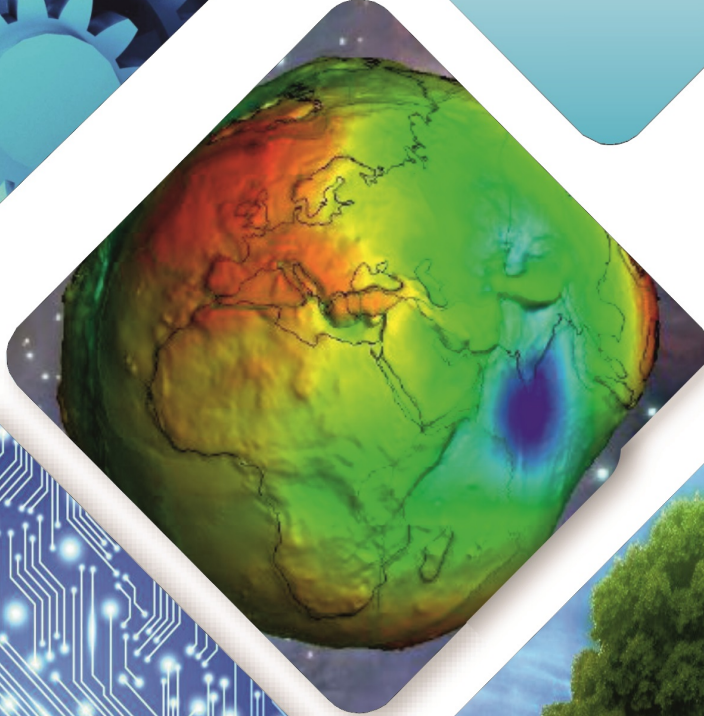


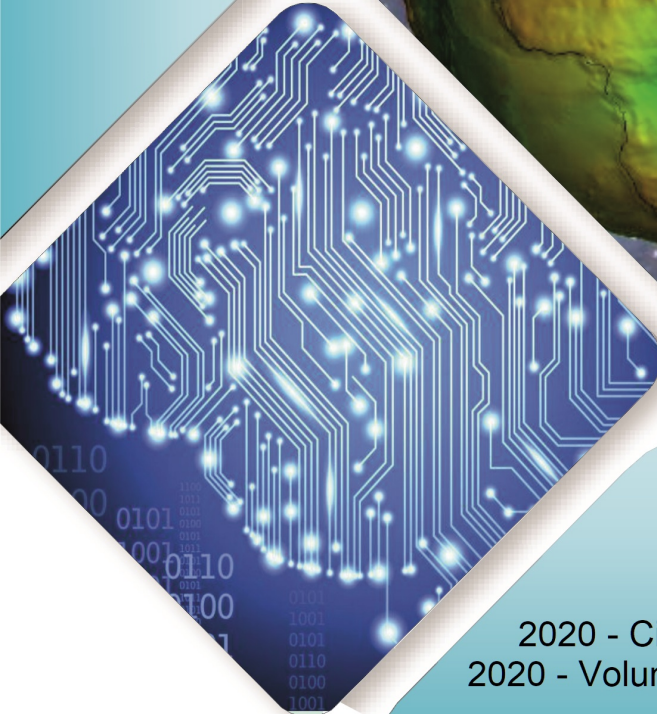


Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

Konya Journal of Engineering Sciences



(KONJES)
E-ISSN: 2667-8055



2020 - Cilt: 8 - Sayı:2
2020 - Volume:8 - 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. Ferruh YILDIZ**
Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ**

Chief Editor/Şef Editör

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

Editors/Editörler

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI
Assoc. Prof. Dr. Halife KODAZ
Assist. Prof. Dr. Omer Kaan BAYKAN

Section Editors/Alan Editörleri

Prof. Dr. Kürşad ERSOY
Prof. Dr. İhsan ÖZKAN
Prof. Dr. Mustafa TABAKCI
Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Assoc. Prof. Dr. Afşin KULAKSIZ
Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM
Assist. Prof. Dr. Alpaslan YARAR
Assist. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN
Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN

Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof.Dr. Ferruh Yıldız, Konya Technical University **Prof.Dr.-Ing. Rudolf Staiger, Bochum University of Applied Sciences**
Prof.Dr. Reşat Ulusay, Hacettepe University **Prof.Dr. Chryssy Potsiou, National Technical University of Athens**
Prof.Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University **Prof.Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University**
Prof.Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University **Prof.Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University**
Prof.Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University **Prof.Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University**
Prof.Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

Prof. Dr. Ali BERKTAY

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

Res. Assist. İsmail KOC
Res. Assist Emir Ali DİNSEL
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	8	Haziran	2020	Sayı	2
Volume	8	June	2020	Issue	2

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

HARİCİ UYGULANAN MANYETİK ALANIN MİLİMETRE DALGA/TERAHERTZ DEDEKTÖRÜ OLARAK KULLANILAN PARİLTİLİ DEŞARJ LAMBALARINDAKİ PLAZMA İŞİMA OPTİK SPEKTRUMUNA OLAN ETKİSİNİN DENEYSEL GÖSTERİMİ

Experimental Demonstration of the Effect of the Externally Applied Magnetic Field on the Plasma Optical Radiation Spectrum of the Glow Discharge Lamps which are used as milimeter wave/Terahertz detectors

.....Asaf Behzat ŞAHİN 192-199

HAVAALANI YER SEÇİMİNDE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) ve ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ (AHP) KULLANIMI

Use of Geographic Information Systems (GIS) and Analytical Hierarchy Process (AHP) in Airport Location Selection

.....Ela ERTUNÇ, Tayfun ÇAY 200-210

BETONARME KİRİŞLERİN ŞEKİL DEĞİŞTİRME ESASLI HASAR SINIRLARININ ARAŞTIRILMASI

Investigation of Deformation Based Damage Limits of Reinforced Concrete Beams

.....S. Bahadır YÜKSEL, Saeid FOROUGHİ, Rohullah JAMAL 211-222

SANDVIÇ KOMPOZİTLERDE ÇEKİRDEK KALINLIĞININ VE KARBON LİF YÖNLENMELERİNİN BASMA VE EĞİLME DAYANIMLARINA ETKİSİ

The Effect of Carbon Fibre Orientations and Core Thicknesses on Compression and Flexural Properties of Sandwich Composites

.....Serhat OSMANOĞLU, Erdem SELVER, Muharrem İMAL 223-236

THREE DEGREE OF FREEDOM LEG DESIGN FOR QUADRUPED ROBOTS AND FRACTIONAL ORDER PID (PIAD_μ) BASED CONTROL

Dört Ayaklı Robotlar için Üç Serbestlik Dereceli Bacak Tasarımı ve Kesir Dereceli PID (PIAD_μ) Tabanlı Kontrolü

.....Muhammed Arif ŞEN, Veli BAKIRCIOĞLU, Mete KALYONCU (English) 237-247

AISI 304 PASLANMAZ ÇELİK SACIN HİDROMEKANİK DERİN ÇEKİLMESİ

Hydromechanical Deep Drawing Of Aisi 304 Stainless Steel Blank

.....Mevlüt TÜRKÖZ 248-257

A MARKOV DECISION PROCESS APPROACH FOR MENTAL HEALTH

Zihinsel Sağlık için Markov Karar Süreci Yaklaşımı

.....Yasin GÖÇGÜN (English) 258-268

PROCESSING OF β -TYPE BIOMEDICAL Ti74Nb26 ALLOY BY COMBINATION OF HOT PRESSING AND HIGH TEMPERATURE SINTERING

Sıcak Presleme Ve Yüksek Sıcaklık Sinterleme Kombinasyonu İle B Tipi Biyomedikal Ti74Nb26 Alaşımının Üretimi

.Tarık AYDOĞMUŞ , Nuaman Jasim Filamarz Al-ZANGANA , Fevzi KELEN (English) 269-281

2007 VE 2018 TÜRK DEPREM YÖNETMELİKLERİNE GÖRE YEREL ZEMİN SINIFLARININ YAPILARDAKİ BURULMA DÜZENSİZLİĞİNE ETKİSİ

Effect of Local Site Classes on Torsional Irregularity in Structures According to Turkish Seismic Codes 2007 and 2018

.....Kabil ÇETİN, Ali DEMİR, Taha Yasin ALTIOK 282-290

EFFECTS OF IGNITION ADVANCE ON COMBUSTION, FUEL CONSUMPTION AND EMISSION AT 13B WANKEL ENGINE

13B Wankel Motorunda Ateşleme Avansının Yanma, Yakıt Tüketimi ve Emisyona Etkileri

Ömer CİHAN, Osman Akın KUTLAR, Abdurrahman DEMİRCİ, Hüseyin Emre DOĞAN (English) 291-299

GMAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ HARDOKS500 - ST52 NUMUNENİN ÇEKME DAYANIMI VE SERTLİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Investigation of Tensile Strength and Hardness Behaviour of Hardox500 – St52 Specimen Joined by GMAW Method

.....Şeyma KORKMAZ, M. Hüseyin ÇETİN, Muhammed ADAR, Abdulkadir ORAK 300-317

KALSİNASYONUN Mg-Fe HİDROTALSİT (FeHT) ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Investigation of the Effect of Calcination on Mg-Fe Hydrotalcite (FeHT)

.....Taha BOYRAZ, Tuğba TÜRK, İbrahim ALP 318-327

THE INFLUENCE OF PRESSURE STIFFNESS ON THE TORSIONAL BUCKLING OF LAMINATED COMPOSITE CYLINDERS UNDER EXTERNAL HYDROSTATIC PRESSURE

Basınç Rijitliğinin Hidrostatik Basınç Etkisi Altındaki Katmanlı Kompozit Silindirlerin

Burulmalı Burkulmalarına Etkisi

.....İzzet U. CAGDAS (English) 328-33

ZASEY'E DAYALI HARMONİKLI YÜK VE DENGESİZ BESLEME GERİLİMİ ALTINDA TRANSFORMATÖRÜN İNDİRGENMESİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Comparison of Derating in Transformer under Non-Linear Load and Imbalanced Supply Voltage Based on TSFM

.....Atabak NAJAFİ 336-353

DEVELOPMENT OF A WEBGIS BASED AIR QUALITY GEOPORTAL FOR MONITORING AND MANAGING AIR QUALITY IN ISTANBUL

İstanbul İlinde Hava Kalitesi İzleme ve Yönetimi için WebGIS Tabanlı Hava Kalite GeoPortali Tasarımı

.....Fatih SARI (English) 354-368

A DECISION-MAKING MODEL PROPOSAL (AAV) FOR SELECTION OF AMPHIBIOUS ATTACK VEHICLES FOR LANDING PLATFORM DOCK (LPD) BY INTEGRATED MCDM METHODS

Bütünleşik ÇKKV Metotları ile Çok Maksatlı Amfibi Hücum Gemisi için Zırhlı Amfibi Araçların (AAV) Seçimine İlişkin Bir Karar Verme Model Önerisi

.....Abdullah YILDIZBASI , Mustafa Burak ÖZDEMİ (English) 369-383

EXPERIMENTAL AND STATISTICAL INVESTIGATION OF DRILLING OF AISI 1040 STEEL AT DRY AND WET CONDITIONS

AISI 1040 Çeliğinin Kuru ve Islak Koşullarda Delinmesinin Deneysel ve İstatistiksel İncelenmesi

.....Murat OZSOY, Neslihan OZSOY (English) 384-391

TRAFİK KAYNAKLI ÇEVRESEL GÜRÜLTÜ KONTROLÜNDE ÇİMENTO BAĞLAYICILI DÜZ LEVHALARIN GÜRÜLTÜ BARIYER SİSTEMLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE SİMÜLATİF BİR ANALİZ

A Simulative Analysis on the Usability of Cement Bonded Flat Plates in Noise Barrier Systems in Environmental Noise Control with Traffic Source

.....Ebru KAYA, Lütfullah GÜNDÜZ 392-403

KARABÜK ÜNİVERSİTESİ KAMPÜS ATIKSULARININ "PHRAGMITES AUSTRALIS" VE "ALOE VERA" BITKİLERİ İLE YAPAY SULAK ALANLARDA ARITIMI

Treatment of Karabük University Campus Wastewater Using Constructed Wetland Planted with "Phragmites Australis" and "Aloevera"

.....Ertuğrul ESMERAY, Özlem ARMUTCU 404-417

HETEROJEN İŞGÜCÜNE SAHİP PARALEL MONTAJ HATLARI İÇİN MALİYET YÖNELİMLİ MATEMATİKSEL BİR MODEL VE SEZGİSEL BİR YAKLAŞIM

A Cost-Driven Mathematical Model and Heuristic Approach for Parallel Assembly Lines with Heterogeneous Workforce

.....Serhan KÖKHAN, Ömer Faruk BAYKOÇ, Selçuk Kürşat İŞLEYEN 418-431



HARİCİ UYGULANAN MANYETİK ALANIN MİLİMETRE DALGA/TERAHERTZ DEDEKTÖRÜ OLARAK KULLANILAN PARILTILI DEŞARJ LAMBALARINDAKİ PLAZMA IŞIMA OPTİK SPEKTRUMUNA OLAN ETKİSİNİN DENEYSEL GÖSTERİMİ

Asaf Behzat ŞAHİN

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE
absahin@ybu.edu.tr

(Geliş/Received: 31.05.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 20.08.2019)

ÖZ: Bu çalışmada, Parıltılı deşarj lambaları (GDD) içindeki plazma bölgesinde meydana gelen optik ışımada meydana gelen, milimetre dalga radyasyon ve harici elektromanyetik alana bağlı değişimler gözlemlenmiş ve ölçülmüştür. Milimetre dalganın (MD) tek başına uygulandığı zaman optik ışımada görülen etkinin göreceli olarak %3 civarı olduğu görülmektedir. Elektromanyetik alanın (EM) etkisi ile ışınımında %5'lik bir artış oluşmaktadır. 600 Gauss şiddetinde bir manyetik alanın uygulanması, plazma bölgesi optik ışımalarının milimetre dalga radyasyona karşı hassasiyetini 0.4 dB kadar arttırmıştır. Daha yüksek manyetik alan değerlerinin denenmesi planlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Terahertz, Plazma, Milimetre dalga, Manyetik alan

Experimental Demonstration of the Effect of the Externally Applied Magnetic Field on the Plasma Optical Radiation Spectrum of the Glow Discharge Lamps which are used as milimeter wave/Terahertz detectors

ABSTRACT: In this study, the optical emission from a Glow Discharge Device (GDD) lamp plasma that is affected by both magnetic and milimeter wave electric field is observed and recorded. Milimeter wave radiation has increased the optical emission by %3. Electromagnetic field has also increased the emission by %5. A magnetic field of 600 Gauss has increased the optical emission sensitivity to milimeter wave by 0.4 dB. In the future, higher magnetic field values will be studied.

