Ilgın, M.A., 2018, "A green supplier evaluation system based on a new multi-criteria sorting method: VIKORSORT", *Expert Systems with Applications*, 114, 479-487, doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.07.071>.
- Ecer, F., and Pamucar, D., 2020, "Sustainable supplier selection: A novel integrated fuzzy best worst method (F-BWM) and fuzzy CoCoSo with Bonferroni (CoCoSo'B) multi-criteria model", *Journal of cleaner production*, 266, 121981, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121981>.

- Gan, J., Zhong, S., Liu, S., and Yang, D., 2019, "Resilient Supplier Selection Based on Fuzzy BWM and GMo-RTOPSIS under Supply Chain Environment", *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2019, 1-14, doi:10.1155/2019/2456260.
- Garg, C. P., and Sharma, A., 2020, "Sustainable outsourcing partner selection and evaluation using an integrated BWM–VIKOR framework", *Environment, Development and Sustainability*, 22(2), 1529-1557, doi:10.1007/s10668-018-0261-5.
- Ghadimi, P., Dargi, A., and Heavey, C., 2017, "Making sustainable sourcing decisions: practical evidence from the automotive industry", *International Journal of Logistics Research and Applications*, 20(4), 297-321, doi:10.1080/13675567.2016.1227310.
- Ghoushchi, S., Khazaeili, M., Amini, A., and Osgooei, E., 2019, "Multi-criteria sustainable supplier selection using piecewise linear value function and fuzzy best-worst method", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37, 1-17, doi:10.3233/JIFS-182609.
- Govindan, K., Jha, P.C., Agarwal, V., and Darbari, J., 2019, "Environmental management partner selection for reverse supply chain collaboration: A sustainable approach", *Journal of Environmental Management*, 236, 784-797, doi:10.1016/j.jenvman.2018.11.088.
- Govindan, K., Khodaverdi, R., and Jafarian, A., 2013, "A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach", *Journal of cleaner production*, 47, 345-354, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.014>.
- Guo, C., and Li, X., 2014, "A multi-echelon inventory system with supplier selection and order allocation under stochastic demand", *International Journal of Production Economics*, 151, doi:10.1016/j.ijpe.2014.01.017.
- Gupta, H., and Barua, M.K., 2017, "Supplier selection among SMEs on the basis of their green innovation ability using BWM and fuzzy TOPSIS", *Journal of cleaner production*, 152, 242-258, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.125>.
- Haeri, S.A.S., and Rezaei, J., 2019, "A grey-based green supplier selection model for uncertain environments", *Journal of cleaner production*, 221, doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.193.
- Heidarzade, A., Mahdavi, I., and Mahdavi-Amiri, N., 2016, "Supplier selection using a clustering method based on a new distance for interval type-2 fuzzy sets: A case study", *Applied Soft Computing*, 38, 213-231, doi:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.09.029>.
- Hoseini, S.A., Hashemkhani Zolfani, S., Skačauskas, P., Fallahpour, A. and Saberi, S., 2022, "A Combined Interval Type-2 Fuzzy MCDM Framework for the Resilient Supplier Selection Problem", *Mathematics*, 10(1), 44, <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/1/44>.
- Ikram, M., Zhang, Q., Sroufe, R., and Ferrasso, M., 2020, "The Social Dimensions of Corporate Sustainability: An Integrative Framework Including COVID-19 Insights", *Sustainability*, 12(20), 8747.
- Javad, M.O.M., Darvishi, M., and Javad, A.O.M., 2020, "Green supplier selection for the steel industry using BWM and fuzzy TOPSIS: A case study of Khouzestan steel company", *Sustainable Futures*, 2, 100012, doi:<https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100012>.
- Kadaifci, C., Asan, U., Serdarasan, S., and Arican, U., 2019, "A new rule-based integrated decision making approach to container transshipment terminal selection", *Maritime Policy & Management*, 46(2), 237-256, doi:10.1080/03088839.2018.1489149.
- Kahraman, C., Öztayşi, B., Uçal Sarı, İ., and Turanoğlu, E., 2014, "Fuzzy analytic hierarchy process with interval type-2 fuzzy sets", *Knowledge-Based Systems*, 59, 48-57, doi:<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.02.001>.
- Kahraman, C., Ruan, D., and Doğan, I., 2003, "Fuzzy group decision-making for facility location selection", *Information Sciences*, 157, 135-153, doi:[https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(03\)00183-X](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(03)00183-X).
- Kannan, D., Khodaverdi, R., Olfat, L., Jafarian, A., and Diabat, A., 2013, "Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multi-objective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain", *Journal of cleaner production*, 47, 355-367, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.010>.

- Kannan, D., Mina, H., Nosrati-Abarghoee, S., and Khosrojerdi, G., 2020, "Sustainable circular supplier selection: A novel hybrid approach", *Science of The Total Environment*, 722, 137936, doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137936>.
- Karaöz, A.E., Akyüz, G.A., and Tekin, K. 2019, "Tedarikçi seçimi uygulamaları: bilgi ve iletişim teknolojileri perspektifli bir literatür taraması", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 362-378.
- Karnik, N.N., and Mendel, J., 2001, "Operations on type-2 fuzzy sets", *Fuzzy Sets and Systems*, 122(2), 327-348, doi:[https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(00\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(00)00079-8).
- Kazemitash, N., Fazlollahtabar, H., and Abbaspour, M., 2021, "Rough Best-Worst Method for Supplier Selection in Biofuel Companies based on Green criteria", *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 4(2), 1-12. <https://doi.org/10.31181/oresta20402001k>.
- Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., Salehi Sadaghiani, J., and Hassani Goodarzi, G., 2014, "Multiple criteria group decision-making for supplier selection based on COPRAS method with interval type-2 fuzzy sets", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(5-8), 1115-1130, doi:10.1007/s00170-014-6142-7.
- Khoshfetrat, S., Rahiminezhad Galankashi, M., and Almasi, M., 2020, "Sustainable supplier selection and order allocation: a fuzzy approach", *Engineering Optimization*, 52(9), 1494-1507, doi:10.1080/0305215X.2019.1663185.
- Laosirihongthong, T., Samaranayake, P., and Nagalingam, S., 2019, "A holistic approach to supplier evaluation and order allocation towards sustainable procurement", *Benchmarking: An International Journal*, 26(8), 2543-2573, doi:10.1108/BIJ-11-2018-0360.
- Li, J., Fang, H., and Song, W., 2019, "Sustainable supplier selection based on SSCM practices: A rough cloud TOPSIS approach", *Journal of cleaner production*, 222, 606-621, doi:10.1016/j.jclepro.2019.03.070.
- Liu, H.C., Quan, M.Y., Li, Z., and Wang, Z.L., 2019, "A new integrated MCDM model for sustainable supplier selection under interval-valued intuitionistic uncertain linguistic environment", *Information Sciences*, 486, 254-270, doi:10.1016/j.ins.2019.02.056.
- Liu, P., Gao, H., and Ma, J., 2019, "Novel green supplier selection method by combining quality function deployment with partitioned Bonferroni mean operator in interval type-2 fuzzy environment", *Information Sciences*, 490, 292-316, doi:10.1016/j.ins.2019.03.079.
- Lo, H.W., Liou, J.J.H., Wang, H.S., and Tsai, Y.S., 2018, "An integrated model for solving problems in green supplier selection and order allocation", *Journal of cleaner production*, 190, 339-352, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.105>.
- Lu, H., Jiang, S., Song, W., and Ming, X., 2018, "A rough multi-criteria decision-making approach for sustainable supplier selection under vague environment", *Sustainability*, 10(8), 2622.
- Luthra, S., Govindan, K., Kannan, D., Mangla, S.K., and Garg, C.P., 2017, "An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains", *Journal of cleaner production*, 140, 1686-1698, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.078>.
- Macioł, A., Jędrusik, S., and Rębiasz, B., "Rule-based approach for supplier evaluation", *2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, 1207-1214, 8-11 Sept. 2013.
- Memari, A., Dargi, A., Akbari Jokar, M.R., Ahmad, R., and Abdul Rahim, A.R., 2019, "Sustainable supplier selection: A multi-criteria intuitionistic fuzzy TOPSIS method", *Journal of Manufacturing Systems*, 50, 9-24, doi:10.1016/j.jmsy.2018.11.002.
- Mendel, J.M., John, R.I., and Liu, F., 2006, "Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14(6), 808-821, doi:10.1109/TFUZZ.2006.879986.
- Mohammed, A., 2019, "Towards a sustainable assessment of suppliers: an integrated fuzzy TOPSIS-possibilistic multi-objective approach", *Annals of Operations Research*, doi:10.1007/s10479-019-03167-5.
- Mousakhani, S., Nazari-Shirkouhi, S., and Bozorgi-Amiri, A., 2017, "A novel interval type-2 fuzzy evaluation model based group decision analysis for green supplier selection problems: A case

- study of battery industry", *Journal of cleaner production*, 168, 205-218, doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.154.
- Nourmohamadi Shalke, P., Paydar, M.M., and Hajiaghahi-Keshteli, M., 2018, "Sustainable supplier selection and order allocation through quantity discounts", *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 13(1), 20-32, doi:10.1080/17509653.2016.1269246.
- Özgen, D., Önüt, S., Gülsün, B., Tuzkaya, U.R., and Tuzkaya, G., 2008, "A two-phase possibilistic linear programming methodology for multi-objective supplier evaluation and order allocation problems", *Information Sciences*, 178(2), 485-500, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.08.002>.
- Pamucar, D., Chatterjee, K., and Zavadskas, E.K., 2019, "Assessment of third-party logistics provider using multi-criteria decision-making approach based on interval rough numbers", *Computers & Industrial Engineering*, 127, 383-407, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.023>.
- Paul, S.K., 2015, "Supplier selection for managing supply risks in supply chain: a fuzzy approach", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(1), 657-664, doi:10.1007/s00170-015-6867-y.
- Qin, J., and Liu, X. 2019, "Interval Type-2 Fuzzy Group Decision Making by Integrating Improved Best Worst Method with COPRAS for Emergency Material Supplier Selection", *Type-2 Fuzzy Decision-Making Theories, Methodologies and Applications*, Springer, 249-271.
- Qin, J., Liu, X., and Pedrycz, W., 2017, "An extended TODIM multi-criteria group decision making method for green supplier selection in interval type-2 fuzzy environment", *European Journal of operational research*, 258(2), 626-638, doi:10.1016/j.ejor.2016.09.059.
- Rafigh, P., Akbari, A., Bidhendi, H. M., and Kashan, A.H., 2021, "A fuzzy rule-based multi-criterion approach for a cooperative green supplier selection problem", *Environ Sci Pollut Res*, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17015-2>.
- Rashidi, K., and Cullinane, K., 2019, "A comparison of fuzzy DEA and fuzzy TOPSIS in sustainable supplier selection: Implications for sourcing strategy", *Expert Systems with Applications*, 121, 266-281, doi:10.1016/j.eswa.2018.12.025.
- Rezaei, J., 2015, "Best-worst multi-criteria decision-making method", *Omega*, 53, 49-57, doi:<https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>.
- Rezaei, J., 2016, "Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model", *Omega*, 64, 126-130, doi:<https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001>.
- Rezaei, J., 2020, "A Concentration Ratio for Non-Linear Best Worst Method", *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 19(3), pp. 891-907.
- Rezaei, J., Nispeling, T., Sarkis, J., and Tavasszy, L., 2016, "A supplier selection life cycle approach integrating traditional and environmental criteria using the best worst method", *Journal of cleaner production*, 135, 577-588, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.125>.
- Rezaei, J., Wang, J., and Tavasszy, L., 2015, "Linking supplier development to supplier segmentation using Best Worst Method", *Expert Systems with Applications*, 42(23), 9152-9164, doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.07.073>.
- Sanayei, A., Farid Mousavi, S., Abdi, M.R., and Mohaghar, A., 2008, "An integrated group decision-making process for supplier selection and order allocation using multi-attribute utility theory and linear programming", *Journal of the Franklin Institute*, 345(7), 731-747, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2008.03.005>.
- Schramm, V.B., Cabral, L.P.B., and Schramm, F., 2020, "Approaches for supporting sustainable supplier selection - A literature review", *Journal of cleaner production*, 273, 123089, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123089>.
- Senturk, S., Erginel, N., and Yazirli, Y., 2017, "Interval Type-2 Fuzzy Analytic Network Process for Modelling a Third-party Logistics (3PL) Company", *Journal of Multiple-Valued Logic & Soft Computing*, 28.
- Shidpour, H., Shahrokhi, M., and Bernard, A., 2013, "A multi-objective programming approach, integrated into the TOPSIS method, in order to optimize product design; in three-dimensional concurrent

- engineering", *Computers & Industrial Engineering*, 64(4), 875-885, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.12.016>.
- Simic, V., Gokasar, I., Deveci, M., and Karakurt, A., 2021, "An integrated CRITIC and MABAC based type-2 neutrosophic model for public transportation pricing system selection", *Socio-Economic Planning Sciences: 101157*, doi:<https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101157>.
- Song, W., Xu, Z., and Liu, H.C., 2017, "Developing sustainable supplier selection criteria for solar air-conditioner manufacturer: An integrated approach", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1461-1471, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.081>.
- Şengül, Ü., Eren, M., Eslamian Shiraz, S., Gezder, V., and Şengül, A.B., 2015, "Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey", *Renewable Energy*, 75, 617-625, doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.045>.
- Tavana, M., Yazdani, M., and Di Caprio, D., 2017, "An application of an integrated ANP-QFD framework for sustainable supplier selection", *International Journal of Logistics Research and Applications*, 20(3), 254-275, doi:10.1080/13675567.2016.1219702.
- Tseng, M.L., Lin, Y.-H., Chiu, A., Chia, Y., and Chen, 2008, "Fuzzy AHP-approach to TQM strategy evaluation", *IEMS*, 7, 34-43.
- Türk, S., John, R., and Özcan, E., "Interval type-2 fuzzy sets in supplier selection", *2014 14th UK Workshop on Computational Intelligence (UKCI)*, 1-7, 8-10 Sept. 2014, doi:10.1109/UKCI.2014.6930168.
- Wu, Q., Zhou, L., Chen, Y., and Chen, H., 2019, "An integrated approach to green supplier selection based on the interval type-2 fuzzy best-worst and extended VIKOR methods", *Information Sciences*, 502, 394-417, doi:10.1016/j.ins.2019.06.049.
- Xu, Z., Qin, J., Liu, J., and Martínez, L., 2019, "Sustainable supplier selection based on AHPSort II in interval type-2 fuzzy environment", *Information Sciences*, 483, 273-293, doi:10.1016/j.ins.2019.01.013.
- Yaakob, A.M., Khalif, K.M.N.K., Gegov, A., and Rahman, S. F. A., "Interval type 2- fuzzy rule based system approach for selection of alternatives using TOPSIS", *2015 7th International Joint Conference on Computational Intelligence (IJCCI)*, Vol. 2, 112-120, 12-14 Nov. 2015.
- Yazdani, M., Chatterjee, P., Zavadskas, E.K., and Hashemkhani Zolfani, S., 2017, "Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection", *Journal of cleaner production*, 142, 3728-3740, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.095>.
- Yıldızbaşı, A., Öztürk, C., Efendioğlu, D., and Bulkan, S., 2020, "Assessing the social sustainable supply chain indicators using an integrated fuzzy multi-criteria decision-making methods: a case study of Turkey", *Environment, Development and Sustainability*, doi:10.1007/s10668-020-00774-2.
- Yilmaz, O., Görür, G., and Dereli, T., 2001, *Computer Aided Selection of Cutting Parameters by Using Fuzzy Logic*.
- Yucesan, M., Mete, S., Serin, F., Celik, E., and Gul, M., 2019, "An Integrated Best-Worst and Interval Type-2 Fuzzy TOPSIS Methodology for Green Supplier Selection", *Mathematics*, 7(2), doi:10.3390/math7020182.
- Zadeh, L.A., 1965, "Fuzzy sets", *Information and Control*, 8(3), 338-353, doi: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
- Zadeh, L.A., 1975, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I", *Information Sciences*, 8(3), 199-249, doi:[https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5).
- Zarbakshnia, N., and Jaghdani, T.J., 2018, "Sustainable supplier evaluation and selection with a novel two-stage DEA model in the presence of uncontrollable inputs and undesirable outputs: a plastic case study", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5), 2933-2945, doi:10.1007/s00170-018-2138-z.
- Zhong, L., and Yao, L., 2017, "An ELECTRE I-based multi-criteria group decision making method with interval type-2 fuzzy numbers and its application to supplier selection", *Applied Soft Computing*, 57, 556-576, doi:10.1016/j.asoc.2017.04.001.



OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS OF ALUMINIUM 6013-T6 ALLOY IN THE TURNING PROCESS

¹Seçil EKŞİ , ²Çetin KARAKAYA 

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

²Innovation Centre, Highfield Drive, St. Leonards-on-Sea, East Sussex, TN38 9UH, ENGLAND

¹eksi@sakarya.edu.tr, ²cetkarakaya@gmail.com

(Geliş/Received: 28.01.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.04.2022)

ABSTRACT: One of the most common methods of machining is turning. Cutting speed, depth of cut, and feed rate are the most effective cutting parameters on the surface roughness. In addition to cutting parameters, the use of cooling type, the cutting tool is also essential on the surface roughness of materials. In this study, the surface roughness properties of Al 6013-T6 material were investigated depending on feed rate and cutting speed in turning process. Experiments were planned according to L9 orthogonal array. Optimum conditions were found via Taguchi's Signal/Noise analysis. Variance analysis (ANOVA) was performed to determine the parameters that affect the turning process. As a result of experimental studies surface roughness values increased as feed rate increased and decreased as cutting speed increased. The analysis results showed that feed rate is a dominant parameter on surface roughness. It was also observed that the cutting parameters had a significant effect on the machining time. As the machining time decreases, the surface roughness increases.

Keywords: Turning, Surface roughness, Optimization, Taguchi method

Alüminyum 6013-T6 Alaşımlarının Tornalama İşlemlerinde Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu

ÖZ: Tornalama işlemi, parçaların işlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Devir hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızı, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili kesme parametreleridir. Ayrıca kesme parametrelerinin yanında kesici takım özellikleri ve soğutma tipi de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkilidir. Al 6013-T6 malzemesinin tornalama işlemi sonucu yüzey pürüzlülüğü, ilerleme hızına ve devir hızına bağlı olarak incelenmiştir. Adım başına ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmış ve devir hızı azaldıkça azalmıştır. Çalışmada taguchi deney tasarımı ve varyans analizi (ANOVA) de yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme hızının en baskın parametre olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda kesme parametrelerinin işleme süresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. İşleme süresi azalırken yüzey pürüzlülüğü artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tornalama, Yüzey pürüzlülüğü, Optimizasyon, Taguchi metodu

1. INTRODUCTION

In the machinery industry, the surface quality of the machined parts is a significant factor. Good surface quality is preferred because it reduces costs and improves quality in manufacturing. Each parameter used during the processing of the materials affects the surface sensitivity. The purpose of the chip removal is not just to shape the parts. It is also to manufacture according to a certain degree of accuracy shown in the part picture in terms of geometry, size, and surface (Hariharan *et al.*, 2021, Abasa *et al.*, 2020, Ajay and Vinoth., 2021, Panthangi *et al.*, 2021)

Turning, an important branch of machining constitutes the process. Turning operation with rotary motion designed to the part by removing chips from a material cylindrical shape forming. The effect of the independent variables on the dependent variables in turning are the factors that directly affect the product quality. Investigation and determination of the parameters that cause changes in the dependent variables are important in terms of increasing the product quality. In turning, cutting speed, feed, depth of cut, speed, process length, type of cutting tool, material, cutting fluid etc. parameters represent independent variables. These independent variables are surface roughness, wear, force, etc. has a large effect on the dependent variables. These effects constitute the focus of attention of researchers (Özlu *et al.* 2019, Yağmur *et al.* 2021, Pul and Bican, 2021, Pul and Özerkan, 2022).

Many studies have examined the surface roughness properties of aluminium and steel materials in the turning process (Mia *et al.*, 2018; Sarnobat and Raval, 2019; Davim and Figueira, 2007; Poulachon *et al.*, 2004; Asiltürk and Akkuş, 2011; Kumar, 2019). Asiltürk *et al.* studied on optimization of turning parameters on AISI 4140 steel to minimize surface roughness with Taguchi method. Results of this study indicate that the feed rate has the most significant effect on surface roughness values (Asiltürk and Akkuş, 2011). Kumar investigated effect of spindle speed, feed rate and depth of cut in micro turning operation. It was reported that depth of cut has significant influence on surface roughness.

Srithar *et al.* studied the surface roughness properties with the hard turning process on AISI D2 steel, and they found that the most critical factor among the cutting parameters was the feed rate (Srithar *et al.*, 2014). Jeyaprakash *et al.* analyzed analytically and experimentally the surface roughness values with minimum cutting thickness in CNC micro turning of aluminium 19000 alloys. Analytical and experimental results were close to each other (Jeyaprakash *et al.*, 2020). Some researchers have developed hybrid nano-cutting fluid with a different volumetric concentration based on alumina. Thermophysical properties of hybrid nanofluids, machining forces, and surface roughness of steel during turning were investigated (Sharma *et al.*, 2020). Acayaba *et al.* developed estimation models using the experimental data. They proved that the neural network performed better with a more appropriate difference (1400%) than the linear model (Acayaba and Escalona, 2015). Patel *et al.* studied cutting conditions and tool geometry by developing a mathematical model. According to the developed model, the estimated surface roughness values were close to the experimental values (Patel and Gandhi, 2019). Lalwani *et al.* investigated the effect of cutting force and surface roughness on tool wear. The axial depth of the cut has the most significant impact on component forces (Lalwani *et al.*, 2008). By Kim *et al.*, the cutting speed is insufficient to explain the surface roughness variation. Also, unlike most studies, the depth of cut is an effective parameter (Kim and Kwon, 2015). Bilgic *et al.* investigated the prediction of surface roughness and tool temperature values for turning using the Artificial Neural Networks method and Multi Linear Regression Model. (Bilgic *et al.*, 2019). Selvaraj *et al.* investigated the effects of process parameters on tool wear in dry turning of duplex stainless steel material at different speeds and feed rates. They reported that the cutting speed was the most effective parameter in the turning process, optimized with the Taguchi method (Selvaraj *et al.*, 2014). Bindhushree *et al.* studied on turning of Aluminum material by using Taguchi method. They investigated effects of parameters painstaking as a cutting speed, feed rate and depth of cut, output obtained are material removal rate, machining time through turning. They showed that the very important factors are speed and depth of cut. Surface roughness increases with increasing speed and depth of cut. Machining time is decreases with increasing speed and depth of cut values (Bindhushree *et al.*, 2021).

One of the indispensable quality characteristics in machining is the surface quality. It is very important to obtain the intended surface depending on the place where the product works. For this reason, it is very important to determine the parameters that affect the achievement of the intended surface quality. In this study, the surface roughness properties of Al 6013-T6 material in the turning process were investigated experimentally and statistically. The turning process was carried out at three feed rates and cutting speed levels. Also, machining time of turning process is calculated. The optimization study was carried out by comparing the results with each other. The aim of this study to find optimum turning conditions of Al 6013-T6 in turning process.

2. EXPERIMENTAL METHODS

2.1. Materials and method

6013-T6 Aluminum alloy was used in the experimental study. Al 6013-T6 has high hardness and corrosion resistance. Its weldability is good. It can be used in the aircraft industry, seat, and door construction, anywhere requiring hardness and machinability. The chemical compositions of 6013-T6 Aluminum Alloy are shown in Table 1. Mechanical properties of workpiece materials are given in Table 2. Al 6013-T6 used in the experiments was 20 mm in diameter and 100 mm in length. The view of test specimen is shown in Figure 1.



Figure 1. View of the test specimen

Table 1. Composition of 6013-T6 Aluminium (%)

Mg	Cu	Si	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Al
0.90	0.94	0.73	0.36	0.26	0.03	0.06	0.02	balance

Table 2. Mechanical properties of workpiece materials

Materials	Hardness (Brinell)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Al 6013-T6	130	385	405

Experimental samples were prepared at The Tezsan TN50 BR model turning machine in Sakarya University Mechanical Engineering Department Laboratory. The process was carried out at three different feed rate (0.1 mm / rev, 0.2 mm / rev, 0.3 mm / rev) and three levels of cutting speed (60 m/min, 80 m/min, 100 m/min). The experiments were carried out with VBGT160404L-Y PV7020 coded cermet turning insert, whose geometric features and dimensions are given in Figure 2. The turning process was performed as dry machining. The value of cut depth was taken as 0.5 mm and maintained constant throughout the experiment. Each test was repeated three times at dry machining conditions, and then surface roughness was measured and averaged. Teskon TR200 was used to measure the surface roughness of the workpieces processed on the lathe. Surface roughness measurements were made according to TS 2495 EN ISO 3274 standard. In order to measure the surface roughness values on the workpiece, the cutting length (L_c) was chosen as 0.8 mm and the sample length (L_t) as 4.8 mm.

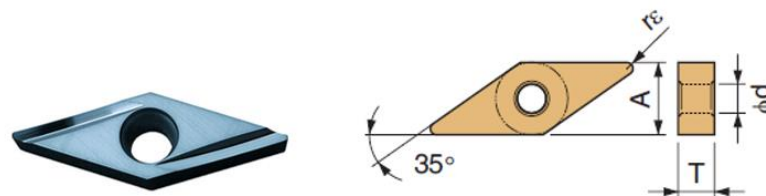


Figure 2. Technical properties of cutting tool

2.2. Taguchi method and experimental plan

The method, which was developed by combining the experimental design theory and the concept of quality loss function, is widely used with its low number of experiments and ease of use. The method is particularly successful in experimental systems where there are qualitative variables where the surface

response method cannot be used. This experimental design process consists of 3 main phases: the planning phase, the implementation phase, and the analysis interpretation phase. The planning phase is the most important phase that should be given maximum attention. Data collected from all experiments are analyzed to determine the effects of various design parameters. This approach implements the fractional factorial approach and this is accomplished using orthogonal arrays. Orthogonal arrays are standardized by the Taguchi method and their degrees of freedom must be greater than or equal to the degrees of freedom of the experimental system. The degree of freedom of the experimental system is determined by the factor level and the number of interactions. Taguchi's experimental design method was used in the optimization study. This method has optimized control parameters and levels for minimum surface roughness. Selected parameters and levels are indicated in Table 3. In Taguchi method orthogonal array is used to decrease experiment numbers. The L9 (3²) orthogonal array was chosen to determine the optimum conditions and analyze the parameters.

Table 3. Control parameters and their levels

Symbol	Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
A	Feed rate (mm/rev)	0.1	0.2	0.3
B	Cutting speed (m/min)	60	80	100

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. S/N ratio results

The average values of surface roughness (μm) measurements are shown in Table 4. Each measurement was repeated three times. As seen in Table 4, surface roughness significantly increased as the feed rate increased. The increase in cutting speed has reduced the surface roughness. It is determined that the effect of the cutting speed is much less than the effect of the feed rate. Similar results had been reported in the literature. Srithar and Sharma (Srithar *et al.* 2014, Sharma *et al.* 2020) have found similar results in the turning process. Surface roughness values decreased as spindle speed increased and surface roughness increased as feed rate increased. The feed rate significantly impacts Ra values [Mia *et al.*, 2018, Sarbonat *et al.*, 2019, Asiltürk and Akkuş, 2011). The optimization was performed using obtained results. This optimization process has three useful functions known as the signal-to-noise ratio (S/N) function. These are 'larger is better', 'nominal is the best', and 'smaller is better'. The characteristic of surface roughness is better suited to the 'smaller is better' situation. The following equation calculates the S/N ratio,

$$\text{S/N Ratio} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} (\text{sum of mean of square of surface roughness}) \quad (1)$$

Table 4. The experimental results and S/N ratio values

Specimen No	Feed rate (mm/rev)	Cutting Speed (m/min)	Surface roughness (Ra)	S/N ratio for Ra (dB)
1	0.1	60	0.766	2.3154
2	0.1	80	0.753	2.4641
3	0.1	100	0.712	2.9504
4	0.2	60	3.584	-11.0874
5	0.2	80	3.498	-10.8764
6	0.2	100	3.481	-10.8341
7	0.3	60	7.829	-17.8741
8	0.3	80	7.529	-17.5347
9	0.3	100	7.362	-17.3399

Machining time is one of the important parameters in the turning process. As the machining time decreases, the surface roughness increases. Therefore, minimizing surface roughness can result in high machining times. High machining time is also undesirably related to increased cost. The processing time can be calculated with the following equation;

$$t_h = \frac{Dx\pi xL}{Vx1000xf} \quad (2)$$

where, t_m : Machining time (min), D : Original diameter (mm), L : Length of cut (mm), V : Cutting speed (m/min), f : feed rate (mm/rev).

The machining times calculated according to Equation 2 are given in Table 5.

Table 5. The machining times calculated according to Equation 2

Specimen No	Feed rate (mm/rev)	Cutting Speed (m/min)	Machining time (s)
1	0.1	60	12
2	0.1	80	10
3	0.1	100	8
4	0.2	60	6
5	0.2	80	5
6	0.2	100	4
7	0.3	60	4
8	0.3	80	3,33
9	0.3	100	2,67

As can be seen from Table 5, machining time is higher at low cutting speed. It was observed that while the feed rate increased at the same cutting speed, the machining time decreased.

Variation of surface roughness and machining time as a function of feed rate and cutting speed is given in Figure 3.

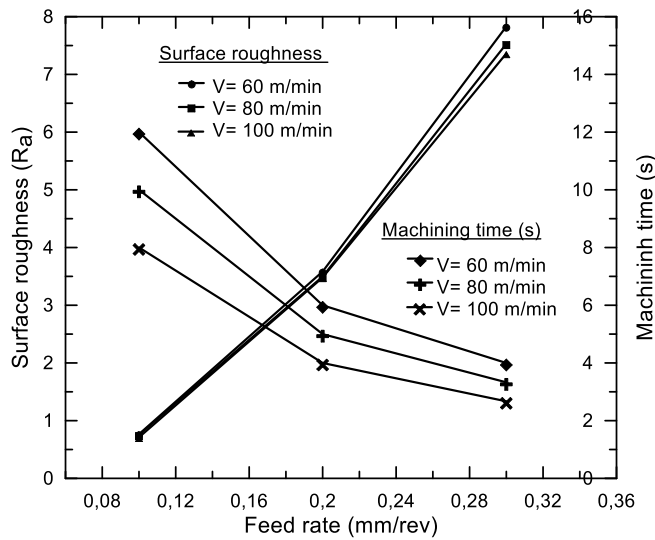


Figure 3. Change of surface roughness and machining time at different cutting speeds according to feed rate

As shown in Figure 3, as the feed rate increases, the surface roughness increases. The lowest surface roughness was obtained at 0.712 μm and 0.1 mm/rev feed rate 100 m/min cutting speed. The highest surface roughness was obtained at 7.829 μm and 0.3 mm/rev feed rate 60 m/min cutting speed. From this graph, we can see clearly that the effect of the feed rate is much more dominant than the cutting speed in the turning process.

Figure 3 clearly shows that surface roughness and machining time vary inversely (Qehaja *et al.*, 2015, Bindhushree *et al.*, 2021, Ragab *et al.* 2017). Machining time varies inversely with feed rate and cutting speed. The lowest machining time was obtained at a cutting speed of 100 m/min and a feed rate of 0.3 mm/rev.

“S/N response table” shows the effect of each parameter on the surface roughness in Table 6. Graphical forms of control factor levels for Ra given in Table 6 are shown in Figure 4. The best level of each factor was found by looking at the highest S/N ratio in control factor levels. The factors giving the best Ra value were for the A factor (Level 1, S/N=2.577) and for the B factor (Level 3, S/N=-8.408). This means that an optimum Ra value can be obtained from these factor levels.

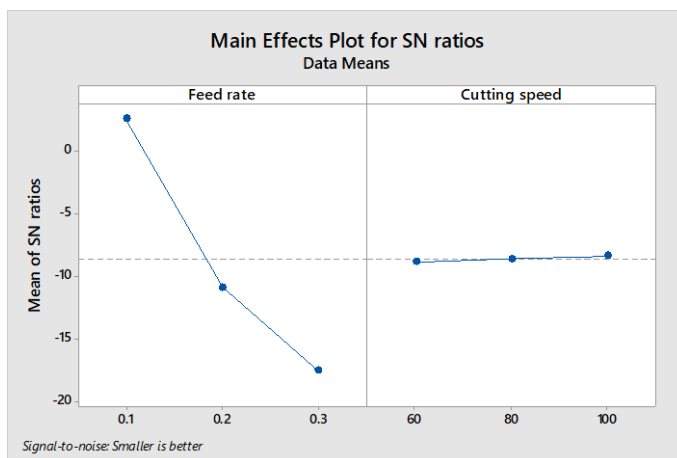


Figure 4. S/N graphs for surface roughness

Table 6. S/N response table for surface roughness

Level	A (Feed rate)	B (Cutting speed)
1	2.577	-8.882
2	-10.933	-8.649
3	-17.583	-8.408
Delta	20.160	0.474
Rank	1	2

3.2. Variance analysis and regression analysis

MINITAB 18 was used to perform variance and regression analysis. The regression equation below shows the relationship between the process parameters (cutting speed and federate) and surface roughness for turning with a correlation coefficient (R^2) of 0.99.

$$Ra = -2.38 + 34.15 f - 0.0004 v \quad (3)$$

Variance analysis (ANOVA) was performed to investigate the effects of turning parameters on surface roughness values of materials. ANOVA test results were given in Table 7. The effect of each parameter is given in the last column of the table. From Table 7, it is found that feed rate (99.84 %) is the most significant factor on surface roughness, and the second factor is cutting speed (0.094 %). The effect of cutting speed on surface roughness for chosen speed values is negligible.

Table 7. ANOVA test results

Variance Source	Degree of freedom	Adjusted Sum of squares	Adjusted Mean square	F ratio	Contribution rate %
Feed rate	2	70.7793	35.3897	2665.82	99.84
Cutting speed	2	0.0666	0.0333	2.51	0.094
Error	4	0.0531	0.0133		0.066
Total	8	70.8990			100

4. CONCLUSIONS

In this study, surface roughness properties of Al 6013-T6 material were investigated by the turning process. Results were evaluated with the Taguchi test design method. Taguchi method was successfully applied to Al materials. By using this method, both time and cost savings were achieved. The results obtained will be helpful for future academic research and industrial applications. Following results can be drawn based on the experiments and statistical study,

- Surface roughness values decreased with the increase of cutting speed.
- Surface roughness values increased with the increase of feed rate.
- The optimum levels of the control factors for minimizing the surface roughness using S/N rates were determined. The best average surface roughness value was 0.712 μm at 0.1 mm/rev feed rate, at 100 m/min.
- The highest surface roughness value was 7.829 μm at 60 m/min cutting speed and 0.3 mm/rev feed rate.
- According to the Anova test, the effect of the feed rate on the surface roughness of the materials is significant (99.84 %); the second important parameter is cutting speed (0.094 %).
- R^2 of the equations which were obtained by the linear regression model for R_a were found to be 99%.

- Machining time and the surface roughness are inversely proportional.
- The lowest machining time was obtained at a cutting speed of 100 m/min and a feed rate of 0.3 mm/rev, while the highest machining time was obtained at a cutting speed of 60 m/min and a feed of 0.1 mm/rev.

5. REFERENCES

- Abasa, M., Sayda, L., Akhtara, R., Khalida, Q.S., Khanb, A.M., Pruncu, C.I., 2020, "Optimization of machining parameters of aluminum alloy 6026-T9 under MQL-assisted turning process", *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10916–10940.
- Acayaba, G.M.A., Escalona, P.M., 2015, "Prediction of surface roughness in low speed turning of AISI316 austenitic stainless steel", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 11, 62-67.
- Ajay, C.V., Vinoth V., 2021, "Optimization of process parameters in turning of aluminum alloy using response surface methodology", *Materials Today: Proceedings*, 46, 9462–9468.
- Asilturk, I., Akkus, H., 2011, "Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method", *Measurement*, 44, 1697-1704.
- Bilgic, H.H., Guvenc, M.A., Cakir, M., Mistikoglu, S., 2019, "A study on prediction of surface roughness and cutting tool temperature after turning for s235jr steel", *Konya Journal of Engineering Sciences*, 7, 966-974.
- Bindhushree, B.S., Arunadevi, M., Prakash, C.P.S., 2021, "Experimental investigation of process parameters for turning aluminum using ANOVA", *Materials Today: Proceedings*, 46, 5060-5066.
- Davim, J.P., Figueira, L., 2007, "Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques," *Materials and Design*, 28(4), 1186-1191.
- Hariharan, M.K., Anderson, A., Kumar, K. R., Senthilkumar, A., 2021, "Optimization of machining parameters in turning of LM6 high silicon aluminium alloy using aluminium titanium nitride and diamond like carbon coated carbide tool," *Materials Today: Proceedings*, 45, 5853–5859.
- Jeyaprakash, N., Yang, C.H., Kumar, D.R., 2020, "Minimum cutting thickness and surface roughness achieving during micromachining of aluminium 19000 using CNC machine," *Materials Today: Proceedings*, 21, 755-761.
- Kim, Y.S., Kwon, W.T., 2015, "The effect of cutting parameters for the finest surface roughness during the turning of AISI 1045 with a WC insert", *Journal of Materials Processing Technology*, 29(8), 3437-3445.
- Kumar, S.P.L., 2019, "Measurement and uncertainty analysis of surface roughness and material removal rate in micro turning operation and process parameters optimization" *Measurement*, 140, 538-547.
- Lalwani, D.I., Mehta, N.K., Jain, P.K., 2008, "Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 206(1), 167-179.
- Mia, M., Morshed, M.S., Kharshiduzzaman, M.D., Razi, M.H., Mostafa, M.R., Rahman Ahmad, S.M.S., Hafiz, M.T., Kamal, A.M., 2018, "Prediction and optimization of surface roughness in minimum quantity coolant lubrication applied turning of high hardness steel", *Measurement*, 118, 43-51.
- Özlu, B., Akgün, M., Demir, H., 2019, "AA6061 Alaşımının Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin Analizi ve Optimizasyonu," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 151-158.
- Panhangı, R.K., Rao K.S., Babu B.S., 2021, "Optimization of surface roughness in turning of LM9 aluminum casting alloy", *Materials Today: Proceedings*, 41, 1164–1168.
- Patel, V.D., Gandhi, A.H., 2019, "Analysis and modeling of surface roughness based on cutting parameters and tool nose radius in turning of AISI D2 steel using CBN tool", *Measurement*, 138, 34-38.
- Poulachon, G., Bandyopadhyay, B.P., Jawahir, I.S., Pheulpin, S., Seguin, E., 2004, "Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels", *Wear*, 256(3–4), 302-310.

- Pul, M., Bican, O., 2021, "Comparison of the Effect of Alloy Type on Some Machining Properties in Turning Different Aluminum Alloys", *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 3 (1), 9-17.
- Pul, M., Özerkan, H.B., 2022, "The effect of cutting depth and cutting tool geometry on surface roughness and tool wear behavior in the machining of Al 6061 alloy", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(4), 2013-2024.
- Qehaja, N., Jakupi, K., Bunjaku, A., Bruçi, M., Osmani, H., 2015, "Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process", *Procedia Engineering*, 100, 135-40.
- Ragab, A.E., Taha, M.A., Abbas, A.T., Al Bahkali, E.A., El-Danaf, E.A., Aly, M.F., 2017, "Effect of extrusion temperature on the surface roughness of solid state recycled aluminum alloy 6061 chips during turning operation", *Advances in Mechanical Engineering*, 9(10), 1-11.
- Sarnobat, S.S., Raval, H.K., 2019, "Experimental investigation and analysis of the influence of tool edge geometry and work piece hardness on surface residual stresses, surface roughness and work-hardening in hard turning of AISI D2 steel", *Measurement*, 131, 235-260.
- Selvaraj, D.P., Chandramohan, P., Mohanraj, M., 2014, "Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi Method", *Measurement*, 49, 205-215.
- Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Dixit, A.R., Singh, R.K., 2020, "Measurement of machining forces and surface roughness in turning of AISI 304 steel using alumina-MWCNT hybrid nanoparticles enriched cutting fluid", *Measurement*, 150, 1-13.
- Srithar, A., Palanikumar, K., Durgaprasad, B., 2014, "Experimental Investigation and Surface roughness Analysis on Hard turning of AISI D2 Steel using Coated Carbide Insert", *Procedia Engineering*, 97, 72-77.
- Yağmur, S., Kaya, M.K., Şeker, U., 2021, "AA-6082 T4 Alaşımının Tornalamasında Çok Kristalli Elmas (ÇKE) Takımlara Uygulanan Talaş Kırıcı Formlarının Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 51-57.



RULMANLARDA TİTREŞİM VERİLERİNDEN DURUM İZLEME VE ARIZA TEŞHİSİ İÇİN DERİN ÖĞRENME YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

¹Nurhan GÜRSEL ÖZMEN , ²Yunus Emre KARABACAK 

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE

²Çay İşletmeleri Genel Müdürlüğü (ÇAYKUR), Rize, TÜRKİYE

¹nurhan@ktu.edu.tr, ²yunus.karabacak@caykur.gov.tr

(Geliş/Received:;28.12.2021 Kabul/Accepted in Revised Form: 05.04.2022)

ÖZ: Rulmanlar, yük taşıma kapasiteleri nedeniyle endüstride pek çok alanda sıklıkla kullanılan makine elemanları olduklarından, aşırı yüklenme durumlarında adhezyon, abrazyon ve sürünme gibi aşınma türlerine ya da kırılmalara maruz kalabilirler. Bu nedenle, rulmanlarda durum izlemesi yapılması ve arızaların teşhis edilmesi, sürdürülebilirlik, yüksek performans ve güvenlik açılarından önemli bir husustur. Arıza türlerinin ayırt edilmesinde belirleyici özniteliklerin seçilmesi, farklı çalışma koşullarında bir takım öznitelikler de değişebildiğinden zor bir süreçtir. Bu nedenle, bu çalışmada sağlıklı rulmanların (SR) ve rulman arızalarının (dış bilezik arızası-AR1, iç bilezik arızası-AR2, yuvarlanma arızası-AR3) tespiti için özniteliklerin içsel dinamiklerle belirlendiği derin öğrenme yöntemi olan evrişimli sinir ağları (ESA) kullanılmıştır. Birbirinden farklı mimariyelere sahip ESA yaklaşımlarını eğitmek için Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü uygulanan titreşim sinyallerinin spektrogramları elde edilmiştir. Spektrogram verileri ile eğitilen GoogleNet, ResNet-50, EfficientNet-B0 ve AlexNet yaklaşımlarının sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Karmaşık mimariye sahip ESA'ların (GoogleNet, ResNet-50, EfficientNet-B0) arızaları %100 doğrulukla, AlexNet'in ise %90 doğrulukla tespit ettiği görülmüştür, ancak ağ yapısı değiştikçe ve katman sayısı arttıkça eğitim süresinin de uzadığı görülmüştür. Elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmaların sonuçlarından üstün olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, farklı yaklaşımlara sahip evrişimli sinir ağları yönteminin en temel rulman arıza tespitinde yüksek sınıflandırma doğruluğu sağladığı ve arıza teşhisi için umut vadeden bir yöntem olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Arıza teşhisi, Rulmanlar, Derin Öğrenme, Durum İzleme, Titreşim

Application of Deep Learning Method for Condition Monitoring and Fault Diagnosis from Vibration Data in Bearings

ABSTRACT: Since bearings are machine elements that are frequently used in several industry due to their load carrying capacity, they are subjected to wear or breakage such as adhesion, abrasion and creep under overloading conditions. For this reason, condition monitoring and fault detection are an important issue for sustainability, high performance and reliability. Feature selection is a difficult task, hence, some features may change due to changing working conditions. Therefore, in this study, convolutional neural networks (ESA), which is a deep learning method in which features are determined by internal dynamics, are used for the detection of healthy bearings (SR) and bearing failures (outer ring failure-AR1, inner ring failure-AR2, rolling element failure-AR3). In order to train ESA approaches with different architectures, spectrograms of vibration signals using Short-Time Fourier Transform were obtained. The results of GoogleNet, ResNet-50, EfficientNet-B0 and AlexNet approaches that are trained with spectograms are comparatively examined. It has been seen that ESAs with complex architectures (GoogleNet, ResNet-50, EfficientNet-B0) detect failures with 100% accuracy and AlexNet with 90% accuracy, but it has been observed that the training time increases as the network structure changes and the number of layers

increases. It is observed that the results of the study are far better than the similar papers in the literature. As a result, it is seen that the convolutional neural network method with different approaches provides high classification accuracy in the most basic bearing fault detection and is a promising method for fault diagnosis.

Keywords: *Fault detection, Bearings, Deep Learning, Condition Monitoring, Vibration*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel durum izleme uygulamaları, geliştirilen izleme teknolojilerine ve yapay zeka ile karar verme yöntemlerine bağlı olarak çok gelişmiştir. Fabrikalar, üretim tesisleri ve santraller gibi çalışmanın sürekli olduğu ve üretimin kesintisiz devam ettiği yerlerde söz konusu sistemleri oluşturan ekipman ve makinelerin hatasız çalışması maliyet ve iş güvenliği açısından son derece önemlidir (Cakır ve diğ., 2021). Makinelerin bakım aralıklarının ve beklenmeyen arızalardan kaynaklanan duruş sürelerinin mümkün olduğunca düşük tutulması arzu edilir. Dolayısıyla, böyle bir arızanın yol açacağı maliyetleri en aza indirmek için, bu tür arızaların önceden tespit edilmesi önem taşımaktadır. Mühendislik uygulamalarındaki artan karmaşıklık ve hassasiyet özellikle Endüstri 4.0 , nesnelerin interneti ve büyük veri analizi kavramlarının hayatımıza girmesi nedeniyle durum izleme ve güvenilirlik sorunları daha da önemli hale gelmiştir (Caesarendra ve Tjahjowidodo, 2017). Durum izleme, makinelerle ait farklı parametrelerin gerçek zamanlı olarak ölçülmesi ve makine izleme yazılımıyla birleştirilmesi yoluyla makine sağlığı ve güvenliğini bir başka deyişle makinelerin kalan kullanışlı ömrünü kestiren veya öngören bir bakım yaklaşımıdır. Toplanan ölçüm verileri yorumlanarak makinenin arızalı olup olmadığı belirlenir ve bu doğrultuda bakım planı hazırlanarak uygulamaya geçilir. Özellikle rulman ve dişli çark gibi elemanların kullanıldığı makinelerin arızalarının teşhisi için güvenilir bir durum izleme sisteminin kurulması kesintisiz ve sorunsuz bir çalışma sağlar (Correa ve Guzman, 2020).

Rulmanlar, bağlı hareketi istenen hareketle sınırlayan ve hareket eden elemanlar arasındaki sürtünmeyi azaltarak bu esnada daha az güç harcanarak, daha yüksek devirlere çıkabilen makine elemanlarıdır. Çoğu rulman, sürtünmeyi en aza indirerek istenen hareketi kolaylaştırır. Rulmanlar, çalışma şekline, izin verilen hareketlere veya parçalara uygulanan kuvvetlerin veya yüklerin yönlerine göre farklı şekillerde sınıflandırılırlar. Birçok endüstriyel uygulamada, güç ve hareket iletim sistemleri dairesel veya eksenel olan her türlü taşıt ve transport ekipmanında ve üretim makinelerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Rulmanların üretimlerinde yüksek teknoloji ve yüksek kalitede malzeme kullanımı esastır. Ayrıca, kullanıldıkları yerlerde statik ve dinamik yüklere maruz kaldıklarından, temas noktalarında farklı deformasyonların gözlenmesi normaldir. Bu nedenle rulmanlarda durum izleme çalışmaları da söz konusu sistemlerin sağlıklı çalışabilmeleri için son derece kritiktir (Duan ve diğ., 2018). Rulmanlarda en sık karşılaşılan sorunlar yağsızlık, adhezyon aşınması, yüzey yorgunluğu, abrazyon aşınması ve kırılma şeklinde sıralanabilir. Bu hasarların meydana getireceği zaman, üretim ve para kaybını önlemek için kesitirimci bakım yöntemleri uygulanmalıdır (Geitner ve Bloch, 2012).

Rulmanlarda durum izlemesi için literatürde yaygın olarak kullanılan bazı teknikler mevcuttur. Titreşim analizi (Malla ve Panigrahi, 2019; Liu ve diğ., 2020), akustik analiz (Elforjani ve Shanbr, 2017; Hase, 2020), aşınma kalıntısı analizi (Peng ve diğ., 2019; Ranjan ve diğ., 2020), motor akım analizi (Hoang ve Kang, 2019) gibi teknikler bunlardan başlıcalarıdır. Makinelerin pek çoğunda millerin dönmesi veya dişlilerin çalışması esnasında periyodik hareket ortaya çıktığından, makinenin çalışma frekansı ve dolayısıyla titreşim frekansı tespit edilerek, olağan olmayan durumlar tespit edilebilir. Rulman durumunun titreşimler yoluyla izlenmesinde sıklıkla titreşim sensörleri kullanılır (O'Lmasov Ahadjon Akramjon, 2020). İvmeölçer olarak da bilinen titreşim sensörleri zorlu çalışma koşullarına ya da yüksek sıcaklığa maruz kalabilir. Böyle durumlarda rulmanlarda durum izleme performansının iyileştirilmesi için akustik ölçümlerden yararlanılabilir (Rezaei ve diğ., 2011). Rulmanlarda bir diğer durum izleme tekniği ise termal görüntülemedir (Choudhary ve diğ., 2018). Elektromanyetik spektrumun uzun kızılötesi aralığındaki radyasyonu algılayabilen ve termogram olarak bilinen termal görüntüler üreten kameralar

ile rulmanlar temassız ve sürekli olarak izlenebilir (Usamentiaga ve diğ., 2014). Farklı durum izleme ölçüm metodları geliştirilmesine rağmen, titreşim analizi hala daha en geçerli olan yöntemdir. Çünkü, değişikliklere duyarlıdır ve sürekli durum izleme çalışmalarında kullanılmaya da uygundur. Ayrıca, sinyal işleme yöntemlerinin gelişimiyle birlikte, titreşim verilerinin hassasiyeti de artmaktadır.

Rulmanlarda arıza teşhisi çalışmaları için kullanılacak verinin yanında, bu verilerin değerlendirileceği yöntemler de büyük önem taşımaktadır. Geçmişten günümüze rulmanlarla ilgili birçok arıza teşhis ve durum izleme çalışmasında sınıflandırma algoritması olarak, yapay sinir ağları (Karabacak ve diğ., 2022; Karabacak ve Özmen, 2021), destek vektör makineleri (Goyal ve diğ., 2020; Zhang ve Zhou, 2013), k en yakın komşu algoritması (Dong ve diğ., 2017) ve karar ağaçları algoritması (Amarnath ve diğ., 2013) kullanılmıştır. Bu yöntemlerin veri boyutuna ve tipine göre sınıflandırma performansları değişiklik göstermektedir. Bu alanda destek vektör makineleri ve yapay sinir ağları en yaygın kullanılan ve yüksek doğruluk elde edilen yöntemlerin başında gelmektedir. Sınıflandırma algoritmalarının üstün performans göstermesindeki önemli etkenlerden biri de ayırt edici özniteliklerin ele alınan probleme uygun seçilmesidir. Son yıllarda, kestirimci bakım çalışmalarındaki veri seti boyutları büyüdükçe, ayırt edici özniteliklerin sayısı da artmış ve bu özniteliklerin belirlenmesi zorlaşmıştır. Dolayısıyla, öz niteliklerin dışardan belirlenmesine gerek kalmadan, problemin iç yapısında özniteliklerin belirlenerek ve ağırlıklandırılarak sınıflandırma işleminin yapıldığı etkili bir algoritma olan evrişimsel sinir ağları (ESA) kullanılmıştır (Karabacak ve diğ., 2020; Zhu ve diğ., 2018). ESA en kolay uygulanabilen ve sıklıkla tercih edilen bir derin öğrenme algoritmasıdır.

Rulmanlarda yapay zeka tekniklerinin kullanımı makinelerde durum izleme amacıyla, farklı değişken parametreler altındaki karmaşık sistemlerin modellenmesi amacıyla veya da sistemlerin optimizasyonu, kestirimi ve kontrolü gibi amaçlarla sıklıkla kullanılmaktadır (Eren ve diğ., 2021). Bu bağlamda derin öğrenme, en yeni makine öğrenme tekniklerinden biridir ve son yıllarda durum izleme amacıyla da uygulamalar yapılmıştır. Derin öğrenmenin rulman ve redüktör gibi elemanların kestirimci bakımında güvenilir ve etkili bir metodoloji olduğu farklı araştırmacılar tarafından ortaya koyulmuştur (Li, X. ve diğ., 2019). Yoo ve Baek sürekli dalgacık dönüşümü ve ESA yaklaşımına dayalı olarak rulmanların kalan faydalı ömrünün tahmini için yeni bir görüntü özniteliği hesabı geliştirmiştir (Yoo ve Baek, 2018). Sadoughi ve Hu yuvarlanma elemanlı rulmanlarda arıza teşhisi için fizik tabanlı bir ESA kullanmıştır (Sadoughi ve Hu, 2019). Zhu ve arkadaşları rulmanlarda arıza teşhisi için güçlü genellemeye sahip bir kapsül ağına dayalı ESA üzerinde çalışmış ve geliştirdikleri modeli geleneksel yöntemlerle karşılaştırmıştır (Zhu ve diğ., 2019). Zhang ve arkadaşları gürültülü ortamda ve farklı çalışma yükleri altında çalışan rulmanların arızalarının teşhisi için yeni eğitim metodları ile eğitilen bir ESA yaklaşımı geliştirmiştir (Zhang ve diğ., 2018). Kumar ve arkadaşları rotatif makinelerde rulman arızalarının teşhis edilmesi için yeni bir ESA yaklaşımı geliştirmiştir (Kumar ve diğ., 2021). Huang ve arkadaşları rulmanlarda arıza teşhisi için çok ölçekli enfomasyona sahip gelişmiş bir derin ESA yaklaşımı kullanmıştır (Huang ve diğ., 2019). Zhang ve arkadaşları rulman arızalarının teşhisi için zaman-fekans görüntüsüne dayalı olarak gelişmiş bir ESA yaklaşımı sunmuştur (Zhang ve diğ., 2020). Zhao ve arkadaşları derin ESA yaklaşımına dayalı olarak planet dişli mekanizmasındaki rulmanların arızasını teşhis etmiştir (Zhao ve diğ., 2019). Hoang ve Kang ESA ve titreşim görüntüsü kullanarak rulmanlarda arıza teşhisi yapmıştır (Hoang ve Kang, 2019). Xu ve arkadaşları geliştirilmiş çok ölçekli bir ESA yaklaşımı ile öznitelik çıkarım mekanizmasına dayalı olarak rulmanlarda azıra teşhisi yapmıştır (Xu ve diğ., 2021). Li ve arkadaşları derin öğrenme ve ESA teknikleri ile bir öznitelik füzyonu metodu kullanarak rulmanlarda arıza teşhisi yapmıştır (Li, H. ve diğ., 2019). Kumar ve arkadaşları dalgacık dönüşümüne dayalı bir ESA yaklaşımı kullanarak rulman kusurunun boyutlarının değerlendirmesini yapmıştır (Kumar ve diğ., 2020). Xiong ve arkadaşları dalgacık paket dönüşümünü ESA yapısına entegre ederek makaralı rulmanlar için yeni bir uçtan uca arıza teşhis yaklaşımı geliştirmiştir (Xiong ve diğ., 2020). Islam ve Kim dalgacık paket dönüşümü ve ESA yaklaşımının iki boyutlu temsilini kullanarak otomatik bir rulman arıza teşhis şeması önermiştir (Islam ve Kim, 2019). Shao ve arkadaşları modifiye edilmiş ESA ve termal görüntüler kullanarak farklı çalışma koşulları altında rotor ve rulman sistemlerinin akıllı arıza teşhisine yönelik bir yaklaşım geliştirmiştir (Shao ve diğ., 2020). She ve Jia üstel olarak azalan öğrenme

oranına sahip çok kanallı bir ESA yaklaşımına dayalı olarak rulmanlı yatakların aşınma yapısını göstermiştir (She ve Jia, 2019). Ma ve arkadaşları iki boyutlu görüntü temsili kullanarak transfer öğrenme ve ESA yaklaşımına dayalı olarak yeni bir rulman arıza teşhisi yöntemi önermiştir (Ma ve diğ., 2019). Cheng ve arkadaşları çoklu arıza davranışları altında rulmanların kalan faydalı ömrünün tahmini için aktarılabılır ESA tabanlı bir yaklaşım önermiştir (Cheng ve diğ., 2021). Guo ve arkadaşları rulmanlarda arıza teşhisi ve lokalizasyonu için enformasyon füzyonuna dayalı çok görevli bir ESA yaklaşımı önermiştir (Guo ve diğ., 2019). Wu ve arkadaşları yarı denetimli bir ESA yöntemi ile rulmanlarda arıza teşhisi yapmıştır (Wu ve diğ., 2021). Schwendemann ve arkadaşları rulmanlarda arıza sınıflandırması için en güncel durumu ele almış ve taşlama makinelerindeki rulmanlara yönelik durum değerlendirmesi yapmıştır (Schwendemann ve diğ., 2021).

Arıza teşhisi çalışmalarında, ideal öznelikleri belirlemek için öznelik uzayı üzerinde farklı öznelik seçim teknikleri gerekmekte ve klasik sınıflandırma algoritmalarında özellik uzayındaki özneliklerin sayısı, çeşitli hataları beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla, derin öğrenme yöntemleri bu zorluğu ortadan kaldırmaktadır ayrıca sınırlı veri olması durumunda da başarılı sonuçlar vermektedir (Karabacak ve diğ., 2020; Yamashita ve diğ., 2018). Her ne kadar derin öğrenme yaklaşımının kullanımında veri sayısının fazla olması ve geçmiş öğrenme bilgisi gerekse de, gelecekte de işlemci kapasitesi yüksek bilgisayarlar vasıtasıyla, derin öğrenme yöntemindeki eksikliklerin üstesinden gelineceği düşünülmektedir. Bu çalışmada CWRU titreşim verilerinden (Randall, 2021) arıza teşhisi yapabilmek amacıyla sağlıklı rulmanların (SR) ve rulman arızalarının (dış bilezik arızası-AR1, iç bilezik arızası-AR2, yuvarlanma arızası-AR3) tespiti için bir derin öğrenme yöntemi olan evrişimli sinir ağları (ESA) kullanılmıştır. Literatürde ilk kez birbirinden farklı mimariye sahip ESA yaklaşımları ağ yapısı ve eğitim süresi açısından değerlendirilmiştir. Ham titreşim verilerine Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü uygulandıktan sonra spektrogramları elde edilmiştir. Bu spektrogram görüntüleri ile farklı ağlar eğitilmiştir. GoogleNet, ResNet-50, EfficientNet-B0 ve AlexNet yaklaşımlarının sonuçları ağ yapısı ve eğitim süresi açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar doğruluk ve performans değerleri açısından karşılaştırmalı olarak ve literatürdeki benzerleri ile kıyaslamalı olarak sunulmuştur.

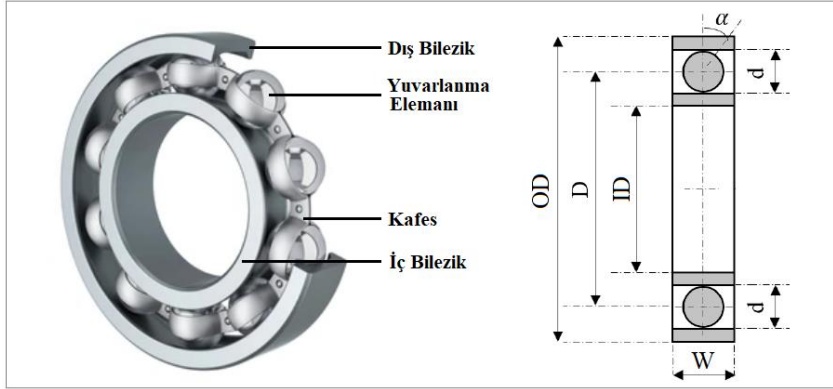
Çalışmanın devamı rulman arızalarının ve veri setinin tanıtıldığı Materyal ve Yöntem başlığı ile sürdürülmüştür. Bu bölümde Kısa zamanlı Fourier Dönüşümü ve Evrişimli Sinir Ağları tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde zaman ve frekans analizlerine ait bulgular farklı değerlendirme kriterleri açısından sunulmuştur. Ayrıca CWRU (Randall, 2021) rulman titreşim verileri kullanılan çalışmalar ile sonuçlar kıyaslamalı şekilde verilmiştir. Son olarak dördüncü bölümde çalışmanın sonuçları açık bir şekilde ifade edilmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Rulman Arızaları (Bearing Faults)

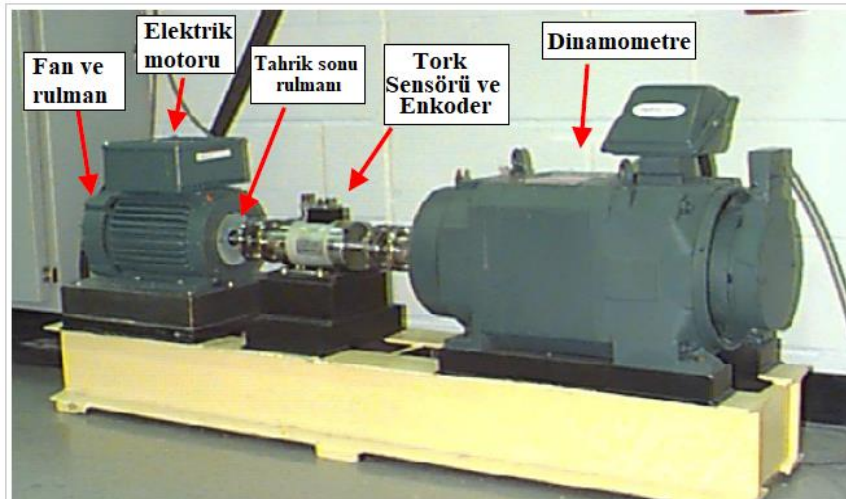
Rulmanlar, makinelerin yüksek hızlarda verimli çalışmasını ve ağır yükleri güvenli bir şekilde taşımasını sağlayan hassas bir şekilde üretilmiş makine elemanlarıdır. Birçok farklı tip ve boyutta rulman standart olarak hassas ve titiz bir işçilikle üretilmektedir. Yapılan bir çok çalışmada rulmanlı yataklardaki titreşim mekanizması açıklamıştır (Al Shorman ve diğ., 2020; Gupta ve Pradhan, 2017). Sağlıklı çalışan bir rulmanda bile titreşimler oluşur, titreşim seviyelerinin artışı bir arızanın varlığı ile açıklanabilir. Yüzey yorgunluğu, adhezyon veya abrazyon aşınması, plastik deformasyon, korozyon, zayıf ya da yanlış yağlama, hatalı montaj ve uygunsuz tasarım gibi çok sayıda faktör rulmanların erkenden arızalanmasına neden olabilir. Arızaların yol açtığı titreşim miktarının tespit edilmesi ve onu yaratan arızaların belirlenmesi rulmanların durum izleme çalışmalarında araştırılan en önemli konulardır.

Şekil 1’de, en çok kullanılan rulman türlerinden biri olan sabit bilyalı rulmanın temel boyutları ve elemanları gösterilmektedir. Sabit bilyalı rulman, iç bilezik, dış bilezik, bilyeler (yuvarlanan elemanları) ve kafesten oluşur. Burada OD dış bilezik çapı; D adım çapı; ID iç çap veya delik çapı; d yuvarlanma elemanı çapı; W kanal genişliği ve α ise temas açısıdır (Nguyen-Schäfer, 2016).



Şekil 1. Rulman elemanları ve temel boyutlar
Figure 1. Bearing components and basic dimensions

Bu çalışmada, Case Western Reserve Üniversitesi (CWRU), ABD'den Randall'ın rulman titreşim verileri kullanılmıştır (Randall, 2021). Veri setinin elde edildiği deney düzeneği Şekil 2'de sunulmuştur. Düzenek üzerinde 2 hp elektrik motorunun döndürdüğü bir mil bulunmaktadır. Mile monte edilmiş bir tork dönüştürücü ve enkoder yer alır. Dinamometre ve elektronik kontrol sistemi ile mile tork uygulanmaktadır. Testler için, tahrik ve fan yatağı rulmanlarına 0,18 ila 0,71 mm arasında değişen çaplarda hatalar (SKF sabit bilyalı rulmanlar: sırasıyla 6205-2RS JEM ve 6203-2RS JEM) elektro-deşarj işleme (EDM) yöntemi ile işlenmiştir. Farklı durumlar için 161 adet veri seti oluşturulmuştur. Tüm veriler için mil dönüş hızı 6 rad/s'dir. Örnekleme frekansı ise 48000 örnek/s'dir. Sinyal uzunluğu her bir rulman için 200000 örnektir (Randall, 2021; Smith ve Randall, 2015). Deney düzeneği ve veri setlerine ait daha fazla detaya CWRU Rulman Veri Merkezi web sitesinden erişilebilir (CWRU Rulman Veri Merkezi Web sitesi.). CWRU veri seti içerisinde 1 sağlıklı ve 3 arızalı rulmana ait (6203-2RS) titreşim verileri seçilmiştir. Bunlar SR (sağlıklı rulman), AR1 (dış bilezik arızası), AR2 (iç bilezik arızası) ve AR3 (yuvarlanma elemanı arızası) olarak gösterilmiştir. Bu veriler seçilen dört farklı durum için [200000x1] boyutundadır. Çizelge 1'de, test rulmanlarının temel boyutları gösterilmektedir. Şekil 3 sağlıklı ve arızalı rulmanlara ait temsili görsellerdir.



Şekil 2. Rulman deney düzeneği (Smith ve Randall, 2015)
Figure 2. Bearing test setup (Smith and Randall, 2015)

Çizelge 1. Deney rulmanlarının temel boyutları (Smith ve Randall, 2015)*Table 1. Basic dimensions of test bearings (Smith and Randall, 2015)*

Sembol	Açıklama	Değer
D	Adım çapı	38.5 [mm]
ID	İç bilezik çapı	25 [mm]
OD	Dış bilezik çapı	52 [mm]
d	Yuvarlanma elemanı çapı	7.12 [mm]
W	Kanal genişliği	15 [mm]
n	Yuvarlanma elemanlarının sayısı	12 [-]
α	Kontak açısı	0 [°]
f_s	Rulman dönüş hızı	6 [Hz]



Şekil 3. Sağlıklı ve arızalı rulman gösterimleri (Skf Rulman Kataloğu) SR (sağlıklı rulman), AR1 (dış bilezik arızası), AR2 (iç bilezik arızası), AR3 (yuvarlanma elemanı arızası)

Figure 3. Healthy and faulty bearing representations (Skf Rolling Bearings) SR (healthy), AR1 (outer race fault), AR2 (inner race fault), AR3 (Rolling element fault)

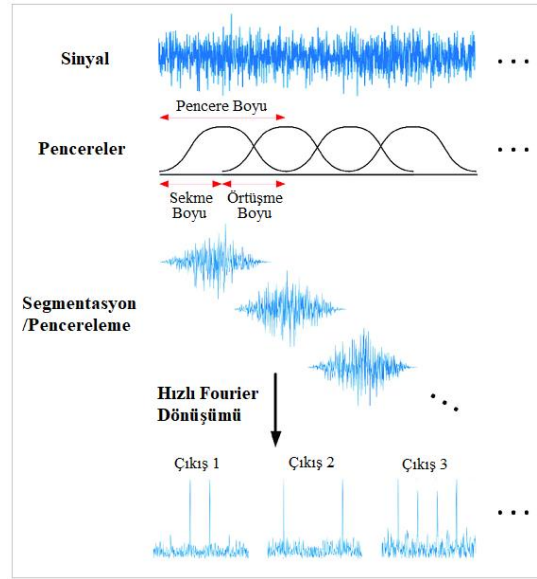
Rulmandaki bilye (yuvarlanma elemanı) çalışma sırasında iç veya dış yuvadaki yerel bir arızaya çarptığında, dış bilezik bilye geçiş frekansı (BPFO), iç bilezik bilye geçiş frekansı (BPFI), temel dizi frekansı (FTF) ve bilye spin frekansı (BSF) gibi rulman arıza frekanslarından birine bağlı olarak özel bir darbe sinyali (pals) çıkar (Kim ve diğ., 2020). Frekans spektrumunda görülen bu sinyal arızanın türü hakkında bilgi verir.

Metodoloji (Methodology)

Bir makineye ait rulmandan gelen titreşim verilerinin analizinde zamana dayalı analiz yöntemleri, frekans alanı yöntemleri ve zaman-frekans alanı analizinin bir kombinasyonuna dayanır. Zaman alanı analizi, sistemin titreşim seviyelerindeki genel artıştaki eğilimleri tespit etmek için kullanışlıdır. Ancak bu analiz arızanın türünü tespit edebilmek için yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle frekans alanı analizi veya zaman-frekans analizi yapılması faydalı olacaktır (Mohd Ghazali ve Rahiman, 2021). Bu doğrultuda bu çalışmada zaman-frekans analizine dayalı olarak ham titreşim verilerine kısa zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) uygulanmıştır. Bu KZFD uygulanan rulmanlara ait spektrogram görüntüleri elde edilmiştir. Ele alınan her veri setine ait spektrogramlar görüntü olarak kaydedildikten sonra derin öğrenme algoritması için veri seti olarak kullanılmıştır.

Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) ve Titreşim Sinyallerinin Spektrogramları (Short-Time Fourier Transform and Vibration Signals Spectrograms)

Kısa Zamanlı Fourier dönüşümü (KZFD), zaman içinde değişen sinyalin yerel bölümlerinin sinüzoidal frekansını ve faz içeriğini belirlemek için kullanılan Fourier temelli bir dönüşümdür. Uygulamada, KZFD, uzun bir zaman sinyalini eşit uzunlukta daha kısa parçalara ayırarak her kısa parça üzerinde ayrı ayrı Fourier dönüşümünün hesaplanması ile elde edilir (Şekil 4). Bu, her kısa segmentteki Fourier spektrumunu ortaya çıkarır ki buna spektrogram adı verilir. Spektrogramda, değişen spektrumlar zamanın bir fonksiyonu olarak çizilir. Bu ifadeye işaretin (sinyalin) spektrogramı adı verilir (Sharma ve Parey, 2017).



Şekil 4. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (Jeon ve diğ., 2020)

Figure 4. Short-Time Fourier Transform (Jeon et al, 2020)

Sürekli zaman durumunda, KZFD işlemi uygulanırken sinyal bir pencere fonksiyonu ile çarpılır (Eşitlik 1). Burada, $x(t)$ zaman sinyalini, $p(t)$ pencere fonksiyonunu, τ zaman eksenini ve ω frekansı göstermektedir. $X(t)$ ise $x(t)$ 'nin Fourier dönüşümüdür, sinyalin zaman ve frekans üzerinden fazını ve büyüklüğünü temsil eden karmaşık bir fonksiyon olarak dikkate alınır (Vashisht ve Peng, 2018).

$$KZFD \{x(t)\}(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)p(t-\tau)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

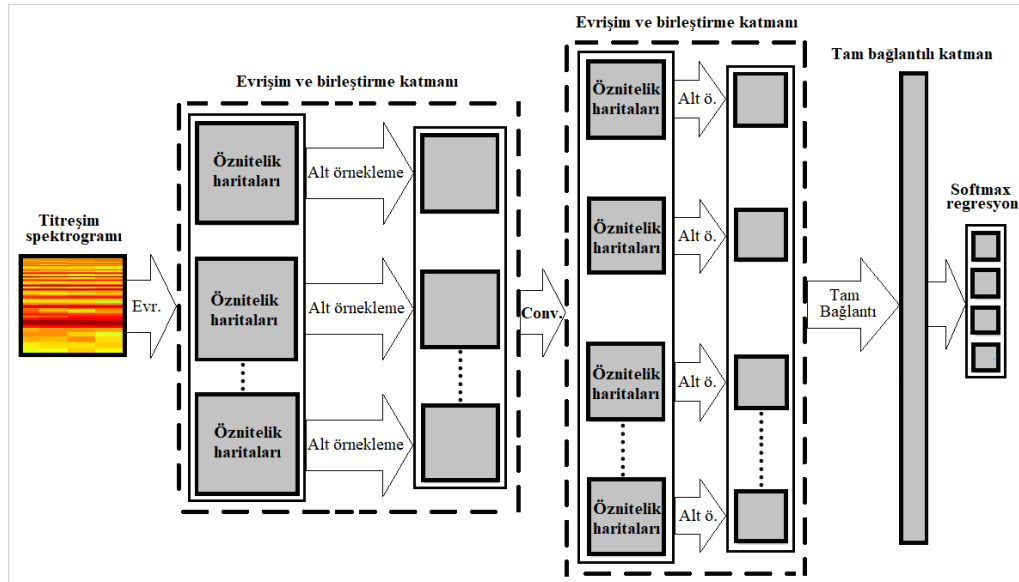
Ayrık zaman durumu için KZFD, Eşitlik 2'deki gibi hesaplanmaktadır. Burada $x[n]$ ayrık sinyali, $p[n]$ pencere fonksiyonunu, m ve n ise ayrık durum için zaman aralıklarını temsil etmektedir. Buna göre, KZFD fonksiyonunun spektrogramı Eşitlik 3'de gösterildiği gibi hesaplanır (Vashisht ve Peng, 2018).

$$KZFD \{x[t]\}(m, \omega) = X(m, \omega) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x[n]p[n-m]e^{-j\omega n} \quad (2)$$

$$Spektrogram \{x[t]\}(m, \omega) = |X(m, \omega)|^2 \quad (3)$$

Evrişimli Sinir Ağları (ESA) (Convolutional Neural Networks (CNN))

Evrişimli sinir ağı (ESA-CNN veya ConvNet), yapay sinir ağlarının özel bir alt sınıfı olup, çoğunlukla görüntüler üzerinden analizler gerçekleştirilmektedir. En çok kullanılan derin öğrenme türlerinden olan ESA'lar, çok katmanlı algılayıcıların belli bir düzende geliştirilmiş şeklidirler. Çok katmanlı algılayıcılarda bir katmandaki her nöron bir sonraki katmandaki tüm nöronlara bağlıdır. ESA da, evrişimsel ve alt örnekleme katmanlarından oluşur. Bu katmanların her birinin belirli bir topografik yapısı vardır ve her katman farklı nöron kümeleri içerir. Her nöron, önceki katmanlardaki nöronlarla da bağlantılıdır. Şekil 5'te, giriş, evrişim, alt örnekleme katmanları, öznelik haritaları, tam bağlantılı katmanı ve softmax regresyondan (son aşama) oluşan tipik bir ESA mimarisi sunulmuştur. Evrişimsel ve alt örnekleme katmanları, hesaplama süresini azaltmak için özel bir şekilde düzenlemiştir (Chen ve diğ., 2015). ESA algoritması kullanıldığı durumda rulman arızası ile ilgili özneliklerin ayrıca çıkarılması gerekmez. Programın kendi içerisinde seçmiş olduğu özneliklere bağlı olarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir ve bu sayede işlem yükü azaltılabilir. ESA, yerel ağırlık paylaşımı yoluyla ağ parametrelerinin sayısını azaltma ve örnek sayısı yetersiz olduğu durumda ağı aşırı uyum göstermesini önleme yeteneğine de sahiptir (Chen ve diğ., 2019).



Şekil 5. Tipik ESA mimarisi

Figure 5. Typical architecture of CNN

Evrişimsel katmanlar bir dizi filtreden oluşur. Bu filtreler, bir önceki katmandan gelen girdileri bir dizi ağırlıkla çarpar ve öznelik haritası adı verilen bir çıktı oluşturur. Filtrelerdeki nöronlar giriş veri noktalarına bağlanır ve bu noktalar ağırlıklarla çarpılır. Aynı filtredeki tüm nöronlar ağırlıklarını paylaştığından, ESA'nın optimizasyon süresi ve karmaşıklığı azalır (Yamashita ve diğ., 2018).

Eğer evrişim katmanına girişin $X \in R^{A \times B}$ olduğu varsayılırsa, katman çıkışı Eşitlik 4'deki gibi hesaplanır. Burada, A ve B giriş verisinin boyutları, $*$ evrişim operatörü, E_n evrişim katmanının n 'inci öznelik haritası, X giriş verisi matrisi, W_n aktüel katmanın n 'inci filtresinin ağırlık matrisi, b_n n 'inci sapma ve f sonuca uygulanan ve lineer olmayan aktivasyon fonksiyonudur (Jing ve diğ., 2017).

$$E_n = f(X * W_n + b_n) \quad (4)$$

Birleştirme katmanları evrişim katmanlarının ardından gelir ve alt örnekleme yaparak ağız özneteliklerinin ve parametrelerinin boyutunu azaltır. Aktivasyon istatistiklerini hesaplayan üç farklı birleştirme işlevi vardır: maksimum birleştirme, ortalama birleştirme ve ağırlıklı birleştirme. Bunlar arasında maksimum birleştirme, ESA mimarisinde en çok tercih edilen fonksiyondur (Sun, M. ve diğ., 2017). F birleştirme bloğu boyutu ve $E_n \in F$ olmak üzere birleştirme katmanının çıkışı G_n olarak ifade edilirse, maksimum birleştirme aktivasyonu Eşitlik 5'deki gibi yazılır (Jing ve diğ., 2017).

$$G_n = \max E_n \quad (5)$$

Son olarak, tam bağlantılı katman, evrişim ve birleştirme katmanlarının kombinasyonlarını takip eder. Tam bağlı katman, geleneksel yapay sinir ağlarına benzemektedir. Bu nedenle farklı sınıflandırma problemlerine uygulanabilir. Hızlı ve doğru sonuçlar elde etmek için son katman olarak bir gizli katman ve softmax regresyonu seçilmiştir. Bu çalışmada, sağlıklı ve arızalı olan farklı rulmanlar sınıflandırıldığından, softmax regresyonunun çıkışı Eşitlik 6'daki gibi ifade edilebilir. Burada H sınıf etiketinin numarası, W_j ağırlık matrisi, b_j sapma, R ise sınıflandırma işleminin nihai sonucudur (Jing ve diğ., 2017).

$$R = \begin{bmatrix} G(y=1|x; W_1, b_1) \\ G(y=2|x; W_2, b_2) \\ \dots \\ G(y=H|x; W_H, b_H) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sum_{j=1}^H \exp(W_j x + b_j)} \begin{bmatrix} \exp(W_1 x + b_1) \\ \exp(W_2 x + b_2) \\ \dots \\ \exp(W_H x + b_H) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Modifiye Edilmiş Ön Eğitimli ESA'lar ile Rulmanlarda Arıza Teşhisi (Diagnostics of Bearings with Modified Pretrained CNNs)

Ön eğitimli ve öznetelik çıkarmayı öğrenmiş bir ESA modifiye edilerek yeni sınıflandırma problemlerine uygulanabilir. Bu şekilde bir ağı eğitmek için gereken zaman ve harcanacak çaba sıfırdan bir ağı eğitmek için gerekenden çok daha azdır (Hao ve diğ., 2021). Bu çalışmada rulman arızalarının teşhisi için ön eğitimli ESA'lar kullanılmıştır. Çizelge 2'de bu ESA'lara ait özellikler verilmiştir.

ESA yöntemlerinde genellikle büyük boyutlu görsel veri kullanıldığında yüksek performans gösterdiği anlayışı hakimdir. Ancak sınırlı veri olması durumunda da derin öğrenmeden yararlanmak mümkündür. Bunun için ince ayar yapma, veri boyutlarını büyütme veya farklı bir kayıp fonksiyonu seçme gibi işlemler yapılır ve ESA'nın performansı iyileştirilebilir (Karabacak ve diğ., 2020; Yamashita ve diğ., 2018). Bu çalışmada kullanılan ön eğitimli ESA'ların performansının iyileştirilmesi için öncelikle ince ayar ile ağ parametreleri güncellenmiş ve ham verilere veri büyütme işlemi uygulanmıştır. Çizelge 3'de seçilen ESA yaklaşımlarına ait diğer parametrelerle ilgili bilgiler verilmiştir. Veriler %50 eğitim, %25 doğrulama ve %25 test verisi olacak şekilde standart gruplandırılmıştır. Doğrulama frekansı 5 Hz ve öğrenme oranı 0,001 olarak seçilmiştir.

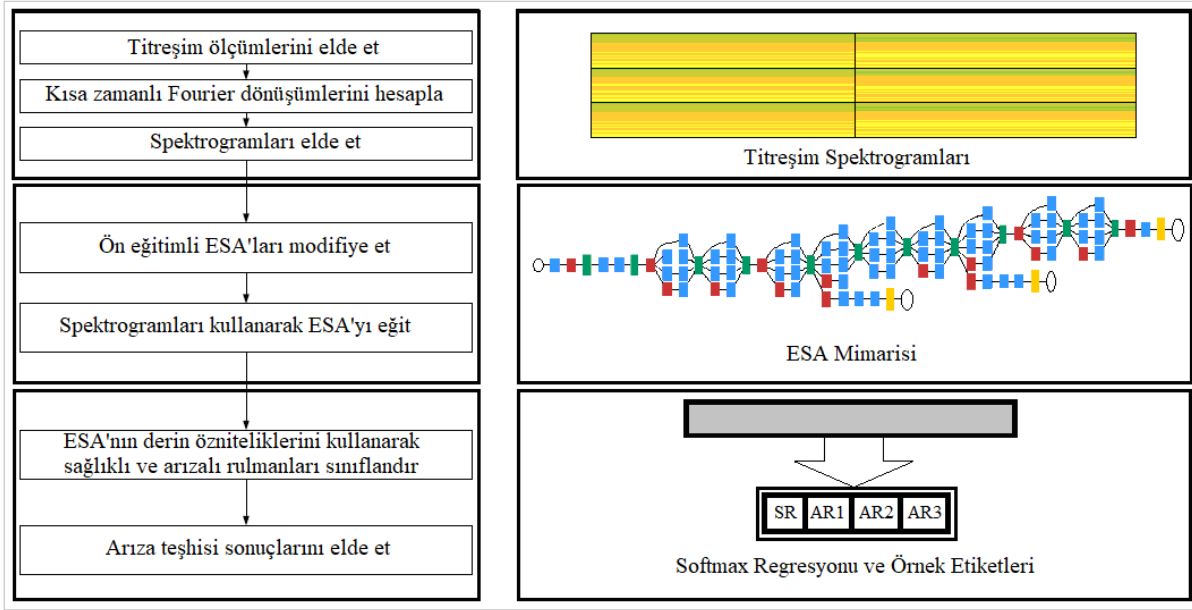
Çizelge 2. Modifiye edilmiş ön eğitilmiş ESA'ların özellikleri*Table 2. Characteristics of modified pretrained CNNs*

	<i>GoogleNet</i>	<i>ResNet-50</i>	<i>AlexNet</i>	<i>EfficientNet-B0</i>
Katman derinliği	22	50	8	82
Katman sayısı	144	177	25	290
Bağlantı sayısı	170	192	24	362
Giriş tipi	Görüntü	Görüntü	Görüntü	Görüntü
Giriş boyutu	224x224x3	224x224x3	227x227x3	224x224x3
Çıkış tipi	Sınıflandırma	Sınıflandırma	Sınıflandırma	Sınıflandırma
Çıkış boyutu	4	4	4	4
Ağırlık öğrenme oranı faktörü	10	10	10	10
Sapma öğrenme oranı faktörü	10	10	10	10
Kayıp Fonksiyonu	Çapraz entropi	Çapraz entropi	Çapraz entropi	Çapraz entropi

Eğitim sürecinin akış şeması Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre SR, AR1, AR2 ve AR3 için titreşim sinyallerine ait spektrogramlar ayrı ayrı elde edilmiştir. Her bir rulman için elde edilen veriler eğitim, test ve doğrulama olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. ESA çıkışları sağlıklı ve arızalı rulmanları sınıflandırmak için değiştirilmiştir. Eğitim ve doğrulama verileri kullanılarak ESA eğitilmiş ve derin özniteliklere göre sınıflandırma yapılmıştır. Son olarak, eğitilen ağ test edilmiş ve veri etiketlerine göre arıza teşhisi yapılmıştır.

Çizelge 3. Farklı ESA'lar için parametreler*Table 3. Parameters for different CNNs*

	Giriş Veri Tipi				Arıza Tipi
	Titreşim Spektrogramları				
	GoogleNet	ResNet-50	AlexNet	EfficientNet-B0	SR
Doğrulama frekansı	5 Hz				AR1
Öğrenme oranı	0.001				AR2
Maksimum epok	5				
Mini gurup boyutu	10				AR3
Giriş verisi çözünürlüğü	1458 x 718 piksel				



Şekil 6. ESA tabanlı rulman arıza teşhisi yaklaşımı ve eğitim sürecinin akış şeması

Figure 6. CNN based approach to bearing diagnostics and flowchart of the training process

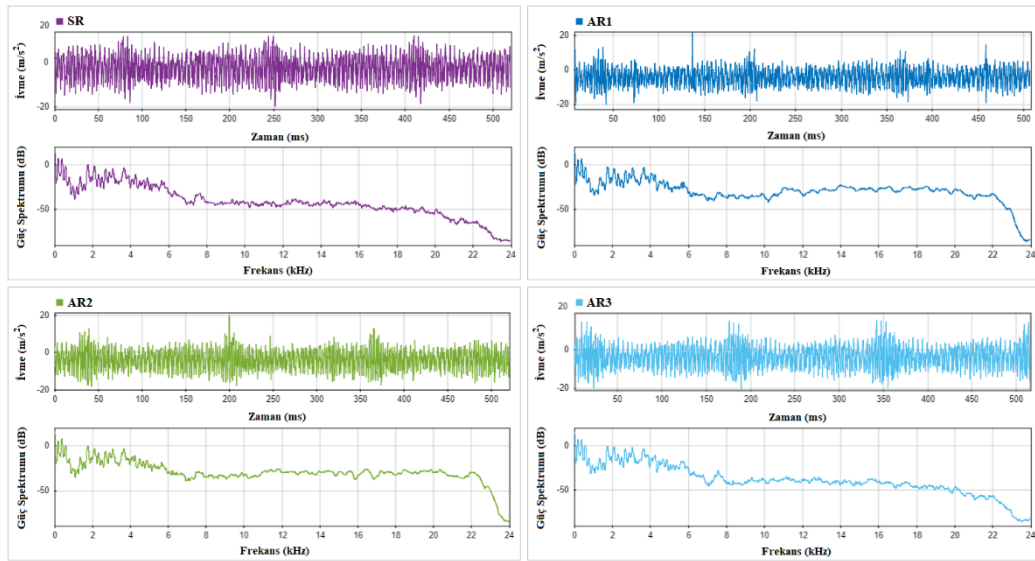
Çalışmaya ait tüm analiz ve hesaplamalar Intel Core i7-3630QM, 2.40 GHz işlemci ve 16.0 GB ram belleğe sahip bir bilgisayarda MATLAB (2021-b) programı ile gerçekleştirilmiştir. Matlab programı kullanılarak ESA'ların eğitimi gerçekleştirilmiştir. Programın içeriğindeki derin öğrenme araç kutusu yardımıyla ön eğitilmiş ESA'lar modifiye edilebilir, eğitilebilir ve görüntü, zaman serisi veya metin gibi veriler kullanılarak sınıflandırma ya da regresyon analizi gerçekleştirilebilmektedir (Matlab, Derin Öğrenme Araç Kutusu).

BULGULAR ve TARTIŞMA (FINDINGS and DISCUSSION)

Titreşim Sinyallerinin Zaman ve Frekans Analizi (Time and Frequency Analysis of Vibration Signals)

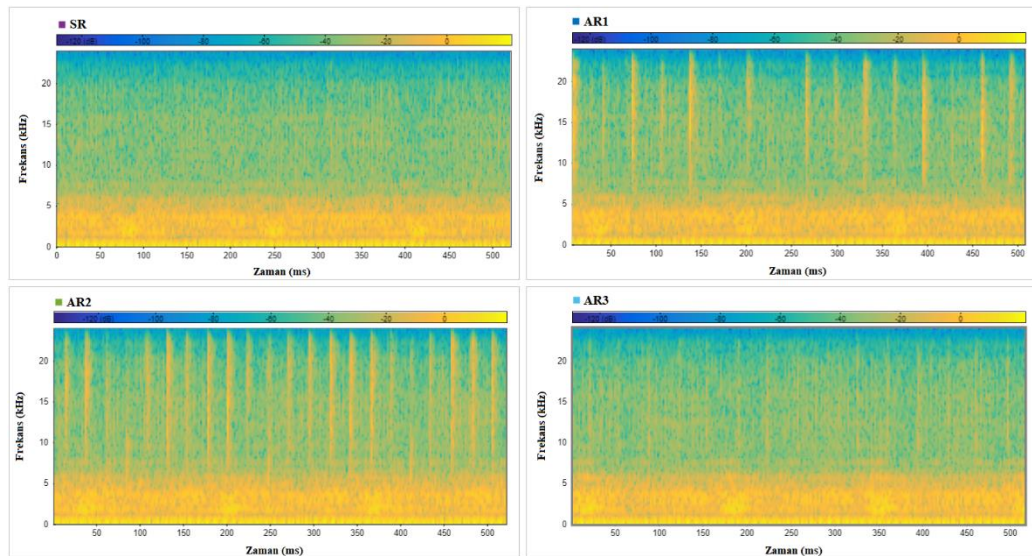
SR, AR1, AR2 ve AR3 rulmanlarından elde edilen titreşim sinyallerinin zaman ve frekans bölgesindeki gösterimleri Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre SR rulmanının titreşim genlikleri arızalı rulmanlara göre daha düşüktür. En yüksek titreşim genlikleri AR1 (dış bilezik arızası) rulmanında gözlemlenmiştir. Her bir rulman tipi için güç spektrumun değerleri birbirine yakın görünmektedir.

Şekil 8'de, herbir rulman veri grubunun spektrogramları yani zaman-frekans dağılımları görülmektedir. Özellikle AR1 (dış bilezik arızası) ve AR2 (iç bilezik arızası) rulmanlarının frekans bileşenlerinin periyodik değişimleri belirgindir. AR3 (yuvarlanma elemanı arızası) rulmanının frekans bileşenlerinin zamanla değişimi belirgin değildir. Rulman arızalarının spektrogramlarından çıplak gözle anlam çıkarmak kolay değildir. Bu görüntüler ESA'ya ham veri olarak girilir ve program içerisinde uygun özellikler belirlenerek, işlem adımları gerçekleştirildikten sonra doğru sınıflandırma sonuçları elde edilir.



Şekil 7. Seçilen SR, AR1, AR2 ve AR3 veri setlerinin zaman ve frekans analizi

Figure 7. Time and frequency analysis of selected of datasets of healthy and faulty bearings



Şekil 8. Seçilen SR, AR1, AR2 ve AR3 veri setlerinin spektrogramları

Figure 8. Spectrograms of selected datasets of healthy and faulty bearings

Farklı ESA Yaklaşımları ile Arıza Teşhisi Sonuçları (Diagnostic Results with Different CNN Approaches)

Bu çalışmada ön eğitilmiş ESA yaklaşımları rulmanlarda arıza teşhisi problemine uygun hale getirilmiş ve titreşim verilerinden elde edilen spektrogram görüntüleri ile eğitilmiştir. Eğitim süresi boyunca doğrulama başarısı, kayıp ve gradyan değerleri hesaplanmış, ağırlıklar güncellenmiş ve yaklaşımların sonuçları analiz edilmiştir. Daha sonra, test için ayrılan veri seti ile test edilen ESA'ların başarıları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanında, farklı sayıdaki görsel veri ile eğitilip sonuçları analiz edilen ESA modelleri birbiriyle kıyaslanmıştır.

ESA modelleri için hedef, sağlıklı ve arızalı rulmanları tespit etmektir. Çizelge 4, rulmanların sınıf etiketlerini ve farklı ESA modellerinin eğitimi, doğrulanması ve test edilmesi için kullanılan örnek sayılarını göstermektedir.

Çizelge 4. ESA modelleri için sınıf etiketleri ve örnek sayısı*Table 4. Class labels and sample size for CNN models*

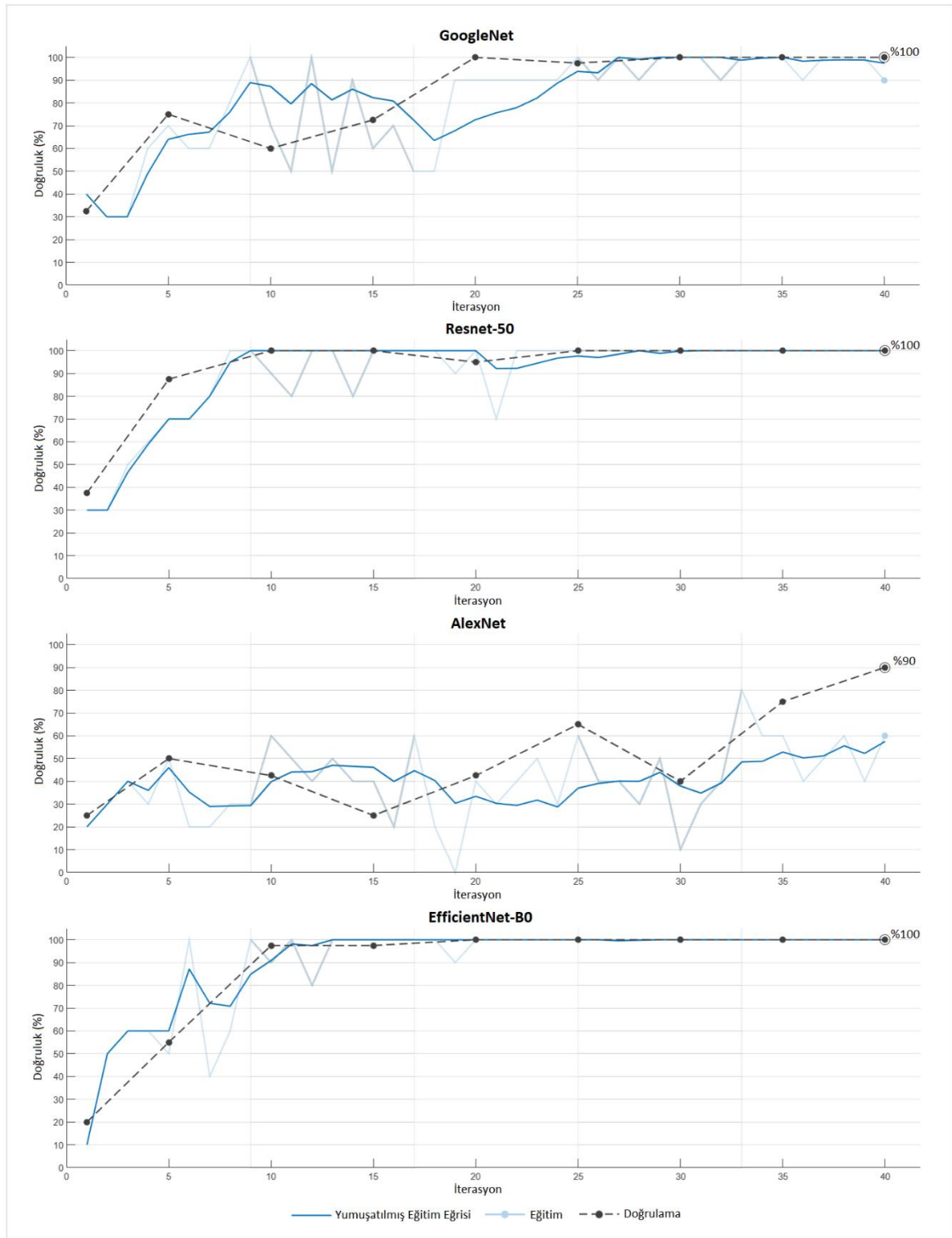
Sınıf Etiketi	Eğitim Verisi Sayısı	Doğrulama Verisi Sayısı	Test Verisi Sayısı
SR	24	8	8
AR1	24	8	8
AR2	24	8	8
AR3	24	8	8

Şekil 9, farklı ESA modelleri için doğruluk oranlarını göstermektedir. Buna göre GoogleNet, ResNet-50 ve EfficientNet-B0 yaklaşımları eğitim süreci sonunda %100 doğrulama oranına ulaşmıştır. AlexNet yaklaşımı ise %90 doğrulama oranına ulaşabilmiştir. EfficientNet-B0 ve Resnet-50 yaklaşımlarının katman ve bağlantı sayısı yüksek olduğundan ulaşılan doğruluk oranları da daha yüksek çıkmıştır. Ancak daha derin yaklaşımlarda eğitilecek parametre sayısı da artacağından eğitim süreci de uzun olmaktadır. Diğer tüm şartlar aynı kalmak koşulu ile ESA mimarisinde karmaşıklığın artışı doğruluk oranını olumlu etkilerken eğitim süresini de arttırmaktadır. AlexNet yaklaşımında eğitilecek parametre sayısı diğer ESA yaklaşımlarından daha az olduğu için eğitim süresi kısa sürmüştür ve 5 epok sonrasında %90 doğrulama oranına ulaşılmıştır. ResNet-50 ve EfficientNet-B0 yaklaşımlarının eğitim sürecinde ilk epokta yüksek bir doğruluk oranına ulaştığı görülmektedir. Bunun yanında, AlexNet ve GoogleNet yaklaşımlarının üçüncü veya dördüncü epok sonucunda doğrulama oranının ciddi bir şekilde arttığı da görülmektedir.

Şekil 10, farklı ESA yaklaşımları için eğitim ve doğrulama süreçlerindeki kayıpları göstermektedir. Kayıplar, tahmin edilen çıktı ile gerçek çıktı arasındaki farkın nicel bir ölçüsüdür ve yineleme sayısı ile azalır. Yaklaşımlara ait kayıp değerleri eğitim süresi boyunca doğrulama oranlarının değişimine bağlı olarak zamanla azalmıştır. Bunun yanında mimari olarak daha karmaşık olduğu ve büyük ESA yaklaşımlarının ilk epoklarda oldukça düşük kayıp değerlerine ulaştığı görülmektedir. GoogleNet, ResNet-50 ve EfficientNet-B0 yaklaşımlarına ait kayıplar eğitim süreci sonunda tamamen sıfırlanmıştır. AlexNet yaklaşımında ise %10 kayıp oranına kadar inilmiştir.

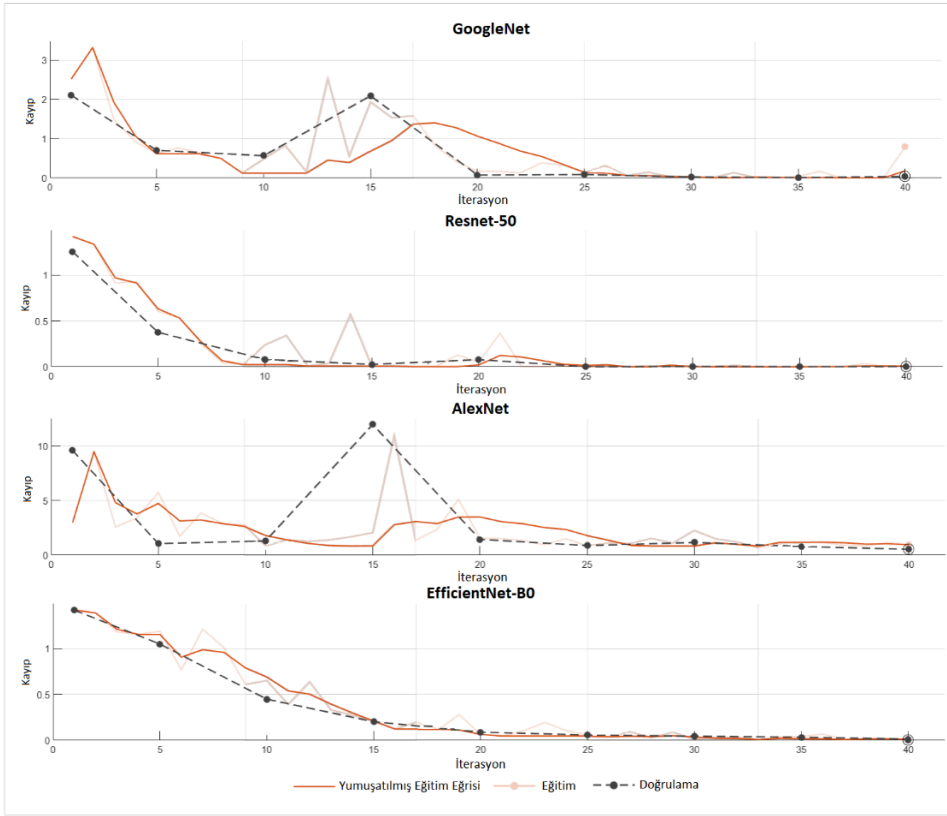
Farklı ESA yaklaşımlarına ait karışıklık matrisleri Şekil 11'de verilmiştir. Rulmanlardan toplanan spektrogram örneklerinin eğitim, doğrulama ve test oranları %50, %25 ve %25 olarak alınmıştır. Hata matrisi veya karışıklık matrisi, tipik olarak denetimli öğrenme algoritması olan bir algoritmanın performansının görselleştirilmesine izin veren belirli bir tablo düzenidir. Bu tabloda matrisin her satırı tahmin edilen bir sınıftaki örnekleri temsil ederken, her sütun gerçek bir sınıftaki örnekleri temsil eder. Çapraz hücreler ise doğru şekilde sınıflandırılan değerleri ifade etmektedir. Diğer yandan, çapraz olmayan hücreler de yanlış sınıflandırılmış gözlemleri göstermektedir. Her bir hücreye ait gözlem sayısı ve toplam gözlem sayısının yüzdesi verilmiştir. Buna göre ResNet-50 ve EfficientNet-B0 yaklaşımlarının test başarı oranlarının %100 olduğu görülebilir. Diğer taraftan, GoogleNet yaklaşımının test başarı oranı %96.9 ve AlexNet yaklaşımının test başarı oranı %93.8 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5, farklı sayıda örnekle eğitilmiş ve test edilmiş ESA yaklaşımlarının başarı oranlarını göstermektedir. Buna göre, örnek sayısı arttıkça tüm ESA yaklaşımlarının doğrulama ve test doğruluk oranları ve eğitim süreleri artmaktadır. Resnet-50 ve EfficientNet-B0 gibi daha karmaşık mimariye sahip ESA'ların eğitim süresinin daha uzun olduğu çizelgeden görülmektedir.



Şekil 9. Farklı ESA modelleri için doğruluk oranları

Figure 9. Accuracies for different CNN models



Şekil 10. Farklı ESA yaklaşımları için kayıplar
Figure 10. Losses for different CNN approaches

		GoogleNet					ResNet-50				
Çıkış Sınıfı	AR1	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	AR2	0 0.0%	7 21.9%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	AR3	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	SR	0 0.0%	1 3.1%	0 0.0%	8 25.0%	88.9% 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	100% 0.0%
		100% 0.0%	87.5% 12.5%	100% 0.0%	100% 0.0%	96.9% 3.1%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
		AR1	AR2	AR3	SR	Hedef Sınıfı					
Çıkış Sınıfı	AR1	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	AR2	0 0.0%	7 21.9%	0 0.0%	1 3.1%	87.5% 12.5%	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	AR3	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	SR	0 0.0%	1 3.1%	0 0.0%	7 21.9%	87.5% 12.5%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	100% 0.0%
		100% 0.0%	87.5% 12.5%	100% 0.0%	87.5% 12.5%	93.8% 6.2%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
		AR1	AR2	AR3	SR	Hedef Sınıfı					
Çıkış Sınıfı	AR1	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	AR2	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	AR3	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	SR	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	100% 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	100% 0.0%
		100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
		AR1	AR2	AR3	SR	Hedef Sınıfı					

Şekil 11. ESA yaklaşımlarının karışıklık matrisleri
Figure 11. Confusion matrices of CNN approaches

Çizelge 5. Örnek sayısının ESA yaklaşımlarının performansına etkisi*Table 5. Effect of sample size to the different CNNs performance*

ESA Yaklaşımları	Örnek Sayısı	Doğrulama Başarısı (%)	Test Başarısı (%)	Eğitim Süresi (s)
GoogleNet-ESA	32	75	75	29
GoogleNet-ESA	64	90	85	50
GoogleNet-ESA	128	100	100	123
ResNet-50-ESA	32	100	100	60
ResNet-50-ESA	64	100	100	125
ResNet-50-ESA	128	100	100	316
AlexNet-ESA	32	50	42	16
AlexNet-ESA	64	65	50	29
AlexNet-ESA	128	90	90	66
EfficientNet-B0-ESA	32	75	65	53
EfficientNet-B0-ESA	64	85	70	72
EfficientNet-B0-ESA	128	100	100	224

Farklı ESA Yaklaşımlarının Literatür ile Karşılaştırılması (Comparison of Different CNN Approaches with Literature)

CWRU rulman titreşim verileri literatürde pek çok kere kullanılmıştır (Randall, 2021) fakat her bir veri seti farklı yaklaşımlarla ve farklı parametrelerle ele alındığından sağlıklı ve doğru bir kıyaslama yapabilmek pek mümkün olmamaktadır. Yakın zamanda Sun ve arkadaşları sıkıştırılmış algılama ve derin öğrenme fikrinden esinlenerek, rulmanlar için yeni bir arıza tespit sistemi önermiştir (Sun, J. ve diğ., 2017). Buradan hareketle, bizim çalışmamızda kullanılan ESA yaklaşımları ile literatürdeki sonuçlara ait karşılaştırılma Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Farklı ESA yaklaşımlarının literatürle karşılaştırılması*Table 6. Comparison of different ESA approaches with the literature*

ESA Yaklaşımlarının Karşılaştırılması	
Yaklaşım	Ortalama Doğrulama Başarısı
GoogleNet-ESA	1
ResNet-50-ESA	1
AlexNet-ESA	0.90
EfficientNet-B0-ESA	1
Sıkıştırma örneklemesine dayalı ESA (Sun,J. ve diğ., 2017)	0.97
Zaman bölgesi sinyaline dayalı ESA (Sun,M. ve diğ., 2017)	0.96

Görüldüğü üzere, GoogleNet-ESA, ResNet-50-ESA ve EfficientNet-B0-ESA yaklaşımlarına ait doğruluk oranları (Sun,J. ve diğ., 2017)'nin sonuçlarından daha yüksektir. Yalnızca AlexNet-ESA yaklaşımına ait ortalama doğruluk oranı literatürde daha yüksektir. Sonuçların birbirinden farklılık arz etmesinin başlıca nedeni, ESA modellerinin mimarisindeki farklılıklar ve karmaşıklık düzeyidir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada sağlam ve farklı arıza tiplerine sahip (dış bilezik arızası-AR1, iç bilezik arızası-AR2, yuvarlanma arızası-AR3) rulmanların teşhis edilmesi için ESA yönteminden faydalanılmıştır. Son yıllarda önem kazanan ESA yaklaşımları rulman arızalarının durum izleme çalışmalarında kullanılabilmesi amacıyla bu çalışmada titreşim spektrogramları üzerinde denenmiştir. Birbirinden farklı mimarilere sahip

ESA yaklaşımlarını eğitmek için kullanılan spektrogram görüntülerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre daha karmaşık mimariye sahip ESA yaklaşımlarının, yani GoogleNet-ESA, Resnet-50 ve EfficientNet-B0-ESA'nın rulman arızalarını %100 doğrulukla teşhis ettikleri görülmektedir. Ancak AlexNet-ESA yaklaşımının test başarı oranı %90 olarak gerçekleşmiştir. ESA mimarisinin ağ yapısı değiştiği ve katman sayısı arttıkça eğitim süresi de uzadığından, ele alınan problemin tipine göre ESA mimarisine karar verilmelidir. Elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmaların sonuçlarından üstün olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, farklı yaklaşımlara sahip evrişimli sinir ağları yönteminin en temel rulman arıza tespitinde yüksek sınıflandırma doğruluğu sağladığı ve arıza teşhisi için umut vadeden bir yöntem olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Al Shorman, O., Irfan, M., Saad, N., Zhen, D., Haider, N., Glowacz, A., AlShorman, A., 2020, "A review of artificial intelligence methods for condition monitoring and fault diagnosis of rolling element bearings for induction motor", *Shock and Vibration*, Cilt 2020.
- Amarath, M., Sugumaran, V., Kumar, H., 2013, "Exploiting sound signals for fault diagnosis of bearings using decision tree", *Measurement*, Cilt 46, Sayı 3, ss. 1250-1256.
- Caesarendra, W., Tjahjowidodo, T., 2017, "A review of feature extraction methods in vibration-based condition monitoring and its application for degradation trend estimation of low-speed slew bearing", *Machines*, Cilt 5, Sayı 4, ss. 21.
- Cakir, M., Guvenc, M. A., Mistikoglu, S., 2021, "The experimental application of popular machine learning algorithms on predictive maintenance and the design of IoT based condition monitoring system", *Computers & Industrial Engineering*, Cilt 151, ss. 106948.
- Chen, Z., Gryllias, K., Li, W., 2019, "Mechanical fault diagnosis using convolutional neural networks and extreme learning machine", *Mechanical systems and signal processing*, Cilt 133, ss. 106272.
- Chen, Z., Li, C., Sanchez, R. V., 2015, "Gearbox fault identification and classification with convolutional neural networks", *Shock and Vibration*, Cilt 2015.
- Cheng, H., Kong, X., Chen, G., Wang, Q., Wang, R., 2021, "Transferable convolutional neural network based remaining useful life prediction of bearing under multiple failure behaviors", *Measurement*, Cilt 168, ss. 108286.
- Choudhary, A., Shimi, S. L., Akula, A., 2018, "Bearing fault diagnosis of induction motor using thermal imaging", *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, ss. 950-955, IEEE.
- Correa, J. C. A. J., Guzman, A. A. L., 2020, *Mechanical Vibrations and Condition Monitoring*, Academic Press. CWRU Rulman Veri Merkezi web sitesi. <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/>(14.12.2022)
- Dong, S., Luo, T., Zhong, L., Chen, L., Xu, X., 2017, "Fault diagnosis of bearing based on the kernel principal component analysis and optimized k-nearest neighbour model", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 36(4), 354-365.
- Duan, Z., Wu, T., Guo, S., Shao, T., Malekian, R., Li, Z., 2018, "Development and trend of condition monitoring and fault diagnosis of multi-sensors information fusion for rolling bearings: a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1), 803-819.
- Elforjani, M., Shanbr, S., 2017, "Prognosis of bearing acoustic emission signals using supervised machine learning", *IEEE Transactions on industrial electronics*, 65(7), 5864-5871.
- Eren, B., Guvenc, M. A., Mistikoglu, S., 2021, "Artificial intelligence applications for friction stir welding: A review", *Metals and Materials International*, 27(2), 193-219.
- Geitner, F. K., Bloch, H. P., 2012, *Chapter 3 machinery component failure analysis*, Machinery failure analysis and troubleshooting 4th edn. Butterworth-Heinemann, Oxford, 87-293.
- Goyal, D., Choudhary, A., Pabla, B. S., Dhama, S. S., 2020, "Support vector machines based non-contact fault diagnosis system for bearings", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(5), 1275-1289.

- Guo, S., Zhang, B., Yang, T., Lyu, D., Gao, W., 2019, "Multitask convolutional neural network with information fusion for bearing fault diagnosis and localization", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(9), 8005-8015.
- Gupta, P., Pradhan, M. K., 2017, "Fault detection analysis in rolling element bearing: A review", *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2085-2094.
- Hao, X., Zheng, Y., Lu, L., Pan, H., 2021, "Research on Intelligent Fault Diagnosis of Rolling Bearing Based on Improved Deep Residual Network", *Applied Sciences*, 11(22), 10889.
- Hase, A., 2020, "Early detection and identification of fatigue damage in thrust ball bearings by an acoustic emission technique", *Lubricants*, 8(3), 37.
- Hoang, D. T., Kang, H. J., 2019, "A motor current signal-based bearing fault diagnosis using deep learning and information fusion", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(6), 3325-3333.
- Hoang, D. T., Kang, H. J., 2019, "Rolling element bearing fault diagnosis using convolutional neural network and vibration image", *Cognitive Systems Research*, 53, 42-50.
- Huang, W., Cheng, J., Yang, Y., Guo, G., 2019, "An improved deep convolutional neural network with multi-scale information for bearing fault diagnosis", *Neurocomputing*, 359, 77-92.
- Islam, M. M., Kim, J. M., 2019, "Automated bearing fault diagnosis scheme using 2D representation of wavelet packet transform and deep convolutional neural network", *Computers in Industry*, 106, 142-153.
- Jeon, H., Jung, Y., Lee, S., Jung, Y., 2020, "Area-Efficient Short-Time Fourier Transform Processor for Time-Frequency Analysis of Non-Stationary Signals", *Applied Sciences*, 10(20), 7208.
- Jing, L., Zhao, M., Li, P., Xu, X., 2017, "A convolutional neural network based feature learning and fault diagnosis method for the condition monitoring of gearbox", *Measurement*, 111, 1-10.
- Karabacak, Y. E., Gürsel Özmen, N., Gümüşel, L., 2020, "Worm gear condition monitoring and fault detection from thermal images via deep learning method", *Maintenance and Reliability*, 22(3).
- Karabacak, Y. E., Özmen, N. G., 2021, "Common Spatial Pattern-based Feature Extraction and Worm Gear Fault Detection through Vibration and Acoustic Measurements", *Measurement*, 110366.
- Karabacak, Y. E., Özmen, N. G., Gümüşel, L., 2022, "Intelligent worm gearbox fault diagnosis under various working conditions using vibration, sound and thermal features", *Applied Acoustics*, 186, 108463.
- Kim, S., An, D., Choi, J. H., 2020, "Diagnostics 101: A Tutorial for Fault Diagnostics of Rolling Element Bearing Using Envelope Analysis in MATLAB", *Applied Sciences*, 10(20), 7302.
- Kumar, A., Vashishtha, G., Gandhi, C. P., Zhou, Y., Glowacz, A., Xiang, J., 2021, "Novel convolutional neural network (NCNN) for the diagnosis of bearing defects in rotary machinery", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-10.
- Kumar, A., Zhou, Y., Gandhi, C. P., Kumar, R., Xiang, J., 2020, "Bearing defect size assessment using wavelet transform based Deep Convolutional Neural Network (DCNN)", *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 999-1012.
- Li, H., Huang, J., Ji, S., 2019, "Bearing fault diagnosis with a feature fusion method based on an ensemble convolutional neural network and deep neural network", *Sensors*, 19(9), 2034.
- Li, X., Zhang, W., Ding, Q., 2019, "Deep learning-based remaining useful life estimation of bearings using multi-scale feature extraction", *Reliability engineering & system safety*, 182, 208-218.
- Liu, Z., Zhang, L., Carrasco, J., 2020, "Vibration analysis for large-scale wind turbine blade bearing fault detection with an empirical wavelet thresholding method", *Renewable Energy*, 146, 99-110.
- Ma, P., Zhang, H., Fan, W., Wang, C., Wen, G., Zhang, X., 2019, "A novel bearing fault diagnosis method based on 2D image representation and transfer learning-convolutional neural network", *Measurement Science and Technology*, 30(5), 055402.
- Malla, C., Panigrahi, I., 2019, "Review of condition monitoring of rolling element bearing using vibration analysis and other techniques", *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 7(4), 407-414.
- Matlab, Derin Öğrenme Araç Kutusu, <https://www.mathworks.com/>, 20.02.2020.

- Mohd Ghazali, M. H., Rahiman, W., 2021, "Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review", *Shock and Vibration*, Article ID 9469318.
- Nguyen-Schäfer, H., 2016, "Contact stresses in rolling bearings", *Computational Design of Rolling Bearings*, ss. 47-61, Springer, Cham.
- O'Lmasov Ahadjon Akramjon, O. G., 2020, "New approaches in the diagnosis and monitoring of rotor oscillations using shaft sensors", *Science and Education*, 1(1), 158-166.
- Peng, Y., Cai, J., Wu, T., Cao, G., Kwok, N., Zhou, S., Peng, Z., 2019, "Online wear characterisation of rolling element bearing using wear particle morphological features", *Wear*, 430, 369-375.
- Randall, R. B., 2021, "Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications", *John Wiley & Sons*.
- Ranjan, R., Ghosh, S. K., Kumar, M., 2020, "Fault diagnosis of journal bearing in a hydropower plant using wear debris, vibration and temperature analysis: A case study", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 234(3), 235-242.
- Rezaei, A., Dadouche, A., Wickramasinghe, V., Dmochowski, W., 2011, "A comparison study between acoustic sensors for bearing fault detection under different speed and load using a variety of signal processing techniques", *Tribology Transactions*, 54(2), 179-186.
- Sadoughi, M., Hu, C., 2019, "Physics-based convolutional neural network for fault diagnosis of rolling element bearings", *IEEE Sensors Journal*, 19(11), 4181-4192.
- Schwendemann, S., Amjad, Z., Sikora, A., 2021, "A survey of machine-learning techniques for condition monitoring and predictive maintenance of bearings in grinding machines", *Computers in Industry*, 125, 103380.
- Shao, H., Xia, M., Han, G., Zhang, Y., Wan, J., 2020, "Intelligent fault diagnosis of rotor-bearing system under varying working conditions with modified transfer convolutional neural network and thermal images", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(5), 3488-3496.
- Sharma, V., Parey, A., 2017, "Frequency domain averaging based experimental evaluation of gear fault without tachometer for fluctuating speed conditions", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 85, 278-295.
- She, D., Jia, M., 2019, "Wear indicator construction of rolling bearings based on multi-channel deep convolutional neural network with exponentially decaying learning rate", *Measurement*, 135, 368-375.
- Skf, Rulman Kataloğu, <https://www.skf.com/>, 19.02.2022.
- Smith, W. A., Randall, R. B., 2015, "Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study", *Mechanical systems and signal processing*, 64, 100-131.
- Sun, M., Song, Z., Jiang, X., Pan, J., Pang, Y., 2017, "Learning pooling for convolutional neural network", *Neurocomputing*, 224, 96-104.
- Sun, J., Yan, C., Wen, J., 2017, "Intelligent bearing fault diagnosis method combining compressed data acquisition and deep learning", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(1), 185-195.
- Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., Bulnes, F. G., 2014, "Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing", *Sensors*, 14(7), 12305-12348.
- Vashisht, R. K., Peng, Q., 2018, "Crack detection in the rotor ball bearing system using switching control strategy and Short Time Fourier Transform", *Journal of Sound and Vibration*, 432, 502-529.
- Wu, Y., Zhao, R., Jin, W., He, T., Ma, S., Shi, M., 2021, "Intelligent fault diagnosis of rolling bearings using a semi-supervised convolutional neural network", *Applied Intelligence*, 51(4), 2144-2160.
- Xiong, S., Zhou, H., He, S., Zhang, L., Xia, Q., Xuan, J., Shi, T., 2020, "A novel end-to-end fault diagnosis approach for rolling bearings by integrating wavelet packet transform into convolutional neural network structures", *Sensors*, 20(17), 4965.
- Xu, Z., Li, C., Yang, Y., 2021, "Fault diagnosis of rolling bearings using an improved multi-scale convolutional neural network with feature attention mechanism", *ISA transactions*, 110, 379-393.

- Yamashita, R., Nishio, M., Do, R. K. G., Togashi, K., 2018, "Convolutional neural networks: an overview and application in radiology", *Insights into imaging*, 9(4), 611-629.
- Yoo, Y., Baek, J. G., 2018, "A novel image feature for the remaining useful lifetime prediction of bearings based on continuous wavelet transform and convolutional neural network", *Applied Sciences*, 8(7), 1102.
- Zhang, W., Li, C., Peng, G., Chen, Y., Zhang, Z., 2018, "A deep convolutional neural network with new training methods for bearing fault diagnosis under noisy environment and different working load", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 100, 439-453.
- Zhang, X., Zhou, J., 2013, "Multi-fault diagnosis for rolling element bearings based on ensemble empirical mode decomposition and optimized support vector machines", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 41(1-2), 127-140.
- Zhang, Y., Xing, K., Bai, R., Sun, D., Meng, Z., 2020, "An enhanced convolutional neural network for bearing fault diagnosis based on time-frequency image", *Measurement*, 157, 107667.
- Zhao, D., Wang, T., Chu, F., 2019, "Deep convolutional neural network based planet bearing fault classification", *Computers in Industry*, 107, 59-66.
- Zhu, J., Chen, N., Peng, W., 2018, "Estimation of bearing remaining useful life based on multiscale convolutional neural network", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(4), 3208-3216.
- Zhu, Z., Peng, G., Chen, Y., Gao, H., 2019, "A convolutional neural network based on a capsule network with strong generalization for bearing fault diagnosis", *Neurocomputing*, 323, 62-75.



DETERMINATION OF OPTIMAL CONJUGATE GRADIENT METHOD FOR GEOMETRY FITTING

^{1,2}Kadir KIRAN

¹ Department of Airframe and Powerplant Maintenance, School of Civil Aviation, Suleyman Demirel University, Isparta, TURKEY

² Design and Manufacturing Laboratory, Innovative Technologies Application and Research Center (YETEM), Suleyman Demirel University, Isparta, TURKEY

^{1,2} kadirkiran@sdu.edu.tr

(Geliş/Received: 02.10.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 07.04.2022)

ABSTRACT: In this study, it is aimed to determine the optimal conjugate gradient (CG) method for the geometry fitting of 2D measured profiles. To this end, the three well-known CG methods such as the Fletcher-Reeves, Polak-Ribiere and Hestenes-Stiefel were employed. For testing those methods performances, the five primitive geometries accommodating circle, square, triangle, ellipse and rectangle were first built with a 3D printer, and then they were scanned with a coordinate measuring machine (CMM) to achieve their 2D profiles. The nonlinear least squares procedure was implemented to minimize the error between those measured data and modeled ones. An iterative line search was utilized for this task. The search direction was calculated using the above-mentioned CG methods. During the geometry fitting process, the number of function evaluations at each iteration were computed and the total number of function evaluations were set to be a performance measure of the CG method in question when it converged. By using these performance measures, the performance and data profiles were created to efficiently determine the optimal CG method. Based on performance profiles, it can be stated that the Fletcher-Reeves and Polak-Ribiere methods are the fastest ones on three test geometries out of five. In addition to that, all the CG methods were able to complete the geometry fitting of 80% of test geometries. On the other hand, by examining the data profiles, it was determined that the Polak-Ribiere and Hestenes-Stiefel methods achieve their maximum capabilities of the completing geometry fitting (i.e., 80%) with much lower number of function evaluations than the Fletcher-Reeves method. Besides, in most geometries, the Polak-Ribiere method outperformed the others, thereby it was determined to be the optimal one for the geometry fitting. As a conclusion, the reported results in this work might help the end-users who study on the CMM data processing to conduct an efficient geometry fitting.

Key Words: Conjugate gradient, Geometry fitting, Optimization

Geometri Uydurma için En İyi Eşlenik Gradyan Yönteminin Tespit Edilmesi

ÖZ: Bu çalışmada, ölçülen 2B profillere geometri uydurulması için en iyi eşlenik gradyan (EG) yönteminin tespit edilmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla, iyi bilinen üç eşlenik gradyan yöntemleri, Fletcher-Reeves, Polak-Ribiere and Hestenes-Stiefel kullanıldı. Adı geçen yöntemlerin performansları test etmek için daire, kare, üçgen, elips ve dikdörtgen geometrilerini içeren test parçaları ilk olarak 3B yazıcı ile imal edildi ve daha sonra bu geometrilerin 2B profillerini elde etmek amacıyla adı geçen geometriler koordinat ölçme makinesi ile tarandı. Ölçülerek ve modellenerek elde edilen veriler arasındaki hatayı en aza indirmek için doğrusal olmayan en küçük kareler prosedürü uygulandı. Bu uygulama için bir iteratif doğru boyunca arama gerçekleştirildi. Arama yönü ise yukarıda adı geçen yöntemler kullanılarak hesaplandı. Geometri uydurma sürecinde her bir iterasyonda yapılan fonksiyon değerlendirme sayısı hesap edildi ve ilgili

eşlenik gradyan yöntemi yakınsadığında ortaya çıkan toplam fonksiyon değerlendirme sayısı yöntemin performans ölçütü olarak belirlendi. Verimli bir şekilde en iyi eşlenik gradyan yöntemini tespit edebilmek için bu performans ölçütleri kullanılarak performans ve veri profilleri oluşturuldu. Performans profillerine dayanarak, Fletcher-Reeves ve Polak-Ribiere yöntemlerinin beş geometriden üçünde en hızlı olduğu ifade edilebilir. Buna ek olarak, tüm EG yöntemleri test geometrilerinin %80'inin geometri uydurmasını tamamlayabilmiştir. Öte yandan, veri profilleri incelenerek, Polak-Ribiere ve Hestenes-Stiefel yöntemlerinin Fletcher-Reeves yöntemine göre çok daha az sayıda fonksiyon değerlendirmesi ile maksimum geometri uydurma kabiliyetlerine (%80) ulaştıkları tespit edilmiştir. Ayrıca birçok geometride Polak-Ribiere yöntemi diğerlerinden daha iyi olduğundan bu yöntem geometri uydurma için en iyi yöntem olarak belirlendi. Sonuç olarak, çalışmada rapor edilen sonuçlar koordinat ölçme makinesi verilerinin işlenmesi ile ilgilenen son kullanıcılara verimli bir geometri uydurma gerçekleştirmelerinde yardımcı olabilir.

Anahtar Kelimeler: Eşlenik gradyan, Geometri uydurma, En iyileme

1. INTRODUCTION

The application of the CG methods can be found in many fields such as engineering, computer science, etc. due to their efficiency in nonlinear optimization. Li et al. (2020), for instance, proposed a CG method along with pseudospectral collocation scheme. They applied it to find optimal rocket landing guidance. The authors reported that the proposed method stands out with high convergence speed and computational efficiency. In the work completed by Chattopadhyay and Chattopadhyay (2018), a neurocomputing model was developed using CG method-based backpropagation in artificial neural network for predicting average rainfall. An application of CG methods in finite element method was presented by Schwarz (1979). Helmig et al. (2020) investigated effect of number of temperature measurements on boundary conditions obtained using CG method. To this end, they used two test cases including orthogonal cutting process and a heat spreader cooling concept for power electronics and they stated that it is possible to reconstruction of the boundary using lower temperature measurements than the actual unknown boundary segments with a certain threshold number of sensors. Another study on inverse heat conduction problem was completed by Xiong et al. (2020) using a sequential CG method. They estimated the surface heat flux and it was reported that the proposed method provides more accurate results and less computation time. On the other hand, from the structural engineering point of view, Wang et al. (2013) revealed a new CG method for multi-source dynamic load identification from the noisy response measurements. The application results proved that the suggested method is more efficient than the Landweber iteration method. Moreover, for the image restoration problem, some modified Hestenes-Stiefel conjugate gradient algorithms were presented by Hu et al. (2020). Other CG algorithms (Cao and Wu, 2020; Joo et al., 1997), for this purpose, were also brought in the literature. In addition to them, some improved CG methods such as those of (Mtagulwa and Kaelo, 2019; Jiang and Jian, 2019; Wang et al., 2018; Fatemi, 2016) were presented for general optimization problems.

As can be seen from the above summarized studies, the CG methods have been frequently finding an area to be applied. However, no study was found on the geometry fitting and the CMM data processing by using CG methods. Thus, there is no data about their performance in this topic. To a little contribute this gap, the current work concentrates on defining the optimal CG methods from the well-known methods (i.e., Fletcher-Reeves, Polak-Ribiere and Hestenes-Stiefel) for the geometry fitting of measured 2D profiles. The paper is structured as follows: Section 2. covers the primitive geometries, their mathematical models, and the geometry fitting procedure. A brief description on the mathematical background of CG method is given in Section 3. In Section 4, the obtained results are presented with discussion. Finally, Section 5 summarizes and concludes the paper.

Nomenclature

x, y :	coordinates of each point on the geometry	r_c :	radius of circle
x_u, y_u :	coordinates of each point on the geometry without rotation	r :	radius of triangle
x_c, y_c :	center coordinates of the geometry	θ :	rotation angle
u :	parameter ranging between 0 and 2π radians	a :	radius of ellipse along x axis
w :	width	b :	radius of ellipse along y axis
h :	height	n_s :	Number of edges (i.e., $n_s = 3$ for triangle)

2. PRIMITIVE GEOMETRIES AND THEIR FITTING PROCEDURE

For determination of the optimal CG method, the five primitive geometries are used. Those geometries are circle, square, rectangle, triangle, and ellipse. Their parametric mathematical models (Desmos, 2021) are given below.

Circle:

$$\begin{aligned} x &= r_c \cos(u) + x_c \\ y &= r_c \sin(u) + y_c \end{aligned} \quad (1)$$

Square and rectangle:

$$\begin{aligned} x_u &= \frac{w}{2} (|\cos(u)| \cos(u) + |\sin(u)| \sin(u)) \\ y_u &= \frac{h}{2} (|\cos(u)| \cos(u) - |\sin(u)| \sin(u)) \\ x &= x_u \cos(\theta) - y_u \sin(\theta) + x_c \\ y &= x_u \sin(\theta) + y_u \cos(\theta) + y_c \end{aligned} \quad (2)$$

Triangle:

$$\begin{aligned} r &= \frac{h}{\cos\left(\frac{2}{n_s} \arcsin\left(\sin\left(\frac{n_s u}{2}\right)\right)\right)} \\ x_u &= r \cos(u) \\ y_u &= r \sin(u) \\ x &= x_u \cos(\theta) - y_u \sin(\theta) + x_c \\ y &= x_u \sin(\theta) + y_u \cos(\theta) + y_c \end{aligned} \quad (3)$$

Ellipse:

$$\begin{aligned} x_u &= a \cos(u) \\ y_u &= b \sin(u) \\ x &= x_u \cos(\theta) - y_u \sin(\theta) + x_c \\ y &= x_u \sin(\theta) + y_u \cos(\theta) + y_c \end{aligned} \quad (4)$$

All those coordinate calculations given above are theoretical. To obtain actual coordinates of those geometries, first a workpiece containing those geometries were built using a 3D printer with a PLA material. They were later scanned via the CMM that provides their 2D profiles. With these theoretical and measured data, the nonlinear least squares fitting procedure is employed. To do so, first we describe the sum of the squared errors, $\epsilon^2(p)$, between theoretical and measured data as follows (Jia, 2017):

$$\epsilon^2(p) = \sum_{j=1}^n [x_j - x_j^{model}(p)]^2 + \sum_{j=1}^n [y_j - y_j^{model}(p)]^2 \quad (5)$$

where p is the parameter vector accommodating all the variables in the geometry being used, x_j , y_j , $x_j^{model}(p)$ and $y_j^{model}(p)$ denote x and y -coordinates of the geometry obtained from the measurement and the mathematical model, respectively. As well-known, the nonlinear least squares procedure aims to minimize this parameter dependent error. For that purpose, in this study, an iterative line search procedure along with three well-known CG methods is implemented. The details about the minimization process are covered in the next section.

3. CONJUGATE GRADIENT METHODS

The conjugate gradient methods are frequently used in nonlinear optimization problems. To minimize the sum of squared errors between the data obtained via the measurements and the mathematical model, in this study, an iterative line search procedure is implemented. In the line search, the search direction, s_{j+1} , (see Equation 6.) is computed using three well-known CG methods (i.e., Fletcher-Reeves (Fletcher and Reeves, 1964), Polak-Ribiere (Polak and Ribiere, 1969) and Hestenes-Stiefel (Hestenes and Stiefel, 1952)).

$$s_{j+1} = -G(p_{j+1}) + \beta_{j+1}s_j \quad (6)$$

In this equation, $G = -J^T D$ is the objective function gradient, J is the Jacobian matrix of the objective function, $D = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix}$ is the difference matrix, $D_x = x_j - x_j^{model}(p)$ and $D_y = y_j - y_j^{model}(p)$. β_{j+1} is the CG coefficient and it is computed using the above-mentioned methods. Their mathematical descriptions are given below.

Fletcher-Reeves:

$$\beta_{j+1} = \frac{G(p_{j+1})^T G(p_{j+1})}{G(p_j)^T G(p_j)} \quad (7)$$

Polak-Ribiere:

$$\beta_{j+1} = \frac{G(p_{j+1})^T (G(p_{j+1}) - G(p_j))}{\|G(p_j)\|^2} \quad (8)$$

Hestenes-Stiefel:

$$\beta_{j+1} = \frac{G(p_{j+1})^T (G(p_{j+1}) - G(p_j))}{s_j^T (G(p_{j+1}) - G(p_j))} \quad (9)$$

In Equations 7 to 9, the initial search direction is $s_0 = -G(p_0)$ (i.e., opposite of the gradient of the objective function). By using all those, the iterative line search to find the next parameters is describes as follows (Nocedal and Wright, 2006):

$$p_{j+1} = p_j + \alpha_j s_j^T \quad (10)$$

where $\alpha_j > 0$ is the step length that controls the amount of the movement along the CG direction. It can be computed using various line search conditions. However, in this study, a numerical algorithm is

implemented to compute the step length. Equation 10 proceeds until the convergence condition is satisfied. This condition is:

$$\text{maximum}|J^T D| \leq \vartheta \tag{11}$$

where $\vartheta = 10^{-4}$ is the convergence tolerance.

4. RESULTS AND DISCUSSION

To determine the optimal CG method for geometry fitting, totally fifteen geometry fittings have been completed using the five test geometries and three CG methods. For keeping track the geometry fitting process, the geometry fitting parameters, sum of the squared errors, norm of the gradient of the objective function and step length have been recorded at each iteration. Those results are presented in Figure 1. Note that all those results, as example, belong the ellipse fitting process with the Polak-Ribiere method. The same procedure has been also completed for all the test geometries and the CG methods. In addition, the number of function evaluations (Nfe), as the performance measure of the CG method, are computed for each iteration. The above-mentioned fitting outcomes are also plotted in accordance with number of function evaluations, as shown in Figure 2.

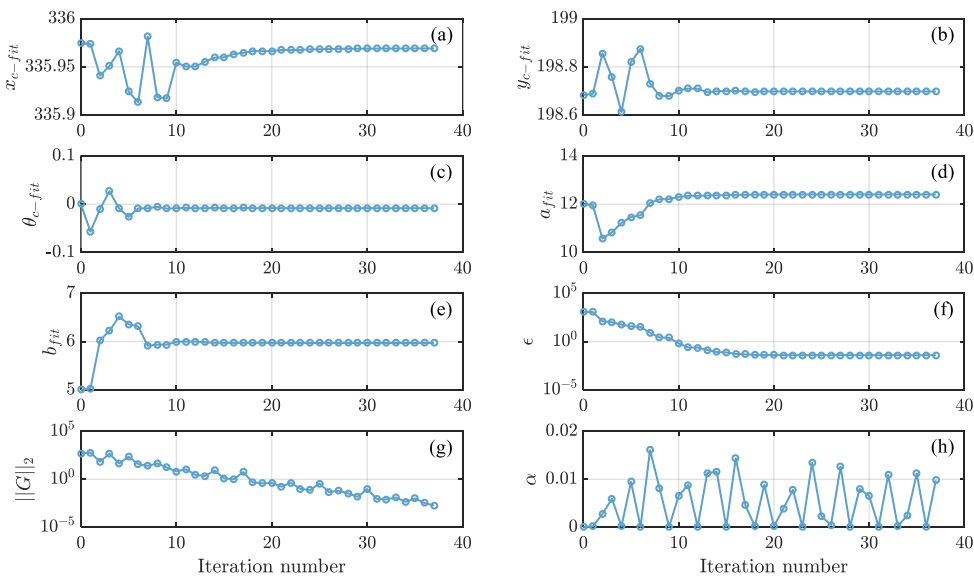


Figure 1. Fitting progress of the ellipse: Results versus iteration, (a) Ellipse center x -coordinate (mm) (b) Ellipse center y -coordinate (mm) (c) Ellipse rotation angle (degree) (d) Ellipse radius along x -direction (mm) (e) Ellipse radius along y -direction (mm) (f) Sum of squared errors (g) Norm of the gradient of objective function (h) Step length

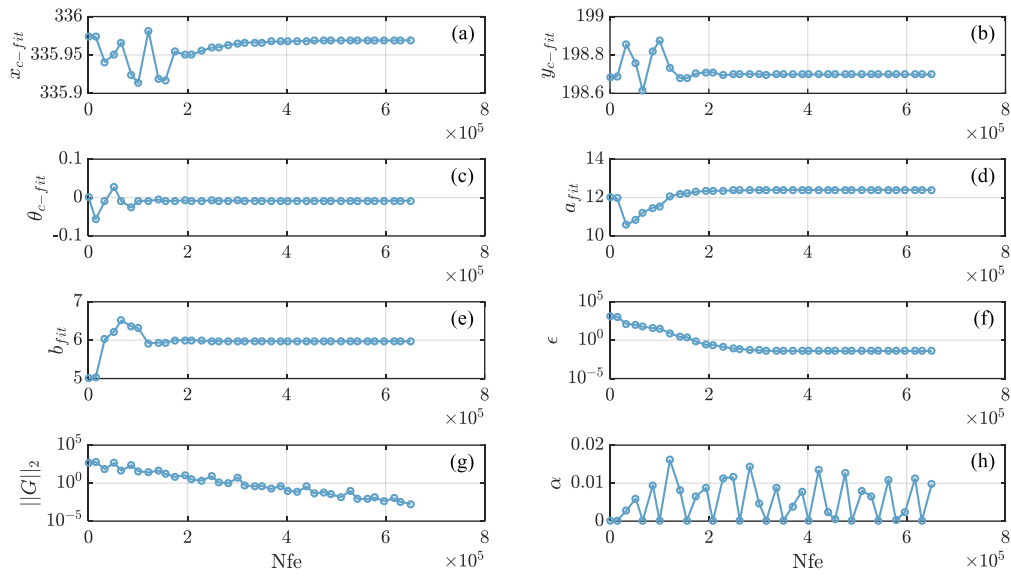


Figure 2. Fitting progress of the ellipse: Results versus number of function evaluations, (a) Ellipse center x -coordinate (mm) (b) Ellipse center y -coordinate (mm) (c) Ellipse rotation angle (degree) (d) Ellipse radius along x -direction (mm) (e) Ellipse radius along y -direction (mm) (f) Sum of squared errors (g) Norm of the gradient of objective function (h) Step length

As can be seen from these figures, the iterative line search starts with initial parameter values supplied by the user and it successfully converges the required tolerance after a little bit fluctuation. It might be stated that the convergence is linear based on the Figure 2(g). Also notice that the sum of squared error and norm of the gradient of the objective function continuously decrease. This shows that the proposed fitting process works very well. On the other hand, the number of function evaluations at each iteration quite different due to step length computation. Figure 2(h) shows that the different step length is necessary for a significant progress, which means that the amount of work, the number of function evaluations, will vary during the process. As a result of converged ellipse parameters at 37. iteration (i.e., $x_c = 335.9690$ mm, $y_c = 198.6981$ mm, $\theta = -0.0084^\circ$, $a = 12.4034$ mm, $b = 5.97$ mm), a comparison of actual, fit, and measured ellipses is indicated in Figure 3. One can notice that the fitted ellipse successfully represents the measured data.

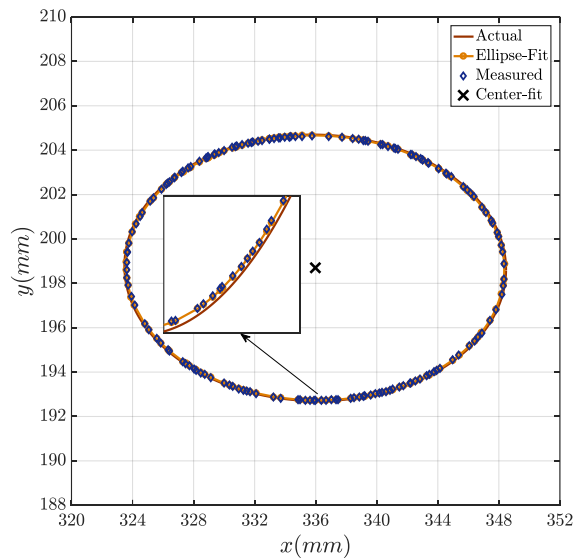


Figure 3. Ellipse fitting

As mentioned before, the same outcome recording procedure (i.e., Figures 1 and 2) and the fit quality check (i.e., Figure 3) have been completed for all the geometries and the CG methods. At the end of convergence, the total number of function evaluations are set as the performance measure of the CG methods for each geometry. All those results are provided in Figure 4. The geometry numbers 1, 2, 3, 4 and 5, in this figure, correspond to the circle, the square, the triangle, the ellipse and the rectangle, respectively. Moreover, the ∞ denotes that the corresponding CG method fails to converge. For more clarity, the Fletcher-Reeves on the square, Polak-Ribiere and Hestenes-Stiefel on the rectangle are not successful to complete the fitting process.

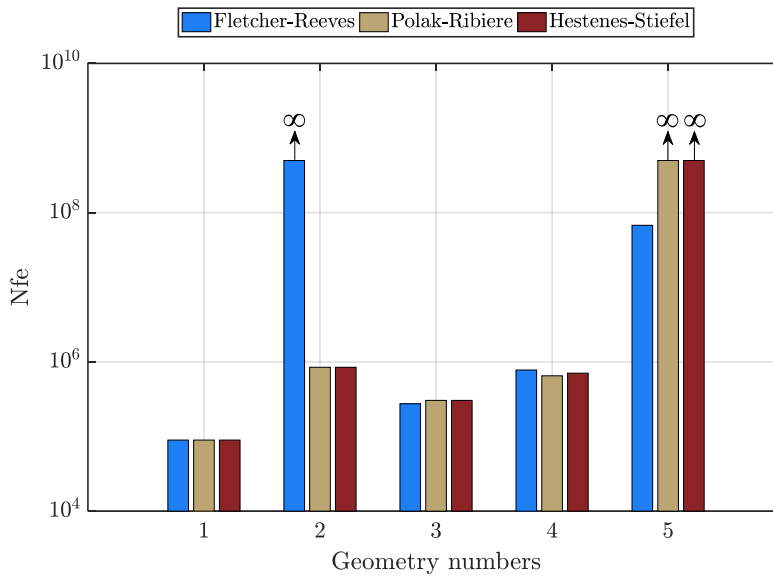


Figure 4. Total number of function evaluations for all CG methods

One can also notice from Figure 4. that the Polak-Ribiere and Hestenes-Stiefel methods exhibit similar performances for all the geometries while the Fletcher-Reeves differs from them on the geometries 2 and 5. It can be seen that, for rectangle fit, the Fletcher-Reeves is the only one being successful. Although those interpretations, it is difficult to define the optimal CG method for geometry fitting. Therefore, we generate performance (Dolan and More, 2002) and data profiles (More and Wild, 2009) using the total number of function evaluations. The performance profiles of the CG methods are illustrated in Figure 5. These profiles simply show success rate of the CG methods within the factor ν of the fastest CG method which can be identified from probability values $P(\nu)$ at $\nu = 1$. Such that, the fastest CG method might be defined either the Fletcher-Reeves and the Polak-Ribiere. Both has $P(1) = 60\%$, which means that they are the fastest one on three test geometries out of five, whereas the Hestenes-Stiefel has the probability $P(1) = 40\%$. As we keep increasing factor ν , all the methods capabilities to complete geometry fitting rise. For instance, at the factor $\nu = 1.109$ of fastest one, the Polak-Ribiere and the Hestenes-Stiefel methods performances rise to 80% (i.e., $P(1.109) = 80\%$). At this factor, the Fletcher-Reeves method performance remains same. It can be also mentioned that the Polak-Ribiere and the Hestenes-Stiefel methods reach up their maximum performance at $\nu = 1.109$. From this value on, even if we increase the ν , their success probability will not change. However, the same is not valid for the Fletcher-Reeves. It is necessary to increase the factor ν from 1.109 to 1.196. At this value, the Fletcher-Reeves reaches its maximum probability (i.e., $P(1.196) = 80\%$).

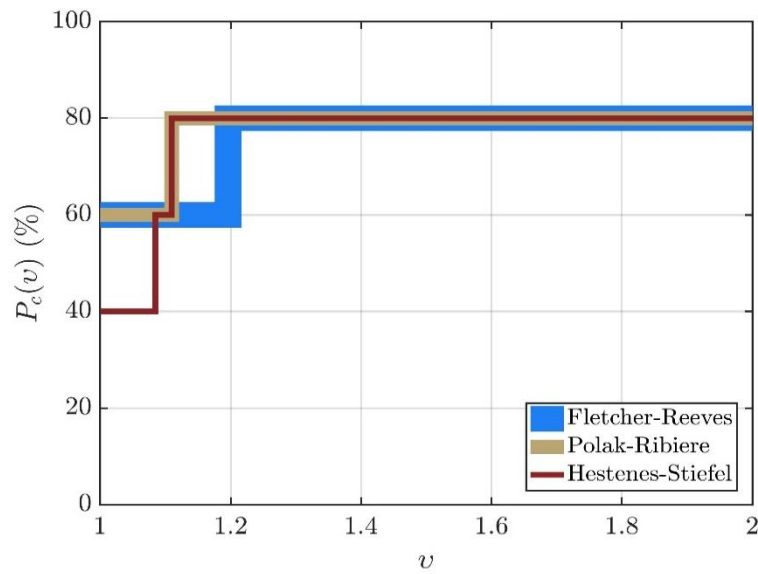


Figure 5. Performance profiles of CG methods

In other respect, we can also evaluate the performances of the CG methods from a computational budget perspective. For this task, we use data profiles, as shown Figure 6. Those profiles basically provide the number of geometries, which can be successfully fitted by the CG methods, within given computational budget (i.e., total number of function evaluations in this study). As an example, we are given a computational budget of 5×10^5 (i.e., $\psi = 5 \times 10^5$) total number of function evaluations to complete at least two geometry fittings (i.e., $D(\psi = 5 \times 10^5) \geq 40\%$). In these terms, we could choose one of the CG methods because they all have same probability $D(\psi = 5 \times 10^5) = 40\%$. Let's give another example; the computational budget is $\psi = 6.51 \times 10^5$ and we need to fit at least three geometries ($D(\psi = 6.51 \times 10^5) \geq 60\%$). For these conditions, the only choice is the Polak-Ribiere method because its probability at $\psi = 6.51 \times 10^5$ is 60% while the others have probability of 40% (see Figure 6). As can be seen from the figure that the Polak-Ribiere and Hestenes-Stiefel methods reach maximum number of geometry fitting (i.e., 4 geometries out of 5) at $\psi = 8.472 \times 10^5$. However, the Fletcher-Reeves requires much greater number of function evaluations to reach the $D(\psi) = 80\%$.

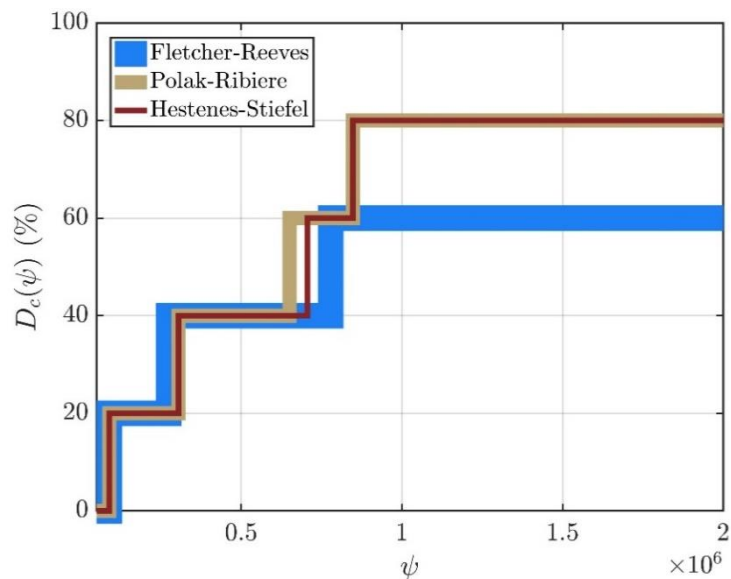


Figure 6. Data profiles of CG methods

Based on the results reported so far, it is determined that the Polak-Ribiere is the optimal CG method for geometry fitting in this study because it is both one of the fastest methods and requires lower number of function evaluations to reach the maximum probability compared to others. This efficiency of the Polak-Ribiere method comes from its self-restarting property. More specifically, if the method provides a bad search direction and a small progress (i.e., $p_{j+1} \approx p_j$ which in turn $G(p_{j+1}) \approx G(p_j)$), the β_{j+1} will be approximately zero (see Equation 8). In this case, the method reduces to steepest descent method, which means that it restarts itself to get rid of bad search direction and small progress. The same property is also valid for the Hestenes-Stiefel method. However, the Fletcher-Reeves method is not able to perform a self-restarting and it requires additional restart conditions in this case. For further mathematical details on this property, the reader is referred to Nocedal and Wright (2006).

5. CONCLUSIONS

This paper has focused on determining the optimal CG method for geometry fitting. For this task, the three well-known CG methods (i.e., Fletcher-Reeves, Polak-Ribiere and Hestenes-Stiefel) were employed. To test their performances in the geometry fitting, the five primitive geometries such as circle, square, triangle, ellipse and rectangle were selected and their 2D profiles were acquired via the CMM. Based on the nonlinear least squares fitting process, the sum of the squared error between the measured and modeled data was minimized using the iterative line search along with the conjugate directions obtained from the above-mentioned CG methods. During the fitting process, the number of function evaluations required to progress in the line search were kept track for each iteration, and the total number of function evaluations, when the CG method being used converges, were set as a performance measure. Using those data, the performance and data profiles were created to be efficiently determine the optimal method. The results have shown that the Fletcher-Reeves and the Polak-Ribiere are the fastest ones based on the performance profiles. However, for an optimal choice, it has been determined that the Polak-Ribiere is a great candidate. From a practical application view, those results may be pioneer for the end-users who deal with geometry fitting of the CMM data.

6. ACKNOWLEDGEMENT

The author thanks Design and Manufacturing Laboratory, Innovative Technologies Application and Research Center (YETEM), Suleyman Demirel University where provides the scanning of the geometries used in this study with the CMM.

REFERENCES

- Cao, J., Wu, J., 2020, "A conjugate gradient algorithm and its applications in image restoration", *Applied Numerical Mathematics*, 152, 243-252.
- Chattopadhyay, S., Chattopadhyay, G., 2018, "Conjugate gradient descent learned ANN for Indian summer monsoon rainfall and efficiency assessment through Shannon-Fano coding", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 179, 202-205.
- Desmos, <https://www.desmos.com>, Access date:16.05.2021.
- Dolan, E.D., Moré, J.J., 2002, "Benchmarking optimization software with performance profiles", *Mathematical programming*, 91, 201-213.
- Fatemi, M., 2016, "A new efficient conjugate gradient method for unconstrained optimization", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 300, 207-216.
- Fletcher, R., Reeves, C.M., 1964, "Function minimization by conjugate gradients", *The Computer Journal*, 7(2), 149-154.
- Helmig, T., Al-Sibai, F., Kneer, R., 2020, "Estimating sensor number and spacing for inverse calculation of thermal boundary conditions using the conjugate gradient method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 153, 119638.

- Hestenes, M.R., Stiefel, E. 1952, "Methods of conjugate gradients for solving linear systems", *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 49(6), 409-436.
- Hu, W., Wu, J., Yuan, G., 2020, "Some modified Hestenes-Stiefel conjugate gradient algorithms with application in image restoration", *Applied Numerical Mathematics*, 158, 360–376.
- Jia, P., 2017, *Fitting a parametric model to a cloud of points via optimization methods*, Ph.D. thesis, Syracuse University, New York.
- Jiang, X., Jian, J., 2019, "Improved Fletcher-Reeves and Dai-Yuan conjugate gradient methods with the strong Wolfe line search", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 348, 525-534.
- Joo, K. S., Bose, T., Xu, G. F., 1997, "Image restoration using a conjugate gradient-based adaptive filtering algorithm", *Circuits systems signal processing*, 16(2), 197-206.
- Li, Y., Chen, W., Zhou, H., Yang, L., 2020, "Conjugate gradient method with pseudospectral collocation scheme for optimal rocket landing guidance", *Aerospace Science and Technology*, 104, 105999.
- More, J. J., Wild, S. M., 2009, "Benchmarking derivative-free optimization algorithms", *SIAM Journal on Optimization*, 20, 172-191.
- Mtagulwa, P., Kaelo, P., 2019, "An efficient modified PRP-FR hybrid conjugate gradient method for solving unconstrained optimization problems", *Applied Numerical Mathematics*, 145, 111–120.
- Nocedal, J., Wright, S.J., 2006, *Numerical optimization*, 2nd ed., Springer Science & Business Media, New York.
- Polak, E., Ribiere, G., 1969, "Note sur la convergence de methodes de directions conjuguees. Revue francaise d'informatique et de recherche operationnelle", *Revue francaise d'informatique et de recherche operationnelle*, 3(R1), 35-43.
- Schwarz, H. R., 1979, "The Method of Conjugate Gradients in Finite Element Applications", *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 30, 342-354.
- Wang, L., Han, X., Xie, Y., 2013, "A new conjugate gradient method for solving multi-source dynamic load identification problem", *Int J Mech Mater Des*, 9, 191-197.
- Wang, J., Zhang, B., Sun, Z., Hao, W. and Sun, Q., 2018, "A novel conjugate gradient method with generalized Armijo search for efficient training of feedforward neural networks", *Journal of Neurocomputing*, 275, 308-316.
- Xiong, P., Deng, J., Lu, T., Lu, Q., Liu, Y., Zhang, Y., 2020, "A sequential conjugate gradient method to estimate heat flux for nonlinear inverse heat conduction problem", *Annals of Nuclear Energy*, 149, 107798.



SULAMA KANALLARINDA VORTEKS TÜRBİNLERİN SCADA İLE ENERJİ ÜRETİM KONTROLÜNÜN VERİMLİLİK ÜZERİNE ETKİSİ

Muzaffer YÜCEL

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Çan Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Çanakkale, TÜRKİYE
muzaffer@comu.edu.tr

(Geliş/Received: 16.12.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.04.2022)

ÖZ: Bu çalışmada tarımsal sulama kanallarına kurulması uygun olan vortex tipi türbin tasarlanmıştır. Sistem kontrolünün ve elektrik çıkış değerlerinin istenilen düzeyde olması için ana kumanda scada programı yapılmıştır. Scada ve mikro denetleyici (PLC), kurulan türbin çıkış elektrik değerlerinin (Tam sinüs dalga, 50Hz, 380v) ideal olması için, PID kontrol yöntemi ile tüm değişken parametrelerini denetleyerek sisteme kumanda etmektedir. Sulama kanallarında düşü yüksekliğinin minimum seviyede ve açık kanal olmasından dolayı kurulabilecek en uygun türbin tipi olarak vortex türbin görülmektedir. Kurulan türbinde kontrol, rezervuara gelen suyun debisinin azaltılması veya artırılması ve türbin kanat açısını değiştirerek yapılmıştır. İki farklı kontrolde ideal pozisyonu sistem yazılımında hesaplanarak konumlanması hedeflenmiştir. Tek taraflı kontrol yapıldığında enerji çıkış değerleri ile iki parametre kontrolü yapıldığındaki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunun yanında sadece iki farklı değişkenin en yüksek verimde sabit tutulduğu durumda enerji çıkış değerlerinin değişimi gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Vortex, Scada, Mikrodenetleyici, Su Türbini, Yenilenebilir Enerji

The Effect of Energy Production Control with Scada of Vortex Turbines in Irrigation Channels on Efficiency

ABSTRACT: In this study, a vortex-type turbine suitable for installation in agricultural irrigation channels was designed, and a vortex-type turbine and main control SCADA program were designed to ensure that the system control and electrical output values were at the desired level. Scada and microcontroller (PLC) control the system by controlling all variable parameters with the PID control method to ensure that the installed turbine output electrical values (Full sine wave, 50Hz, 380v) are ideal. The vortex turbine is seen as the most suitable turbine type to be installed due to the minimum height of the irrigation channels and the open channel. In the installed turbine, the control was made by decreasing or increasing the flow rate of the water coming into the reservoir and changing the turbine blade angle. It is aimed to calculate and position the ideal position in the system software in two different controls. When one-sided control is performed, the energy output values are compared with the results when two parameter controls are made. In addition, the change in energy output values was observed only when two different variables were kept constant at the highest efficiency.

Keywords: Vortex, Scada, Microcontroller, Water Turbine, Renewable Energy

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tarımsal sulama kanallarında su akışı, bitkiler ekilmeye başladığı dönemden başlar ve hasat dönemine kadar devam eder. Bu süreç ortalama 7-8 aylık bir dönemdir. Sulama kanalları alt kısmında

tortu birikmesini engellemek için 1-2 m/sn hızla suyun akması sağlanacak şekilde eğim verilerek tasarlanmaktadır. Kanallar debi açısından bakıldığında akıntı büyüklüğüne göre değişebilir, 1m³ -15m³ aralığında değişen sulama kanalları mevcuttur. Sulama kanallarında akıntı hızını düşürmek ve bir alt kot değerine geçmek için savaklar yapılmaktadır. Burada su ortalama 1-2m'lik kot farkı oluşturularak bir alt kota düşürülmektedir. Bu savaklar herhangi bir altyapı maliyeti gerektirmeden vortex türbin kurmak için ideal olan yerlerdir. Savaklara kurulması planlanan türbinler sulamaya engel olabilecek bir durumda oluşturmamaktadır. Aksine var olan potansiyeli enerji elde etmek için kullanmak ekonomik kazanç getirecektir.

Çizelge 1. Teorik hesaplamalardaki denklemlerde kullanılan simgelerin açıklamaları

Table1. Descriptions of symbols used in equations in theoretical calculations

Ortalama akım hızı(m/sn)	V	Net düşü yüksekliği (m)	H
Manning pürüzlülük katsayısı	n	Suyun özgül kütlesi (kg/m ³)	ρ
Enkesit alanı (m ²)	A	Türbin mekanik verim katsayısı	η
Islak çevre(m)	P	Tork	t
Hidrolik yarıçap(m)	R	Dairesel hız (rad/sn)	ω
Kanal taban eğimi	S_0	Kanat boyu(m)	r
Debi miktarı(m ³ /sn)	Q	Tork kuvveti(N)	F
Yer çekim ivmesi	g	Vortex kuyusu akıntı yönlendirme kapakçığı açısı	β
Kanatların önündeki akıntı hızı	u_1	Kanat aç değişimi (pitch)	α
Akıntının kanatlardan sonraki hızı	u_2	Programlanabilir mantık denetleyicisi	PLC
Türbin shaft dakika devir sayısı	N_{rpm}	Ana kumanda görsel yazılım	Scada
Akıntının taşıdığı güç değeri	P_i	Kanat çevrim değeri	η_{kanat}

SULAMA KANALLARI AKINTI HIZI DEĞİŞİMİ (IRRIGATION CHANNELS FLOW RATE CHANGE)

Tarımsal sulama kanallarının en kesitleri genellikle trapez yapıdadır. Bu şekil yapılarında akıntı hızı ideal olduğundan dolayı altta tortu ve çamur birikmesi az olmaktadır.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$Q = AV = \frac{1}{n} \frac{A^{5/3}}{p^{2/3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$



Şekil 1.Türbin tasarımının denendiği ve hesaplamaların yapıldığı Balıkesir/Gönen tarımsal sulama kanalı

Figure 1. Balıkesir/Gönen agricultural irrigation canal where turbine design is tested and calculations

Kanaldaki suyun debi değerini bulunması için kanal sıvı izi kesit alanından birim zamanda geçen sıvı miktarı debi değerini vermektedir. Kanallardaki hızı ve debi değerleri Eşitlik 1' de Manning denklemleri ile bulunmaktadır (Bulu s.43, 2011). Formüldeki n ifadesi kanallarda kullanılan yapı malzemesinin karakteristik katsayısı olarak adlandırılır. Farklı malzemelerden yapılmış kanalların n değerleri Çizelge 1' de listelenmiştir.

Yapılan çalışmada kanal akıntı hızı hesaplamalarında Manning katsayı değeri kanal yapı malzemesi olarak beton kullanıldığından dolayı 0,012 olarak alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 2. Yapay kanallarda malzeme yapısına bağlı olarak değişen Manning katsayısı değeri (s.42 hidroelektrik santrallerin tasarım ve hesapları(Bulu, 2011).

Table2.Manningcoefficientvaluechangingdependingon thematerialstructure in artificialchannels(s.42 hidroelektrik santrallerin tasarım ve hesapları A. Bulu)

KAPLAMASIZ KANALLAR	n		KAPLAMALI KANALLAR	n	
	Toprak	0,016-0,020		Beton	0,013-0,017
Çakıl tabanlı	0,022-0,030	Taban beton şevler taş	0,020-0,025		
İçinde ot büyümüş	0,022-0,033	Taban beton rip-rap şev	0,020-0,030		
Kaya	0,025-0,045	Kanalizasyon borusu	0,012-0,015		
		Kaya kazı beton kaplama	0,017-0,020		

VORTEX HESAPLAMALAR(VORTEX CALCULATIONS)

Bir hidroelektrik santralde üretilebilecek elektriksel ve mekanik enerji hesabı Eşitlik3 ve Eşitlik 4' deki formül ile hesaplanmaktadır($r =1000\text{kg/m}^3, g= 9,81\text{m/sn}^2$) (Sritram ve diğ., 2021).

$$P_h(\text{watt}) = gQH = rgQH \quad (3)$$

$$P_{\text{mekanik}} = \eta P_h = \eta rgQH \quad (4)$$

Türbin içerisindeki basınçlı suyun kanatlarda oluşturduğu basınca karşı koyma gücü, frenleme kuvveti, kanatların açılma hızı ile kanat şaftında meydana gelen torkun çarpımıdır (Saleem ve diğ., 2020). Eşitlik 6' da Kanal içerisindeki akıntı, bir hızla sahipse, bir engelle karşılaştığında, engele momentumunu aktarır. Engelin akıntıyı durdurma yönündeki bu etkiye frenleme etkisi denilmektedir. Engel aerodinamik bir yapıyla tasarlanmış bir akıntı türbin kanadı ise taşınan bu momentum kanatlarda bir itme ve kaldırma kuvvetine neden olur. Bu kuvvetlerin bileşkesi kanatlar bir şafta bağlandığında, dönme

etkisi oluşur. Doğrusal olarak kanatlara çarpan akıntı dairesel hareket meydana getirir. Şaftta meydana gelen karşı kuvvet frenleme kuvveti Eşitlik 5' te gösterilmiştir. Vortex kuyusu içerisine giren su, düşü yüksekliği ve basınç değişimine bağlı olarak kuyu duvarlarına teğet hız yaparak aşağı doğru düşme meydana gelmektedir. Bu hareket esnasında kuyunun tam ortasında bir hava boşluğu oluşmaktadır. Teğet hız ile hava boşluğu doğru orantılıdır (Ullah ve diğ., 2020).

$$P_{frenleme} = \tau\omega = rF \omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (5)$$

Gelen akıntının taşıdığı kinetik enerjinin tasarlanan kanat yapısı ile şaftta meydana gelen tork kuvveti ile dairesel harekete dönüşür. Şaftta bağlı olan alternatör mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu dönüştürme esnasında kayıplar meydana gelir. Kayıpların oranı verimi belirlemektedir. Eşitlik 6' da de verim, gelen enerjinin elde edilen elektrik enerjisine oranı mekanik verim değerini belirlemektedir.

$$\eta = \frac{P_{h(watt)}}{P_{frenleme}} \% \quad (6)$$

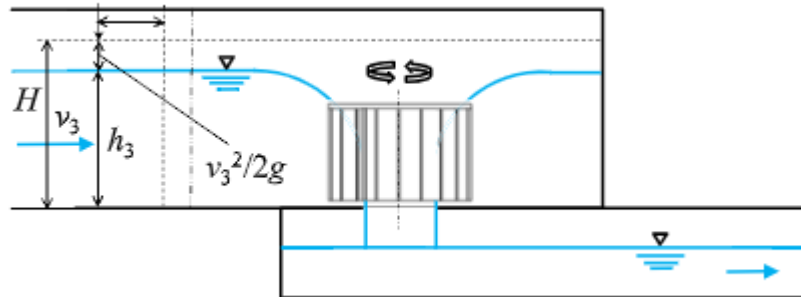
Governor Hesapları (Governor Accounts)

Sistem gelen akıntının kanatlar üzerinden geçerek enerjisini kanatlara aktarma prensibine dayanmaktadır. Kanatlar maksimum enerjiyi üzerine alabilmek için özel tasarlanmış aerodinamik yapıya sahiptir. Kanat açısı değişimi (pitch) kontrol mekanizması sayesinde maksimum enerji üretebilecek ideal açıda konumlandırılmaktadır. Eşitlik 7'de Vortex önündeki akıntı hızı vortex kanalındaki teğet hızına sürtünme ihmal edildiğinde eşit olmalıdır. Vortex kanalında yerçekimine bağlı olarak düşey bir hız oluşmaktadır (Saleem ve diğ., 2020).

$$u_1 = u_2 \quad (7)$$

Yapılan çalışmalarda vortex kuyusunun yüksekliği ile teğet hız arasında Eşitlik 8' deki gibi bir ilişki bulundu (Nishi ve diğ., 2020).

$$H = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} \quad (8)$$

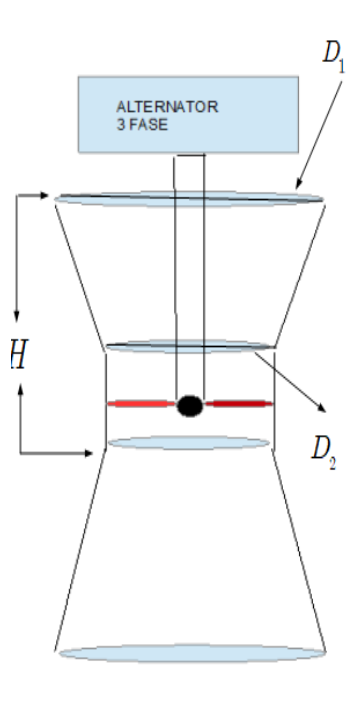


Şekil 2. Vortex türbin düşü yükseklikleri ve akıntı hız değişimi arasındaki ilişki (Nishi ve diğ.,2020).

Figure 2. The relationship between vortex turbine head height and flow velocity variation (Nishi ve diğ.,2020).

Vorteks kuyusunda akıntı hızının artması belirleyici özelliştir. Akıntı ile ilgili yapılan çalışmalarda tork ve elde edilen güç değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir (Dhakal ve diğ., 2014). Vortex kuyusunun tabanına yerleştirilen türbin kanatlarının açısı akıntının hız yönüne dik konumlandırılması verimi

artıracaktır. Bu şekilde akıntı basıncının kanatlara iletilmesi verimi artırmaktadır. Ancak buradaki teğet hız, gelen akıntının miktarına göre yönü değişir. Bunun açısı değişimine sahip olan kanatların kullanılması avantaj sağlar. Vorteks kuyusu ve teğet hızların farklı tarzdaki tasarım davranışlarını bazı araştırmacılar tarafında incelenmiş ve matematiksel modeller çıkarılmıştır (Dhakal ve diğ., 2015).



Şekil 3. Vortex türbin genel yapısı,
Figure 3. The general structure of the vortex turbine,

Şekil 3'deki yön ve açı değerlerine bakıldığında gelen akıntı yönü ve hızı ile çıkan akıntı yönü ve hızı arasında Denklem (9)'da ki gibi trigonometrik oran vardır (Saleem ve diğ., 2020).

$$\frac{u_1}{\sin a_1} = \frac{u_2}{\sin a_2} \quad (9)$$

Eşitlik 10' da kanatlardan önceki ve sonraki akıntı hızı devir (rpm) ve vorteks kuyusu giriş ve çıkış çaplarına göre değişimini göstermektedir. Hızın değerlerinin artması ile şaft devir hızı arasında doğru bir orantı vardır (Guzmán ve diğ., 2021).

$$u_1 = \frac{pD_1 N_{rpm}}{60}, \quad u_2 = \frac{pD_2 N_{rpm}}{60} \quad (10)$$

Kanatlardan önceki ve sonraki hız değişim oranı kanatların verim katsayısını belirlemektedir. Eşitlik 11' de h_b kanat çevrim oranının akıntı hız değişim oranı olarak belirlenmektedir. Eşitlik 13' te $P_{şaft}$ değeri kanatlarda oluşan dönme tork değeri şaft üzerindeki mekanik güç değeridir. Eşitlik 12 ile gösterilen ifadede P_i değeri akıntının taşıdığı güçtür. Vortex kuyusunun derinliği elde edilen enerjiyi artırmaktadır. Bu derinliğe bağlı olarak tabandaki kanat açıları da değişmektedir (Saleem ve diğ., 2020). Bir şafta bağlı olan kanatların aerodinamik yapısından dolayı gelen akıntıyı şaftta dönmeye yönelik bir tork kuvveti oluşturur.

$$\eta = \frac{u_2}{u_1} = \frac{P_{şaft}}{P_i} \% \quad (11)$$

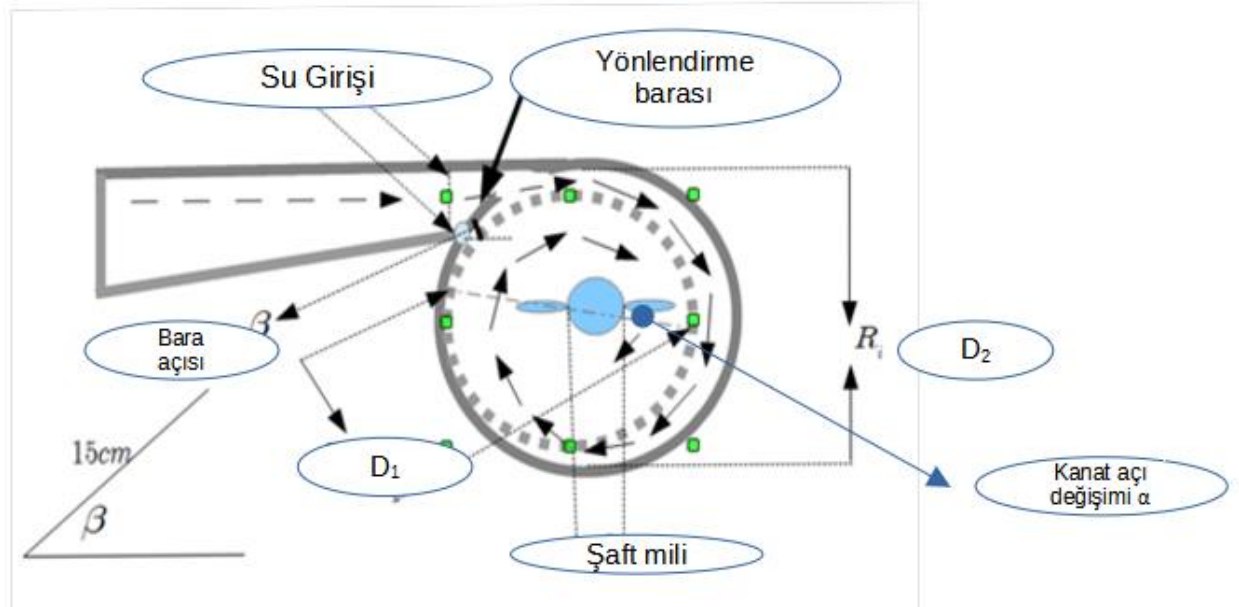
$$P_i = \frac{1}{2} r Q u_1^2 = r Q g H \quad (12)$$

$$P_{\text{şaft}} = \tau \omega \quad (13)$$

MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Materyal (Material)

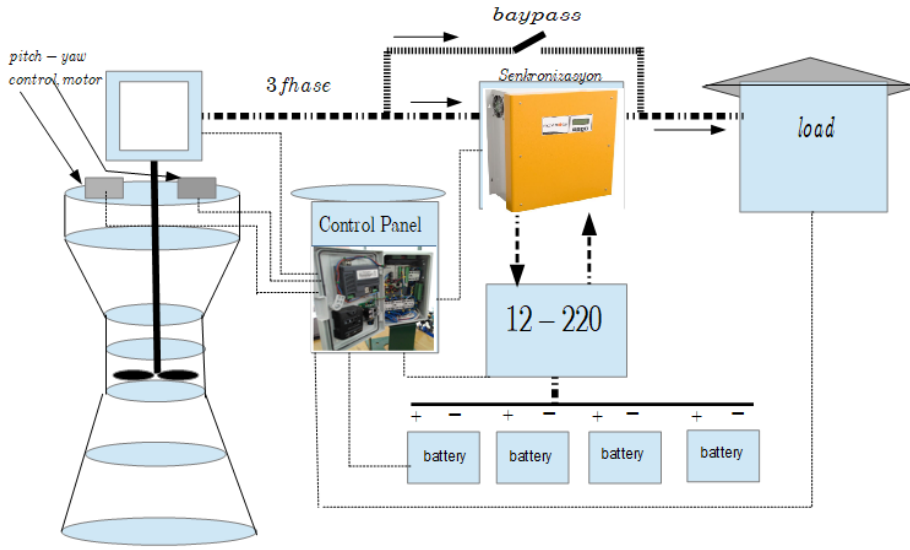
Yapılan çalışmada alternatör çıkışındaki frekans, gerilim, akım, aktif güç, reaktif güç değerlerinin değişimi sürekli kontrol edilmektedir. Bu değerlerin istenilen değer aralığında olması için türbin kanat (pitch) açısı değiştirme step motoru ve vortex akıntı girişi yönlendirme kanatçığı hareket step motoru ile kontrol edilir. Step motorların hızları ve pozisyonları, türbin çıkış veri değerlerinin değişim hızına ve ivmesine göre, PID kontrol ile yapılmaktadır.