Keywords: Terahertz, Plasma, Milimeter wave, Magnetic field

GİRİŞ (INTRODUCTION)

100 GHz - 10 THz arasındaki elektromanyetik frekans aralığına Terahertz Bandı denmektedir ve bu band uzay teknolojisi, ilaç sanayii, iletişim vb. uygulamalar için gittikçe önem kazanmaktadır. THz radyasyonunun plazmalar ile etkileşimi, THz radyasyonunun plazma ortamında iletimi, yansımaları ve absorpsiyonu şimdiye değin çeşitli çalışmalarda araştırılmıştır (Lewis, 2014; Hafez ve diğ., 2016). Terahertz dalga sensörleri, iletişim, malzemelerin tanımlanması, görüntüleme, kalite kontrol veya biyokimyasal gibi farklı uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde mikrodalga frekansı katıhal ve yarıiletken teknolojilerinin gelişmesi sonucu, milimetre ve milimetre altı dalga boyu sistemler giderek yaygınlaşmaktadır. (Tonouchi, 2007). Ek olarak, doğrudan ve heterodin çalışan diyot dedektörler, Foto iletken genişbantlı THz anten sensörleri, Termal sensörler, Schottky bariyer diyotları, alan etkili

transistör dedektörleri gibi değişik ölçüm teknikleri vardır. (Semerci T. ve diğ., 2016; Ilin K.S. ve diğ., 2000). Manyetik alanın plazmalar üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Plazma ortamı, nötr bir gaz üzerine, elektronları gaz atomundan koparmak için yeterli miktarda enerji (elektrik alan) uygulandığında ortaya çıkar. Plazma ortamları, plazma yoğunluğu, plazma frekansı, çarpışma frekansı ve plazma sıcaklığı gibi parametreler ile karakterize edilir (Bellan, 2008). Bu parametreler, plazma ortamından geçen elektromanyetik dalganın iletimini, yansımalarını ve soğurulmasını belirler. Bu nedenle, terahertz dalgası, belirgin bir soğurma etkisi ve yansıma olmadan, THz tekrarlanmasına yakın yüksek çarpışma frekansına sahip yoğun bir plazmayı geçebilir (Yuan C.-X. ve diğ., 2012). Ayrıca, Parıltı Deşarj Lambalar (Glow Discharge Device-GDD) Terahertz/milimetre dalga radyasyon sensörü olarak kullanılabilirler, böylece THz alıcı ve THz görüntüleme gibi uygulamalarda yer bulurlar (Sizov ve Rogalski, 2010; Sizov, 2010). Bu nedenle, neon gösterge lambaları veya GDD'ler THz sinyalleri için düşük maliyetli dedektör olarak önerilebilir (Haddad ve diğ., 2013; Çınar ve diğ., 2013; Abramovich ve diğ., 2009; Rozban D. ve diğ., 2008).

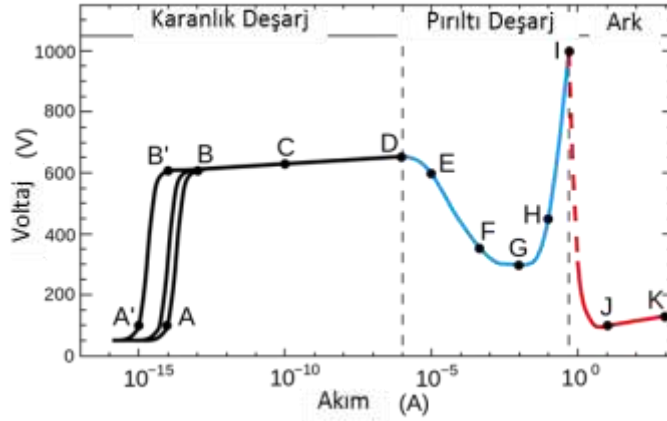
Terahertz teknolojisindeki gelişmeler sayesinde tıbbi tetkik, güvenlik taraması, askeri tanıma, radyo uzay bilimi, iklimsel incelemeler, yüksek hızlı veri iletişimi, kimyasal ve biyolojik tespit alanlarına yönelik uygulamalar ve çalışmalar ortaya çıkmıştır. THz dalgalarının plazma ortamında yayılma özellikleri ve plazma ile etkileşimi halen yeni uygulamalar bulunan ve her gün yeni yayın çıkan alanlardır.

THz spektrumunda son yıllarda yeni kaynakların geliştirilmesi yeni uygulamaların önün açmıştır. Terahertz kaynağı olarak çeşitli cihaz ve teknikler kullanılmaktadır; katı hal elektronik kaynakları, Kuantum Şelale Çukuru Lazerler, ElektroOptik Rektifikatörler, Fotoiletken yapılar, vb. Bu çalışmada katı hal elektronik kaynağı (Schottky Diyot) kullanılmıştır. Schottky diyotlarının doğrusal olmayan özelliği sayesinde ile mikrodalga frekansı sinyaller frekans çarpma katlama yöntemi ile milimetre dalga ve Terahertz frekanslarına çıkarılmaktadır..

Çalışmamızda, Milimetre Dalga/THz radyasyonunun GDD içindeki plazma alanının optik ışması ve akım değeri üzerindeki etkisini inceledik. Önceki çalışmalardan farklı olarak, plazma bölgesini kapsayan bir manyetik alan oluşturulmuştur. Manyetik akı şiddeti B , deneyimizdeki diğer bir etkidir. Manyetik alanı sabit bir mıknatıs veya elektromanyetik bir bobin ile elde etmek mümkündür. Fiziksel hareket olmadan, akım değerini değiştirerek manyetik akı şiddeti değerini ve manyetik alan yönünü değiştirmenin kolay olması sebebi ile elektromanyetik bir bobbin tercih edilmiştir.

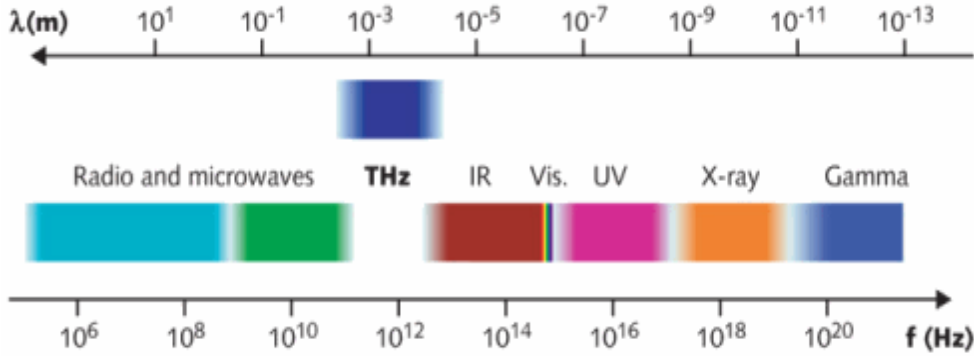
MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Terahertz tespit tekniklerinin geliştirilmesi ihtiyacını göz önüne alarak, terahertz radyasyon ve manyetik alanların soğuk plazma GDD'ler üzerindeki etkileri, plazma optik emisyon spektroskopisi tekniği kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır. Neon gösterge lambaları yani GDD'ler terahertz radyasyonu için ucuz dedektörler olarak kullanılabilirler. Plazma halini maddenin dördüncü hali olarak kabul edilmektedir ve genelde yüksek sıcaklık veya füzyon plazması ve düşük sıcaklık plazma olarak iki gruba ayrılır. GDD içinde oluşturulan plazma düşük sıcaklık plazma grubuna girmektedir. GDD içindeki parıldama veya pırıltı deşarjı, bir elektrik alanı etkisi ile düşük basınçlı gazda oluşan bir plazmadır. Gaz karışımı temel olarak Argon ve Neon gibi asal gazlardan oluşur ve basınç oranları tipik olarak 10^{-2} ila 10^{-5} atm arasındadır. Bu deşarj mekanizması, düşük basınçlı vakum altında elektrotlar üzerine bir DC voltaj uygulanarak başlatılır.



Şekil 1. Deşarj Plazmalarında Voltaj ve Akım arasındaki tipik ilişki
Figure 1. Voltage-Current Relationship in the discharge plasma

Plazma ortamında, 10^{-15} ve 10^{-6} Amper arası (A-D) akım artarken elektrik alan voltaj değeri eşik değerinden (B'-B) sonra yavaşça artar. 10^{-5} Amper değeri geçildikten sonra ışımali-parıltılı- uyarım deşarjı gerçekleşir. (D-G) aralığında akım ve gerilim ilişkisi negatiftir, bu negative ilişki sayesinde GDD'ler bir kapasitör ile osilatör olarak da kullanılabilirler. (G-I) aralığında akım 1 Amper değerlerine yaklaşır ve parıltılı ışımaya elektrik arkına dönüşür (Tonouchi, 2007). Deneylerde kullandığımız GDD lambalar 0.1 A üzeri akımlarda elektrodların yanması sebebi ile çalışmaz hale gelmektedirler. Elektromanyetik (EM) spektrumunda terahertz bölgesi (THz) (0.1 ila 10 THz), kızılötesi ve mikrodalga bant arasında bulunur, terahertz radyasyon, milimetre ve milimetre-altı dalgaları, T ışınları veya THz aralığı olarak adlandırılır.



Şekil 2. Elektromanyetik Spektrum
Figure 2. Electromagnetic Spectrum

Gazlarda plazma hali, nötr gaz atomlarından bir veya daha fazla elektronu koparacak şiddette elektrik alanı uygulandığında meydana gelir. Plazma ortamının parametreleri plazma yoğunluğu, plazma frekansı, plazma sıcaklığı ve çarpışma frekansıdır (Bellan, 2008). Bu parametreler, plazma içinden geçen elektromanyetik dalganın iletimini, yansımısını ve emilimini etkiler. Terahertz radyasyonu, belirgin bir emme gücü ve yansıma olmadan THz tekrarlanmasına yakın yüksek çarpışma frekansına sahip yoğun bir plazmayı geçebilir (Yuan ve diğ., 2012; Yuan ve diğ., 2010). Aynı şekilde, homojen olmayan çarpışma frekansı değerine sahip bir plazma ortamından terahertz radyasyonu kayıpsız geçebilir. DC akım ile oluşturulmuş Parıltılı Deşarj Plazma ortamında terahertz dalganın iletimi, plazmanın elektrik alanının yönü ve dalganın polarizasyonuna bağlıdır. Aynı zamanda, Parıltılı Deşarj Plazma içeren GDD komponentlerin THz dalga şiddetine orantılı olarak GDD üstünden akan akımda görülen değişimin hassasiyeti [mA/mW], GDD içindeki elektrik alanının THz dalganın polarizasyon yönü ile paralel olduğu

oranda artmaktadır. Plazma ortamındaki doğrusal olmayan ilişkilerden dolayı THz dalga polarizasyonunun plazma elektrik alan yönüne dikey olduğu durumda da az da olsa değişim hassasiyeti görülmektedir.

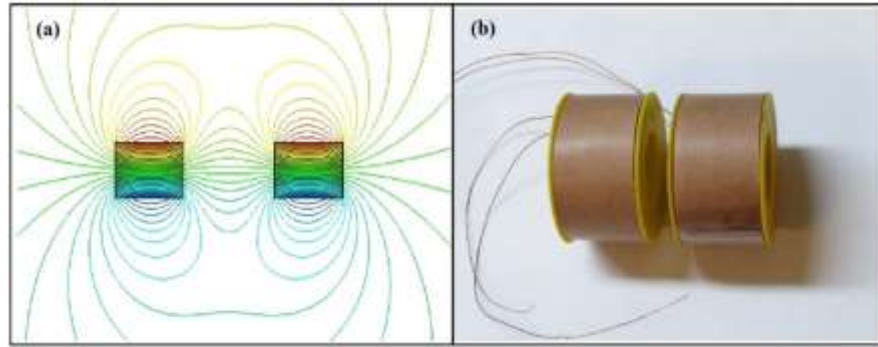
Manyetik alan kuvveti B , çalışmada test edilen ana etkidir. B Manyetik alanı tabii bir miktarda veya elektromanyetik bobin ile elde edilebilir. Deney düzenine göz önünde bulundurularak kullanım kolaylığı açısından elektromanyetik bobin tercih edilmiştir. Manyetik akı yoğunluğu olarak en az $B \approx 200,300$ Gauss hedeflenmiş olup, tel çapına göre ($\phi = 0.361$ mm) veya Amerikan standardı (AWG No: 27) kullanılmış, çerçeve boyutları ($d_{iç} = 28.0$ mm, $c = 12.0$ mm, $b = 27.0$ mm) olarak tasarlanmıştır. $d_{iç}$ iç çap, c bobinin yüksekliği, b bobinin genişliği ve N bobin sarım sayısı ($N = 2016$ n). Ölçülen direnç yaklaşık olarak $R = 44 \Omega$ olmuştur. Maksimum akım değeri (I), DC güç kaynağının maksimum değeri 30V bağlı olarak;

$$I_{30V} = (30 \text{ V}) / (44 \Omega) = 0.681 \text{ Amp} = 681.8 \text{ mA}$$

Solenoidin orta noktasında DC manyetik akı yoğunluğu B ;

$$B_{orta} = \mu_0 I * (N / L)$$

Böylece, 30 VDC güç kaynağı kullanarak solenoidin orta noktasında bir DC manyetik akı yoğunluğu tahmin edebilir. $N = 2016$ n, $L = b = 27$ mm, ve $I_{30V} = 0.6818$ Amp ise, maksimum B değeri= 639.72 Gauss çıkar.