Şekil 4. Tasarlanan türbin su giriş kısmı ölçü değerleri

Figure 4. Measured values of the designed turbine water inlet

Şekil 4' te gösterildiği gibi Türbinde su girişinin sağlandığı daralan bir kanal bulunmaktadır. Kanalın vortex kuyusu girişinde debi kuyuya giren akıntı miktarını ve akıntı yönlendirme kapakçığı bulunmaktadır. Bu sayede akıntı vortex kuyusu duvarlarında teğet hızı artmaktadır. Buna bağlı olarak vortex kuyusundaki akıntı hızının vektörel yönü değişmektedir. Teğet hızı yönü türbin kanatlarına dik açıda çarpması durumunda maksimum verim elde edilebilmektedir. Kanatların akıntı teğet hızına dik yönelmesi için yönelme (pitch) açıları bir step motor tarafından sağlanmaktadır. Yönlendirme barası kapakçığı ve kanat yönelme açısı (pitch) değişimleri başlama konumunda sıfır pozisyonundadır. Kapakçık açılmaya başladığında kanat açıları da buna senkron açılmaya başlar enerji çıkış değeri eğimi sıfır olunca her iki kontrol mekanizması durur. Durduğu bu nokta maksimum verimin elde edildiği noktadır.



Şekil 5. Türbin elektrik diyagramı gösterimi

Figure5. Turbine electrical diagram representation

Sistemde yazılımı yapılan PLC ve SCADA, üretilen elektrik değerleri ve şebeke elektrik değerlerini sürekli kontrol eder. Buna bağlı olarak gelen su yönlendirme barasını ve kanat aç değişimini kumanda eder. Şekil 5' de gösterilen sistemde üretilen elektrik kullanımı için yük kontrol modeli (load) tasarlanmış ve evin içerisinde olan elektrikli eveşyaları devreye alınıp çıkarılarak türbin davranışları incelenmiştir. Elektrik doğru akıma (DC) sonra tekrar 220V, 50Hz frekans değerine dönüştürülmektedir. Elektrikli cihazların devreye alınması sırasında frekans düşmesi yaşanmaması için akülerdeki enerjiden destek alınmaktadır. Sistem 2 farklı şekilde kontrolü yapılmaktadır.

a)= By-Pass modu

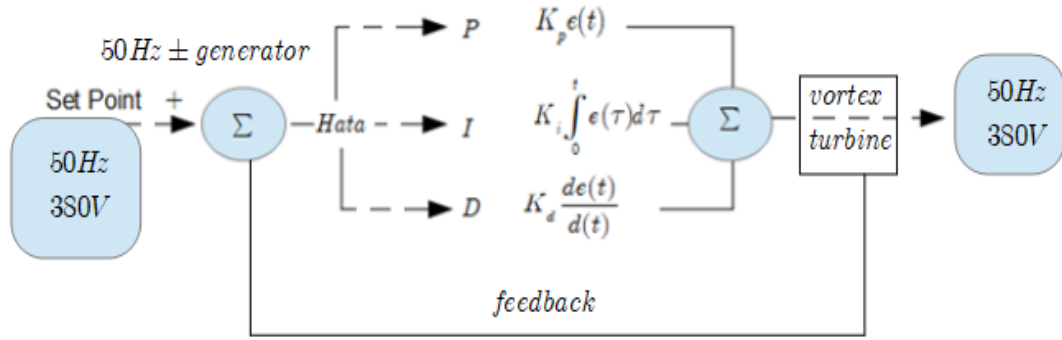
b)= Senkronizasyon modu

Yapılan çalışma ve SCADA yazılımı her iki farklı yöntemini de denetlemektedir. Eğer frekans değişim değeri verilen tolerans değerinin üzerine çıkarsa sistem akü destekli çalışır. Frekans tolerans değerleri arasında kalırsa By-Pass modun da ve sürekli SCADA denetiminde çalışmaktadır. Bundan sonraki çalışma By-Pass modu üzerinden devam edecektir.

Method(Method)

Kontrol Otomasyonu (PID)

Türbin kontrolü, kullanıma gönderilen elektriğin frekans ve gerilim değerleri sürekli kontrol edilir. Bu değerlerin grafiğindeki değişimin ivme değerine bakılarak bu ivmenin sıfır olması için yönlendirme barası hareket motoru ve kanat aç değişimini sağlayan pitch kontrol motorunun hız ve adım değerleri PID kontrol ile denetimi yapılmaktadır. Ancak PID kontroldeki kazanç değerleri sistemin set değeri çıkış frekans değerlerine bağlı olarak 50Hz, 380V seviyesinde sabit tutulmaya çalışılmaktadır. Elektriğin bağlı olduğu evde, elektrik aletlerin güç değerleri farklı olduğundan, yüke giren aletler üretilen frekansta değişim oranına PID kazanç değerleri (K_p , K_i , K_d) türbin devrinin frekans değerine eşit olması için sürekli değişmektedir.



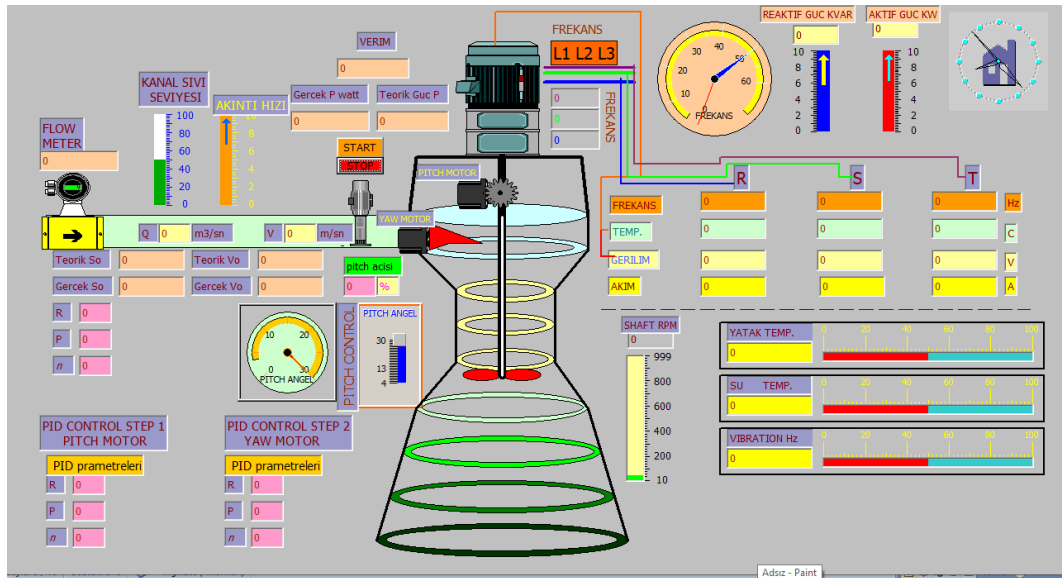
Şekil 6. PID kontrol sisteminin kontrol mekanizması aşamaları gösterimi

Figure 6. Control mechanism stages illustration of PID control system

PID Sistemli kontrollerde temel prensip set-point değerinde olması gereken değer ile alternatör çıkışındaki değer arasındaki hata değişim grafiği; oransal, türevsel, ve integral yöntemi ile denetlenerek, olması gereken set-point değerinde sabit tutulmaya çalışılır. Şekil 6'da bu değerlerin sisteme katkı değerlerinin hesaplama yöntemi gösterilmiştir.

Scada (Ana Kumanda Görsel Ekran)(Scada (Main Control Visual Display))

Türbin kontrolü mikro denetleyici (PLC) ile yapılmaktadır. Buna bağlı olarak türbinde meydana gelen değişiklikler ve olması gereken değerler bir ana kumanda merkezi yazılımı (scada) ile denetlenmektedir. Şekil 7' de türbin ana kumanda merkezi ekran görüntüsü üzerindeki türbin ile ilgili tüm verilerin izlenimi gösterilmektedir.



Şekil 7. Türbin kontrol ana kumanda merkezi (scada) yazılım ana ekran görünümü

Figure 7. Turbine control main control center (scada) software main screenview

DENEYSEL BULGULAR (EXPERIMENTAL FINDINGS)

Akıntı hızı değişimi (Current Velocity Change)

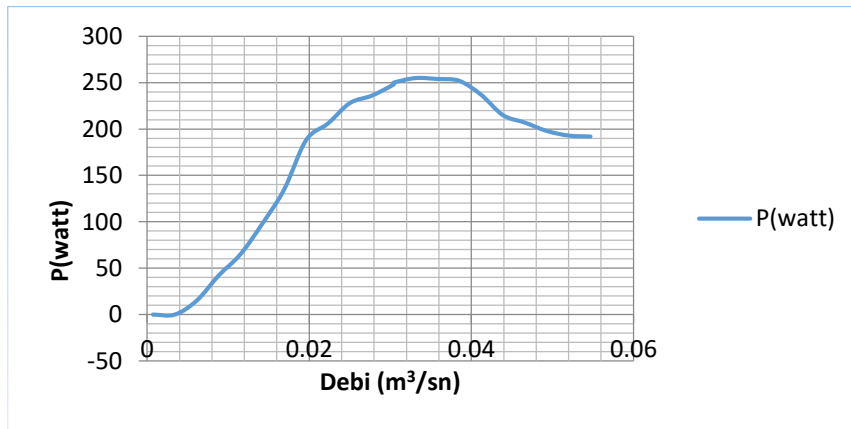
Denklem 1 ve 2' de verilen formül ile akıntı hızı ve debi değişimini hesaplamak için Manning denklemleri kullanılmıştır. Sistemin kurulu olduğu kanaldaki akıntı hızı $V=0,714\text{m/sn}$, $Q =0,054\text{m}^3/\text{sn}$ debi miktarı da bulundu. Aşağıdaki Şekil 8'da tasarlanan türbin sulama kanalındaki savak kısmına kurulmuştur.



Şekil 8. Kurulumun yapıldığı türbin farklı bölgelerden çekilmiş görüntüsü
Figure 8. The image of the turbine, where the installation is made, taken from different regions

Debi – Güç Değişimi (Flow–Power Variation)

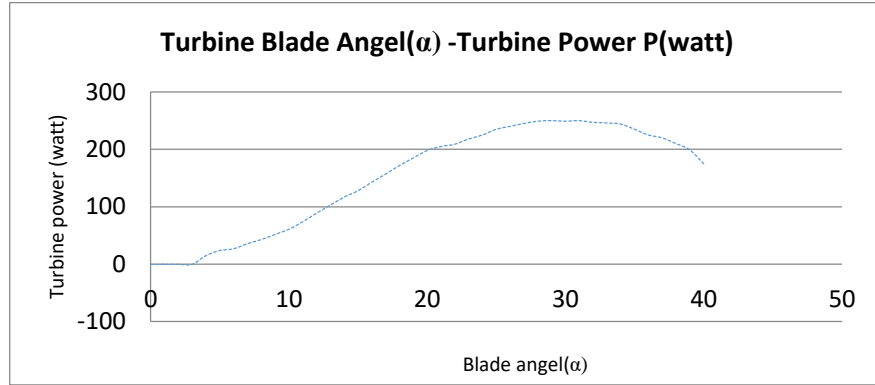
Şekil 9' da gösterilen grafikte debi değerinin artması elde edilen elektrik enerji değerinin artmasını sağlamaktadır. Ancak bu durum debinin artması sürmesine rağmen elde edilen elektrik enerjisi sabit olup artmamaktadır. Daha sonra bu değer bir miktar azalıp sabit olarak devam etmektedir. Sonuç olarak debinin artması vortex merkezindeki hava boşluğunun azalması ile suyun dönme etkisi azalır, burada enerji değeri de azalmaktadır.



Şekil 9. Vortex Türbin'de debi miktarına bağlı olarak elde edilen enerji miktarı değişimi
Figure 9. Change in the amount of energy obtained in the vortex turbine depending on the amount of flow

Türbin Kanat Açısı (pitch) (α) – Elektrik Enerjisi (watt)(TurbineBladeAngle (pitch) (α) – ElectricalEnergy (watts))

Mikro denetleyici (PLC) kontrollü türbinde PID kontrollü step motor kontrol çıkışı ve şebeke yük girişindeki frekans ve gerilim değerlerini sürekli takip ederek kontrol yapar. Bu kontrolü step motora bağlı olan türbin kanat açılarını değiştirerek devir kontrolünü gerçekleştirir. Şekil 10' daki gösterimde kanat açısı değişiminin 30° değerlerinde maksimum güç elde edildiği gözlemlenmiştir. Burada üretilen maksimum gücün (250w), ev elektrik aletleri ile kullanıldığında durum bu şekildedir. Örneğin 100w enerji kullanıldığında 50hz frekansı yakalamak için kanat açılarını değiştirmektedir. Kanat açıları(α) $15-17^\circ$ değerinde olmaktadır.

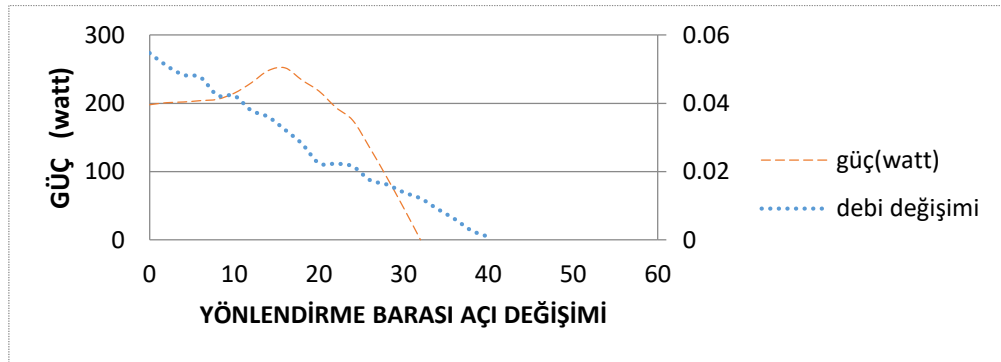


Şekil 10. Türbin kanat açısı değişimine bağlı gerçekleşen elektrik enerjisi değişimi gösterimi

Figure 10. Display of electrical energy change due to turbine blade angle change

Yönlendirme barası(β) – Güç(watt)- Debi(m^3/sn) değişimi (Directionbus(β) – Power(watt)- Flow(m^3/sec) change)

Bu çalışmada, türbin vortex kuyusuna su girişini kontrol eden yönlendirme barası(β) ve kanat açısı değişimi(α) ile kontrol sağlanmaktadır. Şekil 11' deki gösterimde yönlendirme barası ($\beta = 0^\circ$) değerinde kontrol maksimum su girişi olmakta ancak vortex etkisi görülmemektedir. Ancak açısı değeri ($\beta = 17^\circ$) gibi değerlerde maksimum vortex etkisi görüldüğünden güç değeri maksimum seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Ancak ($\beta = 17^\circ$) üzerinde olduğu kapanma durumunda akıntı debisi değeri azaldığından güçte bu oranda düşmüştür. Yapılan çalışmalarda türbin verimi %43 olarak bulunmuştur. Çift yönlü kontrol mekanizması kullanıldığında bu verim değeri %47,28 değerlerine çıkmıştır (Sritram ve diğ., 2016).



Şekil 11. Vortex türbin 'deki debi(m^3/sn) değeri – güç – yönlendirme barası(β) açısı değişim grafiği

Figure 11. Flow rate (m^3/sn) value in Vortex turbine–power–directionbus (β) angle change graph

Yüke Bağlı Frekans Değişimi(Frequency change depending on load)

Sistemde frekans kontrolü yapılması denetlemek için 10w gücünde rezistansları devreye bağlayarak denemeler yapıldı. 10w gücündeki rezistans devreye alındığında frekans değerinde meydana gelen değişim ve alternatörün tekrar aynı frekans değerine (set) gelmesi için geçen süreler Çizelge 3 de gösterildiği gibi gözlemlendi. Alternatör çıkışına kısa devre olarak bağlana 10w rezistansların sayısı arttıkça veya güç artışı oranında kontrolde ve set değerine geçiş süreci uzamaktadır. Bu durum su basıncının artması ile aç kontrolü yapan motorların yavaşlaması ile alakalıdır. Bunun yanında üretilen güç ihtiyacı arttıkça kontrolde zorlaşmaktadır.

Çizelge 3. PLC ile(α) ve (β) çift kontrol 20Hz alternatör çıkış frekansı +10W kısa devre ekleme sonucu frekans değişimi ve kontrol sisteminin set değerine ulaşmak için geçen zaman değeri

Table 3. Doublecontrolwith PLC (α) and (β) 20Hz alternatör output frequency +10W short circuit addition, frequency change and time taken to reach the set value of the control system

(α) ve (β) çift kontrol		
Devreye bağlanan rezistans(watt)	Frekansdeğeri(Hz)	20Hz frekansa set olma Süresi (sn)
0	20(set değeri)	
+10	19,75	1,4
+10	19,74	1,6
+10	19,71	1,9
+10	19,68	2,1
+10	19,65	2,19
+10	19,61	2,28
+40W bilgisayar	19,56	2,31
+80W elektrik motoru	19,4	2,32

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada vortex türbin, su girişi kontrolü (β) ve kanat aç değişimi (α) olmak üzere iki farklı kontrol yöntemi ile elektrik enerjisi değerleri kontrol altında tutulmaya çalışılmıştır. Sistem için bir scada programı tasarlanmış bu program ile tüm sistemin kontrolünün yapılabildiği ve denetlendiği gözlemlenmiştir. Üretilen elektrik enerjisi bir ev ortamında olabilecek elektriksels aletlerin devreye alınması ile frekans değişiminin mikro denetleyici (PID) yazılım ile 1-1,5 saniye gibi çok kısa sürede tekrar düzenli hale gelerek yükün doğrudan türbin üzerinden desteklendiği görülmüştür. Tek parametrel kontrol yapıldığında (β) frekans değerinin \pm % 15 değiştiği gözlemlenmiştir. Sadece kanat aç değişimi yapıldığında \pm % 9 oranında değişim göstermiştir. (β)su giriş kontrolü ve (α) kanat aç değişimi kontrolü yapıldığında \pm % 1,2 gibi değerler arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum 50Hz şehir şebekesi frekans değişim değerleri arasında olduğundan kabul edilebilir bir durumdur. SCADA ve Microdenetleyici (PLC) yazılım elektrik çıkış parametreleri frekans (Hz), güç(watt), gerilim(Volt) grafiksel değerlerini okur, değişim miktarını, eğimini hesaplar ve istenilen değerden sapma olduğunda giriş parametresi (β) ve (α) değerlerin step motorlarına PID yöntem ile müdahale eder. Sistem PLC program tarama süresi kadar kısa bir zaman aralığında müdahale ederek kontrol altında tutar. Ancak burada mekanik tasarımda(β)ve (α) değişimini sağlayan step motorlarının hızının maksimum olması için yüksek tork ve minimum ve maksimum dönüş değerlerinin kısa olması gerekmektedir. Buradaki sistemde \pm % 1,2 hata değeri step motorların minimum ve maksimum hareket zamanından kaynaklanmaktadır. Bunu önlemek için farklı teknikler düşünülmelidir.

Yapılan çalışmada su yönlendirme barası ve kanat açısı değişimi güç çıkışı scada ile denetlenerek maksimum veri çıkışının sağlanabilmesi için 2 farklı kontrol mekanizmasını en iyi konumda olması yazılım ile sağlanmıştır. Scada kontrol sonucunda %47,28 verimle çalıştığı gözlemlenmiştir. Tek yönlü kontrol yapılan sistemlerde bu verim değeri %37 civarında olduğu görülmüştür. İki farklı yöntem ile kontrol sisteminde daha yüksek verim ve ideal (50Hz) frekansa ulaşılmıştır.

Tasarlanan sistem ile ulusal şebekeye bağlantısı olmayan bölgeler için mikro pilot şebeke özelliği taşıdığı ve kullanılabilir olduğu ispatlanmıştır. Sistem sulama kanalları, dere, ırmak ve çay kenarları gibi düşü değeri az olan bölgelerdeki kurulan tesislerde kullanıma uygundur.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

- Bulu A., 2011, "Hidro elektrik Santrallerin Tasarım ve Hesapları", *Okan Ünv. Mühendislik Fak.*(2011)
- Guzmán, V.J., Glasscock J.A., 2021, "Analytical solution for a strong free-surface water vortex describing flow in a full-scale gravitational vortex hydropower system", *Water Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.wse.2021.03.004>.
- Dhakal, S., Timilsina, A. B., Dhakal, R., Fuyal, D., Bajracharya, T. R., Pandit, H. P., Amatya, N., 2015, "Mathematical modeling, design optimization and experimental verification of conical basin: gravitational water vortex power plant", *World's largest hydro conference*, at Portland, or, USA; July 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1762.0083
- Dhakal, S., Nakarmi, S., Pun, P., Thapa, A. B., Bajracharya, T. R., 2014, "Development and testing of runner and conical basin for gravitational water vortex power plant", *Journal of the Institute of Engineering*, Cilt10, Sayı1, ss. 140-148.
- Kadu, C. B., Patil, C.Y., 2016, "Design and Implementation of Stable PID Controller for Interacting Level Control System", *Procedia Computer Science*, Cilt2016, ss. 737-746, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.03.097>.
- Nishi, N., Suzuo, R., Sukemori, D., Inagaki, T., 2020, "Loss analysis of gravitation vortex type water turbine and influence of flow rate on the turbine's performance", www.elsevier.com/locate/renene, *Renewable Energy*, Cilt155, Sayı 2020, ss. 1103-1117.
- Saleem, A.S., Cheema, T.A., Ullah, R., Ahmad, S.M., Chattha, J.A., Akbar, B., Park, C.W., 2020, "Parametric study of single-stage gravitational water vortex turbine with cylindrical basin", www.elsevier.com/locate/energy, *Energy*, Cilt 200, Sayı 2020, ss. 117464.
- Sritram, P., Suntivarakorn, R., 2021, "The Efficiency Comparison of Hydro Turbines for Micro Power Plant from Free Vortex", *Energies*, Cilt 14, Sayı 23, ss. 7961, <https://doi.org/10.3390/en14237961>.
- Sritram, P., Suntivarakorn, R., 2016, "The effects of blade number and turbine baffle plates on the efficiency of free-vortex water turbines", *Pongsakorn Wichian and Ratchaphon Suntivarakorn / Energy Procedia*, Cilt 100, Sayı 2016, ss. 198 – 202.
- Ullah, R., Cheema, T.A., Saleem, A.S., Ahmad, S.M., Chattha, J.A., Woo Ç., 2020, "Preliminary experimental study on multi-stage gravitational water vortex turbine in a conical basin", *Renewable Energy*, Cilt145, Sayı2020, ss. 2516-2529.



GELENEKSEL YÖNTEMLERLE ÜRETİLEN KAPASİTANS TABANLI KENDİNDEN SENSÖRLÜ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT

Murat ÖZTÜRK

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay,
TÜRKİYE

murat.ozturk@iste.edu.tr

(Geliş/Received: 07.01.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 18.04.2022)

ÖZ: Bu çalışmada, çimento hamurunun kapasitans tabanlı kendiliğinden algılama özelliği incelenmiştir. Çimento hamurlarına sürekli ve süreksiz yükleme döngüleri (minimum gerilme 6 kPa, maksimum gerilme 36 kPa) uygulanmıştır. Gerilme ve kapasitans arasında bir ilişki gözlemlenmiştir. Çimento hamuru üzerindeki basınç gerilmesinin artırılmasıyla, kapasitans değerinde düşüşler ölçülmüştür. Kapasitans değişikliği tüm gerilme aralığı için geri dönüşlüdür. Çimento hamurunun başlangıç kapasitans değeri (yüksüz hali) 119.51 pF iken numunenin 36 kPa basınç gerilmesi altındaki kapasitans değeri 119.41 pF'dir. En yüksek gerilmede kapasitansta fraksiyonel değişim 9.2×10^{-4} 'tür.

Anahtar Kelimeler: Kendinden sensörlü, Kapasitans, Çimento hamuru, Basınç

Capacitance-Based Self-Sensing Cement-Based Composite Produced by Traditional Methods

ABSTRACT: In this study, capacitance based self-sensing properties of the cement paste is investigated. Continuous and discontinuous loading cycles (minimum stress is 6 kPa, maximum stress is 36 kPa) are applied to the cement pastes. A correlation between stress and capacitance is observed. The greater the compressive stress on the cement paste, the lower the capacitance. Capacitance change is irreversible for the entire stress regime. Initial capacitance value (un-loaded state) of the cement paste is 119.51 pF, whereas capacitance value of the specimen under 36 kPa compressive stress is 119.41 pF. Fractional change in capacitance at the highest stress is 9.2×10^{-4} .

Keywords: Self-sensing, Capacitance, Cement paste, Compression

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çimentolu kompozitler dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemelerindedir. Çimento esaslı kompozit, inşaat sektöründe yüksek mukavemet, dayanıklılık ve kolay uygulama gibi avantajlar sağlar. Yapısal özelliklere ek olarak, çimento esaslı kompozitlerden bazı ek işlevler de beklenir. Akıllı olan çok işlevli yapı malzemeleri, yapısal sağlık izleme (Yan ve diğ., 2017), kendi kendini sönmleme (Ruan ve diğ., 2017), kendi kendini iyileştirme (Shah ve Huseien, 2020), kendi kendine güç üretme (Xi ve Chung, 2020), elektromanyetik ekranlama (Jung ve diğ., 2020), akıllı yol (Saleem ve diğ., 2016) ve kendini algılama (Han ve diğ., 2020) gibi uygulamalar için kullanılır. Kendi kendine algılama, yapı malzemelerinin herhangi bir cihaza (bağlı veya gömülü) ihtiyaç duymadan kendi durumunu algılama yeteneğini ifade eder.

Kendi kendine algılama, bir yapı malzemesine gerilme uygulanması ve bunun sonucu malzemede meydana gelen elektriksel tepkilerin ölçülmesi esasına dayanır (Xi ve Chung, 2019). Malzemenin elektriksel tepkilerindeki değişim, malzemedeki gerilme değişimlerinin algılanabilmesini sağlar.

Yaygın olan direnç tabanlı kendi kendine algılama, malzemedeki öz direnç değişiminin gerilme uygulamasıyla ilişkilendirilmesine dayanır (Bekzhanova ve diğ., 2021). Direnç öz dirençle, gerilme ise şekil değiştirme ile ilgilidir. Direnç bazlı kendi kendini algılayan malzemenin test edilmesi için bu malzemenin iletken olması gerekir. Bu amaçla yarı iletken veya iletken olmayan malzemeler iletken olacak şekilde iletken dolgu maddeleriyle ile modifiye edilir. Karbon lif (Han ve diğ., 2021), karbon siyahı (Monteiro ve diğ., 2017), grafen (Papanikolaou ve diğ., 2019), grafit (Rovnanik ve diğ., 2019) ve çelik lif (Wang ve diğ., 2021), direnç tabanlı kendi kendini algılama uygulamaları için en yaygın kullanılan iletken dolgu malzemeleridir. İletkenlik ihtiyacı, direnç tabanlı kendi kendine algılama uygulamasını sınırlar. Bu yöntem mevcut yapılarda kullanılamaz. Ayrıca iletken dolgular ek maliyete neden olurlar.

Daha az yaygın olan kapasitans tabanlı kendi kendine algılama, malzemedeki kapasitans değişiminin gerilme uygulamasıyla ilişkilendirilmesidir (Chung, 2021). Kapasitans, malzeme özelliği olan elektriksel geçirgenlik ile ilgilidir. Kapasitans tabanlı kendinden algılama uygulamalarında iletkenliğe gerek yoktur. Kapasitans tabanlı öz algılama, hem mevcut hem de yeni yapılar için uygulanabilmektedir.

Direnç tabanlı kendini algılayan yapı malzemeleri üzerine birçok çalışma olmasına rağmen, çimento esaslı kompozitlerin kapasitif kendini algılama özellikleri üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, farklı yükleme koşulları altında çimento hamurunun kapasitif kendini algılama özellikleri incelenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalardan ((Chung ve Wang, 2018) ve (Ozturk ve Chung, 2021)) farklı olarak yüksek frekans ayarı ve değişik gerilme değerleri kullanılmıştır. Yüksek frekans, elektrot-malzeme arayüzeyin etkisini azaltmak için tercih edilmiştir. Ayrıca farklı gerilme değerlerinin kullanılması uygulamada bu yöntemin etkinliğinin ortaya çıkarılması içindir.

YÖNTEM (METHOD)

Malzemeler (Materials)

Çimento hamurunun hazırlanmasında CEM I 42,5 R Portland çimentosu (Oyak Çimento, Ankara, Türkiye) ve şebeke suyu kullanılmıştır. Çimento hamuru karışımı için su:çimento oranı 0,30 olarak sabit tutulmuştur. Çimento ve su karıştırıcıda bir süre karıştırıldıktan sonra homojen taze karışım yağlı ahşap kalıba dökülmüştür. 24 saat sonra çimento hamuru kalıptan çıkarılmış ve 28 gün süreyle su tankında kürlenmiştir. 28 günlük su küründen sonra test numuneleri 5 gün süreyle oda sıcaklığında (23 °C ve 70 bağıl nem) kurumaya bırakılmıştır.

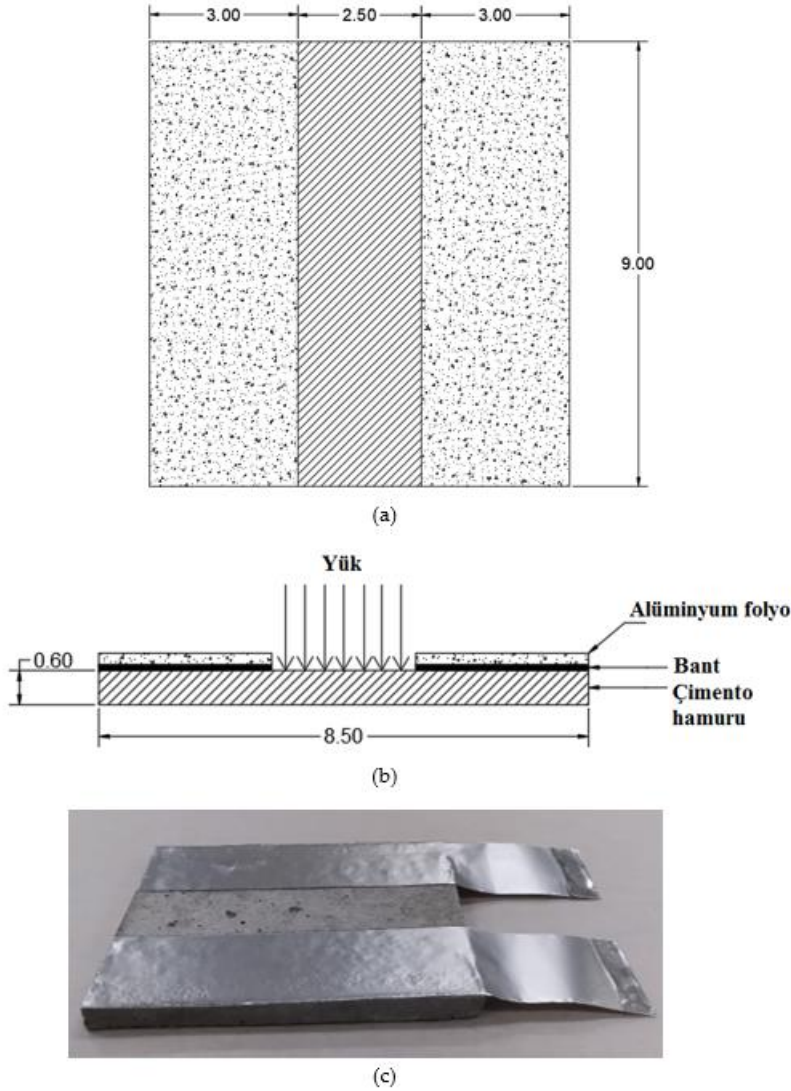
Test yöntemi (Test method)

9,0 cm x 8,5 cm x 0,6 cm (uzunluk x genişlik x kalınlık) boyutlarındaki çimento hamurunun düzlemsel kapasitans değeri, numune yüzeyine çift taraflı yapışkan bant ile yapıştırılan iki eş düzlemsel elektrot (Alüminyum folyo) ile ölçülmüştür. Test numunesi Şekil 1'de gösterilmiştir. Yapışkan bant, dielektrik film görevi görür. Numune yüzeyindeki her elektrot 9,0 cm x 2,5 cm boyutlarındadır. Elektrotların en yakın kenarları arasındaki mesafe 2,5 cm'dir.

Gerilme algılaması için elektrot kaplanmayan numune yüzeyine çimento hamuru numunesinin düzlemine dik doğrultuda yük uygulanmıştır. Yük uygulama alanı 9,0 cm x 2,5 cm'dir. Numune üzerindeki gerilme, kuvvetin alana bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yükleme için bilinen ağırlıklar kullanılmıştır. Uygulanan maksimum gerilme 36 kPa'dır (rastgele seçilmiştir). Maksimum gerilmenin, numunenin elastik sınırlarını aşmamasına özen gösterilmiştir.

Kapasitans ölçümleri için LCR metre (LCR-6000, GW Instek, New Taipei City, Tayvan) kullanılmıştır. Frekans ve voltaj değerleri 100 kHz ve 1 V (AC voltaj) olarak ayarlanmıştır. Sayaç ayarı, seri olarak kapasitansa karşılık ayarlanmıştır.

Ölçümler üç farklı numune üzerinde yapılmıştır. Her numunede gerilme ile birlikte kapasitans değerindeki fraksiyonel değişim birbirine çok yakın olarak gözlemlenmiştir. Sunulan değerler test edilen üç numuneden birine aittir.



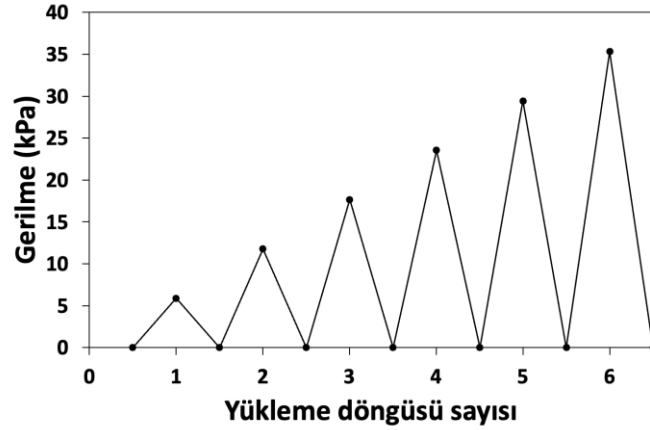
Şekil 1. Elektrotlu çimento pastası numunesi a) şematik üstten görünüm. b) şematik yandan görünüm. c) perspektif fotoğraf

Figure 1. Cement paste sample with electrode a) schematic top view. b) schematic side view. c) perspective photography

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Şekil 2, kademeli olarak artan gerilme genliğinde yükleme ve ardından boşaltma ile değişen çimento hamurunun kapasitans değerlerini göstermektedir. Artan gerilme genliği ile kapasitans azalmıştır. Basınç gerilmesi ne kadar yüksek olursa kapasitans düşüşü de o kadar yüksek olmuştur (Chung ve Wang, 2018). Çimento hamurunun başlangıç (yüksüz durumda) kapasitans değeri 119,51 pF olarak ölçülmüştür. Bu değer, numuneye uygulanan maksimum gerilme (36 kPa) ile 119,41 pF'ye düşmüştür. Kapasitif kendini algılamının, 12 kPa gerilme seviyesinin altında etkin olmadığı tespit edilmiştir. Yükleme ve boşaltma sırasındaki kapasitans değişimi, tüm gerilme seviyeleri için tamamen tersine çevrilebilir durumdadır. Şekil 3, artan gerilme genliği ile kapasitansta kısmi azalmadaki değişimi göstermektedir. Eğri, 6 kPa ile 36 kPa arasında neredeyse doğrusaldır. En yüksek gerilme seviyesinde kapasitansta fraksiyonel azalma %0.09'dur.

Şekil 4, kademeli olarak artan gerilme genliğinde yükleme ve ardından boşaltma ile değişen çimento hamurunun kapasitans değerlerini göstermektedir. Ancak, bu kurulum için önerilen test yönteminin güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini test etmek için tekrar tekrar üç farklı gerilme seviyesi (12 kPa, 24 kPa ve 36 kPa) uygulanmıştır. Her üç gerilme rejimi için kapasitans değerlerindeki değişiklik tamamen tersine çevrilebilir durumdadır.



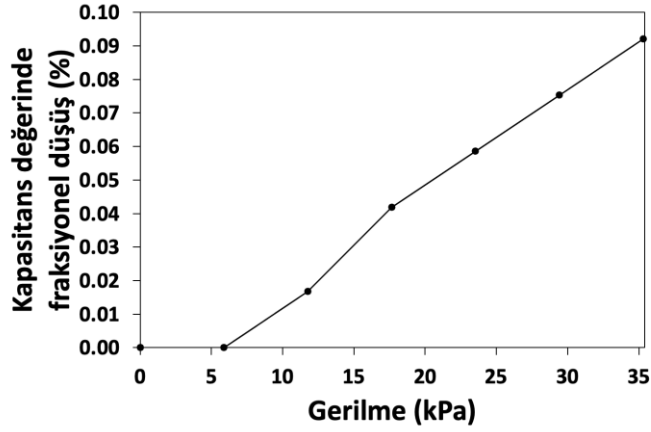
(a)



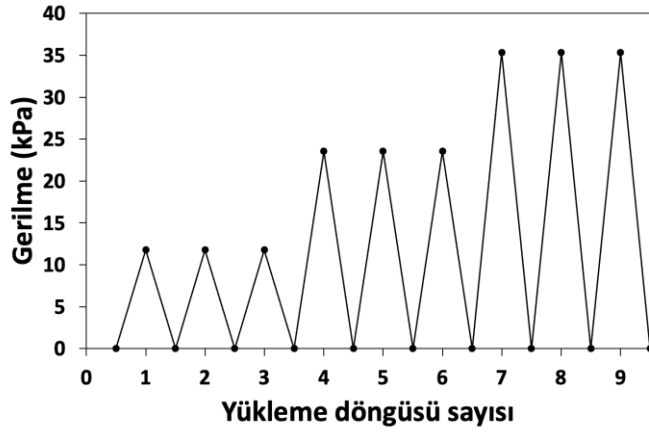
(b)

Şekil 2. a) Yükleme ve sonraki boşaltma döngüleri. b) Aşamalı artan gerilme genliğinde yükleme ve ardından boşaltma ile kapasitans değişimi

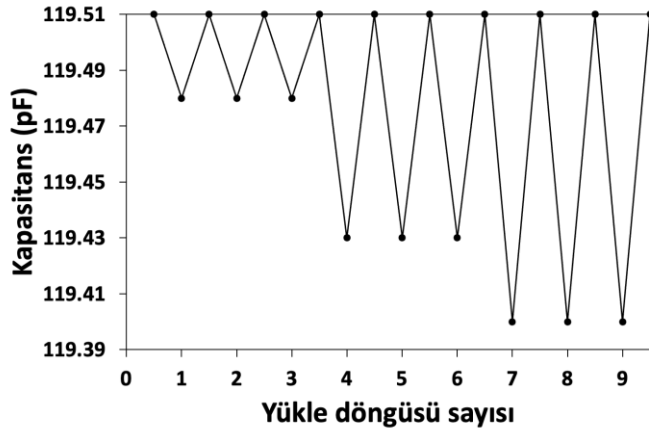
Figure 2. a) Loading and subsequent unloading cycles. b) Capacitance change with loading and subsequent unloading at progressively increasing stress amplitude



Şekil 3. Gerilmeye karşı kapasitansta fraksiyonel düşüş
Figure 3. Stress versus Fractional decrease in capacitance



(a)



(b)

Şekil 4. a) Tekrarlanan yükleme döngüleri. b) Aşamalı artan gerilme genliğinde tekrarlanan yükleme ve ardından boşaltma ile kapasitans değişimi

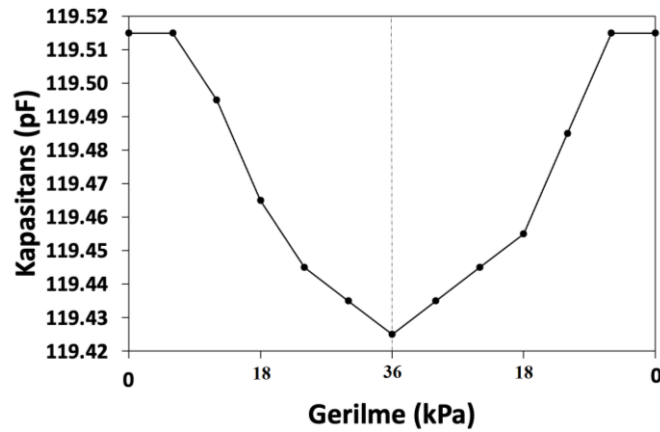
Figure 4. a) Repeated loading cycles. b) Capacitance change with repeated loading and subsequent unloading at progressively increasing stress amplitude

Şekil 5, her bir gerilme seviyesinde boşaltma olmaksızın, kademeli olarak artan gerilmede yükleme ve ardından kademeli olarak azalan gerilmede boşaltma ile değişen çimento hamurunun kapasitans değerlerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi numune üzerindeki gerilme arttıkça kapasitans değeri

düşmektedir. Kapasitans değerindeki değişikliğin tamamen tersine çevrilebilir olduğu görülmektedir. Algılama, 12 kPa altında etkisizdir.

Numuneye uygulanan yük numunenin yüzeyine normaldir ayrıca yük uygulama yönü de kapasitans ölçüm yönüne dik konumdadır. Poisson etkisinden dolayı yük yönünde basınç gerilmesi, kapasitans ölçüm yönünde ise çekme gerilmesi oluşur. Kapasitans ölçüm yönündeki çekme gerilme nedeniyle elektrotlar arasındaki mesafe artar ve kapasitans değeri azalır (Chung ve Wang, 2018).

Kapasitans değişikliklerinin çimento hamuru ile olan şekil değişikliklerini temsil ettiği varsayılır, böylece kapasitif kendi kendine algılama sağlanır (Ozturk ve Chung, 2021). Kapasitanstaki fraksiyonel azalma, çimento hamurundaki elastik deformasyona eşit olduğu söylenebilir. Elastik deformasyon birim şekil değişikliğidir. En yüksek gerilmeye kapasitansta fraksiyonel değişim 9.2×10^{-4} olarak ölçülmüştür. Bu değişim makul olan 33 MPa'lık bir elastik modüle karşılık gelir (Chung ve Wang, 2018).



Şekil 5. Kademeli olarak artan gerilme ve ardından kademeli olarak azalan gerilme ile değişen çimento hamurunun kapasitansı

Figure 5. Capacitance of cement paste changed by progressively increasing and decreasing stress

Mevcut çalışmadaki tüm deneyler, çimento hamuru üzerindeki gerilme değişiminin, kapasitans değeri açısından malzemenin elektriksel tepkisinde değişikliklere yol açtığını göstermiştir (Tian ve diğ., 2019). Bu davranış, çimento hamuruna uygulanan gerilmenin düzlemsel kapasitör alanında azalmaya ve dolayısıyla düzlem içi kapasitansta azalma olmasıyla açıklanabilir (Chung ve Wang, 2018). Kapasitans değerindeki değişikliklerin gözlemlenmesi malzeme üzerindeki gerilmenin tespit edilmesini sağlar. Gerilme tespiti aynı zamanda elastik bölgedeki birim şekil değişikliklerinin tespitini de mümkün kılar (Chung ve Xi, 2021).

SONUÇ (CONCLUSION)

Çimento esaslı malzemeler en çok kullanılan yapı malzemeleridir. Kendiliğinden algılama, hareketli yük algılama (ev ve sınır güvenliği, trafik izleme vb.) uygulamaları için değerlidir. Bu doğrultuda çimento hamurunun kapasitans bazlı kendini algılama özellikleri araştırılmıştır.

Bu çalışma, herhangi bir iletken dolgu maddesi içermeyen çimento hamurunun kapasitans tabanlı kendini algılama özelliklerini sunmaktadır. Düzlem içi kapasitans ile basınç gerilmesi arasında bir korelasyon gözlenmiştir. Bu ilişki ile kapasitif kendini algılama sağlanmıştır. Çimento hamurunun düzlem içi kapasitans değeri yük uygulaması ile azalmıştır. Çimento hamuru numunesi üzerindeki basınç gerilme ne kadar yüksek olursa kapasitans o kadar düşük olmuştur.

Kapasitif kendinden algılama, önerilen ölçüm düzeneği için 12 kPa'nın altında etkisizdir. Kapasitans düşüşü, 36 kPa basınç dayanımına kadar tamamen tersine çevrilebilir durumdadır. Çimento hamurunun başlangıç kapasitans değeri (yüksüz durumda) 119.51 pF iken, 36 kPa basınç altında 119.41 pF'ye düşmüştür. En yüksek gerilmeye kapasitansta fraksiyonel değişim 9.2×10^{-4} olarak ölçülmüştür.

ÇATIŞAN ÇIKARLARIN BEYANI (CONFLICT of INTEREST)

Yazar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanmasıyla ilgili olarak herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan etmemiştir.

SPONSOR (FUND)

Yazar bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanması için herhangi bir mali destek almamıştır.

KAYNAKÇA (REFERENCE)

- Bekzhanova, Z., Memon, S. A., Kim, J. R., 2021, "Self-Sensing Cementitious Composites: Review and Perspective", *Nanomaterials*, Cilt 11, Sayı 9, ss. 2355, <https://doi.org/10.3390/NANO11092355>.
- Chung, D. D. L., 2021, "Self-sensing concrete: from resistance-based sensing to capacitance-based sensing", *International Journal of Smart and Nano Materials*, Cilt 12, Sayı 1, ss. 1–19, Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/19475411.2020.1843560>.
- Chung, D. D. L., Wang, Y., 2018, "Capacitance-based stress self-sensing in cement paste without requiring any admixture", *Cement and Concrete Composites*, Cilt 94, ss. 255–263, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.017>.
- Chung, D. D. L., Xi, X., 2021, "Piezopermittivity for capacitance-based strain/stress sensing", *Sensors and Actuators A: Physical*, Cilt 332, ss. 113028, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113028>.
- Han, J., Cai, J., Pan, J., Sun, Y., 2021, "Study on the conductivity of carbon fiber self-sensing high ductility cementitious composite", *Journal of Building Engineering*, Cilt 43, ss. 103125, <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103125>.
- Han, J., Pan, J., Cai, J., Li, X., 2020, "A review on carbon-based self-sensing cementitious composites", *Construction and Building Materials*, Cilt 265, ss. 120764, <https://doi.org/10.1016/j.CONBUILDMAT.2020.120764>.
- Jung, M., Lee, Y. soon, Hong, S. G., Moon, J., 2020, "Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high performance concrete (UHPC): Dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE)", *Cement and Concrete Research*, Cilt 131, ss. 106017, <https://doi.org/10.1016/j.CEMCONRES.2020.106017>.
- Monteiro, A. O., Cachim, P. B., Costa, P. M. F. J., 2017, "Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles", *Cement and Concrete Composites*, Cilt 81, ss. 59–65, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.009>.
- Ozturk, M., Chung, D. D. L., 2021, "Capacitance-based stress self-sensing effectiveness of a model asphalt without functional component", *Construction and Building Materials*, Cilt 294, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123591>.
- Papanikolaou, I., Arena, N., Al-Tabbaa, A., 2019, "Graphene nanoplatelet reinforced concrete for self-sensing structures – A lifecycle assessment perspective", *Journal of Cleaner Production*, Cilt 240, ss. 118202, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118202>.
- Rovnaník, P., Kusák, I., Bayer, P., Schmid, P., Fiala, L., 2019, "Electrical and self-sensing properties of alkali-activated slag composite with graphite filler", *Materials*, Cilt 12, Sayı 10, ss. 1616, <https://doi.org/10.3390/ma12101616>.
- Ruan, Y., Zhou, D., Sun, S., Wu, X., Yu, X., Hou, J., Dong, X., Han, B., 2017, "Self-damping cementitious composites with multi-layer graphene", *Materials Research Express*, Cilt 4, Sayı 7, ss. 075605, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AA78E4>.
- Saleem, M., Elshami, M. M., Asce, M., Najjar, M., 2016, "Development, Testing, and Implementation Strategy of a Translucent Concrete-Based Smart Lane Separator for Increased Traffic Safety", *Journal of Construction Engineering and Management*, Cilt 143, Sayı 5, ss. 04016129, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001240](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001240).

- Shah, K. W., Huseien, G. F., 2020, "Biomimetic Self-Healing Cementitious Construction Materials for Smart Buildings", *Biomimetics* 2020, Cilt 5, Sayı 4, ss. 47, <https://doi.org/10.3390/BIOMIMETICS5040047>.
- Tian, Z., Li, Y., Zheng, J., Wang, S., 2019, "A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties", *Composites Part B: Engineering*, Cilt 177, ss. 107437, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107437>.
- Wang, H., Shi, F., Shen, J., Zhang, A., Zhang, L., Huang, H., Liu, J., Jin, K., Feng, L., Tang, Z., 2021, "Research on the self-sensing and mechanical properties of aligned stainless steel fiber-reinforced reactive powder concrete", *Cement and Concrete Composites*, Cilt 119, ss. 104001, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104001>.
- Xi, X., Chung, D. D. L., 2019, "Electret, piezoelectret, dielectricity and piezoresistivity discovered in exfoliated-graphite-based flexible graphite, with applications in mechanical sensing and electric powering", *Carbon*, Cilt 150, ss. 531–548, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.040>.
- Xi, X., Chung, D. D. L., 2020, "Deviceless cement-based structures as energy sources that enable structural self-powering", *Applied Energy*, Cilt 280, ss. 115916, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115916>.
- Yan, S., Ma, H., Li, P., Song, G., Wu, J., 2017, "Development and Application of a Structural Health Monitoring System Based on Wireless Smart Aggregates", *Sensors*, Cilt 17, Sayı 7, ss. 1641, <https://doi.org/10.3390/S17071641>.



KALP HASTALIĞI TEŞHİSİNDE YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİNİN KULLANIMI VE KARŞILAŞTIRILMASI

¹Onur ÜNLÜ , ²Hüma ÜNLÜ , ³Yılmaz ATAY 

¹Tarsus Üniversitesi, Tarsus Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Mersin, TÜRKİYE

²Aksaray Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Aksaray, TÜRKİYE

³Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

¹onurunlu@tarsus.edu.tr, ²humaunlu@aksaray.edu.tr, ³yilmazatay@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 01.08.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 19.04.2022)

ÖZ: Günümüzde insan ölümlerinin önemli bir kısmı kalp hastalıkları kaynaklıdır. Bu tür hastalıklar erken teşhis ile tedavi edildiğinde belirtilen ölüm oranları ciddi bir şekilde azalabilmektedir. Bu çalışmada Cleveland ve Z-Alizadehsani veri kümeleri için yapay zeka teknikleriyle kalp hastalığı teşhisi uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Cleveland veri kümesi için yaş, cinsiyet, göğüs ağrı türü, kan basıncı, kolesterol, kan şekeri, elektrokardiyografi sonucu, en yüksek kalp atış hızı, indüklenen göğüs ağrısı, eski zirve, eğitim, majör damar sayısı, tal isimleriyle ifade edilen 13 özellik yapay zeka tabanlı erken teşhis sistemine girdi özellikler olarak verilmiştir. Z-Alizadehsani veri kümesi için ise veritabanında bulunan 55 özelliğin tamamı aynı yapay zeka sistemine girdi özellik olarak kullanılmıştır. Önerilen yapay zeka sisteminde Naive-Bayes, Lineer Regresyon, Polinomiyal Regresyon, Destek Vektör Makinası (DVM) gibi basit sınıflandırıcıların yanı sıra bir topluluk sınıflandırma yaklaşımı olan Rassal Orman ve Yapay Sinir Ağı tabanlı Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) kullanılmıştır. Yapılan deneylerde 10 K katlama ve Bekletme (20 çalıştırma) çapraz doğrulama yöntemleri kullanılmıştır. Çoklu Lineer Regresyon yaklaşımı bekletme yöntemiyle Cleveland veri kümesi için 0.90'a kadar doğruluk değeri üretirken Z-Alizadehsani veri kümesi için 0.91'e kadar doğruluk değeri üretmiştir. K katlama çapraz doğrulama yöntemi uygulandığında ise bu değerler iki veri kümesi için de 0.93'e kadar doğruluk oranına ulaşmıştır. DVM yöntemi Cleveland veri kümesi için K katlama yöntemiyle 0.97 doğruluk oranıyla en yüksek sonucu vermiştir. Genel olarak K katlama yönteminin Bekletme yöntemine göre daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Deneylerin detaylı sonuçları ve literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırmalı sonuçları çizelgelerde verilmiştir. Çalışmada kullanılan modeller Türkiye'deki hastane otomasyonları gibi sistemlere entegre edilerek hastalıkların erken ve doğru teşhis edilmesi sağlanabilecektir. Önerilen sistem, ideale yakın bir düzeyde geliştirildiğinde sürekli öğrenen bir web servis olarak hastanelerin otomasyon sistemlerine sunulabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Kalp hastalığı teşhisi, Çok katmanlı algılayıcı, Lineer regresyon, Polinomiyal Regresyon, Destek Vektör Makinası, Rassal Orman, Naive-Bayes, Sınıflandırma, Tanıma

The Utilization and Comparison of Artificial Intelligence Methods in the Diagnosis of Cardiac Disease

ABSTRACT: Today a significant amount of human mortality is because of cardiac disease. These mortality could be reduced considerably by diagnosis on early stages. In this study we propose an artificial intelligence based early diagnosis system for cardiac disease prediction. For the research we utilized Cleveland and Z-Alizadehsani datasets. For Cleveland database which contains 76 attributes, 13 attributes selected in order to predict heart disease presence. For Z-Alizadehsani database which contains 55 attributes, all attributes are utilized for prediction. System implements not only basic classifiers as Naive-Bayes, Linear Regression, Polynomial Regression, Support Vector Machine (SVM)

but also ensemble classifier Random Forest and complex models like artificial neural network based multilayer perceptron. On cardiac disease prediction two cross validation techniques employed. Firstly 20 experiments processed for each method by utilizing holdout cross validation technique. Secondly K-fold (10 fold) cross validation is applied for all methods. Multiple Linear Regression with holdout cross validation has achieved best results as 0.91 accuracy for Cleveland dataset and 0.91 for Z-Alizadehsani dataset. For these two datasets when K fold is utilized 0.93 accuracy score achieved for both. Best result is obtained as 0.97 accuracy by SVM method with Z-Alizadehsani dataset. Generally it is observed that K fold method has better results than Holdout method. Detailed and comparable results of experiments are given in tables. Illnesses could be detected correctly in early phases by integrating these models to health systems like hospital otomations. The proposed system could be presented as continous learning web service to health automation systems.

Keywords: *Cardiac disease prediction, Multilayer perceptron, Linear regression, Polynomial Regression, Support Vector Machine, Random Forest, Naive-Bayes, Classification, Recognition*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapay zeka yöntemleri insan zekasını modelleyerek, birçok iş sahasında insan işgücünün yerini almakta veya insanlara yardımcı olarak ilgili sektörlerde kullanılmaktadır. Bu tür mekanizmalar; ses tanıma, görüntü işleme, otonom araçlar, ekonomi piyasalarında gelecek tahminleme, siber güvenlikte saldırı tespit sistemleri, yazılım geliştirmede maliyet kestirimi, sağlık sektöründe hastalıkların teşhisi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

Ülkemizde her yıl binlerce insan kalp hastalığından yaşamını yitirmektedir (TÜİK, 2019). Kalp hastalıkları insan sağlığını tehdit eden en önemli faktörlerden biri haline gelmiştir. Kalp hastalığının pek çok sebebi olabilir. Bunlar arasında kan damar hastalıkları, koroner damar hastalıkları, kalp ritim bozuklukları, doğuştan gelen hastalıklar ve benzeri olabilir. Bu makalede ifade edilen kalp hastalığı terimi herhangi bir türdeki kalp hastalığının mevcudiyetini ifade etmektedir.

Yapay zeka yöntemleri en temel anlamda danışmanlı (Kotsiantis ve diğ., 2007) ve danışmansız (Ghahramani, 2003) olmak üzere 2 ana grup altında ele alınabilir. Danışmanlı öğrenme yöntemlerinde girdi ve çıktı veriler elde bulunur ve bunlar sisteme birlikte verilerek sistemin eğitilmesi sağlanır. Sistem bu eğitimin sonucunda öğrenir ve test girdileriyle test edilir. Test girdilerinin gerçek çıktıları elde var olduğundan sistemin çıktılarıyla karşılaştırılarak sistemin başarımı ölçümlenir. Danışmansız öğrenme teknikleri ise çıktı verilerinin elde bulunmadığı durumlarda kullanılırlar. Bu sistemler verilerin birbirlerine olan benzerliklerini çeşitli mesafe ölçme yöntemleriyle karşılaştırarak verileri gruplara ayırırlar. Bu makalede danışmanlı öğrenme teknikleri kalp hastalığı teşhisinde kullanılmış ve yöntemlerin başarımları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

LİTERATÜR ÇALIŞMASI (LITERATURE REVIEW)

Literatürde kalp hastalığı teşhisinde yapay zeka kullanan pek çok çalışma mevcuttur. Zhenya ve Zhang 2021 yılında yayınlanan çalışmalarında kalp hastalığı teşhisinin verimliliğini arttıran ve yanlış sınıflandırma maliyetini düşüren 5 adet heterojen yöntem önermişlerdir (Qi ve Zuru, 2021). Bu yöntemde Rassal Orman, Lojistik Regresyon, DVM, Aşırı Öğrenme Makinası ve K en yakın komşu algoritmaları kullanılmıştır. Önerilen algoritma topluluğunun birlikte kullanılması sonucunda tekil sınıflandırıcılara göre daha yüksek başarımlar elde etmişlerdir. Sonuçların değerlendirilmesinde kesinlik (precision), duyarlılık (recall), özgüllük (specificity) gibi metrikler kullanılmıştır.

Yar ve diğerleri (2020), araştırmalarında 10 adet farklı yapay zeka sınıflandırma algoritmasını Cleveland ve Hungarian veri kümeleri üzerinde çalıştırmışlar ve 0.90'ın üzerinde doğruluk performansı elde etmişlerdir.

Arabasadi ve diğerleri (2017), Z-Alizadeh Sani (Alizadehsani ve diğ., 2013) veri kümesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Öznitelik seçimi için DVM'ye göre ağırlık skoru kullanılmış, en yüksek skoru elde eden öznitelikler eğitime dâhil edilmiştir. Giriş katmanında başlangıç değerlerinin genetik algoritma ile hesaplandığı, üst katmanda ÇKA bulunan hibrit bir yöntem ile 0.97 duyarlılık, negatif olarak doğru etiketlenen verilerin gerçekte negatif olan verilere oranı ile bulunan 0.92 özgüllük değeri elde edilmiştir. Alizadehsani ve diğerleri (2013), Z- Alizadehsani veri kümesi üzerinde Sıralı Minimal Optimizasyon (SMO), Naive Bayes ve ÇKA yöntemleri ile sırasıyla 0.94, 0.76 ve 0.88 doğruluk değerleri elde etmiştir. SMO DVM'lerinin eğitimi sırasında ortaya çıkan optimizasyon problemini verimli bir şekilde çözmektedir.

Mohanad Alkhodari, Luay Fraiwan tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada konvolüsyonel ve tekrarlayan sinir ağları kullanılarak fonokardiyogram kayıtları üzerinden kalp kapakçığı hastalığı tespiti yapılmıştır (Alkhodari ve Fraiwan, 2021). Veriler 1000 adet kayıttan oluşmaktadır. Normal hastalar ve 4 farklı kalp kapakçığı hastalığı için ayrı ayrı 200 kayıt bulunmaktadır. Giriş katmanında CNN sinyal verilerini alıp işlemekte BiLSTM (Bidirectional Long Short Term Memory – İki Yönlü Uzun Kısa Süreli Hafıza) katmanına girdi olarak göndermektedir. LSTM gelişmiş bir tür TSA (Tekrarlı Sinir Ağı)'dır. Sonuçta 0.98 kesinlik, hassasiyet ve F1-ölçütü değerleri elde edilmiştir.

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi akademisyenlerinin gerçekleştirdiği bir çalışmada Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yöntemiyle Cleveland veri kümesi üzerinde özellik seçimi yapılmış ve Rassal Orman algoritmasıyla eğitim gerçekleştirilmiştir. Bu eğitim sonucunda test verileriyle yapılan testten 0.85-0.88 aralığında doğruluk, özgüllük, duyarlılık, kesinlik ve F-ölçütü değerleri elde edilmiştir (Ekrem ve diğ., 2020).

Nancy Masih ve arkadaşları kalp hastalığının teşhisinde Framingham veri kümesi üzerinde ÇKA tabanlı Derin Sinir Ağı kullanmışlar ve çeşitli veri önışleme teknikleriyle önceki çalışmalara göre 0.036 oranında başarıyı arttırarak 0.96 seviyesinde doğruluk oranına ulaşmışlardır. Kullandıkları sinir ağı girdi katmanı, çıktı katmanı ve birden fazla gizli katmandan oluşmaktadır (Masih ve diğ., 2021).

Akalın ve diğerleri (2020), K en yakın komşu, Gaussian Naive Bayes ve Rassal Orman algoritmaları ile sınıflandırma yapmış ve Cleveland veri kümesi üzerinde Rassal Orman ile 0.82 doğruluk elde etmişlerdir. Chen ve diğerleri (2011) problemi yapay sinir ağları ile çözümlenmişler ve 0.80 doğruluk değerine aynı veri kümesi için ulaşmışlardır. Mohan ve diğerleri (2019), tarafından yine aynı veri kümesi üzerinde lineer modellenmiş hibrit Rassal Orman sistemini önermiş ve 0.88 doğruluk değeri elde etmişlerdir.

Hsieh ve diğerleri (2012), Endovasküler anevrizma onarımı (EVAR) ameliyatı geçiren hastanın ameliyat sonrası komplikasyon oluşma riskini ve ikincil değişken olarak komplikasyon türünü tahmin etmeye çalışan Bayes Ağı, Yapay Sinir Ağı ve DVM'nin birleştirilmesi ile oluşan yeni bir birleştirilmiş model önermiştir. Öznal, belirsiz veya yetersiz tanımlanmış değişkenler eğitime dahil edilmemiştir. Önerilen algoritma ile 0.81 oranında doğruluk elde edilmiştir.

Shorewala (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada yoğun sinir ağı kullanılarak 70.000 kayıt içeren 'Cardiovascular Disease Dataset' veri kümesi üzerinde çalışılmıştır. Önerilen mimaride üç gizli katman bulunmaktadır. Birinci katmanda 256 nöron bulunmaktadır ve aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid kullanılmıştır. İkinci katmanda 256 nöron bulunmaktadır ve aktivasyon fonksiyonu olarak softmax kullanılmıştır. Son gizli katman birinci katmanla aynı özelliktedir. Mimariyle 0.739 doğruluk ve 0.72 F₁ skoru elde edilmiştir.

Dutta ve diğerleri (2020) tarafından geliştirilen iki katmanlı evrimsel sinir ağı (ESA) sonuç sınıfa özel uyum dengesizliğine karşı dirençlidir. Model 1999-2016 yılları arasında elde edilmiş 37079 kayıt içeren NHANES veri kümesi üzerinde çalışmaktadır. Çalışmadaki en yüksek doğruluk oranı 0.82'dir.

Ayon ve diğerleri (2020), sınıflandırma tabanlı yöntemler ve derin öğrenme yöntemini kullanarak Cleveland veri kümesi üzerinde karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada DVM, Lojistik Regresyon, Derin Sinir Ağı, Karar Ağacı, Naive Bayes, Rassal Orman, K-En Yakın Komşu algoritmaları karşılaştırılmıştır. Derin Sinir Ağı 4 gizli katman için her bir katmanda sırasıyla 14, 16, 16,

14 nöron olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmalarında Cleveland veri kümesi için en yüksek başarıyı 0.97 ile DVM yöntemi vermiştir.

Kolukisa ve diğerleri (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Cleveland ve Z-Alizadehsani veri kümeleri üzerinde önceden yapılmış çalışmalar karşılaştırılmış ve çizelge halinde sunulmuştur. Ayrıca Naive-Bayes, Rassel Orman, K-En Yakın Komşu, ÇKA, DVM sınıflandırıcıları ayrı ayrı ve toplu olarak test edilmiştir. Medikal doktorların önerisiyle Cleveland veri kümesi üzerinde yapılan özellik seçimi sonucunda 0.82 doğruluk oranına ulaşmışlardır. Z-Alizadehsani veri kümesi üzerinde Fisher Diskriminant Analizi ile oluşturulmuş toplu sınıflandırma metodu 0.94 F_1 skor değerine ulaşmıştır.

Mienye ve diğerleri (2020) tarafından Cleveland ve Framingham veri kümeleri rasgele daha küçük parçalara ayrılıp sonrasında Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (SRA) ile modellenmiştir. Algoritma sonraki adımda Ağırlıklı Yaşlandırma Sınıflandırıcı Topluluğunun (AYST) bir modifikasyonu olan doğruluk tabanlı bir yaklaşım kullanarak farklı SRA modellerinden homojen bir topluluk modeli oluşturur. Doğruluğuna ve toplulukta harcanan zamana bağlı olarak sınıflandırıcılara ağırlıklar atanır. Ağırlığı belirli bir eşliğin altına düşen sınıflandırıcı topluluktan çıkarılır. Model Cleveland ve Framingham veri kümeleri üzerinde sırasıyla 0.93 - 0.91 doğruluk değerlerine ulaşmıştır.

Gupta ve diğerleri (2021), Rassel Orman, DVM ve Lojistik Regresyon modellerini birlikte kullanarak bir topluluk modeli oluşturmuştur. Bu model Z-Alizadeh Sani Veri Kümesini Kullanarak Kalp Hastalığı Teşhisi için DMHZ (çeşitli yöntemlerin birlikte uygulanması) olarak isimlendirilmiştir. Model 0.95 doğruluk, 0.98 duyarlılık değeri elde etmiştir.

VERİ KÜMELERİ (DATA SETS)

Bu çalışmada deneyler iki farklı veri kümesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi yapay zeka ile kalp hastalığı teşhisi uygulamalarında uzun zamandan beri yoğun olarak kullanılmakta olan UCI veri merkezinde yayınlanmış Cleveland veri kümesini içermektedir (Janosi ve diğ., 1988). Cleveland veri kümesi 167 kalp hastalığı bulunmayan ve 136 kalp hastalığı bulunan toplam 303 tekil kayıt içermektedir. Bunlardan 6 kayıt için eksik veri bulunmaktadır. Bu veriler veri kümesinden ön işleme aşamasında çıkarılarak 297 veri ile çalışma gerçekleştirilmiştir. Veri kümesi toplamda 76 özellik barındırmasına karşın bunlardan kalp hastalığı teşhisinde sıklıkla kullanılan 13 özellik yapay zeka sistemine girdi olarak verilmiştir. Kalp hastalığı teşhisinde kullanılan 13 girdi özellik Çizelge 1' deki gibidir. Hastaların adları ve sosyal güvenlik numaraları kişisel verilerin korunması amacıyla veri tabanından çıkarılmıştır.

Bu çalışmada yapay zeka ile kalp hastalığı teşhisi sistemi için kullanılan ikinci veri kümesi 2017 yılında yayınlanan Z-Alizadehsani veri kümesidir (Alizadehsani ve diğ., 2017). Z-Alizadehsani veri kümesi 216 kalp hastalığı bulunan ve 87 kalp hastalığı bulunmayan olmak üzere toplam 303 adet kayıt içermektedir. Veritabanında her bir kayıt için 55 farklı özellik bulunmaktadır. Özellikler; demografik, semptom ve muayene, EKG sonuçları, labaratuvar ve eko sonuçları olmak üzere 4 farklı alana aittir. Özelliklerden bazıları şu şekildedir: hipertansiyon geçmişi, mevcut sigara içen kişi, eskiden sigara içen kişi, birinci derece yakınarda kalp hastalığı mevcudiyeti, kan basıncı, ritim, kan şekeri, hemoglobinin. Alanların bazıları var veya yok şeklinde ikili değerler içerirken bazıları sayısal ölçüm sonuçlarını içermektedir. Z-Alizadehsani veri kümesinde bulunan 55 özelliğin tamamı uygulanan deneylerde kullanılmıştır.

Çizelge 1. Kalp Hastalığı Teşhisinde Yapay Zekaya Girdi Olarak Kullanılan 13 Özellik*Table 1. 13 Attributes Which Are Used As Input To Artificial Intelligence For Heart Disease Diagnosis*

Yaş	Age
Cinsiyet	Sex
Göğüs ağrı türü	Chest pain type (4 values)
Kan basıncı	Resting blood pressure
Kolesterol	Serum cholesterol in mg/dl
Kan şekeri	Fasting blood sugar > 120 mg/dl
Elektrokardiyografik sonucu	Resting electrocardiographic results (values 0,1,2)
En yüksek kalp atış hızı	Maximum heart rate achieved
İndüklenen göğüs ağrısı	Exercise induced angina
Eski zirve	Old peak = ST depression induced by exercise relative to rest
Eğim	The slope of the peak exercise ST segment
Majör damar sayısı	Number of major vessels (0-3) colored by fluoroscopy
Tal	Thal: 0 = normal; 1 = fixed defect; 2 = reversable defect

DANIŞMANLI YAPAY ZEKA VE MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ (SUPERVISED ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING TECHNIQUES)

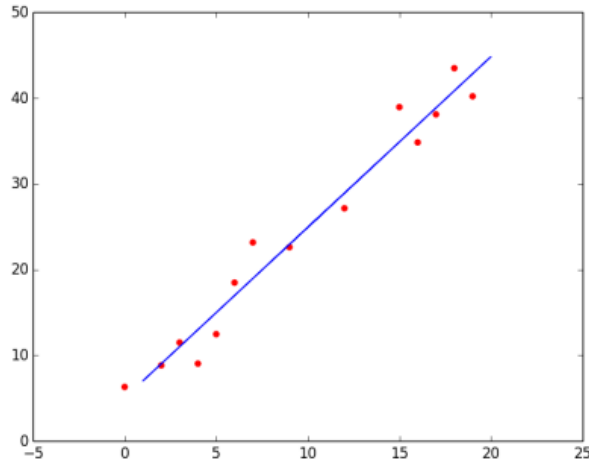
UCI ve Kaggle gibi veri depolarında çeşitli hastalıklar için derlenmiş hasta kayıtları bulunan veri kümeleri bulunmaktadır. Bu makalede kalp hastalığı teşhisi için derlenip UCI veri deposunda sunulmuş Cleveland ve Z-Alizadehsani veri kümeleri için temel makine öğrenmesi yöntemleri, Rassel Orman topluluk sınıflandırma yöntemi ve ÇKA kullanılmıştır. Bu bölümde kullanılan yöntemlerin detayları anlatılmaktadır.

Regresyon (Regression)

Lineer Regresyon (Seber ve Lee, 2012), verilen x_i bağımsız değişkenleri ve y bağımlı değişkenlerine göre x_i bağımsız değişkenlerinin katsayılarını (w_i) ve sabit değerini (w_0), ϵ (epsilon) hata payıyla bulmaktadır. Lineer regresyon verilen noktalara göre mesafelerin en az olacağı şekilde en uygun çizgiyi bulur. Regresyon süreçlerinin tekli lineer regresyon, çoklu lineer regresyon, polinomial regresyon gibi farklı türleri vardır.

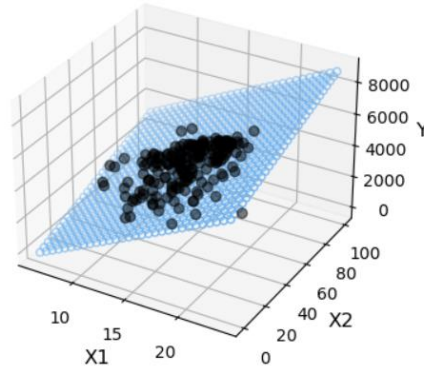
Tekli lineer regresyonun formülü $y = w_0 + w_1x$ şeklindedir. Burada y bağımlı değişkeni tek bir adet x bağımsız değişkenine bağlıdır. Şekil 1' de örnek olarak verilen x ve y değerlerine göre tekli lineer regresyonda mavi çizgiyle gösterilen doğru çizilmiştir. Bundan sonra tahmin amacıyla gelecek olan yeni x değerleri doğru üzerindeki y karşılıklarına göre tahminlenecek ve belirli bir hata payıyla y değerleri tahmin edilmiş olacaktır.

Çoklu lineer regresyonun (Tabachnick ve diğ., 2007) formülü $y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + \dots$ şeklindedir. Burada y bağımlı değişkeni girdi olarak kullanılan n adet x_i bağımsız değişkenine bağlıdır. Çoklu lineer regresyonda hangi x_i değerlerinin katsayısının daha önemli olduğunu bulmak için adım adım regresyon uygulanır. Burada tüm değişkenler için Sıradan En Küçük Kareler (SEKK) hesabı yapılır ve P değerlerine bakılarak oransal olarak yüksek olan x_i değerleri teker teker regresyon hesabından çıkarılarak y bağımsız değişkeni üzerinde en etkili x_i değerleri bulunur ve kullanılır. $y = w_1x_1 + w_2x_2$ tipinde bir çoklu lineer regresyona ait örnek grafik Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 1. Tekli Lineer Regresyon Örneği

Figure 1. Single Linear Regression Example



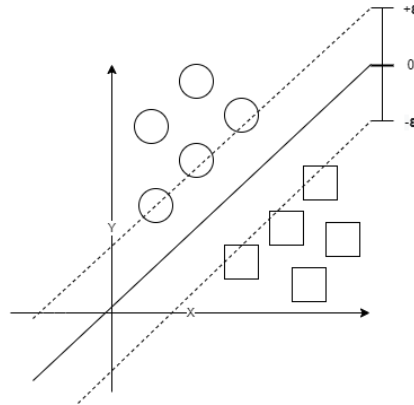
Şekil 2. Çoklu(İkili) Lineer Regresyon Örneği

Figure 2. Multiple (Double) Linear Regression Example

Çoklu regresyon, polinomial regresyon denilen bir yöntemi de içermektedir. Polinomial regresyonda (Ostertagova, 2012) bağımlı değişkenler bağımsız değişkenlerin üsleri şeklinde ifade edilmektedir. Polinomial regresyonun formülü $y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2^2 + w_3x_3^3 + \dots + w_ix_i^i$ şeklindedir.

Destek Vektör Makinası (Support Vector Machine)

Destek Vektör Makinaları (Cristianini ve Shawe-Taylor, 2000) sınıflandırma için kullanılan başarılı bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Algoritma özelliklere göre verileri sınıflar arasında maksimum boşluk oluşacak şekilde bir alan belirler. Bu alanlar oluşturulurken her iki sınıfın sınırlarını oluşturan örneklerden geçecek şekilde Şekil 3' teki gibi destek vektörleri çizilir. Bu destek vektörleri lineer bir fonksiyon kullanılarak çizilebildiği gibi, polinomial, gauss veya üssel bir fonksiyon kullanılarak çizilebilir. Kullanılan veri kümesi dağınık bir yapıda ise çekirdek fonksiyonları kullanılarak üçüncü bir boyut oluşturulup veriler sınıflandırılabilir. Kullanılacak çekirdek fonksiyonu radyal tabanlı, lineer, polinomial veya sigmoid olabilmektedir.



Şekil 3. Destek Vektör Makinası

Figure 3. Support Vector Machine

$y = wx + b$ doğrusu için $y_i - wx_i - b \leq \epsilon$ ve $w x_i + b - y_i \leq \epsilon$ eşitsizlikleri ile sınıfların sınırları belirlenmektedir.

Rassal Orman (Random Forest)

Karar ağaçları (Safavian ve Landgrebe, 1991) kullanılarak geliştirilmiş Rassal Orman (Oshiro ve diğ., 2012) sınıflandırma algoritması veri kümesini rasgele parçalara ayırıp her bir parça için ayrı ayrı karar ağaçları oluşturmaktadır. Her eğitim seti, orijinal eğitim setinden değiştirilir ve seçilen rastgele nitelikler üzerindeki en iyi bölünme kullanılarak düğüm bölünür. Oluşturulan karar ağaçlarından üretilen sonuç değerleri çoğunluk oylaması ile puanlandıktan sonra en yüksek puanı alan sonuç sınıfa ulaşılmaktadır. Karar ağaçlarının yaprak düğümlerinde sınıflar bulunmaktadır. Veri kümesini parçalara böldüğü için büyük veri kümelerinde hızlı ve hesaplama açısından verimli çalışabilmektedir.

Naive Bayes (Naive Bayes)

Naive Bayes algoritması Bayes teoremine (Smets, 1993) dayanmaktadır. Bayes teoremi koşullu olasılığa bağlı olarak hesaplanır. X ve Y koşulunun birlikte gerçekleştiği alan olan kesişim kümesi X kesişim Y dir. Yani hem daha geniş bir küme olan Y olasılığının gerçekleşip aynı zamanda X olasılığının gerçekleşme ihtimali:

$$P(y|X) = \frac{P(X|y)P(y)}{P(X)} \quad (1)$$

(1) olarak hesaplanır. Naive Bayes (Friedman ve diğ., 1997) sınıflandırma algoritması ise her bir bağımlı değişken için ayrı ayrı her durumun olasılığını hesaplar. Algoritma temel olarak her bir özelliğin belirli dağılımından ziyade modeldeki güçlü bağımsızlık varsayımlarını ifade eder. Modelde her bir bağımlı değişken için olasılık hesaplandığından Linear Regresyondan genellikle daha iyi sonuç üretir. İki özellik x_1 ve x_2 için $P(x_1, x_2) = P(x_1) P(x_2)$ özelliklerinin olasılık değerlerinin çarpımı ile bulunur. X bağımlı değişkenleri $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ olmak üzere y olasılığı:

$$P(y|x_1, \dots, x_n) = \frac{P(y) \prod_{i=1}^n P(x_i|y)}{P(x_1)P(x_2) \dots P(x_n)} \quad (2)$$

ile hesaplanır. Belirli bir girdi için payda sabit terim olduğundan kaldırılır ve

$$P(y|x_1, \dots, x_n) \propto P(y) \prod_{i=1}^n P(x_i|y) \quad (3)$$

olarak elde edilir. Bir sınıflandırıcı model oluşturmak için çıktı değerlerinin en büyük değeri alınır. Sonuç olarak y çıktısı

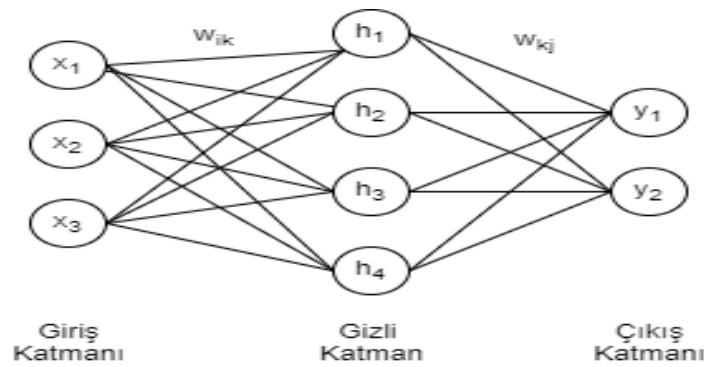
$$y = \operatorname{argmax}_y P(y) \prod_{i=1}^n P(x_i|y) \quad (4)$$

formülü ile hesaplanır. Denetimli sınıflandırma algoritması olan Naive Bayes'in Çok Terimli Naive Bayes (Kibriya ve diğ., 2004), Bernoulli Naive Bayes (Raschka, 2014) ve Gaussian Naive Bayes (Fadlil ve diğ., 2017) türleri vardır. Çok terimli Naive Bayes, her özelliği çok terimli bir dağılım olarak ifade eder. Bernoulli Naive Bayes'te özellikler ikili değişkenlerden oluşan vektör olarak ifade edilir. Gaussian Naive Bayes'te ise her özelliği bir Gauss (normal) dağılımına uygun olarak oluşturur.

Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

Yapay Sinir Ağları ilk olarak Rosenblatt (1958) tarafından beyindeki sinir hücresinin matematiksel olarak modellenmesi olan algılayıcı (perceptron) kavramının ortaya atılmasıyla gündeme gelmiştir (Jain ve diğ., 1996). Bu kavramda sinir hücresi çeşitli giriş bağlantılarına ve bağlantı ağırlıklarına sahipken bir adet çıktı bağlantısına sahiptir.

Algılayıcıda giriş X_i değerleri W_i ağırlıklarıyla çarpılarak bunların toplamı eğer eşik değerinin üzerindeyse 1 altındaysa 0 çıktısını verir. Bu şekilde danışmanlı öğrenme yönteminde ağırlıkların beklenen çıktı ile gerçek çıktı aynı ise değişiklik yapılmaz. Eğer ağırlıkların gerçek çıktı beklenen çıktıdan büyükse ilgili ağırlık değeri öğrenme katsayısının ilgili X değeriyle çarpımı miktarınca azaltılır ($W_i = W_{i \text{ eski}} - \lambda X_i$). Eğer ağırlıkların gerçek çıktı beklenen çıktıdan küçükse ilgili ağırlık değeri öğrenme katsayısının ilgili X değeriyle çarpımı miktarınca artırılır ($W_i = W_{i \text{ eski}} + \lambda X_i$). Bir değişken ağırlığının değişimi iterasyon olarak adlandırılırken tüm değişkenlerin ağırlıklarının değişimi epok olarak adlandırılır. ÇKA ölçümlenebilir fonksiyonlara yakınsamak üzere eğitilen ileri beslemeli yapay sinir ağlarından (Hornik ve diğ., 1989). Öğrenmesini geri yayılım algoritmasıyla gerçekleştirir. ÇKA'lar giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere en az üç katmandan oluşmaktadır. Girdi ve çıktı katmanlarındaki nöron sayısını problemdeki girdi ve çıktı değişkenleri belirlerken, gizli katman sayısı ve gizli katmanlardaki nöron sayısı daha ziyade sistemin performansını etkileyen unsurlardır. Her bir gizli katman değeri $h_k = \sum_i w_{ik} x_i$ ile hesaplanır. Şekil 4' te ÇKA mimarisi görülmektedir.



Şekil 4. Çok Katmanlı Algılayıcı

Figure 4. Multi Layer Perceptron

DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu makale kapsamında Çoklu Lineer Regresyon, Polinomiyal Regresyon, Naive Bayes ve ÇKA' lar kalp hastalığı teşhisinde kullanılmış ve Doğruluk (*Accuracy*), Kesinlik (*Precision*), Duyarlılık (*Recall*) ve F-Ölçütü (*F-Score*) değerleri kıyaslanmıştır (Sokolova ve Lapalme, 2009). Doğruluk değeri tahmin edilmeye çalışılan durumun doğru tahmin edilme oranının yüzde olarak gösterimidir. Bir test verisinin Kalp

Hastası olması ve bunun eğitim sonucunda hasta yani pozitif olarak tahmin edilmesi Doğru Pozitif (*DP - TP*), hasta değil yani negatif olarak tahmin edilmesi Yanlış Negatif (*YN - FN*) olarak nitelendirilir. Aynı mantıkla gerçekte kalp hastası olmayan örnekler için kalp hastası değil olarak tahmin edilen sonuçlar Doğru Negatif (*DN - TN*), kalp hastası olarak tahmin edilen sonuçlar Yanlış Pozitif (*YP - FP*) olarak tanımlanmaktadır. Çizelge 2’de bu değerlerin tutulduğu Karmaşıklık Matrisi (Sokolova ve Lapalme, 2009) bulunmaktadır.

Çizelge 2. Karmaşıklık Matrisi

Table 2. Confusion Matrix

	Tahmin Evet	Tahmin Hayır
Gerçek Evet	Doğru Pozitif	Yanlış Negatif
Gerçek Hayır	Yanlış Pozitif	Doğru Negatif

Üzerinde çalışılan veri kümesi örneğindeki veri dağılımına göre gerçek değerlerin dağılımları değişecektir. Örneğin kansızlık gibi daha sık görülen bir hastalıkta DP değerleri kanser hastalarını tutan bir veri kümesinde DP sayısından fazla olacaktır. Bu dağılımlar hesaplanan doğruluk değerine etki edecektir. Şöyle ki 9900 değer DP, 100 değer YP olduğu bir veri kümesinde test verileri çoğunluğun bulunduğu DP etiketi ile en basit algoritma ile etiketlense bile 0.99 gibi bir Doğruluk oranı bulunacaktır. Bu da sonuçların yanlış değerlendirilmesine sebep olacaktır. Bu sebeple literatürde Doğruluk değerinden ziyade Kesinlik ve Duyarlılık değerleri ve bu değerlerin harmonik ortalaması olan F-Ölçütü daha çok kullanılmaktadır.

Kesinlik; gerçekte pozitif olan ve pozitif olarak etiketlenen (DP) örnek sayısının model tarafından üretilen pozitif değerlerin sayısına oranıdır. Duyarlılık ise gerçekte pozitif olan ve doğru bir şekilde tahmin edilen (DP) örnek sayısının, tüm gerçek pozitif sayısına oranıdır. F₁-Ölçütü bu iki değer harmonik ortalamasıdır:

$$Kesinlik = \frac{Doğru\ Pozitif}{Doğru\ Pozitif + Yanlış\ Pozitif} \quad (5)$$

$$Duyarlılık = \frac{Doğru\ Pozitif}{Doğru\ Pozitif + Yanlış\ Negatif} \quad (6)$$

$$F_1\text{Ölçütü} = 2 * \beta * \frac{Kesinlik * Duyarlılık}{Kesinlik + Duyarlılık} \quad (7)$$

F-Ölçütü değeri hesaplanırken 2*β sabit değişkendir. Literatürde (Zhao ve diğ., 2013) genellikle β=1 için hesaplanan F₁-Ölçütü değeri kullanılmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında Çoklu Lineer Regresyon, Polinomiyal Regresyon, Naive Bayes, DVM, Rassal Orman ve ÇKA’lar kalp hastalığı teşhisinde kullanılmış ve Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F₁ Ölçütü değerleri kıyaslanmıştır. Veri kümeleri bekletme yöntemi (20 çalıştırma) için rasgele bir şekilde %67’ye %33 oranla eğitim ve test olarak ikiye ayrılmış, modeller eğitim veri kümesiyle eğitildikten sonra test veri kümesiyle test edilmiştir. K katlama yöntemi için ise veri kümesi 10 parçaya bölünmüş ver her bir parça için ilgili parça test verisi diğer parçalar eğitim verisi olacak şekilde 10 adet farklı eğitim ve test verileri için modeller çalıştırılmıştır.

DeneySEL çalışmalar AMD Ryzen 7 3700U 2.3 GHz işlemcili 16 GB RAM kapasiteli ve 8 çekirdekli bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Programlama dili olarak Python, yapay zeka kütüphanesi olarak scikit-learn kullanılmıştır. Deneyler Bekletme ve K katlama çapraz doğrulama yöntemleri ile çalıştırılarak en iyi sonuçlar ve ortalama sonuçlar çizelgelerde gösterilmiştir.

*Çoklu Lineer Regresyonun**En İyi Sonucunun Karmaşıklık Matrisi**Confusion Matrix of Best Result of Multi Layer Linear Regression*

	Tahmin Evet	Tahmin Hayır
Gerçek Evet	50	3
Gerçek Hayır	7	39

*İkinci Dereceden Polinomiyal Regresyonun**En İyi Sonucunun Karmaşıklık Matrisi**Confusion Matrix of Best Result of Second Degree Polynomial Regression*

	Tahmin Evet	Tahmin Hayır
Gerçek Evet	45	10
Gerçek Hayır	11	33

*Destek Vektör Makinesinin**En İyi Sonucunun Karmaşıklık Matrisi**Confusion Matrix of Best Result of Support Vector Machine*

	Tahmin Evet	Tahmin Hayır
Gerçek Evet	52	5
Gerçek Hayır	8	34

*Rassal Ormanın En İyi**Sonucunun Karmaşıklık Matrisi**Confusion Matrix of Best Result of Random Forest*

	Tahmin Evet	Tahmin Hayır
Gerçek Evet	46	3
Gerçek Hayır	10	40

*Gaussian Naive Bayes'in**En İyi Sonucunun Karmaşıklık Matrisi**Confusion Matrix of Best Result of Gaussian Naive Bayes*

	Tahmin Evet	Tahmin Hayır
Gerçek Evet	41	9
Gerçek Hayır	5	44

*Çok Katmanlı Algılayıcının**En İyi Sonucunun Karmaşıklık Matrisi**Confusion Matrix of Best Result of Multi Layer Perceptron*

	Tahmin Evet	Tahmin Hayır
Gerçek Evet	48	6
Gerçek Hayır	9	36

Şekil 5. Cleveland Veri Kümesi İçin En İyi Sonuçların Karşılaştırmalı Karmaşıklık Matrisleri (Bekletme Yöntemiyle)*Figure 5. Comparable Confusion Matrixes of Best Results for Cleveland Dataset (With Holdout)*

Yapılan deneyler sonucunda Cleveland veri kümesi için en yüksek başarımlı bekletme yöntemiyle Lineer Regresyonda elde edilmiştir. Doğru pozitif oranı %51, doğru negatif oranı %39, yanlış pozitif oranı %7, yanlış negatif oranı %3'tür.

Çoklu Lineer Regresyonda adım adım regresyon uygulanmış kalp hastalığı teşhisinde yaş ve kolesterol bilgisinin etkisiz olduğu saptanmış ve bu değişkenler Çoklu Lineer Regresyonda girdi kümesinden çıkarılmıştır. Çoklu Lineer Regresyonda 20 deney için çalıştırma süresi yaklaşık 33 salisedir.

Cleveland veri kümesi için bekletme yöntemi kullanılarak Polinomiyal Regresyon 2.,3. ve 4. derece için denenmiştir. 2. Dereceden Polinomiyal Regresyon için 0.79 Doğruluk, 0.82 Kesinlik, 0.78 Duyarlılık ve 0.77 F1 Ölçütü elde edilmiştir. 3. Dereceden Polinomiyal Regresyon için 0.72 Doğruluk, 0.70 Kesinlik, 0.82 Duyarlılık ve 0.68 F1 Ölçütü elde edilmiştir. 4. Dereceden Polinomiyal Regresyon için 0.71 Doğruluk, 0.74 Kesinlik, 0.71 Duyarlılık ve 0.70 F1 Ölçütü elde edilmiştir. Polinomiyal Regresyonda 20

deney için yaklaşık çalıştırma süresi 46 salisedir. Ayrıca Çoklu Lineer Regresyon ve Polinomiyal Regresyon için 0.5 üzerindeki çıktı değerleri 1, 0.5 altındaki çıktı değerleri 0 kabul edilmiştir.

Cleveland ve Z-Alizadehsani veri kümeleri için bekletme ve k katlama yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen Lineer Regresyon, Polynomial Regresyon, DVM, Rassal Orman, Naive Bayes ve ÇKA modelleri ile elde edilen en iyi sonuçlar Çizelge 3'te gösterilmiştir. Bu çizelgede ayrıca literatürde yapılmış diğer çalışmaların sonuçları da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu yöntemlerin ortalama sonuçları ise Çizelge 4'te görülmektedir. Çizelge 3'te testler sonucunda elde edilen en iyi sonuçlar sunulurken; Çizelge 4'te ortalama sonuçlar verilmiştir. Burada deneysel çalışmalar en iyi ve ortalama sonuçlar açısından analiz edilmiştir. Böylece çalışmada önerilen yaklaşımların farklı kriterlere göre değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Rassal Orman yöntemi 20 ağaçlı ve ağaç derinliği 5 olarak tanımlanmıştır. Naive Bayes sınıflandırıcı için Multinomial Naive Bayes, Bernoulli Naive Bayes ve Gaussian Naive Bayes denenmiştir. Bu üç yöntem için yapılan karşılaştırmada en başarılı sonucu Gaussian Naive Bayes'in verdiği görülmüştür ki Çizelge 3'te gösterilen Naive Bayes sınıflandırıcı Gaussian sınıflandırıcının sonuçlarıdır. 20 deney için çalıştırma süresi yaklaşık 35 salisedir.

ÇKA kullanılarak gerçekleştirilen deneyler şu şekildedir: Öncelikle 128 nöronlu tek gizli katmanlı, maksimum iterasyon sayısı 5000, aktivasyon fonksiyonu olarak relu, öğrenme katsayısı 0.1, geri yayımda ağırlıkların optimizasyonu için stokastik gradyan inişi kullanılmıştır. Deneyler sonucunda en başarılı sonuç olarak 0.93, ortalama sonuç olarak 0.77 doğruluk değeri elde edilmiştir. Çalıştırma süresi 20 deney için yaklaşık 14 saniye sürmüştür.

Çizelge 3. Yapay Zeka Tekniklerinin Kalp Hastalığı Teşhisindeki Sonuçlarının Literatürle Karşılaştırılması

Table 3. Comparison of Results of Artificial Intelligence Techniques with Literature on Cardiac Disease Diagnosis

Referans	Model Adı	ZALizadeh (Bekletme)			ZALizadeh (K Katlama)			Cleveland (Bekletme)			Cleveland (K Katlama)		
		Doğru luk	Kesin lik	Duyarl ılık	Doğru luk	Kesin lik	Duyarl ılık	Doğru luk	Kesin lik	Duyarl ılık	Doğru luk	Kesin lik	Duyarl ılık
Bu Çalışma da Önerilen ve Kullanılan Yöntemler	Lineer Regresyon	0.91	0.90	0.93	0.93	1.0	1.0	0.90	0.98	0.85	0.93	1.0	1.0
	Polinomiyal Regresyon	0.82	0.71	0.76	0.87	0.75	0.90	0.79	0.82	0.78	0.87	0.92	0.94
	DVM	0.91	0.95	0.76	0.90	1.0	0.73	0.87	0.95	0.88	0.97	1.0	0.92
	Rassal Orman	0.92	0.95	0.74	0.93	1.0	0.80	0.87	0.93	0.85	0.87	1.0	0.92
	Naive Bayes	0.81	0.64	0.97	0.87	0.85	1.0	0.87	0.90	0.87	0.90	0.93	0.89
	ÇKA	0.86	0.92	0.85	0.90	0.87	1.0	0.85	0.88	0.88	0.90	0.94	0.91
Alizadeh sani ve diğ., 2013	ÇKA	-	-	-	0.88	-	0.91	-	-	-	-	-	-
	Naive Bayes	-	-	-	0.76	-	0.68	-	-	-	-	-	-
	SMO	-	-	-	0.94	-	0.96	-	-	-	-	-	-
Arabasadi ve diğ., 2017	Genetik + ÇKA	-	-	-	0.94	-	0.97	-	-	-	0.89	-	0.88
Yar ve diğ., 2020	Karar Ağacı	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.87	0.85	0.90
	Lojistik Regresyon	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.84	0.81	0.90
	ÇKA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.85	0.83	0.84
	DVM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.84	0.80	0.93
	Rassal Orman	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.89	0.91	0.89
	Naive Bayes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.82	0.81	0.86
Referans	Model Adı	ZALizadeh (Bekletme)			ZALizadeh (K Katlama)			Cleveland (Bekletme)			Cleveland (K Katlama)		
		Doğru luk	Kesin lik	Duyarl ılık	Doğru luk			Doğru luk	Kesin lik	Duyarl ılık	Doğru luk		
Gupta ve diğ., 2021	DHMZ	0.95	-	0.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ayon ve diğ., 2020	Ken yakın komşu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.94	0.96	0.93
	DVM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.97	0.97	0.95
	Naive Bayes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.91	0.93	0.91
	ÇKA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.97	0.97	0.98
	Rassal Orman	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.89	0.89	0.90
Mienye ve diğ., 2020	Lojistik Regresyon	-	-	-	-	-	-	0.78	0.79	0.78	-	-	-
	DVM	-	-	-	-	-	-	0.79	0.80	0.79	-	-	-
	Naive Bayes	-	-	-	-	-	-	0.81	0.79	0.84	-	-	-
	Rassal Orman	-	-	-	-	-	-	0.83	0.81	0.87	-	-	-
	SRA	-	-	-	-	-	-	0.93	0.96	0.91	-	-	-

Çizelge 3. Yapay Zeka Tekniklerinin Kalp Hastalığı Teşhisindeki Ortalama Sonuçlarının Karşılaştırılması

Table 4. Comparison of Average Results of Artificial Intelligence Techniques on Cardiac Disease Diagnosis

Ölçütler/ Yöntemler	Çoklu Lineer Regresyon	İkinci Dereceden Polinomial Regresyon	Destek Vektör Makinesi	Rassal Orman	Gaussian Naive Bayes Sınıflandırıcı	Çok Katmanlı Algılayıcı
Doğruluk (Cleveland Bekletme)	0.84	0.71	0.81	0.81	0.81	0.79
Doğruluk (ZAlizadeh Bekletme)	0.85	0.76	0.85	0.84	0.74	0.82
Doğruluk (Cleveland K Katlama)	0.83	0.76	0.81	0.83	0.83	0.76
Doğruluk (ZAlizadeh K Katlama)	0.87	0.73	0.85	0.86	0.74	0.84
Kesinlik (Cleveland Bekletme)	0.86	0.69	0.80	0.83	0.81	0.78
Kesinlik (ZAlizadeh Bekletme)	0.72	0.60	0.83	0.80	0.54	0.70
Kesinlik (Cleveland K Katlama)	0.84	0.76	0.82	0.83	0.84	0.75
Kesinlik (ZAlizadeh K Katlama)	0.77	0.54	0.85	0.78	0.53	0.71
Duyarlılık (Cleveland Bekletme)	0.78	0.66	0.79	0.75	0.79	0.76
Duyarlılık (ZAlizadeh Bekletme)	0.78	0.60	0.60	0.62	0.85	0.70
Duyarlılık (Cleveland K Katlama)	0.55	0.75	0.76	0.80	0.78	0.75
Duyarlılık (ZAlizadeh K Katlama)	0.82	0.56	0.62	0.69	0.88	0.77
F ₁ Ölçütü (Cleveland Bekletme)	0.82	0.67	0.79	0.79	0.80	0.76
F ₁ Ölçütü (ZAlizadeh Bekletme)	0.74	0.60	0.69	0.70	0.65	0.70
F ₁ Ölçütü (Cleveland K Katlama)	0.81	0.74	0.78	0.80	0.80	0.75
F ₁ Ölçütü (ZAlizadeh K Katlama)	0.78	0.53	0.71	0.72	0.65	0.73

SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS and SUGGESTIONS)

Kalp hastalıkları günümüzde ölüm sebeplerinin başlıcalarındandır. Bu hastalıktan kaynaklı ölümlerin önüne geçebilmek için erken dönemde teşhis ve tedavi oldukça önemlidir. Bu çalışmada kalp hastalığı teşhisinde kullanılacak yapay zeka tabanlı bir karar destek mekanizması önerilmiştir. Kullanılan yapay zeka yöntemleri çoklu lineer regresyon, polinomial regresyon, destek vektör makinesi, rassal orman, naive bayes sınıflandırıcılardan ve çok katmanlı algılayıcıdan oluşmaktadır. Yapılan çalışmalar bu alanda sıklıkla kullanılan Cleveland ve Z-Alizadehsani veri kümeleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir yöntem için bekletme çapraz doğrulama yöntemleriyle 20 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte K katlama için 10 farklı eğitim ve test kümesi oluşturulmuş ve her biri için modeller çalıştırılmıştır. Bekletme yöntemi gerçeğe en yakın ortalama sonucu verdiği için

aslında gerçek model doğruluğunun 10 K katlama yöntemi ile tam olarak bulunamadığı görülmüştür. Z-Alizadehsani veri kümesi için en yüksek doğruluk 0.93 olarak K katlama ile Rassal Orman modeli kullanılarak elde edilmiştir. Cleveland veri kümesi için ise en yüksek doğruluk 0.97 olarak K katlama ile DVM kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 3 ve Çizelge 4 incelendiğinde iki veri kümesi için de yapılan deneylerin sonuçlarının birbirleriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Örnek sayısı aynı olan iki farklı veri kümesi için kullanılan yöntemlerin benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, kalp hastalığı teşhisinde hastanelerde ve klinik merkezlerde uygulanan ölçümlere entegre edilecek bir yapay zeka temelli karar destek sistemi erken ve doğru teşhiste önemli rol oynayabilecektir. Bu entegrasyon sağlık çalışanlarının hastanın sağlık verilerini girebileceği bir masaüstü veya web tabanlı uygulama ile yapılabileceği gibi tüm hastanelerin ve klinik merkezlerin bağlantı aracılığıyla ulaşabileceği yapay zeka tabanlı bir web servis olarak da kullanıma sunulabilir. Web servis olarak kullanıma sunulması durumunda yapay zekanın yeni verilerle sürekli olarak öğrenmeye devam etmesi sağlanabilir. Böylece sistem kendini zaman içerisinde dinamik olarak geliştirecektir. Böyle bir sistemde dinamik öğrenme yaklaşımları ve hibrit sistemler uygulanabilecektir. Ayrıca ele alınan teknikler farklı ölçüm verileriyle şeker hastalığı, böbrek hastalıkları vb. hastalıkların erken ve doğru teşhisi için kullanılabilir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- Alizadehsani, R., Habibi, J., Hosseini, M. J., Mashayekhi, H., Boghrati, R., Ghandeharioun, A., Bahadorian, B., Sani, Z. A., 2013, "A data mining approach for diagnosis of coronary artery disease", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Cilt 111, Sayı 1, ss. 52-61.
- Alizadehsani, Z., Alizadehsani, R., Roshanzamir, M., , 2017, Z-Alizadeh Sani Data Set, <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Z-Alizadeh+Sani>, ziyaret tarihi: 24 Ekim 2021
- Alkhodari, M., Fraiwan, L., 2021, "Convolutional and recurrent neural networks for the detection of valvular heard diseases in phonocardiogram recordings", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Cilt 200.
- Akalın, B., Veranyurt, Ü., Veranyurt, O., 2020, "Classification of individuals at risk of heart disease using machine learning", *Cumhuriyet Medical Journal*, Cilt 42, Sayı 3, ss. 283-289.
- Arabasadi, Z., Alizadehsani, R., Roshanzamir, M., Moosaei, H., Yarifard, A. A., 2017, "Computer aided decision making for heart disease detection using hybrid neural network-Genetic algorithm", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Cilt 141, ss. 19-26.
- Ayon, S. I., Islam, M. M., Hossain, M. R., 2020, "Coronary artery heart disease prediction: a comparative study of computational intelligence techniques", *IETE Journal of Research*, ss. 1-20.
- Chen, A. H., Huang, S. Y., Hong, P. S., Cheng, C. H., Lin, E. J., 2011, "HDPS: Heart disease prediction system", *2011 computing in cardiology, IEEE*, ss. 557-560.
- Cristianini, N., Shawe-Taylor, J., 2000, *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*, Cambridge university press.
- Dutta, A., Batabyal, T., Basu, M., Acton, S. T., 2020, "An efficient convolutional neural network for coronary heart disease prediction", *Expert Systems with Applications*, Cilt 159.
- Ekrem, Ö., Musleh Salman, O. K., Aksoy, B., İnan, S. A., 2020, "Yapay Zeka Yöntemleri Kullanılarak Kalp Hastalığının Tespiti", *Journal of Engineering Sciences and Design*, Cilt 8, Sayı 5, ss. 241-254.
- Fadlil, A., Riadi, I., Aji, S., 2017, "Ddos attacks classification using numeric attribute-based gaussian naive bayes", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, Cilt 8, sayı 8, ss. 42-50.
- Friedman, N., Geiger, D., Goldszmidt, M., 1997, "Bayesian network classifiers", *Machine learning*, Cilt 29, Sayı 2, ss. 131-163.
- Ghahramani, Z., 2003, "Unsupervised learning", *Summer School on Machine Learning*, Berlin, Springer, ss. 72-112.

- Gupta, A., Arora, H. S., Kumar, R., Raman, B., 2021, "DMHZ: A Decision Support System Based on Machine Computational Design for Heart Disease Diagnosis Using Z-Alizadeh Sani Dataset", *IEEE International Conference on Information Networking (ICOIN)*, ss. 818-823.
- Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H., 1989, "Multilayer feedforward networks are universal approximators", *Neural Networks*, Cilt 2, ss. 359-366.
- Hsieh, N. C., Hung, L. P., Shih, C. C., Keh, H. C., Chan, C. H., 2012, "Intelligent Postoperative Morbidity Prediction of Heart Disease Using Artificial Intelligence Techniques", *Journal of Medical Systems*, Cilt 36, Sayı 3, ss. 1809-1820.
- Jain, A. K., Mao J., Mohiuddin, K. M., 1996, "Artificial neural networks: A tutorial", *Computer*, Cilt 29, Sayı 3, ss. 31-44.
- Janosi, A., Steinbrunn, W., Pfisterer, M., Detrano, R., 1988, Heart Disease Data Set, <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/heart+disease>, ziyaret tarihi: 7 Ağustos 2021.
- Kibriya, A. M., Frank, E., Pfahringer, B., Holmes, G., 2004, "Multinomial naive bayes for text categorization revisited", *Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Berlin.
- Kolukisa, B., Hacilar, H., Kuş, M., Bakır-Güngör, B., Aral, A., Güngör, V. Ç., 2019, "Diagnosis of coronary heart disease via classification algorithms and a new feature selection methodology", *International Journal of Data Mining Science*, Cilt 1, Sayı 1, ss. 8-15.
- Kotsiantis, S. B., Zaharakis, I., Pintelas, P., 2007, "Supervised machine learning: A review of classification techniques", *Emerging artificial intelligence applications in computer engineering*, IOS Press, ss. 3-24.
- Masih, N., Naz, H., Ahuja, S., 2021, "Multilayer perceptron based deep neural network for early detection of coronary heart disease", *Health And Technology*, Cilt 11, ss. 127-138.
- Mienye, I. D., Sun, Y., Wang, Z., 2020, "An improved ensemble learning approach for the prediction of heart disease risk", *Informatics in Medicine Unlocked*, Cilt 20.
- Mohan, S., Thirumalai, C., Srivastava, G., 2019, "Effective heart disease prediction using hybrid machine learning techniques", *IEEE Access*, Cilt 7, ss. 81542-81554.
- Oshiro, T. M., Perez, P. S., Baranauskas, J. A., 2012, "How many trees in a random forest?", *International workshop on machine learning and data mining in pattern recognition*, Berlin.
- Ostertagova, E., 2012, "Modelling using polynomial regression", *Procedia Engineering*, ss. 500-506.
- Qi, Z., Zuoru, Z., 2021, "A hybrid cost-sensitive ensemble for heart disease prediction", *BMC Medical Informatics and Decision Making*, Cilt 21, Sayı 1, ss. 1-18.
- Raschka, S., 2014, "Naive bayes and text classification i-introduction and theory", *arXiv preprint*.
- Rosenblatt, F., 1958, "The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain", *Psychoanalytic*, ss. 386-408.
- Safavian, S. R., Landgrebe, D., 1991, "A survey of decision tree classifier methodology", *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, Cilt 21, Sayı 3, ss. 660-674.
- Seber, G. A. F., Lee, A. J., 2012, *Linear Regression Analysis*, John Wiley & Sons.
- Shorewala, V., 2021, "Early detection of coronary heart disease using ensemble techniques", *Informatics in Medicine Unlocked*, pp. Pre-proof.
- Smets, P., 1993, "Belief functions: the disjunctive rule of combination and the generalized Bayesian theorem", *International Journal of approximate reasoning*, Cilt 9, Sayı 1, ss. 1-35.
- Sokolova, M., Lapalme, G., 2009, "A systematic analysis of performance measures for classification tasks", *Information Processing and Management*, Cilt 45, ss. 427-437.
- Tabachnick, B. G., Fidell, L. S., Ullman, J. B., 2007, *Using multivariate statistics*, Boston: MA: Pearson.
- TÜİK, Ölüm ve Ölüm Nedeni İstatistikleri, 2019, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Olum-ve-Olum-Nedeni-Istatistikleri-2019-33710>, ziyaret tarihi: 07 Ağustos 2021.
- Yar, M., Muhammad, T. , Maqsood H., Kil To, C., 2020, "Early and accurate detection and diagnosis of heart disease using intelligent computational model", *Scientific Reports*, Cilt 10, Sayı 1.

Zhao, M. J., Edakunni, N., Pocock, A., & Brown, G, 2013, "Beyond Fano's inequality: Bounds on the optimal F-score, BER, and cost-sensitive risk and their implications", *The Journal of Machine Learning Research*, Cilt 14, Sayı 1, ss. 1033-1090.



ULTRA YÜKSEK BASINÇTA ÇALIŞAN KALIN CİDARLI SİLİNDİRLERİN TASARIMINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN SAYISAL VE ANALİTİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

¹Mevlüt AYDIN , ²Mevlüt TÜRKÖZ , ³Yusuf Furkan YAPAN 

^{1,2} Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

¹maydin@ktun.edu.tr, ²mturkoz@ktun.edu.tr, ³yapan@yildiz.edu.tr

(Geliş /Received: 05.02.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 20.04.2022)

ÖZ: Bu çalışmada ultra yüksek basınç altında çalışan kalın cidarlı silindirlerin tasarımına etki eden geometrik parametreler araştırılmıştır. Bu kapsamda, 350 MPa basınç altında, tasarım parametrelerinin silindir iç yüzeyinde meydana gelen maksimum gerilmelere ve katmanlar arasındaki maksimum ara yüzey basıncına etkileri analitik ve nümerik olarak belirlenmiştir. Tasarım parametreleri sırasıyla iç silindir çapı, iç ve dış cidar kalınlıkları ile tek taraflı sıkı geçme toleransıdır. Parametrelerin etkileşimi ve sonuçların anlamlılığını araştırmak için tam faktöriyel deney tasarımı oluşturulmuştur. Sonuçlara regresyon ve varyans analizleri uygulanmıştır. Sonuç olarak silindirde oluşan maksimum gerilmeye etki eden en önemli parametrenin % 32.7 ile sıkılık toleransı olduğu bulunmuştur. İç cidar kalınlığının ise %6.2 oranla gerilme düzeyi üzerinde en az etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca kalın cidarlı silindirlerin tasarımında Sonlu Elemanlar Analizlerinin de (SEA) kullanılabilirliğini göstermek için basınç altındaki silindirlerde meydana gelen Von-Mises eşdeğer gerilmeleri ve ara yüzey basıncı SEA ile de elde edilmiştir. SEA sonuçlarının analitik sonuçlarla karşılaştırılması ile SEA'ların güvenilirlikleri belirlenmiştir. SEA'lar iki farklı (Ansys ve Solidworks) sonlu elemanlar çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiş ve aralarındaki hesap farkı tespit edilmiştir. Gerilme değerinde Solidworks ve analitik çözüm arasındaki fark % 2.05 iken Ansys ve analitik çözüm arasındaki fark % 0.5 olarak hesaplanmıştır. Buradan SEA çözücülerinin her ikisinin de oldukça yüksek doğrulukta tahminlerde bulunabildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ara yüzey basıncı, Katmanlı silindir, Sıkı geçme, Sıkılık toleransı, Ultra yüksek basınç

Numerical and Analytical Investigation of the Parameters Affecting the Design of Ultra High Pressure Thick Wall Cylinders

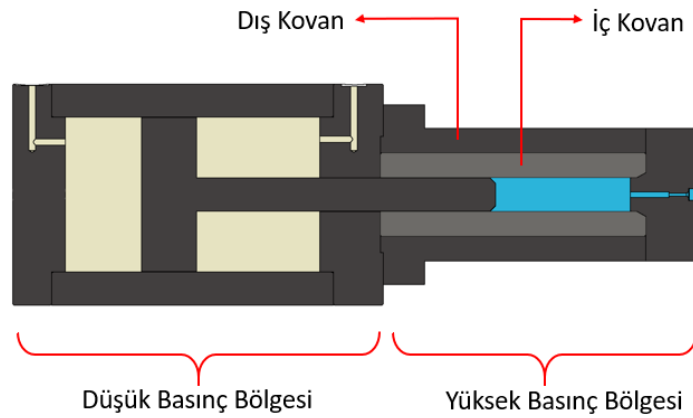
ABSTRACT: In this study, geometric parameters affecting the design of thick-walled cylinders operating under ultra-high pressure were investigated. In this context, the effects of design parameters on the maximum stresses occurring on the inner surface of the cylinder and the maximum interface pressure between the layers under 350 MPa pressure were determined analytically and numerically. The design parameters are the inner cylinder diameter, the inner and outer wall thicknesses, and the one-sided shrinking allowance respectively. A full factorial experimental design was created to investigate the interaction of the parameters and the significance of the results. Regression and variance analysis were applied to the results. As a result, it was found that the most important parameter affecting the maximum stress in the cylinder was the shrinking allowance with 32.7%. It was observed that the inner wall thickness had the least effect on the stress level with a rate of 6.2%. In addition, Von-Mises equivalent stresses and interface pressure between the cylinders under internal pressure were obtained by Finite Element Analysis (FEA) to show the usability of (FEA) in the design of thick-walled cylinders. The reliability of the FEAs was determined by comparing the results of the FEA with the analytical results. FEAs were

performed using two different finite element solvers (Ansys and Solidworks) and the calculation difference between them was determined. In the stress value, the difference between Solidworks and analytical solution was 2.05%, while the difference between Ansys and analytical solution was 0.5%. From this, it has been determined that both FEA solvers can make predictions with very high accuracy.

Keywords: Layered cylinder, Shrinkage pressure, Shrink fit, Shrinkage allowance, Ultra-high pressure

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ultra yüksek basınçlar sanayide hidroşekillendirme işleminde; su jeti ile kesmede; sızdırmazlık ve patlatma dayanım ve yorulma gibi testlerde kullanılmaktadır. Bunun yanında yapıların basınç taşıma kapasitesini artıran ofofretaj, endüstriyel temizlik ve yüksek basınçta pastörizasyon işlemlerinde de ultra yüksek basınçlardan yararlanılmaktadır. Ultra yüksek basınçlar, basınç yükselticiler kullanılarak elde edilmektedir. Basınç yükselticilerle, iki farklı alana sahip bir mil yardımıyla 200-450 MPa gibi ultra yüksek basınçlar elde edilmektedir. Basınç yükselticilerde Şekil 1’de görüldüğü gibi düşük basınç bölgesi standart bir hidrolik silindir olup 25 MPa gibi standart hidrolik basınçlarla çalışmaktadır. Milin önündeki yüksek basınç bölgesine doldurulan sıvının basıncı, alan oranı kadar artırılmaktadır. Bu basınçlarda ani gelişen hasarlar, ölümcül tehlikede ve yüksek maliyette olabilmektedir. Bu nedenle basınç yükselticilerde tekrarlı yüksek gerilmelere maruz kalan Kalın Cidarlı Silindirler (KCS), genellikle yüksek akma ve yorulma dayanıma sahip malzemelerden çok katmanlı olarak imal edilmektedir. Bunun yanında hidrolik silindirlerin tasarımında güvenle kullanılacak boyutların belirlenmesi de önem arz etmektedir.



Şekil 1. Tek etkili basınç yükseltici (Aydın ve diğ., 2020)

Figure 1. Single acting pressure intensifier

KCS’ler hidrolik, kimya, makine imalat, petrol, askeri ve nükleer santral endüstrilerinde kullanılmaktadır. Yüksek basınçlı reaktör kapları, proses tesisleri, hava kompresör üniteleri, hidrolik tanklar, ekstrüzyon kovanları, namlular, gaz depolama tankları gibi birçok örnek uygulaması mevcuttur.

Çok katmanlı olarak üretilen KCS’ler birbirlerine sıkı geçme işlemiyle montaj edilmektedir. Sıkı geçmenin oluşturduğu gerilme durumu neticesinde, tek bir silindirde kullanılan toplam malzemeden daha az malzeme kullanarak, daha yüksek basınçlara direnen bir yapı oluşmaktadır (Öztürk, 2011; Aydın ve diğ.,2020).

Literatürde, çok katmanlı silindirlerin sıkı geçme işleme ile montaj edilmesinden kaynaklanan ara yüzey basınç değerleri, silindirlerin sıkı geçirilmesiyle ömürlerindeki değişimleri içeren, analitik ve nümerik hesabının yapıldığı birçok çalışma mevcuttur (Öztürk ve Tse-Chien , 2011; Öztürk, 2010; Zhang ve diğ., 2000; Parades ve diğ., 2010; Aydın ve diğ., 2020). Öztürk (2010), çelik-çelik ve çelik alüminyum malzemeleriyle kalın cidarlı katmanlı silindirlerin farklı sıkı geçme toleranslarında meydana gelen ara yüzey basıncını analitik ve nümerik olarak değerlendirmiştir. Sıkı geçme işleminde oluşan gerilmeler,

cidar boyunca SE ile hesaplanmış ve analitik değerlerle karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, katmanlı silindirlerin sıkı geçme prosesini SEA'lerin büyük oranda başarılı yaptığı belirtilmiştir. Ek olarak karmaşık geometriye sıkı geçirilmiş parçaların gerilmelerinin tespitinde analitik yöntemler yerine SEA'lerin daha güvenilir olduğu gösterilmiştir. Parades ve diğ. (2010), sıkı geçme ile montajı yapılan bir sistemi hem sayısal hem de deneysel olarak araştırmıştır. Sayısal sonuçların gayet başarılı olduğu belirtilmiştir. Aydın ve diğ. (2020), sıkı geçirilmiş katmanlı silindirlerde ara yüzey basıncının silindirlerin yorulma ömrüne etkisini incelemiştir. Yapılan SEA'lar sonucunda, sıkı geçme arttıkça yorulma ömründe artış meydana gelmiştir. Aynı şartlar altında tek katmanlı silindirin ömrü 5586 çevrim olurken optimum katmanlı silindirde ömür %99 artışla 9530 çevrime yükselmiştir. Aydın ve Türköz (2021) tarafından yapılan çalışmada, farklı malzeme çiftleriyle oluşturulan katmanlı silindir tasarımlarında tek katmanlı bir yapıya göre ağırlığın %36 oranına kadar azaltılabileceği nümerik analizlerle bulunmuştur. Benuzzi ve Donzella (2004), analitik ve sayısal çalışmalar kullanarak karmaşık yapıya sahip bir demiryolu aksı ve tekerleğinin sıkı geçirilmesinde uygulanan kuvvetleri araştırmışlardır. Bu tarz karmaşık parçalarda SEA sonuçlarının analitik sonuçlara göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Özel ve diğ. (2005), katmanlı silindirler arasındaki sıkı geçme değerini belirlemek için farklı göbek-mil bağlantıları için gerilme ve deformasyon değerlerini SEA ile incelemiştir. İç silindir dış yüzeyindeki ve delik yüzeyindeki gerilmeler analitik olarak Lamé denklemleriyle hesaplanıp doğrulanması yapılmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalara benzer olarak; karmaşık geometriye sahip sıkı geçirilmiş numunelerin hesaplamalarında Sonlu Elemanlar sonuçlarının analitik sonuçlara göre daha kullanışlı olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada özellikle sıkı geçirilmenin başladığı anda başlangıç noktalarında oluşan plastik bölge incelenmiştir. İncelemeler sonucunda silindirlerin uç bölgelerinde merkez bölgelerine nazaran daha güvensiz ve daha yüksek gerilmeler oluştuğu belirtilmiştir. Geren ve diğ. (2000) su jetlerinde kullanılan ve basınç seviyesine göre tek veya çok katmanlı olarak üretilen basınç yükselticilerin tasarım sınırlarını analitik olarak hesaplayıp geometrik boyutlar için en uygun aralıkları belirlemiştir. Yapılan çalışmada 4 farklı iç silindir çapında ve 4 farklı iç basınçta güvenlik katsayılarının nasıl değiştiğini göstermişlerdir. Sonuç olarak tek katmanlı silindirlerde 2000 bar basınç ve 70 mm cidar kalınlığının sınır değer olarak alınması gerektiğini, çift katmanlı yapılarda, dış silindir cidar kalınlığının belirli bir değerden sonra güvenlik katsayısına etkisinin oldukça az olduğu bulunmuştur. Zhang ve diğ. (2000) dişli çark göbek bağlantıları için kullanılan sıkı geçme işlemlerinde oluşan gerilme değerlerini, Lamé denklemleri ile analitik olarak belirleyip, SEA ile karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmada karmaşık geometri kullanılmıştır ve Lamé denklemlerinin karmaşık geometrilerde etkili bir yöntem olmadığını belirterek üç boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçlarının sıkı geçme işlemlerinde daha gerçekçi sonuçlar verdiğini vurgulamıştır.

Sıkı geçme sırasında oluşan gerilmelerin tahmini için var olan denklemler üzerinde yenileme çalışmaları ve çoğu çalışmada kullanılan Lamé denklemlerine ek olarak yeni analitik metodların önerildiği çalışmalar bulunmaktadır (Wang ve diğ., 2018; Campos ve diğ., 2019). Wang ve diğ. (2018) tarafından presle sıkı geçirilmiş malzemelerde meydana gelen düzensiz gerilme dağılımlarını tahmin eden yeni bir teorik model önerilmiştir. Teorik model, deneylerle ve analitik analizlerle doğrulanmıştır. Çalışmada sıkı geçme işlemindeki temas uzunluğu ve sıklık oranı da etki parametresi olarak araştırılmıştır. Farklı malzeme çiftlerinin (Ni36CrTiAl - 50Ni-50Fe, AISI 1045 - AISI 1045) tam temas koşullarındaki gerilme dağılımları analiz edilmiştir. Sonuçta teorik modelin gerilme dağılımını tahmin etmede yüksek doğruluğa sahip olduğu gösterilmiştir. Aynı modelin farklı malzeme çiftlerinde de kullanılabileceği belirtilmiştir. Campos ve Hall (2019), Lamé denklemlerini basitleştirmiştir. Basitleştirilmiş formüller ve klasik Lamé denklemleri SEA sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Basitleştirilmiş denklemlerin her iki sonuçla da uyumlu olduğu bulunmuştur. Ayrıca ince cidarlı sıkı geçme işlemlerinde çevresel gerilmenin kalınlığa bağlı olmadığı bulunmuştur. Tezel (2019) yaptığı çalışmada mikro modüllü dişlilerin göbek-mil bağlantılarında farklı sıkı geçme toleranslarında oluşan gerilme dağılımlarını sayısal ve analitik olarak hesaplayıp karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmada kullanılan mil-göbek toleransları sırasıyla H7/p6, H7/s6 ve H7/u6'dır. Çalışmada AISI 4340 çeliği kullanılmıştır. Ayrıca modülü 1 mm, diş sayısı 20 olan 6 mm genişliğindeki dişlinin göbek çapı 2,2,5,3,4,5,6,8 ve 10 mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak nominal çap

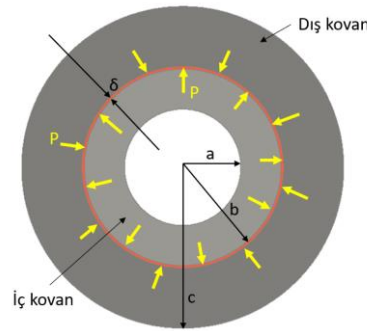
arttıkça teğetsel ve radyal gerilmenin azaldığı anlaşılmıştır. Ancak bu durum sistemdeki güvenlik katsayısını düşürdüğünden aradaki dengeyi iyi bir şekilde sağlanması gerektiği vurgulanmaktadır. Ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin tüm nominal çap değerleri için büyükten küçüğe doğru H7/u6, H7/s6, H7/p6 şeklinde sıralanmaktadır.

Bu çalışmada basınç yükselticileri oluşturan hidrolik silindirlerin tasarımına, iç silindir çaplarının, iç ve dış silindir cidar kalınlıklarının ve sıklık değerinin etkileri analitik hesaplamalarla belirlenmiştir. Ayrıca iki farklı SEA yazılımının KCS tasarımında kullanılabilirliği sonuçların analitik sonuçlarla kıyaslanması yoluyla ortaya konulmuştur. Silindir içine uygulanan basınç neticesinde oluşan radyal ve teğetsel gerilmeler ile ara yüzey basınçları analitik olarak Lamé Denklemleriyle ve lineer statik SEA ile hesaplanmıştır. Literatürdeki araştırmalardan farklı olarak geometrik parametrelerin meydana gelen maksimum eşdeğer gerilmelere etki düzeyleri varyans analizi yapılarak ortaya konulmuştur. Yapılan çalışma KCS tasarımı yapan sanayi kuruluşlarına ve konuyla ilgili akademik çalışmalara ışık tutacak niteliktedir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, iki katmanlı olarak imal edilen kalın cidarlı silindirlerde, tasarım parametrelerinin, 350 MPa çalışma basıncı altında oluşan iç gerilmelere etkisi analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. İncelenen parametreler iç silindir yarıçapı (a), iç ve dış silindir cidar kalınlıkları ve sıkı geçme toleranslarıdır. Şekil 2’de incelenen katmanlı silindirin şematik görüntüsü verilmiştir. Burada, a ; iç silindir iç yarı çapını, b ; iç silindir dış yarı çapını, c ; dış silindir dış çapını, δ ; sıkı geçme toleransını p ; iç basıncı, p_0 ise dış basıncı temsil etmektedir. Parametrelerin etki düzeyleri varyans analizi ile ortaya konulmuştur. Yine katmanlı olarak üretilen silindirlerin sıkı geçme tolerans değerlerine göre oluşan ara yüzey basınçları da analitik ve nümerik olarak belirlenmiştir.

Nümerik analizler ANSYS ve SOLIDWORKS SEA çözümleri ile yapılmıştır. Nümerik sonuçlar, analitik sonuçlarla karşılaştırılarak her iki SEA çözümlerinin hata oranları tespit edilmiştir.



Şekil 2. İç içe sıkı geçmiş silindirlerin sıkı geçme toleransı (δ) ve sıkı geçirilmiş silindirlere etki eden ara yüzey basıncı

Figure 2. Shrinkage allowance (δ) of compound cylinders and interface pressure acting on shrink fitted cylinders

Katmanlı Silindirlerde Gerilme Hesabı (Stress Calculation in Layered Cylinders)

Ultra yüksek basınçta çalışan KCS’lerde çok yüksek gerilme seviyeleri oluşmaktadır. Bu gerilmeler altında yapının hasar görmemesi için uygun şekilde boyutlandırılması oldukça önemlidir. Katmanlı KCS’lerde silindirlerin sıkı geçirilmesi sonucunda oluşan temas basıncı, iç silindir yüzeylerinde basma yönünde ön gerilme oluşturmaktadır. İç kovanda basma gerilmesi şeklinde oluşan ön gerilme, basınç neticesinde oluşan çekme gerilmesini düşürmektedir. Ayrıca iç yüzeyde olabilecek mikro çatlakların da ilerlemesini engelleyerek yapının yorulma dayanımını artırmaktadır. Bu nedenle çok katmanlı silindirler, eş değer kalınlıktaki tek katmanlı silindire göre çok daha yüksek gerilmelere dayanabilmektedir. Katman sayısına maruz kalınan iç basınca göre karar verilmektedir. Katmanlı olarak

üretileen ve aralarında sıkı geçme alıştırma toleransı (δ) olan silindirler, birbirlerine ya preste ya da ısıtılarak geçirilmektedir. Ancak en çok kullanılan birleştirme işleminin ısıtılarak geçme işlemidir. Silindirlerin montajı için dış silindir ısıtılır ve içine iç silindir yerleştirilir. Montaj tamamlandıktan sonra soğumaya bırakılır. Bu esnada boyut farkından dolayı ara yüzeyde “sıkı geçme basıncı” (p) denilen basınç ortaya çıkar (Ugural,1995).

Ara yüzey basıncının silindir iç yüzeyinde ön gerilme oluşturması silindirlerin yorulma ömürlerini ve dayanımlarını pozitif yönde etkilemektedir. Denklem 1’de iki silindirinin sıkı geçmesi sonucunda ortaya çıkan ara yüzey basıncının formülü görölmektedir (Harvey, 1984).

$$p = \frac{E \cdot \delta}{b} * \frac{(b^2 - a^2) * (c^2 - b^2)}{2 * b^2 * (c^2 - a^2)} \quad (1)$$

Kalın cidarlı silindirler iç ve dış basınçlara maruz kaldığında radyal (σ_r) ve teğetsel (σ_t) gerilmeler ortaya çıkar. Bu gerilmeler için Lamé eşitlikleri (Denklem 2 ve 3) kullanılmaktadır (Harvey, 1974).

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \nu^2} * \left[C_1 * (1 + \nu) - C_2 * \frac{1 - \nu}{r^2} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1 - \nu^2} * \left[C_1 * (1 + \nu) + C_2 * \frac{1 - \nu}{r^2} \right] \quad (3)$$

Eşitliklerdeki E , elastiklik modülü, ν poisson oranı, C ise gerilme sabitidir. C_1 ve C_2 iç ve dış basınca göre değişen sabitler olup Denklem 5 ve 6’da gösterilmiştir. Analitik hesap yapılırken iç ve dış basınca göre sabitler değişmektedir.

$$C_1 = \frac{1 - \nu}{E} * \frac{a^2 * p_i - b^2 * p_0}{b^2 - a^2} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{1 - \nu}{E} * \frac{a^2 * b^2 * (p_i - p_0)}{b^2 - a^2} \quad (6)$$

Burada, a iç silindir iç yarı çapını, b iç silindir dış yarı çapını, p_i iç basıncı, p_0 ise dış basıncı gösterir. C_1 ve C_2 değerleri Denklem 2 ve 3’te yerine koyulduğunda radyal ve teğetsel gerilmeler;

$$\sigma_r = \frac{(a^2 * p_i) - (b^2 * p_0)}{b^2 - a^2} - \frac{(p_i - p_0) * a^2 * b^2}{r^2 * (b^2 - a^2)} \quad (7)$$

$$\sigma_t = \frac{(a^2 * p_i) - (b^2 * p_0)}{b^2 - a^2} + \frac{(p_i - p_0) * a^2 * b^2}{r^2 * (b^2 - a^2)} \quad (8)$$

elde edilmektedir.

Katmanlı Silindirlerin Lineer Statik SEA’ları (Linear Static FEA’s of Layered Cylinders)

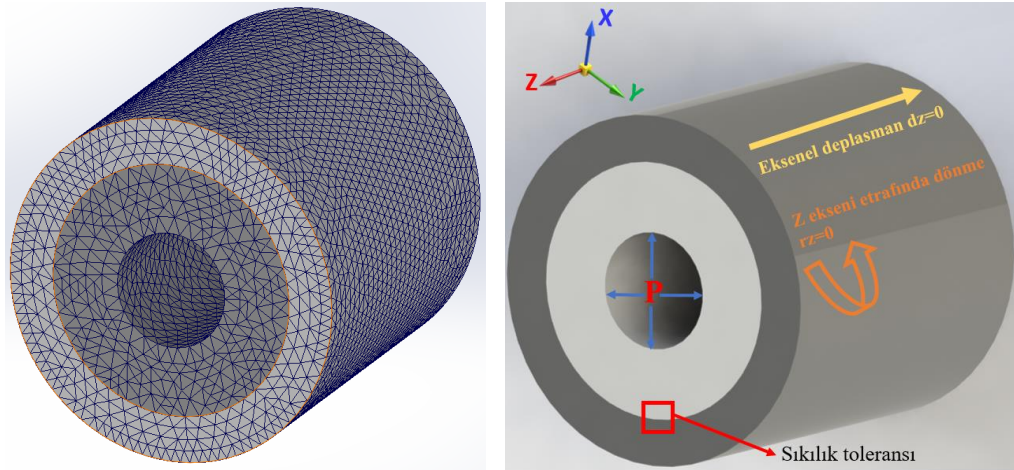
Bu çalışmada KCS’lerin tasarımında Sonlu Elemanlar Analizlerinin (SEA) kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla ilk olarak boyutlar sabit tutularak Çizelge 1’de verilen sıkı geçme toleranslarında ara yüzey basınçları belirlenmiş ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonraki analizlerde iç basınç altındaki KCS’lerde oluşan maksimum gerilmeye geometrik parametrelerin etkisi tespit edilmiştir. KCS’ler Solidworks yazılımında geometrik olarak modellendikten sonra 0.2-2 mm aralığında tetragonal elemanlara ayrılmıştır. Ansys yazılımında ise 2 mm hexagonal elemanlara ayrılmıştır. Sonrasında malzeme, sınır şartlar ve basınç parametreleri tanımlanmıştır (Şekil 3). Malzemeler izotropik lineer elastik malzeme olarak modellenmiştir. Modellemede sınır şartı belirlenirken; silindirlerin eksen ve dönme doğrultusunda hareketleri kısıtlanmıştır. Endüstriyel uygulamalarda iç silindir daha sert, dış silindir daha

sünek malzemeden seçilmektedir. Bu çalışmada, iç silindir AISI 4340 ıslah çeliği, dış silindir St52 genel imalat çeliği olarak düşünülmüştür. Ancak linear statik SEA'da malzeme elastisite modülü ve poisson oranı değerleriyle modellendiği için her iki malzeme için de aynı değerler kullanılmıştır. Burada malzemelerin farklılığı, meydana gelen gerilmelerin akma mukavemetleriyle kıyaslanması noktasında dikkate alınmaktadır.

Çizelge 1. Sıkı geçme prosesinde kullanılan parametreler

Table 1. Parameters used in shrink-fit process

İç silindir iç yarıçapı, a (mm)	25
İç silindir dış yarıçapı, b (mm)	55
Dış silindir dış yarıçapı, c (mm)	85
Boy (mm)	150
Sıkı geçme toleransı (δ) (mm)	0.03, 0.06, 0.09



Şekil 3. a) Katmanlı silindirlerin sonlu elemanlarına ayrılması **b)** Uygulanan sınır şartları

Figure 3. a) Meshing of layered Cylinders b) Boundary conditions

Malzeme olarak elastik malzeme modeli kullanılmış olup çekme testi sonucunda elde edilen akma gerilmesi, çekme gerilmesi, elastiklik modülü ve poisson oranı değerleri programlara tanıtılmıştır. Analizler yapılırken silindirlerin aksel ve dönme yönünde hareketi sabitlenmiştir. Tasarlanan geometriler SEA programlarındaki sıkı geçme komutu ile birbirine montaj edilmiştir. Basınç tanımı iç silindirin iç yüzeyindeki tüm elemanlara uygulanmıştır. Analizlerde doğruluğu sağlamak için aynı silindirler üç farklı sıkılık toleransı (0.03, 0.06 ve 0.09 mm) montaj edilmiş ve Denklem 2'de verilen formül ile hesaplanan analitik sonuçlarla doğrulanması yapılmıştır.

İç Basınç Altındaki Katmanlı Silindirlerin Linear Statik Analizi (Linear Static Analysis of Layered Cylinders Under Internal Pressure)

Katmanlar arası oluşan basınç analizlerinden sonra iç içe geçmiş iki katmanlı KCS'lerin yüksek iç basınç altında davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda, 350 MPa basınç altında iç içe geçmiş KCS'lerin Von Mises eşdeğer gerilmeleri SEA ile hesaplanmıştır. Nümerik olarak elde edilen sonuçlarla Denklem 7 ve 8 ile hesaplanan analitik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Basınç altında maksimum gerilme silindir iç yüzeyinde meydana gelmektedir. Maksimum gerilmeler, silindirin iç yüzeyindeki tüm elemanların von-Mises eşdeğer gerilme değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Analizlerdeki parametreler iç silindir çapı, iç cidar kalınlığı, dış cidar kalınlığı ve sıkı geçme toleransı olarak belirlenmiştir. SEA ve analitik sonuçları karşılaştırmak için Çizelge 2'de görülen 4 parametre ve her bir parametrenin de üç

düzeyi için Taguchi L₉ deney tasarım matrisine göre analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece SEA yazılımları dokuz farklı tasarım için doğrulanmıştır. Taguchi yöntemi sadece nümerik çalışmaların analitik sonuçlarla doğrulanması için uygulanmıştır. İstatistiksel analizlerde tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Böylece Taguchi tasarımında kullanılmamış olan parametre seviyelerinden kaynaklanan belirsizlikler de ortadan kaldırılmıştır. Taguchi L₉ deney tasarım çizelgesi Çizelge 3'te verilmiştir.

Parametre Etkilerinin Regresyon ve Varyans Analizleriyle Belirlenmesi (Determination of Parameter Effects by Regression and ANOVA Analysis)

KCS tasarımında geometrik parametrelerin etkisi Çizelge 2'de görülen parametre seviyeleri ile tam faktöriyel analitik hesaplamalar yapılarak belirlenmiştir. Böylece 4 parametre ve 3 seviye için toplamda 81 sonuç elde edilmiştir. Sonuçlara regresyon ve varyans analizleri uygulanarak parametrelerin sonuçlar üzerindeki anlamlılığı ve etki seviyesi belirlenmiştir.

Çizelge 2. Deney parametre ve seviyeleri

Table 2. Experiment parameters and their levels

Parametreler	Parametre Seviyeleri		
	1	2	3
İç silindir iç yarıçapı (a) (mm)	17.5	25	32.5
İç silindir cidar kalınlığı (mm)	15	30	45
Dış cidar kalınlığı (mm)	15	30	45
Tek taraflı sıklık toleransı	0.03	0.06	0.09

Çizelge 3. Taguchi L₉ Deney parametreleri ve ölçüleri

Table 3. Taguchi L₉ experiment parameters and dimensions

Deney No	Parametreler ve Seviyeleri			
	İç silindir iç yarıçapı (a) (mm)	İç silindir cidar kalınlığı (mm)	Dış silindir cidar kalınlığı (mm)	Tek taraflı sıklık toleransı
1	17.5	15	15	0.03
2	17.5	30	30	0.06
3	17.5	45	45	0.09
4	25	15	30	0.09
5	25	30	45	0.03
6	25	45	15	0.06
7	32.5	15	45	0.06
8	32.5	30	15	0.09
9	32.5	45	30	0.03

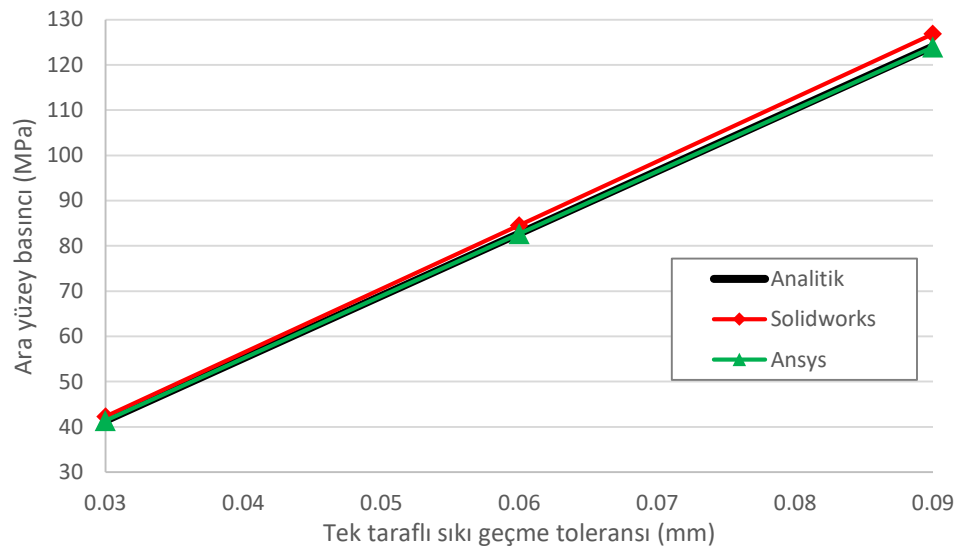
SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSION)

Bu çalışmada ilk olarak katmanlı KCS'lerin, üç farklı sıklık toleransı ile sıkı geçme işlemi sonucunda oluşan ara yüzey basıncının analitik ve nümerik olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Daha sonra, silindirlere 350 MPa iç basınç uygulayıp iç silindirde oluşan eşdeğer gerilmelerin analitik hesabı yapılmıştır ve tasarım parametrelerinin etki düzeyleri varyans analizi ile belirlenmiştir.

Katmanlı Silindirlerin Sıkı Geçme Prosesi (The Shrink-Fit Process of Layered Cylinders)

Üç farklı sıklık toleransı ile yapılan sıkı geçme süreci analizleri sonucunda elde edilen ara yüzey basınçları Şekil 4'te verilmiştir. Ansys yazılımı ile Analitik sonuçlar birbiriyle oldukça uyumlu çıkmıştır.

Solidworks yazılımından elde edilen sonuçların ise analitik sonuçlardan bir miktar farklı olduğu görülmektedir. Çizelge 4'te sıklık değerine göre değişen gerilme değerlerinin karşılaştırması ve analitik ve nümerik sonuçlar arasındaki sapma oranları gösterilmiştir. Ansys programı ile analitik değerler arasındaki fark ortalama % 0.05 olarak belirlenirken Solidworks yazılımında bu fark ortalama %2.28'ye çıkmıştır. Her ne kadar Solidworks yazılımındaki sapma oranı bir miktar daha fazla çıksa da %98'e yaklaşan bir doğruluk değeri SEA'ler için oldukça yeterlidir.



Şekil 4. Tek taraflı sıklık değerlerine göre ara yüzey basınç değerleri karşılaştırması

Figure 4. Comparison of interface pressure values according to shrinkage allowance

Çizelge 4. Ara yüzey basınçlarının doğrulanması ve sapma oranı hesabı

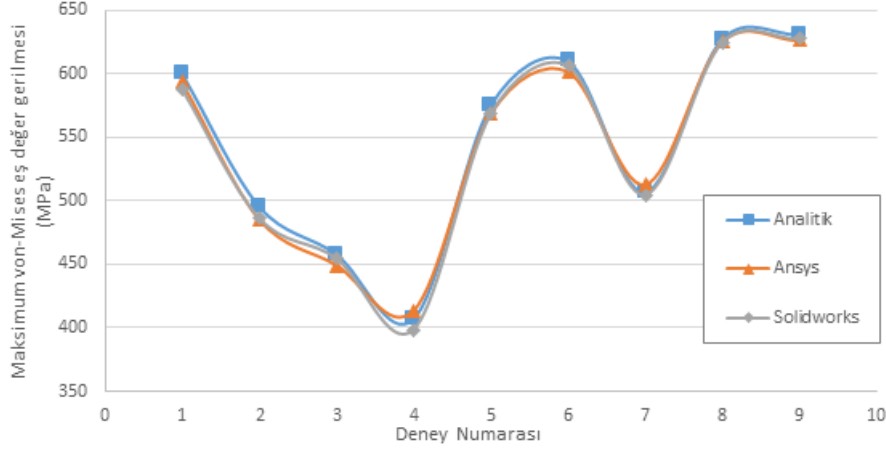
Table 4. Verification of interface pressures and deviation ratios

Sıklık Toleransı (mm)	ANSYS	SOLIDWORKS	Anolitik	Sapma Oranı (ANSYS) (%)	Sapma Oranı (SOLIDWORKS) (%)
	p (MPa)	p (MPa)	p (MPa)		
0.03	41.342	42.31	41.34	0.005	2.346
0.06	82.65	84.55	82.69	0.048	2.249
0.09	123.89	126.8	124.03	0.113	2.233
Ortalama				0.05	2.28

İç Basınç Altında Katmanlı Silindirlerin Gerilme Analizleri (Stress Analysis of Layered Cylinders Under Internal Pressure)

Katmanlı silindirlerin iç yüzeyine 350 MPa basınç uygulandıktan sonra analitik ve nümerik olarak hesaplanan maksimum gerilmeler Şekil 5'te karşılaştırılmıştır. SEA'lardan farklı geometrik ölçülerdeki silindir tasarımlarında hesaplanan gerilmeler analitik sonuçlarla oldukça uyumlu çıkmıştır. SEA'nın tahmin başarısı literatürde katmanlı KCS tasarımıyla ilgili Öztürk, 2010; Zhang ve diğ., 2000; Parades ve diğ., 2010; Campos ve diğ., 2019 tarafından yapılan çalışmalarla benzer seviyede elde edilmiştir. Her iki SEA yazılımı için analitik değerlerden sapma oranları Çizelge 5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Solidworks yazılımında sapma oranı % 1.1, Ansys yazılımında %1.3 değerinde çıkmıştır. Solidworks'ün gerilme değerini tahmindeki başarısı ara yüzey basınç değerinin tahminine göre artmış ve sapma oranı

Ansysis ile neredeyse aynı olmuştur. Buradan KCS'lerin lineer statik SE analizlerinde Solidworks yazılımının profesyonel SEA yazılımlarıyla aynı derecede güvenilirlik sunabildiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5. İç basınç altında silindirlerin gerilme analizi

Figure 5. Stress analysis of cylinders under internal pressure

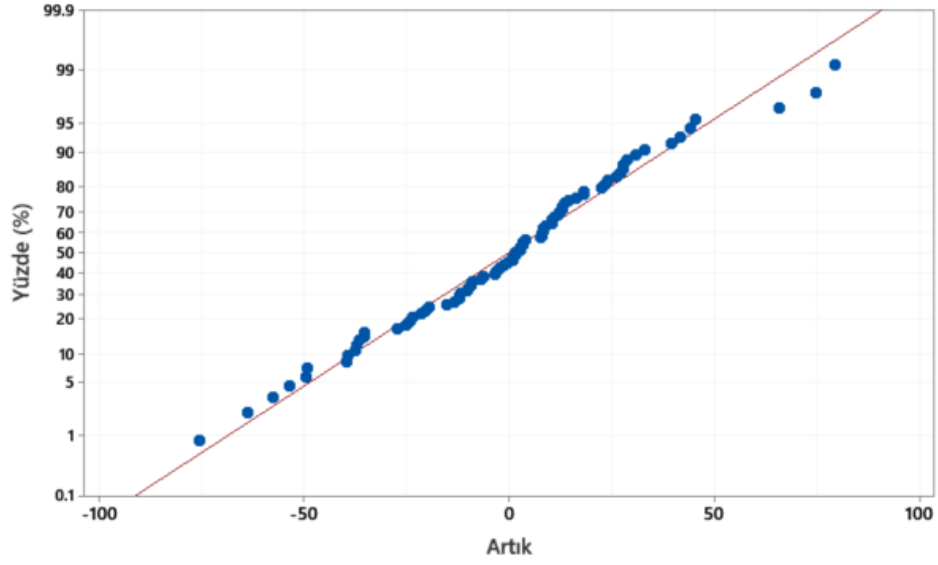
Çizelge 5. Taguchi L₉ tablosuna göre elde edilmiş eşdeğer gerilmeler

Table 5. Equivalent stresses obtained according to the Taguchi L₉ DOE

Deney No	Analitik (MPa)	Ansys (MPa)	Solidworks (MPa)	Ansys Sapma (%)	Solidworks Sapma (%)
1	600.6	593.5	587.9	1.2	2.1
2	495.7	485.2	486.1	2.1	1.9
3	458.0	449.0	454.4	2.0	0.8
4	406.8	412.9	398.1	1.5	2.1
5	574.9	568.4	568.1	1.1	1.2
6	610.0	601.7	606.3	1.4	0.6
7	506.7	512.6	504.5	1.2	0.4
8	627.2	625.2	624.6	0.3	0.4
9	631.0	626.3	627.5	0.7	0.6
Ortalama				1.3	1.1

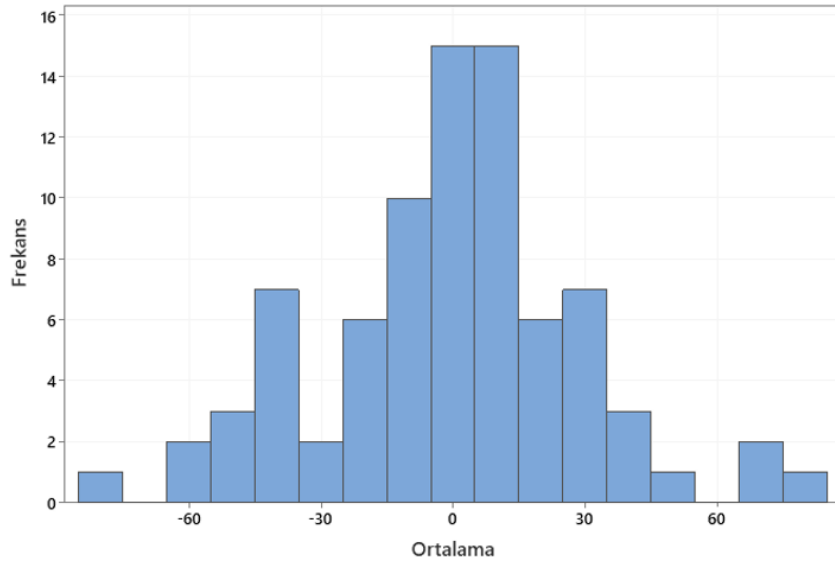
Geometrik Parametrelerin Etki Sonuçları (Effect Results of Geometric Parameters)

350 MPa gibi ultra yüksek iç basınçta çalışan katmanlı KCS'lerde oluşan gerilmelerin hesabı ve tasarım esnasında hangi parametrenin bu gerilmeler üzerinde ne kadar etkili olduğunu bilmek önemlidir. Bu çalışmada, belirlenen dört parametrenin silindir iç yüzeyindeki maksimum eşdeğer gerilmeye etkilerini detaylı incelemek için tam faktöriyel deney tasarımına göre elde edilen sonuçlara regresyon ve varyans analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda oluşan regresyon eğrisi Şekil 6'da gösterilmiştir. Sonuçların, regresyon denkleminin türetilen regresyon eğrisine yakınsadığı görülmektedir. Bu da sonuçların deney sistemi üzerinde anlamlılığını göstermektedir.



Şekil 6. Regresyon analizi sonucunda oluşan regresyon eğrisi
Figure 6. Regression curve plotted as a result of regression analysis

Şekil 7’de ise deney sonuçlarından üretilen normal dağılım histogram grafiği verilmiştir. Histogram üzerine normal dağılım eğrisi yerleştirildiğinde sonuçların istatistiksel olarak mantıklı olduğu ve normal dağılımda seyrettiği görülmektedir. Regresyon analizi sonucu sistemin güvenilirliğini temsil eden R-square (adj) değeri %87.4 çıkmıştır. Mühendislik problemlerinde %70 ve üstü değerler kabul edilebilir olmakla birlikte %87.4 sistemin büyük oranda güvenilir olduğunu net bir şekilde göstermektedir.



Şekil 7. Regresyon analizi sonucunda oluşan histogram normal dağılım grafiği
Figure 7. Normal distribution histogram graph obtained from regression analysis

Regresyon analizlerinden sonra, tam faktöriyel deney tablosu sonuçlarına varyans analizi uygulanmıştır. Sonuçlar doğrultusunda oluşan varyans analiz çizelgesi Çizelge 6’da verilmiştir. Varyans analizi ile her bir parametrenin iç gerilmelere olan katkı yüzdeleri, etki ve anlamlılık testleri olan f-testi ve p-testi sonuçları hesaplanabilmektedir. Anlamlılık testi sonucu olan p-değerleri tüm parametreler için istatistiksel anlamlılık sınırı olan 0.05 değerinden çok daha düşük seviyede çıkmıştır. Bu da deney parametrelerinin ve seviyelerinin sonuçlar üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir.

Sonuçlara göre en etkili parametre %32.7 ile sıkı geçme toleransı olmuştur. Hassas ve çok küçük ölçüler olan sıklık toleransının ve ara yüzeyde oluşturduğu basıncın katmanlı KCS tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli parametre olduğu anlaşılmıştır. Sıklık toleransından sonra maksimum eşdeğer gerilmeye sırasıyla dış cidar kalınlığı %27.5, iç silindir iç yarıçapı %22.3 ve iç silindir cidar kalınlığı %6.2 oranla etki etmiştir. İç basınca maruz kalan katmanlı silindirlerde, emniyet ve gerilme açısından iç silindir cidar kalınlığının artırılması alınacak önlemlerden ilki gibi düşünülse de sıklık toleransı ve dış silindir cidar kalınlığının çok daha önemli olduğu görülmektedir.

Çizelge 6. Kullanılan parametre ve maksimum gerilmelere etki yüzdeleri

Table 6. Used parameter and percentages of influence on maximum stresses

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Etki Yüzdesi	Ortalama Kareler	F değeri	P değeri
İç silindir iç yarıçapı (mm)	2	136571	%22.28	68285	70.93	< 0.001
İç silindir cidar kalınlığı (mm)	2	38039	%6.21	19020	19.76	< 0.001
Dış silindir cidar kalınlığı (mm)	2	168484	%27.49	84242	87.50	< 0.001
Tek taraflı sıklık toleransı	2	200433	%32.71	100216	104.09	< 0.001
Hata	72	69317	%11.31	963		
Toplam	80	612844	100.00%			

Tam faktöriyel deney tasarım tablosuna göre, analitik olarak hesaplanmış eş değer gerilmelere parametre seviyelerinin etki grafikleri Şekil 'de gösterilmiştir. İç silindir iç yarıçapı artarken maksimum gerilme beklenildiği şekilde artmıştır. İç silindir iç yarıçapı kullanılacağı sistemin kapasitesi açısından sabit bir değere sahipse özellikle dış silindir cidar kalınlığı ve sıklık toleransının dikkatlice seçilmesi gerekmektedir. İç silindir cidar kalınlığının etkisi daha az olmakla birlikte cidar kalınlığını artırmak maksimum eşdeğer gerilme değerinde de artışa neden olmaktadır. Bunun nedeni iç silindir cidar kalınlığı arttıkça dış silindir cidar kalınlığının da küçülmesi ve bu nedenle iç silindirde oluşan basma gerilmesinin azalmasıdır. Dolayısıyla iç silindir cidar kalınlığını artırmak gerilme açısından avantajdan çok dezavantaja dönüşmektedir. Bu nedenle basınçlı silindir tasarımı yapılırken emniyet açısından iç silindir cidar kalınlığını büyük yapmaktan ziyade bilakis iç silindir cidar kalınlığını azaltmak gerekmektedir. Ancak iç silindir cidar kalınlığı azaldıkça dış silindirde oluşan eşdeğer gerilme artmaktadır. Bu nedenle iç silindir cidar kalınlığının dış silindirde akma oluşturmayacak ölçülerde olmasına dikkat edilmelidir. Böylece iç silindir malzemeleri pahalı olduğu için maliyet açısından da büyük avantaj elde edilmiş olur.

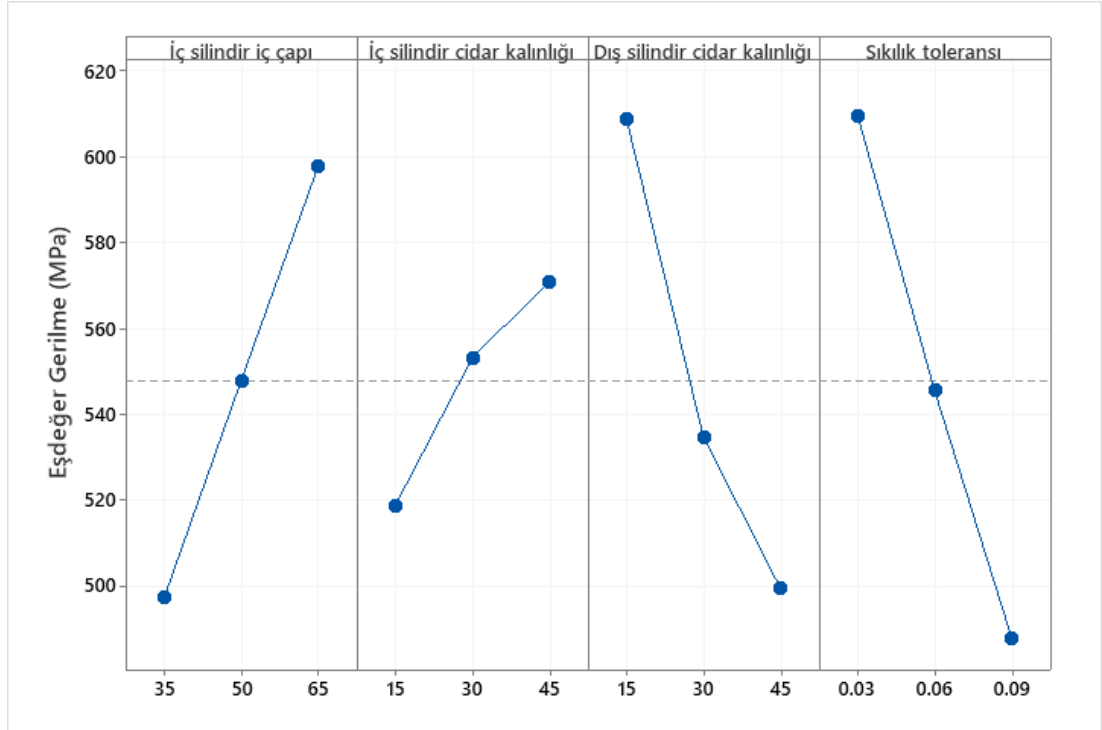
Dış silindir cidar kalınlığı arttığında iç silindirde oluşan basma gerilmeleri de artmaktadır. Bu basma gerilmeleri yüksek basınçtan kaynaklanan çekme gerilmelerini sönmülediğinden dış silindir cidar kalınlığının artmasıyla iç silindirde oluşan eş değer gerilme azalmaktadır. Bu da çevrimsel yükleme altında çalışan sistemde en kritik bölge olan silindir iç yüzeyinin ortalama gerilmesini azaltmakta ve böylece yorulma ömrünü artırmaktadır. Ancak malzeme maliyeti açısından optimum cidar kalınlığının tercih edilmesi gerekmektedir.

En etkili parametre olan tek taraflı sıklık toleransı artarken, iç silindir iç yüzeyinde oluşan ortalama gerilme önemli oranda azalmaktadır. Bunun sebebi, sıklık toleransı artarken silindirlerin ara yüzeyinde meydana gelen basıncın artmasıdır. Bu basınç iç yüzeyde önemli oranda basma gerilmeleri oluşturmaktadır. Basma gerilmeleri de çevrimsel iç basınç nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini azaltarak ortalama gerilme seviyesini düşürmektedir. Bu da, iç silindir yorulma ömrünü artırmaktadır.

Parametrelerin iç silindirde oluşan gerilmelere etkisi genel olarak değerlendirildiğinde tasarım açısından silindir cidar kalınlıklarını artırmak yerine daha az maliyetli olan sıklık toleranslarını değiştirerek hedeflenen iç gerilmelerin elde edilmesinin çok daha uygun bir çözüm olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Katmanlı KCS tasarımında amaç en az gerilmeyi verecek bir tasarım yapmak olduğu için seçilen parametre seviyelerinde optimum değerler 35 mm iç silindir çapı, 15 mm iç silindir cidar kalınlığı, 45 mm

dış silindir cidar kalınlığı ve 0.09 mm tek taraflı sıklık için elde edilmiştir. Bu seviyelerde iç silindir iç yüzeyinde oluşan gerilme 311 MPa olmuştur.



Şekil 8. Parametre ve seviyelerinin iç silindir gerilmelerine etkileri

Figure 8. Effects of parameters and levels on inner cylinder stresses

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada ultra yüksek basınç altında çalışan KCS tasarımına etki eden geometrik parametreler araştırılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak farklı sıklık toleranslarında meydana gelen ara yüzey basıncı ile iç basınç altında silindirlerde oluşan gerilmeler analitik ve nümerik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. Ardından iç silindir çapı, iç ve dış silindir cidar kalınlıkları ile tek taraflı sıkı geçme toleransının, 350 MPa basınçta silindirlerde meydana gelen eşdeğer gerilmelere etkisi incelenmiştir. Her bir parametre için üçer düzey belirlenerek tam faktöriyel deney tasarım tablosu oluşturulmuş ve analitik olarak 81 adet tasarımın gerilme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar regresyon ve varyans analizleriyle değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Katmanlı silindirlerin farklı toleranslardaki sıkı geçme işlemi Ansys ve Solidworks yazılımında nümerik olarak incelendiğinde meydana gelen ara yüzey basıncının ortalama olarak Solidworks yazılımında %2.28, Ansys yazılımında ise %0.06 oranında analitik değerden farklı olduğu bulunmuştur. Her ne kadar Solidworks yazılımındaki sapma oranı bir miktar daha fazla çıksa da %98'e yaklaşan bir doğruluk değeri SEA'ler için oldukça yeterlidir.
- Yazılımların, farklı geometrik ölçülerdeki KCS'lere iç basınç uygulandığında meydana gelen gerilme değerlerini tahmin etme başarısı Taguchi L₉ deney matrisine göre araştırıldığında Solidworks yazılımının %1.13, Ansys yazılımının %1.27 hata payı ile gerilmeleri başarıyla tahmin ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Yazılımların hem kendi aralarındaki hem de analitik sonuçlarla arasındaki bu fark eleman boyutu, çözücü ve matematiksel modellerden kaynaklanabilmektedir. Bu hata oranları kabul edilebilir ve oldukça başarılı değerlerdir.

- Parametrelerin etkisini analiz etmek için tam faktöriyel deney tasarımına göre analitik olarak hesaplanan gerilme değerlerine regresyon ve varyans analizi yapıldığında regresyon analizi sonuçlarının normal dağılımda olduğu ve yapılan hesaplamaların anlamlılığı ortaya konulmuştur. Varyans analizi sonuçlarına göre iç silindirde oluşan maksimum eşdeğer gerilme üzerine en etkili parametre %32.7 ile sıklık toleransı olmuştur. Diğer parametrelerin etki oranlarının ise sırasıyla, dış silindir cidar kalınlığı için %27.5, iç silindir iç yarıçapı için %22.3 ve iç silindir cidar kalınlığı için %6.2 olduğu bulunmuştur. Buradan KCS tasarımında silindir cidar kalınlıklarını artırmak yerine daha az maliyetli olan sıklık toleranslarını değiştirerek hedeflenen iç gerilmelerin elde edilmesinin çok daha uygun bir çözüm olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Parametre seviyelerinin etkileşim grafiklerine göre dış silindir cidar kalınlığı ve sıklık toleransı artarken maksimum eşdeğer gerilmede büyük oranda azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi ara yüzeyde oluşan basıncın iç basınçla oluşan eşdeğer çekme gerilmelerini düşürmesidir. İç silindir çapı arttıkça toplam eşdeğer gerilme de beklenildiği şekilde artmıştır. İç silindir cidar kalınlığını artırmanın yine eşdeğer gerilme değerini artırdığı bulunmuştur. Bu nedenle KCS tasarımında yüksek mukavemetli ve pahalı olan iç silindir malzemesinin dış silindirde akma oluşturmayacak minimum ölçülerde alınmasının hem maliyet hem emniyet açısından çok daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKÇA (REFERENCE)

- Aydın. M., Yapan Y.F., Türköz M., "Investigation on Effect of Shrinkage Allowance to the Fatigue Life of Compound Cylinders Operating at High Pressure", *International Conference on Engineering Technologies*, 370-373, Konya, 19-21 November 2020
- Aydın M., Türköz M., "Effect of Shrink Fit Process on Total Equivalent Stress and Total Amount of Material", *International Conference on Engineering Technologies*, 405-408, Konya, 18-20 November 2021
- Benuzzi D. ve Donzella G. "Prediction of the press-fit curve in the assembly of a railway axle and Wheel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit* 218(1):51-65 (2004)
- Campos, U. A. ve Hall, D. E., "Simplified Lamé's equations to determine contact pressure and hoop stress in thin-walled press-fits", *Thin-Walled Structures*, 138, 199-207. (2019)
- Geren N., Tunç T., "Su jeti Kesme Sistemlerinde Kullanılan Basınç Arttırıcılarda Gerilme Analizleri ve Tasarım Sınırları", *Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, Ankara , Eylül 2000
- Harvey, J. F., 1974, *Theory and Design of Modern High Pressure Vessels*, Van Nostrand, Princeton.
- Öztürk F., W.O.O. Tse-Chien, Simulations of interference and Interfacial pressure for three disk shrink fit assembly, *Gazi Univ. J. Sci.* 23 (2) (2010) 233–236.
- Ozturk, F., 2011, "Finite-element modelling of two-disc shrink fit assembly and an evaluation of material pairs of discs", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 225, No. 2, pp. 263–273
- Özel, A., Temiz, Ş., Aydın, M. D., ve Şen, S., 2005, "Stress analysis of shrink-fitted joints for various fit forms via finite element method", *Materials & design*, Vol. 26 No. 4, pp.281-289.
- Paredes, M., Nefissi, N. ve Sartor, M., 2012, "Study of an interference fit fastener assembly by finite element modelling, analysis and experiment", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, Vol.6, No.3 pp. 171–177
- Ugural, A. C. and Fenster, F. K., 1995, *Advanced strength and applied elasticity*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- Zhang, Y., McClain, B., ve Fang, X. D., 2000, "Design of interference fits via finite element method" *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.42 No.9, pp.1835-1850.
- Wang, X., Lou, Z., Wang, X., Hao, X., ve Wang, Y. 2019, "Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(8), 2834-2846.



BETON BORULARIN ZEMİN YÜKLERİ ALTINDA TASARIMLARI

¹Taha ORTAKCI , ²Fatih SAKA 

Karabük Üniversitesi, Safranbolu Şefik Dizdar MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Karabük, TÜRKİYE
Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE

¹tahaortakci@karabuk.edu.tr, ²sakafatih@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 25.01.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 20.04.2022)

ÖZ: Kanalizasyon sistemleri projelerinde, boruların hidrolik hesapları yapılmakta ancak zemin yükleri altında emniyeti genellikle göz ardı edilmektedir. Zemin yükleri altında boru tasarımında; boruların mukavemeti, yerleştirme koşulları, boru tabanına döşenen zemin kalitesi ve yerel zemin belirleyici olmaktadır. Beton borulara etkiyen zemin yüküne karşılık yeterli dayanıma sahip borular ve boru tabanı zemin hazırlanmalıdır. Bu çalışmada örnek projeler üzerinde riskli olabilecek noktalarda tasarım hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda yönetmelikteki maksimum hendek genişlikleri esas alınmıştır. Ayrıca uygulamada sıklıkla kullanılan Ø300- Ø1800 çapları arasındaki borularda, farklı zemin türlerine göre, gömülme derinliklerine karşılık birim boru üzerinde oluşan yüklerin değişimi grafiklerle elde edilmiştir. Böylelikle uygulamada sıklıkla kullanılan boru çapları için tasarımın kolaylaştırması amaçlanmıştır. Hendeklerde negatif kemerlenme etkisi sebebiyle hendek genişliğini, iş sağlığı ve güvenliği önlemlerini göz önünde tutarak minimum seviyede tutulmaya çalışılmalıdır. Böylelikle boru üzerine gelen yük etkileri de azaltılabilir. Yük hesaplamalarında yerel zeminin suya doygun kil olduğu durumda boru yükünün maksimum seviyeye çıktığı görülmüştür. Çalışmada, Ø800 ve üzeri çaplı beton borularda zemin yükleri altında daha fazla risk taşıdığı görülmüştür. Ayrıca boru tabanına yapılan beton yataklamanın zemin yüklerine karşı oldukça iyi performans gösterdiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton boru tasarımı, Birim boy boru yükleri, Boru yataklama

Designs of Concrete Pipes Under Ground Loads

ABSTRACT: In sewage systems projects, hydraulic calculations of pipes are made, but their safety under ground loads is often ignored. In pipe design under ground loads; the strength of the pipes, the placement conditions, the quality of the floor laid on the pipe base and the local ground are decisive. The pipes and the pipe base with sufficient strength against the ground load acting on the concrete pipes should be prepared. In this study, design calculations were made on the sample projects at the points that may be risky. Calculations are based on the maximum trench widths in the regulation. In addition, the variation of the loads on the unit pipe according to the burial depths of the pipes between Ø300- Ø1800 diameters, which are frequently used in practice, were obtained with graphs. Thus, it is aimed to facilitate the design for pipe diameters that are frequently used in practice. Due to the negative arching effect in the trenches, the width of the trench should be kept at a minimum, taking into account occupational health and safety measures. Thus, the load effects on the pipe can also be reduced. In the load calculations, it was observed that the pipe load increased to the maximum level when the local soil was water-saturated clay. In the study, it was observed that concrete pipes with diameters of Ø800 and above carry more risks under ground loads. In addition, it has been understood that the concrete bedding made to the pipe base performs quite well against ground loads.

Keywords : Concrete pipe design, Unit length pipe loads, Pipe bedding

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusunun artmasına paralel olarak altyapı çalışmalarının önemi de artmaktadır. Yol, su, elektrik, gaz, kanalizasyon, çevre, ulaşım vb. altyapı tesisleri gün geçtikçe gelişimini sürdürmektedir. Bu çalışmada, alt yapı tesislerinde önemli bir yeri olan kanalizasyon sisteminde sıklıkla kullanılan beton borular üzerinde durulacaktır. Dünyada yaygın olarak kullanımı geçmişten günümüze kadar devam eden beton borular, çok farklı çaplarda üretilmektedirler. Künk ve büz olarak da adlandırılan bu borular, geçmişte agrega ve çimento harcının tokmakla ve şişlemeyle kalıbına yerleştirilerek üretimi yapılırken, günümüzde fabrikasyon yöntemlerle istenilen çimento dozlu harç ile boru kalıbında makinelerle vibrasyonu sağlanarak imal edilmektedir.

Kanalizasyon sistemleri projelerinde boruların zemin yükleri altında emniyeti tetkik edilmemektedir. Genellikle cazibeli projelendirilen kanalizasyon boruları arazi şartları gereği yüksek gömülme derinliğine yerleştirilerek büyük zemin yüklerine maruz kalabilmektedirler. Konuyla ilgili literatürde, teorik çalışmalar olmasına rağmen bu çalışmaların saha kullanımına yönelik pratikleri bulunamamıştır. Bu nedenle kanalizasyon sistemi inşasında çalışanlara katkıda bulunmak amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

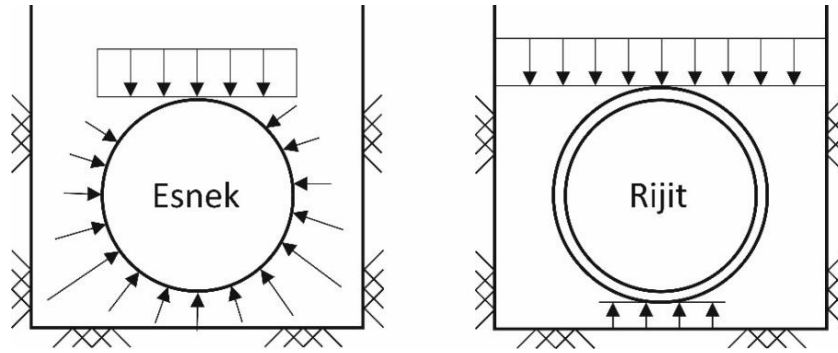
Boruların kapasite üstü yüke maruz kalması durumunda çeşitli kusurlarla birlikte göçmeler oluşabilmektedir. Göçmeye neden olan kusurlar; boru cidarının çatlaması, kırılması, yüksek çekme gerilmelerinin oluşması ve enine-boyuna doğrultuda eğilmenin ortaya çıkması olarak sayılabilir. Böyle durumlarda, yük altında tahribat gören borular, sokak ve caddelerde sağlıklı hizmet veremeyerek toplum hayatının aksamasına ve çevreye zarar verilmesine yol açmaktadır. Bu problemleri önlemek için yapılacak kanalizasyon sistemi çok yönlü değerlendirilerek yapılmalı ve toplum hayatında karşılaşılabilecek problemlerin minimuma indirgenmesi sağlanmalıdır. Bu sebeple boruların üzerlerine gelebilecek yüklerin analizini detaylı şekilde yapmak gerekmektedir. Gömülü borulara gelebilecek zemin yükleri ve bunun yanında muhtemel trafik yükleri hesaplanarak, tasarımda bu değerlere de dikkat edilmesi gerekmektedir (Balkaya, 2002; Steven ve Moser, 2001).

KAYNAK ARAŞTIRMASI (LITERATURE SURVEY)

Zemin Yükleri Altında Boruların Davranış Biçimleri (Behavior of Pipes Under Soil Loads)

Kanalizasyon sistemlerinde kullanılan borular üzerlerine gelen yüklere karşı verdikleri tepkiye göre esnek veya rijit olarak sınıflandırılmaktadır. Beton ve koruge borular kanalizasyon sistemlerinde tercih edilen en yaygın borulardır. Beton boruların rijitlik özelliği koruge borulara nispeten ağır basmaktadır ve rijit borular olarak sınıflandırılmaktadır. Koruge borular ise beton borulara göre süneklik özelliği daha fazla olmakta ve esnek borular sınıflandırılmasında yer almaktadır (Ayalp, 2006).

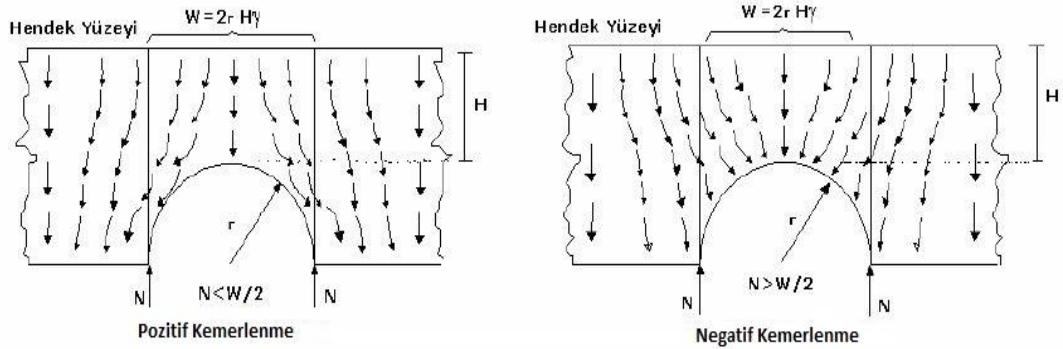
Beton boruların hasar görmeden deformasyon yapma kabiliyeti çok düşüktür, gelen yükleri kendi dayanımlarıyla boru tabanına aktarmak üzere tasarlanırlar. Beton boru ve diğer rijit yapıları borularda yükler borunun alt ve üst kısmında yoğunlaşmaktadır. Esnek borular her ne kadar esnek olarak tanımlansa da belirli rijitliği olan alt yapı elemanlarıdır. Belirli bir limite kadar rijit özelliği ve limit üstünde hasar görmeden oldukça esneme yapabilme özelliğiyle yük taşıyan borulardır (Şekil 1). Esnek olarak tanımlanan borularda, yükler borunun tüm çevresine uniform dağılmaktadır. Bu nedenle esnek borularda, borunun tüm çevresindeki zemin kalitesi ön plana çıkarken, rijit borularda ise boru tabanı zemin kalitesi etkili olmaktadır (Ayalp, 2006; Çoban, 2014).