Şekil 3. (a) İki solenoid bobin arasındaki manyetik akı dağılımı. (b) Deneyde kullanılan bobinler.

Figure 3. (a) Magnetic flux distribution between two solenoids (b) The solenoids used in the experiment

Tek bir solenoid bobini kullanıldığında, eksen merkezinden uzaklaştıkça manyetik alan yönlerindeki bozulma olacağından ve manyetik alan uygulayacağımız GDD lambasına aynı anda milimetre dalga/THz dalgası uygulanabilmesi için iki adet bobin kullanmayı tercih ettik (Şekil 3b). Zıt akımlı iki solenoid arasındaki mesafe az olduğunda, eksen manyetik alan yönü eksen (Şekil 3a) boyunca kalmaktadır. Birbirine bakan iki simetrik EM bobin arasındaki boşluğa eksen ile aynı yönde GDD lambasını yerleştirilmiştir.

Çalışmada kullanılan parıltılı deşarj dedektörleri, GDD, (Neon Gösterge Lambaları) içerisinde abnormal plazma bölgeleri oluşmaktadır (Şekil 4). GDD'ler, cam tüp içinde iki paralel tungsten elektrot içermektedir, 10^{-2} atmosferde Argon ve Neon gaz karışımı bulunan GDD iç yüzeyi, optik ışımaya rengini kırmızı-infrared den yeşile çevirmek için floresan fosfor kaplıdır. Ayrıca, GDD düşük maliyeti nedeniyle ucuz bir mikrodalga/milimetre dalga/THz sinyali dedektörü olarak kullanılmaktadır.

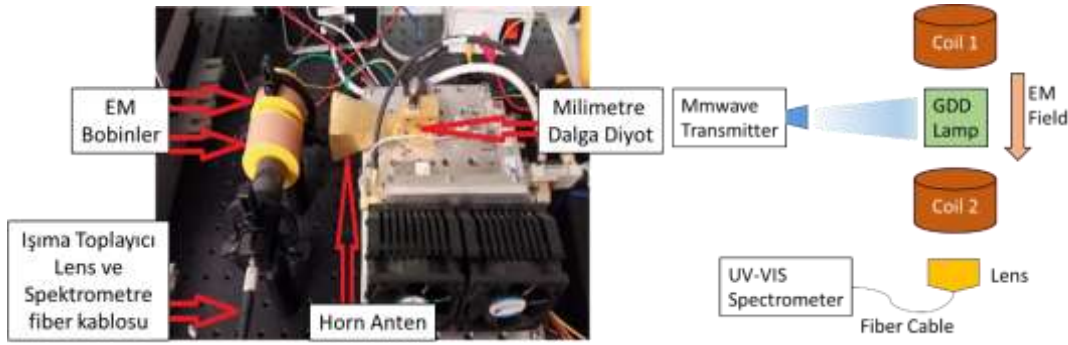


Şekil 4. GDD (Neon Gösterge) Lambası

Figure 4. GDD or Neon indicator lamps

GDD içindeki abnormal plazmadan yayılan optik ışımının spectrum değerlerini ölçmek ve kaydetmek için, geniş ölçüm aralıklı UV / VIS / NIR (Dalga boyu aralığı 200 - 1100 nm) AvaSpec ULS3648 StarLine Spektrometre kullanılmıştır. Spektrometre ışık şiddeti ölçümleri, bilinen kalibrasyon ışık kaynağına ($\mu\text{W} / \text{cm}^2$ cinsinden) göreceli olarak ışınım verilerine çevrilmiştir.

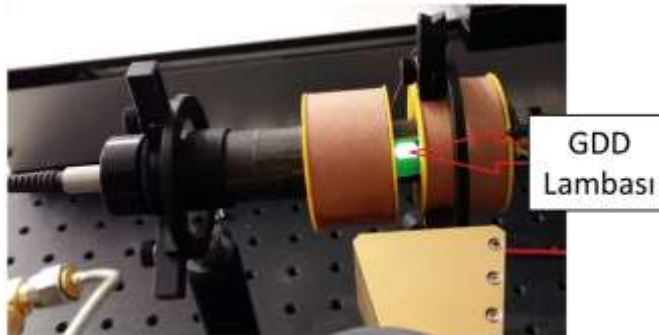
Abnormal plazma optik ışması üzerinde milimetre dalga/terahertz dalgası ve manyetik alanın bileşik etkisini incelemek için, şekilde gösterildiği gibi, iki elektromanyetik bobin, GDD lambası, milimetre kaynak sistemi ve spektrometre kullanılmıştır. Elektromanyetik akı kaynağı olan EM bobinler arasındaki 1 cm'lik aralığa, aynı eksen üzerinde olacak şekilde üzeri silindirik siyah kâğıt kaplı GDD lambası yerleştirilmiştir. Dış ortamdaki ışık değişimlerinin Spektrometre ölçümlerini etkilememesi için fiber optik kablo bağlantılı olan ışın toplayıcı lens bu şekilde izole edilmiştir ve sadece GDD üzerindeki optik ışımayı toplamıştır. GDD lambası, seri bağlantılı 5.6 kilo ohm'luk bir direnç ile 120VDC kaynağa bağlanmıştır. GDD lambası üzerindeki ortalama DC akım 10mA'dır.



Şekil 5. Deneysel Düzeneğin Fotoğrafı ve Şeması

Figure 5. Photograph and schematics for the experimental setup

GDD lambasına yan taraftan, horn anten aracılığı ile 300mW gücünde 60GHz milimetre dalga sinyali yönlendirilmiştir. 4 cm mesafede birim alan milimetre dalga şiddeti yaklaşık $210\text{mW}/\text{cm}^2$ veya $2.1\text{mW}/\text{mm}^2$ hesaplanmıştır. Bu yerleşimde EM manyetik alanı GDD elektrik alanına dik konumda, GDD elektrik alanı ve milimetre dalga polarizasyonu paraleldir. Siyah silindirik kâğıt boru ile GDD üzerindeki optik ışıma, ışın toplayıcı lens ve fiber optik kablo (UVIR)ile spektrometreye aktarılmaktadır. Spektrometre ölçümleri USB kablo ile bilgisayara kaydedilmiştir. Deney esnasında i) manyetik alan (EM) ve milimetre dalga (MD) uygulanmamış (baz), ii) manyetik alan uygulanmış ve milimetre dalga uygulanmamış, iii) manyetik alan uygulanmamış ve milimetre dalga uygulanmış, iv) manyetik alan ve milimetre dalga uygulanmış olarak GDD optik ışınım spektrum analizleri yapılmıştır. İndüktif ısınma nedeni ile GDD akım değeri 0.3 A değerine sınırlanmıştır, bu değer karşılığı olan toplam manyetik akı yoğunluğu yaklaşık 600 Gauss eder.



Şekil 6. GDD lambasının konumunun detayı

Figure 6. Detail of the GDD lamp position

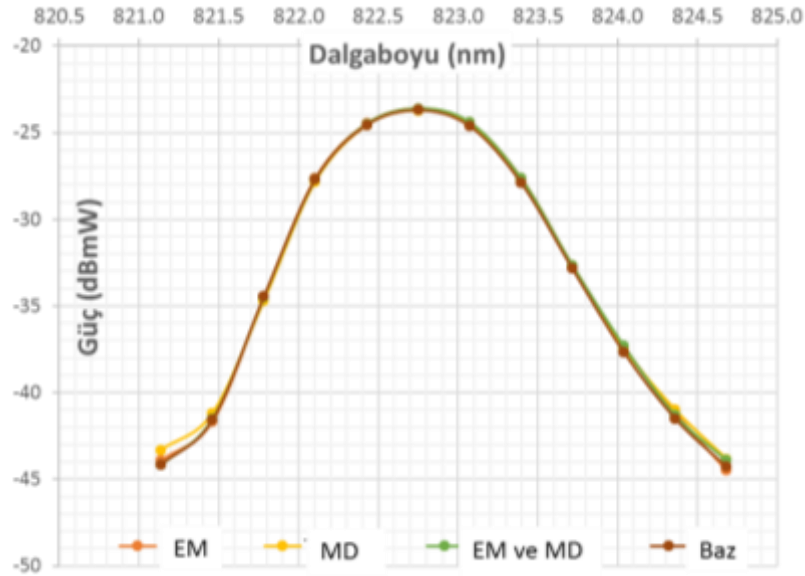
Spektrum ölçümlerinde Neon emisyon dalgaboyu olan kızılötesi 821.0 - 825.0 nm spektrumu üzerinde durulmuştur (Çizelge 1), bu dalgaboyu aralığı yüksek bir ışınım değerine sahiptir. Kalibreli kaynağa göre düzeltilmiş optik ışınım şiddet yoğunlukları dalgaboyuna (nm) ışık şiddeti (dBmW) cinsinden grafikler ile verilmiştir (Şekil 7).

Çizelge 1. Neon emisyon spektrumu (821.0 – 825.0 nm) (Bellan 2008).

Table 1. Neon Emission Spectrum

Ion	Dalga boyu (nm)	A_{ki} (s ⁻¹)	E_i (eV)	E_k (eV)	Lower Level Conf.	Upper Level Conf.	g^k
Ne II	821.3046		36.1788192	37.68800503	$2s^22p^4(^3P)4p$	$2s^22p^4(^3P)5s$	4
Ne II	821.45712		34.63187023	36.14077580	$2s^22p^4(^3P)3d$	$2s^22p^4(^3P)4p$	6
Ne VIII	821.7	2.32e+06	[140.76269]	[142.2711]	$1s^23p$	$1s^23d$	6
Ne IX	822.1	4.25e+05	1 071.8384	1 073.3461	$1s3p$	$1s3d$	5
Ne II	824.4328		36.1788192	37.68227852	$2s^22p^4(^3P)4p$	$2s^22p^4(^3P)5s$	2
Ne I	824.86823		18.63679141	20.13945716	$2s^22p^5(^2P^{\circ}_{3/2})3p$	$2s^22p^5(^2P^{\circ}_{1/2})3d$	3

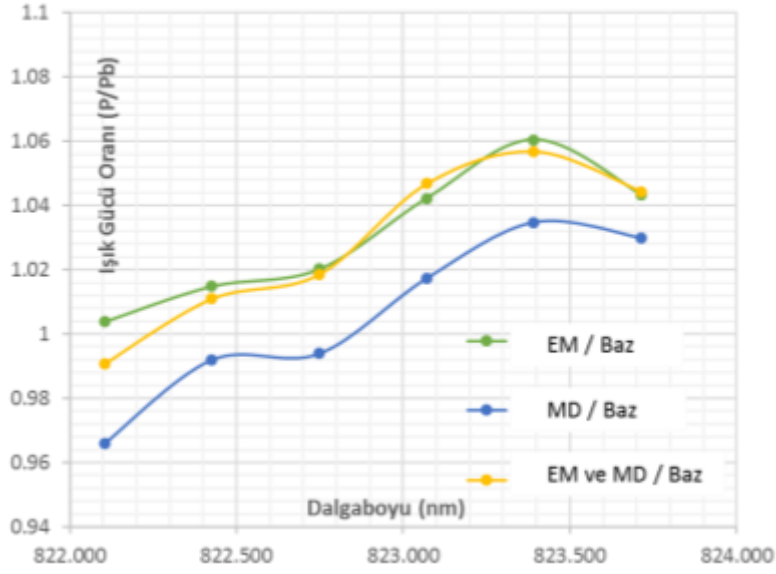
BULGULAR (RESULTS)



Şekil 7. Optik Işıma Spektrum Dağılımı

Figure 7. Optical Radiation Spectrum Distribution

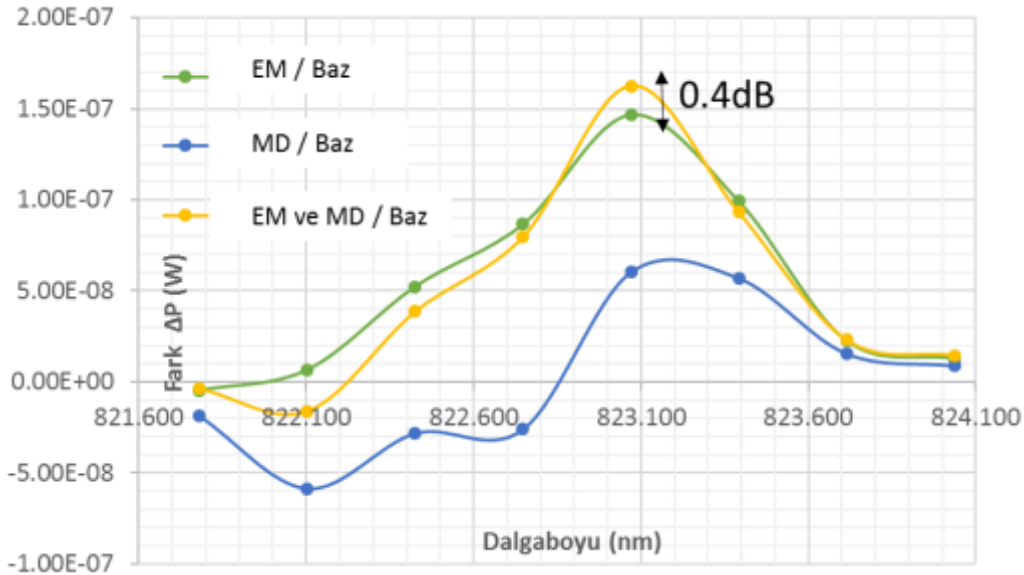
Baz Spektrumuna göre diğer spektrum ölçümlerinin oransal ve logaritmik fark grafikleri elde edilmiştir. Sonuçlar, şekil 8.'de ve 9. da verilmiştir. Şekillerde EM, sadece elektromanyetik alanın uygulandığı, MD, sadece milimetre dalga'nın uygulandığı, EM ve MD hem manyetik alanın hem milimetre dalga'nın uygulandığı durumdur.



Şekil 8. Spektrum değerlerinin Baz spektrum değerine doğrusal oranı

Figure 8. Linear ratios of the spectra with respect to the base spectrum

Milimetre dalganın (MD) tek başına uygulandığı zaman spektrumda görülen etkinin göreceli olarak %3 civarı olduğu görülmektedir. Buna karşın, elektromanyetik alanın (EM) etkisi ile ışınmada %5'lik bir artış oluşmaktadır. Elektromanyetik alan uygulanmakta iken, milimetre dalganın uygulanmasının pozitif bir etki yaptığı ve ışımda ek bir artış olduğu görülmüştür. GDD plazma yoğunluğu, hem manyetik alan hem de milimetre dalganın etkisi ile artmış ve bu ışımda pozitif bir etki yapmıştır. Bu fark yaklaşık 0.4dB bir kazanca karşılık gelmektedir.



Şekil 9. Watt cinsinden EM, MD, EM ve MD Spektrum-Baz Spektrum Farkları

Figure 9. EM, MD, EM and MD spectra – base spectrum difference in W

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

GDD lambaların milimetre dalga/THz dedektörü olarak kullanımında artık GDD plazma optik ışımada milimetre dalga sinyale bağlı olarak görülen değişim üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu çalışma ile harici bir manyetik alan uygulanmasının GDD plazma optik ışması üzerinde pozitif bir etki olabileceği gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda manyetik ve milimetre dalga çok yüksek frekans harici elektrik alanın, GDD plazma elektrik alanında olan etkisinin teorik olarak incelenmesi, daha yüksek elektromanyetik akı yoğunluklarının uygulanması ve farklı frekans milimetre dalga/THz kaynakların denenmesi üzerinde durulacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abramovich A., Kopeika N. S., Rozban D., 2009, "THz polarization effects on detection responsivity of glow discharge detectors (GDDs)," *IEEE Sensors Journal*, Cilt 9, ss. 1181-1184.
- Bellan P. M., 2008, *Fundamentals of plasma physics*: Cambridge University Press.
- Çınar K., Altan H., Şahin A. B., 2013, "THz transmission and detection through glow discharge detectors," in *SPIE Defense, Security, and Sensing*, ss. 87160J-87160J-9.
- Haddad J., Bousquet B., Canioni L., Mounaix P., 2013, "Review in terahertz spectral analysis," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Cilt 44, ss. 98-105.
- Hafez H., Chai X., Ibrahim A., Mondal S., Férachou D., Ropagnol X., Ozaki T., 2016, "Intense terahertz radiation and their applications," *Journal of Optics*, Cilt 18, p. 093004.
- Ilin K.S, Lindgren M., Currie M., Semenov A. D., Goltsman G. N., Sobolewski R., 2000, "Picosecond hot-electron energy relaxation in NbN superconducting photodetectors," *Appl. Phys. Lett.* 76, p. 2752-2754.
- Lewis R. A., 2014, "A review of terahertz sources," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Cilt. 47, p. 374001.
- Rozban D., Kopeika N. S., Abramovich A., Farber E., 2008, "Terahertz detection mechanism of inexpensive sensitive glow discharge detectors," *Journal of Applied Physics*, Cilt 103, p. 093306.
- Semerci T., Demirhan Y., Miyakawa N., Wang H. B., Ozyuzer L., 2016, "Thin film like terahertz bolometric detector on Bi2212 single crystal," *Opt. Quantum. Electron.* 48, p. 3401-3411.
- Sizov F., 2010, "THz radiation sensors," *Opto-electronics review*, Cilt 18, pp. 10-36.
- Sizov F., Rogalski A., 2010, "THz detectors," *Progress in Quantum Electronics*, Cilt 34, ss. 278-347.
- Tonouchi M., 2007, "Cutting-edge terahertz technology," *Nat. Photonics* 1, p. 97-105.
- Yuan C.-X., Zhou Z., Yue F., 2012, "Terahertz waves propagation in a bounded plasma slab with high plasma density and high collision frequency," in *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, 2012 Fifth International Conference on, pp. 608-613.

HAVAALANI YER SEÇİMİNDE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) ve ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ (AHP) KULLANIMI

¹Ela ERTUNÇ , ²Tayfun ÇAY 

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

¹eertunc@ktun.edu.tr, ²tcay@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 11.07.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.08.2019)

ÖZ: Günümüzde hızla artan nüfusun hızlı, ekonomik, güvenilir ulaşım taleplerini karşılamak gün geçtikçe güç hale gelmiştir. Karayolu ulaşımına ek olarak, demir yolu ve havayolu ulaşımı da bu talebi karşılamak için gelişme göstermiştir. Gün geçtikçe yaygınlaşmakta olan havayolu ulaşımı; insanların daha hızlı, ekonomik, güvenilir şekilde seyahat edebilmelerini sağlamaktadır.

Havalimanı yapılmak istenen yerin belirlenmesi aşaması oldukça karmaşık bir problemdir. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) bu problemlerin çözümünde kullanılan bir karar verme yöntemidir. Bu çalışmanın amacı, Bayburt ve Gümüşhane illerinde havalimanı yapılabilecek en uygun alanların Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden en çok kullanılan 'Analitik Hiyerarşi Prosesi' kullanılarak belirlenmesidir.

Anahtar Kelimeler: Çok ölçütlü karar verme, Analitik hiyerarşik proses (AHP), Havaalanı yer seçimi, Coğrafi bilgi sistemi (CBS)

Use of Geographic Information Systems (GIS) and Analytical Hierarchy Process (AHP) in Airport Location Selection

ABSTRACT: Today, it has become increasingly difficult to meet the rapid, economic, reliable transportation demands of the rapidly growing population. In addition to road transport, rail and airline transport have also shown improvement to meet this demand. Airline transportation, which is becoming more and more widespread day by day; It enables people to travel faster, economically and reliably.

The determination of the location of the airport is a very complex problem. Analytical Hierarchy Process (AHP) is a decision making method used to solve these problems. The aim of this study is to determine the most suitable areas of airport in Bayburt and Gümüşhane provinces by using Geographical Information System (GIS) and Analytical Hierarchy Process which is the most widely used of Multi-Criteria Decision Making methods.

Key Words: Multiple criteria decision making, Analytical Hierarchical Process (AHP), Airport location selection, Geographical information systems (GIS)

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ulaşım, geçmişten beri insanlık için ekonomik ve kültürel açıdan önem taşımaktadır. Dünyada en hızlı gelişim gösteren bölgeler yeterince ulaşım ağına sahip bölgeler olmuştur. Günümüzde uçak mühendisliği alanındaki teknolojik gelişim, daha büyük, daha hızlı ve daha güvenli uçakların tasarımıyla birlikte hava taşımacılığı ücretlerinde önemli bir düşüş ve modern toplumun zamana daha fazla değer vermesiyle sonuçlanmış, bu da son yıllarda hava taşımacılığı sektörünün katlanarak gelişmesine yol açmıştır.



Üretilen bu önemli yolcu taşıma talebi dünyadaki havaalanı altyapısının iyileştirilmesi için gereksinimlere dönüşmüştür. Gelişmekte olan ülkeler için, hava taşımacılığı gelişimi hayati öneme sahiptir, çünkü izolasyonun kaldırılmasının yanı sıra ülkenin ekonomik kalkınmasına da önemli katkı sağlar. Bu durum, tur operatörlerinin tercihen doğrudan uçuşlar kullanarak yurtdışındaki turistlerin yoğunluğunu hava yoluyla taşıma eğilimi nedeniyle, mevcut havalimanlarının sayısının yükseltilmesi için sürekli bir talebe yol açmıştır. Bu nedenle son yıllarda Türkiye’de de havalimanı sayısı artırılmaya başlanmıştır.

Havaalanları, çoğu zaman çevre üzerinde önemli etkileri olan önemli ulaştırma projeleri olarak kabul edilmektedir. Belirli bir bölgedeki aday havaalanı sahalarının araştırılması sırasında, bir dizi çevresel, operasyonel kriterler, arazi kullanım planlaması ve kültürel kriterler göz önünde bulundurulur. Bir havaalanı yeri seçiminde; rüzgâr özellikleri, mevcut karayolu ağı ile olan etkileşim, havalimanının çevresindeki topografyadan kaynaklanan engeller önemli kriterler olarak sıralanabilir. Bu nedenle, bu kriterler göz önünde bulundurularak inşasına başlanacak havaalanı için uygun yerin seçilmesi önemli bir karar verme aşamasıdır.

Yer seçiminde yaygın olarak kullanılan en temel yöntemlerin başında çok ölçütlü nicel karar verme yöntemleri gelmektedir. Çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yöntemleri ile birden fazla amacın en iyisinin bulunması hedeflenmektedir. Bilimsel çalışmalarda en sık kullanılan ÇÖKV yöntemlerinden biri de 1970’lerde Prof. Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)’dir (Lobo ve diğ., 2016). Aydın ve diğ. (2009), Ankara’da kurulması hedeflenen yeni bir hastane için yer seçimini, bu konudaki uzman görüşlerinin yardımıyla belirlenen kriterlere göre, AHP ile modellemiş ve bu konuda önerilerde bulunmuşlardır. Mohajeri ve Amin (2010), AHP ve veri zarflama analizi (DEA) yöntemlerini kullanarak, kuzeydoğu İran’daki Mashhad şehrinde yapılacak bir tren istasyonu için en uygun yeri bulmaya çalışmışlardır. Bu amaçla, 26 kriter ve beş (potansiyel) yer adayını kullanmış ve AHP uygulaması gerçekleştirerek tren istasyonu için yer önerisinde bulunmuşlardır. Erbiyık ve diğ. (2012), Türkiye’de bir perakende mağaza yeri seçimi için kriterler tanımlamışlar ve kriter seçim modelini AHP yöntemi ile kurmuşlardır. AHP yöntemi ile gerçek iş hayatında süt ürünlerine ait perakende mağazalarının en uygun yerini seçmeye çalışmışlardır.

Vahidi ve diğ. (2014), çalışmalarında Bulanık Analitik Hiyerarşi Sürecini (FAHP), Charmshahr adlı bir sanayi bölgesi için en iyi atık bertaraf yönteminin seçilmesinde kullanmışlardır. Bu bölge, çoğu deri ve tabakhane endüstrisi olan 200’den fazla fabrika içermektedir. Çöp toplama, geri dönüşüm, Atık Kaynaklı Yakıt yakma ve geleneksel yakma olmak üzere dört alternatifi, bertaraf yöntemleri olarak kabul etmişlerdir. İkili karşılaştırmaları, bireysel uzmanların maliyet, teknik güvenilirlik, fizibilite, atık tutarlılığı, çevresel etkiler, sosyal bakış açıları, mevcut bilgi ve bakım gibi sekiz kritere ilişkin kararlarına dayanarak yapmışlardır. Çevresel etkilerin ağırlığını en fazla, sosyal konuların ağırlığını ise en az seçmişlerdir. Sonuçlar olarak, özellikle ekonomik sorunlar, fizibilite ile su ve toprak kirlilikleri bakımından, toprağı doldurmayı, Charmshahr sanayi bölgesi için en uygun bertaraf yöntemi olarak seçmişlerdir.

İnce ve diğ. (2016), yeni bir özel sağlık kuruluşuna ihtiyacı olduğu düşüncesiyle Tuzla ilçesinde kurulması planlanan sağlık kuruluşu için en iyi yer seçimini gerçekleştirmek amacıyla AHP yöntemini kullanmışlardır. Lobo ve diğ. (2016), faaliyetlerini genişletmek için üç konumdan oluşan bir tesis kurmak için en iyi yeri seçmek isteyen bir şirkete yardımcı olmak amacıyla, AHP’yi mülk fiyatı, tedarikçilerden uzaklık, iş havuzunun kalitesi ve işçilik maliyeti gibi dört kriter göz önüne alarak kullanmışlar ve en uygun yer önerisinde bulunmuşlardır. Al-shabeeb (2016), kuraklığın etkisinde olan Ürdün Azraq havzasında olası su toplama alanlarını belirlemek için AHP yöntemini Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile bütünleşmiş bir şekilde uygulamış ve su toplama için uygun alanların gösterildiği bir sonuç haritası üretmiştir. Ding ve diğ. (2017), kentlerde kullanılan Talep Duyarlı Geçiş (DRT) rotalarını optimize etmek için AHP temelli çok amaçlı optimizasyon önermişlerdir. Optimizasyonun hedefi, hem transit ağlarının kapsama oranını hem de transit geçiş katılım oranını aynı anda en üst düzeye çıkarmak olarak belirlenmiş ve sonuçlar önerilen çoklu hedefli optimizasyon modelinin, kentsel geçiş sistemlerinin katkı oranını ve hizmet seviyesini iyileştirmedeki ümit verici performansla sahip olduğunu göstermiştir. Atthirawong ve MacCharty (2017), AHP kullanarak bir uluslararası saha seçimini değerlendirmek için yapılandırılmış bir

model önermişlerdir. AHP tabanlı modelin iki şirket ile kullanılabilirlik değerlendirmesini ele almışlar ve modelin etkinliğini, Tayland'da yabancı bir katılımcıya sahip bir şirket kullanarak göstermişlerdir. Jalilzadehazhari ve diğ. (2017), kapalı mekânlardaki pencere panjurlarının seçiminde AHP'yi, görsel, termal, enerji ve yaşam döngüsü maliyeti arasındaki değişime dayanarak seçmek için kullanmışlar ve AHP'nin bu tür problemleri yönetebilme kabiliyetini ortaya koymuşlardır.