Şekil 1. Esnek ve Rijit Borularda Yük Dağılımı

Figure 1. Load Distribution in Flexible and Rigid Pipes

Boru üzerine etkiyen yükün belirlenmesinde boru rijitliğinin zemin rijitliğine oranı etkili olmaktadır. Eğer boru rijitliği etrafındaki zemin rijitliğinin çok üzerinde ise yükün yaklaşık tamamı boru tarafından taşınmaktadır. Rijit olarak tanımladığımız beton borularda mekanizma bu şekilde işlemektedir. Boru üzerinde oluşan basınç birikmesi koruge(esnek) boruda deformasyon oluşturmaktadır. Boru tüm çevresine yüksek rijitlikte zemin malzemesi yerleştirildiği takdirde; zemin malzemesi yapı üstünde taş kemer gibi işlev görür. Dolgu zeminin bu kemerlenme etkisi pozitif kemerlenme olarak adlandırılmakta ve yapı üzerindeki basıncı düşürmektedir. Pozitif kemerlenme etkisi, zemin mukavemetine ve zemin ile borunun etkileşimine bağlıdır (Sağlamer ve Balkaya, 2014; Spangler, 1966). Oysa beton borular yüksek rijitliği sebebiyle negatif kemerlenme meydana getirmektedir (Şekil 2). Negatif kemerlenmede yan dolgular boru üzerine oturarak boruya ek bir yük getirmektedir. Böylece boruya etkiyen düşey toprak basıncı, boru üstündeki zemin prizması ağırlığından büyük olmaktadır (Steven ve Moser, 2001).



Şekil 2. Borularda Pozitif ve Negatif Kemerlenme (Bashir,2000)

Figure 2. Positive and Negative Arching on Pipes (Bashir, 2000)

Şekil 2 'de boru üzeri zemin prizması ağırlığının boruda oluşturacağı etkiler gösterilmektedir. Boru üzeri toprak yüksekliği H, boru yarıçapı r ve geri dolgunun özgül ağırlığı γ ile ifade edilerek boru orta ekseninde alınan normal kuvvet ile düşey toprak basıncı arasındaki eşitsizlik şekilden görülebilmektedir.

Kanalizasyon Sistemlerinin İnşası (Construction of Sewer Systems)

Sistemlerin inşasında hendek kazısının şevli veya iksalı olmasına, zeminin jeolojik yapısı göz önünde bulundurularak karar verilir. Şevli kazılarda, şev eğimleri zeminin jeolojik yapısına ek olarak yer altı suyu durumuna, iklim şartlarına göre arazide uygulama yapılarak belirlenmelidir. Açılan hendeklerde akmalara, kaymalara, göçüklere müsaade etmeyecek şekilde iş sağlığı ve güvenliğiyle ilgili gerekli tedbirler alınmalıdır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın "Atıksu Toplama ve Uzaklaştırma Sistemleri Hakkında Yönetmelik" te boru çapına göre borunun her iki yanında eşit mesafe bırakılarak kazılması önerilen hendek genişlikleri Çizelge 1'de verilmiştir (Resmi Gazete, 2017).

Çizelge 1. Hendek Taban Genişlikleri (Resmi Gazete, 2017)*Table 1. Trench Base Widths (Official Gazette, 2017)*

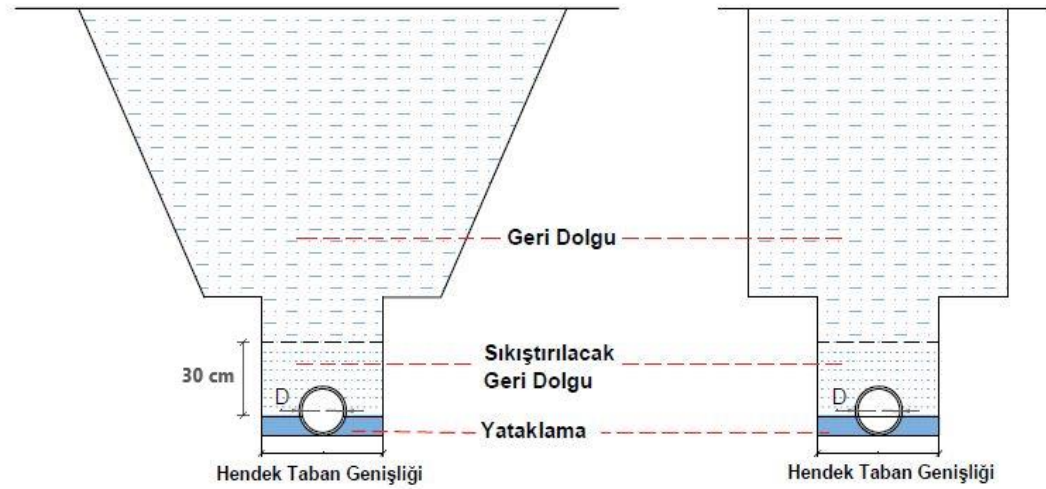
Boru Çapı(D)	Hendek Tipi	Hendek Genişliği(cm)
D ≤ 40 cm	Şevli Hendek	60
	İksalı Hendek	70
40<D≤70 cm	Şevli Hendek (≤60°)	D+40
	Şevli Hendek (>60°)	D+70
	İksalı Hendek	D+80
D>70 cm	Şevli Hendek (≤60°)	D+90
	Şevli Hendek (>60°)	D+120
	İksalı Hendek	D+130

Yer altına döşenen boruların verimli şekilde çalışabilmesi için zeminde oturma ve boru düzleminde sağa sola hareketlilik istenmez. Boruların döşendikleri yerde stabil kalabilmeleri ve zeminle sağlıklı etkileşimi için yataklama uygulaması yapılmaktadır. Borular hendeğe indirilmeden önce, hendek derinliği ve genişliği kontrol edilmeli, kum, silt ve yumuşak küskülük zeminlerde borunun yerleştirileceği kısım için yatak hazırlanmalıdır. Bu yatak sayesinde, zeminde çizgisel olarak oturmanın önüne geçilmiş olunur. Yerel zeminin elverişsiz olduğu durumlarda boru tabanı zemine sıkıştırma yapılarak, çakıl, jeotekstil veya beton yerleştirme işlemleri değerlendirilerek boru tabanı zemin güçlendirilmelidir. Hendekte su bulunuyorsa suyun tahliyesi sağlanarak boru tabanı yataklama işlemine geçilmelidir (Balkaya, 2001; Resmi Gazete, 2017).

Yataklama borunun taşıma gücünü artırdığından yapımına özel itina gösterilmelidir. Kazısı yapılan hendek tabanı silindir ya da kompaktör yardımıyla sıkıştırılmalıdır. D boru çapı olmak üzere, hendek tabanı üzerine $D/10 + 10$ (cm) kalınlığında stabilize malzemeyle yatak oluşturulduktan sonra borular yerleştirilmelidir. Kayalık zeminlerde ise yataklama yapılabilmesi için 10 cm daha derin kazı yapılmalıdır. Kayalık zeminlerde yataklama kalınlığı $(D/10+20)$ cm olmalı ve yataklama malzemesi kum gibi yumuşak malzemeden teşkil edilmelidir (Resmi Gazete, 2017; Kasap, 2016). Sistemde borulardan yük altında üstün dayanım bekleniyorsa, borular yerleştirildikten sonra yataklama yüksekliği kadar tabana beton dökülerek beton yataklama oluşturulabilir (Balkaya, 2002). Ayrıca beton yataklama ile beraber boru tüm çevresi de betonla kaplanırsa beton boruların negatif kemerlenme etkileri ortadan kaldırabilmektedir. Beton gömlekleme olarak adlandırılan bu durum, ekonomik olmasa da çok üstün dayanım gerekli ekstrem yerler için değerlendirilebilir.

Yataklama sonrası boru üzerinde boşluk kalmaması ve dolgu ile boru etkileşiminin daha iyi olması için boru üzeri 30 cm geçinceye kadar geri dolgu sıkıştırılmaktadır. Geri dolgu malzemesi olarak genellikle yerel zemin malzemesi kullanılmakta ve bu şekilde sistemin inşası ekonomik olmaktadır. Ancak yerel zeminin taşıma gücü düşük ve sıkışabilirliği yüksek olduğu yani dolgu için elverişsiz olduğu durumlarda, farklı nitelikte zemin getirilerek geri dolgu yapılabilir. Bu durumda boru üzeri oluşacak yüklerin hesabında, geri dolgu olarak seçilen zemin malzemesinin değerleri kullanılmalıdır.

1.5 m'den daha derin kazılarda güvenlik için hendekler şevli veya iksalı olarak yapılabilir. Derin kazılarda hendek taban genişliği Tablo 1'de belirtilen değerleri aşması halinde, hendek tabanına dar dik kenarlı yeni bir hendek açılması hem ekonomik yönden hem de boru üzerine gelebilecek yükleri azaltmak için pratik bir yöntemdir (Şekil 3) (Balkaya, 2002)



Şekil 3. Hendek İçerisine Dar Dik Kenarlı Yeni Hendek Kesiti

Figure 3. New Trench Section with Narrow Vertical Sides Inside the Trench

Beton Borulara Etkiyen Zemin Yüklerinin Hesaplanması ve Tasarımı (Calculation of Soil Loads Acting on Concrete Pipes and Design)

Beton borulara gelen zemin yük etkisi; dolgu yüksekliği, hendek genişliği, çevresindeki zeminin yapısı ve inşaa yöntemlerine bağılı olarak değişebilmektedir. Boruya etkiyen yükün kabaca, boru üstündeki hendek düzleminin zemin yüküyle hendek duvarı boyunca oluşan düşey kayma gerilmeleri farkı kadar olduğu düşünülür. Gömülü boru üzeri yük hesabında birçok bağıntı geliştirilmiştir. Bu bağıntılardan Anson Marston'nun yöntemi en yaygın kullanılanıdır ve kapsamlı şekilde yük hesabını formülize etmektedir (Moser ve Steven, 2001). Teknolojinin gelişmesiyle birlikte gömülü boruların yük hesabı sonlu elemanlar metodu ile de yapılabilmiştir. Boru üzeri yüklerin hesabını, sonlu elemanlar programını kullanarak hesaplanmış ve Marston'un yükleri ile karşılaştırılmıştır. Marston yük hesabında boru yanal dolgusunun yük taşımada etkisi olmadığı varsayıldığından; Marston Formülü ile elde edilen yükün, Plaxis Sonlu Elemanlar yöntemiyle bulunan yükten daha fazla olduğu tespit edilmiştir. (Balkaya ve Sağlamer, 2014). Bu sebeple Marston Formülünün boru güvenliği için emniyetli tarafta kaldığı yorumu yapılabilir. Buna göre hendeklerde rijit boru yük hesabında aşağıdaki Eşitlik 1 kullanılabilir.

$$W = \frac{\gamma \cdot B_d^2 \cdot \left(1 - e^{-2 \cdot K \cdot \mu \cdot \left(\frac{H}{B_d}\right)}\right)}{2 \cdot K \cdot \mu} \tag{1}$$

e : Doğal logaritma tabanı

γ : Dolgunun birim hacim ağırlığı (KN/m³)

W : Dolgu içindeki boru yatay düzlemdeki düşey basınç (KN/m)

B_d : Boru üst seviyesinde hendeğin genişliği (m)

H : Boru ile doğal zemin seviyesi arasındaki mesafe (m)

μ : $\tan \varphi$ = Dolgu ve borunun kenarları arasındaki sürtünme katsayısı

K : Yanal aktif birim basıncın düşey birim basınca oranı

Eşitlik 1'de yer alan K ve μ zemin değerleri deneysel çalışmalar sonucu tespit edilmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Çeşitli Zeminlerde γ , K ve μ Değerleri (Moser ve Steven)Table 2. γ , K and μ Values on Various Soils (Moser and Steven, 2001)

Zemin Cinsi	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Rankine Oranı K	Sürtünme Katsayısı μ	K. μ
Kısmen sıkıştırılmış nemli bitkisel toprak	15	0.33	0.50	0.165
Suya doymuş bitkisel toprak	18	0.37	0.40	0.148
Kısmen sıkıştırılmış nemli kil	17	0.33	0.40	0.132
Suya doymuş kil	20	0.37	0.30	0.111
Kuru kum	17	0.33	0.50	0.165
Islak kum	20	0.33	0.50	0.165

Yük hesabı yapıldıktan sonra boru üzerinde oluşabilecek olağandışı yükler için güvenlik faktörü unsuru devreye sokulur. Uygulamada kullanılan güvenlik faktörleri çok çeşitlidir. Çelik donatısı olmayan bir boru numunesi için tavsiye edilen güvenlik faktörü değerleri 1.2-1.5 arasında değişir. Güvenliği yüksek tutmak amacıyla değer 1.5 olarak alınabilir. Betonarme borularda tavsiye edilen güvenlik faktörü değeri genellikle 1.0'dir (Balkaya, 2002).

Beton boruların gevrek özelliğinden dolayı kırılma mukavemeti öne çıkmaktadır. İller bankası beton/betonarme boru ve bağlantı parçaları özel şartnamesi (2009)'da, lastik ve entegre contalı boruların test minimum kırılma yükleri aşağıda Çizelge 3, Çizelge 4, Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilmiştir. Contalar, boruların birleşim kısımlarında akış esnasındaki sızmanın önlenmesi ve esnek bağlantının sağlanması amaçlı araçlardır. Boruların bağlantı bölgelerine imalat esnasında yerleştirilene entegre conta, saha uygulaması sırasında yerleştirilene lastik conta denilmektedir. Entegre contalı ve lastik contalı boruların üretim süreçlerinde farklılık bulunduğundan yüklere karşı dayanımları da farklı olmaktadır. Çizelgelerde belirtilen dayanım sınıfı, borunun enine doğrultuda birim uzunlukta yük taşıma kapasitesidir ve boru çapı arttıkça bu değer azaldığı gözlenmektedir. Borunun taşıma gücü hesabında her(m) uzunluğu minimum kırılma yükü yani tepe yükü deney sonucu olarak alınır.

Çizelge 3. Lastik contalı Ø 150- Ø 600 beton borularda taşıma gücü deneyinde en küçük kırılma yükleri ve dayanım sınıfları (İller Bankası, 2009)

Table 3. Minimum breaking loads and strength classes in the bearing capacity test of Ø 150- Ø 600 concrete pipes with rubber gaskets (İller Bankası, 2009)

Anma Çapı(mm)	Borunun Her(m) Uzunluğu Minimum Kırılma Yükü(kN/m) (Tepe Yükü)	Dayanım Sınıfı (Tepe Yükü / İç Çap) (kN/m)
Ø 150	26	173
Ø 200	27	135
Ø 300	30	100
Ø 400	32	80
Ø 500	35	70
Ø 600	38	63

Çizelge 4.Entegre contalı Ø150- Ø600 beton borularda taşıma gücü deneyinde en küçük kırılma yükleri ve dayanım sınıfları (İller Bankası, 2009)

Table 4. Minimum breaking loads and strength classes in the bearing capacity test of Ø150- Ø600 concrete pipes with integrated gaskets

Anma Çapı(mm)	Borunun Her(m) Uzunluğu Minimum Kırılma Yükü(kN/m) (Tepe Yükü)	Dayanım Sınıfı (Tepe Yükü / İç Çap) (kN/m)
Ø 150	38	253
Ø 200	45	225
Ø 300	48	160
Ø 400	54	135
Ø 500	60	120
Ø 600	65	108

Çizelge 5. Lastik contalı Ø 500- Ø 2400 betonarme borularda taşıma gücü deneyinde en küçük kırılma yükleri ve dayanım sınıfları (İller Bankası, 2009)

Table 5. Minimum breaking loads and strength classes in the bearing capacity test of Ø 500- Ø 2400 reinforced concrete pipes with rubber gaskets

Anma Çapı(mm)	Borunun Her(m) Uzunluğu Minimum Kırılma Yükü(kN/m) (Tepe Yükü)	Dayanım Sınıfı (Tepe Yükü / İç Çap) (kN/m)
Ø 500	41	82
Ø 600	44	73
Ø 800	52	65
Ø 1000	65	65
Ø 1200	73	61
Ø 1400	77	55
Ø 1600	86	54
Ø 1800	90	50
Ø 2000	105	53
Ø 2200	115	52
Ø 2400	125	52

Çizelge 6. Entegre contalı Ø 800- Ø 2400 betonarme borularda taşıma gücü deneyinde en küçük kırılma yükleri ve dayanım sınıfları (İller Bankası, 2009)

Table 6. Minimum breaking loads and strength classes in the bearing capacity test of Ø 800- Ø 2400 reinforced concrete pipes with integrated gaskets (İller Bankası, 2009)

Anma Çapı(mm)	Borunun Her(m) Uzunluğu Minimum Kırılma Yükü(kN/m) (Tepe Yükü)	Dayanım Sınıfı (Tepe Yükü / İç Çap) (kN/m)
Ø 800	72	90
Ø 1000	80	80
Ø 1200	85	71
Ø 1400	92	66
Ø 1600	103	64
Ø 1800	108	60
Ø 2000	126	63
Ø 2200	138	63
Ø 2400	150	63

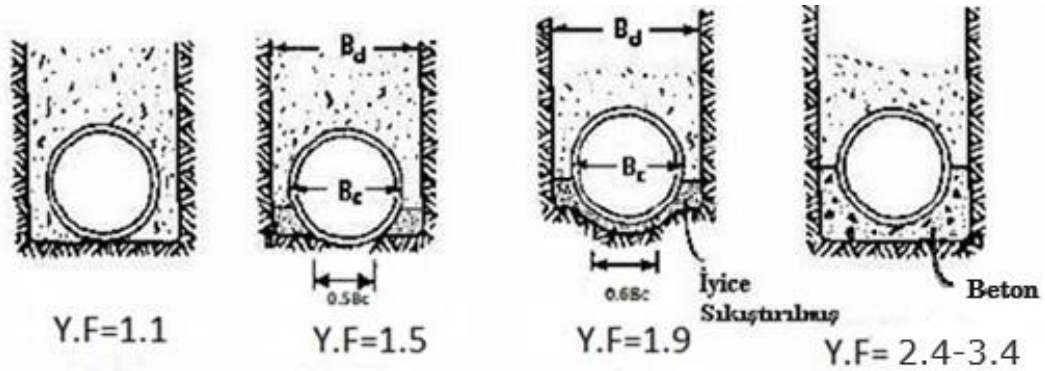
Beton boruların taşıma gücünün belirlenmesi için birkaç test metodu olmakla birlikte, üç kirişli taşıma gücü testinin kullanımı yaygındır (Şekil 4).



Şekil 4. Üç Kirişli Taşıma Deneyi

Figure 4. Three-Beam Load Experiment

Beton borular, çevresine yapılacak yataklama ile testlerde elde edilen dayanım değerlerinin üzerinde yükleri taşıyabilmektedir. Sahadaki yüklenme şartları testlerdekinden farklı olmakta ve yanıl zemin desteğiyle boruların yük taşıma kapasiteleri artmaktadır. Zemin malzemesinin saha taşıma gücüne sayısal etkisi yataklama faktörü (YF) olarak belirtilmektedir (Şekil 5). Yataklama faktörü; müsaade edilmeyen durumda 1.1, sıradan yataklama halinde 1.5, birinci sınıf yataklamada 1.9, beton yataklamada ise 2.4-3.4 arasında değerler aldığı kabul edilmektedir. Beton yataklamanın etkisi dökülecek betonun sınıfına göre değişebileceğinden değer aralığı olarak verilmiştir. Laboratuvar ortamında elde edilen taşıma gücü dayanımları ile yataklama faktörü çarpımları sahada taşınabilecek maksimum yükleri vermektedir (Ayalp, 2006; Balkaya 2002; Spangler, 1966).



Şekil 5. Çeşitli Yataklama Türlerinde Yataklama Faktörleri (Balkaya, 2002)

Figure 5. Bedding Factors in Various Bedding Types (Balkaya, 2002)

Bu çalışma vaka uygulamalarında Marston'un formülü kullanılarak yük hesabı yapılmıştır. Ayrıca Çizelge 3, Çizelge 4, Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilen beton boru minimum kırılma yükleri ile yataklama faktörü değeri çarpılarak saha taşıma gücü hesaplanmıştır. Buradan tasarımı sağlayan yataklama biçimi belirlenmiştir. Müsaade edilmeyen yataklama yani faktör değerinin 1.1 olduğu durum göz önünde tutulmamıştır.

Trafik Yükünün Boru Üzerine Etkisinin Bulunması (Calculation of the Effect of Traffic Load on the Pipe)

Borular genellikle insanların yoğun yaşadığı yerlerde bulunduğundan otoyol veya demiryolu gibi ulaşım araçlarının geçtiği yol zeminine inşa edilebilirler. Bu sebeple boruları tasarlarırken zemin yükünün yanında trafikten kaynaklı yük toplamı göz önünde bulundurulur. Gömülü borunun trafik yüküne yakın derinlikte olması, yük etkisinin daha çok hissedilmesine yol açar. Derinlik arttıkça tekerlek yüklerinin etkisi azalmaktadır (Sağlamer ve Balkaya, 2004).

Borulara etkileyen trafik yükünün Boussinesq metodu ile saha uygulamasında pratik hesabı aşağıdaki formülle yapılabilmektedir (CivilWeb, 2022). Formülde m^2 ye düşen yük bulunur ve bu değer boru dış çapı ile çarpılırsa birim boru üzerine düşen yük elde edilir (Eşitlik 2). Formülde yer alan trafik durumuna göre tekerlek başına düşebilecek yüklerde Çizelge 7’de verilmiştir.

$$W_t = \frac{3 \cdot P_t}{2 \cdot \pi \cdot H^2} \left[\frac{1}{1 + (r_t/H)^2} \right]^{5/2} \cdot Bc \quad (2)$$

W_t : Boruya etkileyen trafik yükü (kN/m)

P_t : Eksenel tekerlek yükü (kN)

Bc : boru dış çapı (m)

r_t : Tekerlek yükünün boru merkez düzlemine yatay mesafesi (m)

Çizelge 7. Trafik Yükleri (Kalde, 2019)

Table 7. Traffic Loads (Kalde, 2019)

Sınıflar	Toplam Yük(kN)	Tekerlek Başına Maksimum Yük(kN) (P_t)
Ağır Trafik	600	100
Orta Trafik	300	50
Hafif Trafik	120	20
Otomobil	30	10

Çalışma kapsamında vaka uygulamasında tekerlek yükünün boru merkez düzleminde yer aldığı kabul edilerek r_t değeri sıfır olarak alınmıştır. Böylece tasarımın emniyetli tarafta kalması ve formülün daha sade bir hal alması hedeflenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Beton Borular (Concrete Pipes)

Beton boruların üretimi için kullanılan Türk Standardı TS 821 EN 1916’dır. Buna göre Ø150 –Ø600 arası çaplarda beton olarak imal edilirken, Ø600-Ø2400 arası oval hasır çelik takviyeli olarak üretimi yapılmaktadır. Beton malzemesinin teknik özellikleri bu borularda da görülmektedir. Basınç yüklerine karşı oldukça iyi performans gösterebilmekte ve rijitliklerini uzun yıllar sürdürebilmektedirler. Beton borular üretim tesislerinde “İller Bankası Beton/Betonarme Boru ve Bağlantı Parçaları Özel Teknik Şartnamesi” kurallarına göre imal edilirler (Şekil 6). Bu şartnameye göre borularda olması gereken minimum kırılma yükleri Bölüm 2.3. ‘de verilmiştir

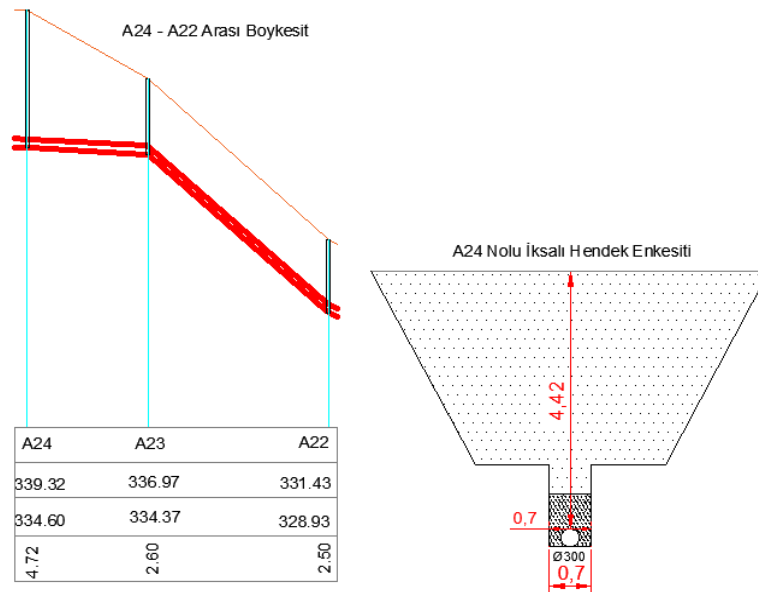


Şekil 6. Üretim Aşamasında Bulunan Beton Boru
Figure 6. Concrete Pipe in Production Phase

Vaka Uygulaması (Proposed Method)

Beton boruların zemin yüklerine karşı performansı, Karabük Üniversitesi Atıksu ile Safranbolu Yağmursuyu Şebeke projelerinin riskli olabilecek boru kesitleri üzerinde değerlendirilmiştir. Zemin yüklerine karşı boru tasarımında, literatürdeki yöntemlerin uygulamada kullanımı ele alınmıştır. Projelerde yer alan en yüksek gömülme derinliğine sahip boru kesitleri için hesaplar yapılmıştır. Beton-betonarme boruların tasarım yükü ve beton-betonarme boru özel şartnamesinde tesislerde bulunması gereken minimum test yükleri vasıtasıyla 3 tip yataklama etkisinden güvenli tarafta kalanlar tablolarla belirlenmiştir. Güvenli tarafta kalmayan tasarımlar kırmızıyla boyanarak belirtilmiştir. Hesaplamalarda beton yataklama durumunda faktör değer aralığı, minimum değeri 2.4 olarak kabul edilmiştir.

Şekil 7'de Karabük Üniversitesi kampüsünde bulunan atık su hattının 22 ve 24 nolu bacalar arası Ø300 boru ile döşenmiş boy kesiti ve hesap yapılan 24 nolu bacada çıkan boru en kesiti verilmiştir.



Şekil 7. Karabük Üniversitesi Atıksu 22-24 Bacalar Arası En-Boy Kesitler
Figure 7. Karabuk University Wastewater 22-24 Cross Sections

- 24 nolu baca çıkışı, Ø300 beton boru tetkik;

$$H=4.42m$$

$$B_d = 0.7 \text{ m (İksalı hendekte hendek genişliği) (ÇSB yönetmelik)}$$

$$B_c = 0.38 \text{ m}$$

$$\gamma: 20kN/m^3 \text{ Killi zemin (Suya doymun olduğu varsayılarak)}$$

$$K: 0.3 \text{ Suya doymun killi zemin}$$

$$\mu: 0.37 \text{ Suya doymun killi zemin}$$

$$W = \frac{\gamma B_d^2 \left(1 - e^{-2K\mu \left(\frac{H}{B_d}\right)}\right)}{2K\mu} = \frac{20 \cdot 0.7^2 \left(1 - e^{-2 \cdot 0.3 \cdot 0.37 \cdot \left(\frac{4.42}{0.7}\right)}\right)}{2 \cdot 0.3 \cdot 0.37} = 33.277 \text{ kN/m}$$

Boru düzlemi üzeri yolda ağır trafik yükü olduğu kabul edilirse, trafik yükü;

$$W_t = \frac{3 Pt B_c}{2 \pi H^2} = \frac{3 \cdot 100 \cdot 0.38}{2 \cdot \pi \cdot 4.42^2} = 0.928 \text{ kN/m bulunur.}$$

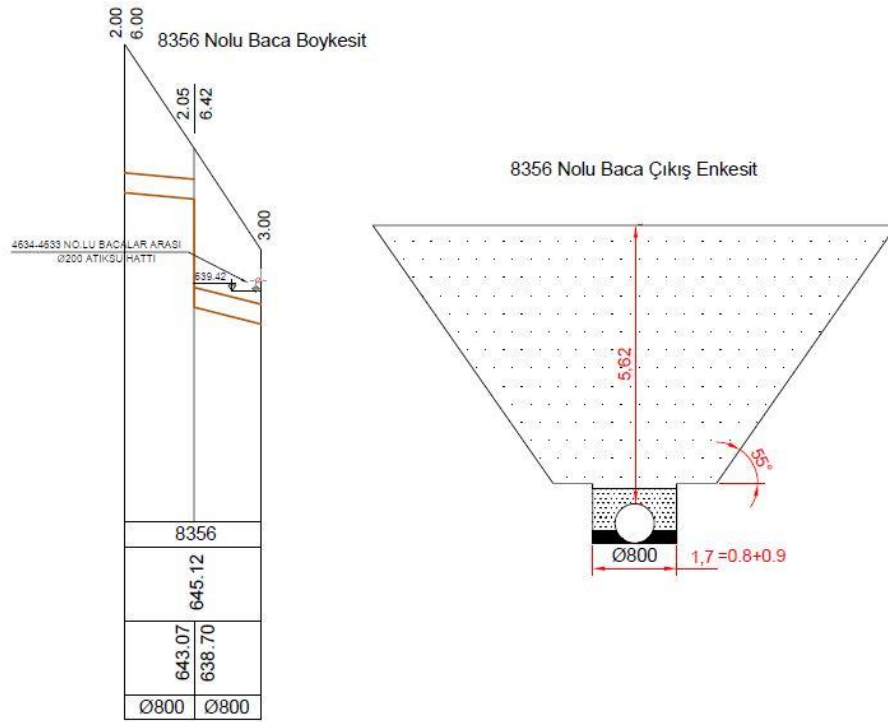
Toprak yükü ve trafik yükü toplamı 34.20 kN/m olarak elde edilmiştir. Beton borularda güvenlik faktörü 1.5 alınmakta ve toplam yükü çarpımı tasarım yükünü vermektedir. Elde edilen tasarım yükü 51.3 kN/m olmaktadır. Ø300 lastik ve entegre contalı beton boruların taşıma gücü deneyindeki minimum kırılma yükleri ve yataklama faktörüyle taşıyabileceği yükler ayrı ayrı tablolarda verilmiştir.

Çizelge 8. 24 nolu baca çıkışı lastik ve entegre contalı Ø300 beton boru tetkik sonuçları

Table 8. Ø300 concrete pipe inspection results with chimney outlet no.24 rubber and integrated gasket;

Conta Türü	Toplam Yük(kN/m)	Tasarım Yükü(kN/m)	Minimum Deneş Taşıma Gücü(kN/m)	Yataklama Faktörü Etkisi(Y.F)		
				Sıradan Yataklama (1.5)	1 Sınıf Yataklama (1.9)	Beton Yataklama (2.4)
Lastik Contalı	34.20	51.30	30	45	57	72
Entegre Contalı	34.20	51.30	48	72	91.2	115.2

Bir diğér proje Safranbolu yağmursuyu hattında ise 8356 nolu bacadan çıkan Ø800 betonarme boru üzerinde maksimum dolgu yüksekliğı oluşmaktadır. Şekil 8'de 8356 nolu bacaya ilişkin en-boy kesitler verilmiştir.



Şekil 8. Safranbolu Yağmursuyu Şebekesi 8356 Nolu Baca En-Boy Kesitler

Figure 8. Safranbolu Stormwater Network Chimney No. 8356 Across Sections

- 8356 nolu baca çıkışı, Ø800 betonarme boru tetkik;

$H=5.62\text{m}$

$B_d = 1.7 \text{ m (D+0.9)}$ (hendek genişliği <60)

γ : 20kN/m^3 Kum zemin (Suya doymun olduğu varsayılarak)

K : 0.33 Suya doymun kum zemin

μ : 0.5 Suya doymun kum zemin

$$W = \frac{\gamma B_d^2 \left(1 - e^{-2 K \mu \left(\frac{H}{B_d}\right)}\right)}{2 K \mu} = \frac{20 \cdot 1.7^2 \left(1 - e^{-2 \cdot 0.33 \cdot 0.5 \left(\frac{5.62}{1.7}\right)}\right)}{2 \cdot 0.33 \cdot 0.5} = 116.318 \text{ kN/m}$$

Boru üzerinde trafik yükü bulunmadığından toprak yükü toplam yük olarak kabul edilir. Betonarme borularda güvenlik faktörü 1 olarak tavsiye edildiğinden tasarım yükünü 116.318 kN/m olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 9. 8356 nolu baca çıkışı lastik ve entegre contalı Ø800 boru tetkik sonuçları

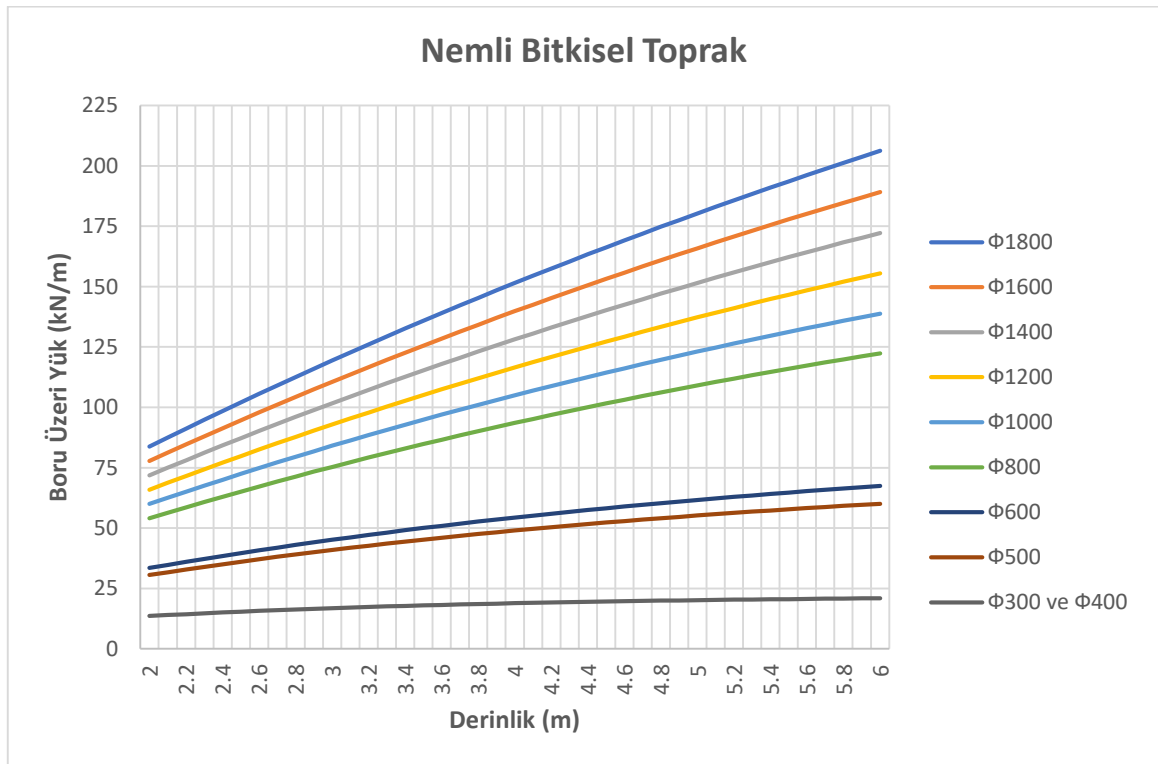
Table 9. Inspection results of Ø800 concrete pipe with 8356 chimney outlet rubber and integrated gasket

Conta Türü	Toplam Yük(kN/m)	Tasarım Yükü(kN/m)	Minimum Deneş Taşıma Gücü(kN/m)	Yataklama Faktörü Etkisi(Y.F)		
				Sıradan Yataklama (1.5)	1 Sınıf Yataklama (1.9)	Beton Yataklama (2.4)
Lastik Contalı	116.318	116.318	52	78	98.8	124.8
Entegre Contalı	116.318	116.318	72	108	136.8	172.8

ANALİTİK BULGULAR (ANALYTICAL FINDINGS)

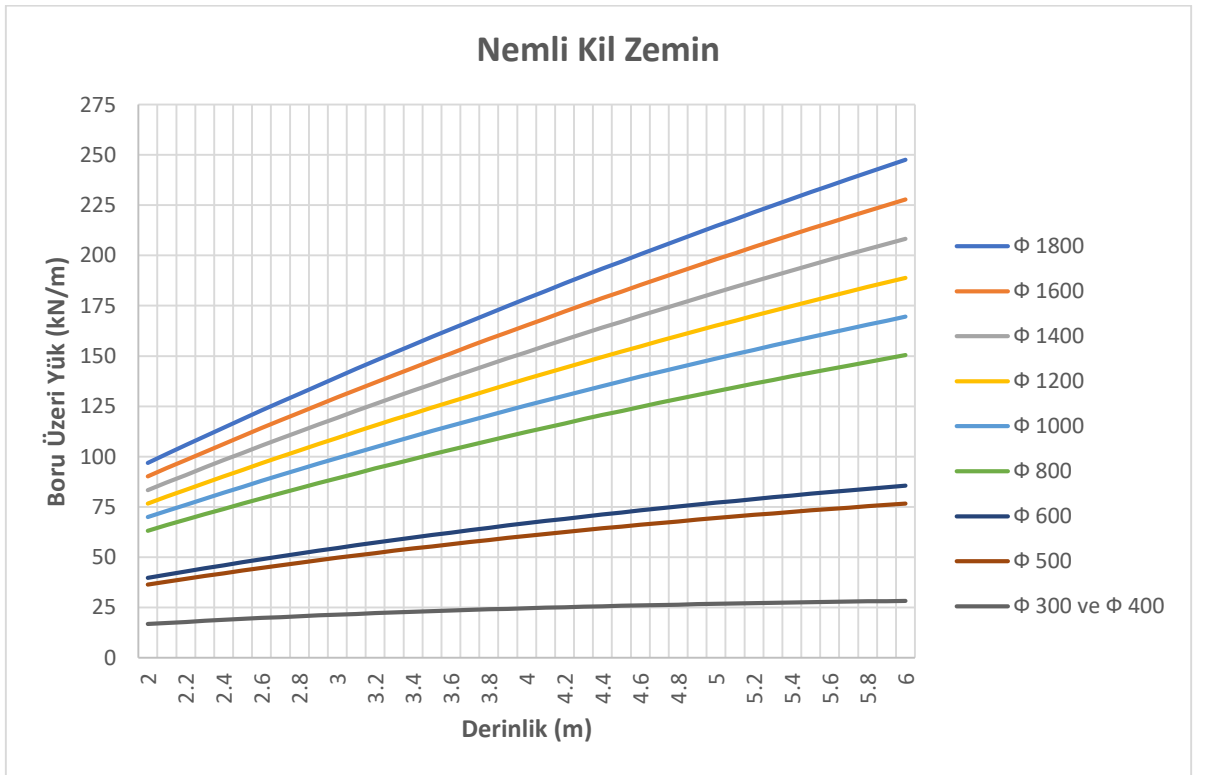
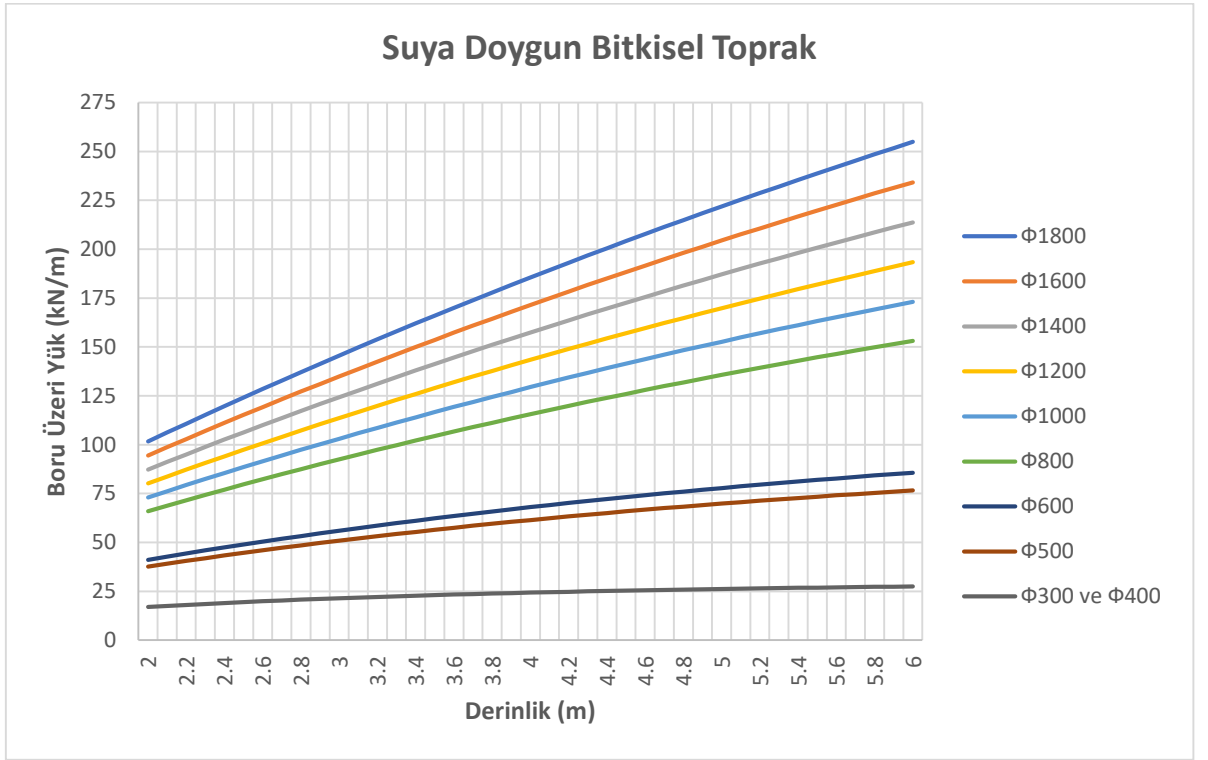
“Gömülü Borulara Etkiyen Zemin Yüklerinin Bulunması” başlıklı Ayalp (2006) çalışmasında boru üzeri gömülme yüksekliğinin 2 m’yi geçtiği durumlarda boru mukavemetinin dolgu yükünü taşıyacak nitelikte olması vurgusu yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında Marston’un değişen yerel zemin parametreleri ve yönetmelikte belirtilen maksimum hendek genişliği baz alınarak, sıklıkla kullanılan Ø300- Ø1800 arası beton boruların artan gömülme derinliği ile tasarım yükleri hesaplanmıştır.

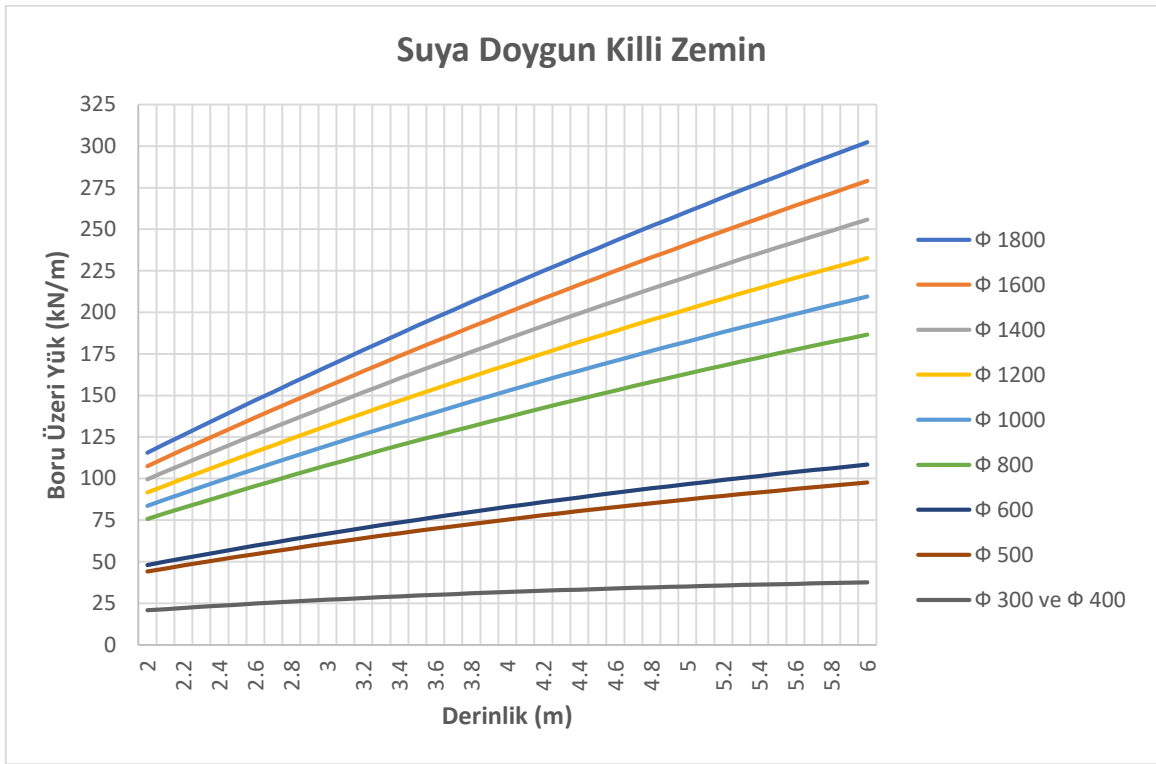
Beton borularda Marston formülünde yer alan yerel zemin değerlerine göre; birim ağırlık, Rankine oranı ve sürtünme katsayısı ve boru çapına göre maksimum hendek genişliği belirlenerek gömülme derinliğiyle boru üzerinde yüklerin değişimi grafiklerle gösterilmiştir. (Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14) Aşağıda verilen grafiklerden yerel zemin ve proje parametrelerine göre gelebilecek yükler belirlenerek, beton borunun yataklama biçimine karar verilebilir ve/veya yüksek dayanımlı boru üretim kararı alınabilir.



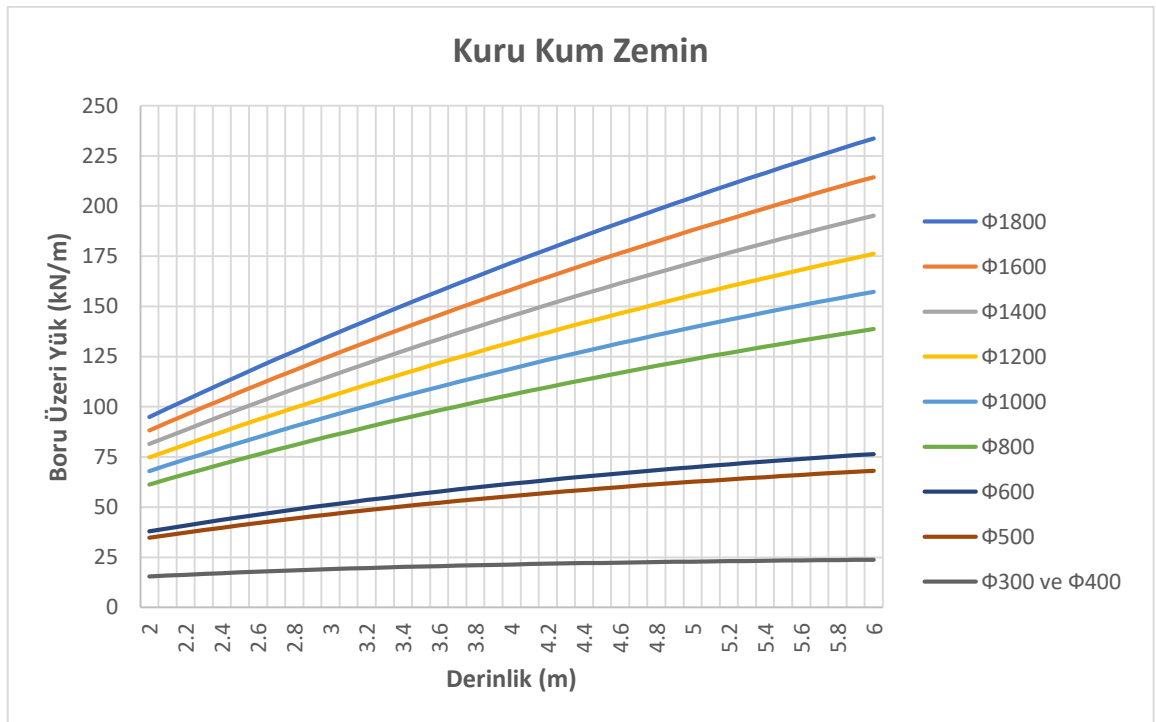
Şekil 9. Nemli Bitkisel Zeminde Gömülme Derinliği -Yük Grafiği

Figure 9. Burying Depth-Load Graph in Moist Vegetal Soil

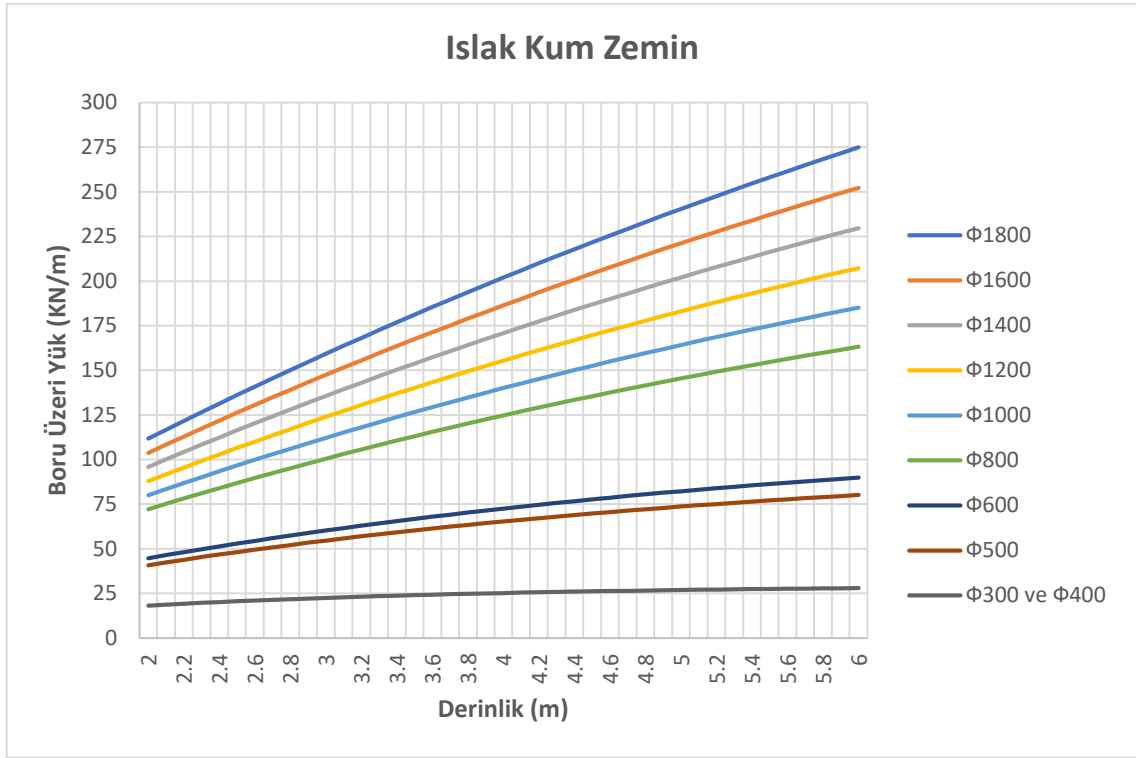




Şekil 12. Suya Doygun Kil Zeminde Gömülme Derinliği-Yük Grafiği
 Figure 12. Buried Depth-Load Graph in Water-Saturated Clay Soil



Şekil 13. Kuru Kum Zeminde Gömülme Derinliği-Yük Grafiği
 Figure 13. Buried Depth-Load Graph in Dry Sand Soil



Şekil 14. Islak Kum Zeminde Gömülme Derinliği-Yük Grafiği

Figure 14. Buried Depth-Load Graph in Wet Sand

SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Çalışmada kapsamında yapılan vaka analizi ve bulgularda verilen grafikler irdelendiğinde aşağıdaki tespitlerde bulunulmuştur.

- Ø300-Ø400 çaplı borularda hendek genişliği aynı olmasından yükler eşit saptanmıştır. Bu halde negatif kemerlenme etkisinin boru çapından ziyade hendek genişliğinden kaynaklandığı yorumu yapılabilir. Ancak boru çapı hendek genişliğini belirleyen en önemli parametredir. Yönetmelik gereği Ø400'den Ø500'e ve Ø600'den Ø800'e geçen borularda hendek genişliği belirlemedeki ani değişimler grafiklere yansımıştır. Belirtilen çaplar arası yük eğrilerinde bariz yük farkları oluşmaktadır.
- Hendeklerde negatif kemerlenme etkisi sebebiyle hendek genişliğini, iş sağlığı ve güvenliği önlemlerini göz önünde tutarak minimum seviyede tutulmaya çalışılmalıdır. Grafiklerde verilen yükler yönetmelikte verilen maksimum hendek genişliklerine göre hesaplanmıştır. Bu hendek genişliklerinden daha küçük genişlikler hesabı emniyetli tarafta tutacaktır.
- Boru çapı yükselmesiyle birlikte gömülme derinliği etkilerinin arttığı gözlenmektedir yani derinlik arttıkça çaplarda orantılı yük artışı oluşmamaktadır. Grafiklerde verilen derinlik-etkiyen yük eğrileri eğimine bu durum yansımıştır. Buradan yüksek çaplı betonarme borularda derinlik arttıkça borunun göçme emniyetine karşı daha dikkat edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.
- Boru üzeri gelebilecek zemin yüklerinde en elverişsiz durum, yerel zeminin suya doymun kil olduğunda görülmüştür.
- Yataklama faktörü, beton borunun zemin yükleri altında performansında son derece önemlidir. Örnek uygulamalarda beton yatak oluşturma işleminin, ekonomik olmasa da ağır zemin yüklerinde iyi sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Beton yataklamadan maksimum performansı alabilmek için beton kalitesi artırımı değerlendirilebilir.
- Hesaplamalarda yataklama faktörlerinden herhangi biri mukavemeti sağlamıyorsa veya emniyetli tarafta kalmayan bir yataklama yöntemiyle çalışılmak istenildiğinde; şartnamedeki minimum kırılma yükü yerine üretim tesisi test sonuçları doğrultusunda yataklama faktörleriyle hesap yenilenebilir.

Eğer bu durumda da tasarım emniyetsiz tarafta kalıyorsa; boru üretim tesisinden çimento dozu artırılmış ya da çeşitli katkılarla dayanımı yükseltilmiş betonla üretim yapılması veya donatı seviyesi daha yüksek boru imalatı talep edilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışmada kullanılan Safranbolu Yağmursuyu Projesini temin ettiğimiz Kastamonu İller Bankası Bölge Müdürlüğü'ne ve Karabük Üniversitesi Atıksu Projesini temin ettiğimiz KBU Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'na teşekkür ederiz.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT of INTEREST)

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

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ayalp, Ömer G., "Gömülü Borulara Etkiyen Zemin Yüklerinin Bulunması", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2006).
- Balkaya, M., "Zemine Gömülü Boruların Mühendislik Davranışı" Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2002).
- Balkaya, Müge, and Ahmet Sağlamer. "The effect of trench width on the behavior of buried rigid pipes." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1637. No. 1. American Institute of Physics, 2014. <https://doi.org/10.1063/1.4904565>
- Bashir, R. "Analysis and design of buried pipelines." *Diss. King Fahd University of Petroleum and Minerals* (2000).
- CivilWeb Spreadsheets, "Loads on Buried Pipes", <https://civilweb-spreadsheets.com/drainage-design-spreadsheets/buried-pipe-design-spreadsheet/loads-on-buried-pipes/> (2022)
- Çoban, S., "İçme suyu ve kanalizasyon boru hatlarının deprem performansı." Yüksek Lisans Tezi, *Maltepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2014).
- Gazete, Resmi "Atıksu Toplama ve Uzaklaştırma Sistemleri Hakkında Yönetmelik", *T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sayı 29940* (2017).
- Gazete, Resmi. "Yağmursuyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Hakkında Yönetmelik", *T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sayı 30105* (2017).
- İller Bankası, "İller Bankası Beton/Betonarme Boru ve Bağlantı Parçaları Özel Teknik Şartnamesi" *T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sayı 17/217* (2009)
- Kalde Boru Sistemleri, "Koruge Teknik Katalog", http://www.zengileryapi.com.tr/katalog/kalde1_katalog.pdf. (2019)
- Kasap A. "Kanalizasyon ve İçme Suyu İnşaatlarında Kullanılan Boru Tiplerine Göre Maliyet Analizi ", <https://www.ilbank.gov.tr/index.php?Sayfa=UzmanlikTezleri> (2016)
- Moser, Alma P. and Steven L. Folkman. "Buried pipe design", Vol. 2. New York: *McGraw-Hill* (2001).
- Sağlamer, A., M. Balkaya, M., "Gömülü Boru Hatlarının Statik ve Dinamik Yükler Altındaki Davranışı." *İMO Teknik Dergi* (2004).
- Spangler, M. G. "Soil engineering" *International Textbook Co. Scranton, Po* (1966).



KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİNE AİT BİNALAR İÇİN ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ ARTIRMAYA YÖNELİK ÖRNEK BİR ÇALIŞMA

¹Gülin GENÇOĞLU KORKMAZ , ²Ahmet SAMANCI 

¹Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, KONYA,
TÜRKİYE

²Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

¹ggkorkmaz@ktun.edu.tr, ²asamanci@erbakan.edu.tr

(Geliş/Received: 18.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.04.2022)

ÖZ: Dünyada ve ülkemizde artan enerji maliyetleri, fosil yakıtların tükeniyor olması, yenilenebilir enerji kaynaklarında da henüz istenen kurulu güç potansiyeline erişilememiş olması, enerjide dışa bağımlılık ve çevresel endişeler binalarda enerjinin verimli kullanımını zorunlu kılmıştır. Özellikle kamu kurum ve kuruluşlarından başlanmak üzere tüm yapılarda enerji tasarrufu yoluna gidilmesi, enerjinin verimli kullanılması ve hatta var olan enerjinin daha sonra kullanılmak üzere depolanması ülkemizin enerji verimliliği ve yönetimi konusunda üst sıralara ilerlemesine yardımcı olacaktır. Üniversitelerde enerjinin verimli kullanılması ile hem enerji maliyetlerinin üniversite bütçesi üzerindeki yükü hafifletilebilecek, hem de sürdürülebilir üniversite kriterleri için önemli bir adım atılabilecektir. Bu amaçla, bu çalışmada Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi binasının (KTUN) enerji açısından mevcut durumu ortaya çıkarılmış ve enerji verimlilik potansiyeli incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, üniversitenin 2020-2021 yılı enerji tüketim değerinin sırasıyla 482 ve 502 Ton Eşdeğer Petrol (TEP) olduğu bununla birlikte yıllık CO₂ salınımının 2020 yılında 135 toneşd.CO₂ ve 2021 yılında 141 toneşd.CO₂ olduğu belirlenmiştir. Bir başka deyişle bu rakamlar sırasıyla 1164 ton ve 1215 ton karbon ayak izine karşılık gelmektedir. Yapılan çalışmadan yola çıkılarak başta kamu kurum ve kuruluşlarında olmak üzere tüm yapılarda enerji mevzuatlarına göre enerji tasarrufu, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili çalışmalara bir an önce başlanması ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği, Fosil yakıtlar, Karbon ayak izi, Yenilenebilir enerji

A Case Study on Increasing Energy Efficiency for Buildings of the Faculty of Engineering and Natural Sciences of Konya Technical University

ABSTRACT: Increasing energy costs in the world and in our country, the depletion of fossil fuels, the fact that the desired installed power potential in renewable energy sources has not yet been reached, dependence on foreign energy and environmental concerns have made it necessary to use energy efficiently in buildings. Especially starting from public institutions and organizations, going to the way of energy saving in all structures, efficient usage of energy and even storing the existing energy for later use will help our country to move to the top in energy efficiency and management. With the efficient usage of energy in universities, the burden of energy costs on the university budget will be alleviated, and an important step will be taken for sustainable university criteria. For this purpose, in this study, the current state of the Konya Technical University Faculty of Engineering and Natural Sciences (KTUN) building was revealed in terms of energy and its energy efficiency potential was examined. According to the results, it has been determined that the energy consumption value of the university for the year 2020-2021 is 482 and 502 Tons Equivalent Petroleum (TEP), respectively, and the annual CO₂ emissions are 135 toneq.CO₂

in 2020 and 141 toneq.CO₂ in 2021. In other words, these figures correspond to a carbon footprint of 1164 tons and 1215 tons, respectively. Based on the work done, studies on energy saving, energy efficiency and renewable energy sources should be started as soon as possible and necessary precautions should be taken according to energy regulations in all structures, especially in public institutions and organizations.

Keywords: Carbon footprint, Energy efficiency, Fossil fuels, Renewable energy

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkelerin gelişmişliklerinde kalkınmalarını gösteren ve itici gücü oluşturan unsurların başında enerji gelmektedir. Enerji, ısınma ihtiyacının karşılanmasının dışında temel üretim faktörlerinden biridir. Bu nedenle, ülkeler ihtiyaç duydukları enerjiyi güvenli, sürekli, kalıcı, ucuz, kaliteli, temiz ve doğa dostu olarak sağlamak; enerji kaynaklarını enerji arz güvenliği içinde çeşitlendirmek zorundadırlar. Bu kapsamda, sadece enerjinin sağlanması ve üretilmesi değil, aynı zamanda çevreye duyarlı şekilde temiz enerji kullanımının da sağlanmasına yönelik planlamaların yapılması ve bununla birlikte uygun enerji depolama yöntemleri ile enerjinin gerektiği zaman yeniden kullanılması amacıyla saklanması-depolanması gerekmektedir (Flavin ve Lenssen, 1994). Enerji verimliliği konusu bölgesel, ulusal ve küresel anlamda büyük öneme sahiptir. Ülkemizde, son yıllarda artan nüfus, sanayi ve gelişen teknoloji ile birlikte yükselen enerji ihtiyacımız, fosil yakıtların tükeniyor olması, mevcut enerji kaynaklarımızın sınırlı oluşu ve enerjide büyük oranda dışa bağımlı olmamız ülkemizde enerjinin verimli kullanılmasına bununla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ilişkin çalışmaları zorunlu hale getirmiştir. Enerjinin doğru ve verimli kullanılması ile sağlanacak enerji tasarrufu bununla birlikte enerjinin ihtiyaç olması durumunda kullanılması amacıyla fazla olduğu dönemde uygun enerji depolama teknikleri ile depolanması aslında enerjinin daha ucuza mal edilme yöntemidir ve ülke ekonomisi üzerindeki enerjiden kaynaklanan maliyetlerin düşürülmesinin yanı sıra sera gazlarının neden olduğu iklim değişikliklerinin azaltılmasına ve enerji arz güvenilirliğinin artırılmasına katkıda bulunacaktır (Aydin, 2016). Hastane, alışveriş merkezi, sanayi kuruluşları, kamu kurumları, eğitim veren binalarda tüketilen enerjinin dünyada olduğu gibi ülkemizde de toplam enerji tüketimindeki payı oldukça yüksektir (Yılmaz, 2006). Dolayısıyla yapılardaki enerji tüketiminin azaltılması, yapıların dış cephelerindeki yalıtımın standartlarla belirlenmiş iklim şartlarına göre tasarlanması ve ısı kayıp kaçaklarının en aza indirilmesi ile ısıtma için harcanan enerjinin azaltılması, kullanılan yakıtın kaliteli olması, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek binalarda ısınma ve sıcak su ihtiyacı için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, gün ışığından faydalanmanın en uygun düzeye taşınması önem arz etmektedir. Bununla birlikte, binalarda verimli aydınlatma ve elektrikli cihazların kullanılması ve doğal havalandırmanın bina tasarımında kurgulanması gibi uygulamalar günümüzde yapılarda enerjinin verimliliği ve tasarrufu konularında ele alınan önemli uygulamalardır (Çakmanus ve diğ., 2010).

Bu araştırmada Konya Teknik Üniversitesi (KTUN) Alaeddin Keykubat Kampüsü'nde yer alan Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi binası enerji tüketimi ve verimliliği konusu incelenmiştir. Bu fakülte Selçuk Üniversitesi'nden (S.Ü.) 2018 yılında ayrılmış ancak hala aynı kampüs içerisinde yer aldığından ayrı elektrik ve su sayaçları bulunmasına karşın doğalgazı S.Ü'den karşılamakta, S.Ü'nin firmalara ödediği ücret üzerinden kullanım bedeli kadar, toplam doğalgaz fatura tutarı 12 aya bölünerek yıl boyunca S.Ü'ne ödeme yapmaktadır. S.Ü'ne ait ana ısı merkezinden ısınma işlemi sağlandığından ayrı bir doğal gaz saati bulunmamaktadır ve merkezi olarak ısınma işlemi gerçekleştirilmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

52400 m² kapalı alana sahip olan bu fakülte de yaklaşık 400 akademik ve idari personel görev yapmaktadır. 5600 lisans, 1955 lisansüstü öğrencisi bulunmaktadır, ancak her lisansüstü öğrencinin düzenli olarak gelmediği, laboratuvar analiz tekniklerini kullanmadığı, elektrik, doğalgaz ve su tüketiminde bulunmadığı düşünüldüğünden bu çalışmada yapılan hesaplamalarda ortalama öğrenci

sayısı 7000 olarak alınmıştır. Öğrenci sayısı her geçen gün artan üniversitede enerji ihtiyacı da giderek artmaktadır. İhtiyaç duyulan enerjiyi elektrik, su ve doğalgaz kullanarak karşılayan fakültede ısı ve elektriksel enerji tüketen pek çok sistem mevcuttur. Başta kazan olmak üzere basınçlı hava sistemleri, elektrik motorları, ısıtma ve soğutma sistemleri, aydınlatma sistemleri hem öğrencilerin hem de akademisyenlerin laboratuvarlarda kullandıkları analitik cihazlar ve çeşitli ekipmanlar, gibi yoğun enerji tüketen pek çok sayıda sistem bulunmaktadır. Fakültenin son 2 yıla ait elektrik, doğalgaz ve su tüketim faturaları incelenmiş buna göre yıllık ortalama 492 TEP enerji tüketimi gerçekleştiği görülmektedir. Çalışmada, incelenen yıllar için yıllık enerji tüketim analizi, enerji türleri ve toplam etkisi ile CO₂ salınım miktarı dikkate alınarak incelenmiştir. Ayrıca, aylık bazda yapılan çalışmalarda ay ay fakültenin tüketim değerleri incelenerek uzaktan eğitim dönemi (2020-2021) ve yüz yüze eğitim (2021-2022) dönemlerindeki değişkenlikler incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan enerji tüketim bilgileri kurum Yapı İşleri Daire Başkanlığı kaynaklarından alınmıştır. Yerleşke binalarının ve enerji tüketim noktalarının tasarruf potansiyellerinin incelenmesi için çeşitli ölçüm cihazları kullanılmış (dijital termometre ve termal kamera) ve tüm ölçümler 25.12.2021-31.12.2021 tarihleri arasında düzenli olarak alınmıştır. Düzenli alınan tüketim verileri sayesinde fakültenin enerji tüketim karakteristiği hakkında belirli periyotlarda analizler yapılmıştır. Verimlilik artırıcı projeler ve fırsatlar listesi için hesaplama ve değerlendirmeler yapılırken Çizelge 1 ve 2 de verilen referans değerler kullanılmıştır.

Çizelge 1. Referans Değerler Tablosu (30.12.2021 tarihli, Dolar kuru:13 TL)

Table 1. Table of Reference Values (dated 30.12.2021, USD exchange rate: 13 TL)

Enerji Birim Fiyat	2020	2021
Elektrik (\$ / kWh)	0,69 \$	0,92 \$
Doğalgaz(\$/m ³)	1,69\$	2,15 \$
Su (\$ / m ³)	0,53 \$	0,60 \$

Çizelge 2. Çevrim Tablosu

Table 2. Conversion Table

Çevrim Birimleri (kWh, m ³ , TEP, kcal)	
1 kWh Elektrik	8,6x10 ⁻⁵ TEP
1 Ton Doğalgaz	82,5x10 ⁻⁵ TEP
1 TEP	10 ⁷ kcal
1 m ³ su*	6 kWh
1000 lt mazot	0. 84 TEP
1 lt mazot	10 L (ortalama 2021)

*Suyun yerden çıkarılması, iletilmesi, arıtılması vb. yoğun enerji gerektiren işlemler içerdiğinden, 1m³ suyun temini yaklaşık 6 kWh enerji tüketimine eşdeğer kabul edilmiştir.

BULGULAR (RESULTS)

Yıllık Enerji Tüketim (Annual Energy Consumption)

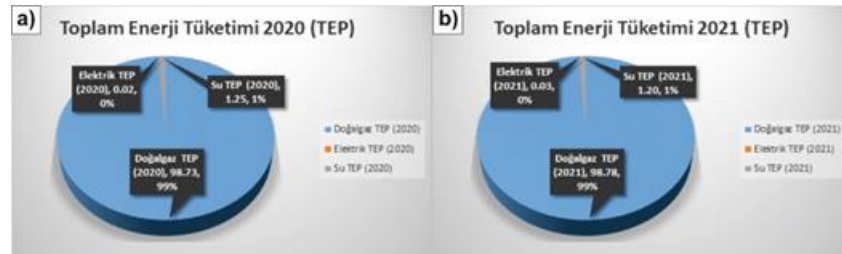
KTUN Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi birbirine bağlı 7 bloktan oluşmaktadır. Bu bloklarda enerji kaynağı olarak elektrik ve doğalgaz kullanılmakta ve yerleşke içinde herhangi bir enerji üretim tesisi bulunmamaktadır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, yerleşke binalarında kullanılan enerji 2020-2021 yılları arasında online-yüzyüze eğitim şekilleri de göz önünde bulundurularak giderek artmıştır. Fakülteye ait 2020-2021 yılları arası toplam enerji tüketimleri (elektrik, su, doğalgaz) Çizelge 3 ve Şekil 1, 2 ve 3 de verilmektedir. Buna göre yıllık toplam enerji tüketimi sırasıyla 482 ve 502 TEP iken, 1000 Kişi Başına Düşen TEP Miktarı sırasıyla 65 ve 68 TEP dir.

Çizelge 3. Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi için son 2 yıla ait yıllık ısıtma ve soğutma derece-gün sayıları ile Toplam Yıllık Enerji Tüketimi değerleri

Table 3. Annual heating and cooling degree-days and Total Annual Energy Consumption values for the last 2 years for Konya Technical University Faculty of Engineering and Natural Sciences

Yıl	Yıllık Isıtma Derece Gün Sayısı (HDD)	Yıllık Soğutma Derece Gün Sayısı (CDD)	Toplam Yıllık Enerji Tüketimi (TEP)	1000 Kişi Başına Düşen TEP Miktarı	1000 m ² Başına Düşen TEP Miktarı
2020	2444	243	482	65	9.2
2021	1989	178	502	68	9.6

Fakülteye ait 2020-2021 yılları elektrik, su ve doğalgaz tüketimleri incelenerek oluşturulan diyagramlarda (Şekil 1) her iki yılda da enerji tüketimindeki en büyük pay doğalgaza, en küçük pay ise elektriğe aittir. Ancak 2021 yılında enerji tüketiminde artışın gözlemlendiği görülmektedir. Bununla birlikte 2020 yılına göre 2021 yılında doğalgaz tüketiminin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum 2021 yılında online yerine yüz yüze eğitime geçilmiş olması ile açıklanabilmektedir.

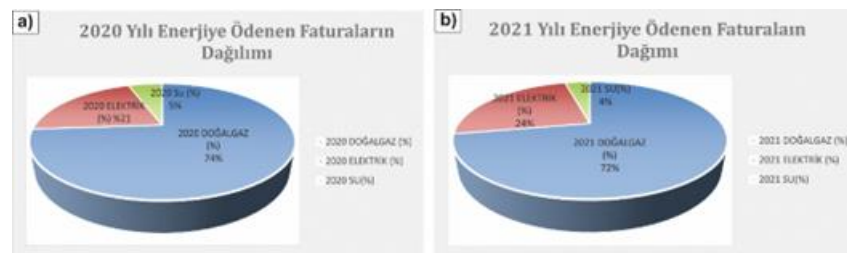


Şekil 1. TEP cinsinden (a) 2020 yılında (b) 2021 yılında doğalgaz, elektrik ve su tüketimlerinin görüldüğü diyagramlar

Figure 1. Diagrams showing natural gas, electricity and water consumption in TOE (a) in 2020 (b) in 2021

Aylık Enerji Tüketim (Monthly Energy Consumption)

Fakülteye ait 2020-2021 yılları enerji tüketim değerlerine göre her ay tüketimin farklı değerler aldığı görülmektedir. 2020 yılına göre 2021 yılında aylara göre doğalgaz, elektrik ve su tüketimlerinde TEP olarak artış gözlemlendiği görülmektedir. Doğalgaz tüketiminin her ay ve her yıl elektrik ve su tüketimine göre daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 4).



Şekil 2. 2020-2021 yıllarında KTUN Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi'ne ait tüketilen enerjinin maliyet dağılımı

Figure 2. Cost distribution of energy consumed by KTUN Faculty of Engineering and Natural Sciences in 2020-2021



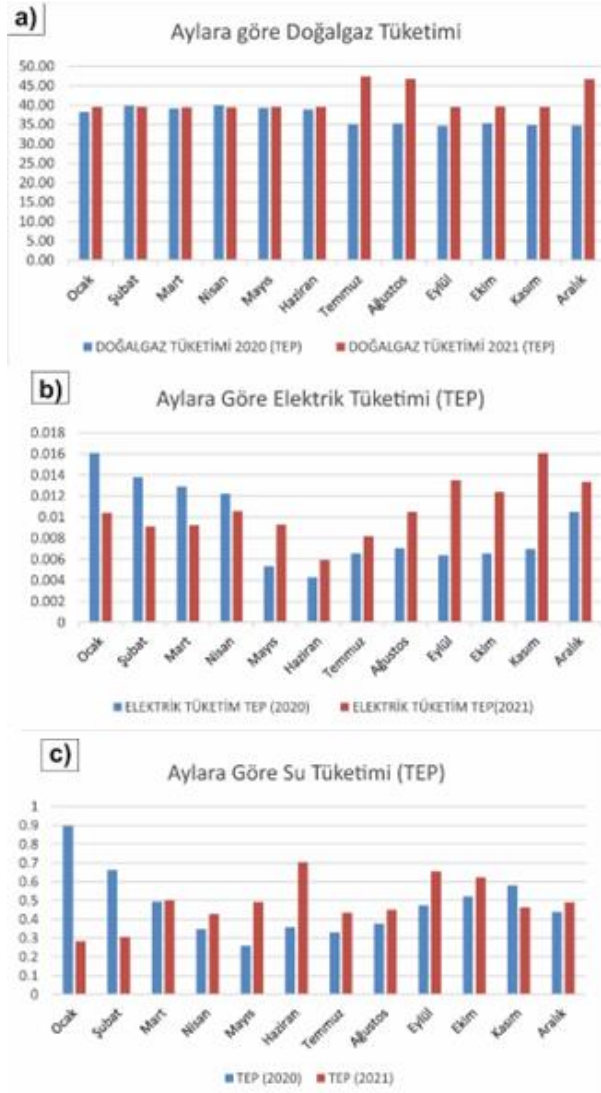
Şekil 3. Yıllara göre TEP cinsinden (a) Doğalgaz tüketimi, (b) elektrik tüketimi, (c) su tüketimi histogram diyagramları

Figure 3. Histogram diagrams of (a) natural gas consumption, (b) electricity consumption, (c) water consumption in TEP by years

Bu da enerji tüketiminin çok büyük çoğunluğunun doğalgaz tüketimi ile ısınmaya harcadığını göstermektedir. Özellikle öğrencilerin olmadığı yaz aylarında elektrik ve su tüketiminde her iki yılda da azalma görülmektedir. Doğalgaz faturalarının aylara bölünerek ödenmesi, toplam tüketimi aylara bölerek dağıtılması aylık tüketim grafiklerine olumsuz yansımakta, yaz-kış aynı miktarda enerji tüketildiği gibi bir algı yaratmaktadır. Ancak enerji tüketimlerinin yıllık TEP grafikleri (Şekil 1 ve 2) ve fatura-maliyet dağılım grafikleri (Şekil 3) incelendiğinde doğalgaz tüketiminin payının diğerlerine göre daha yüksek oranda olması en büyük sorunun ısınmada yaşandığını gözler önüne sermektedir. En az elektrik enerjisi tüketiminin hem 2020 hem de 2021 yılında Haziran ayında olduğu tespit edilmiştir. Ancak elektrik enerjisi ve doğalgaz tüketiminin en yüksek olduğu ayların genel olarak ocak, kasım ve aralık ayları olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Ocak ayının su tüketiminde 2020'de en yüksek 2021'de ise en düşük olduğu, Mayıs ayının ise 2020'de su tüketiminin en az olduğu ay olduğu gözlenmiştir (Şekil 4c). Türkiye'de pandemiyin yayılmaya başladığı 11 Mart 2020 tarihinden itibaren online eğitim ve hibrit çalışma koşullarına geçilmesi ile elektrik ve su faturalarında aylara göre azalma yaşandığı görülmektedir. Aynı azalmanın aylara göre doğalgaz tüketim grafiğinde görülmemesinin nedeni yine yıllık toplam fatura bedellerinin 12 aya bölünerek taksitli ödenmesi ile açıklanabilmektedir. Yıllık toplam fatura bedeli ve toplam tüketim miktarı diyagramlarından yine doğalgazın diğerlerine göre en çok tüketilen enerji kaynağı olduğu belirlenmiştir.

Bina Zarfının Isı Yalıtımı (Thermal Insulation of Building Envelope)

Isı yalıtımı çerçevesinde alınabilecek bazı tedbirler ile kamu binaları ve konutlarda enerji verimliliği artırılabilir. Dış ortamı ısıtmak asla mümkün olmayacağı için ortamların dış hava ile bağlantısının azaltılması, kapı altlarında fitil-süngerlerin kullanılması, gölgeliklerin kullanılması, bina girişlerinde çift kapı kullanılması ısı kayıp kaçaklarını önleyecek önlemlerden bazıları olarak sıralanabilir. Bununla birlikte ısı kaybını önleyecek diğer önemli tedbirler dış cephe ısı yalıtımının yapılması, oluşan ısı köprülerinin önlenmesi, pencerelerden meydana gelen ısı kayıplarının en aza indirilmesi olabilir. Binalarda en yüksek ısı kayıpları %20-50 arasında ısı köprülerinde meydana gelmektedir. Sonrasında %15-25 oranında dolgu duvar, %25 tavan, %10-25 pencerelerde ve %10 döşemelerden meydana gelmektedir (Ekinci, 2005). Isı yalıtımının önemini anlattığı örnek bir çalışmada (Gürdal, 1988) iki katlı bir binanın ısı yalıtımlı ve ısı yalıtımsız olma durumlarında kullanılan yakıt durumları ve havaya salınan zehirli sera gazlarının miktarları incelenmiş, ısı yalıtımı yapılması halinde enerjiden %78.4 tasarruf sağlandığı, havaya salınan zehirli gaz miktarında da %70 oranında azalma olduğu ifade edilmiştir (Kurt ve Arık 2018). KTUN Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi binaları incelendiğinde yalıtımının olmadığı bununla birlikte bazı binalarda sıvaların döküldüğü görülmektedir. Ayrıca yeni yapılan G blokta su yalıtımın yeterli olmamasından kaynaklı bazı bölümlerde bazı personel odalarında tavandan, pencerelerden, pencere altındaki mermerlerden bir miktar su sızıntılarının olduğu gözlenmektedir (Şekil 5).



Şekil 4. (a) Aylara göre doğalgaz tüketimi, (b) Aylara göre elektrik tüketimi, (c) Aylık su tüketimi grafiği
Figure 4. (a) Natural gas consumption according to months, (b) Electricity consumption according to months, (c) Monthly water consumption graph







Şekil 5. (a) Binaların dış kabuğunda görülen döküntüler (b)-(c) oda duvarlarında yağışlı aylarda gözlenen su sızıntıları

Figure 5. (a) Debris on the outer shell of the buildings (b)-(c) water leaks on the room walls in rainy months

Elektrik ve Aydınlatma Sistemi (Electric and Lighting System)

Aydınlatma açısından enerji tasarrufu için bir örnek olarak; bina ve hizmet sektöründe kullanılan akkor flamanlı lambalarının aylık tüketimi 100 kWh iken bunun yerine aynı ışık akısını veren led

lambaları kullandığında Şekil 6'da görüldüğü gibi 20 kWh bir tüketim olması mümkündür. Bina ve hizmet sektöründe aydınlatma için kullanılan elektrik miktarının genel tüketime oranının %21 olduğu göz önüne alınırsa akkor lamba yerine kullanılan led lambaları ile sağlanacak enerji tasarrufunun miktarının kayda değer olacağı görülecektir. Mühendislik fakültesinde her binada her sınıf, laboratuvar, koridor ve personel odalarında floresan, bazı yeni sınıf ve personel odalarında (yeni bina-G blok) ise led kullanılmıştır. Bunların dışında elektrik tüketiminde önemli bir yere sahip olan 20 adet projektör çatılarda aydınlatma amaçlı bulunmaktadır. Kullanılan floresan lamba yerine aynı lümen değerine sahip LED aydınlatma kullanılması daha faydalı olacaktır. Bu sayede aydınlatma sistemlerinde elektrik enerjisinden tasarruf edilebilir. Yaklaşık 2000 adet armatür için led armatür kullanılması maliyeti verimlilik arttırıcı projeler tablosunda verilmektedir (Çizelge 12).

VERİMLİLİK	DÜŞÜK			YÜKSEK
AMPUL TİPİ				
LÜMEN (ışık birimi)	KLASİK	HALOJEN	TASARRUFLU	LED
450	40 W	29 W	9 W	8 W
800	60 W	43 W	14 W	13 W
1100	75 W	53 W	19 W	17 W
1600	100 W	72 W	23 W	20 W
ÖMÜR	1 yıl	1-3 yıl	6-10 yıl	15-25 yıl
TASARRUF	X	%30'a kadar	%75'e kadar	%80'e kadar

Şekil .6 Ampullerin tiplerine göre enerji tasarrufu (Elhuveydi, 2020).

Figure 6. Energy savings according to the types of bulbs (Elhuveydi, 2020).

Hidrofor ayarlarının yapılması (Making the settings of the hydrophore)

KTUN Mühendislik ve Doğa bilimleri fakültesi binası hidrofor çalışma basıncı 5.5 bar olarak gözlemlenmiştir. Fakültede özellikle eğitim-öğretim dönemleri içerisinde öğrenci sayısı fazla olduğundan lavabolarda su tüketimi fazla olacağından 5.5 bar yani 55 mSS uygun görülmektedir. Ancak yapılan hesaplamalara göre bu değer oldukça yüksektir. Çizelge 4'te yapılan basınç hesabına göre hidrofor çalışma basıncı P_{alt} 3 bar basınç yeterli olacaktır. Alt basınç değeri ve üst basınç değerleri birbirine çok yakın olmamalıdır. Bu durum da hidrofor çok sık devreye girip çıkacaktır. Genellikle P_{alt} basıncının en az %20-25 i $P_{üst}$ olarak hesaplanır. Yani hidrofor durma basıncı $3 \cdot 1.25 = 3.75$ yaklaşık 4 bar olması yeterli olacaktır. Hidroforların gereğinden fazla yüksek basınçlarda çalışması pompalarının aşırı yüklenmesine sebep olacak, fazladan elektrik tüketimine yol açacaktır. Gerekli düzeltmeler yapılması halinde fazla kullanılan elektrik sarfiyatının önlenmesi mümkündür.

Çizelge 4. Bina yüksekliğine bağlı olarak uygun hidrofor çalışma ve durma basınçlarının hesaplanması

Table 4. Calculation of the appropriate booster pressure working and stopping pressures depending on the building height

Bina yüksekliği* (Bodrum + 4 kat)=(h= 5 kat x 4 m) (A)	20	**mSS
Toplam boru fittings basınç kayıp yükseklikleri (yaklaşık kabul) (B)	5	mSS
Toplam gereken basınç yüksekliği (A+B)	25	mSS
Cihazların asgari çalışma basıncı (yaklaşık kabul 5-10 alınabilir) (C)	5	mSS
Hidrofor çalışma basıncı (A+B+C) ($P_{alt}=3$ bar)	30	mSS
Hidrofor durma basıncı ($P_{üst}=1.25 \cdot P_{alt} = 3.75$ bar) (yaklaşık 4 bar alalım)	40	mSS

* Çatıda herhangi bir tesisat bulunmadığı için çatı yüksekliği dahil edilmemiştir. **mSS: metre Su Sütunu

Karbon Ayak İzi ve Binaların Enerji Sınıfı Hesaplamaları (Carbon Footprint and Energy Class Calculations of Buildings)

Karbon Ayak İzi (CO₂ Salınımı) (Carbon Footprint -CO₂ Emission)

Karbon ayak izi; insan faaliyetlerinin karbondioksit cinsinden çevreye verdiği zarar olarak tanımlanmaktadır (Şekil 7). Birincil ve İkincil karbon ayak izi olmak üzere ikiye ayrılabilir (Bekiroğlu, 2008). **Birincil ayak izi**, ulaşım ve evsel enerji tüketimi olmak üzere fosil yakıtların yanmasıyla ortaya çıkan doğrudan CO₂ emisyonlarıdır. **İkincil ayak izi ise**, bir ürünün üretilme aşamasından sevk ve idaresine kadar kullanımda olduğu süre boyunca enerji tüketimine neden olan döngüsüdür. Günümüzde gelişen teknoloji ve artan nüfus ile enerji ihtiyacı sürekli arttığı için, bu enerjinin yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanması CO₂ salınımını büyük oranda engelleyecektir. KTUN Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi 2020-2021 yılları enerji tüketim kalemleri CO₂ çevrim katsayılarına göre sınıflandırılmıştır. Buna göre toplam CO₂ salınımı 2020 yılında 134848 kg eşd.CO₂ ve 2021 yılında 140660 kg eşd.CO₂ olarak hesaplanmıştır. Bir başka deyişle bu rakamlar sırasıyla 1164 ton ve 1215 ton karbon ayak izine karşılık gelmektedir (Çizelge 5). Yıllık toplam enerji tüketimi (TEP) değeri ile yıllık oluşan toplam CO₂ (Ton/yıl) salınımının doğru orantılı olduğu görülmektedir. 2021 yılında CO₂ salınımının biraz fazla olmasının sebebi özellikle doğalgazın daha fazla kullanılmış olması olarak düşünülmektedir. Bununla birlikte yüz yüze eğitime geçilmesi elektrik, su ve doğalgaz tüketimlerinde artışa sebep olmuştur. Özellikle doğalgaz tüketiminin her iki yılda da aylara göre oldukça fazla olması ısınmadan kaynaklı bir problemin olduğunu düşündürmektedir. Bu durum ısı kayıp kaçaklarının olması, bina kabuğunun ısı yalıtımının iyi olmayışı ile açıklanmaktadır.