Obeidat ve diğ. (2017) çalışmalarında, AHP kullanarak müşterilerin Ürdün'de satın almak için uygun bir daire seçmelerine yardımcı olmaktadır. Çalışma verileri Ürdün'e ait olsa da dünya çapındaki insanlar bu çalışmanın sonuçlarından faydalanabilecek niteliktedir. İki yönlü bir metodoloji kullanılmıştır. İlk olarak, Ürdün'deki emlak sektöründeki beş yatırımcıdan, müşterilerin daire satın alırken göz önünde bulundurdıkları özellikler hakkında geri bildirimler alınmıştır. İkinci olarak, birkaç müşteriye, Ürdün emlak piyasasında bulunan 10 farklı daire alternatifinin önceliklerini elde etmek için 305 katılımcıdan toplanan ikili bir karşılaştırma anketi kullanılarak hayal ettikleri daire tercihleri sorulmuştur. AHP tekniği, müşterilerin en iyi satın alma kararına ulaşmalarına yardımcı olmak için toplanan verileri analiz etmek için kullanılmıştır.

Harwati ve Utami (2018), yeni bir pazarlama mağazasının yerini seçmek için mekâna uzaklık, rakiple rekabet seviyesi, potansiyel müşteri sayısı ve kira maliyeti gibi dört önemli ölçütü kullanmışlardır. AHP yöntemi ile optimum yeri belirlemek için nicel veriler kullanmışlar ve üç alternatif yer arasında en uygun konumu seçmişlerdir.

Sennaroğlu ve Çelebi (2018) çalışmalarında, askeri bir havaalanı için çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanarak bir yer seçimi problemini çözmüşlerdir. Çalışmada, aday yerler arasındaki en iyi yeri tespit etmek amacıyla dokuz ana kriter ve otuz üç alt kriter, sadece iklim, coğrafya, altyapı, güvenlik ve ulaşım gibi askeri bir havaalanının gereklilikleri değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal etkiler de dikkate alınarak belirlenmiştir. Ölçüt ağırlıkları AHP kullanılarak belirlenmiş ve dört alternatif içerisinde uygun olanı seçilmiştir.

Bu çalışmada da, havaalanı yeri için sunulan alternatiflerden uygun olanını seçmek amacıyla CBS ile bütünlük bir AHP yöntemi kullanılmıştır. Bunun için Havaalanı planlamasında "T.C. Ulaştırma Bakanlığının Havaalanlarının Planlama ve Tasarım Teknik Esasları ve Sivil Havacılık Teşkilatı - Havaalanı Planlama Kılavuzu" incelenerek yer seçiminde kullanılması gereken en temel kriterler belirlenmiştir. Altı adet kriter için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuş, kriterlerin ağırlık matrisleri hesaplanmış ve alternatiflerden uygun olan önerilmiş ve uygun alanların gösterildiği bir sonuç haritası üretilmiştir.

MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Çalışma, Gümüşhane ve Bayburt illerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu illerde gerçekleştirilmesinin nedeni, bu illerde çalışma başladığında gerçek bir havaalanı inşasına başlanmış olmasıdır. Nitekim çalışma sonucu da inşasına başlanılan yerin uygunluğunu doğrulamaktadır. Çalışmada kullanılan materyaller: Gümüşhane ve Bayburt illeri için nüfus yoğunluk bilgileri, meteorolojik veriler (sıcaklık, yağış), yükseklik, eğim bilgileri ve kara ulaşımına ve il merkezlerine erişim bilgileridir.

Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytical Hierarchy Process)

AHP, karar vericinin mevcut tüm alternatifleri, bunlara ait tüm kriterlere göre değerlendirerek, göreceli kriterlerin önem durumlarına ikili karşılaştırmalar yapması esasına göre çalışmaktadır. AHP'nin hiyerarşik yapısına göre, karar vericinin hedefi en üst seviyededir. Hiyerarşik yapıda alt seviyelere doğru inildikçe kriterler ve bu kriterlere ait alt-kriterler bulunmaktadır. Hiyerarşi seviyesi düştükçe alt kriterlere ulaşmakta ve bu kriterlerin ayrıntılarına inilmekte, başka bir deyişle belirginleşmektedir.

AHP uygulamasında öncelikle kriterlerin ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmalıdır. İkili karşılaştırma matrisi, AHP'nin asıl verilerini oluşturmaktadır. Matris, bütün alternatiflerin, tüm alt-kriterler altında mukayese edilmesine dayanmaktadır. Her bir seviyedeki kriterler, bir sonraki üst seviye kriterine göre önemi bakımından ikili bir şekilde karşılaştırılır. Hiyerarşinin tepesinden aşağıya doğru

işlem devam ederken, belirli bir seviyedeki ikili karşılaştırmalar aşağıdaki gibi çoklu kare matrislere ($K = [K_{ij}]_{n \times n}$) indirgenebilir:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}$$

Karşıt özelliklere sahip matris $R = \begin{bmatrix} 1 \\ K_{ij} \end{bmatrix}_{n \times n}$ aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ 1 & 1 & 1 \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ 1 & 1 & 1 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}$$

HP'de, Saaty (1980) 'de önerildiği gibi, öznel ikili karşılaştırmalar yapmak için önem derecesine göre 1'den 9'a kadar numaralandırılmış bir ölçek kullanılır (Tablo 1). İlk olarak, tüm ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. Sonra, Saaty'nin özvektör prosedürü temelinde ağırlık vektörü $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]$ hesaplanır. Ağırlıkların hesaplanması iki adımda gerçekleştirilir: (1) normalize edilmiş ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur ve (2) ağırlıklandırılmış matris oluşturulur. Tablo 1'de oransal önem ölçeği, ikili karşılaştırma için Saaty tarafından geliştirilen 1-9 ölçeğine göre tanımlanmıştır.

Çizelge 1. 9 puanlık görelî önem ölçeği ve açıklamaları (Saaty, 1980)

Table 1. 9-point relative significance scale and explanations

Önem Ölçeği	Tanım	Açıklama
1	Eşit derecede önemli	İki seçenek eşit derecede öneme sahiptir.
3	Orta derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı biraz üstün kılmaktadır.
5	Kuvvetli derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı oldukça üstün kılmaktadır.
7	Çok kuvvetli derecede önemli	Bir kriter diğerine göre üstün sayılmıştır.
9	Kesin önemli	Bir kriterin diğerinden üstün olduğunu gösteren kanıt çok büyük güvenilirliğe sahiptir.
2,4,6,8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere iki ardışık yargı arasındaki değerlerdir.
Yukarıdaki sıfır olmayan sayıların karşılıkları	Ters karşılaştırma için karşılıklar	

Oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi $K = [K_{ij}]_{n \times n}$ normalize edilmiş bir ikili karşılaştırma matrisi elde etmek için matris içindeki her bir elemanın sütun toplamına bölüdüğü (1) eşitliği kullanılarak normalize edilir (Chen, 2006; Bunruamkaew, 2012).

$$N_{ij} = \frac{K_{ij}}{\sum_{i=1}^n K_{ij}} \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bütün j değerleri için de (1) eşitliği uygulanır.

Ağırlıklar, matrisin normalize edilmiş sütunları toplamının ağırlıklandırılmış matrisi elde etmek için kullanılan kriter sayısına (n) bölüdüğü (2) eşitliği kullanılarak hesaplanır (Bunruamkaew 2012).

$$W_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^n N_{ij}}{n} \begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{12} \\ W_{13} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Bütün i değerleri için de (2) eşitliği uygulanır.

Tutarlılık vektörünü elde etmek için, ikili karşılaştırma matrisi ağırlık vektörü ile çarpılır; yani,

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{12} \\ W_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{12} \\ K_{13} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ardından, ağırlıklı toplam vektörü kriter ağırlığına bölünerek elde edilir;

$$\begin{aligned} K_{v_{11}} &= \frac{1}{w_{11}} [K_{11}W_{11} + K_{12}W_{21} + K_{13}W_{31}] \\ K_{v_{21}} &= \frac{1}{w_{21}} [K_{21}W_{11} + K_{22}W_{21} + K_{23}W_{31}] \\ K_{v_{31}} &= \frac{1}{w_{31}} [K_{31}W_{11} + K_{32}W_{21} + K_{33}W_{31}] \end{aligned} \quad (4)$$

Ağırlık vektörü W ile ikili karşılaştırma matrisi K arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır (Chen, 2006);

$$K_W = \lambda_{max} W$$

Karşılaştırma matrisinin maksimum öz değeri olan λ_{max} değeri (Mikhailov ve Tsvetinov 2004) AHP'de önemli bir doğrulama parametresidir. Hesaplanan vektörün tutarlılık oranını (CR) hesaplayarak bilgileri yansıtmak için referans indeksi olarak kullanılmaktadır (Chen 2006). λ , (6) eşitliği kullanılarak formüle edilen tutarlılık vektörünün değerinin ortalaması alınarak elde edilmektedir (Bunruamkaew 2012).

$$\lambda = \sum_{i=1}^n K_{v_{ij}} \quad (5)$$

CR'yi hesaplamak için, n'inci dereceden her bir matris için tutarlılık indeksi (CI), eşitlik (7) ile elde edilebilir (Chen, 2006).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (6)$$

Sonra CR, CI ve RI'nın birbirine oranı olarak eşitlik (7) ile verilebilir;

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

Burada RI, rastgele oluşturulmuş bir ikili karşılaştırma matrisinden elde edilen rastgele tutarlılık indeksidir. Tablo 2, 1'den 15'e kadar olan matrisler için RI değerlerini göstermektedir (Saaty, 1980). Herhangi bir seviyedeki herhangi bir daha yüksek değer ($RI > 0.01$), karar vericilerin kararlarını yeniden incelemeye gerek duyduğunu belirtir (Bunruamkaew, 2012), bu durumda Analitik Hiyerarşi Sürecinin 3. adımından başlayarak gözden geçirilmesi ve revize edilmesi gerekmektedir (Şekil 1) (Chen, 2006).

Çizelge 2. N=1-15 için rastgelelik index değerleri (Saaty, 1980)

Table 2. Randomness index values for N=1-15

Random Index (RI)															
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.58

Bir karar verme probleminde yer alan tüm kriterlerin ikili karşılaştırmalarının toplam ölçütünü oluşturmak için, bireysel değerlendirmelerin (8) eşitliği kullanılarak ortalaması alınmaktadır.

$$k_{ij}^{hp} = \sqrt[q]{\prod_{q=1}^q k_{ij}^q} \quad (8)$$

Burada k_{ij}^q , bir q ($q = 1, 2, 3, \dots, Q$), kriterinin K matrisinin bir elemanı, ve k_{ij}^{hp} tüm k_{ij}^q kriterlerinin aritmetik ortalamasıdır. Grup CR eşitlik (6) ve (7)'e göre hesaplanmaktadır (Saaty 1980; Chen, 2006; Akalın ve diğ., 2013).