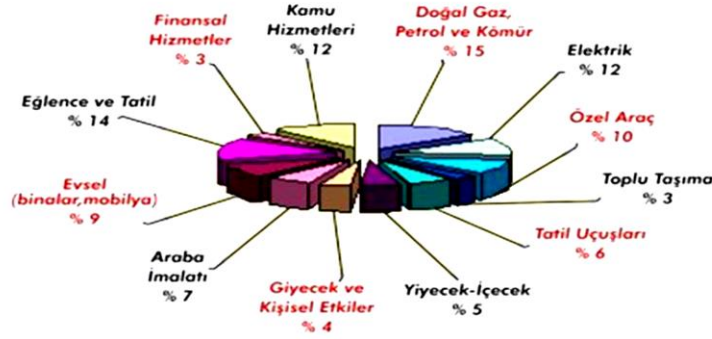
Çizelge 5 2020-2021 yıllarına göre karbon ayak izinin hesaplanması.

Table 5. Calculation of carbon footprint according to the years 2020-2021.

Enerji Tüketimi	Fosil Yakıtlar İçin SEG Katsayıları (kgeşd.CO ₂ /kWh)	2020 (kgeşd.CO ₂)	2021 (kgeşd.CO ₂)
Elektrik tüketimi	0,007	1262 kWh *0.007= 8.834	1494 kWh *0.007= 10.458
Doğalgaz tüketimi	0,234	576236.5m ³ *0.234 = 134839.34	601070 m ³ *0.234 = 140650
Toplam (kgeşd.CO ₂)		134848.174~135.000	140660.830~141.000
Toplam (TON)*		1164	1215

*kgeşd.CO₂-Ton dönüşümleri için otomatik karbon izi hesaplayıcı <https://www.egeorman.org.tr/hesaplayicilar/karbon-ayakizi/> kullanılmıştır.

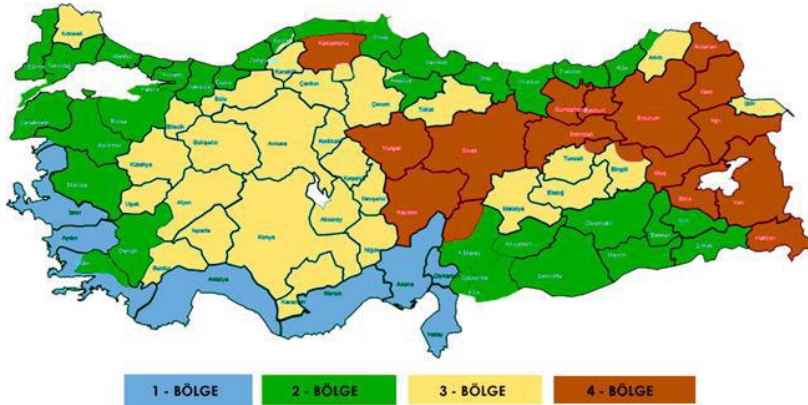
Bir Kişinin Tipik 'Karbon Ayak İzi'nin Dökümü



Şekil 7. İnsan Yaşamında Karbon Ayak İzi (Başol, 2018)
Figure 7. Carbon Footprint in Human Life (Başol, 2018)

Binaların Enerji Sınıfı Hesaplamaları (Energy Class Calculations of Buildings)

Konya ili 2005 yılı resmi gazetede yayınlanan Türkiye Işıma Bölgeleri haritasına göre 3. Bölgede yer almaktadır (Şekil 8). Fakültenin 2020-2021 yıllarına ait metrekareye düşen enerji tüketimleri (kWh) Çizelge 6'da verilmektedir. Binanın yıllık enerji tüketimi tesisin toplam kapalı alan büyüklüğüne bölünerek m² başına enerji tüketimi olan Enerji Performans (EP) değeri bulunur. KTUN Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi için yıllık elektrik, doğalgaz ve su tüketimlerinin toplamından yola çıkılarak elde edilen veriler daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Buna göre 2020-2021 yıllarına ait EP'ler Çizelge 6'da verilmektedir.



Şekil 8 Türkiye Işıma Bölgeleri (Resmi Gazete, 2005)
Figure 8. Radiation Zones of Turkey (Official Gazette, 2005)

Çizelge 6 2020-2021 yıllarına ait metrekareye düşen enerji tüketimleri (kWh)

Table 6. Energy consumption per square meter for the years 2020-2021 (kWh)

Yıllık enerji tüketimi (TEP)	Toplam Alan (m ²)	TEP	kWh	EP (kWh/m ²)
2020	52400	482	5589630	106.67 ~ 107
2021	52400	502	5822894	111.12 ~ 111

Birincil enerjiye göre referans göstergeler Çizelge 7'de yer almaktadır. Buna göre Fakülte binası 3. Isıtma bölgesinde Referans Göstergesi (RG) değeri 300 dür. Sera gazı referans göstergesi ise Çizelge 8'de

50 olarak görülmektedir. Bu veriler ışığında Çizelge 11’de bina enerji sınıfı A sınıfı olarak bulunmaktadır. Çizelge 9’da Sera Gazı etkisi SEG yani toplam CO₂ salınımı 2020 yılında 134848.174 kgeşd.CO₂ ve 2021 yılında 140660.830 kgeşd.CO₂ olarak hesaplanmıştır. Buna göre salınım miktarı çok fazla olduğundan Nihai Enerji Tüketimine Göre Sera Gazı Emisyon Sınıfı (SEG) çizelgesinde (Çizelge 10) G sınıfı olarak belirlenmektedir. Bina Enerji Performans Göstergesi ise Çizelge 11’de EP değerleri 106-111 aralığında olduğundan D sınıfı olarak belirlenmektedir.

Çizelge 7 Birincil enerjiye göre referans göstergesi (RG kWh/m²-yıl) (Resmi Gazete, 2005)

Table 7. Reference indicator according to primary energy (RG kWh/m²-year) (Official Gazette, 2005)

BİNA TİPLERİ	KULLANIM AMACI	1.ISITMA BÖLGESİ (RG)	2.ISITMA BÖLGESİ (RG)	3.ISITMA BÖLGESİ (RG)	4.ISITMA BÖLGESİ (RG)
Konutlar	Meskenler	165	240	285	420
	Bloklar	180	255	300	435
Hizmet Binaları	Ofisler	240	300	360	495
	Eğitim Binaları	180	255	300	450
	Hastaneler	600			
Ticari Binalar	Otel, Restoran	540			
	AVM	750			

Çizelge 8 Sera gazı referans göstergesi (SRG kg eşd.CO₂/m².yıl) (Resmi Gazete, 2005).

Table 8. Greenhouse gas reference indicator (SRG kg equivalent CO₂/m².year) (Official Gazette, 2005)

BİNA TİPLERİ	KULLANIM AMACI	1.ISITMA BÖLGESİ (RG)	2.ISITMA BÖLGESİ (RG)	3.ISITMA BÖLGESİ (RG)	4.ISITMA BÖLGESİ (RG)
Konutlar	Meskenler	28	40	47	70
	Bloklar	30	43	50	73
Hizmet Binaları	Ofisler	40	50	60	80
	Eğitim Binaları	30	45	50	75
	Hastaneler	120			
Ticari Binalar	Otel, Restoran	100			
	AVM	150			

Çizelge 9. Birincil Enerji Tüketimine Göre Enerji Sınıfı (EP kWh/m²-yıl) (Resmi Gazete, 2005).

Table 9. Energy Class according to Primary Energy Consumption (EP kWh/m²-year) (Official Gazette, 2005).

BİNA ENERJİ SINIFI	ENERJİ SINIFI ENDEKSİ (EP)
A	EP<0,4*RG
B	0,4*RG≤EP<0,8*RG
C	0,8*RG≤EP<RG
D	RG≤EP<1,20*RG
E	1,20*RG≤EP<1,40*RG
F	1,40*RG≤EP<1,75*RG
G	1,75*RG≤EP

Çizelge 10. Nihai Enerji Tüketimine Göre Sera Gazı Emisyon Sınıfı (SEG) (Resmi Gazete, 2005).*Table 10. Greenhouse Gas Emission Class (SEG) according to Final Energy Consumption (Official Gazette, 2005).*

BİNA ENERJİ SINIFI	SERA GAZI EMİSYON SINIFI (SEG)
A	$SEG < 0,4 * SRG$
B	$0,4 * SRG \leq SEG < 0,8 * SRG$
C	$0,8 * SRG \leq SEG < SRG$
D	$SRG \leq SEG < 1,20 * SRG$
E	$1,20 * SRG \leq SEG < 1,40 * SRG$
F	$1,40 * SRG \leq SEG < 1,75 * SRG$
G	$1,75 * SRG \leq SEG$

Çizelge 11 Bina Enerji Performans Göstergesi (Resmi Gazete, 2005)*Table 11. Building Energy Performance Indicator (Official Gazette, 2005)*

ENERJİ SINIFI	EP ARALIKLARI
A	0-39
B	40-79
C	80-99
D	100-119
E	120-139
F	140-174
G	>175

SONUÇLARIN İRDELENMESİ (DISCUSSION)

Fakülte S.Ü.'den ayrılmış olmasına rağmen aynı kampüs alanı içerisinde yer aldığından aynı doğalgaz sayacını kullanmakta ve, S.Ü'nün doğalgaz şirketine ödediği tarife üzerinden S.Ü'ne ödeme gerçekleştirmektedir. Yıllık fatura bedeli 12 aya bölünerek ödendiğinden yaz-kış ayları boyunca neredeyse aynı miktarda tüketim yapılmış olduğu algısı oluşmaktadır. Bu nedenle bu konuda önlem alınmalı, fakülte kendine ait bir sayaç taktırmalı ve ödemelerini taksitli fiyat üzerinden değil aylık kullanım bedeli üzerinden ödemelidir. Ancak yıllık tüketimlerin incelendiği diyagramlar göz önüne alındığında en çok enerji tüketiminin doğalgaz kullanımına bağlı olarak gerçekleştiği görülmekte, incelenen fakülte binasında genel olarak ısınma ile ilgili problemler olduğu düşünülmektedir. Fakülte geneli incelendiğinde yapı itibarıyla duvarlarda, kapılarda ve camlarda herhangi bir ısı yalıtımının bulunmadığı, E-F bloğun betonarme, B bloğun tamamen alçıdan olduğu, genel olarak her binada sıva malzemesinin olmadığı, kapı doğramalarının basit çita, kontrplak, suntadan yapılmış dolgu malzemesi olduğu tespit edilmiştir. Sıva malzemesinin bununla birlikte su yalıtımının yetersiz olduğu bölümlerde duvarların dökülme olduğu, yağışlı dönemlerde duvarlardan su sızıntılarının gerçekleştiği görülmektedir. Bu nedenlerle ısı kayıplarının en çok yaşandığı bina kabuk malzemelerinin iyileştirilmesi ile enerji kaybının en aza indirilmesi gerekmektedir.

Verimlilik Artırıcı Projeler (Productivity Increasing Projects)

Günümüzde her alanda gereksinim duyulan enerji gelişmişliğin, sosyal ve ekonomik kalkınmanın temeli olarak görülmektedir. Dışa bağımlılık ve artan enerji maliyetleri enerjinin verimli kullanılması ve enerji yönetiminin önemini bir kez daha gözler önüne sermektedir. Enerjinin yoğun olarak kullanıldığı başta sanayi, endüstriyel kurum ve kuruluşlar ve kamu kurumları olmak üzere yapılarda enerji verimliliğini arttırmaya yönelik planlı ve sistematik çalışmalar yapılmalı ve enerjinin sürdürülebilirliği sağlanmalıdır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen enerji etüdü ile KTUN Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi enerji tüketimi, enerji verimliliği konusunda bazı eksiklikler tespit edilmiş, bu eksiklikler rapor halinde sunulmuş, verimlilik artırıcı projeler önerilmiştir.

Yapılan gözlem, inceleme ve hesaplamalar sonucunda bazı aksaklıklar tespit edilmiş, enerjinin verimli kullanılabilmesi, enerji maliyetinin en aza indirilebilmesi için verimlilik arttırıcı projeler listesi hazırlanmıştır (Çizelge 12). Görülen her bir aksaklığa karşı oluşturulan fırsatlar listesi incelendiğinde (Çizelge 12) her bir maddenin kendi içerisinde çok kısa bir süre içerisinde kendini amorti etmesi ve daha sonra kara geçilmesi beklenmektedir. 2 yıllık ortalama tüketim 492 TEP olarak belirlenmiş bunun maliyeti ise 4.920.00TL (378.460\$) olarak hesaplanmıştır. En çok enerji tüketiminin ısınmada yaşandığı, en çok ısı kaybının ısı yalıtımının olmayışından kaynaklandığı bu çalışma sonucu ortaya çıkmaktadır. Buna göre yapılacak bina kabuğu yalıtımı (çatı-duvar) ile %50 oranında 2.460.000 TL (189.230\$) tasarruf sağlanacağı, yapılan yenilemenin maliyetinin 4.4 yılda kendini amorti edeceği hesaplanmıştır. Benzer şekilde gibi çatılara kurulabilecek güneş panelleri ile yenilenebilir enerji kaynağı ile ısınmanın gerçekleşmesi halinde %5 lik bir tasarruf ile firmalardan alınan fiyatlar doğrultusunda 246.000 TL(189.230\$) tasarruf sağlanarak, kurulum maliyeti 0.3 yıl (yani 4 ayda) kendini amorti edecektir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

Kalorifer sistemi 7/24 çalışmaktadır. Kazan sistemi düzenli kontrol edilmektedir fakat S.Ü. bağlı ana sistemden ısınma gerçekleştiğinden kazan dairesinde sıcaklık ayarlarında değişiklik yapılamamaktadır. Bununla birlikte personel odaları ve sınıflarda klima saati, koridor ve tuvaletlerde radyatörlerde termostatik vana yalnızca yeni yapılan G blokta bulunmaktadır. Fakültede bulunan diğer 6 blokta sınıflar, personel odaları, toplantı salonları, koridorlar ve tuvaletlerde radyatörler termostatik vana bulundurmamaktadır. Dijital termometre ile yapılan ölçümlerde ve klima saati ile termostatik vana bulunan sınıf ve odalarda mahal sıcaklıkları 25-26 °C gözlemlenmiştir. Personel odaları ve sınıflar da dahil olmak üzere her odaya klima saati, radyatörlere termostatik vana takılmalı, sıcaklıkları 18-22 °C'ye ayarlanmalıdır. Enerji verimliliği açısından enerji sarfiyatının önüne geçilebilmesi için Kamu Kurumlarında Enerji Verimliliği Mevzuatına ve Kazan yakma talimatlarına uygun olarak çalışmalar gerçekleştirilmeli ve fazla enerji tüketiminin önüne geçilmelidir.

Bunların dışında ısı kayıplarının önemli bir bölümünün yaşandığı camlar ise fakültede çift cam olmalarına rağmen kırık bazı camlar tespit edilmiştir. En çok ısı kayıp kaçaklarının yaşandığı bir başka bölüm olan ana giriş kapıları ise yönetmeliklerde belirtildiği gibi çift kapılıdır. Her blokta ana girişlerde çift kapı sistemi mevcut olmasına rağmen kapı altlarında, kapı altı hava kaçakları vardır ve fitil/sünger bulunmamaktadır. Bu da ısı kayıp kaçaklarına neden olmaktadır.

Mühendislik fakültesinde yer alan bazı koridor, bazı tuvalet ve bazı laboratuvarlarda aydınlatma sistemlerinde fotoselli kullanılmış olmasına rağmen genel itibariyle derslik, laboratuvar, tuvalet, personel odaları ve koridorlarda floresan lamba kullanılmıştır. Floresanlar yerine aynı lümen değerine sahip LED aydınlatma ve harekete ve sese duyarlı armatürler kullanılması aydınlatmada önemli ölçüde tasarruf sağlayacaktır. Led lambalar diğer lambalara kıyasla daha verimlidir, bununla birlikte başlangıçta daha pahalı olmasına karşın, daha uzun ömürlüdür ve geleceğin aydınlatma biçimi olarak görülmektedir. Su tasarrufu ise yine enerji tasarrufu olarak değerlendirildiğinde, bozuk muslukların tamir edilmesi ve her musluğa perlatör takılması ile önemli ölçüde tasarruf gerçekleştirilmektedir.

Kojenerasyon sistemleri kurularak tek bir enerji kaynağı (genelde doğalgaz) ile elektrik, sıcak su ihtiyaçları giderilebilir. Böylece en üst seviyede verimlilik sağlanabilir.

Fakülte binası 3. Isıtma bölgesinde RG değeri 300 dür. Sera gazı referans göstergesi ise 50 olarak görülmektedir. Bu veriler ışığında Çizelge 11'da bina enerji sınıfı A sınıfı olarak bulunmaktadır. Sera Gazı etkisi yani toplam CO₂ salınımı 2020 yılında 134848.174 kgeşd.CO₂ ve 2021 yılında 140660.830 kgeşd.CO₂ olarak hesaplanmıştır. Buna göre salınım miktarı çok fazla olduğundan Nihai Enerji Tüketimine Göre Sera Gazı Emisyon Sınıfı (SEG) G sınıfı olarak belirlenmektedir. Bina Enerji Performans Göstergesi ise EP değerleri 106-111 aralığında olduğundan D sınıfı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 12 Fırsatlar Listesi ve Verimlilik Artırıcı Projeler*Table 12. List of Opportunities and Productivity Increasing Projects*

Fırsatlar Listesi Verimlilik Arttırıcı Projeler	Enerji Türü	Tasarruf Yüzdesi (%)	Yatırım Maliyeti (TL)	Tasarruf Miktarı (TL/Yıl)	Geri Ödeme Süresi (Yıl)	Sorumlu Kişi	Açıklama
Enerji tasarrufu farkındalık eğitimi	Genel	10	Ücretsiz	492.000 (37.846 \$)	0.0	Herkes	Açık bırakılan kapılar ve pencereler binanın ısı kaybetmesine sebep olur. Bununla ilgili eğitim verilerek bu tür kayıplar önenebilir.
Kapı altı rüzgârlık	Doğalgaz	30	3m =24 24*4=96	1.476.000 (113.538 \$)		Güvenlik, Temizlik Görevlisi	Kapı altı boşlukları için süpürgelik görevi gören aparatlar kullanılmalıdır
Kapı, duvar ve camların yalıtımlarının yapılması	Doğalgaz	50	54.500 m ² *200 TL =10.900.000 TL	2.460.000 (189.230 \$)	4.4	Bina görevlileri Yapı işleri teknisyenleri	Pencereler için fitil, duvarlara yalıtım ısı kayıplarını azaltacaktır.
Yakma talimatına uyulması	Doğalgaz	30	0	1.476.000 (113.538 \$)	0.0	Kazan görevlisi	Kazan yakma talimatına uyulması yakıt tasarrufu sağlar.
Termostatik vana kullanılması	Doğalgaz	25	100 TL*900= 90.000	1.230.000 (94.615 \$)	0.1	Bina görevlileri	Termostatik vanaların kullanılması gereksiz yakıt tüketimini önleyerek enerji tasarrufu yapılmasına olanak sağlar.
Brülör ayarlarının yapılması	Doğalgaz	5	0	246.000 (18.923 \$)	0.0	Bina görevlileri	Brülörün belirli kalorifer yakma rejimlerinde çalışması yakıt tasarrufu sağlar.
Mevcut kalorifer kazanının yoğunmalı kazan ile değiştirilmesi	Doğalgaz	15	150.000*8 1.200.000	738.000 (56.770 \$)		Selçuk Üniversitesi Bina görevlileri, kazan görevlisi	Bacadan çıkan atık ısının değerlendirilmesi ve verimin artırılması hususunda yoğunmalı kazan tercih edilmelidir.
*Ekonomizere kullanılması	Doğalgaz	5	1000 TL	246.000 (18.923 \$)	0.0	Bina görevlileri	Bacadan çıkan atık ısının değerlendirilmesi için tercih edilir.
Mevcut aydınlatmaların LED panel armatür ile değiştirilmesi	Elektrik	5	25 TL*2000= 50000TL	246.000 (18.923 \$)	0.2	Bina görevlileri	Aynı lümen değerinde LED panel armatür kullanılması elektrik tasarrufu sağlar.
Su yalıtımının yapılması	Su+elektrik doğalgaz	2		98.400 (7.569\$)		Bina görevlileri Yapı işleri teknisyenleri	Binaların sıvalarının dökülmesine çabuk çürümeye yol açacak, odalardan sızan sular duvarlara parkelere zarar verecektir.
Su tasarrufu için perlatör kullanımı, bozuk ve akıtan muslukların tamirati	Su	3	4 TL*600= 2400TL	147.600 (11.35 \$)	0.0	Bina görevlileri Temizlik Görevlisi	Lavabolardaki gereksiz su akışı, sirkülasyon pompalarının uygun şekilde ayarlanmasıyla veya lavabo altındaki vanaların uygun şekilde kısılmasıyla sağlanabilir.
Hidrofor ayarlarının yapılması	Su	5	1000 TL	246.000 (18.923 \$)	0.0	Bina görevlileri Temizlik Görevlisi	Hidroforların gereğinden fazla çalışması pompaların zarar görmesine sebep olacak, fazla elektrik tüketimine yol açacaktır.
Yenilenebilir enerji kaynakları/Güneş panelleri sistemi kurulması ile sıcak su ve ısınmada yararlanılması	Sıcak su+doğalgaz	5	10kW 70000TL	246.000 (18.923 \$)	0.3	Bina görevlileri Yapı işleri teknisyenleri	Her binada sıcak su kullanımı sağlanabilir. Güneş enerjisi ile ısınma yapılarak doğal gaz tüketimi azaltılabilir

*Yoğunmalı kazan değişimi yapılırsa ekonomizere gerek kalmayacaktır

1 lt mazot= 0.000846599 TEP=10 TL (ortalama-2021)

492 TEP =492 ton TL*10 (2020-2021 yılı ortalama enerji tüketim maliyeti)= 4.920.00 TL (378.461 \$) 2 yıllık ortalama maliyet

Bu çalışma ile yıllara göre toplam enerji tüketimi (TEP) ve bu enerji tüketiminin oluşturduğu toplam CO₂ salınımı değerleri incelendiğinde enerji tüketimi ve CO₂ salınımının temelde doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Ancak doğalgaz kullanımı sonucu oluşan CO₂ emisyonun elektrik kullanımına göre fazla olması sebebiyle doğalgaz kullanımı arttıkça CO₂ salınımının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Üniversitenin toplam enerji tüketimini azaltması yönünde öncelikle detaylı etüt çalışmasının yaptırılması, enerji tüketimlerinin sürekli takip edilmesi, üniversitede en az bir enerji yöneticisinin bulunması ve gerekli kontrollerin düzenli yapılması gerekmektedir. Gerekli yatırımların yapılarak uygun bulunan verimlilik artırıcı projelerin gerçekleştirilmesi önerilebilir. Bu çalışma ve ulaşılan sonuçlar başta kamu kurum ve kuruluşları olmak üzere sanayi kuruluşları ve normal binalarda enerji tüketim planlamalarını, işletmelerin enerji hedeflerini ve CO₂ salınımı gibi çevresel etkilerini belirlemede etkin olacaktır. Ayrıca bu ve benzeri çalışmalar ülkemizde en fazla enerji tüketim alanı olan sanayi sektöründeki enerjinin planlamasında ve verimliliğin artırılmasında örnek olarak dışa bağımlılığın azalmasına katkı sağlayacaktır.

KTUN Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesinin 2 yıllık enerji tüketimleri incelendiğinde fakülte binasında enerji yönetimi hususunda gözlemlenen eksiklikler doğrultusunda verimlilik artırıcı projeler ve fırsatlar listesi hazırlanmıştır (Çizelge 12). Bunların başında personellere enerji yönetimi ve enerji farkındalığı eğitim seminerleri verilmesi gelmektedir ve bu eğitimin enerji kayıplarının %10 oranında azaltması beklenmektedir. Yakıt tasarrufu için kullanılan yakıt kalitesi, tam yanmanın sağlanması ve ısı yalıtımının yapılarak ısı kayıp kaçaklarının önlenmesi gerekmektedir. Yapıların ısı yalıtımının gerçekleşmesi ile yakıt tüketiminin azalacağı gibi hava kirliliğinin de önüne geçilecektir. Isı yalıtımından kaynaklı problemler ısı kayıp kaçaklarının en çok nerede olduğunun tespit edilmesi ile buna bağlı olarak da gerekli kapı, duvar, cam, çatı yalıtımlarının yapılması ile ortadan kaldırılabilir. Pencerelerde çift cam uygulaması ısı kaybını önlemektedir ve fakülte camlarında çift cam uygulaması mevcuttur. Ancak yalıtımın daha iyi olması için yeni yapılacak olan binalarda cam aralarına argon gazı koyulabilir, ısı kontrolü sağlayan triple-glazed yarı reflekte gibi camlar kullanılabilir. Ayrıca termal kamera ile detaylı biçimde kalorifer yalıtımları da incelenip kayıp-kaçaklara bakılarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Kazan ısıtma soğutma sistemleri dahil tüm sistemler (en azından kazan ısıtma-klima havalandırma sistemleri) tek bir merkezden otomatik olarak kontrol edilebilmelidir. Binalarda mekanik ve elektrik otomasyon sistemleri uygulanarak enerji tüketim miktarları takip edilebilir. Bu sayede tüketim verileri anlık kontrol edilebilir ve kullanım miktarlarını en aza indirmek için gerekli çalışmalar yapılabilir.

Enerji verimliliği ve enerjinin doğru kullanımı adına, hem ısınmada hem de sıcak su kullanımında yararlanmak üzere çatılara güneş panelleri yerleştirilmesi önerilmektedir. Binaların güney cephesine veya çatı üzerine yerleştirilen fotovoltaik güneş panelleri sayesinde elektrik enerjisi ihtiyacı karşılanabilir. Böylelikle tükenmekte olan fosil yakıt tüketimi azalarak, doğaya salınan CO₂ gibi gazların da salınımı engellenmiş olacaktır. Her binanın çatısına yerleştirilen güneş kolektörleri ile güneş enerjisinden yararlanılarak sıcak su elde edilebilir ve tüm binalarda kullanılabilir. Kampüs alanındaki otoparklara yüzeyi güneş panelleri ile kaplı çatılar yapılabilir ve elde edilen enerji elektrikli cihazlar ve gece aydınlatması için kullanılabilir. Gün ışığını algılayan foto sensörler yardımıyla dış mekânlarda gece aydınlatmaları yenilenebilir enerji sistemi ile gerçekleştirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmanın yapılmasında desteğini esirgemeyen **Konya Teknik Üniversitesi Rektör Yardımcısı Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY'** a, gerekli ölçümlerin ve denetimlerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Konya Teknik Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik İşler personeline teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

Aydin, M., 2016, Enerji Verimliliğinin Sürdürülebilir Kalkınmadaki Rolü: Türkiye Değerlendirmesi: Yönetim Bilimleri Dergisi, v. 14, no. 28, p. 409-441.

- Başol, O., 2018, Dünyada ve Türkiye’de Yeşil İşlerin Gelişimine İlişkin Bir Değerlendirme: Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar, no. 636, p. 71-87.
- CIPEC, (2002). Energy Efficiency Planning and Management Guide, Canada, 12.
- Çakmanus, İ., Kaş, İ., Künar, A., ve Gülbeden, A., 2010, Yüksek performanslı sürdürülebilir binalara ilişkin bir değerlendirme: Yeşil Bina Dergisi, v. 3, no. 4, p. 461-462.
- Ekinci, C. E., 2005, Bordo Kitap: Yapı ve tasarımcının inşaat el kitabı, Üniversite Kitabevi.
- Elhuvaydi, A.,2020. Enerji Verimliliği Bakımından Bitlis Eren Üniversitesi Kampüs Binalarının Enerji Etüdü Bitlis Eren Üniversitesi Ve Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı *Yüksek Lisans Tezi*. P. 94.
- Flavin, C., ve Lenssen, N., 1994, Reshaping the electric power industry: Energy Policy, v. 22, no. 12, p. 1029-1044.
- Gürdal , E., 1988. Isı iletkenlik katsayısının malzeme özellikleri ile ilişkisi, Yapı, 80, 44-46.
- Kurt, H., Arık, F., 2018. Planlama Yapı ve Çevre için Jeoloji. Nobel Yayınları, 432, 320-321.
- Yılmaz, Z., 2006, Akıllı binalar ve yenilenebilir enerji: Tesisat Mühendisliği Dergisi,(91), v. 7, p. 15.



KARBON FİBER TAKVİYELİ GRAFİT ve PTFE KATKILI POLİ-ETER-ETER-KETON (PEEK) POLİMER KOMPOZİTİN TRİBOLOJİK PERFORMANSLARINA KAYMA HIZININ ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

¹Ahmet MASLAVİ , ²Hüseyin ÜNAL , ³Salih Hakan YETGİN 

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

³ Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin, TÜRKİYE

¹ahmad.abdulkarim@ogr.sakarya.edu.tr, ²unal@subu.edu.tr, ³shakanyetgin@tarsus.edu.tr

(Geliş/Received: 09.02.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.04.2022)

ÖZ: Farklı endüstriyel sektörlerde kullanılan makinalarda plastik esaslı rulman, makara ve burç gibi makine elemanları kullanılmaktadır. Bu uygulamalardaki makine elemanlarının çalışma esnasındaki hızları ve taşıma yükleri malzemenin ömrünü belirlemektedir. Bu deneysel çalışmada, rulman, makara ve burç yapımında kullanılan yüksek performanslı mühendislik plastikleri arasında yer alan karbon fiber takviyeli grafit ve poli-tetra-flor-etilen (PTFE) katkılı poli-eter-eter-keton (HV-PEEK) polimeri kullanılarak tribolojik performansları incelenmiştir. Testlerde AISI304 paslanmaz çelik karşı disk kullanılmış, deneyler kuru kayma şartları altında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Aşınma deneyleri, 3.53 MPa basınç altında, düşük (1.0 m/s) ve yüksek (4.0 m/s) kayma hız aralıklarında pim-disk aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma test sonuçlarına göre, kayma hızına bağlı olarak HPV-PEEK polimerinin sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı değişimi incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre artan kayma hızı ile birlikte polimerin sürtünme katsayısı azalırken spesifik aşınma oranı değerleri artmıştır. Genel olarak sürtünme katsayısı 0.14 ile 0.19 aralığında elde edilmiş, aşınma oranı ise 1.66×10^{-6} ile 0.48×10^{-6} mm³/Nm aralığında değişim göstermiştir. Deneylerde kullanılan HV-PEEK polimer kompozitinde düşük kayma hızlarında abrazyon aşınma mekanizması gözlenirken yüksek kayma hızlarında adhezif aşınma mekanizması gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PEEK, Triboloji, PTFE, Karbon fiber, Grafit, Kayma hızı

Determination of the Effect of Sliding Speed on Tribological Performances of Carbon Fiber Reinforced, Graphite and PTFE Filled Poly-ether-ether-ketone (PEEK) Polymer Composite

ABSTRACT: Machine elements such as plastic-based bearings, rollers and bushings are used in machines used in different industrial sectors. The sliding speed and carrying loads of the machine elements in these applications determine the life of the material. In this experimental study carbon fiber reinforced and graphite and poly-tetra-flour-ethylene (PTFE) filled poly-ether-ether-ketone (HPV-PEEK) polymer, which is among the high performance engineering plastics used in bearings, rollers and bushings were used to determine tribological performances. AISI 304 stainless steel counter disc was used in the tests, the experiments were carried out under dry sliding conditions and at room temperature. Tribological tests were carried out on a pin-on-disc wear test machine under 3.53 MPa and at low (1.0 m/s) and high (4.0 m/s) sliding speeds. According to the wear test results, the friction coefficient decreased while wear rate values increased with the increase in sliding speed values. In general, the friction coefficient was obtained between 0.14 and 0.19, while the specific wear rate varied between 1.66×10^{-6} and 0.48×10^{-6} mm³/Nm. While

abrasive wear mechanism was observed in HV-PEEK polymer at low sliding speed values, adhesive wear mechanism was observed at high sliding speed values.

Keywords: PEEK, Tribology, PTFE, Carbon fiber, Graphite, Sliding speed

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Poli-eter-eter-keton (PEEK) polimeri, yüksek performanslı polimerler grubunda yer alan yarı kristal yapıya sahip bir termoplastik polimer çeşididir. PEEK polimeri üstün mekanik özelliklere, kimyasal korozyon direncine, yüksek ergime sıcaklığına (343 °C), yüksek camı geçiş sıcaklığına (143 °C), termal kararlılığa, iyi derecede tribolojik özelliklere ve yüksek radyasyon direncine sahip yarı-kristal yapıya sahip termoplastik esaslı mühendislik plastiklerinden birisidir [Yutao ve diğ., 2020; Mir ve diğ., 2019; Shah ve diğ., 2021; Huayuan ve diğ., 2009; Karpe Ganesh ve Dhamejani, 2016]. PEEK polimeri uçak ve uzay sanayi, makine, otomotiv, elektrik/elektronik, tekstil, enerji, denizcilik, nükleer endüstrisi, kimya ve sağlık gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoğu durumda, PEEK polimer kompoziti, yüksek yük ve uzun çalışma saatlerine dayanması gereken uygulamalarda da kullanılabilir. Bununla birlikte, PEEK polimeri, kuru kayma temas koşulları altında çalışma gereksinimlerini karşılamayı zorlaştıran karşı disk malzemeye yapışması nedeniyle nispeten yüksek sürtünme katsayısı ve düşük aşınma direnci göstermektedir [Yutao ve diğ., 2020; Puertolas ve diğ., 2019; Kharat ve diğ., 2019; Zalaznik ve diğ., 2016]. PEEK polimerinin tribolojik performansını artırmak için polimer malzeme bünyesine inorganik katkı ve farklı fiber takviyeleri ilave edilmektedir. Literatürde bu konu ile ilgili bazı çalışmalara rastlanmaktadır. Petrica ve arkadaşları [2016] PEEK polimeri ile çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) polimerinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada PEEK polimerinin sürtünme katsayısının ÇYMAPE polimerine göre üç kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Wang ve arkadaşları [2016] poliimmit (PI), poli-tetra-flor-etilen (PTFE) ve PEEK polimerlerinin farklı sıcaklık, kayma hızı ve yük altındaki aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda artan kayma hızı ile polimer malzemelerin sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı ve aşınma oranı değerlerinin ise azaldığı ifade edilmiştir. Uygulanan yükün artırılması ile polimer malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin azaldığı belirtilmiştir. Aşınma ve sürtünme özelliklerinin uygulanan sıcaklığın camı geçiş sıcaklığının üzerinde veya altında olmasına bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Kharat ve arkadaşları [2019] %30 cam elyaf (CE) takviyeli PEEK kompozitlerin 50-100 ve 150 °C sıcaklıklar altındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. 80 N yük ve 150 °C sıcaklık altında CE/PEEK kompozitinin üstün aşınma direnci özelliği gösterdiği belirtilmiştir. Li ve arkadaşları [2013] bilya-disk aşınma test düzeneği kullanarak katkısız PEEK polimeri ve %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompozitlerin kuru kayma şartları ve oda sıcaklığındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda uygulanan yükün ve kayma zamanının artırılması ile PEEK ve PEEK kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma kaybı değerlerinin arttığı ve sonrasında kararlı hale geldiği belirtilmiştir. Shukur ve Dearn [2020] katkısız PEEK polimeri ile %30 karbon fiber takviyeli PEEK kompozitin kuru ve yağlı çalışma ortamlarındaki aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda hem PEEK hem de karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitin silikon ortamındaki sürtünme katsayısının yağlı ortamdaki sürtünme katsayısına göre %50 oranında daha düşük olduğu belirtilmiştir. PEEK/30KE kompozitin silikon ortamında en iyi aşınma direnci gösterdiği belirtilmiştir. Bijwe ve Nidhi [2007] cam elyaf, karbon elyaf takviyeli PTFE ve grafit katkılı PEEK kompozitlerin aşınma mekanizmalarını inceledikleri çalışma sonucunda %30 karbon fiber takviyesinin mekanik özellikleri geliştirdiği ancak tribolojik performansı pek etkilemediği belirtilmiştir. Katı yağlayıcıların ise PEEK polimer kompozitlerin sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirdiği belirtilmiştir. Davide ve arkadaşları [2021] %15 oranında karbon fiber takviyeli PEEK kompoziti ile %10 karbon fiber + %10 PTFE + grafit katkılı PEEK kompozitinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda PEEK kompozitlerin 1 N ve 5 N yük altındaki sürtünme katsayılarının sırasıyla 0.22 ve 0.16 civarında elde edildiği belirtilmiştir. Liao ve arkadaşları [2022] grafit/PTFE/PEEK kompozit kaplamaların tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışma sonucunda aşınma oranının ve sürtünme

katsayısının grafit ve PTFE ilavesi ile önemli oranda azaldığı belirtilmiştir. Yutao ve arkadaşları [2020] grafen oksit (GO) ve molibden disülfid (MoS_2) katkı PEEK kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada grafen oksit ve MoS_2 ilavesinin PEEK kompozitin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azalttığı belirtilmiştir. PEEK polimeri bünyesindeki optimum GO ve MoS_2 katkı oranının sırasıyla %0.7 ve %15 olduğu belirtilmiştir. Zalaznik ve arkadaşları [2016] PEEK polimerine %0.5, 1, 2 ve 5 oranlarında mikro ve nano boyutlu molibden disülfid (MoS_2) ve tungsten disülfid (WS_2) katkıları ilave etmişler ve elde ettikleri farklı katkı ve kompozisyonlu PEEK kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda kompozitlerin sürtünme katsayısının %30 oranında azaldığı belirtilmiştir. Hem mikro- hem de nano- boyuttaki molibden disülfid ve tungsten disülfid katkıların ilavesi ile karşı disk yüzeyde oluşan transfer film tabakasının aşınma direncini %51 oranında artırdığı belirtilmiştir. Puertolas ve arkadaşları [2019] %1-10 oranlarında grafen-nano-plaka (GNP) katkı PEEK kompozitlerin termal, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Kristalin faz miktarı, GNP miktarının artması ile %39'dan %34'e azalmıştır. Grafen miktarı ile kompozitin elastiklik modülü değeri artarken çekme dayanımı, kopma uzaması ve tokluk değerleri azalmıştır. PEEK polimerine ilave edilen GNP ile sürtünme katsayısı %38 civarında aşınma oranı ise %83 civarında azalmıştır. Düşük GNP katkı PEEK kompozitlerde abrasif aşınma mekanizmasının, yüksek GNP katkı PEEK kompozitlerde ise yorulma aşınması mekanizmasının etkili olduğu belirtilmiştir. Yapılan literatür araştırmalarında saf PEEK polimeri ile cam fiber takviyeli ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yaygın olarak değişik sektörlerde kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu amaçla, yüksek yük ve hıza maruz kalınan tribolojik uygulamalarda kullanılacak grafit, PTFE ve karbon fiber takviyeli PEEK (HPV-PEEK) polimer kompozit malzeme üretilmiştir. Karbon fiber kompozitin mukavemet ve rijitliğini artırırken grafit ve PTFE katı yağlayıcı katkıları ise sürtünme katsayısının düşmesine ve aşınma direncinin artmasını sağlamaktadır. Yapılan literatür çalışmasında bu malzeme ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu sebeple yapılan deneysel çalışmada yüksek performanslı mühendislik plastikleri arasında yer alan %10 karbon fiber takviyeli %10 grafit ve %10 poli-tetra-flor-etilen katkı poli-eter-eter-eton (HPV-PEEK) polimerinin AISI304 paslanmaz çelik diske karşı kuru kayma şartları altındaki tribolojik performansları incelenmiştir. Bu çalışmada, rulman, makara, burç ve aşınma kılavuzları gibi uygulamalarda kullanılan bu malzemenin yüksek hızlardaki tribolojik davranışları belirlenmiştir. Çalışma, 1.0, 2.0, 3.0 ve 4.0 m/s kayma hızlarında 3.53 MPa basınç altında 2000 m kayma yolunda kuru kayma şartlarında oda sıcaklığında ve pim-disk aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Yukarıda belirtilen şartlar altındaki gerçekleştirilen HPV-PEEK kompozitin sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı değişimi incelenmiştir.

DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

Aşınma deneylerinde kullanılan rulman çeşidi PEEK polimer kompoziti, Ketron HPV PEEK ticari koduyla Mitsubishi Chemical Advanced Materials firmasından temin edilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği gibi ekstrüzyonla çubuk formunda üretilmiş olup 10 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda elde edilmiştir. Şekil 2'de HPV-PEEK polimer kompozitin tipik kullanım alanlarına örnekler ve Çizelge 1'de HPV-PEEK polimer kompozitin fiziksel, mekanik, termal ve tribolojik özellikleri verilmiştir.



Şekil 1. HPV PEEK polimer kompozitin ekstrüde edilmiş çubuk görüntüsü

Figure 1. Extruded rod image of HPV PEEK polymer composite



Şekil 2. HPV-PEEK polimer kompozitin tipik kullanım alanı [<https://polyfluorold.com>].

Figure 2. Typical use of HPV-PEEK polymer composite

Çizelge 1. HPV-PEEK polimer kompozitin fiziksel, mekanik, termal ve tribolojik özellikleri [<http://qcpp.matweb.com>]

Table 1. Physical, mechanical, thermal and tribological properties of HPV-PEEK polymer composite

Özellik	Değeri	Birimi	Test standardı
Yoğunluk	1.44	g/cm ³	ASTM D792
Su emme, 24 saat	0.050	%	ASTM D570(2)
Çekme mukavemeti	75.8	MPa	ASTM D638
Elastiklik modülü (çekmede)	5860	MPa	ASTM D638
Eğme mukavemeti	190	MPa	ASTM D790
Elastiklik modülü (Eğmede)	7580	MPa	ASTM D790
Sertlik	85	Rockwell M	ASTM D785
Ergime sıcaklığı	340	°C	ASTM D3418
Maksimum çalışma sıcaklığı	250	°C	
Sürtünme katsayısı (dinamik), kuru ortam, çelik disk	0.21	-	QTM 55007
Aşınma oranı	201x10 ⁻⁸	mm ³ /Nm	QTM 55010

Aşınma deneyleri, pim-disk aşınma test cihazı yardımıyla oda sıcaklığında kuru kayma şartları altında yapılmıştır. 10x1000 mm ebatlarında çubuk formunda temin edilen HPV-PEEK kompozit aşınma ve sürtünme testlerinde pim numunesi olarak kullanılmıştır. Aşınma deney numuneleri geleneksel torna tezgahında 6 mm çapa ve 50 mm uzunluğunda olacak şekilde hassas olarak tornalanmıştır (Şekil 3). Çizelge 2’de çalışmada kullanılan malzemeler için aşınma test parametreleri verilmiştir.



Şekil 3. HPV-PEEK polimer kompoziti pim numunesi

Figure 3. HPV-PEEK polymer composite pin specimen

Çizelge 2. Aşınma testi parametreleri

Table 2. Wear test parameters

Malzeme	Test Sıcaklığı (°C)	Kayma mesafesi (m)	Uygulanan basınç (MPa)	Kayma hızı (m/s)
HPV-PEEK	23±1	2000	3.53	0.5
				1.0
				2.0
				4.0

Karşı disk malzeme olarak ise AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Disk malzemesi önce 90 mm çapında ve 5 mm kalınlığında olacak şekilde tornalanmış ve daha sonrasında ise düzlem yüzey taşlama cihazında taşlanmıştır. Taşlama yapılan diskin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ve yüzey pürüzlülüğü 0,32 Ra olarak belirlenmiştir. Her aşınma deneyinden önce çelik disk ve polimer kompozit pim yüzeyleri asetonla temizlenmiş ve kurutulmuştur. Her aşınma testi öncesi numune pim ağırlığı (m_1) ve aşınma testi

sonrası pim ağırlığı (m_2) ölçülmüş ve ağırlık kaybı Δm yani ($m_1 - m_2$) tespit edilmiştir. Spesifik aşınma oranı (K_o) ise Eşitlik (1)'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Formülde, L ; kayma mesafesi (m), q ; malzemenin yoğunluğu (g/cm^3) ve F ; uygulanan yük (N)' tür.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L * \rho * F} \quad (1)$$

Deney numunelerinin sürtünme katsayısı ölçümleri disk üzerinde pim olacak şekilde tasarlanmış ve Şekil 4'te resmi verilen aşınma deney düzeneğinde ölçülmüştür. Pim-disk test makinası, makinanın ana gövdesi üzerine monte edilmiş bir elektrik motoru, bir yük kolu, bir elektronik yük hücresi ve verilerin gönderildiği bir bilgisayardan meydana gelmektedir. Aşınma cihazının ana gövdesinde dönen bir disk vardır. Bu disk aşınma cihazına bağlı olan 2 kW gücünde bir elektrik motoru sayesinde dönmektedir. Diskin üzerine deneyde kullanılan paslanmaz çelik disk malzeme bir vida yardımıyla bağlanır. Deneylerde kullanılan HPV-PEEK pim numunesi 6 mm çapında hazırlanmış olup aşınma düzeneğinde olan kola bağlanır. Aşınma cihazı çalıştırdıktan sonra kola bağlanan HPV-PEEK polimer kompozit pim numunesi diskin üzerine yavaş bir şekilde bırakılır. Pim numunesinin hareket halindeki diske temas etmesi sonucu oluşan sürtünmeyle birlikte numune bağlı olan kol aparatı dönüş yönüne göre hareket eder. Bu hareket yanal kuvvet olarak adlandırılır. Bu yanal kuvvet aşınma cihazına bağlı olan bir yük hücresi ile ölçülüp bilgisayara aktarılarak excell programında kaydedilir. Aşınma cihazı, aşınma yapılacak olan deneyler için dakikada 1000 veri ölçebilecek şekilde ayarlanmıştır. Deney süresi boyunca yanal yükü ölçen yaklaşık 65.000 veri elde edilmiştir. Bu yanal yük verileri Excell programında bir sütuna kaydedilmiş sonrasında uygulanan yüke bölünerek sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan HPV-PEEK polimer pim malzemesi ile paslanmaz çelik disk arasındaki sürtünme katsayısı (μ), yanal kuvvetin normal kuvvete oranıdır ve Eşitlik (2)'de verilen formül ile hesaplanmaktadır. Formülde μ : sürtünme katsayısını, F_s : sürtünme kuvvetini (N) ve F_n ise normal kuvveti (N) göstermektedir. Her bir aşınma testi en az üç kez tekrarlanmış olup ortalama değerler verilmiştir.

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (2)$$



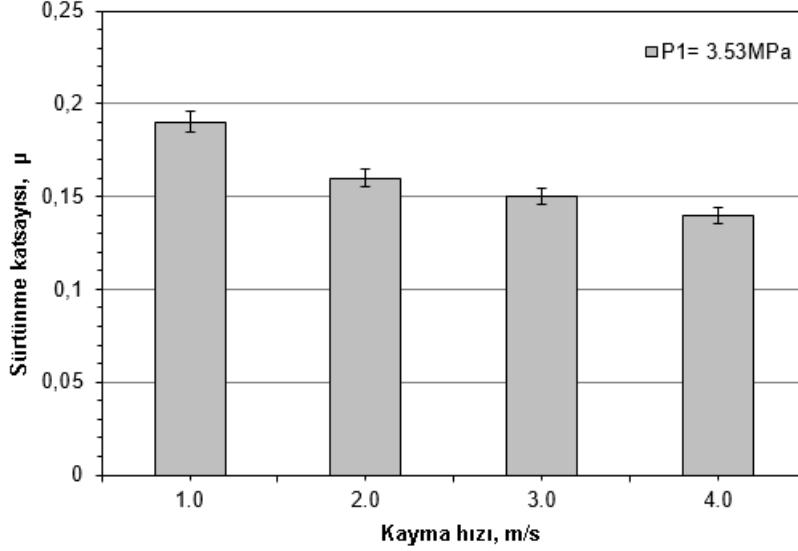
Şekil 4. Aşınma test cihazının gösterimi

Figure 4. Figure of the wear machine

DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Şekil 5'te HPV-PEEK yüksek performanslı polimer kompozitin 3.53 MPa basınç altındaki kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim verilmiştir. HPV-PEEK kompozitin sürtünme katsayısı şekilde görüldüğü gibi artan kayma hızına bağlı olarak azalmaktadır. Kayma hızının %300 oranında artırılması ile HPV-PEEK kompozitin sürtünme katsayısı yaklaşık olarak %35.7 oranında azalmıştır. 1.0 m/s kayma hızında 0.19 olan sürtünme katsayısı değeri 4.0 m/s kayma hızında 0.14 olarak elde edilmiştir. Bu düşüşün sebebi ise paslanmaz disk yüzeyinde oluşan ve disk ile polimer arasındaki

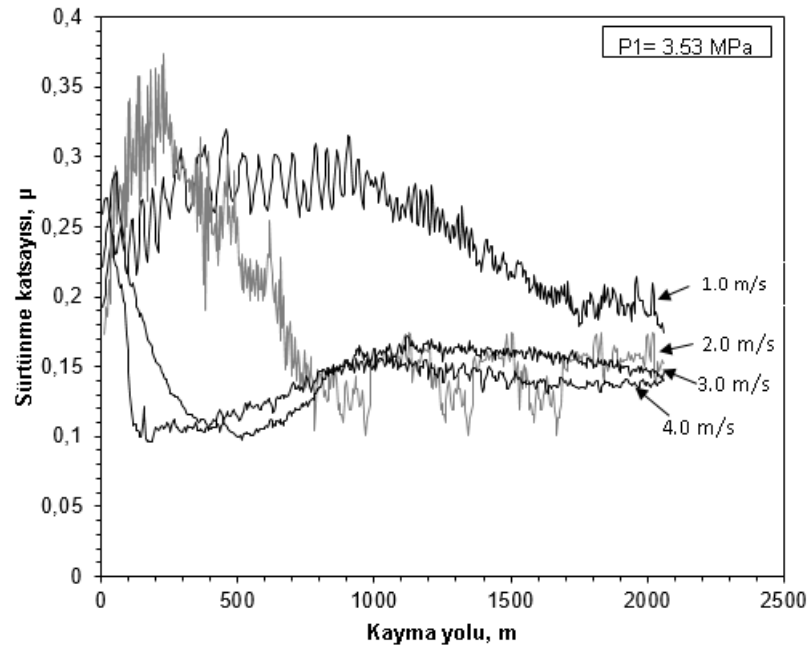
teması azaltan ince bir transfer film tabakasının oluşumudur. Oluşan bu transfer film tabakası, aşınma prosesi devam ettiğinde kararlı hal aşamasında daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmesine sebep olmuştur.



Şekil 5. HPV-PEEK kompozitin sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

Figure 5. Friction coefficient-sliding speed relationship of HPV-PEEK composite

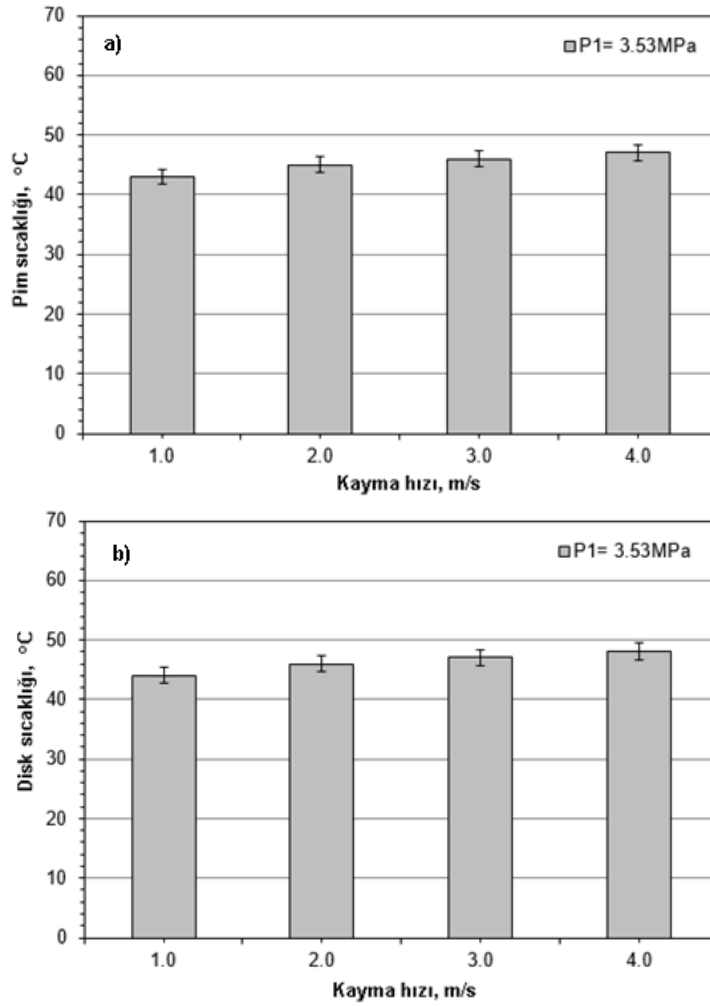
Şekil 6'da ise HPV-PEEK kompozitin farklı kayma hızlarına bağlı olarak sürtünme katsayısının kayma yoluna bağlı olarak değişimi verilmiştir. Bilindiği gibi polimer malzemelerin sürtünme davranışları başlangıç aşaması ve kararlı hal aşaması olmak üzere iki aşamada gerçekleşmektedir. Başlangıç aşamasında, polimer pim yüzeylerinde ve disk yüzeylerinde pürüzlülükler bulunmaktadır. Bu aşamada pim ve disk yüzeyleri temas ettiği için daha yüksek sürtünme katsayısı elde edilmektedir. Kararlı hal aşamasına ulaşıldığında ise bu pürüzlü yüzeyler oluşan polimer aşınması neticesinde ortadan kaybolmaktadır. Disk yüzeyi polimer aşınma partikülleri ile kaplanarak transfer film tabakasını oluşturmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi düşük kayma hızında (1.0 m/s) kararlı hal aşaması yaklaşık 1800 m civarında elde edilirken yüksek kayma hızlarında (2.0-4.0 m/s) yaklaşık olarak 1000 m gibi mesafede kararlı hal aşaması elde edilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi yüksek kayma hızlarında, karşı disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası (Şekil 9-d) kararlı hal aşamasına geçiş mesafesini önemli oranda azaltmıştır. Yutao ve arkadaşları [2020] tarafından temas halindeki malzemelerin kararlı hal aşamasına daha kısa sürede ulaşmasının önemli olduğu, bu durumun enerji tüketimini azalttığı ve kompozitin performansını arttırdığı belirtilmiştir.



Şekil 6. HPV-PEEK kompozitin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi

Figure 6. Friction coefficient-sliding distance relationship of HPV-PEEK composite

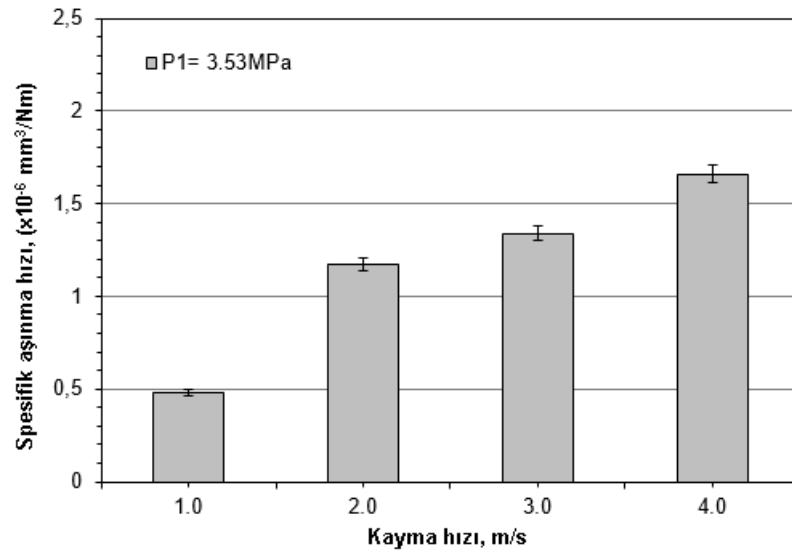
Viskoelastiklik ve sıcaklık değişimi polimer malzemelerin aşınma ve sürtünme özelliklerini etkileyen en önemli parametreler arasında yer almaktadır. Genellikle birbirine temas eden ve hareket eden iki malzeme arasında ısı oluşur ve oluşan bu ısı temas sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Temas noktasındaki sıcaklık polimer malzemenin deformasyon sıcaklığından daha yüksek olması durumunda yumuşama meydana gelecektir ve bu durum polimer malzemelerin viskoelastik özelliklerini etkileyecektir. Şekil 7 a-b'de HPV-PEEK kompozitin kayma hızına bağlı olarak aşınma testleri sırasında ölçülen pim ve disk yüzeylerin sıcaklıkları verilmiştir. Şekiller de görüldüğü gibi artan kayma hızı ile hem pim yüzey sıcaklığı hem de disk yüzey sıcaklığı artmıştır. Polimer pim numunenin düşük kayma hızında (1.0 m/s) ölçülen sıcaklığı yaklaşık 43 °C civarında iken yüksek kayma hızında yaklaşık 47 °C olarak ölçülmüştür. Polimer pim numunenin kayma hızına bağlı olarak yüzey sıcaklığının yaklaşık %9.3 oranında arttığı belirlenmiştir. Disk yüzey sıcaklıkları ise artan kayma hızına bağlı olarak yaklaşık 44 °C'den 48 °C'ye çıkmış ve yaklaşık %9.0 oranında disk yüzey sıcaklığı artmıştır. Kararlı hal aşamasında temas noktasındaki lokal sıcaklık aşınma ve sürtünme özelliklerinin kontrol edilmesinde kritik parametredir. Özellikle ısıl iletkenliği düşük olan polimer malzemeler için sürtünme ısısının etkisiyle oluşan lokal sıcaklık değerleri aslında polimerin ölçülen sıcaklığından daha yüksektir. Yüksek sıcaklık, yüzeyde malzemelerin deforme olmasına ve kimyasal reaksiyonlara sebep olabilmektedir. Eğer lokal sıcaklık polimer malzemenin camsı geçiş sıcaklığına ulaşırsa polimer malzemedeki mukavemet azalımı sürtünme ve aşınma özelliklerini daha fazla etkileyecektir [Karpe Ganesh ve Dhamejani, 2016]. Kuru kayma şartları altında, temas sonucunda oluşan sıcaklığın sürtünme katsayısı üzerinde etkisi olduğu Song ve arkadaşları [2015] tarafından da bildirilmiştir. Birbirleriyle temas sonucu oluşan veya sisteme uygulanan sıcaklığın HPV-PEEK polimer malzemenin camsı geçiş sıcaklığı (143 °C) altında olduğu durumlarda, sürtünme katsayısının düşük olduğu, camsı geçiş sıcaklığında (143-152 °C) sürtünme katsayısının aniden arttığı ve 180 °C üzerindeki sıcaklıklarda sürtünme katsayısının çok yüksek değerlerde elde edildiği belirtilmiştir.



Şekil 7. HPV-PEEK polimer kompozitin kayma hızına bağlı olarak temas yüzey sıcaklığı değişimi a) pim, b) disk

Figure 7. Contact surface temperature change depending on sliding speed of HPV-PEEK polymer composite a) pin, b) disc

Şekil 8’de ise HPV-PEEK kompozitin farklı kayma hızlarına bağlı olarak spesifik aşınma oranı değerleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan kayma hızına bağlı olarak kompozitin spesifik aşınma oranında artış gözlenmiştir. Spesifik aşınma oranındaki bu artış kayma hızının 1.0 m/s’den 2.0 m/s’ye çıkarılmasıyla yaklaşık %143 oranında elde edilirken kayma hızının 4.0 m/s’ye artırılması ile daha da artarak yaklaşık %245.8 oranında elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi HPV-PEEK polimerinin en düşük aşınma oranı $0.48 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değeri ile 1.0 m/s kayma hızında elde edilirken en yüksek aşınma oranı ise $1.66 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değeri ile 4.0 m/s kayma hızında elde edilmiştir. Juanjuan ve arkadaşları [2020] yaptıkları çalışmada, düşük yükler altında düşük aşınma oranı, yüksek yüklerde ise yüksek aşınma oranı değerleri elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada uygulanan kayma hızı ve basınç değerleri arasında aşınma oranını etkileyen en önemli parametrenin kayma hızı olduğunu belirtmişlerdir. Yani yapılan tribolojik testler sonucunda uygulanan kayma hızına bağlı olarak HPV-PEEK kompozit malzemesi daha fazla aşınmakta ve bu da çalışma ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Rulman, makara, burç ve aşınma kılavuzları gibi uygulamalarda HPV PEEK polimer kompozitin kullanılmasında bu malzemenin yüksek hızlardaki tribolojik davranışları dikkate alınmalıdır.



Şekil 8. HPV-PEEK kompozitin spesifik aşınma oranı- kayma hızı ilişkisi

Figure 8. The specific wear rate-sliding speed relationship of HPV-PEEK composite

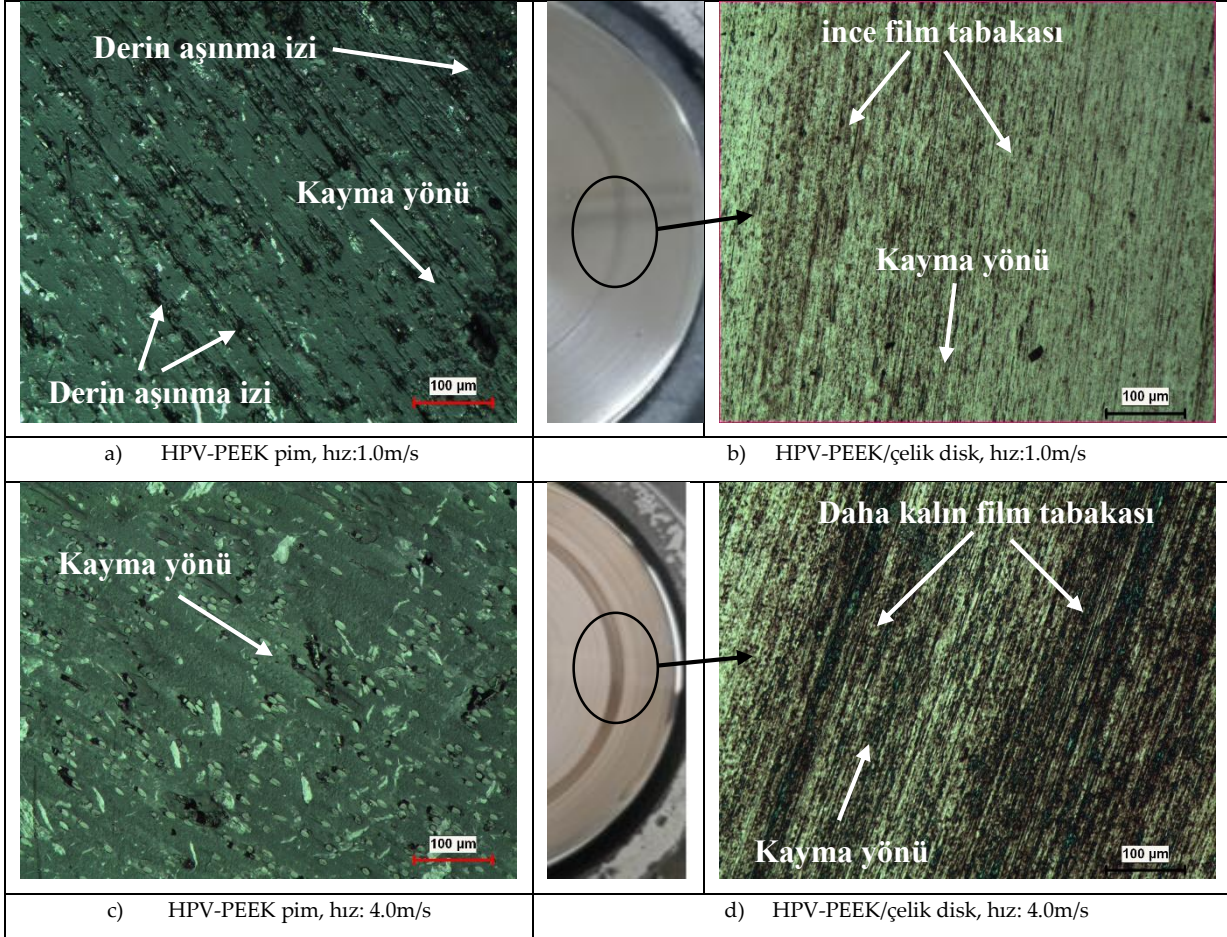
Şekil 9 a-d'de ise HPV PEEK polimer kompozitinin 3.53 MPa basınçta ve 1.0 m/s ve 4.0 m/s kayma hızlarında aşınma ve sürtünme testleri sonucunda elde edilen paslanmaz çelik disk ve polimer pim kompozitin optik mikroskopla alınan aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 9 b ve d'de görüldüğü gibi hem düşük kayma hızında hem de yüksek kayma hızında çelik disk karşı yüzeylerinde transfer film tabakasının oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan bu transfer film tabakasının kalınlığının ve dağılımının artan kayma hızı ile arttığı ve neredeyse tüm yüzeye yayıldığı görülmektedir. Transfer film tabakası, polimer pim numune ile çelik disk arasındaki teması azaltmış ve bu durum sürtünme katsayısının yüksek yüklerde (Bakınız Şekil 5 ve Şekil 6) azalmasının sebebinin açıklamaktadır. Şekil 9 a ve c'de ise HPV PEEK polimer kompoziti pim numunelerinin optik mikroskopta alınan aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde düşük kayma hızlarında kayma hızına paralel olarak şekillenen derin aşınma izlerinin oluştuğu gözlenirken artan kayma hızı ile aşınma izlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası ile açıklanabilir. Yutao ve arkadaşları [2020] aşınma yüzeylerinde oluşan izlerin PEEK polimerine göre çelik karşı diskin daha rijit ve sert olması ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Sürtünme ve aşınma prosesi süresince çelik üzerindeki sert pürüzlerin nispeten daha yumuşak olan PEEK polimerine nüfuz ederek uygulanan yük ve kesme kuvveti etkisi ile PEEK polimerini koparttığı belirtilmiştir. Genellikle plastik deformasyon, delaminasyon ve kesme kuvvetinin oluşması ile PEEK polimeri bir film tabakası oluşturmak üzere karşı disk yüzeyine transfer olmaktadır.

SONUÇLAR (RESULTS)

HPV-PEEK polimer kompozitinin düşük ve yüksek kayma hızlarında tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

HPV-PEEK polimer kompozitin sürtünme katsayısı kayma hızının artmasına bağlı olarak azalmıştır. Hızın 1.0 m/s den 2.0, 3.0 ve 4.0 m/s 'ye artırılmasıyla sürtünme katsayısı sırasıyla %15.7, %21 ve %26.3 oranında azalmıştır. Kayma hızı arttıkça pim ve disk sıcaklıklarında artış gözlenmiştir. Kayma hızı 1.0 m/s'den 4.0 m/s artırıldığında pim ve disk yüzey sıcaklıkları sırasıyla yaklaşık %9 ve %8,3 civarında artmıştır. Polimer pim sıcaklığı çalışılan şartlarda maksimum 48 °C'ye ulaştığından dolayı HPV-PEEK polimerinin yaklaşık 143 °C olan camı geçiş sıcaklığının oldukça altında olduğundan yumuşama eğilimi oldukça uzaktır. Bunun anlamı HPV-PEEK yüksek performanslı polimer kompozitinin deney şartlarında kullanılan maksimum hızlardan daha yüksek hızlarda ve yüklerde rahatlıkla ve kolaylıkla çalışabilir özellikte olduğudur. HPV-PEEK kompozitin spesifik aşınma oranı deneylerde kullanılan kayma hızının

artırılmasına bağlı olarak artış göstermiştir. Kayma hızının 1.0 m/s den 2.0, 3.0 ve 4.0 m/s'ye çıkarılmasıyla spesifik aşınma oranı sırasıyla %143, %278 ve %344 oranında artmıştır. 3.53 MPa sabit deney basıncında yapılan deneyler sonucunda en düşük spesifik aşınma oranı 0.48×10^{-6} mm³/Nm değeri ile 1.0 m/s kayma hızında elde edilirken en yüksek spesifik aşınma hızı 1.66×10^{-6} mm³/Nm değeri ile 4.0 m/s kayma hızında elde edilmiştir. Karbon fiber takviyeli grafit ve poli-tetra-flor-etilen (PTFE) katkılı poli-eter-eter-eton polimerinde düşük kayma hızlarında abrazif aşınma mekanizması gözlenirken yüksek kayma hızlarında adhezif aşınma mekanizması gözlenmiştir.



Şekil 9. Aşınma testleri sonucunda elde edilen disk ve pim yüzeylerinin optik görüntüleri

Figure 9. Optical images of disc and pin surfaces obtained as a result of wear tests

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, desteklerinden dolayı Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (Proje No: 008-2020) teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Bijwe, N., 2007, "Potential of fibres and solid lubricants to enhance the triboutility of PEEK in adverse operating conditions", *Industrial Lubrication Tribology*, Cilt: 4, ss.156-165.
- Davide, M., Giacomo, R., Nora, L., Steven, C., Paolo, P., 2021, "Tribological Characterization of Polyether Ether Ketone (PEEK) Polymers Produced by Additive Manufacturing for Hydrodynamic Bearing Application", *Lubricants*, Cilt: 9, ss. 112.

- Huayuan, W., Feng, X., Shi, Y., Lu, X., 2009, "A Study on the Tribological Properties of Self-assembled Method Treated Nano-La₂O₃ Filled PTFE/PEEK Composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Cilt: 28, Sayı: 6, ss. 645-655.
- <https://polyfluorold.com/blog/peek-the-impact-of-carbon-fibre-fillers-on-hpv-bearing-grades/>, Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2022.
- <http://qep.matweb.com/search/DataSheet.aspx?Bassnum=P1SM1A&ckck=1>, Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2022.
- Juanjuan, Z., Le, M., Dwyer-Joyce, R., 2020, "Friction and wear behaviors of self-lubricating peek composites for articulating pin joints", *Tribology International*, Cilt: 149, 105741.
- Karpe Ganesh G., Dr. C.L. Dhamejani, 2016, "Investigation of Tribological Behavior of PEEK Composite with Glass Fiber Filled under Harsh Operating Condition", *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, Cilt: 2, Sayı:1, ss. 271-279.
- Kharat, A., Talekar, S., Jadhav, S., More, S., Shelke, R., 2019, "Investigation of Tribological Behavior of Peek Composite with Glass Fiber", *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, Cilt: 6, Sayı: 2, ss.214-216.
- Li, E.Z., Guo, W.L., Wang, H.D., Xu, B.S., Liu, X.T., 2013, "Research on Tribological Behavior of PEEK and Glass Fiber Reinforced PEEK Composite", *Physics Procedia*, Cilt: 50, ss. 453-460.
- Liao, Y., Lin, C., Qiwei, W., Shuangjian, L., Zhidan, L., Wei, L., Peng, Z., Chuanyong, Y., 2022, "Enhanced tribological properties of PEEK-based composite coatings reinforced by PTFE and graphite", *Journal of Applied Polymer Science*, Cilt: 139, Sayı: 13, ss. 51878.
- Mir, A.H., Charoo, M. S., 2019, "Friction and wear characteristics of polyetheretherketone (PEEK): A review. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*", Cilt: 561, 012051IOP.
- Petrica, M., Bernadette, D., Thomas, K., Vasiliki Maria, A., 2016, "Studies on Tribological behavior of PEEK and PE-UHMW. *AIP Conference Proceedings*", Cilt: 1779, 070001.
- Puertolas, J. A., Castro, M., Morris, J.A., Rios, R., Anson-Casaos, A., 2019, "Tribological and Mechanical Properties of Graphene Nanoplatelet/PEEK Composites", *Carbon*, Cilt: 141, ss. 107-122.
- Shah, N., 2021, "A Review- Tribological performance of PEEK (Polyether-Ether-Ketone) Coating", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Cilt: 10, Sayı: 11, ss. 216-218.
- Shukur Z. M., Dearn, K. D., 2020, "The Tribological Behaviours of PEEK and Peek Based Composites PEEK Under Sliding Contact", *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, Cilt: 43, Sayı: 7, ss. 389-405.
- Song J., Liu Y.H., Wang S., Liao Z.H., Liu W.Q., 2015, "Study on the wettability and tribological behaviors of glass fiber reinforced poly(ether-ether-ketone) against different polymers as bearing materials for artificial cervical disc", *Biotribology*, Cilt: 4, ss. 18-29.
- Wang, Q., Fei, Z., Tingmei, W., 2016, "Tribological properties of polymers PI, PTFE and PEEK at cryogenic temperature in vacuum", *Cryogenics*, Cilt: 75, ss. 19-25.
- Yutao, Y., Jiang, C., Huo, Y., Li, C., 2020, "Preparation and tribological behaviours of lubrication enhanced PEEK composites", *Applied Science*, Cilt: 10, Sayı: 21, ss. 7536.
- Zalaznik, M., Kalin, M., Novak, S., Jakša, G., 2016, "Effect of the type, size and concentration of solid lubricants on the tribological properties of the polymer PEEK", *Wear*, Cilt: 364-365, ss. 31-39.



ASSESSMENT OF INSTALLED POWER FOR INCLINED BELT CONVEYORS USING GENETIC ALGORITHM AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Ekin KÖKEN

Abdullah Gül University, Engineering Faculty, Nanotechnology Engineering Department, Kayseri, TURKEY
ekin.koken@agu.edu.tr

(Geliş/Received: 10.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 09.05.2022)

ABSTRACT: In this study, the installed power (P_{inst} , kW) of several inclined belt conveyors operating in the mining industry of Turkey was investigated through two soft computing algorithms (i.e., genetic expression programming (GEP) and artificial neural networks (ANN)). For this purpose, the most crucial belt (i.e., belt length (L), belt width (W), belt inclination (α)), operational (i.e., belt speed (V_b) and throughput (Q)) and infrastructural (belt weight (W_b) and idler weight (W_{id})) features of 42 belt conveyors were collected for each investigated belt conveyor. The collected data was transformed into a comprehensive dataset for soft computing analyses. Based on the GEP and ANN analyses, two robust predictive models were proposed to estimate the P_{inst} . The performance of the proposed models was evaluated using several statistical indicators, and the statistical evaluations demonstrated that the models yielded a correlation of determination (R^2) greater than 0.95. Nevertheless, the ANN-based model has slightly overperformed in predicting the P_{inst} values. In conclusion, the proposed models can be reliably used to estimate the P_{inst} for the investigated conveyor belts. In addition, the mathematical expressions of the proposed models were given in the present study to let users implement them more efficiently.

Keywords: Belt conveyors, Mining, Installed power, Gene expression programming, Artificial neural networks

Eğimli Bant Konveyörlerde Kurulu Gücün Genetik Algoritma ve Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Tahmini

ÖZ: Bu çalışmada, madencilik endüstrisinde kullanılan bazı eğimli bant konveyörlerin kurulu gücü (P_{inst} , Kw) iki yapay zeka yöntemi (Genetik programlama (GEP) ve yapay sinir ağları (ANN) ile araştırılmıştır. Bu amaçla, 42 bant konveyöre ait en önemli bant (bant boyu, (L), bant genişliği (W), bant eğimi (α)), işletme (bant hızı, (V_b) ve taşıma kapasitesi (Q)) ve alt yapı (Bant ağırlığı (W_b), bant akış kasnak ağırlığı (W_{id})) özelliklerine ait veriler toplanmıştır. Toplanan veriler yapay zeka analizleri için bir veri seti haline dönüştürülmüş olup, GEP ve ANN yöntemlerini temel alan ve P_{inst} değerini tahmin edebilen iki kuvvetli tahmin modeli önerilmiştir. Önerilen modellerin performansları bazı istatistiksel göstergerler kullanılarak değerlendirilmiş olup, istatistiksel değerlendirmeler modellerin belirleme katsayısı (R^2) değerlerinin 0.95'ten yüksek olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, ANN yöntemini temel alan modelin P_{inst} değerlerini tahmin etmede hafif bir üstünlüğü mevcuttur. Sonuç olarak, önerilen modeller güvenilir bir biçimde P_{inst} değerlerini tahmin etmede kullanılabilir. Ayrıca çalışmada ifade edilen modellere ait matematiksel ifadeler kullanıcıların modelleri daha etkin bir şekilde kullanmaları adına bu çalışmada sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bant konveyörler, Madencilik, Kurulu güç, Genetik programlama, Yapay sinir ağları

1. INTRODUCTION

Belt conveyors are materials handling equipment that is widely used in several industries. They transport bulk materials from one side to another one in a plant or an industrial environment. Therefore, belt conveyors should continuously operate during their service life with optimum energy consumption. To achieve the maximum outputs from a belt conveyor, it is essential to note that variables such as throughput, operating time, motor horsepower, and the efficiency of components embedded in the belt conveyor system should be paid attention to sustainable material transportation.

A typical belt conveyor is illustrated in Figure 1. Of the variables described in Figure 1, the head pulley with gearbox and the electrical motor are one of the most critical variables for belt conveyor sustainability. Since the power consumption of belt conveyors plays a crucial role in engineering economics, it has been investigated in terms of equipment, operation, technology, and performance indicators, each of which has typical qualifications (Middelberg et al. 2009; Xia and Zhang 2010; Mhlongo et al. 2020).

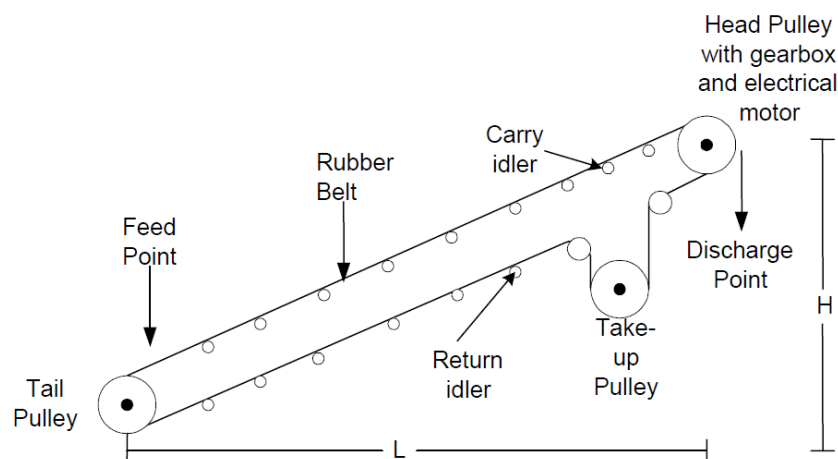


Figure 1. Simplified illustration of a typically inclined belt conveyor (Marx 2005).

Based on modern material transportation science and technology, the installed power of belt conveyors (P_{inst} , kW) has been studied through some methodologies. Therefore, fundamental factors acting directly on the power consumption of a belt conveyor have been widely documented. For instance, belt properties such as belt length (L), belt width (W), belt inclination (α), and belt speed (V_b) are directly associated with the P_{inst} .

Apart from these, belt weight (W_b), idler weight (W_{id}), and throughput (Q) can be declared as other independent parameters for evaluating power consumption (DIN 22101 2002; Dunlop-Fenner 2009; CEMA 2014).

Compared to the conventional ones, energy-saving belt conveyors equipped with multi drivers and soft starters have been designed to let the materials be transported over longer distances (Masaki et al., 2017). From this point of view, belt conveyor systems considering their infrastructures, are inevitable parts, especially in the mining industry.

For instance, Król et al. (2016) proposed a measurement methodology using strain gauges to determine the total mechanical power in underground and surface mining applications. Apart from these, soft computing algorithms were utilized to optimize or regulate the speed control of belt conveyors, which can reduce the total energy consumption (Espinosa et al., 2005; Lepasava et al. 2012; Ali 2018).

Belt conveyors are typically made up of a viscoelastic material, which extends under tension. While running in different segments, the belt has to overcome various resistances, causing its tension to increase continuously. Correspondingly, the belt extends during service life, and its speed increases gradually (Yao and Zhang, 2020). Therefore, the maintenance interval of belt conveyors becomes important for sustainable material transportation.

In that context, the proper selection of electric motor propelling the whole belt conveyor system is of prime importance. For this purpose, conventional methods such as DIN 22101 (2002), Dunlop – Fenner (2009), and CEMA (2014) have been widely adopted to estimate P_{inst} for belt conveyors. However, these methods have time-consuming calculation steps (Köken et al., 2022). Therefore, instead of adopting conventional methods to estimate the P_{inst} , such attempts based on soft computing algorithms would be much more practical and straightforward.

For a practical evaluation of estimating the P_{inst} for the Turkish Mining Industry (TMI), two soft computing methods (i.e., genetic algorithm and artificial neural networks) were attempted in this study. For this purpose, a total of 42 inclined belt conveyors used in mining companies in Turkey were considered. The geometrical, conditional, and operational features were collected from each belt conveyor, and the collected data was transformed into a database for soft computing analyses.

Adopting the constructed database, two soft computing-based predictive models were proposed. The performance of the proposed models was compared using several statistical indicators, and it was concluded that the two proposed methods could be reliably used to evaluate the P_{inst} for the investigated belt conveyors.

2. DATA COLLECTION METHOD

In this study, a comprehensive data collection method was carried out. More profoundly, the most important geometrical (i.e., L , W , α), operational (i.e., Q and V_b), and infrastructural (i.e., W_b , W_{id}) features were collected from each investigated belt conveyor. Under all these circumstances, the motor horsepower propelling each belt conveyor system was acquired, inspecting the identity card of each electric motor propelling belt conveyor system. The throughput (Q) of each belt conveyor was determined by Eq 1 as follows;

$$Q = 3.6 \times A_{mf} \times V_b \times \rho \quad (1)$$

where A_{mf} is the cross-section area of material flow (m^2) (DIN 22101 2002; CEMA 2014), ρ is the bulk density of the transported material (kg/m^3), and Q is ton/h in unit.

For determining A_{mf} in Eq 1, the methods proposed by DIN 22101 (2002) and CEMA (2014) were considered together, and average values obtained from these two methods were adopted as the A_{mf} for generalized material flow during material transportation. In addition, the V_b was measured using a stopwatch, observing the belt's material flow of one complete material transportation. Typically inclined belt conveyors considered in this study are given in Figure 2.

Based on the above-mentioned explanations, a comprehensive database was obtained to establish such predictive models for the evaluation of P_{inst} . Case studies and descriptive statistics of the variables considered in this study are listed in Table 1 and Table 2, respectively. From the descriptive statistics, one could notice that the investigated belt conveyors have a wide range of operational features that enable successful soft computing analyses, which are given in the following section.

3. SOFT COMPUTING ANALYSES

3.1. Gene expression programming (GEP)

The GEP is an evolutionary-based algorithm that produces an explicit mathematical formula between dependent and independent variables. The GEP was first developed by Ferreira (2001) and for the past two decades, the GEP has gained popularity among researchers in various engineering fields. In this section, novel applications of GEP were introduced to establish strong predictive models for the evaluation of P_{inst} . For this purpose, the GeneXpro software was used to implement various GEP models. In these models, the number of chromosomes, head sizes, and gene sizes were set to 30, 7, and 3, respectively.

The linking function was the addition, and root means squared error (RMSE) was regarded as the fitness function. As a result of the GEP analyses, the sub-expression trees obtained from the GEP analyses are given in Figure 3.



Figure 2. Typical inclined belt conveyors considered in this study.

3.2. Artificial neural networks (ANN)

The artificial neural network (ANN) has been widely adopted to predict dependent variables based on complex datasets. It is a well-accepted method in most engineering-related problems. In this study, the neural network toolbox (nntool) was utilized to establish several neural networks in the MATLAB environment. The dataset was randomly divided into training (70/100) and testing/validating (30/100) parts. Various possible network architectures with variable hidden layers and neurons were attempted to determine the most reliable structural combination. For estimating the P_{inst} , the most convenient ANN architecture was found to be 7–5–1. (Figure 4). To increase training efficiency, the dataset (Table 1) was normalized using the following equation (Singh et al. 2012; Lawal and Idris 2020).

$$V_N = 2 \left(\frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) - 1 \quad (6)$$

where x_i is the relevant parameter to be normalized, x_{\min} , and x_{\max} are the minimum and maximum values in the dataset (Table 2).

The explicit mathematic formulae of the sub-expression trees are also presented in Eqs 2 – 4.

$$S_1 = \frac{\left(\frac{-9.10 \times Q}{10^3} + 2.0745 \right) \times \alpha}{-5.2630} \times V_b \quad (2)$$

$$S_2 = -7.9893 + \ln(V_b) + 0.3356L \quad (3)$$

$$S_3 = \frac{\ln(V_b^2) - \frac{W}{Q - Slp} + Slp}{2} \quad (4)$$

Table 1. Case studies considered in this study.

Case	Belt length. L (m)	Belt slope. α (°)	Throughput. Q (t/h)	Belt width. W (mm)	Belt speed. V_b (m/s)	Belt weight. W_b (kg/m)	Idler weight. W_{id} (kg/m)	Installed power. P_{inst} (kW)
1	65	15	284	900	1.32	16.8	5.7	22.0
2	47	8	304	1000	1.74	18.3	6.2	15.0
3	53	10	472	900	2.10	16.5	5.7	22.0
4	33	7	525	1200	2.42	22.0	7.7	15.0
5	51	10	614	900	1.91	16.7	6.6	30.0
6	40	17	383	1000	0.98	18.6	7.1	22.0
7	40	10	279	900	1.55	16.5	5.7	11.0
8	54	11	383	1000	1.62	18.3	6.2	22.0
9	49	8	183	1200	2.03	22.0	7.7	11.0
10	52	9	345	900	1.57	16.5	5.7	15.0
11	33	16	441	1000	1.51	18.3	6.2	18.5
12	47	13	319	1000	2.55	18.3	6.2	18.5
13	65	11	353	1000	1.62	18.3	6.2	22.0
14	36	15	354	1000	2.09	18.3	6.2	22.0
15	52	13	293	1000	2.47	18.3	6.2	18.5
16	48	10	399	1000	2.09	18.3	6.2	18.5
17	47	8	157	1000	0.91	18.3	6.2	7.5
18	34	10	278	900	1.24	16.5	5.7	9.2
19	55	10	340	1200	2.58	22.0	7.8	18.5
20	43	9	313	900	1.53	16.5	5.7	15.0
21	49	13	290	1000	2.24	18.3	6.2	18.5
22	58	11	320	1200	2.06	22.0	7.8	22.0
23	58	11	383	1000	2.83	18.3	6.2	30.0
24	32	9	256	1000	2.00	18.3	6.2	9.2
25	59	11	439	1000	1.01	21.3	7.1	22.0
26	53	15	429	1000	2.44	18.3	6.6	30.0
27	33	8	523	900	1.69	16.5	6.6	15.0
28	41	19	148	1000	0.39	18.6	7.7	9.2
29	58	13	96	1200	0.31	19.8	7.8	7.5
30	42	12	416	1200	1.53	22.0	7.8	18.5
31	50	11	397	1000	2.66	18.3	6.2	22.0
32	40	14	375	1000	1.96	18.3	6.2	18.5
33	52	6	160	900	0.59	16.5	6.1	5.5
34	43	8	311	1000	1.54	18.3	6.2	11.0
35	45	8	189	1000	1.32	18.3	6.2	7.5
36	41	13	79	1000	0.32	16.5	6.2	4.0
37	48	9	801	1200	2.30	22.0	7.8	37.0
38	52	12	458	1000	2.35	18.3	6.2	30.0
39	41	22	327	900	2.17	16.5	5.7	22.0
40	53	15	311	1000	1.02	18.7	6.7	18.5
41	71	15	504	1000	2.50	18.3	6.2	45.0
42	55	10	338	1000	2.18	18.3	6.2	18.5

Based on the subexpression formulations given herein, the P_{inst} can be predicted by Eq 5.

$$P_{inst(GEP)} = 1.0377 \sum_{i=1}^3 S_i - 0.2148 \tag{5}$$

Based on the above-mentioned ANN architecture, the P_{inst} can be estimated using Eq 7. The subequations of the proposed ANN model are listed in Table 3.

$$P_{inst(ANN)} = 20.5 \tanh \left(\sum_{i=1}^5 A_i + 0.10968 \right) + 24.5 \tag{7}$$

Table 2. Descriptive statistics of the variables considered in this study.