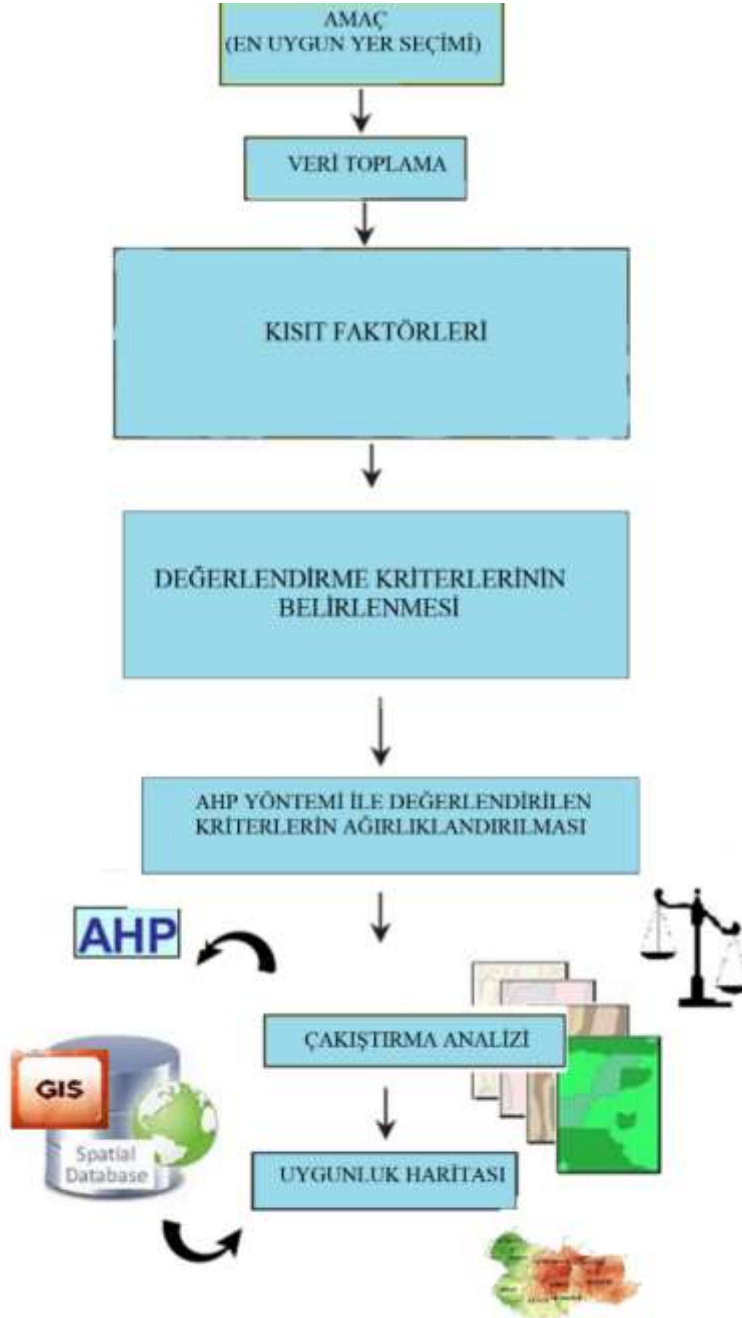
BULGULAR (RESULTS)

AHP yöntemine göre yer seçiminin yapılabilmesi için önce kriterler belirlendi ve hiyerarşik düzen oluşturuldu. Daha sonra kriterler arasında ikili karşılaştırmalar yapıldı. Elde edilen ikili karşılaştırma matrislerinden normalizasyon matrisleri oluşturuldu. Normalizasyon matrislerinden de öncelik vektörleri hesaplandı. İkili karşılaştırmaların, kendi içerisindeki tutarlılığını kontrol etmek içinde tutarlılık testleri yapıldı. Tutarlılık oranı, karar vericilerin ikili karşılaştırmalar sonucunda elde ettikleri kararların güvenilirliğini sorgulamak için hesaplanmaktadır. Bu oranın değeri 0,1 veya daha küçük bir değer olması durumunda, çift yönlü karşılaştırmalar kabul edilebilir bir tutarlılığa sahip olarak varsayılır. Değer 0,1'in üzerinde çıkması sonucun güvenilir olmadığını ve tutarsız kararların göstergesidir. Bu çalışmada hesaplanan tutarlılık oranı $CR = 0.0288$ 'dir. Tutarlılık oranı sağladıktan sonra karar matrisleri oluşturulmuştur. En son yapılan ağırlıklandırma sonucunda elde edilen etki ağırlıkları kullanılarak ArcGIS programında analizler yapılarak, yer seçimi için uygunluk haritası elde edilmiştir.

Ülkemizde son yıllarda özellikle nüfus yoğunluğu yüksek olan kentlerde havayolu ile seyahat eden yolcu sayısında önemli bir artış meydana gelmiştir. Bu nedenle, havaalanı yer seçimi için nüfus yoğunluğu önemli bir kriterdir. Şekil 2 (a), da görüldüğü gibi nüfus yoğunluğu, Gümüşhane ilinin merkezi ve Kelkit ilçesinde daha fazladır.

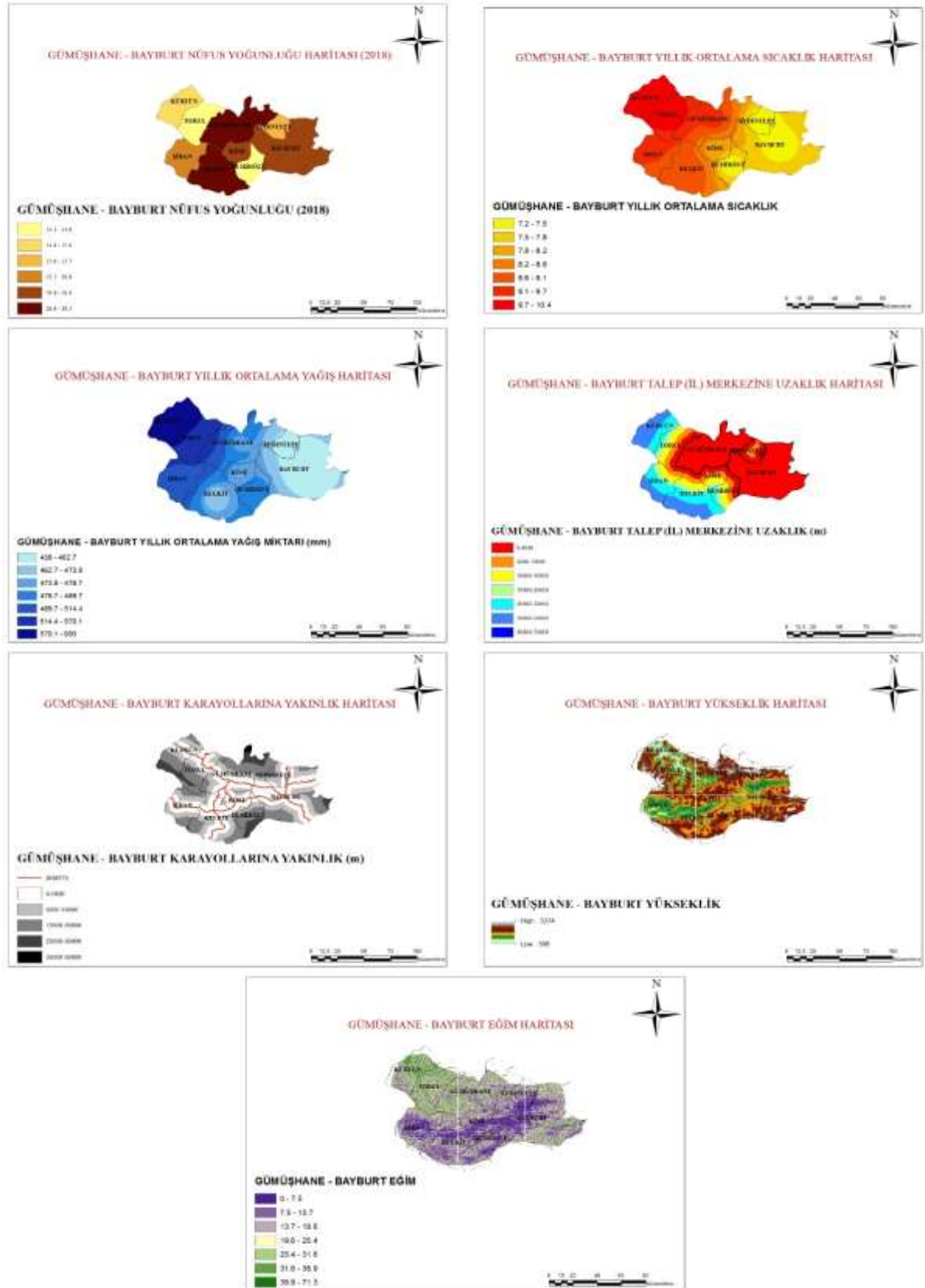
Yüksek sıcaklıkların görüldüğü bölgelerde daha uzun pistlere ihtiyaç olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda havanın yoğunluğunun düşmesi nedeniyle, uçağın itiş gücü azaltılmaktadır. Bu durumda uçağın kalkışı için harcanan güç ve enerji sarfiyatı yükselmekte ve verimlilik düşmektedir. Şekil 2(b)'ye göre ortalama sıcaklık değeri, Bayburt il merkezi ile Demirözü ve Aydıntepe ilçelerinde daha düşük aralıkta olduğu için havalimanı yapımına daha uygundur.

Havaalanı yer seçimi sırasında arazinin topografik yapısı göz önünde bulundurulmalıdır. Yükseklik fazlaştıkça hava yoğunluğu artmakta ve dolayısıyla bu durumda pist uzunluğunu artırmaktadır. Güler (2014) tarafından yapılan çalışmaya göre, deniz seviyesinden her 1000ft yükselme için pist %7 uzatılmalıdır. Yükseklik arttıkça, görüş açısı azalabilir, inşaat maliyeti artabilir. Şekil 2(f)'e göre yükseklik açısından uygun bölgeler; Gümüşhane'nin Şiran İlçesi, Kelkit ilçesinin kuzeyi, Köse ilçesinin güneydoğusu ve Bayburt ilinin kuzeybatısı olarak görülmektedir.



Şekil 1. Havaalanı yer seçimi için işlem süreci

Figure 1. Process for airport location selection

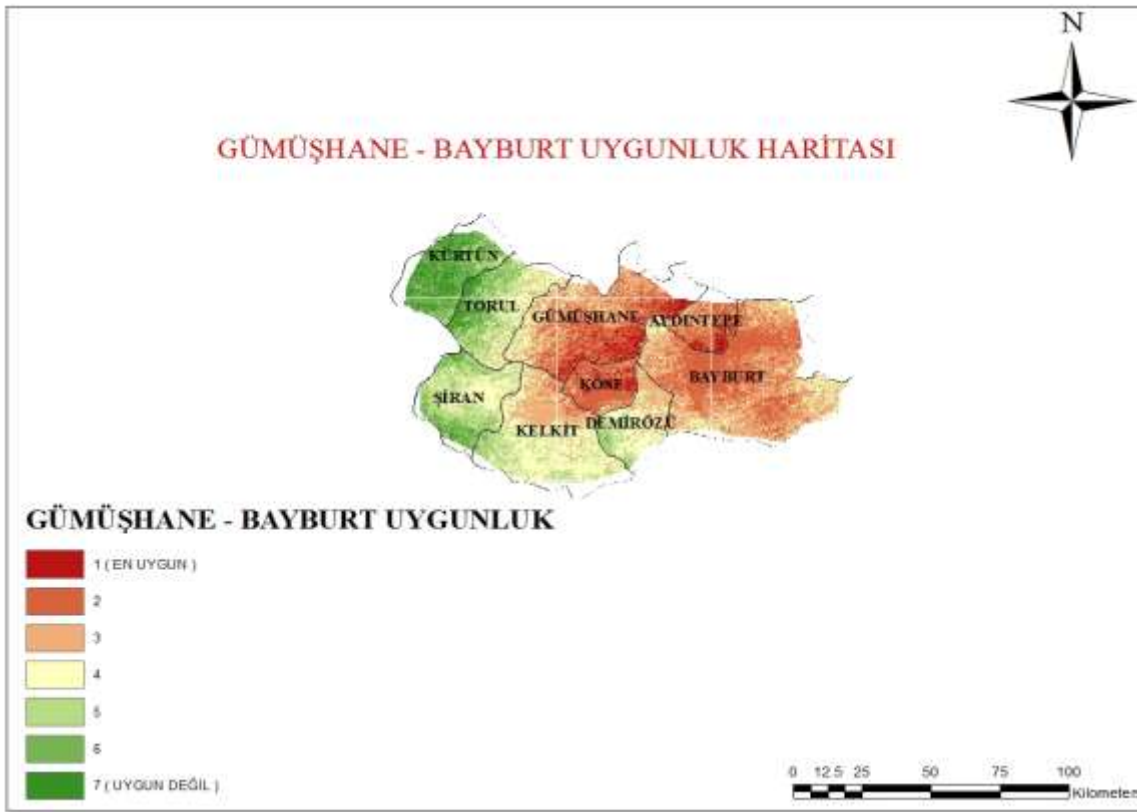


Şekil 2. a) Nüfus yoğunluğu haritası b) Sıcaklık haritası c) Yağış haritası d) İl merkezine uzaklık haritası e) Karayollarına yakınlık haritası f) Yükseklik haritası g) Eğim haritası

Figure 2. a) Population density map b) Temperature map c) Rainfall map d) Distance map to the city center e) Proximity map to highways f) Elevation map g) Slope map

Eğimi fazla olan bölgelerde uçak pistlerinden alınan verim düşmektedir. Eğim, arazinin drenajı ve tasarım, yapım açısından önemlidir. Çünkü bu kriter arazinin tesviye edilmesinde gerekli olan sınıflandırma ve zeminde gerçekleştirilecek işlemleri (kazı, dolgu vb.) belirler ve böylece sahanın hazırlanma maliyeti öğrenilmiş olur. Arazinin istenen seviyeye uygun hale getirilmesi ve drenajının sağlanmış olması maliyet açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Şekil 2 (g)'ye göre Gümüşhane merkez, Torul, Kürtün hariç Gümüşhane ve Bayburt'un diğer ilçeleri daha uygun görülmektedir.

Uygunluk haritası (Şekil 3) incelendiğinde, Gümüşhane il merkezi ve Köse ilçesi havaalanı yer seçimi için daha uygun görülmektedir. Kürtün ve Torul ilçeleri ise gerekli kriterler doğrultusunda uygun olmayan bölgeler olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, havaalanı yapımı için kullanılan kriterler incelendiğinde çalışma yapılan bölgede arasında Gümüşhane ili Köse ilçesi en uygun yer olarak görülmüştür.