Variable	Unit	Minimum	Mean	Maximum	Std. deviation	Number of observation
L	M	32.00	48.05	71.00	9.27	42
α	°	6.00	11.54	22.00	3.35	42
Q	t/h	79.00	346.9	801.00	136.5	42
W	mm	900.00	1009.50	1200.00	95.8	42
V_b	m/s	0.310	1.744	2.830	0.660	42
W_b	kg/m	16.50	18.50	22.00	0.27	42
W_{id}	kg/m	5.70	6.49	7.80	0.69	42
P_{inst}	kW	4.00	18.44	45.00	8.45	42

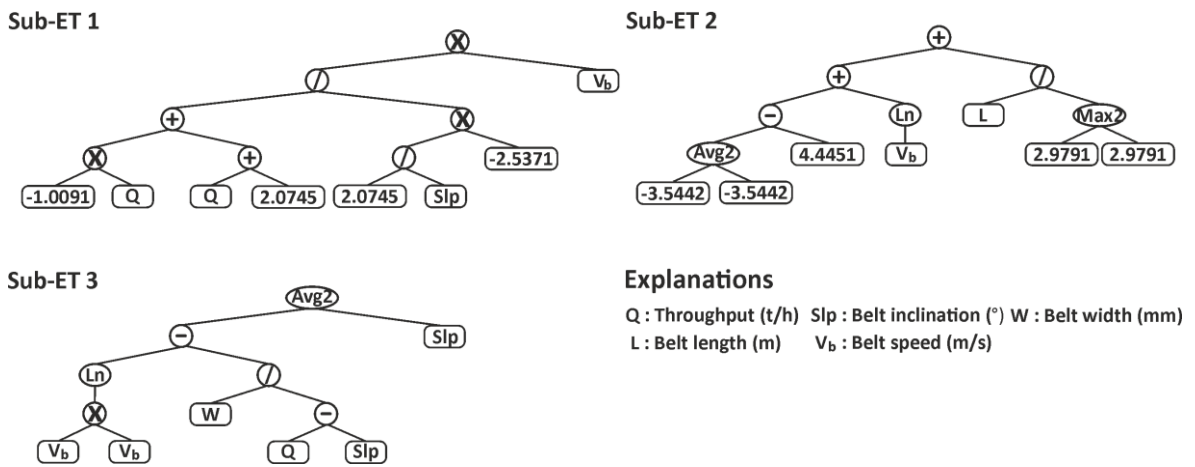


Figure 3. Sub expression trees for the developed GEP model.

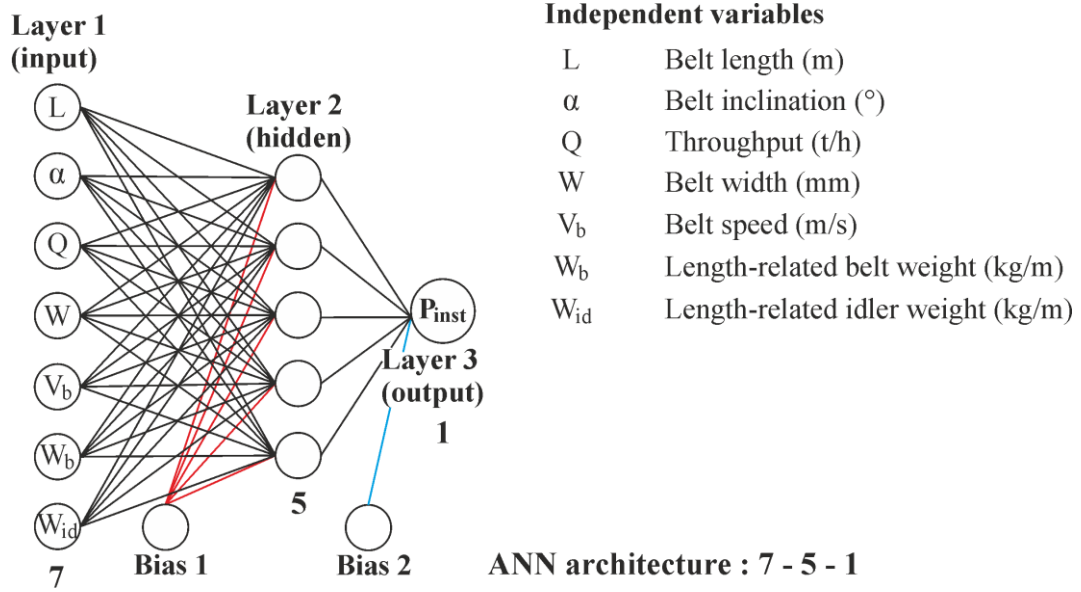


Figure 4. ANN architecture adopted in this study.

Table 3. Sub-equations for the developed ANN model

$A_1 = 0.66923 \tanh(1.2678 {}^n L + 0.97159 {}^n \alpha + 2.2611 {}^n Q + 0.44283 {}^n W + 0.12 {}^n V_b + 0.43722 {}^n W_b - 0.1698 {}^n W_{id} - 0.44501)$
$A_2 = -0.33578 \tanh(1.4031 {}^n L - 1.2798 {}^n \alpha - 0.2072 {}^n Q + 2.2191 {}^n W - 1.20 {}^n V_b + 1.6728 {}^n W_b + 0.5712 {}^n W_{id} - 0.21013)$
$A_3 = 0.044501 \tanh(0.75634 {}^n L - 0.88286 {}^n \alpha - 0.49325 {}^n Q + 1.1719 {}^n W + 1.94 {}^n V_b + 0.87464 {}^n W_b + 0.92297 {}^n W_{id} - 1.6244)$
$A_4 = 1.1508 \tanh(0.3072 {}^n L + 0.44506 {}^n \alpha + 0.6536 {}^n Q - 0.35161 {}^n W + 0.14 {}^n V_b + 1.0646 {}^n W_b - 0.26455 {}^n W_{id} + 1.0625)$
$A_5 = -0.71 \tanh(0.28099 {}^n L + 0.87214 {}^n \alpha - 0.90376 {}^n Q + 0.58785 {}^n W + 0.30 {}^n V_b + 0.81128 {}^n W_b + 0.1762 {}^n W_{id} + 2.7264)$
Normalization functions
${}^n L = 0.051L - 2.615$ ${}^n \alpha = 0.1268\alpha - 1.7901$ ${}^n Q = 0.0028Q - 1.2191$ ${}^n W = 0.0067W - 7$
${}^n V_b = 0.7946V_b - 1.2463$ ${}^n W_b = 0.3636W_b - 7$ ${}^n W_{id} = 0.9524W_{id} - 6.4286$

4. PERFORMANCE OF THE PROPOSED MODELS

The comparison of the predictive models was made using a simple computational code generated through Matlab 2020b (Appendix A). Accordingly, the predicted and measured P_{inst} values are plotted in Figure 5. The proposed GEP and ANN-based predictive models yielded a correlation of determination value (R^2) greater than 0.95.

Consequently, it is clear that the predicted P_{inst} values are in high conformity with the actual (operating) P_{inst} values. In the proposed GEP and ANN models, the most important independent variables (i.e., L , α , Q , W , V_b , W_b , and W_{id}) acting on the P_{inst} were considered (Figure 4). These independent variables were previously adopted by the conventional methods suggested by DIN 22101 (2002) and CEMA (2014).

The performance of the models was also evaluated using various statistical indices such as root means squared error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), and the variance accounted for (VAF). The equations to calculate these indices are given in Eqs. 8 – 10.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |o_i - e_i| \quad (9)$$

$$VAF = \left(1 - \frac{\text{var}(o_i - e_i)}{\text{var}(o_i)} \right) \times 100 \tag{10}$$

where o_i is the observed data, e_i is the estimated data, and n is the number of observations.

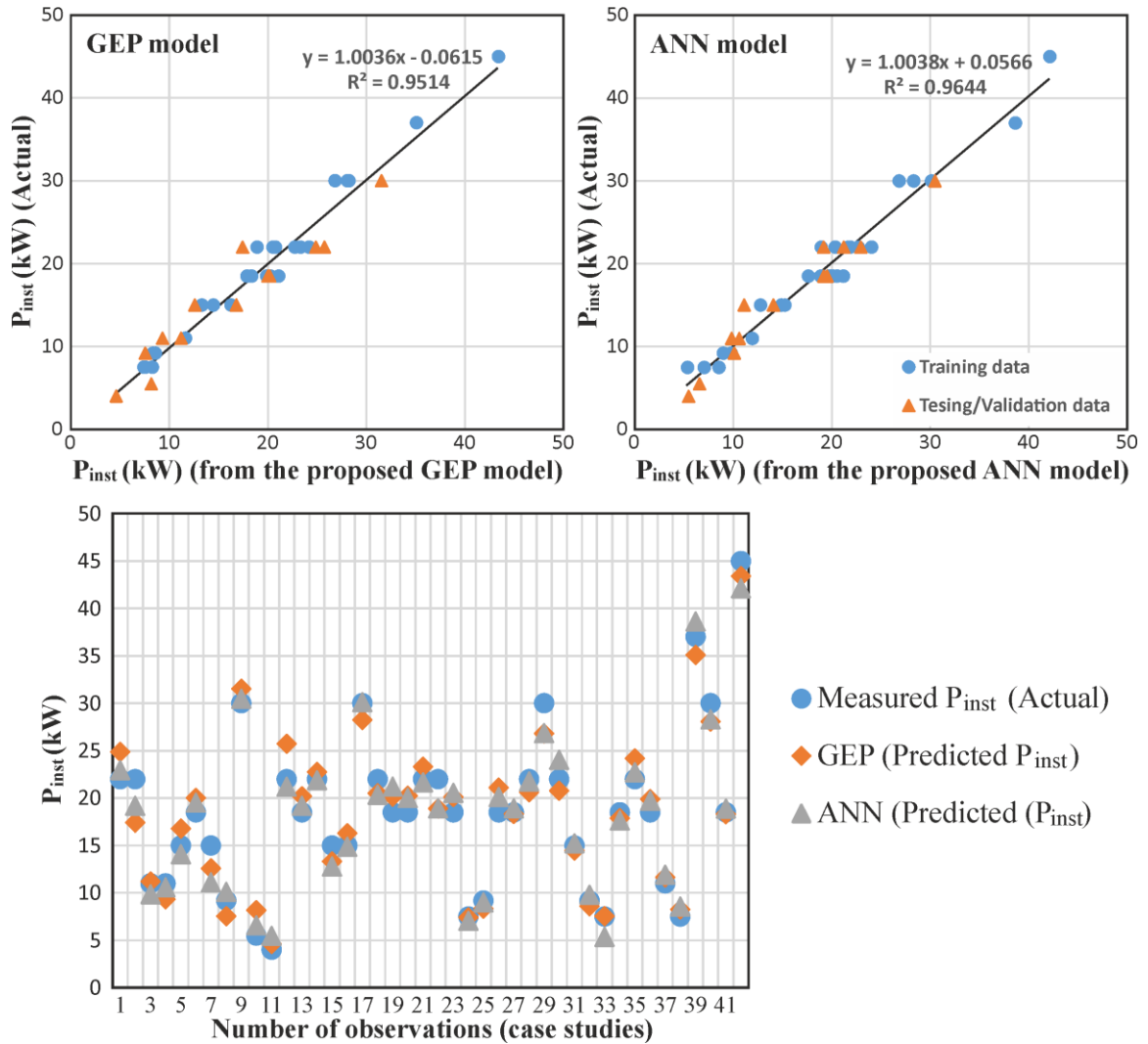


Figure 5. Comparison of the predicted and Measured P_{inst} values

The performance evaluation of the proposed models is given in Table 4. Higher VAF and lower RMSE and MAPE values indicate relatively more successful models. In this direction, when comparing the proposed predictive models to one another, it is logical to suppose that there is no remarkable superiority over the established models. Nevertheless, the ANN-based model (Eq 7) has a slight advantage in predicting the P_{inst} (Table 4). In any case, it is recommended to use the proposed predictive models together for the evaluation of P_{inst} since the conventional methods to estimate the P_{inst} is time-consuming.

Table 4. Performance evaluation of the predictive models

Predictive model	R2	RMSE	MAPE	VAF
GEP	0.9514	1.8416	1.5526	95.1341
ANN	0.9644	1.5812	1.2632	96.4360

Last but not least, the investigated belt conveyors have no energy-saving equipment such as soft starters, frequency converters, belt cleaners, or dust emission equipment, so the proposed models can only be valid for the evaluation of belt conveyors without having such equipment. Therefore there is still a need to analyze belt conveyors equipped with the above-mentioned equipment. It was reported by Jeftenic et al. (2009) and Mushiri (2016) that energy-saving equipment embedded into the belt conveyor systems had prolonged the maintenance interval of the whole belt conveyor system. Therefore, one can claim that the proper selection of motor horsepower could be overestimated when ignoring such equipment.

5. CONCLUSION

In this study, soft computing algorithms were attempted to estimate the P_{inst} of belt conveyors used in the TMI. For this purpose, a total of 42 belt conveyors were considered to establish a comprehensive database for soft computing analyses. Most important geometrical, operational and infrastructural features were collected from each investigated belt conveyor. Based on the GEP and ANN analyses, two robust predictive models were proposed. The proposed models yielded an R^2 greater than 0.95. The performance of the models was also compared with each other, and it was concluded that, there is no clear superiority over the proposed models for the evaluation of P_{inst} . However, the ANN-based model slightly overperformed the other model. Therefore, these two methods can be reliably used to estimate the P_{inst} values for the investigated belt conveyors. It is thought that the proposed models can save time and provide adequate and practical information for estimating the P_{inst} of inclined belt conveyors in the TMI. Since the conventional methods to estimate the P_{inst} is time-consuming, the explicit mathematical formulations of the proposed models were coded in the Matlab environment that can be easily implemented for practical evaluations in this study. From this approach, the present study can be declared a case study showing the applicability of soft computing tools for inclined belt conveyors used in the TMI.

6. ACKNOWLEDGEMENT

The author is greatly indebted to anonymous mining companies who provided their facilities during data gathering and shared the quantitative data of the investigated belt conveyors.

7. CONFLICT of INTEREST

The author declares that he has no known competing financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this document.

Appendix A

Matlab codes for the evaluation of P_{inst} .

```
%Input parameters
Q=input('throughput (t/h):');
Slp=input('slope (degree):');
W=input('belt width (mm):');
L=input('belt length (m):');
Vb=input('Belt speed (m/s):');
Wb=input('Belt weight per unit (kg/m):');
Wid=input('Idler weight per unit (kg/m):');
```

```

%ANN Model
% Normalization functions for the ANN model
nL=0.051*L-2.615;
nSlp=0.1268*Slp-1.7901;
nQ=0.0028*Q-1.2191;
nW=0.0067*W-7;
nVb=0.7946*Vb-1.2463;
nWb=0.3636*Wb-7;
nWid=0.9524*Wid-6.4286;

%Sub equation systems for the ANN model
A1=0.66923*tanh(1.2678*nL+0.97159*nSlp+2.2611*nQ+0.44283*nW+0.12*nVb+0.43722*nWb-0.1698*nWid-0.44501);
A2=-0.33578*tanh(1.4031*nL-1.2798*nSlp-0.2072*nQ+2.2191*nW-1.20*nVb+1.6728*nWb+0.5712*nWid-0.21013);
A3=0.044501*tanh(0.75634*nL-0.88286*nSlp-0.49325*nQ+1.1719*nW+1.94*nVb+0.87464*nWb+0.92297*nWid-1.6244);
A4=1.1508*tanh(0.3072*nL+0.44506*nSlp+0.6536*nQ-0.35161*nW+0.14*nVb+1.0646*nWb-0.26455*nWid+1.0625);
A5=-0.71*tanh(0.28099*nL+0.87214*nSlp-0.90376*nQ+0.58785*nW+0.30*nVb+0.81128*nWb+0.1762*nWid+2.7264);
Pann=20.5*tanh(A1+A2+A3+A4+A5+0.10968)+24.5

%GEP model
% Sub equation systems for the GEP model
S1=(-9.1*10^-3*Q+2.0745)*Slp/-5.2630)*Vb;
S2=-7.9893+log(Vb)+0.3356*L;
S3=((log(Vb.^2))-W)/(Q-Slp)+Slp)/2;
Pgep=1.0377*(S1+S2+S3)-0.2148

```



8. REFERENCES

- Ali A.R. 2018 Predicted speed control based on Fuzzy Logic for belt conveyors, Thesis research in Master's Program in Electrical Engineering, Karlstad University, Sweden, 72 pp.
- CEMA 2014 Conveyor Equipment Manufacturers Association Belt Conveyors for Bulk Materials, 7th, 2014. 978-1891171-44-4
- DIN 22101 2002 German Institute for standardization: Continuous conveyors - Belt conveyors for loose bulk materials - Basis for calculation and dimensioning, 51 pp.
- Dunlop-Fenner 2009 conveyor handbook: Conveyor belting Australia, 103 pp.
- Espinosa O., Jose J. Vandewalle J.P.L, and Wertz V. 2005 Fuzzy Logic, Identification and Predictive Control. Advances in Industrial Control. Springer-Verlag, London, ISBN 978-1-84628-087-0
- Ferreira C. 2001 Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems, Complex Syst, pp. 13
- Jeftenic B., Ristić L., Bebić M., and Statkic S. 2009 Controlled induction motor drives supplied by frequency converters on belt conveyors; modeling and commissioning. In 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp 1063-1068
- Król R. Kaszuba D. and Kisielewski W. 2016 Determination of the mechanical power in belt conveyor's drive system in industrial conditions, In IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 44, 042038
- Köken E., Lawal A.I. Onifade M. and Özarslan A. 2022 A comparative study on power calculation methods for conveyor belts in mining industry, Int J. Min. Rec., 36: 26-45.

- Lawal A.I., and Idris M.A., 2020 An artificial neural network-based mathematical model for the prediction of blast-induced ground vibrations. *Int. J. Environ. Stud.*, 77(2): 318 – 334
- Marx D.J.L. (2005) Energy audit methodology for belt conveyors, Master thesis, University of Pretoria, 123 pp.
- Masaki MS, Zhang LJ, Xia XH. 2017 A comparative study on the cost-effective belt conveyors for bulk material handling, In 9th International Conference on Applied Energy, ICAE2017. Cardiff, UK, 21–24 August. pp. 2754–2760.
- Mhlongo I.N., Nnachi G.U., Nnachi A.F. and Adesola A.T. 2020 Modelling and simulation of conveyor belt for energy efficiency studies, IEEE PES/IAS PowerAfrica, DOI: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219974
- Middelberg A., Zhang J., and Xia X., 2009 An optimal control model for load shifting–With application in the energy management of a colliery, *Appl. Energy*. 86, 7–8, pp. 1266–1273.
- Mushiri T. 2016 Design of a power saving industrial conveyor system, In Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2016 Vol II WCECS 2016, October 19-21, 2016, San Francisco, USA
- Singh R., Kainthola A., and Singh T.N., 2012 Estimation of elastic constant of rocks using an ANFIS approach, *Appl. Soft Comput. J.* 12: 40–45.
- Xia X. and Zhang J., 2010 Energy efficiency and control systems–from a POET perspective, *IFAC Proc.* 43, 1, pp. 255–260. DOI:10.3182/20100329-3-PT-3006.00047
- Yao Y. and Zhang B. 2020 Influence of the elastic modulus of a conveyor belt on the power allocation of multi-drive conveyors, *Plos One*, 15(7): e0235768, DOI: 10.1371/journal.pone.0235768



ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE GES BAĞLANDIKTAN SONRA REAKTİF/AKTİF GÜÇ ORANININ YSA İLE BELİRLENMESİ

¹Emine İŞİN , ²Nurettin ÇETİNKAYA 
¹ eisin@ktun.edu.tr, ² ncetinkaya@ktun.edu.tr

*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Konya, TÜRKİYE*

(Geliş/Received: 16.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.05.2022)

ÖZ: Günümüzde elektrik enerjisine olan talep, sosyal yaşam, endüstriyel uygulamalar ve sanayileşmeye bağlı olarak gün geçtikçe artmaktadır. Enerji talebinin artmasıyla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgar, hidrojen vs.) kullanımının önemi de artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bir güç sistemine dahil edilmesinden sonra ortaya çıkması muhtemel teknik problemlerin incelenmesi gereklidir. Bu teknik problemler genel olarak "Güç Kalitesi" adı ile birlikte değerlendirilebilir. Güç kalitesi; harmonikler, gerilim dalgalanması, güç katsayısı ve fliker gibi birçok parametreyi içinde barındırmaktadır. Bir güneş enerji santralının endüstriyel firmalarda güç sistemine dahil edilmesinde sonra besleme gerilimi, harmonik ve güç katsayısı değerlerinde değişim meydana gelebilir. Bu yüzden şebekeden çekilen elektrik enerjisinin aktif, reaktif ve harmonik değerlerinin sürekli takip edilmesi gerekmektedir. Reaktif/aktif enerji oranları sınır değerleri Enerji Piyasası Değerlendirme Kurumunun belirlediği sınırlar içerisinde olması gerekmektedir. Reaktif yüklerin aktif yüklere oranlandığında güç faktörünün de değişimi söz konusudur. Bu çalışmada; ölçümü yapılan güneş enerji santrali, reaktif/aktif oranı, harmonik ve gerilim saptması yönünden değerlendirilmiştir. Firmalarda GES bağlandıktan sonra yapılan analizler sonucunda yüklerin sistem üzerinde oluşturabileceği sorunlar tespit edilip çözüm önerisi sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Endüktif güç, GES, Kapasitif güç, Aktif güç, Yenilenebilir enerji, Güç faktörü, Güç kalitesi

Detection of Reactive / Active Power Ratio by ANN after Connection GES in Industrial Facilities

ABSTRACT: Today, the demand for electrical energy is increasing day by day depending on social life, industrial applications and industrialization. With the increase in energy demand, the importance of the use of renewable energy sources (solar, wind, hydrogen, etc.) has also increased. It is necessary to examine the technical problems that may arise after the incorporation of renewable energy sources into a power system. These technical problems can generally be evaluated together with the name "Power Quality". power quality; It contains many parameters such as harmonics, voltage fluctuation, power factor and flicker. After a solar power plant is included in the power system in industrial companies, a change may occur in the supply voltage, harmonic and power coefficient values. Therefore, the active, reactive and harmonic values of the electrical energy drawn from the network should be constantly monitored. Limit values of reactive / active energy ratios must be within the limits determined by the Energy Market Evaluation Authority. When the reactive loads are proportional to the active loads, the power factor also changes. In this study; The solar power plant, which was measured, was evaluated in terms of reactive/active ratio, harmonic and voltage deviation. As a result of the analyzes made after the power

supply was connected in the companies, the problems caused by the loads on the system were determined and solution suggestions were presented.

Keywords: *Inductive power, GES, Capacitive power, Active power, Renewable energy, Power factor, Power quality*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisini daha etkin bir biçimde kullanabilmek için, enerji üretimi, iletimi, dağıtımını yapan firmalar elektrik enerjisinin en az kayıpla tüketiciye ulaşması için çaba harcamaktadır. Elektrik içerisinde birçok parametreyi barındırmaktadır. Bu parametreler arasında harmonikler, güç faktörü, fliker, gerilim sapması yer almaktadır. Harmonikler sonucunda gerilim ve akımda dalga şeklinde bozulma, kullanılan ekipmanlarda ısınmalar gibi problemler meydana gelmektedir. Buna ek olarak kompanzasyon sistemlerinde aşırı reaktif yüklenme, pano arızaları sistemin işleyişini olumsuz etkileyecektir. Güç kalitesinden kaynaklanan bu problemler hem şebeke tarafını hem de kullanıcı tarafını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca reaktif/aktif güç oranının Enerji Piyasası Değerlendirme kurumunun yönetmelik gereğince belirlediği sınırlar içerisinde olması gerekmektedir. Kurulu gücü 50 kVA'nın altında olan kullanıcılar çekmiş oldukları aktif enerji miktarının %33'ünü aşacak şekilde endüktif reaktif veya aktif enerji miktarının %20'sini aşacak şekilde kapasitif reaktif tüketmeleri halinde reaktif enerji tüketim bedeli ödemek zorunda kalacaktır. Kurulu gücü 50 kVA'nın üstünde olan kullanıcılar ise çektikleri aktif enerji miktarının %20'sini aşan şekilde endüktif reaktif enerji tüketmeleri veya aktif enerji miktarının %15'ini aşan şekilde sisteme kapasitif reaktif enerji vermeleri halinde, reaktif enerji tüketim bedeli ödemekle yükümlüdür (EPDK-16. Madde). Kullanıcı hatası sebebiyle reaktif enerjinin kaydedilememesi (veya sıfır değer kaydetmesi) durumunda reaktif enerji, aktif enerjinin 0,9 katı alınarak hesaplanır. EPDK tarafından yayınlanan 2022 yılı 2.Çeyrek Faaliyet Bazlı Tarife Tablosuna göre reaktif enerji bedeli 1 Mart 2022'den itibaren 47,4737 krş/kVArh olarak belirlenmiştir. Kullanıcıların aktif reaktif güç oranını cezaya girmeyecek şekilde kontrol altında tutması gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı güçlerdeki endüstriyel firmalarda devreye alınan güneş enerji santralinin aktif ve reaktif değerleri nasıl değişecek, sistemi nasıl etkileyecek, sistemin mevcut kompanzasyon panosunun yenilemek gerekcek mi sorularına cevap aranmıştır. Yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak aktif/reaktif oran tahmin edilmeye çalışılmış, sisteme etkileri hakkında yorumlar yapılmıştır. Kullanıcılara hesaplı, güvenilebilir, kaliteli enerji sunabilmek için yapılacak tahmin çalışmaları büyük önem arz etmektedir (Var ve Türkay, 2014). Tahmin çalışmaları geçmişteki parametrelerin gelecekteki durumun tahmin edilmesi prensibine dayanır. Doğru yapılan tahmin çalışmaları gelecekteki enerji ihtiyacını, enerji ihtiyacındaki ani değişimlerinin tespit etmesiyle durum analizi yapılmasına fayda sağlar (Buhari ve Adamu, 2012). Regresyon analizi, istatistiksel analiz çalışmaları, YSA gibi yöntemler tahmin çalışmalarında sıklıkla kullanılır (Var ve Türkay, 2014).

Kısa vadeli rüzgar gücü tahmin etme çalışmasında hibrid yaklaşım olarak yapay sinir ağları kullanılmış çalışmalar sonucunda ilkbahar, yaz, sonbahar, kış ayları için mutlak yüzdesel hata oranları hesaplanmıştır (Eyese ve diğ., 2017). Gaziantep, Antakya, Kahramanmaraş illeri için yapılan çalışmada yıllık güneş ışınım miktarı, Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan verilere göre YSA ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen yapay sinir ağı ile meteorolojiden alınan veri ile bir tane girdi, iki tane gizli katman ve bir tane çıktı katmanından oluşmaktadır. Oluşturulan modelde Levenberg Marquardt ileri yayımlı algoritma kullanılmıştır. Belirtilen iller için R^2 , RMSE, MAPE ve MSE parametresi ayrı ayrı hesaplanmıştır (Şahan, 2021). İtalya hava kuvvetlerinden alınan veri ile yapılan çalışmada rüzgar hızı tahmin edilmeye çalışılmış, yapılan tahminin doğruluk oranları MAPE, RMSE ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır (Finamore ve diğ., 2016).

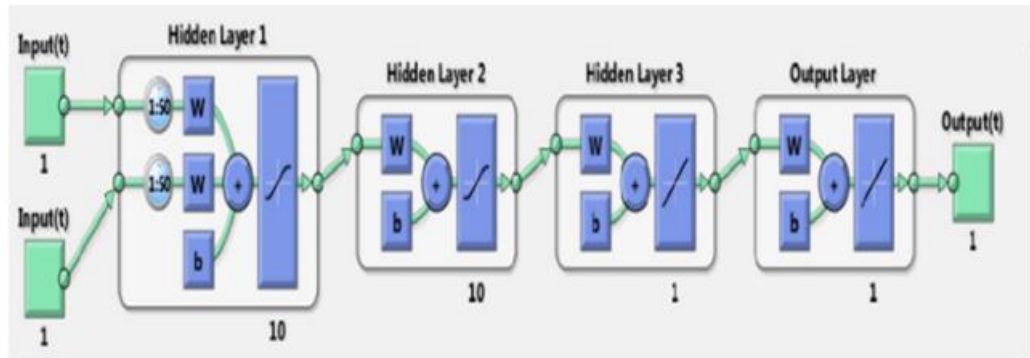
YSA ile yapılan bir çalışmada 24 saat öncesinde güneş enerji santrallerinde güç tahmin edilmeye çalışılmıştır. Kıyaslama yaklaşımları, RMSE, MAE, WMAE verileri ile sistemden elde edilen verilerin doğruluğu ölçülmüştür. Ayrıca YSA modeli oluşturulurken BAGGING ve Bootstrap teknikleri kullanılarak eğitim veri kümeleri, deneme yanılma prosedürüne katkı sağlanmıştır. (Al-Dahidi ve diğ., 2019)

(Zarkovic ve Sosis, 2016) dağıtık üretim tesislerinde harmonik yük akışını YSA ile belirlenmesi için geliştirmiş oldukları modelde elektrik güç sistemlerinin kararlı durumunu değerlendirerek, dağıtık üretim tesislerinin daha kontrollü çalışması için bir planlama oluşturmuşlardır. Sistemdeki güç akışı dikkate alınmalıdır. Bu durumu göz önüne almak için Monte Carlo simülasyonu kullanılmıştır. Aktif güç kayıpları, gerilim dalgalanması, toplam harmonik bozulma dağıtık üretimin etkileridir. Dağıtık üretimin etkileri sistemin verilerini oluşturmaktadır. YSA modeli ile IEEE-33 baralı sistem kullanılarak simülasyonlar tamamlanmıştır.

Endonezya'da gerçekleştirilen bir çalışmada YSA kullanılarak kısa vadede yük tahmini yapılmaya çalışılmıştır. Backpropagation yönteminin öğrenilmesinde gizli katman davranışı gözlemlenmiş ve kısa süreli elektrik yüklerinin tahmini için kullanılmıştır. Kullanılan iki gizli katman her katmanda ise on nöron bulunmaktadır (Zuraidah ve diğ., 2021).

TEORİK METOD (THEORETICAL METHOD)

Endüstriyel tesisin güç oranlarının tahminini yapabilmek için MATLAB Regression Learner yaklaşımı ve Neural Network Start Dyanamic Time Series ve Excell üzerinde hesaplanan hata değerleri ile karşılaştırmalar yapılarak mevcut probleme bakış açısı geliştirilmeye çalışılmıştır. Bulunan oranlar ve sistemin işleyişi hakkında yorumlar yapılmıştır. YSA' da verinin %70' i eğitim, %15' i değerlendirme ve %15'i de test için kullanılmıştır. Bu oranlar çalışmanın özelliklerine göre belirlenebilir. Ayrıca üç gizli katmanı bulunan (hidden layer 1, hidden layer 2, hidden layer 3) yapay sinir ağı en iyi performansa 1000 iterasyon sonucunda ulaşmıştır. Eğitim verileri ağı verilerek ağı öğrenmesi sağlanmış ve 242 model içerisinde test verisi için, hata kareleri ortalaması (MSE), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve ortalama mutlak hata (MAE) hata değerlerinden en küçük hata oranını veren YSA modeli sistem için tercih edilmiştir.



Şekil 1. YSA Modeli

Figure 1. ANN Model

MATLAB Regresyon Öğrencisi (MATLAB Regression Learner)

Mevcut değişkenler ile bağlantı sağlarken aynı zamanda matematiksel analizleri gerçekleştirir. Normalde karmaşık ve zaman gerektiren analizleri hızlı bir şekilde tamamlanmasını sağlar. Şekil 2'de Regresyon akış şeması gösterilmiştir (Tam ve diğ., 2022).



Şekil 2. Regresyon Akış Şeması

Figure 2. Regression Flow Chart

Regresyon Problemi için Veri ve Doğrulama Seçimi (Select Data and Validation for Regression Problem)

Çalışma alanından veya dosyalardan verileri Regresyon Öğrencisine aktarımını, örnek veri kümeleri bulunmasını ve çapraz doğrulama veya bekletme doğrulama seçeneklerinin belirlenmesini sağlar. Şekil 3'te endüstriyel firmada devreye alınan GES 'e ait veriler bulunmaktadır. Oranlar % cinsinden verilip hesaplamalar yapılmıştır.

S	TesisatNo	ModemSeri...	Cihaz	Tarih	EnduktifOran	KapasitifOr...	EK
Number	Number	Number	Categorical	Datetime	Number	Number	Number
S	Tesisat No	Modem Ser...	Cihaz	Tarih	Enduktif Or...	Kapasitif Or...	E/K
1	100408	501301233	80281597-...	17-Oca-2021	0	20	0
2	100408	501301233	80281597-...	18-Oca-2021	29.4930	4.1470	7.1119
3	100408	501301233	80281597-...	19-Oca-2021	9.2750	3.7680	2.4615
4	100408	501301233	80281597-...	20-Oca-2021	9.6570	3.1150	3.1002
5	100408	501301233	80281597-...	21-Oca-2021	8.9460	3.8340	2.3333
6	100408	501301233	80281597-...	22-Oca-2021	12.8620	4.5020	2.8570
7	100408	501301233	80281597-...	23-Oca-2021	4.5450	18.1820	0.2500
8	100408	501301233	80281597-...	24-Oca-2021	2.0830	20.8330	0.1000
9	100408	501301233	80281597-...	25-Oca-2021	8.1700	2.9410	2.7780

Şekil 3. Regresyon Dataları

Figure 3. Regression Data

Regresyon Modeli Seçeneklerini Seçimi (Choose Regression Model Options)

Regresyon Öğrenci' de, bir model seçimini otomatik olarak eğitin veya doğrusal regresyon modelleri, süreç regresyon modelleri, regresyon ağaçları toplulukları ve regresyon sinir ağlarının seçeneklerini karşılaştırıp ve ayarlanır.

Regresyon Öğrencisini Kullanarak Regresyon Ağaçlarının Eğitimi (Train Regression Trees Using Regression Learner)

Regresyon ağaçları oluşturulup yeni veriler için tahminler yapmak üzere eğitilmiş modelleri dışa aktarılır.

Regresyon Öğrencisinde Model Performansını Değerlendirilmesi (Assess Model Performance in Regression Learner)

Regresyon Öğrenci' de regresyon modellerini eğittikten sonra, modelleri model istatistiklerine dayalı olarak karşılaştırabilir, sonuçları bir yanıt grafiğinde veya gerçek ve tahmin edilen yanıtı çizerek

görselleştirebilir ve modeller değerlendirilebilir. Regresyon Öğrenici' de bir modeli eğittikten sonra, hangi modelin en iyi toplam puana sahip olduğunu görmek için modeller bölmesini kontrol edilir. En iyi RMSE değeri bir kutu içerisinde ifade edilir. Bu puan, doğrulama setindeki ortalama karesel hatanın (RMSE) köküdür. Skor, eğitilen modelin yeni veriler üzerindeki performansını tahmin eder. En iyi toplam puan, hedefiniz için en iyi model olmayabilir. Bazen genel puanı biraz daha düşük olan bir model, hedefiniz için daha iyi bir model olabilir.

Yeni Verileri Tahmin Etmek İçin Regresyon Modelini Dışa Aktarımı (Export Regression Model to Predict New Data)

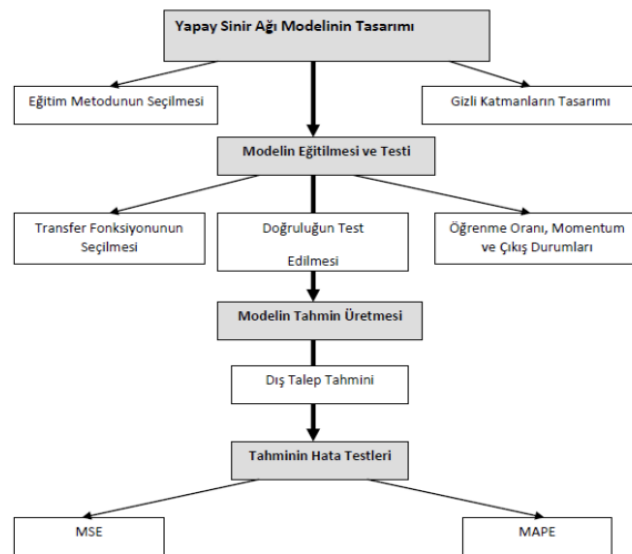
Son model Regresyon Öğrenicisi dışa aktarır, her zaman tam veri seti kullanılarak eğitilir. Kullandığınız doğrulama şeması, yalnızca uygulamanın doğrulama ölçümlerini hesaplama şeklini etkiler. Regresyon probleminiz en iyi modeli belirlemek için doğrulama ölçümlerini ve sonuçları görselleştiren çeşitli grafikler kullanılabilir.

YSA DİNAMİK ZAMAN SERİLERİ (YSA NETWORK START DYANAMİK TIME SERIES)

Yapay Sinir Ağları işleyişi insan sinir sisteminin temel yapı taşlarından olan nörona benzemektedir. Bu sayede bir şeyler öğrenip karar verebilmektedir. Sistemde kullanılacak YSA modeli belirlenmeden önce modelin doğruluğunu etkileyecek olan farklı YSA topolojilerinin incelenmesi gerekmektedir (Ayyagari, 2011).

Yapay Sinir Ağlarıyla tahminleri gerçekleştirmek, mevcut olan geçmişe dair belli bir dönemdeki veriler ile yapay sinir ağını eğitmek ve eğitilmiş verileri geleceğe uyarlamaktan oluşur. Tahmin edilecek parametreyi etkileyen faktörlerin tespiti, verilerin toplanması, tahmin döneminin tespit edilmesi, tahmin yöntemlerinin belirlenmesi ve hata hesabı, tahmin sonuçlarının geçerliliğinin araştırılması süreçlerinden oluşmaktadır (Sarı, 2016). YSA giriş ve çıkış verileri ile herhangi bir ön bilgiye gerek kalmadan gerekli modellemeyi doğrusal veya doğrusal olmayan şekilde gerçekleyebilmektedir (Sarı, 2016).

Şekil 4. Yapay Sinir Ağı Modelinin Tasarım Sürecinin algoritması ve sistemin nasıl işlediği açıklanmaya çalışılmış, hata tahmin testlerinde kullanılan yöntemlere değinilmiştir.

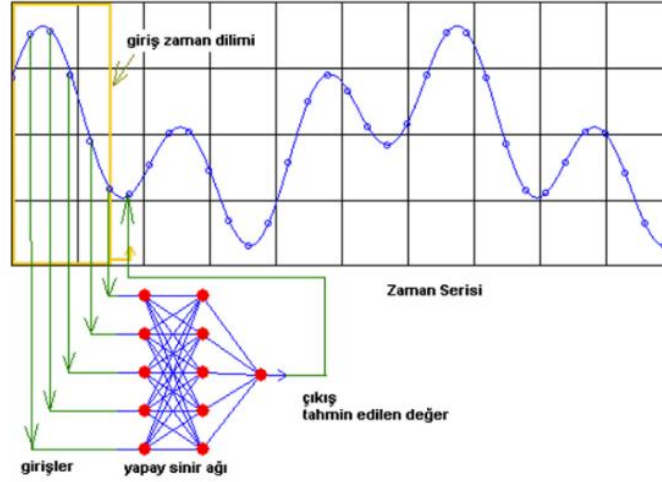


Şekil 4. Yapay Sinir Ağı Modelinin Tasarım Süreci (Karahan, 2015)

Figure 4. Design Process of Artificial Neural Network Model

Zaman serilerinin tahmin çalışmaları, geçmişteki verileri analiz eder ve gelecekteki değerler için yaklaşık tahminde bulunur. Genel olarak bu yöntem doğrusal olmayan (nonlinear) bir fonksiyonun geçmişteki değerlerinden çıkarılan ilişkileri modeller (Çaylı, 2008).

Şekil 5'te zaman serisinde oluşturulan modelin verileri nasıl oluşturduğunu açıklamaktadır. Çıktı olarak alınan verinin, bir sonraki iterasyonda giriş verisi olduğu ifade edilmiştir.

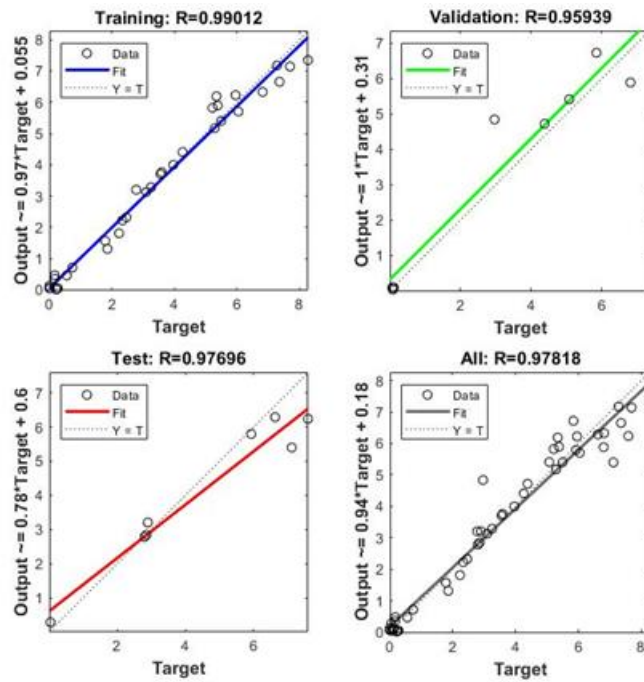


Şekil 5. Zaman serisi tahmini için bir model

Figure 5. A model for time series forecasting

Zaman serilerinde, geçmiş dönemlere ait veriler incelenerek, geleceğe yönelik tahminde bulunulmasıdır. Zaman serisi analizinde, geçmiş periyottaki verilerinin değişim biçimi incelenir ve bu süreci temsil eden model oluşturulur. Bu modelle geleceğe yönelik tahmin çalışmaları yapılmaya çalışılır (Kayakuş ve Terzioğlu, 2021).

Endüstriyel tesiste güneş enerji santralının devreye alınmasıyla birlikte endüktif/kapasitif oranların tahminiyle ilgili istatistikler Şekil 6'da gösterilmiştir. YSA çalıştırıldığında tahmin değerlerinin doğruluk oranı %97 olarak gösterilmiştir.



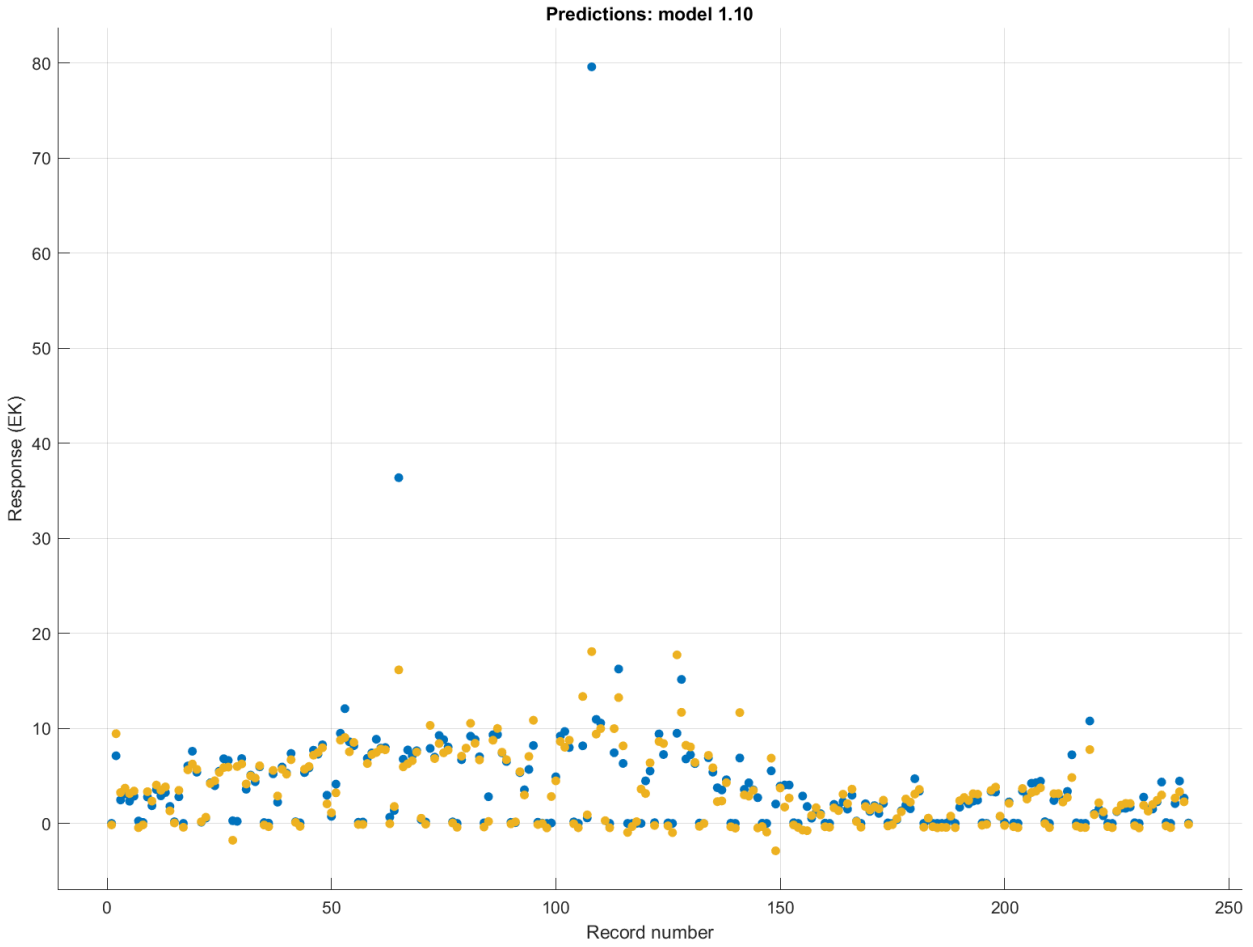
Şekil 6. Test Verilerine Göre Doğruluk Oranları

Figure 6. Accuracy Rates According to Test Data

REGRESYON GRAFİK ANALİZLERİ (REGRESSION GRAPHIC ANALYSIS)

Yanıt Grafiği (Reponse Plot)

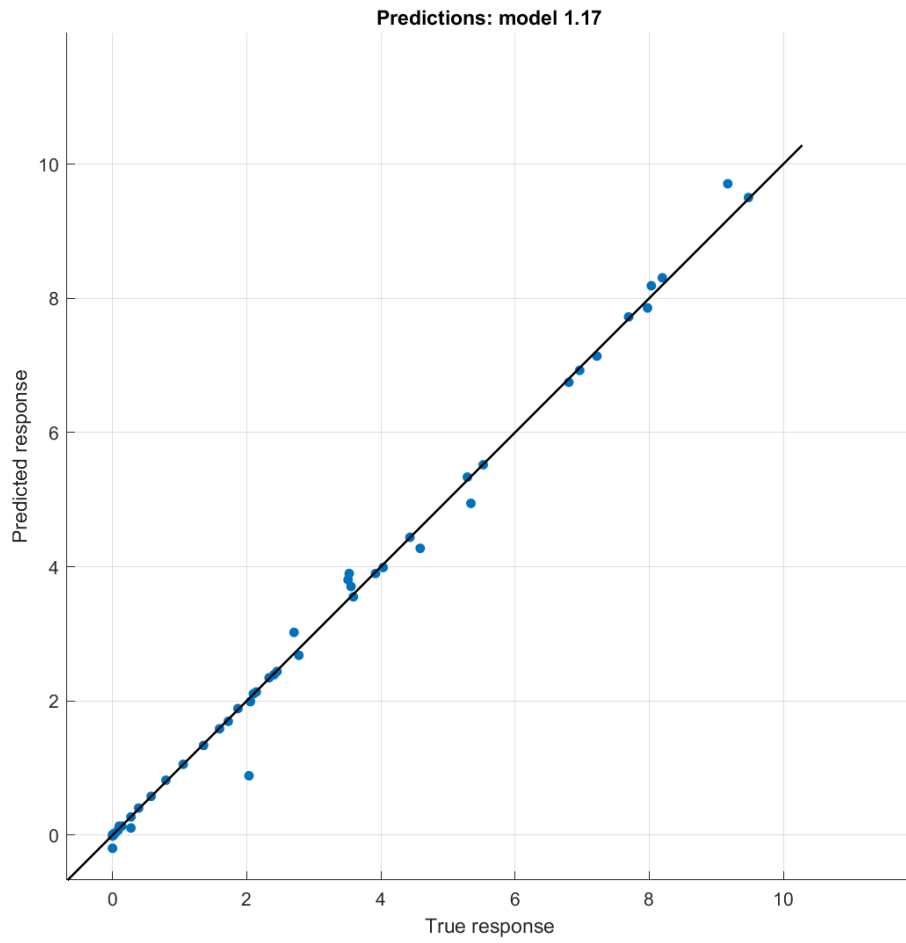
Matematiksel yaklaşımın sonucunu gösterir. Mavi noktalar santral için gerçek değerleri ifade ederken, sarı noktalar tahmin edilen değerleri göstermektedir. Şekil 7'de gerçek değer (E/K) ile tahmin edilen oran verilerinin birbirleriyle uyumu görülmektedir. Ani sapmalarda ise endüstriyel tesisin endüktif veya kapasitif güç değerinin sıfıra yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 7. Response Plot
Figure 7. Response Plot

Gerçek ve Tahmin Grafiği (Predicted vs Actual Plot)

Oluşturulan modelin performansını ifade eder. Grafikteki mavi noktalar ortadaki siyah doğruya ne kadar yakınsa ve bu doğrunun her iki tarafına da eşit şekilde dağılıyorsa analiz başarılı demektir. Şekil 8'de tahmin edilen ve gerçek verilerin siyah doğruya göre pozisyonu gösterilmiştir. Santral devreye alınmadan önceki değerlerde sapmalar görülmektedir.

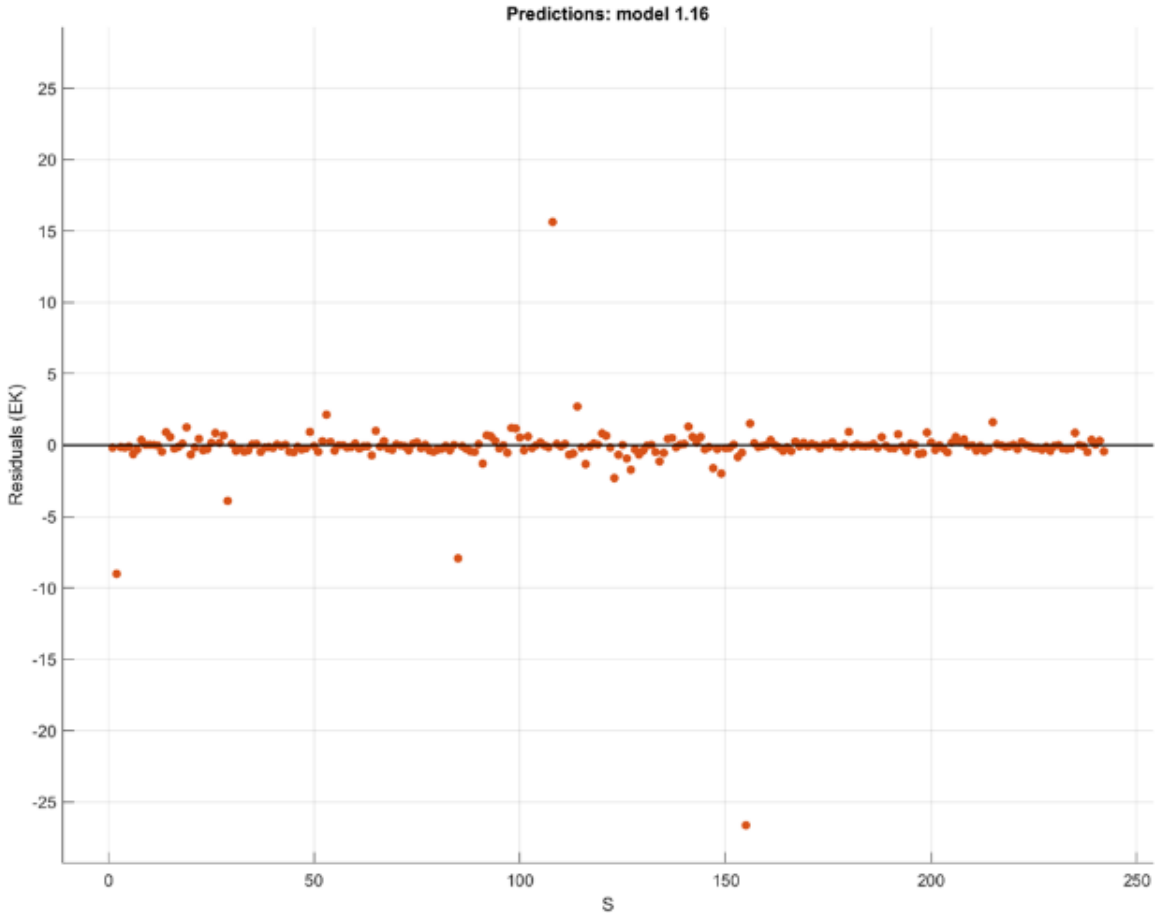


Şekil 8. Predicted vs Actual Plot

Figure 8. Predicted vs Actual Plot

Hata Oran Grafiği (Residual Plot)

Oluşturulan modelin hata oranını ifade eder. Kırmızı noktalar siyah doğruya ne kadar yakınsa hata oranının o kadar düşük olduğu anlamına gelir. Şekil 9'da gösterilen grafikte bazı noktalarda siyah doğruya uzak olduğu görülmektedir. Bu durumu santralin o anlarda sıfır veya sıfıra çok yakın endüktif veya kapasitif yük çekmesiyle ifade edilebilir.



Şekil 9. Residual Plot

Figure 9. Residual Plot

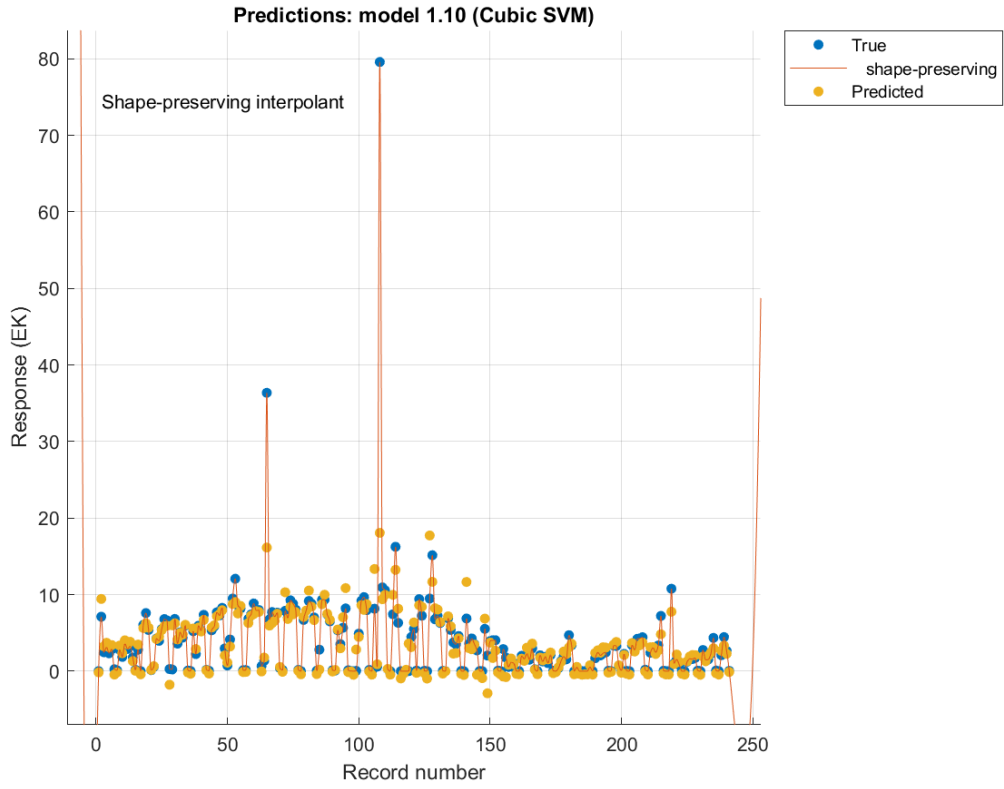
Regresyon analizi yapılırken shape preserving interpolant denklemlerini elde edebilmek için kullanılan kod:

```

coeffs = fit.coeff.coefs;
breaks = fit.coeff.breaks;
for idx = 1:size(fit.coeff.coefs, 1)
eq{idx, 1} = sprintf('%0.2fx^3 + %0.2fx^2 + %0.2fx + %0.2f %0.2f <= x < %0.2f', coeffs(idx, :), breaks(idx:idx+1));
end

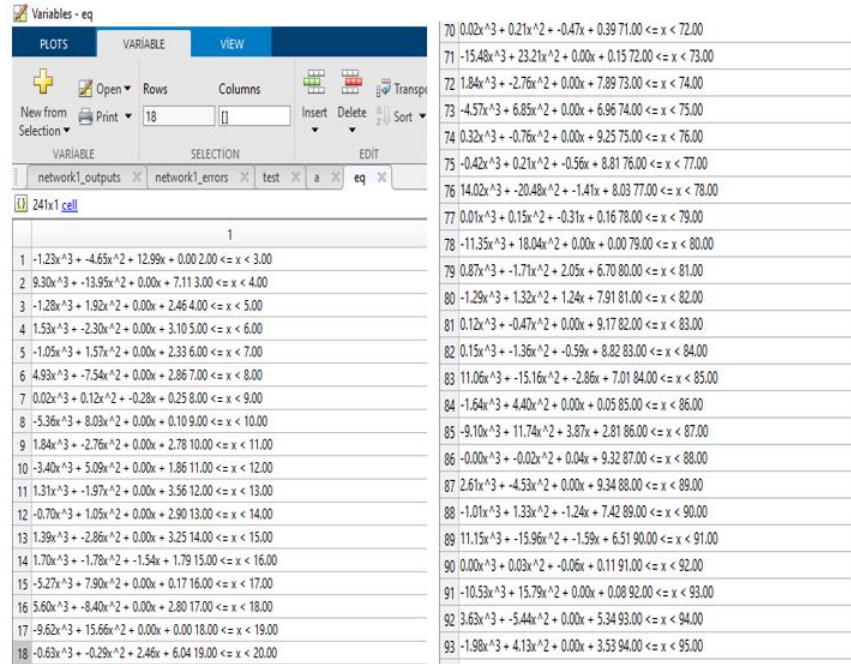
```

Elde edilen denklemler sonucunda çizdirilen grafik Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Shape -preserving plot
Figure 10. Shape -preserving plot

Şekil 11’de regresyon analizi sonucu elde edilen grafiği denklemleri gösterilmiştir. Analiz için kullanılan 242 veriye karşılık 242 tane denklem oluşturulmuştur.



Şekil 11. Regresyon Analizine Göre Elde Edilen Grafik Denklemleri
Figure 11. Graphic Equations Obtained According to Regression Analysis

Çizelge 1’ de YSA’da analiz yapmak için kullanılan değerlerin açıklaması yapılmıştır.

Çizelge 1. YSA'da Hedeflenen Değerler*Table 1. Targeted Values in ANN*

İSTATİSTİK	AÇIKLAMA	HEDEF
RMSE	Karekök ortalama hata. RMSE pozitif değer alır ve birimleri yanıtınızın birimleriyle eşleşir.	RMSE'nin daha küçük değerlerini arayın.
R-Squared	Determinasyon katsayısı. R-kare her zaman 1'den küçüktür ve genellikle 0'dan büyüktür. Eğitimli modeli yanıtın sabit olduğu modelle karşılaştırır ve eğitim yanıtının ortalamasına eşittir. Modeliniz bu sabit modelden daha kötüyse, R ² negatiftir.	1'e yakın bir R ² arayın.
MSE	Ortalama kare hatası. MSE, RMSE'nin karesidir.	MSE'nin daha küçük değerlerini arayın.
MAE	Ortalama mutlak hata. MAE her zaman pozitif değerler alır ve RMSE'ye benzerdir.	MAE'nin daha küçük değerlerini arayın.
MAPE	Ortalama mutlak yüzde hatası eğilim tahmininde, tahmin doğruluğunun ifade edilmesinde kullanılır. Doğruluk genellikle yüzde olarak ifade edilir	MAPE < %10'un altında olan modeller tercih edilmelidir.

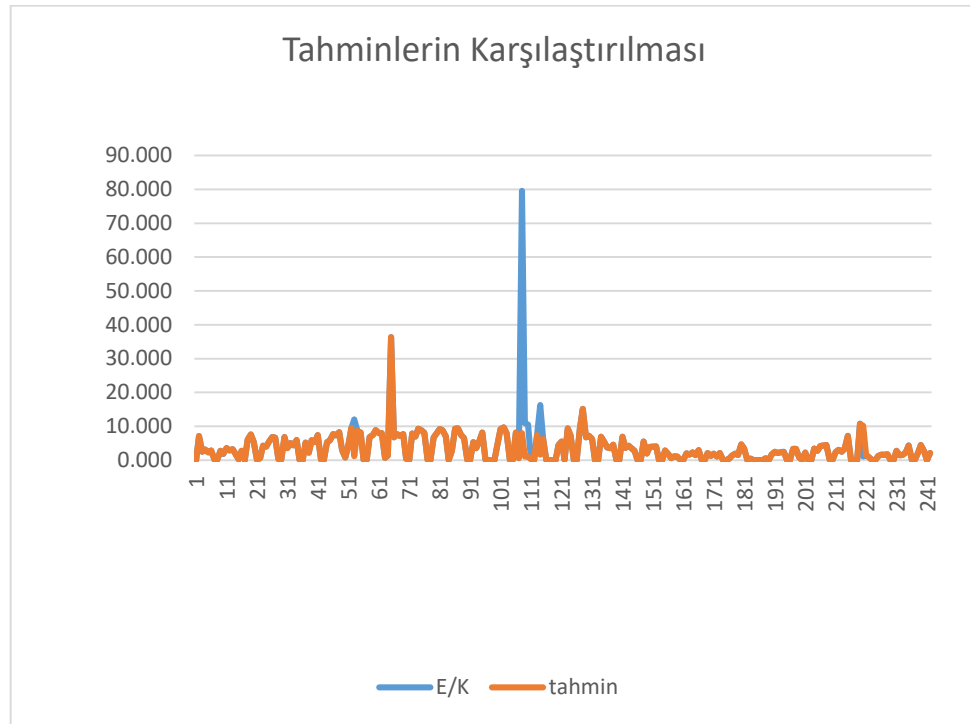
Çizelge 2. YSA ile İstatistiksel Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması için oluşturulmuştur.

Çizelge 2. YSA ile İstatistiksel Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması*Table 2. Comparison of ANN and Statistical Analysis Results*

	RMSE	MSE	MAPE
YSA	3,488	12,1311	-
İstatistiksel Analiz	0,030821365	0,000949957	0,028796204

Bu istatistiklerde beklenen sonuç, en küçük MSE, RMSE ve MAPE değerine sahip tahmin modeli oluşturmaktır, fakat hangi istatistiğin kullanılması gerektiği konusunda bazı parametreler detaylı bir şekilde araştırılmalıdır (Kaynar ve Taştan, 2009).

Şekil 13'te tahmin edilen ve gerçek oranların karşılaştırılması ve ölçülen değer ile tahmin değerinin örtüştüğü grafikte gösterilmiştir.



Şekil 13. Tahmin Edilen ve Gerçek Oranların Karşılaştırılması

Figure 13. Comparison of Estimated and Actual Rates

Başkaca literatürde

- MAPE değeri %10'un altında ise modeller "çok iyi",
- MAPE değeri %10 ve %20 arasında yer alan modelleri "iyi",
- MAPE değeri %20 ve %50 arasında olan modelleri "kabul edilebilir" düzeydedir.

MAPE değeri %50'nin üzerinde olan modeller ise "yanlış ve hatalı" olarak sınıflandırılır. Bu çalışma; doğru yatırım için gerçek veri elde edilmesinin önemini vurgular. Şekil 14'te Regresyon İstatistik Sonuçları MATLAB çıktısı olarak ifade edilmiştir. Tüm eğitim sonuçlarına göre en küçük RMSE değeri olan model tercih edilmiştir.

Current Model Summary	
Model 1: Trained	
Training Results	
RMSE (Validation)	3.483
R-Squared (Validation)	0.80
MSE (Validation)	12.131
MAE (Validation)	2.4026
Prediction speed	~25000 obs/sec
Training time	1.3217 sec

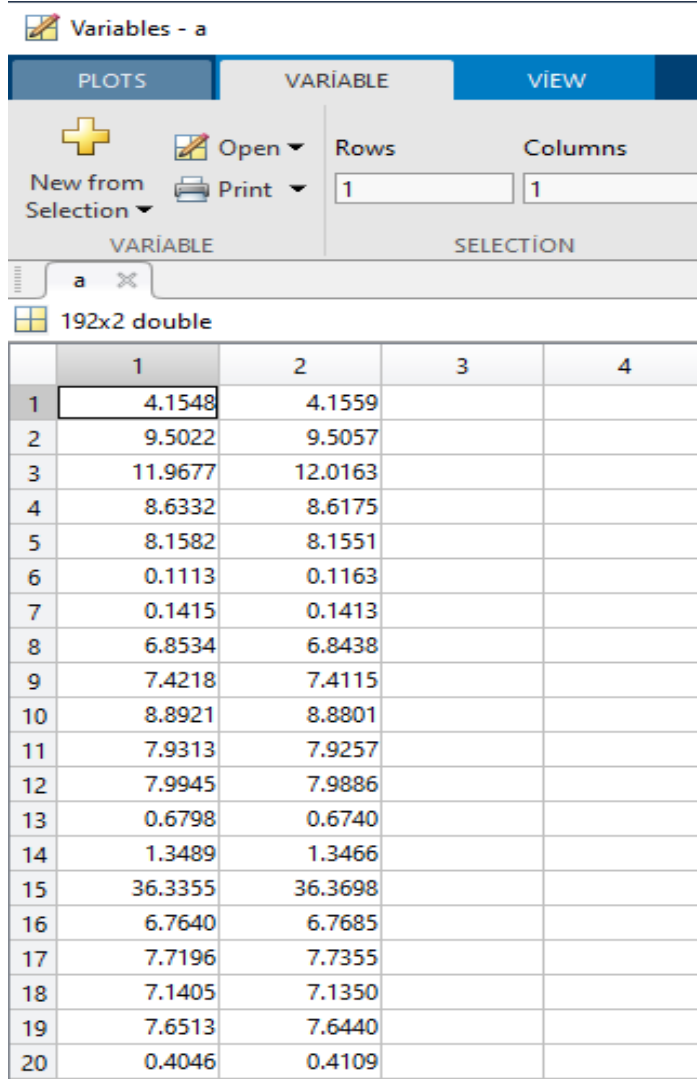
Şekil 14. Regresyon İstatistik Sonuçları

Figure 14. Regression Statistics Results

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Yapılan tahminlerin doğruluk oranını kontrol etmede yaygın olarak kullanılan, Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) istatistiğidir. Literatürde yapılan çalışmalarda, MAPE tahmin hatalarını yüzde olarak ifade ettiğinden tek başına da bir anlam taşıması, uygulamada diğer yöntemlere oranla daha fazla

kullanılmaktadır (Karahan, 2015). Çalışmada, MAPE değeri 0,02879 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara bakıldığında, YSA modelinin yapmış olduğu tahmin değerlerinin eğitim ve test aşamalarının her ikisinde de güvenilir ve tutarlı olduğu söylenebilir. Gerilim kararlılık analizlerinde aktif güç ve reaktif güç kontrol edilecek karakteristiklerdendir (Baysal, 2008). Güç sistemlerinde aktif güç tüketiminin artışı tüm sistemin gerilim profilini etkilemektedir (Butera, Evangelista, 2022). MATLAB'da tahmin edilen oran ve gerçek değer karşılaştırması Şekil 15'te gösterilmiştir.



The screenshot shows the MATLAB Variables window for a variable named 'a'. The window is set to 'VIEW' mode and displays a 192x2 double matrix. The matrix contains two columns of numerical data, representing estimated and actual values. The first column is labeled '1' and the second column is labeled '2'. The values range from 0.04046 to 36.3698. The third and fourth columns are empty.

	1	2	3	4
1	4.1548	4.1559		
2	9.5022	9.5057		
3	11.9677	12.0163		
4	8.6332	8.6175		
5	8.1582	8.1551		
6	0.1113	0.1163		
7	0.1415	0.1413		
8	6.8534	6.8438		
9	7.4218	7.4115		
10	8.8921	8.8801		
11	7.9313	7.9257		
12	7.9945	7.9886		
13	0.6798	0.6740		
14	1.3489	1.3466		
15	36.3355	36.3698		
16	6.7640	6.7685		
17	7.7196	7.7355		
18	7.1405	7.1350		
19	7.6513	7.6440		
20	0.4046	0.4109		

Şekil 15. YSA'da Tahmin Edilen ve Gerçek Değer Karşılaştırması
Figure 15. Estimated and Actual Value Comparison in ANN

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kullanılan tahmin etme metotlarına göre Regresyonda elde edilen doğruluk oranı %80 iken YSA kullanılarak yapılan tahmin çalışmasında elde edilen doğruluk oranının %97,818 olduğu görülmüştür. Aktif ve reaktif güç miktarındaki değişiklikler gerilim değerlerinde ve faz açılarında değişime sebep olmaktadır. Güç sistemlerinde aktif güç tüketiminin artışı tüm sistemin gerilim profilini etkilemektedir. Doğruluk oranının yüksek olmasını enerjinin etkin kullanılmasına zemin hazırlayacak aynı zamanda sistemin güvenilirliğini arttıracaktır. Bu çalışmada kullanılan endüstriyel tesise ait 242 veri ilk önce Yapay Sınır Ağlarıyla tahmin çalışmaları yapılmış daha sonra regresyon modeli kullanılarak doğruluk oranlarında karşılaştırma sağlanmıştır. Genel olarak, bir güç sisteminde gerilim kararlılığı, gerilim değeri

(V) ve reaktif güç (Q) parametreleri ile ilişkilidir. Tahmin modellemelerinde kullanılan, kullanım kolaylığı ve başarılı sonuçlar vermesi sebebiyle seçilen ileri beslemeli geri yayılım ağı ile kurulan model hem kendi içinde değerlendirilmiş, hem de bir başka tahmin tekniği olan çoklu doğrusal regresyon modeli ile performans kıyaslaması yapılmıştır. Gerilim kararlılık analizlerinde aktif güç ve reaktif güç oranı kontrol edilerek YSA ile sonuca ulaşılmıştır. Yapay sinir ağlarında oluşturulan modelin başarısının regresyon modeline göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Benzer olarak yapılacak tahmin çalışmalarında farklı veriler giriş olarak kullanılarak farklı yapay sinir ağları metodolojisine uyarlanarak daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Tahmini yapılacak verinin model karakteristiği ile doğrudan bağlantılı olduğu ve buna bağlı değişkenlik göstereceği unutulmamalıdır. Bir tesise kurulacak kompanzasyon sisteminin tipi sistemde kullanılan yüklerin dağılımına, reaktif güç değişimine ve tesisteki harmoniklerin miktarına bağlı olarak değişmektedir. Şebekede güç kalitesi ve şebeke stabilizasyonu güç faktörünün istenen değerler arasında ayarlanması gibi birçok teknik soruna yol açmaktadır. Aynı zamanda düşük güç kalitesi, tüketicilere rahatsızlık ve mali kayıplar da verebilirken güç faktörünün belirtilen aralıklarda olmaması da tüketici açısından sorunlar oluşturabilir. Bu yüzden kompanzasyon rölesinin akım ölçümü alçak gerilim barasından değil yüksek gerilim barasından yapılması gereklidir. Bu sayede şebekeden hem enerji çekiş hem de şebekeye enerji veriş durumunda daha doğru ve etkili bir kompanzasyon yapılmış olur. Bu çalışma aynı zamanda doğru yatırım için gerçek veri elde edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Al-Dahidi, S., Ayadi, O., Alrbai, M., Adeeb, J. 2019. "Ensemble approach of optimized artificial neural networks for solar photovoltaic power prediction". IEEE Access, 7, 81741–81758.
- Ayyagari, S.B., (2011), Artificial neural network based fault location for transmission lines, University of Kentucky Master's Theses.
- Baysal, M., "Güç Sistem Gerilim Kararlılığında Yük Modellemelerinin Önemi", 2008
- Çaylı, H. 2008. "Finansal Tahminde Yapay Sinir İletim Ağlarının Kullanımı ve Bir Örnek Uygulama".
- Eseye, A. T. Zhang, J., Zheng, D., Ma, H. and Jingfu, G. (2017). Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical hybrid GA-ANN approach. 2017 IEEE 2nd International Conference on Big Data Analysis, 552-556.
- Finamore, A. R., Galdi, V., Calderaro, V., Piccolo, A., Conio, G., and Grasso, S. (2016). Artificial neural network application in wind forecasting: an one-hour-ahead wind speed prediction, 5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016, 1-6.
- G. Zhang, B. Eddy Patuwo, ve M. Y. Hu, "Forecasting with artificial neural networks: The state of the art", Int. J. Forecast., c. 14, sayı 1, ss. 35–62, Mar. 1998, doi: 10.1016/S0169-2070(97)00044-7.
- H. Var ve B. E. Türkay, "Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Kısa Dönem Elektrik Yükü Tahmini", ss. 27–29, 2014.
- Kaynar, O., Taştan, S. 2009. "Zaman Serileri Tahmininde ARIMA-MLP Melez Modeli Oğuz Kaynar (*) Serkan Taştan(**)", ss. 141–149, 2009.
- M. Buhari ve S. S. Adamu, "Short-term load forecasting using artificial neural network", Lect. Notes Eng. Comput. Sci., c. 2195, ss. 83–88, 2012, doi: 10.1109/icit.2000.854220.
- M. Karahan, "Yapay Sinir Ağları Metodu ile İhracat Miktarlarının Tahmini: ARIMA ve YSA Metodunun Karşılaştırmalı Analiz", Ege Akad. Bakis (Ege Acad. Rev., c. 15, sayı 2, ss. 165–165, 2015, doi: 10.21121/eab.2015221919.
- M. Kayakuş ve M. Terzioğlu, "Yapay Sinir Ağları ve Çoklu Doğrusal Regresyon Kullanarak Emeklilik Fonu Net Varlık Değerlerinin Tahmin Edilmesi", Bilişim Teknoloji. Derg., ss. 95–103, 2021, doi: 10.17671/gazibtd.742995.
- M. Sari, "Yapay Sinir Ağları ve Bir Otomotiv Firmasında Satış Talep Tahmini Uygulaması", ss. 1–114, 2016.
- PortalAdmin_Uploads_Content_FastAccess_e50733d959844. 2022 Tarihinde adresinden erişildi <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-159-3/yonetmelikler>

- R. Bayindir, M. Yeşilbudak, ve Ü. Çetinkaya, "Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığını Etkileyen Faktörler", c. 3, sayı 4, ss. 595–602, 2015.
- Şahan, M. 2021. "Yapay Sinir Ağları ve Angström-Prescott Denklemleri Kullanılarak Gaziantep, Antakya ve Kahramanmaraş İçin Global Güneş Radyasyonu Tahmini". Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 16(2), 368–384.
- Tam, V. W. Y., Butera, A., Le, K. N., Da, L. C. F., Evangelista, A. C. J. 2022. "A prediction model for compressive strength of CO 2 concrete using regression analysis and artificial neural networks". *Construction and Building Materials*, 324(November 2021), 126689.
- V. W. Y. Tam, A. Butera, K. N. Le, L. C. F. Da, ve A. C. J. Evangelista, "A prediction model for compressive strength of CO 2 concrete using regression analysis and artificial neural networks", *Constr. Build. Mater.*, c. 324, sayı November 2021, s. 126689, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126689.
- Zarkovic, M., Sosic, D. 2016. "Ann for solving the harmonic load flow in electric power systems with DG". *IET Conference Publications*, 2016(CP711), 13–16.
- Zuraidah, A. H., Windarko, N. A., Eviningsih, R. P. 2021. "Short-Term Electrical Load Prediction Using ANN-Backpropagation". *ICAICST 2021 - 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Computer Science Technology*, 13–18



ZEMİN STABİLİZASYONUNDA BAZALT FİBER VE UÇUCU KÜL KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

¹Onur SARAN , ²Atila DEMİRÖZ 

^{1,2}Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

¹osaran@ktun.edu.tr, ²ademiroz@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 14.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 21.05.2022)

ÖZ: Killer plastik davranış gösteren, yüksek su içeriklerinde dayanımları önemli ölçüde azalan ve yüksek miktarda oturma yapabilen zeminlerdir. Bu zeminler üzerinde inşaat yapılabilmesi için zeminin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi gerekir. Kil zeminlerin mühendislik özellikleri; çimento, kireç, uçucu kül vb. kimyasal katkılarla geliştirilebilmektedir. Ayrıca, son yıllarda fiberlerin zemin iyileştirmesinde kullanımına yönelik çalışmaların sayısı artmaktadır. Çalışmada, bazalt fiber ve uçucu kül katkılarının problemlili zeminlerin dayanım ve geçirimsizlik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla bazalt fiber uzunluğu (6-24 mm), bazalt fiber yüzdesi (%0-1.5), kür süresi (1-56 gün) ve uçucu kül yüzdesi (%0-15) değişken olarak seçilmiştir. Taguchi yöntemine özgü 4 parametrelili ve 4 seviyelili L₁₆ tasarım tablosu kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluk değerlerinde hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç, yarmada çekme ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, serbest basınç ve yarmada çekme deneyleri için optimum parametreler; 18 mm bazalt fiber uzunluğu, %1 bazalt fiber, %10 uçucu kül ve 56 gün kür süresi olarak elde edilmiştir. Bazalt fiber uzunluğu ve içeriğinin artması ile permeabilite katsayısı yükselmiştir. Ancak uçucu kül yüzdesinin artmasıyla permeabilite katsayısı azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bazalt fiber, Uçucu kül, Zemin stabilizasyonu, Dayanım

Investigation of Basalt Fiber and Fly Ash Use in Soil Stabilization

ABSTRACT: Clays show plastic behavior, strength decreases significantly at high water contents, and these clays may settle in high amounts. In order to build on these soils, the engineering properties of the soil must be developed. Engineering properties of clays can be improved by inclusion of chemical admixtures including cement, lime, fly ash, etc. In addition, the number of studies on the use of fibers in soil improvement has been increasing in recent years. In the study, the effects of basalt fiber and fly ash additives on the strength and permeability properties of problematic soils has been investigated. For this purpose, basalt fiber length (6-24 mm), basalt fiber percentage (0-1.5%), curing time (1-56 days) and percentage of fly ash (0-15%) were selected as variables. Experimental studies have been carried out using the L₁₆ design table with 4 parameters and 4 levels specific to the Taguchi method. Unconfined compressive, splitting tensile and permeability tests were carried out on the samples prepared at optimum water content and maximum density values. As a result of statistical analysis, optimum parameters for unconfined compressive and splitting tensile tests; 18 mm basalt fiber length, 1% basalt fiber, 10% fly ash and 56 days curing time were obtained. The permeability coefficient increased with the increase in basalt fiber length and content. However, the permeability coefficient decreased with the increase in the percentage of fly ash.

Keywords: Basalt fiber, Fly ash, Soil stabilization, Strength

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde hızlı nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme, gelişmiş ülkelerdekine benzer şekilde Türkiye'de de yapı alanlarının hızla tükenmesine neden olmuştur. Buna bağlı olarak her geçen gün yeni yapılaşma alanlarının açılması zorunlu hale gelmiştir. İhtiyaçların artması ve kullanılabilir iyi temel zemini özelliği gösteren yerlerin azalması, problemlili zeminler üzerinde mühendislik yapılarının inşasını zorunlu hale getirmiştir. Problemlili zeminler genellikle yeterli taşıma kapasitesine sahip olmayıp, yüksek oturma ya da sıvılaşmaya müsait bir ortam oluşturabilirler. Bir inşaat projesinde bu tür zeminlerle karşılaşıldığında ilk seçenek zemini değiştirmek veya projenin yerini daha iyi mühendislik özelliklerine sahip zeminin olduğu bir yere taşımaktır. Ancak bu seçenekler çoğu zaman ekonomik değildir. Bu durumda en iyi seçenek zemin özelliklerinin yerinde stabilize edilmesidir. Bu amaçla, zemine çeşitli katkı maddeleri ekleyerek yapılan zemin stabilizasyon yöntemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarla, farklı zemin türlerine çimento, kireç, uçucu kül ve silis dumanı gibi farklı katkı maddeleri ilave edilerek zeminlerin dayanım durumları ve iyileşme performansları ölçülüp gözlemlenmektedir (Kenan, 2018; Geçkil ve diğ., 2019).

Uçucu kül elektrik enerjisi elde etmek için yakıt olarak öğütülmüş kömürün kullanıldığı termik santrallerde veya demir, çelik ve bazı metallerin üretimlerinde olduğu gibi elde edilmek istenen esas ürünün yanı sıra yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Atık olarak elde edilen bu ürünlerin depolanması, atılması büyük güçlükler yaratmakta ve çevre kirliliği dahil topluma büyük sorunlar getirmektedir. Yan ürünlerin değerlendirilmesi, çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesi ve doğal malzemelerin azalmasını önlemektedir. Atık malzemelerin değerlendirilmesi durumunda çevre sorunları azalmakta, enerji tasarrufu ve ekonomi sağlanmaktadır (Güler ve diğ., 2005; Alkaya, 2009). Türkiye'de bir yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılmakta ve ortalama 15 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Ülkemiz için böyle bir atığın depolanmaması veya değerlendirilmemesi hem çevresel problemler açısından hem de ekonomik açıdan bu konuya yönelik çalışmaları zorunlu kılmaktadır (Demiröz, 1996). Uçucu kül, puzolanik özellikler ve dolayısıyla yüksek sıkıştırma mukavemeti veren yüksek kalsiyum ve silikat oksit içeriği nedeniyle daha önce zemini stabilize etmek için kullanılmıştır (Zha ve diğ., 2008; Bayshakhi ve diğ., 2017; Çimen ve Keleş, 2020; Dehghanian, 2021; Malikzade ve diğ., 2021)

Günümüzde zemin iyileştirmesinde kullanılan geleneksel katkı maddelerine (kireç, çimento vb.) alternatif olarak doğal ve yapay fiberlerin kullanıldığı çalışmaların sayısı sürekli artmaktadır. Stabilizasyon için bambu, şeker kamışı, Hindistan cevizi lifi gibi doğal fiberler ve polipropilen, polyester, polietilen, cam, naylon, çelik lif gibi yapay fiberler kullanılmaktadır (Danso ve diğ., 2015; Özdemir ve diğ., 2016; Ndepete, 2017; Ayothiraman ve Singh, 2017; Cao ve diğ., 2019; Nezhad ve diğ., 2021).

Yapay fiber türlerinden biri de bazalt fiberlerdir. Bazalt fiberler, 1300-1700 °C'de bazalt taşlarının eritilmesiyle elde edilir. Diğer yaygın olarak kullanılan fiber katkı türlerinden çok daha yüksek çekme mukavemeti ve korozyon direncine sahiptir. Bazalt fiber, 21. yüzyılda doğal yeşil ve çevre dostu bir mineral katkı olarak kabul edilmiştir (Zuhuang ve Yu, 2015; Wang ve diğ., 2020). Betonda yalıtım, ses emilimi, ısıya dayanıklı ve takviyeli malzemeler olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Ludovico ve diğ., 2010; Shi ve diğ., 2013). Konvansiyonel elyaflarla karşılaştırıldığında, bazalt elyafın fiyatı karbon elyafın 1/10'u kadardır. Ayrıca bazalt elyafın çekme mukavemeti ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri polipropilen elyafından önemli ölçüde yüksektir. Günümüzde, bazalt fiberlerin betonda katkı maddesi olarak kullanıldığı birçok çalışma olmasına rağmen, zemin stabilizasyonundaki çalışmalar daha azdır. Bazalt elyaf takviyesinin mekanizması için, içerik ve uzunluğun takviye etkisi üzerindeki etkisi net değildir, bu nedenle bazalt elyaf takviyeli killi zeminin mühendislik özelliklerini incelemek önemlidir (Gao ve diğ., 2015).

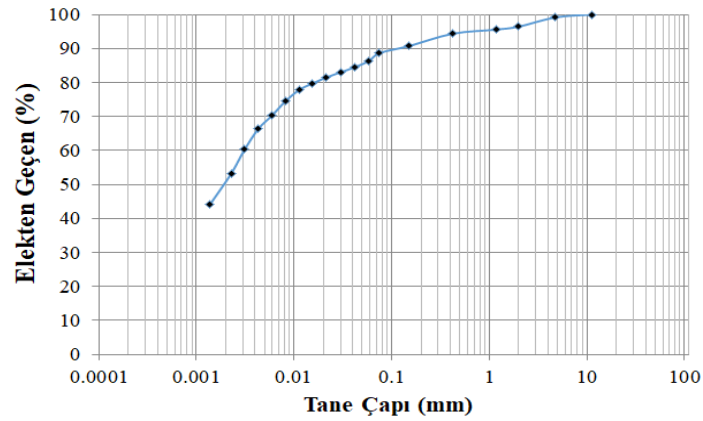
Bu çalışmada, bazalt fiber ve uçucu kül katkılarının problemlili zeminin serbest basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve permeabilite (geçirimsizlik) özelliklerine etkisi incelenmiştir. Puzolanik aktiviteyi arttırmak amacıyla tüm karışımlara %3 kireç katkısı yapılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Zemin Özellikleri (Soil Properties)

Deneylerde kullanılan killi zemin, Konya ili, Selçuklu ilçesi, 2. Organize Sanayi Bölgesinden temin edilmiştir. Zeminin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, hidrometre analizi, kıvam limitleri ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.