Şekil 3. Uygunluk haritası

Figure 3. Suitability map

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Havaalanları bir ülkenin ekonomi ve kültürel anlamda kalkınmasında önemli rol oynamaktadır. Ayrıca, havaalanları turizm sektörüne faydalıdır. Fakat havaalanlarının çevreye olan etkilerinin orantılı bir şekilde planlanması gerekmektedir. Havaalanları özellikli ve nitelikli yatırım projeleri olduğundan kurulması planlanan bölgelerden yer seçim sürecinin doğru bir karar verme sürecinden geçtikten sonra yapılması gerekmektedir. Çünkü bir bölgede kurulması planlanan havaalanının neresi olacağını belirleyen ve bu süreci etkileyen çok fazla kriter mevcuttur. Bu nedenle doğru kararın alınabilmesi için de birçok kriteri birlikte değerlendirerek karar alan bir sistem kullanmak gerekmektedir. Bu çalışmada havaalanı yer seçimi için gerekli olan kriterler arasında en önemlileri kullanılarak AHP ve CBS yöntemleriyle bütünlük bir sistem oluşturulmuştur ve havaalanının kurulması için en uygun yer seçimi yapılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda, Gümüşhane il merkezi ve Köse ilçesi yapılması planlanan havaalanı yeri için uygun bölgeler olarak belirlenmiştir. Gümüşhane iline ait olan Kürtün ve Torul ilçeleri ise yapılan incelemeler doğrultusunda havaalanı yeri için en uygun olmayan bölgeler olarak belirlenmiştir. Bu çalışmaya başlandığı zamanda, hava ulaşımının gün geçtikçe gelişmesi ve artan talep doğrultusunda Bayburt ve Gümüşhane illerinin ortak kullanımı amacıyla bir havaalanı yapılmak istendiği bilinmektedir. Bu yüzden bu alanda böyle bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Haziran 2018 tarihinde Gümüşhane'nin Köse ilçesi Salyazı köyünde yıllık 2 milyon yolcu kapasiteli havaalanı inşaatına başlanılmıştır. İki şehri havaalanı ile buluşturacak olan ve Gümüşhane'nin Köse ilçesine bağlı Salyazı köyünde yapımı süren havalimanı, Gümüşhane merkezine 67, Bayburt merkezine 47 kilometre mesafede inşa edilmektedir. Havaalanı inşaatına başlanan bölge bu çalışmada da en uygun yer olarak belirlenen alandır. Bu da çalışmanın sonucunun doğruluğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akalın, M., Turhan, G., Şahin, A., 2013, "The Application of AHP Approach for Evaluating Location Selection Elements for Retail Store: A Case of Clothing Store", *International Journal of Research in Business and Social Science*, Cilt 2, Sayı 4, ss. 1-20.
- Al-shabeeb, A., R., 2016, "The Use of AHP within GIS in Selecting Potential Sites for Water Harvesting Sites in the Azraq Basin—Jordan", *Journal of Geographic Information System*, Sayı 8, ss. 73-88.
- Atthirawong, W., MacCarthy, B., 2017, "An Application of the Analytical Hierarchy Process to International Location Decision-Making", *In: Proceedings of the 7th annual Cambridge international manufacturing symposium: restricting global manufacturing*, University of Cambridge, Cambridge, ss. 1-18
- Aydın, Ö., Öznehir, S., Akçalı, E., 2009, "Ankara için Optimal Hastane Yeri Seçiminin Analitik Hiyerarşi Süreci ile Modellenmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Cilt 14, Sayı 2, ss. 69-86.
- Bunruamkaew, K., 2012, "How to do AHP analysis in Excel", GIS Seminar, division of spatial information science graduate school of life and environmental sciences, university of Tsukuba.
- Chen, C., 2006, "Applying the analytical hierarchy process (AHP) approach to convention site selection", *Journal of Travel Research*, Cilt 45, ss.167-174.
- Ding, P., Li, R., Chen, Y., Zheng, C., Shen, J., 2017, "Route Choice Optimization of Demand Responsive Transit Based on Analytical Hierarchy Process", *18th COTA International Conference of Transportation Professionals*, ss. 3227-3236.
- Erbıyık, H., Özcan, S., Karaboğa, K., 2012, "Retail store location selection problem with multiple analytical hierarchy process of decision making an application in Turkey", *Procedia Social and Behavioral Sciences*, Cilt 58, ss. 1405-1414.
- Harwati, Utami, I., 2018, "Quantitative analytical hierarchy process to marketing store location selection", *MATEC Web of Conferences*, 154, 01075 (2018).
- İnce, Ö., Bedir, N., Eren, T., 2016, "Hastane Kuruluş Yeri Seçimi Probleminin Analitik Hiyerarşi Süreci ile Modellenmesi: Tuzla İlçesi Uygulaması", *Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, Cilt 1, Sayı 3, ss. 08-21.
- Jalilzadehazhari, E., Johansson, P., Johansson, J., Mahapatra, K., 2017, "Application of analytical hierarchy process for selecting an interior window blind", *Architectural Engineering and Design Management*, Cilt 13, Sayı 4, ss. 308-324.
- Lobo, V., B., Ansari, N., Alengadan, B., B., Gharat, P., Jacob, E., Mishra, P., 2016, "Location Selection for a Company using Analytic Hierarchy Process", *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Cilt 5, Sayı 10, ss. 189-196.
- Mohajeri, N., Amin, G., R., 2010, "Railway station site selection using analytical hierarchy process and data envelopment analysis", *Computers & Industrial Engineering*, Cilt 59, ss. 107-114.
- Mikhailov, L., Tsvetinov, P., 2004, "Evaluation of services using a fuzzy analytic hierarchy process", *Applied Soft Computing*, Cilt 5, ss. 23-33.

- Obeidat, M., S., Qasim, T., Khanfar, A., 2018, "Implementing the AHP multi-criteria decision approach in buying an apartment in Jordan", *Journal of Property Research*, Cilt 35, Sayı 1, ss. 53-71
- Saaty, T.L., 1980, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation*. McGraw-Hill, New York.
- Sennaroğlu, B., Çelebi, G., V., 2018, "A military airport location selection by AHP integrated PROMETHEE and VIKOR methods", *Transportation Research Part D*, Cilt 59, ss. 160-173.
- Vahidi, H., Ghazban, F., Abdoli, M., A., Kazemi, V., D., Banaei, S., M., A., 2014, "Fuzzy Analytical Hierarchy Process Disposal Method Selection for an Industrial State; Case Study Charmshahr", *Arabian Journal of Science Engineering*, Cilt 39, ss. 725-735.



BETONARME KİRİŞLERİN ŞEKİL DEĞİŞTİRME ESASLI HASAR SINIRLARININ ARAŞTIRILMASI

¹S. Bahadır YÜKSEL , ²Saeid FOROUGHI , ³Rohullah JAMAL

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

¹sbyuksel@ktun.edu.tr, ²saeid.foroughi@yahoo.com, ³jamal.rohullah@gmail.com

(Geliş/Received: 02.06.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.09.2019)

ÖZ: Yapısal elemanların deprem performansının belirlenmesi için bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018’de betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. Farklı geometri ve parametrelerde betonarme kiriş modelleri tasarlanmıştır. Gerçek malzeme davranışları esas alınarak elde edilen momenti-eğrilik ilişkilerinden kiriş kesitlerinin elastik ötesi davranışları incelenmiştir. Betonarme kiriş modelleri için moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen veriler kullanılarak kiriş kesitlerinin kırılma durumları ve davranışları incelenmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018’de verilen hasar sınır değerleri betonarme kiriş modelleri için hesaplanmıştır. Şekil değiştirme değerleri TBDY 2018’de tanımlanmış olan Göçmenin Önlenmesi, Kontrollü Hasar ve Sınırlı Hasar Performans seviyeleri için hesaplanmıştır. Betonarme kirişler için göz önüne alınan üç ayrı hasar sınırı ve bu hasar sınırlarına karşı gelen birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. İlgili yer değiştirme taleplerine karşılık gelen kiriş hasarları gözlenmiş ve hasar sınırları değerlendirilmiştir. Betonarme kirişlerde farklı performans düzeyi için beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri ve plastik dönmeleri hesaplanarak performans düzeyleri araştırılmıştır. Göçmenin Önlenmesi ve Kontrollü Hasar performans düzeyleri için plastik dönmelerin hasar sınırları; akma eğriliği, kopma eğriliği, plastik mafsallık uzunluğu, kesme açıklığı ve boyuna donatı çapının fonksiyonudur.

Anahtar Kelimeler: Moment-eğrilik, Performans düzeyi, Hasar sınırları, Birim şekil değiştirme sınırları, plastik dönme.

Investigation of Deformation Based Damage Limits of Reinforced Concrete Beams

ABSTRACT: Deformation based damage limits for reinforced concrete members, which were mandated in Turkish Building Earthquake Codes, 2018 were analytically investigated to be able to determine the earthquake performance of structural members. Reinforced concrete beam models having different geometry and parameters were designed. The nonlinear behavior of reinforced concrete beam sections was investigated using the moment-curvature relationships obtained based on real material behavior. The failure stages and behavior of beam cross-sections were examined by using the data obtained from moment-curvature relations of reinforced concrete beam models. Damage limit values given in Turkish Building Earthquake Codes, 2018 were calculated for the designed concrete beam models. The deformation limits were calculated for the levels of collapse prevention, controlled damage and limited damage performance levels as defined in TBDY 2018. Three different damage limits for the beams and the correspondence strain limits for these beams were investigated. Beam damages and damage limits were evaluated for the corresponding displacement demands. Performance levels of the designed reinforced concrete beams were investigated by calculating the limit values of strains and plastic rotation values for the concrete and the reinforcing steel. Damage limits of plastic rotations for collapse prevention and

controlled damage performance levels are functions of yield curvature, ultimate curvature, plastic hinge length, shear length and the diameter of the longitudinal reinforcement.

Key Words: *Moment-curvature, Performance level, Damage limits, Strain limits, Plastic rotation.*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Performansa dayalı tasarım en genel haliyle, bir yapının tasarım depremi etkisinde belirli bir yapısal performans, bir başka deyişle hasar öngörülerek şekil değiştirmeye dayalı tasarım yöntemleri de kullanılarak tasarlanmasıdır. Son yıllarda, özellikle mevcut yapıların değerlendirilmesinde, kuvvete dayalı tasarım yöntemleri yerine şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri giderek yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri; malzemenin elastik ötesi davranışını hesaba katmaya olanak verdiklerinden kuvvete dayalı tasarım yöntemleriyle karşılaştırıldığında, şekil değiştirme esaslı tasarım için yapısal elemanlarda oluşan şekil değiştirme taleplerini belirli bir hasar seviyesine ulaşma olasılığıyla ilişkilendirmek gerekmektedir (Aydemir ve diğ., 2011). Performansa dayalı tasarım temelde üç parametreden oluşmaktadır. Bunlar kapasite, talep ve performanstır. Kapasite; binanın taşıyıcı sistemi, malzemesi, kesit geometrisi vb. unsurların bir bileşkesi olarak düşünülebilir. Binanın yatay yer değiştirebilme kapasitesi (süneklik) ve yatay yük taşıma kapasitesi (rijitlik) genel anlamda kapasite olarak tanımlanır. Talep; sismik hareketlerin yapıdan karşılamasını istediği yer değiştirme ve kesit tesirleri olarak tanımlanabilir. Performans ise yapının kapasitesinin sismik talepleri hangi oranda karşılayabileceği ile ilgilidir (Celep, 2004). Deprem etkisi altında mevcut binaların yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır (Sinani, 2014).

Performans esaslı deprem mühendisliği, yapıların depreme dayanıklı tasarımında konvansiyonel dayanım esaslı tasarıma göre çok daha şeffaf bir yöntem sunmaktadır. Performans esaslı deprem mühendisliğinde kullanılan doğrusal olmayan hesap yöntemleri gerek yapısal modelleme gerek doğrusal olmayan davranışa ait verilerin hazırlanması, gerekse sonuçların derlenmesi ve yorumu aşamalarında standart mühendislik pratiğine göre daha yüksek bir mühendislik bilgi düzeyi gerektirmektedir (Sucuoğlu, 2015).

Doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle hesaplanan iç kuvvetlerin veya şekil değiştirmelerin, kesit hasar sınırlarına karşı gelmek üzere tanımlanan sayısal değerler ile karşılaştırılması sonucunda kesitlerin hangi hasar bölgelerinde olduğuna karar verilir. Eleman hasarı, elemanın en fazla hasar gören kesitine göre belirlenir. Mevcut veya güçlendirilmiş binaların deprem etkisi altında yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme hesapları için kullanılacak doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme ve plastik dönme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır. Daha sonra bu talep büyüklükleri, şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirmesi yapılır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'de tanımlanan yapı elemanlarında hasar sınırları ve hasar bölgeleri (kesit hasar durumları) sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Önlenmesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleridir. Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranışı, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranışı, göçme önlenmesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlamaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir (TBDY, 2018).

Performansa dayalı tasarım en genel haliyle, bir yapının tasarım depremi etkisinde belirli bir yapısal performans, bir başka deyişle hasar öngörülerek şekil değiştirmeye dayalı tasarım yöntemleri de kullanılarak tasarlanmasıdır. Son yıllarda, özellikle mevcut yapıların değerlendirilmesinde, kuvvete dayalı tasarım yöntemleri yerine şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri giderek yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri; malzemenin elastik ötesi davranışını hesaba katmaya olanak verdiklerinden kuvvete dayalı tasarım yöntemleriyle

karşılaştırıldığında, şekil değiştirme esaslı tasarım için yapısal elemanlarda oluşan şekil değiştirme taleplerini belirli bir hasar seviyesine ulaşma olasılığıyla ilişkilendirmek gerekmektedir (Aydemir ve diğ., 2011). Performansa dayalı tasarım temelde üç parametreden oluşmaktadır. Bunlar kapasite, talep ve performanstır. Kapasite; binanın taşıyıcı sistemi, malzemesi, kesit geometrisi vb. unsurların bir bileşkesi olarak düşünülebilir. Binanın yatay yer değiştirebilme kapasitesi (süneklik) ve yatay yük taşıma kapasitesi (rijitlik) genel anlamda kapasite olarak tanımlanır. Talep; sismik hareketlerin yapıdan karşılanmasını istediği yer değiştirme ve kesit tesirleri olarak tanımlanabilir. Performans ise yapının kapasitesinin sismik talepleri hangi oranda karşılayabileceği ile ilgilidir (Celep, 2004). Deprem etkisi altında mevcut binaların yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır (Sinani, 2014).