Elek analizi ASTM D1140-17 ve hidrometre deneyi ASTM D422-63 standardına uygun yapılarak granülometri eğrisi çizilmiştir (Şekil 1). Zemin içerisinde %0.86 çakıl, %10.50 kum, %38.21 silt ve %50.43 oranında kil bulunmaktadır. Zeminin fiziksel özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Zeminin tane dağılım eğrisi

Figure 1. Grain-size distribution curve of the soil

Çizelge 1. Zeminin fiziksel özellikleri

Table 1. Physical properties of the soil

Özgül Ağırlık	2.65
Likit Limit, ω_L (%)	104.4
Plastik Limit, ω_P (%)	30.6
Plastisite İndisi (I_P) (%)	73.8
Zemin Sınıfı (USCS)	CH
Optimum Su Muhtevası, ω_{opt} (%)	28.5
Maksimum Kuru Yoğunluk, ρ_{kmax} (g/cm ³)	1.45

Bazalt Fiber (Basalt Fiber)

Çalışmada kullanılan bazalt fiberler Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş (Denizli/Türkiye) şirketinden tedarik edilmiştir. Şekil 2’de farklı boydaki bazalt fiberlerin görüntüleri sunulmaktadır. Çizelge 2’de deneylerde kullanılan bazalt fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.



Şekil 2. Deney kullanılan bazalt fiberler
Figure 2. Basalt fibers used in the experiments

Çizelge 2. Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri
Table 2. Physical and mechanical properties of basalt fiber

Bazalt Fiber	
Özellik	Değer
Özgül Ağırlık	2.60 - 2.65
Elastisite Modülü (GPa)	70 - 90
Çekme Dayanımı (MPa)	2800 - 3300
Kopma Uzaması (%)	3.1 - 6
Çapı (µm)	6 - 25
Erime Sıcaklığı (°C)	1350

Uçucu Kül (Fly Ash)

Çalışmada F tipi uçucu kül, Kütahya Seyitömer Termik Santralinden temin edilmiştir. Uçucu külün kimyasal bileşimi Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Uçucu külün kimyasal yapısı
Table 3. Chemical structure of fly ash

Kimyasal Bileşim	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Kızdırma Kaybı
Miktar (%)	54.49	20.58	9.27	4.26	4.48	0.52	2.01	0.65	3.01

Deney Tasarımı (Experiment Design)

Herhangi bir deneyin tasarlanması ile bu deneyi etkileyen parametrelerin sonuç üzerindeki etkilerini araştırmak için çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Taguchi yöntemi ile seçilen ortogonal bir dizin kullanılarak az sayıda deney veya çalışma yapılarak parametrelerin sonuca etkileri araştırılabilmektedir. Bu yöntem ile yapılmamış olan diğer deney sonuçları ile maksimum ve minimum değerler de tahmin edilebilmekte, deneysel maliyet minimum düzeyde tutulabilmektedir. Taguchi metodunda tasarımlar için özel olarak geliştirilmiş ortogonal dizin tabloları kullanılmaktadır. Bu çalışmada 4 parametrelili ve 4 seviyeli standart L₁₆ ortogonal dizin tablosu kullanılmıştır (Çizelge 4 ve 5). Puzolanik aktiviteyi arttırmak amacıyla tüm karışımlara %3 kireç katkısı yapılmıştır.

Çizelge 4. Taguchi tasarımı için L₁₆ ortogonal deney tablosuTable 4. L₁₆ Orthogonal experiment table for Taguchi design

Tasarım No	Parametreler ve Parametre Seviyeleri				Tasarım No	Parametreler ve Parametre Seviyeleri			
	A	B	C	D		A	B	C	D
1	1	1	1	1	9	3	1	3	4
2	1	2	2	2	10	3	2	4	3
3	1	3	3	3	11	3	3	1	2
4	1	4	4	4	12	3	4	2	1
5	2	1	2	3	13	4	1	4	2
6	2	2	1	4	14	4	2	3	1
7	2	3	4	1	15	4	3	2	4
8	2	4	3	2	16	4	4	1	3

Çizelge 5. Taguchi deney tasarımında kullanılan parametreler ve seviyeleri

Table 5. Parameters and levels used in Taguchi experimental design

Seviye	Parametreler			
	A	B	C	D
	Bazalt Fiber Uzunluğu (mm)	Bazalt Fiber (Ağırlıkça, %)	Kür Süresi (Gün)	Uçucu Kül (Ağırlıkça, %)
1	6	0	1	0
2	12	0.5	7	5
3	18	1	28	10
4	24	1.5	56	15

Numune Hazırlanması (Sample Preparation)

Çizelge 4'deki her tasarım için kompaksiyon deneyi (Standart Proktor) yapılarak optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Deney numuneleri, tasarıma göre belirlenen miktarlarda alınarak optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluk değerlerinde, 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki PVC kalıplarda hacim kontrollü olarak 3 tabaka halinde sıkıştırılmıştır. PVC kalıplar deney numunelerinin hazırlanması amacı ile özel olarak tasarlanmıştır. Hazırlanan numuneler hava almayacak şekilde poşetlenmiştir. Daha sonra saklama kabı içerisinde yaklaşık 23°C sıcaklıkta güneş ışığı almayan bölmelerde deney tablosunda verilen sürelerde küre bırakılmıştır (Şekil 3). Kür süresi sonunda uygun başlıklı kriko ile kalıplardan çıkarılan numuneler üzerinde gerekli deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde her tasarım için 3 adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 3. Numune hazırlama süreci
Figure 3. Sample preparation process

BULGULAR (RESULTS)

Kompaksiyon (Standart Proctor) Deney Sonuçları (Compaction (Standard Proctor) Test Results)

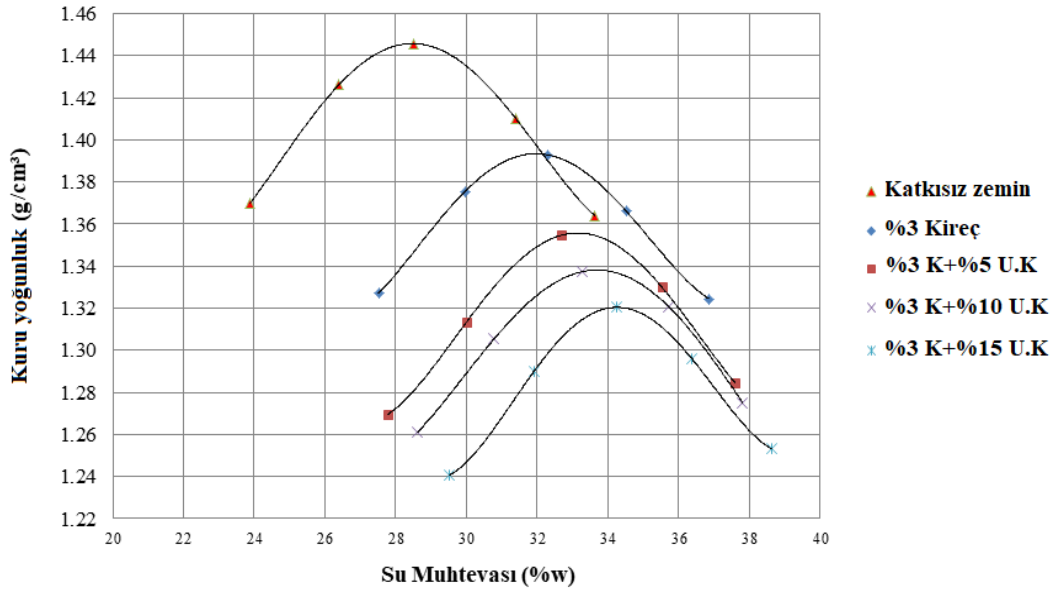
DeneySEL çalışmaların yürütülebilmesi için öncelikle Taguchi deney tablosunda verilen her tasarım için ASTM D698-12e2 standardına göre kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Bazalt fiber (B.F) ve uçucu kül (U.K) katkılı tasarımlar (ayrıca %3 kireç katkısı) için elde edilen optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) değerleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Kompaksiyon deney sonuçları*Table 6. Compaction test results*

Tasarım No	B.F Uzunluğu (mm)	B.F Yüzdesi (%)	Kür Süresi (gün)	U.K Yüzdesi (%)	$Q_{k,max}$ (g/cm ³)	W_{opt} (%)
1	6	0	1	0	1.394	32.0
2	6	0.5	7	5	1.349	33.0
3	6	1	28	10	1.340	33.5
4	6	1.5	56	15	1.314	34.4
5	12	0	7	10	1.338	33.7
6	12	0.5	1	15	1.311	34.3
7	12	1	56	0	1.386	31.9
8	12	1.5	28	5	1.356	33.1
9	18	0	28	15	1.320	34.3
10	18	0.5	56	10	1.332	33.4
11	18	1	1	5	1.350	33.0
12	18	1.5	7	0	1.379	31.8
13	24	0	56	5	1.356	33.2
14	24	0.5	28	0	1.384	31.9
15	24	1	7	15	1.311	34.4
16	24	1.5	1	10	1.327	33.6

Kireç ve uçucu kül ilavesiyle birlikte optimum su içeriği değeri artarken maksimum kuru yoğunluk değeri azalmaktadır. Bazalt fiber içeriğinin kompaksiyon parametrelerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür (Çizelge 6). Katkısız zemin ile kireç ve uçucu kül katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri Şekil 4'te verilmiştir.

Kompaksiyon eğrileri incelendiğinde, %3 kireç ilavesiyle optimum su muhtevası %28.4'ten %32'ye çıkmıştır. Maksimum kuru yoğunluk değeri ise 1.45 g/cm³'ten 1.39 g/cm³'e düşmüştür. Ayrıca kireç oranı %3 olarak sabit tutulduğunda uçucu kül miktarının artmasıyla optimum su muhtevası artarken, maksimum kuru yoğunluk değerinin düştüğü görülmüştür.



Şekil 4. Kompaksiyon eğrileri
Figure 4. Compaction curves

Serbest Basınç Deney Sonuçları (Unconfined compressive Test Results)

Deney programında yer alan 16 farklı tasarım ve katkısız zemin için ASTM D2166 standardına göre Serbest basınç deneyi yapılmıştır (Şekil 5). Yapılan deneylerden elde edilen serbest basınç mukavemeti (SBM) ve birim deformasyon (ϵ) değerleri Çizelge 7'de verilmiştir.



Şekil 5. Serbest basınç deney numuneleri
Figure 5. Unconfined compressive test samples

Çizelge 7 incelendiğinde en büyük dayanım 10 numaralı tasarımda elde edilmiştir. Bu tasarımda bulunan değer, katkısız zeminin serbest basınç mukavemetinin 8.69 katıdır. Birim deformasyon değerleri (ϵ) incelendiğinde 1 günlük kür süresine sahip numunelerde puzolanik aktivitelerin tamamen gerçekleşmemesi nedeniyle daha sünek davrandığı gözlenmiştir. Ayrıca, birim deformasyon değerlerine bakıldığında bazalt fiber içeriği arttıkça süneklilik artmıştır.

İstatistiksel analiz sonuçları Minitab 19 Statistical Software yazılımı ile değerlendirilmiştir. Taguchi analizi yapılarak sonuçlar üzerinde etkili olan parametrelerin optimum seviyelerini belirlemek için S/N oranları belirlenmiştir. Daha sonra parametrelerin sonuç üzerindeki etki derecelerini belirlemek amacıyla çok parametrelili varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Sonuçlar değerlendirilirken tüm parametreler arasında etkileşim olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 7. Serbest basınç deney sonuçları

Table 7. Unconfined compressive test results

Deney No	q_u (kPa)	ϵ (%)
Katkısız	155.8	5.04
1	296.7	3.24
2	813.7	2.44
3	1205.1	2.71
4	1194.0	2.71
5	1005.7	2.36
6	529.7	3.98
7	961.3	2.64
8	1064.4	2.74
9	1119.7	2.41
10	1354.0	2.53
11	513.8	3.97
12	761.6	2.69
13	819.8	2.21
14	847.3	2.53
15	1179.8	2.85
16	531.1	4.31

S/N analizi yapılırken 'en yüksek en iyi' durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Serbest basınç mukavemeti için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, serbest basınç mukavemeti bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve uçucu kül içeriği %10'a kadar artmakta bundan sonra ise azalmaya başlamaktadır. Kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemeti artmaktadır.

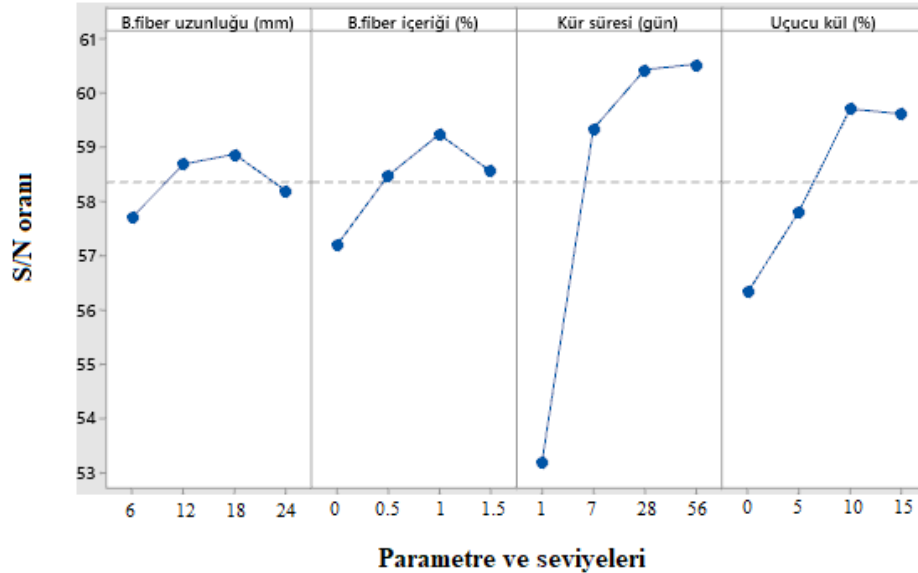
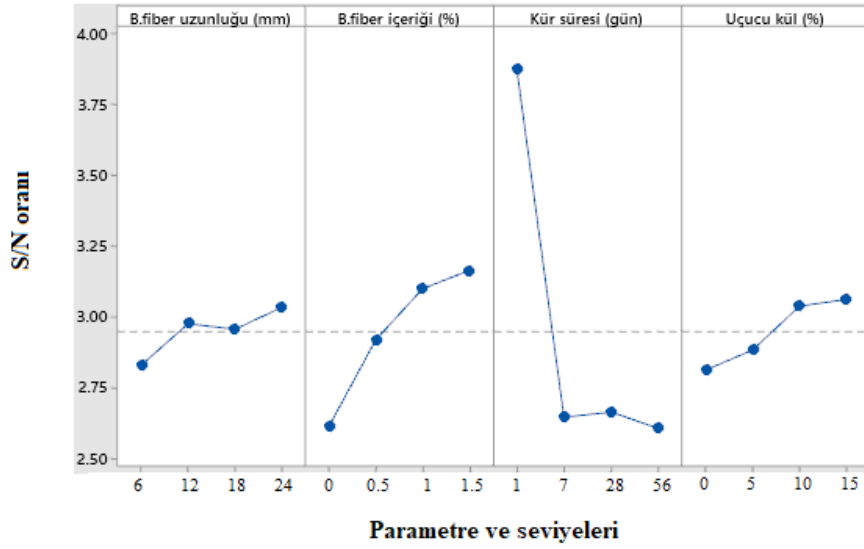
**Şekil 6.** Serbest basınç mukavemeti S/N grafiği

Figure 6. Unconfined compressive strength S/N graph

Birim deformasyon değerleri için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre; bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber içeriği ve uçucu kül içeriği arttıkça süneklilik artmaktadır. 1 günlük kür süresine sahip numuneler daha yüksek birim deformasyon değerlerine sahiptir.



Şekil 7. Birim deformasyon değerleri S/N grafiği

Figure 7. Unit deformation values S/N graph

Varyans analizi yapılırken serbest basınç mukavemeti ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.57, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.86 ve R-kare (tahmini) değeri %87.81 olarak belirlenmiştir. Serbest basınç mukavemet değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.003 < 0.05$ olup model anlamlıdır (Çizelge 8). Serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametre kür süresi, daha sonra uçucu kül ve bazalt fiber içeriğidir. Bazalt fiber uzunluğu için P değeri 0.05'ten büyük olduğu için bu parametrenin deney sonucu üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur.

Çizelge 8. Serbest basınç mukavemeti için varyans analizi sonuçları (ANOVA)

Table 8. Analysis of variance results for unconfined compressive strength (ANOVA)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	190.948	190.948	15.9124	58.06	0.003
B.Fiber Uzunluğu	3	3.272	3.272	1.0906	3.98	0.143
B.Fiber Yüzdesi	3	8.739	8.739	2.9129	10.63	0.042
Kür Süresi	3	147.710	147.710	49.2367	179.66	0.001
Uçucu Kül	3	31.228	31.228	10.4093	37.98	0.007
Hata	3	0.822	0.822	0.2741		
Toplam	15	191.771				

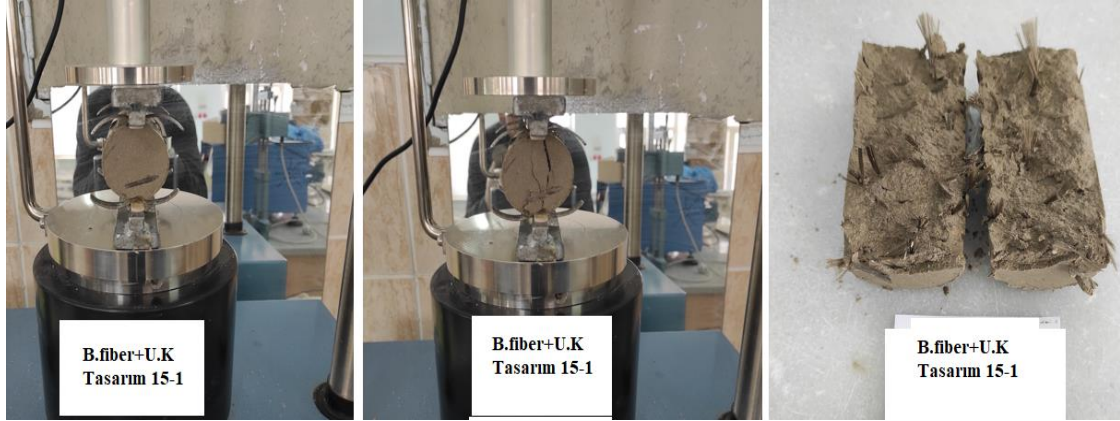
Birim deformasyon (ϵ) değerleri için geliştirilen modelde $p < 0.05$ olup model %99 güven aralığı içerisinde (Çizelge 9). ϵ değerleri üzerinde etkili olan parametreler sırasıyla kür süresi, bazalt fiber içeriği, uçucu kül içeriği ve bazalt fiber uzunluğudur.

Çizelge 9. Serbest basınç deneyi ϵ değerleri için varyans analizi sonuçları (ANOVA)*Table 9. Analysis of variance results for unconfined compressive test ϵ values (ANOVA)*

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	40.7093	40.7093	3.39240	288.68	0.000
B.Fiber Uzunluğu	3	0.33710	0.33710	0.11240	9.56	0.048
B.Fiber İçeriği	3	6.18190	6.18190	2.06060	175.35	0.001
Kür Süresi	3	33.0179	33.0179	11.0060	936.55	0.000
Uçucu Kül	3	1.17240	1.17240	0.39080	33.25	0.008
Hata	3	0.03530	0.03530	0.01180		
Toplam	15	40.7446				

Yarmada Çekme Deney Sonuçları (Splitting Tensile Test Results)

Deney programında yer alan 16 farklı tasarım ve katkısız zemin için ASTM C496 standardına göre yarmada çekme deneyi yapılmış (Şekil 8), yarmada çekme mukavemeti (σ_t) ve birim deformasyon (ϵ) değerleri Çizelge 10'da verilmiştir.

**Şekil 8.** Yarmada çekme deney numunesi*Figure 8. Splitting tensile test sample*

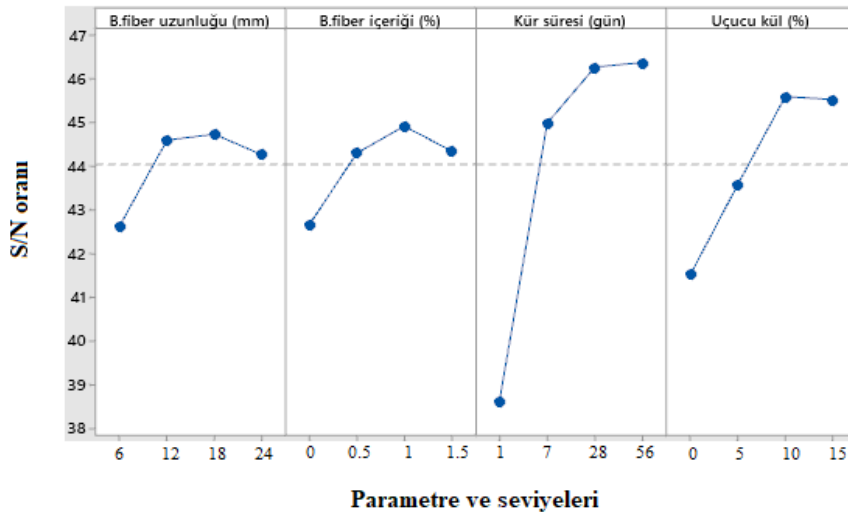
Çizelge 10 incelendiğinde en büyük yarmada çekme mukavemeti 10 numaralı tasarımda elde edilmiştir. Bu tasarımda bulunan yarmada çekme mukavemeti katkısız zeminin yarmada çekme mukavemetinin 8.15 katıdır.

Çizelge 10. Yarmada çekme deney sonuçları

Table 10. Splitting tensile test results

Deney No	σ_t (kPa)	ϵ (%)
Katkısız	33.7	2.94
1	45.71	1.94
2	146.69	2.25
3	219.67	2.46
4	227.21	2.52
5	201.46	2.12
6	105.32	2.22
7	182.73	2.59
8	213.22	2.73
9	224.29	2.04
10	274.65	2.23
11	100.96	2.61
12	141.42	2.87
13	164.22	1.91
14	169.73	2.48
15	236.33	2.78
16	107.58	3.01

S/N analizi yapılırken 'en yüksek en iyi' durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Yarmada çekme mukavemeti için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 9'da verilmiştir. Buna göre, yarmada çekme mukavemeti bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve uçucu kül içeriği %10'a kadar artmakta bundan sonra ise azalmakta, kür süresi arttıkça yarmada çekme mukavemeti arttığı gözlenmiştir. Birim deformasyon (ϵ) değerleri incelendiğinde bazalt fiber içeriğinin yüksek olduğu tasarımlarda numunelerin daha sünek bir davranış gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 9. Yarmada çekme mukavemeti S/N grafiği

Figure 9. Splitting tensile strength S/N graph

Varyans analizi yapılırken yarmada çekme mukavemeti ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.41, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.07 ve R-kare (tahmini) değeri %83.35 olarak belirlenmiştir. Yarmada çekme mukavemet değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.005 < 0.05$ olup model anlamlıdır (Çizelge 11). Yarmada çekme mukavemeti üzerinde en etkili parametre kür süresi, daha sonra uçucu kül içeriği, bazalt fiber içeriği ve bazalt fiber uzunluğudur.

Çizelge 11. Yarmada çekme mukavemeti için varyans analizi sonuçları (ANOVA)*Table 11. Analysis of variance results for splitting tensile strength (ANOVA)*

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	230.677	230.677	19.2231	42.45	0.005
B.fiber uzunluğu	3	11.262	11.262	3.7541	8.29	0.058
B.fiber yüzdesi	3	11.304	11.304	3.7679	8.32	0.058
Kür süresi	3	163.415	163.415	54.4716	120.28	0.001
Uçucu kül	3	44.696	44.696	14.8987	32.90	0.009
Hata	3	1.359	1.359	0.4529		
Toplam	15	232.036				

ϵ değerleri için geliştirilen modelde $p < 0.022$ olup model %98.42 güven aralığı içerisindedir (Çizelge 12). ϵ değerleri üzerinde en çok etkisi olan parametre bazalt fiber içeriğidir. Bazalt fiber içeriği arttıkça numunelerin sünekliliği artmıştır

Çizelge 12. Yarmada çekme deneyi ϵ değerleri için varyans analizi sonuçları (ANOVA)*Table 12. Analysis of variance results for splitting tensile test ϵ values (ANOVA)*

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	21.8236	21.8236	1.8186	15.62	0.022
B.Fiber Uzunluğu	3	1.3881	1.3881	0.4627	3.97	0.143
B.Fiber İçeriği	3	19.1648	19.1648	6.3883	54.87	0.004
Kür Süresi	3	0.9460	0.9460	0.3153	2.71	0.217
Uçucu Kül	3	0.3247	0.3247	0.1082	0.93	0.523
Hata	3	0.3493	0.3493	0.1164		
Toplam	15	22.1729				

Permeabilite Deney Sonuçları (Permeability Test Results)

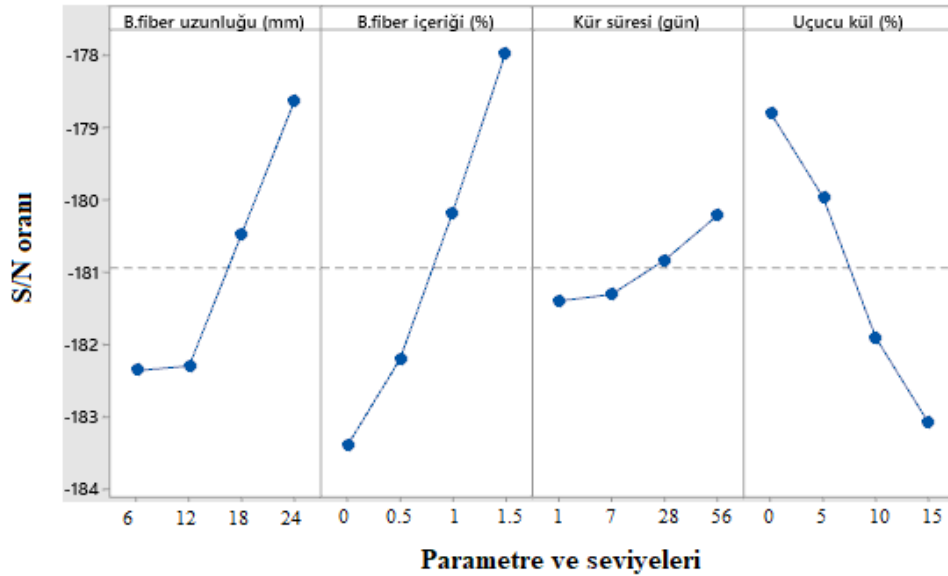
16 farklı tasarım ve katkısız zemin için ASTM D5084 standardına göre düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır. Permeabilite deney sonuçları Çizelge 13'te verilmiştir.

Çizelge 13. Permeabilite deney sonuçları

Table 13. Permeability test results

Deney No	k (m/s)
Katkısız	2.06E-10
1	7.24E-10
2	7.03E-10
3	7.28E-10
4	9.11E-10
5	4.95E-10
6	4.75E-10
7	1.16E-09
8	1.27E-09
9	5.62E-10
10	8.28E-10
11	1.10E-09
12	1.58E-09
13	1.04E-09
14	1.31E-09
15	9.94E-10
16	1.39E-09

Permeabilite deney sonuçları için S/N analizi yapılırken 'en yüksek en iyi' durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Buna göre; bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber içeriği ve kür süresi arttıkça permeabilite katsayısı artarken, uçucu kül içeriğinin artması ile permeabilite katsayısı azalmıştır.



Şekil 10. Permeabilite deneyi S/N grafiği

Figure 10. Permeability test S/N graph

Varyans analizlerinde permeabilite katsayısı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.48, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.41 ve R-kare (tahmini) değeri %85.28 olarak belirlenmiştir. Permeabilite katsayısı değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.004 < 0.05$ olup model anlamlıdır (Çizelge 14). Permeabilite katsayısı üzerinde en etkili parametre bazalt fiber içeriği, daha sonra uçucu kül içeriği ve bazalt fiber uzunluğudur. Kür süresi az da olsa permeabilite katsayısını etkilemektedir.

Çizelge 14. Permeabilite katsayıları için varyans analizi sonuçları (ANOVA)*Table 14. Analysis of variance results for permeability coefficients (ANOVA)*

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	154.188	154.188	12.8490	48.04	0.004
B.Fiber Uzunluğu	3	37.8010	37.801	12.6004	47.11	0.005
B.Fiber Yüzdesi	3	68.3760	68.376	22.7919	85.22	0.002
Kür Süresi	3	3.55300	3.5530	1.1844	4.43	0.127
Uçucu Kül	3	44.4580	44.458	14.8193	55.41	0.004
Hata	3	0.80200	0.8020	0.2674		
Toplam	15	154.990				

Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen bulgular literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında, kullanılan katkı maddelerinin zemin özellikleri üzerindeki etkisinin benzer olduğu belirlenmiştir (Wang ve diğ., 2016; Zorluer ve Gücek, 2017; Bilici ve diğ., 2020; Çimen ve Keleş, 2020; Ghasem ve diğ., 2022).

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, bazalt fiber ve uçucu kül ile güçlendirilmiş problemlili kil zeminin mühendislik özelliklerini değerlendirmek amacıyla deneysel ve istatistiksel bir çalışma yürütülmüştür. Bu amaçla bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber yüzdesi, kür süresi ve uçucu kül yüzdesinin değişken olduğu 4 parametrelili ve 4 seviyeli Taguchi ortogonal dizin tablosu kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Puzolanik aktiviteyi arttırmak amacıyla her tasarıma %3 kireç ilavesi yapılmıştır. Çalışmada varılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Kireç ve uçucu kül ilavesiyle birlikte optimum su içeriği (w_{opt}) değeri artarken maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) değerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, bazalt fiber içeriğinin kompaksiyon parametrelerine önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Bazalt fiber ve uçucu kül katkısı ile problemlili zeminin serbest basınç ve yarmada çekme mukavemetinde büyük oranda artış gözlenmiştir. En yüksek dayanımların elde edildiği tasarımda katkısız zeminin serbest basınç mukavemeti %769, yarmada çekme mukavemeti %751 artmıştır.

Serbest basınç ve yarmada çekme mukavemeti; bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve uçucu kül içeriği %10'a kadar artmakta bundan sonra ise azalmaya başlamaktadır. Kür süresi arttıkça serbest basınç ve yarmada çekme mukavemeti artmaktadır. Her iki deney için optimum parametreler; 18 mm bazalt fiber uzunluğu, %1 bazalt fiber, %10 uçucu kül ve 56 gün küresi olarak elde edilmiştir.

Bazalt fiber uzunluğunun serbest basınç mukavemeti üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Serbest basınç ve yarmada çekme deneylerinde, bazalt fiber uzunluğu ve içeriği arttıkça sünekliğin arttığı belirlenmiştir. Özellikle yarmada çekme deneyinde, birim deformasyon üzerinde en etkili parametrenin bazalt fiber içeriği olduğu görülmüştür.

Permeabilite deneyinde; bazalt fiber uzunluğu ve içeriği arttıkça permeabilite katsayısının arttığı belirlenmiştir. Uçucu kül içeriğinin artması ise permeabilite katsayısını düşürmüştür. Kür süresinin permeabilite katsayısına önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alkaya, D., 2009, "Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi", *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Vol. 5, No. 1, 61-72.
- Ayothiraman, R., Singh, A., "Improvement of Soil Properties by Basalt Fibre Reinforcement", *IDFI-PFSF 2017 Conference*, Melbourne, 404-412, 2017.

- Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M., Savaş, H., 2020, "Kil Zeminin Dayanımı Üzerinde Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılarının Etkisi ve Karşılaştırmalı Analizi", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Vol. 9, No. 2, 910-919.
- Cao, Z., Ma, Q., Wang, H., 2019, "Effect of Basalt Fiber Addition on Static-Dynamic Mechanical Behaviors and Microstructure of Stabilized Soil Compositing Cement and Fly Ash", *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2019, 1-20.
- Çimen, Ö., Keleş, E., 2020, "Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mühendislik Özelliklerine Uçucu Kül ve Kireç Katkılarının Etkisi", *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, Vol. 5, No. 2, 80-90.
- Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., Williams, J., 2015, "Effect of Fibre Aspect Ratio on Mechanical Properties of Soil Building Blocks", *Construction and Building Materials*, Vol. 83, 314-319.
- Demiröz, A., 1996, *Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanımı*, Yüksek Lisans Semineri, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Dehghanian, K., 2021, "Killi Zeminlerin Özelliklerinin Uçucu Kül Kullanarak İyileştirilmesi", *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, Vol. 3, No. 1, 66-72.
- Gao, L., Hu, G., Xu, N., Fu, J., Xiang, C., Yang, C., 2015, "Experimental Study on Unconfined Compressive Strength of Basalt Fiber Reinforced Clay Soil", *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-8.
- Geçkil, T., Sarıcı, T., Yıldırım, E. S., 2019, "Kireç Katkısı ile Kil Bir Zeminin Dayanımının İyileştirilmesi", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Vol. 34, No. 4, 171-180.
- Ghasem G. P., Momeni, M., Mousivand, M., Bayat, M., 2022, "Unconfined Compressive Strength Characteristics of Treated Peat Soil with Cement and Basalt Fibre", *International Journal of Engineering*, Vol. 35, No. 5, 1089-1095.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H., "Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları", *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, IMCET 2005, İzmir, 419-423, 09-12 Haziran 2005.
- Kenan, A., 2018, *Bazalt Fiber Katkısının Siltli Zeminlerin Kayma Direnci Parametrelerine Etkisi*, Yüksek Lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Ludovico, M.D., Prota, A., Manfredi, G., 2010, "Structural Upgrade Using Basalt Fibers for Concrete Confinement", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14, No. 5, 541-552.
- Malikzada, A., Pulat, H. F., Develioğlu, İ., "Effect of Fly Ash on Compaction Behavior of Alluvial Soil", *5th International Students Science Congress Proceedings Book*, İzmir, 126-135, 21-22 May 2021.
- Nath, B. D., Molla, M., Ali, K., Sarkar, G., 2017, "Study on Strength Behavior of Organic Soil Stabilized with Fly Ash", *International Scholarly Research Notices*, Vol. 2017, 1-6.
- Ndepete, C. P., 2017, *Bazalt Fiber Katkısının Siltli Zeminlerde Kayma Direncine Etkisi*, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Nezhad, M. G., Tabarsa, A., Latifi, N., 2021, "Effect of Natural and Synthetic Fibers Reinforcement on California Bearing Ratio and Tensile Strength of Clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 13, No. 3, 626-642.
- Özdemir, T., Polat, G. E., Azdeniz, O., Boz, A., Sezer, A., "Bazalt Fiber ve Kireç ile Güçlendirilmiş Kil Zeminin Dayanım Özellikleri", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 1025-1034, 2016.
- Shi, J., Zhu, H., Wu, Z., Seracino, R., Wu, G., 2013, "Bond Behavior between Basalt Fiber-Reinforced Polymer Sheet and Concrete Substrate under The Coupled Effects of Freeze-Thaw Cycling and Sustained Load", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 17, No. 4, 530-542.
- Zha, F., Liu, S., Du, Y., Cui, K., 2008, "Behavior of Expansive Soils Stabilized with Fly Ash", *Natural Hazards*, Vol. 47, No. 3, 509-523.
- Zhuang, X. S., Yu, X. Y., 2015, "Experimental Study on Strength Characteristics of Lime-Basalt Fiber Reinforced Expansive Soil", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 744, 495-498.
- Zorluer, İ., Gücek, S., 2017, "Usage of Fly Ash and Waste Slime Boron for Soil Stabilization", *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, Vol. 5, No. 1, 51-54.

- Wang, S., Chen, F., Xue, Q., Zhang, P., 2020, "Splitting Tensile Strength of Cement Soil Reinforced with Basalt Fibers", *Materials*, Vol. 13, No. 14, 3110.
- Wang, Y., Sun, S., Ye, W., Li, F., Ding, H., "Laboratory Test of Expansive Soil Improved by Lime-Basalt Fiber Reinforcement", *American Society of Civil Engineers Transportation Research Congress*, Beijing, China, 120-126, 6-8 June 2016.



ESNEK ÜSTYAPILARDA KALICI DEFORMASYON VE YORULMAYA BAĞLI MEKANİSTİK BİR MODELLEME VE DUYARLILIK ANALİZİ

¹Fatma ÇARKANAT , ²Sinem BOZATLI , ³Yavuz ABUT 

Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, Yalova, TÜRKİYE
fatmacarkanat@gmail.com, sinem.bozatli@yalova.edu.tr, yavuz.abut@yalova.edu.tr

(Geliş/Received: 17.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 21.05.2022)

ÖZ: Esnek üstyapı tasarım metodlarından olan ampirik yöntemler büyük ölçüde yol testlerine dayanmaktadır. Fakat mekanistik-ampirik tasarım yönteminde belirli faktörler göz önünde bulundurularak ortamın çevresel ve fiziki şartları hesaba katılarak bölgeden geçen araç trafiğinin sebep olduğu gerilme, deformasyon ve deplasmanlar ve bunun sonucunda da kaplamada oluşan yorulma düzensizlikleri, tekerlek izleri, termal çatlaklar göz önüne alınır, üstyapı kalınlıkları belirlenir ve o yol için gerekli servis ömrünün bulunması hedeflenir. Bu çalışmada, esnek üstyapı tasarımında mekanistik-ampirik bir metodu kullanan KENPAVE yazılımına, Karayolları Genel Müdürlüğü, Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'nde bulunan tasarım kombinasyonlarından birkaç senaryo girilerek yolun servis ömrünün tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, elastik ve tabakalı bir kaplama sistemi tanımlandıktan sonra, asfalt tabaka alt noktasındaki yatay çekme gerilmesinin neden olduğu yorulma ve taban zemini üst noktasında düşey basınç gerilmesinin neden olduğu tekerlek izi deformasyonuna ait hasar modelleri programa girilmiştir. İkinci aşamada AASHTO 93 esnek üstyapı tasarım parametreleri olan trafik kategorisi, toplam mevcut SN değeri, taban zemini- M_R (Esneklik Modülü) değerlerinin servis ömrüne etkileri, duyarlılık analizi yapılarak irdelenmiştir. Karar değişkenlerinin servis ömrü üzerindeki duyarlılıkları göz önüne alındığında dingil yükü sayısı ve taban zemini- M_R etkisinin %95 güven aralığında anlamlı olduğu ve dingil yükü sayısının, servis ömrünü taban zemini- M_R 'a göre daha çok etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Esneklik modülü, Mekanistik-ampirik Tasarım, Asfalt yollar, Servis ömrü, Kalıcı deformasyon, Yorulma

A Mechanistic Modeling and Sensitivity Analysis Based on Permanent Deformation and Fatigue for Flexible Pavements

ABSTRACT: Empirical approaches, one of the flexible pavement design methods, are largely based on road tests. However, in the mechanistic-empirical design method, certain factors such as environmental and physical conditions of the road are estimated and the stress, deformation or deflections caused by the vehicles, as a result of which fatigue distress, rutting or thermal cracks in the pavement are taken into account. It is aimed to find the required service life for the road by determining the pavement thickness. In this study, the main purpose is to estimate the service life of the road by entering a few scenarios from the design combinations taken from the General Directorate of Highways, Project Guide of Flexible Pavements to KENPAVE software, which uses a mechanistic-empirical method for design of flexible pavements. Afterwards, the effects of AASHTO 93 flexible pavement design parameters such as traffic category, total SN value, subgrade- M_R (Modulus of Elasticity) values on service life were analyzed by performing sensitivity analysis. Considering the sensitivity of the decision variables on the service life, it was determined that the effect of the number of axle loads and the subgrade- M_R were significant in the

95% confidence interval, and the number of axle loads affected the service life more than the subgrade- M_R .

Keywords: *Modulus of elasticity, Mechanistic-empirical design, Asphalt roads, Service life, Permanent deformation, Fatigue*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemizde artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte ağır taşıt trafiği artış göstermekte ve bu faktörler yol yapısında bozulmaların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, ülkemizin dağlık ve engebeli coğrafi yapısının olması ve farklı iklim özelliklerinin bulunması sebebiyle, artan dingil yükleri pek çok yol kusurlarını ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla günümüzde faal olarak hizmet veren karayolu ağının bakım ve onarımlarının zamanında ve en efektif bir şekilde yapılması mecburiyet haline gelmektedir (Hanlı, 2009). Bir ülkenin ekonomisinin olumsuz etkilenmesinin önüne geçmek için mevcut karayolu ağını sık tekrarlar yenilemek yerine, faaliyette olan yol güzergahlarının bozulma nedenlerini öngörerek tasarlamak önemlidir. Yol üstyapısının projelendirilmesindeki amaç, proje süresi boyunca üstyapının üzerinden geçen trafiği, büyük deformasyonlara ve çatlamalara uğramadan, güvenli bir şekilde taşıyabilecek üstyapı kalınlıklarının belirlenmesi ve kullanılacak malzemelerin özelliklerinin tespit edilmesidir.

Karayolu üstyapı tasarımındaki çalışmalar, ampirik ya da mekanistik yöntemlere dayanmaktadır (Singh and Sahoo, 2021). Ampirik tasarım, deneylerin veya geçmiş tecrübelerin sonuçlarına dayanan bir yaklaşımdır. Kaplamayı oluşturan yapı malzemelerinin mühendislik özellikleri ve elastisite teorileri kullanılarak modellenen üstyapının herhangi bir noktasındaki trafik veya çevresel etkilere bağlı oluşan gerilme, şekil değiştirme ve deformasyonlar ampirik metotlarla her zaman tahmin edilemeyebilir. Bu sebeple ampirik deney sonuçlarının, performans gözlemleri ve analitik bağıntularla kalibrasyonu gereklidir. Bu zorunluluk analitik-ampirik yöntemlerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Tasarım parametreleri ile üstyapı hasar modeli arasındaki ilişki, kullanılan deney yöntemi veya her ikisinin bir kombinasyonu yoluyla planlanan yaklaşım, tasarımda seçilecek yöntemi belirlemektedir. Mekanistik yaklaşım, analiz için malzeme parametrelerinin yol yapısına yakın ve olabildiğince benzer ortam koşullarında belirlenmesini sağlar. Dolayısıyla bu yaklaşım, üstyapı modelinin elastik veya visko-elastik temsiline dayanmaktadır (NCHRP, 2004). Mekanistik tasarımda gerilme, şekil değiştirme veya plastik deformasyon analizine dayalı olarak malzeme kalitesinin yanı sıra yeterli kaplama tabakası kalınlığının kontrolü sağlanır. Analiz ayrıca üstyapı tasarımcısının kaplama ömrünü bir miktar kesinlik ile tahmin etmesine olanak tanımaktadır. Gelişmekte olan ülkelerin çoğunda üstyapı tasarımı birtakım hasar modelleri, jeolojik veya geoteknik tasarım, inşaat ve bakım problemlerinin herhangi birine veya bunların kombinasyonuna dayanmaktadır (Ekwulo, 2009).

Esnek üstyapılarda kaplama hasarı, asfalt tabaka altındaki yatay çekme gerilmesinin veya taban zemini üzerindeki düşey basınç gerilmesinin neden olduğu yorulma çatlakları veya tekerlek izi deformasyonundan kaynaklandığı genel olarak bilinmektedir. Asfalt kaplama tasarımında bu kritik gerilme ve deformasyonların araştırılması ve bu parametreler göz önüne alınarak tasarım yapılması gerekmektedir. Birçok gelişmiş ülkede üstyapı tasarımında mekanistik yaklaşımın kullanımına yönelik çalışmalar olmasına rağmen, ülkemizde bu tarz tasarım yöntemlerinin kullanımı sınırlıdır.

Ülkemizde asfalt kaplamalı yollar büyük ölçüde AASHTO 93 deneysel yol denklemini baz alan Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'ne göre tasarlanmaktadır (KGM, 2008). Ampirik yöntemlere göre tasarlanıp inşa edilen bu yollarda, AASHTO 93 tasarım yönteminin öngördüğü 20 yıllık servis ömrünü doldurmadan deformasyon, çatlak veya çukur oluşumu gözlemlenebilmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün verileri ile asfalt kaplamalarda bakım onarım maliyetlerinin baz alındığı bir çalışmada, esnek üstyapı hasarlarının tamamına yakınının oluşumunda, tasarım parametrelerinden malzeme faktörünün baskın bir şekilde etkili olduğu bildirilmiştir (Bağdatlı ve Yıldırım, 2017). Ayrıca havaalanı kaplamaları için de yeniden kaplama veya rehabilitasyon, bakım maliyetlerinin hesaplanmasında

mekanistik-ampirik tasarım yöntemlerin daha efektif ve gerçekçi sonuçlar ortaya çıkardığı bildirilmiştir (Kaya, 2020). Bu nedenle deformasyonların sebeplerini öğrenmek, tatbik edilen tasarımın güvenli ve uzun ömürlü olmasını sağlamak, tasarım parametrelerinin duyarlılıklarını belirlemek ve servis ömrü açısından daha gerçekçi tahminler elde edebilmek için analitik-ampirik ve mekanistik-ampirik yöntemlerin mukayeseli olarak değerlendirilmesi daha rasyonel sonuçların ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmada, esnek üstyapı tasarımında mekanistik-ampirik bir metodu kullanan KENPAVE yazılımına, Karayolları Genel Müdürlüğü, Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'nde bulunan tasarım kombinasyonlarından birkaç senaryo girilerek, yolun gerçek servis ömrünün tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, KENPAVE yazılımına elastik ve tabakalı bir kaplama sistemi tanımlandıktan sonra, asfalt tabaka alt noktasındaki yatay çekme gerilmesinin neden olduğu yorulma çatlağı ve taban zemininde meydana gelen kalıcı deformasyona ait hasar modelleri programa girilmiştir. Bunun yanında AASHTO 93 esnek üstyapı tasarım parametreleri olan trafik kategorisi, toplam mevcut SN değeri, taban zemini- M_R (Esneklik Modülü) değerlerinin proje ömrüne etkileri duyarlılık analizi yapılarak irdelenmiştir. Çalışmanın sonuç bölümünde ampirik bir tasarım olan AASHTO 93 tasarımı ile mekanistik-ampirik tasarımların proje ömürleri mukayeseli olarak karşılaştırılmıştır.

ESNEK ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİ (METHODS OF FLEXIBLE PAVEMENT DESIGN)

Esnek üstyapı, ham petrolün damıtılması ile elde edilen bitümlü bağlayıcı, ince ve iri granüler malzemelerden oluşturulan kaplama tabakasıdır. Kaplama yüzeyi, üzerine etki eden trafik yükü nedeniyle ortaya çıkan toplam sehim zemine yansıtılabildiği için Esnek üstyapı olarak adlandırılır. Dolayısıyla esnek üstyapı tasarımı, katmanlı bir sistemin yük dağıtma özelliklerine dayanmaktadır. Bitümlü bağlayıcı, daha çok viskoz yapısı nedeniyle önemli ölçüde plastik deformasyona izin verebilen bir yapıdadır. Esnek üstyapılar, uygulandığı sıcaklığa bağlı olarak sıcak, ılık veya soğuk karışım asfalt olarak inşa edilirler. Yolun toprak işlerinin bitmesinden sonra oluşan tesviye yüzeyi ile temas halinde olan ve trafiğin yüklemiş olduğu ağırlığı, kaplama, temel ve alttemel tabakaları yoluyla taban zeminine farklı gerilmelerle ulaştıran üstyapı çeşididir (İlcalı *ve diğ.*, 2001). Esnek üstyapı tasarım yöntemleri; ampirik, analitik-ampirik ve mekanistik-ampirik yöntemlerden oluşmaktadır.

Ampirik Yöntemler (Empirical Methods)

Ampirik bir tasarım yaklaşımı, yalnızca deneylerin veya deneyimin sonuçlarına dayalı olan yaklaşımdır (Carvalho, 2006). 1960'lı yıllara dayanan AASHTO Yol Testleri, bir diğer adıyla ampirik AASHTO yöntemleri günümüzde de en yaygın kullanılan kaplama tasarım yöntemleridir. AASHTO tasarım denklemi, eşdeğer dingil yükü tekerrür sayısı, trafik yükü ve çevresel faktörler ile ilişkilendirilmektedir (Carvalho, 2006, Huang, 2004).

Analitik-Ampirik Yöntemler (Analytical-Empirical Methods)

Analitik-ampirik yöntemlerde, ampirik denklemler ve gözlemler sonucunda daha gerçekçi yaklaşımlar elde edilmesi amaçlanmıştır. AASHTO 86 esnek üstyapı tasarım yöntemi, AASHTO 93 esnek üstyapı tasarım yöntemi ve Asfalt Enstitüsü yöntemi analitik-ampirik yöntemler arasında girmektedir (Göktolga, 1998). AASHTO 93 üstyapı tasarım rehberinde bulunan yol formülü Denklem 1'de verilmiştir.

$$\log T_{8,2} = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5} \right]}{0,40 + \left[\frac{1094}{(SN+1)^{5,19}} \right]} + 2,32 \cdot \log M_R - 8,07 \quad (1)$$

Burada;

$T_{8,2}$: Eşdeğer tek dingil (8,2 ton) tekerrür sayısı

Z_R : Standart normal sapma

S_0 : Toplam standart sapma

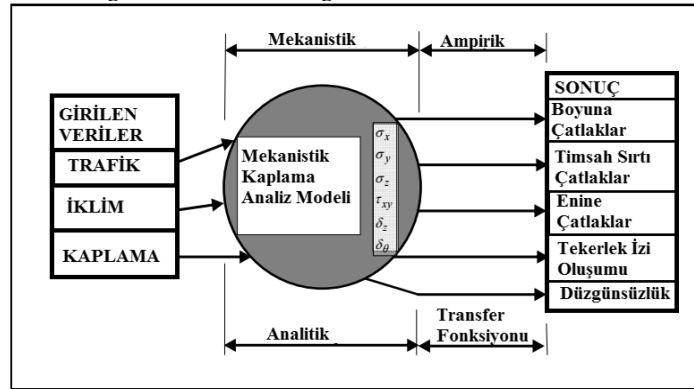
SN: Üstyapı sayısı (inç)

ΔPSI : Servis kabiliyetindeki azalma miktarı ($P_0 - P_T$)

M_r: Taban zemini esneklik modülü (psi)

Mekanistik-Ampirik Tasarım Yöntemleri (Mechanistic-Empirical Design Methods)

Mekanistik-ampirik yöntemler ampirik yöntemlerden bir adım ileriye temsil eder. Trafik yüklemesi ve çevresel koşullar nedeniyle bir esnek üstyapıda gerilmelerin neden olduğu durum, “mekanistik teori” kullanılarak öngörülmektedir (NCHRP, 2004). Mekanistik-ampirik üstyapı tasarım rehberi, ABD’ de NCHRP (Ulusal Karayolları Birliği Araştırma Programı) tarafından 2002 yılında geliştirilen Mekanistik-ampirik Üstyapı Tasarım Kılavuzunun (MEPDG) amacı, kaplama yapılarındaki gerilmelerin fiziksel nedenlerini belirlemek ve bunları gözlemlenen kaplama performansı ile ölçmektir. Şekil 1’de mekanistik-ampirik üstyapı tasarım metodu girdi ve sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 1. Mekanistik-Ampirik üstyapı tasarım metodu (Coree vd. 2005)

Figure 1. Method of Mechanistic-Empirical pavement design (Coree et al. 2005)

NCHRP 2004 rehberi, karayolu üstyapılarının tasarlanması ve değerlendirilmesi için hazırlanan mekanistik-ampirik bir yöntemi içerir. Yapısal tepkiler (gerilmeler, şekil değiştirmeler ve deformasyonlar) malzeme özelliklerine, çevresel koşullara ve yükleme özelliklerine göre mekanistik olarak hesaplanır. Bu yöntemde projelendirme; tasarım aşamaları, girdi, analiz ve çıktılardan oluşmaktadır. Veri girişinde üç seviye bulunmaktadır. Birinci seviyede deneysel veriler ve ölçümler kullanılır (esneklik modülü, trafik verileri vb.). İkinci seviye girdiler, deney ve ölçümlere dayanmakla birlikte diğer parametrelerle ampirik korelasyonlar yoluyla elde edilir (örneğin, CBR değerlerinden tahmin edilen esneklik modülü). Üçüncü seviye girdiler, malzeme türüne veya yol sınıfına göre ulusal veya bölgesel varsayılan değerlerden oluşan bir veri tabanından seçilir (örneğin, esneklik modülü aralığını belirlemek için zemin sınıflandırması, araç sınıfı dağılımını belirlemek için yol sınıfı seçimi vb.). Üst yapı modellenmesi için bilgisayar programları kullanılarak gerilme, deformasyon ve deplasmanlar hesaplanır. Üstyapı modelinin kurulmasında genellikle Çok Katmanlı Elastik Teori (MLET) veya Sonlu Elemanlar Yöntemleri (FEM) gibi döngü içeren yöntemler kullanılmaktadır. Analiz sonucunda başlangıçta kabul edilen kriterler sağlanmıyorsa ilk girilen değerler değiştirilerek işlem tekrar edilir. Kriterler sağlanıyorsa bir sonraki aşamaya geçilir ve üstyapı tipi ve kalınlıkları için yaşam döngüsü maliyet analizi yapılarak tasarım sonlandırılır (NCHRP, 2004).

ELASTİK KATMANLI SİSTEM (ELASTIC LAYERED SYSTEM)

Üstyapı tabakaları ile tekerlek yükü ilişkisinin tahmin yöntemlerinden biri de Wetergaard'ın rijit üstyapıları tepkisini modellemek için geliştirdiği elastik katmanlı teoridir (Westergaard, 1926). Üstyapıların iyi derecelendirilmiş doğal zemin üzerine oturan çeşitli tabakalardan (beton, asfalt, granüler temel, alt temel vb.) oluşan katmanlı bir sistem olarak modellenmesinin en gerçekçi sonuçları verdiği kabul edilmektedir. Böyle bir sistemin davranışı, klasik elastisite teorisi kullanılarak da analiz edilebilir (Burmister, 1945).

Elastik katmanlı analiz, kaplama tepkilerini (gerilme ve şekil değiştirme) belirleme yeteneğine sahip mekanistik bir prosedürdür ve başlıca varsayımlar;

- i) Kaplama yapısı, malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışı ile elde edilen Esneklik (Young) Modülü (E) ve Poisson oranı (μ) ile karakterize edildiği lineer elastik çok katmanlı bir sistem olarak kabul edilir.
- ii) Alt katman hariç, her katmanın sonlu bir kalınlığı vardır ve tümü yatay yönde sonsuzdur.
- iii) Tekerlek yüklemesi (P), dairesel bir alan üzerinde üniform olarak dağılmış bir dikey gerilme ile düşey olarak temsil edilebilir.

HASAR MODELLERİ İLE BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM (COMPUTER AIDED DESIGN WITH DAMAGE MODELS)

Yang H. Huang tarafından geliştirilen bir yazılım olan KENPAVE kullanılarak esnek ve rijit kaplamalar, elastik katmanlı teoriye göre lineer veya nonlineer olarak analiz edilebilmektedir. Ayrıca yazılım, Burmister'in çoklu tabaka modeline dayanan ve elastik teori konseptini baz alan sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır (Huang, 2004). Genel olarak bu yöntemin kullanılma amacı, tüm yük grupları için her periyotta yorulma çatlağı ve tekerlek izi deformasyonunun neden olduğu hasarlara karşı, servis ömrünün her aşamada değerlendirilmesidir. KENPAVE yazılımı son yıllarda, dayanıklı üstyapı tasarımı, zemin deformasyonlarının tespiti, geogrid sistemlerin değerlendirilmesi, yaşam döngüsü maliyet analizi gibi farklı mühendislik uygulamalarında kullanılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları; rijit kaplamalarda tekerlek özellikleri ve dingil yükü konfigürasyonlarını araştırmak için parametrik bir çalışma (Patel ve diğ., 2022), geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) içeren çimento ile güçlendirilmiş temel kaplamalarının yaşam döngüsü maliyeti analizi (Bressi ve diğ., 2022), yaşam döngüsü maliyeti ve sera gazı emisyonları açısından kaplamaların karşılaştırılması (Kulkarni ve Ranadive, 2022), sıcak ve ılık karışım asfalt kaplamalarının arazi ve laboratuvarındaki tekerlek izi davranışı (Alimohammadi ve diğ., 2020), iklim değişikliğinin neden olduğu sel etkisi dikkate alınarak dayanıklı üstyapı tasarımı (Chan ve Wang, 2020), gömülü boruları korumak için genleşmiş polistiren (EPS) blok geogrid sisteminin deneysel değerlendirmesi (Azizian ve diğ., 2020) örnek olarak verilebilir.

Asfalt kaplamaların servis ömrünü etkileyen iki tür gerilmenin görece daha kritik olduğu düşünülmektedir. Bunlardan biri, asfalt tabakanın altında yorulma çatlamasına neden olan eksenel çekme gerilmesi, diğeri ise taban zeminindeki kalıcı deformasyona ait basınç gerilmesidir (Huang, 2004). Yorulma ve tekerlek izi modelleri için kullanılan eşitlikler Denklem 2 ve Denklem 3'te verilmektedir (Asphalt Institute, 1982).

Yorulma çatlağı için bozulma kriteri şu şekilde ifade edilmektedir;

$$N_f = f_1(\epsilon_t)^{-f_2}(E_1)^{-f_3} \quad (2)$$

N_f ; yorulma çatlağını önlemek için izin verilen dingil yükü tekrarı sayısı, ϵ_t ; asfalt tabakasının altındaki çekme birim şekil değiştirmesi, E_1 ; asfalt tabakasının esneklik modülü, f_1 , f_2 ve f_3 yorulma deneylerinden belirlenen sabitlerdir. Asfalt Enstitüsü, analitik tabanlı tasarım prosedürlerinde denklemde ifade edildiği üzere f_1 , f_2 ve f_3 için sırasıyla 0,0796, 3,291 ve 0,854 kullanılmasını önermektedir (Huang, 2004).

Kalıcı deformasyon için bozulma kriteri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$N_d = f_4(\epsilon_c)^{-f_5} \quad (3)$$

N_d ; tekerlek izi deformasyonunu sınırlandırmak için izin verilen dingil yükü tekrarı sayısı, ϵ_c ; taban zemini üstündeki eksenel birim şekil değiştirme miktarı, f_4 ve f_5 yol testlerinden veya saha performansından kaynaklanan sabitler olup sırasıyla Asfalt Enstitüsü tarafından $1,365 \times 10^{-9}$ ve 4,477 olarak verilmektedir (Huang, 2004).

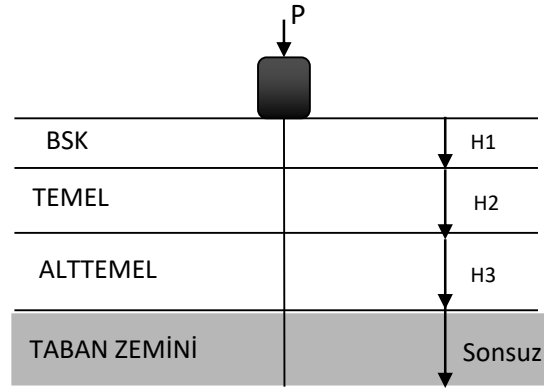
MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, KGM (2008) tasarım yöntemi baz alınarak %95 güvenilirlik düzeyinde, üç farklı trafik kategorisi (düşük, orta, yüksek) ve üç farklı taban zemini taşıma gücü (düşük, orta, yüksek) olmak üzere toplamda dokuz farklı durum seçilerek muhtemel senaryolar belirlenmiştir. Belirlenen kategorilerden alınan 20 yıllık trafik verilerinin ortalaması alınarak, yoldan geçecek olan yıllık dingil yükü tekrarı

sayıları elde edilmiştir. Elastik katmanlı sistem modeli Şekil 2’de, bağımsız değişkenlerin verildiği senaryo tipleri Çizelge 1’de verilmektedir.

Tabakalarda kullanılan malzemelere ait Poisson oranı, Esneklik Modülü, tekerlek yarıçapı, tekerleğin kaplamaya yaptığı basınç, dingil yükü ve zemin Esneklik Modülü değerleri KENPAVE’e bağımsız değişken olarak tanımlanmış ve Denklem 2 ile Denklem 3’te verilen hasar modelleri kullanılarak servis ömrü analizleri yapılmıştır.

Analizler sonucunda, kaplama tabakasının altında gerçekleşen çekme birim şekil değiştirmesi ve taban zemini üzerinde oluşan aksel birim şekil değiştirmeler elde edilmiştir. Her gerilme için izin verilen yük tekrarı sayıları Denklem 2 ve 3’ten hesaplanarak, kritik olanlar servis ömrü olarak alınmıştır.



Şekil 2. Elastik katmanlı sistem modeli

Figure 2. Model of elastic layered system

HASAR MODELİ ANALİZİNİN SONUÇLARI (RESULTS OF DAMAGE MODEL ANALYSIS)

Asfalt Tabakada Yorulma (Fatigue in the Asphalt Layer)

Asfalt tabakasının altında oluşan aksel çekme şekil değiştirme (ϵ_t) miktarları Şekil 3(a)’da verilmiştir. ϵ_t değerleri çekme türünde olduğu için, “eksi” işaretli olarak gösterilmiştir. Durum 1’de düşük trafik yükü olmasına rağmen, düşük taban zemini- M_R değerine sahip olması sebebiyle, çekme şekil değiştirmesinin en yüksek olduğu görülmektedir. Taban zemini- M_R ’ın azalmasına bağlı olarak (Durum 1, 4, 7) şekil değiştirme miktarları da yükselmektedir. Aynı trafik kategorisinde olan Durum 4 ve 7’ye bakıldığında, taban zemini- M_R değerlerindeki artış, Durum 7’de alttemel tabakası kullanılmamasına rağmen olumlu etki yaptığı gözlemlenmektedir ve taban zemini- M_R artışına bağlı çekme şekil değiştirmede azalma gerçekleşmiştir. Sırasıyla Durum 2, 5, 8’e bakıldığında orta, yüksek ve düşük taban zemini- M_R tercihi, çekme şekil değiştirme miktarını aynı trafik yüküne bağlı olarak benzer oranda etkilemiştir. Diğer durumlarda da aynı sonuçlar gözlemlenmektedir. Taban zemini- M_R değerindeki artışa bağlı olarak, çekme şekil değiştirmenin yönü ters orantılı olarak artmaktadır ve taban zemini- M_R ’ın düşük olması, şekil değiştirme miktarlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

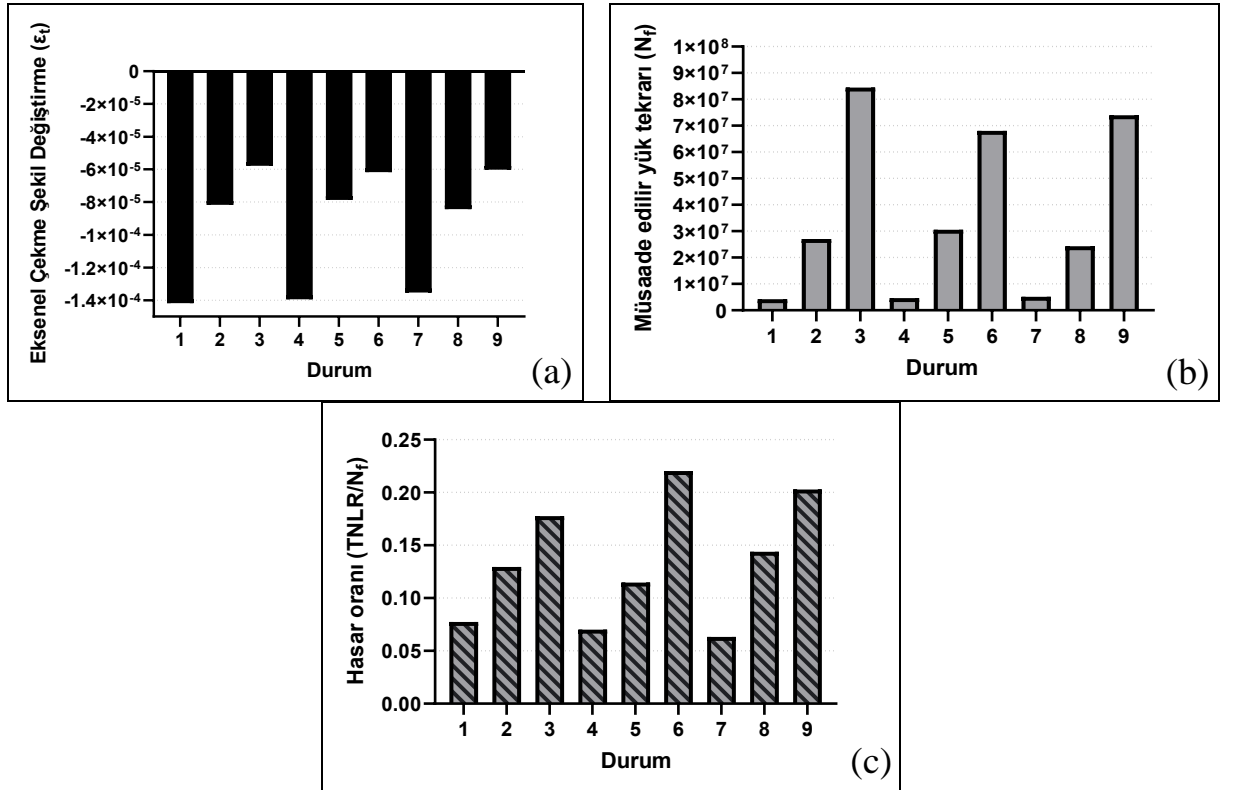
Şekil 3(b)’den görüleceği üzere, en düşük çekme şekil değiştirme miktarına sahip olan Durum 3’e bağlı olarak, izin verilen yük tekrarı sayısı en yüksek çıkmıştır. Deformasyon ne kadar az ise, doğal bir sonuç olarak o kadar çok araç geçişine izin verilir. Dolayısıyla, esnek üstyapının yorulma dayanımının artması, müsaade edilebilir dingil yükü tekrar sayısını artıracaktır.

Şekil 3(c)’de verilen hasar oranları, KENPAVE programında trafik kategorilerine girilen yıllık trafik yükü değerinin, izin verilen yük tekrarı sayısına bölünmesi ile elde edilmektedir. Trafik miktarı ve izin verilen trafik yükünün artışına bağlı olarak hasar oranında artış veya azalış meydana gelmektedir. Hasar oranları kritik seviyelerde yol servis ömürleri hakkında bilgi vermektedir.

Çizelge 1. KENPAVE' de kullanılan bağımsız değişkenler

Figure 1. Independent variables used in KENPAVE

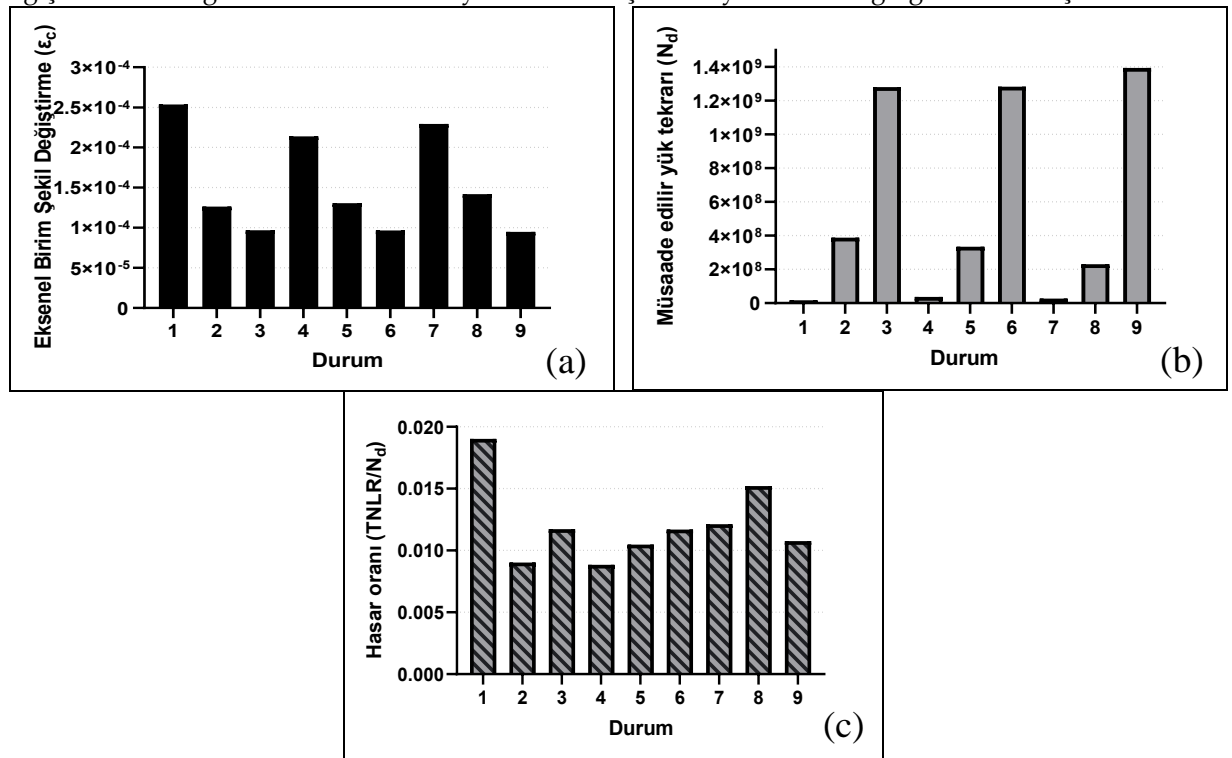
Durum	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Güvenilirlik (%)	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Dingil Yüğü Sayısı, 20 yıllık (milyon)	6,5	70	300	6,5	70	300	6,5	70	300
Dingil Yüğü Sayısı, 1 yıllık (milyon)	0,325	3,5	15	0,325	3,5	15	0,325	3,5	15
Dingil Yüğü, kN	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Tekerlek Yarıçapı, cm	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
Tekerleğin Uyguladığı Basınç, kPa	552	552	552	552	552	552	552	552	552
Taban Zemini MR, psi (bin)	7,5	12,6	19	12,6	19	7,5	19	7,5	12,6
Taban Zemini MR, kPa (bin)	52	87	131	87	131	52	131	52	87
Aşınma Tabakası, cm	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Binder Tabakası, cm	6	10	13	6	10	13	6	10	13
Bitümlü Temel Tabakası, cm	8	13	16	8	13	16	8	13	16
PMT Tabakası, cm	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Alttemel Tabakası, cm	20	15	0	15	0	35	0	25	15
Katman 1 (Asfalt Tabakası), cm	19	28	34	19	28	34	19	28	34
Katman 2 (Temel Tabakası), cm	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Katman 3 (Alttemel Tabakası), cm	20	15	0	15	0	35	0	25	15
Katman 1 (Asfalt MR), kPa (milyon)	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Katman 2 (Temel MR), kPa (bin)	228	228	228	228	228	228	228	228	228
Katman 3 (Alttemel MR), kPa (bin)	128	128	128	128	128	128	128	128	128

Şekil 3. (a) Eksenel çekme şekil değiştirmeleri (ϵ_t), (b) Müsaade edilir yük tekrarları (N_f), (c) Hasar oranları (1 Yıllık Dingil Yüğü / N_f)Figure 3. (a) Tensile strain (ϵ_t), (b) Allowable number of load repetitions (N_f), (c) Damage ratio (1 Year Axle Load / N_f)

Taban Zemininde Kalıcı Deformasyon (Permanent Deformation on the Subgrade)

Şekil 4(a)'da tekerlek izi oluşumuna bağlı deformasyonlar görülmektedir. Taban zemini üzerinde gerçekleşen kalıcı deformasyon miktarı en fazla Durum 1'de görülmektedir. En düşük kalıcı deformasyona sahip olan Durum 9 için, izin verilen yük tekrarı sayısı da yüksek çıkmıştır (Şekil 4(b)). Buna bağlı olarak, basınç dayanımı yüksek olan, yani daha az deforme olan üstyapının, daha fazla trafik yüküne müsaade edebileceği sonucu çıkmaktadır.

Şekil 4(c)'de verilen hasar oranları, KENPAVE programına trafik kategorilerine göre girilen yıllık trafik yükü değerinin kabul edilen yük tekrarı sayısına bölünmesi ile elde edilmiştir. Zemin esneklik modülü ve izin verilen trafik yükü değişkenlerine bağlı olarak hasar oranında artış veya azalış oluşmaktadır. Denklem (3)'de ifade edilen taban zemininin üst kısmında basınç gerilmesi sonucu oluşan aksel birim şekil değiştirmelere (kalıcı deformasyon) bağlı hasar oranlarının, Denklem (2)'de ifade edilen asfalt kaplamadaki (Aşınma, Binder, Bitümlü Temel) yorulma çatlağı sonucu oluşan çekme şekil değiştirmesine bağlı hasar oranlarına kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.



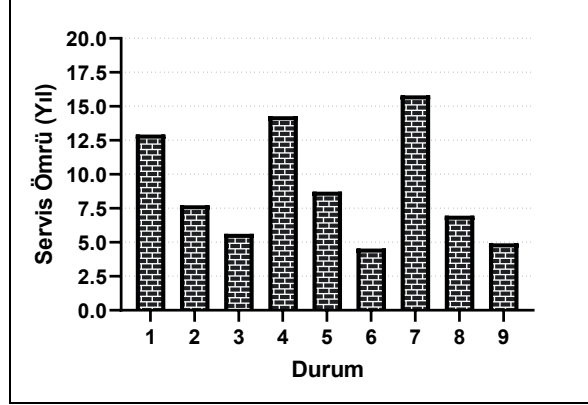
Şekil 4. (a) Aksel birim şekil değiştirmeleri (ϵ_c), (b) Müsaade edilir yük tekrar sayıları (N_d), (c) Hasar oranları (1 Yıllık Dingil Yüğü/ N_d)

Figure 4. (a) Compressive strain (ϵ_c), (b) Allowable number of load repetitions (N_d), (c) Damage ratio (1 Year Axle Load / N_d)

Kalan Servis Ömrü Değerlendirmesi (Assessment of Remaining Service Life)

Maksimum hasar oranı, her durum için Şekil 3(c) ve 4(c)'ye göre sırasıyla "asfalt kaplamadan kaynaklı yorulma ile taban zemini kaynaklı kalıcı deformasyon sonucu oluşan hasar oranlarından en yüksek olanı" olarak tarif edilmektedir (Asphalt Institute 1982). Çizelge 1'de verilen üstyapı kalınlıkları değerlendirildiğinde, Durum 1'de asfalt kaplamasının (Aşınma, Binder, Bitümlü Temel) tamamında oluşan çekme gerilmesine bağlı hasar oranı 0,077 iken (Şekil 3(c)), taban zemininde oluşan kalıcı deformasyona bağlı hasar oranı 0,019 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4(c)). Ortaya çıkan bu hasarın yaklaşık 4 kat daha büyük olması, esnek kaplamasının taban zeminine kıyasla servis yüklerine karşı daha hassas olduğunu göstermektedir. Maksimum hasar oranının, bütün durumlar için yorulma hasarı açısından daha kritik olduğu

görülmektedir. Hasar modeli analizleri sonucunda, 9 farklı durum için servis ömürleri, maksimum hasar oranının sahip olduğu yük tekrar sayısının (N_i), dingil yükü tekerrür sayısına (1 Yıllık Dingil Yüğü) bölünmesiyle elde edilmektedir. Bütün durumlarda servis ömrünün, AASHTO 93 tasarım yönteminin öngördüğü 20 yılın altında kaldığı görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Hasar modeli sonuçlarına göre servis ömrü (yıl)

Figure 5. Service life (years) based on the damage model results

BAĞIMSIZ DEĞİŞKENLER İÇİN DUYARLILIK ANALİZİ (SENSITIVITY ANALYSIS FOR INDEPENDENT VARIABLES)

Çizelge 1’de verilen karar değişkenleri (dingil yükü sayısı, taban zemini- M_R değeri, Alttemel, Bitümlü Temel, Binder ve Aşınma tabakası kalınlıkları) kullanılarak Minitab yazılımı ile ANOVA testi yapılmış ve sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

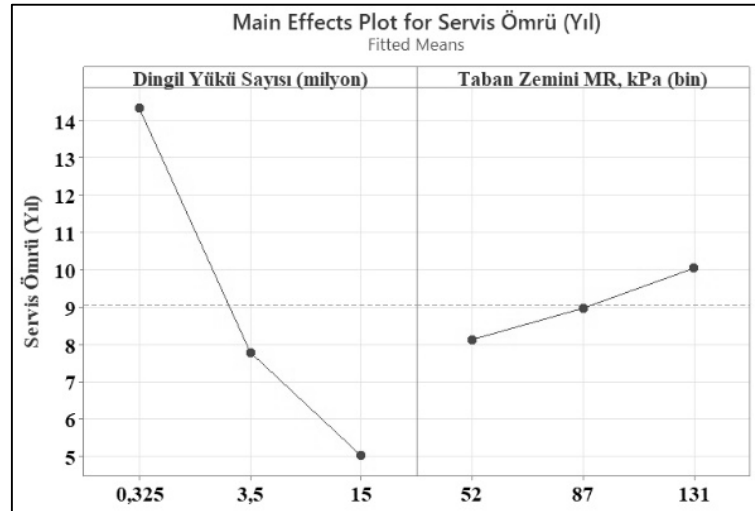
ANOVA testine göre, %95 güven aralığında asfalt tabakada yorulmadan kaynaklı hasar oranı, dingil yükü sayısı ve taban zemini- M_R açısından (sırasıyla p -value değerleri 0,000 ve 0,022 olmak üzere) anlamlıdır (Çizelge 2(a)). Ancak, aynı karar değişkenlerinin taban zemininde kalıcı deformasyon kaynaklı hasar oranı ile olan ilişkisi (sırasıyla p -value değerleri 0,600 ve 0,099 olmak üzere) anlamlı değildir (Çizelge 2(b)). Buradan hareketle, asfalt tabakadaki eksenel çekme şekil değiştirme miktarının, taban zemini üzerindeki kalıcı deformasyon miktarına kıyasla daha kritik olduğu bir kez daha anlaşılabilir.

Karar değişkenlerinin servis ömrü üzerindeki etkileri (duyarlılıkları) ise Çizelge 2(c) ve Şekil 6’da gösterilmektedir. Buradan hareketle, servis ömrü üzerinde dingil yükü sayısı ve taban zemini- M_R etkisinin %95 güven aralığında (sırasıyla p -value değerleri 0,000 ve 0,016 olmak üzere) anlamlı olduğu ve dingil yükü sayısının servis ömrünü taban zemini- M_R ’a göre daha çok etkilediği yorumu yapılabilir.

Çizelge 2. ANOVA testi sonuçları

Table 2. ANOVA test results

a) Asfalt Tabakada Yorulmadan Kaynaklı Hasar Oranı					
Karar Değişkeni	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dingil Yüğü Sayısı	2	0,025438	0,012719	238,26	0,000 <0,05
Taban Zemini-M _R	2	0,00124	0,00062	11,62	0,022 <0,05
Hata	4	0,000214	0,000053		
Toplam	8	0,026891			
b) Taban Zemininde Kalıcı Deformasyon Hasar Oranı					
Karar Değişkeni	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dingil Yüğü Sayısı	2	0,000007	0,000003	0,58	0,600
Taban Zemini-M _R	2	0,000052	0,000026	4,37	0,099
Hata	4	0,000024	0,000006		
Toplam	8	0,000082			
c) Servis Ömrü (Yıl)					
Karar Değişkeni	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dingil Yüğü Sayısı	2	136,909	68,4547	339,26	0,000 <0,05
Taban Zemini-M _R	2	5,518	2,7592	13,67	0,016 <0,05
Hata	4	0,807	0,2018		
Toplam	8	143,235			



Şekil 6. Karar değişkenlerinin servis ömrü üzerindeki ortalama etkileri (duyarlılıkları)

Figure 6. Average effects (sensitivity) of decision variables on the service life

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

- Mekanistik-ampirik üstyapı tasarım yöntemlerinde kullanılan bağımsız değişkenlerin (taban zemini-M_R, trafik yükü, kaplama kalınlığı gibi) tahmin edilen servis ömrü parametresi üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, esnek üstyapı tasarımında kritik olarak en fazla deforme olacak

olan katmanın ve deformasyon çeşidinin belirlenmesi önemli bir konu olarak incelenmeli ve dikkate alınmalıdır.

- KENPAVE yazılımı ile elde edilen hasar modeli sonuçları, asfalt kaplamadaki yorulmaya bağlı servis ömrünün, tekerlek izine bağlı servis ömrüne nazaran daha kritik olduğunu göstermektedir. Yola uygulanan yükler ve çevresel etmenler sonucunda asfaltta gerçekleşen yorulma çatlağı oluşumu gözlemlenmeseydi, tekerlek izine bağlı yol ömrünün çok daha uzun yıllar deformasyona uğramayacağı yorumu çıkarılabilmektedir. Bu nedenle, tekerlek izi deformasyonu baz alınarak tasarlanan bir yolun, ağır trafik yüklemesi gerçekleştiğinde yorulmaya bağlı olarak daha kısa sürede deforme olabileceği sonucu çıkmaktadır.

- AASHTO 93 yöntemi, üstyapı tasarımında mevcut servis kabiliyeti indeksi (PSI) kriterini kullanırken, mekanistik yöntemler yorulma, tekerlek izinde oturma, pürüzlülük gibi birden fazla tasarım kriterini dikkate alması sebebiyle daha ayrıntılı analizlerin yapılmasını mümkün kılmaktadır. Birtakım hasar modelleri kullanan KENPAVE sonuçları incelendiğinde, aynı trafik yüküne sahip kategorilerde, artan taban zemini-MR değerine bağlı olarak, alttemel kalınlığının giderek azalmasına rağmen, servis ömrü değerinin nispeten yükseldiği görülmektedir. Bu nedenle, taban zemini taşıma gücünün yol ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu sonucu çıkarılabilmektedir.

- Çekme gerilmelerinin artışına bağlı olarak, yol yıpranmakta ve bu nedenle en yüksek çekme şekil değiştirmesi olan Durum 6'da görüldüğü gibi en düşük servis ömrü seviyeleri ortaya çıkabilmektedir (Şekil 5). Genel olarak çekme gerilmelerinin azaltılmasını sağlamaya yönelik üretilebilecek çözümlerden bazıları, asfalt kaplama kalınlığını veya Esneklik Modülünü artırmak veya her ikisini birden yapmak şeklinde olabilir. Hasar modeli sonuçlarında kritik olan kalıcı deformasyon (tekerlek izi deformasyonu) olsaydı, taban zemini üzerindeki basınç gerilmesini azaltmanın etkili yollarından biri; granüler temel, alttemel kalınlığını veya bu katmanların esneklik modülünü arttırmak şeklinde olabilirdi.

- Durum 7 senaryosunda görüleceği gibi, %95 güvenilirlik düzeyi gibi yüksek bir seviye, düşük trafik yükü ve yüksek taban zemini-M_R değeri seçilmesine rağmen, servis ömrünün 15,8 yıl çıkmış olması, AASHTO 93 rehberinin servis ömrü beklentilerinin karşılanması açısından yeterli olmadığını göstermektedir.

- Ülkemizde, KGM tarafından en son 2008 yılında revizyonu yapılan esnek üstyapı tasarım rehberi, AASHTO 93 tasarım rehberini baz almaktadır. Bu bağlamda, rehberin mekanistik bir bakış açısıyla revize edilmesi bu çalışmanın yazarları tarafından önerilmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Bu çalışma, üçüncü yazarın danışmanlığı altında birinci yazarın lisans bitirme tezinden üretilmiştir. Ayrıca bu bildirili ile ilgili yazarlar arasında veya herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile mali çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alimohammadi, H., Zheng, J., Buss, A., Schaefer, V. R., Williams, C., & Zheng, G. (2020). Field and simulated rutting behavior of hot mix and warm mix asphalt overlays. *Construction and Building Materials*, 265, 120366.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO, Washington DC.
- Azizian, M., Tafreshi, S. M., & Darabi, N. J. (2020). Experimental evaluation of an expanded polystyrene (EPS) block-geogrid system to protect buried pipes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129, 105965.
- Asphalt Institute, 1982. *Research and Development of Asphalt Institute's Thickness Design Manual*, ninth ed. Asphalt Institute, Lexington.
- Bağdatlı, M. E. C., & Yıldırım, M. Ş. (2017). Karayolu üstyapılarındaki bozulmaların bakım maliyetlerine etkisi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 102-111. DOI: 10.17100/nevbiltek.304473

- Bressi, S., Primavera, M., & Santos, J. (2022). A comparative life cycle assessment study with uncertainty analysis of cement treated base (CTB) pavement layers containing recycled asphalt pavement (RAP) materials. *Resources, conservation and recycling*, 180, 106160.
- Burmister DM (1945). The General Theory of Stresses and Displacement in Layered Systems. *J. Appl. Phys.* 15: 89-94, 126-127, 296-302.
- Carvalho, R.L., 2006, Mechanistic-Empirical Design of Flexible Pavements: A Sensitivity Study, Yüksek lisans tezi, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, 166.
- Chan, K. M., & Wang, Y. (2020). Resilient pavement design with consideration of flooding effect caused by climate change. *Transportmetrica A: Transport Science*, 16(3), 1136-1155.
- Coree B., Ceylan H., Harrington D., 2005, Implementing the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide: Implementation Plan, IOWA State Üniversitesi, ABD.
- Ekwulo, E. O., & Eme, D. B. (2009). Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 3(12).
- Göktolga, D., 1998, Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 112.
- Hanlı, E., 2009, Esnek Yol Üst Yapısında Oluşan Bozulmalar ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 130.
- Huang, Y.H., 2004, Pavement Analysis and Design (2nd ed.) New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., ve Eren, K., 2001, Asfalt ve uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, İsfalt.
- Kaya, O., Comparative Design and Economic Analysis of Asphalt and Concrete Overlays for Airfield Pavements. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(5), 873-882. DOI: 10.35414/akufemubid.713979
- KGM, 2008, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.
- Kulkarni, S., & Ranadive, M. S. (2022). The parametric comparison of perpetual pavements with respect to Life-cycle cost and greenhouse gas emissions. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1147-1152.
- NCHRP, Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Project 1-37A, National Research Council, Washington, DC, 2004.
- Patel, A., Singh, V., & Shanker, R. (2022). FEM based parametric analysis for investigating wheel base characteristics and axle configurations on flexural stresses in rigid pavements. *Materials Today: Proceedings*.
- Singh, A. K., & Sahoo, J. P. (2021). Rutting prediction models for flexible pavement structures: A review of historical and recent developments. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 315-338.
- Westergaard HM (1926). Stresses in Concrete Pavement Computed by Theoretical Analysis. *Public Roads*, Vol, 7, No. 2, pp. 25-35.