Performans esaslı deprem mühendisliği, yapıların depreme dayanıklı tasarımında konvansiyonel dayanım esaslı tasarıma göre çok daha şeffaf bir yöntem sunmaktadır. Performans esaslı deprem mühendisliğinde kullanılan doğrusal olmayan hesap yöntemleri gerek yapısal modelleme gerek doğrusal olmayan davranışa ait verilerin hazırlanması, gerekse sonuçların derlenmesi ve yorumu aşamalarında standart mühendislik pratiğine göre daha yüksek bir mühendislik bilgi düzeyi gerektirmektedir (Sucuoğlu, 2015).

Doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle hesaplanan iç kuvvetlerin veya şekil değiştirmelerin, kesit hasar sınırlarına karşı gelmek üzere tanımlanan sayısal değerler ile karşılaştırılması sonucunda kesitlerin hangi hasar bölgelerinde olduğuna karar verilir. Eleman hasarı, elemanın en fazla hasar gören kesitine göre belirlenir. Mevcut veya güçlendirilmiş binaların deprem etkisi altında yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme hesapları için kullanılacak doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme ve plastik dönme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır. Daha sonra bu talep büyüklükleri, şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirilmesi yapılır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'de tanımlanan yapı elemanlarında hasar sınırları ve hasar bölgeleri (kesit hasar durumları) sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Önlenmesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleridir. Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranış, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranış, göçme önlenmesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranış tanımlanmaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir (TBDY, 2018).

TBDY, 2018'e göre İzin Verilen Şekil Değiştirme Sınırları (Permitted Deformation Limits according to TSC, 2018)

Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi (GÖ), Kontrollü Hasar Performans Düzeyi (KH) ve Sınırlı Hasar Performans Düzeyi (SH) için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, yüksek binalar ve yeni betonarme bina elemanlarında yayılı plastik davranış modeline göre hesaplanan beton ve donatı çeliği toplam birim şekil değiştirmeleri için izin verilen sınırlar aşağıda tanımlanmıştır. Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için beton birim kısalması ($\epsilon_c^{(GÖ)}$) dikdörtgen kesitli kolon, kiriş ve perdeler için Denklem (1)'den hesaplanmaktadır.

$$\epsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018 \quad (1)$$

Bu bağıntılardaki ilk terim sargısız betonun (kabuk betonu) birim kısalmasına karşı gelmektedir. ω_{we} ; etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı Denklem (2) ile hesaplanmıştır.

$$\omega_{we} = \alpha_{se} \rho_{sh,min} \frac{f_{ywe}}{f_{ce}} \quad (2)$$

α_{se} sargı donatısı etkinlik katsayısını, $\rho_{sh,min}$ dikdörtgen kesitte iki yatay doğrultuda hacimsel enine donatı oranının küçük olanını, f_{ywe} enine donatının ortalama (beklenen) akma dayanımını göstermektedir. Sargı donatısı etkinlik katsayısı (α_{se}) Denklem (3) ve kesitte hacimsel enine donatı oranı (ρ_{sh}) Denklem (4) ile hesaplanmıştır.

$$\alpha_{se} = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_o h_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) \quad (3)$$

$$\rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s} \quad (4)$$

A_{sh} ve ρ_{sh} gözönüne alınan doğrultuda enine donatının alanını ve hacimsel oranını, b_k dik doğrultudaki çekirdek boyutunu (en dıştaki enine donatı eksenleri arasındaki uzaklık), s enine donatı aralığını, b_o ve h_o sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutlarını, a_i bir etriye kolu veya ciroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı göstermektedir.

Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için donatı çeliği birim şekil değiştirmesi ($\varepsilon_s^{(G\ddot{O})}$) Denklem (5) ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_s^{(G\ddot{O})} = 0.40\varepsilon_{su} \quad (5)$$

Denklemde ε_{su} çekme dayanımına karşı gelen birim uzamayı göstermektedir. Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, Yüksek Binalar da dahil olmak üzere, yeni betonarme bina elemanlarında yığılı plastik davranış modeline göre hesaplanan plastik dönmeler için izin verilen sınır, kesite etkiyen eksenel kuvvet, beton ve donatı çeliği modelleri dikkate alınarak yapılacak eğrilik analizi sonucunda Denklem (6) ile hesaplanacaktır. Denklemde; ϕ_u , beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri ile beton ve donatı çeliği modellerinden yararlanılarak ve kesite etkiyen eksenel kuvvet dikkate alınarak yapılan analizden elde edilen göçme öncesi toplam eğriliğini göstermektedir. Denklemdeki son terim, akma sonrası (göçme öncesine kadar) durum için akma uzaması penetrasyonuna bağlı donatı sıyrılması dönmeye karşı gelmektedir.

$$\theta_p^{(G\ddot{O})} = \frac{2}{3} \left[(\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s}\right) + 4.5 \phi_u d_b \right] \quad (6)$$

Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, yeni betonarme bina elemanların hesap yöntemleri ile hesaplanan beton ve donatı çeliği için izin verilen toplam birim şekil değiştirmeler $\varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_s^{(KH)}$ ile plastik dönme $\theta_p^{(KH)}$ sınırları, Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi Denklem (7, 8 ve 9) ile tanımlanmıştır.

$$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75\varepsilon_c^{(G\ddot{O})} \quad (7)$$

$$\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75\varepsilon_s^{(G\ddot{O})} \quad (8)$$

$$\theta_p^{(KH)} = 0.75\theta_p^{(G\ddot{O})} \quad (9)$$

Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, yeni betonarme bina elemanların hesap yöntemleri ile hesaplanan beton ve donatı çeliği için izin verilen toplam birim şekil değiştirmeler $\varepsilon_c^{(SH)}$ ve $\varepsilon_s^{(SH)}$ Denklem (10 ve 11) ile tanımlanmıştır:

$$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025 \quad (10)$$

$$\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075 \quad (11)$$

Etkin kesit rijitlikleri kullanılarak yapılan hesapta SH performans düzeyi için taşıyıcı sistemde plastik mafsall oluşumuna izin verilmeyecektir ($\theta_p^{(SH)} = 0$). Akma durumu için yer değiştirmiş plastik mafsall

akma dönmesi θ_y Denklem (12) ile hesaplanacaktır. Kiriş ve kolonlarda $\eta = 1$, perdelerde ise $\eta = 0.5$ alınacaktır. f_{ce} ve f_{ye} ise betonun ortalama (beklenen) basınç dayanımı ile donatının ortalama akma dayanımını göstermektedir.

$$\theta_y = \frac{\phi_y L_s}{3} + 0.0015 \eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{\phi_y d_b f_{ye}}{8 \sqrt{f_{ce}}} \quad (12)$$

Bu çalışmada betonarme kiriş elemanlarının deprem performansının belirlenmesi için TBDY, (2018)'de verilen kurallara göre farklı parametrelere ve sabit geometriye sahip 22 adet betonarme kiriş modeli tasarlanmıştır (Çizelge 1). Tasarlanan betonarme kiriş kesitlerinde gerçek malzeme davranışları esas alınarak farklı beton basınç dayanımı ve basınç donatı oranına göre moment-eğrilik ilişkilerinden; akma eğriliği (ϕ_y), akma momenti (M_y), göçme öncesi eğrilik (ϕ_u), eğilme momenti kapasitesi (M_u) ve eğrilik sünekliği (μ) değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kiriş modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen sonuçlara göre kiriş kesitlerinin davranışları incelenmiştir. Tasarlanan betonarme kiriş modellerinde yapılan performans değerlendirmesinde GÖ, KH ve SH için oluşan şekil değiştirme ve iç kuvvet sınır değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kiriş elemanlarında sargı donatı ve çekme donatı oranı sabit tutularak, farklı parametre olarak basınç donatısı oranı ve beton basınç dayanımına göre hesaplanan beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri, plastik mafsallık akma dönmesi ve plastik dönmeler hesaplanarak kiriş kesitlerinin performans düzeyleri araştırılmıştır.

Betonarme kiriş kesit hesabı ve tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, elde edilen kesitteki donatı oranının, dengeli orandan küçük olmasını sağlamaktır. Bu koşul yönetmeliklerce zorunlu olduğu için bu çalışmada TS500 (2000)'de verilen sınır değerler dikkate alınmıştır. TS500 (2000)'de betonarme kirişlerde sünek davranışın sağlanabilmesi için, donatı oranı Denklem (13 ve 14) ile sınırlandırılmıştır. Denklemlerde ρ ; çekme donatı oran, ρ' ; basınç donatı oranıdır.

$$(\rho - \rho') \leq \rho_{max}, \quad \rho = \rho_{max} = 0.85 \rho_b, \quad \rho \leq \rho_{max}; 0.02 \quad (13)$$

$$\rho_b = 0.85 k_1 \left(\frac{f_{cd}}{f_{yd}} \right) \left(\frac{600}{600 + f_{yd}} \right) \quad (14)$$

Sabit geometride, farklı beton sınıfı, boyuna donatı olarak sabit çekme ve farklı basınç donatı oranlarına sahip toplam 22 adet betonarme kiriş modeli tasarlanmıştır. Betonarme kiriş modellerinin tasarımında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) ve Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS500, 2000)'de verilen hükümler dikkate alınmıştır. Farklı parametrelerde tasarlanan betonarme kiriş modellerinde çekme donatı oranı olarak; $\rho_{max} = 0.85 \rho_b$ ve basınç donatı oranı olarak; $\rho'_s = 0, 0.1 \rho_{max}, 0.2 \rho_{max}, 0.3 \rho_{max}, 0.4 \rho_{max}, 0.5 \rho_{max}, 0.6 \rho_{max}, 0.7 \rho_{max}, 0.8 \rho_{max}, 0.9 \rho_{max}$ ve ρ_{max} değerleri dikkate alınmıştır. Betonarme kiriş modellerinde C20 ve C30 olarak iki beton sınıfı dikkate alınmıştır. Kiriş modellerinde her beton sınıfı için çekme donatısı oranı sabit tutulmuş basınç donatısı oranları değiştirilerek kesitlerin hesapları yapılmıştır.

Betonarme kesitlerde süneklik, kesitin dayanımında önemli bir azalma olmadan yapabileceği doğrusal ötesi deformasyon kapasitesi olarak tanımlanır. Sayısal olarak ise süneklik, eğrilik süneklik katsayısı (μ) Denklem (15) ile hesaplanmaktadır. Eğrilik süneklik katsayısı, kesitin kırılma anında yaptığı eğriliğin (ϕ_u), çekme donatısının aktığı anda kesitte oluşan eğriliğe (ϕ_y) oranıdır (Yüksel ve diğ., 2020).

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (15)$$

MATERYAL ve METOT (MATERIALS and METHODS)

Dikdörtgen en-kesitli kiriş kesitlerinde farklı performans düzeyi için oluşan şekil değiştirme ve iç kuvvet sınır değerleri hesaplanarak Çizelgeler ve grafikler halinde özetlenmiştir. Tasarlanan betonarme kiriş modellerinde moment-eğrilik analizlerinden ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u ve μ (eğrilik sünekliği) değerleri hesaplanmıştır. Yönetmelikte verilen hasar sınırlarını tanımlayan birim şekil değiştirme ve iç kuvvet değerleri dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş modelleri için hesaplanmıştır. Şekil değiştirme ve iç kuvvet sınırlarının hesaplanmasında TBDY, (2018)'de tanımlanmış üç farklı hasar sınırı olan GÖ, KH ve SH seviyeleri kullanılmıştır. Birim şekil değiştirme istemlerinin belirlenmesi plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği betonarme sünek taşıyıcı sistem elemanlarında, farklı kesit hasar sınırlarına (GÖ, KH ve SH performans düzeyleri) göre izin verilen beton ve donatı çeliği şekil değiştirme üst sınırları (kapasiteleri) hesaplanmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen ϕ_y ve ϕ_u değerlerine göre plastik mafsallı dönmeleri hesaplanmıştır. Beton ve donatı çeliği için hesaplarda ve malzeme modellerinde kullanılan parametreler Çizelge (2)'de özetlenmiştir. Kesitlerde kullanılan donatı oranları TS500, (2000) ve TBDY, (2018)'de verilen sınırlamalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Beton sınıfı olarak C20 ve C30 seçilmiştir. Tüm kesit modelleri için, donatı çeliği olarak S420 seçilmiştir.

Çizelge 1. Tip-1 ve Tip 2 olarak tasarlanan betonarme kiriş modellerine ait donatı oranı ve alanları
Table 1. Reinforcement ratio and areas of reinforced concrete beam models designed as Type-1 and Type 2.

Kesit Grubu	Kesit No	Sargı Donatısı	Beton sınıfı (MPa)	$A_s(mm^2)$	$A'_s(mm^2)$	ρ_b	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
Tip 1	B1-0				0.0			0.0	0.85
	B1-1				153			0.0014	0.77
	B1-2				306			0.0027	0.68
	B1-3				459			0.0041	0.60
	B1-4				612			0.0054	0.51
	B1-5	$\Phi 8/50mm$	20	1530	765	0.0160	0.0136	0.0068	0.43
	B1-6				918			0.0082	0.34
	B1-7				1071			0.0095	0.26
	B1-8				1224			0.0109	0.17
	B1-9				1377			0.0122	0.09
	B1-10				1530			0.0136	0.00
Tip 2	B2-0				0.0			0.0	0.85
	B2-1				226			0.0020	0.77
	B2-2				452			0.0040	0.68
	B2-3				678			0.0060	0.60
	B2-4				905			0.0080	0.51
	B2-5	$\Phi 8/50mm$	30	2261.25	1131	0.0236	0.0201	0.0101	0.43
	B2-6				1357			0.0121	0.34
	B2-7				1583			0.0141	0.26
	B2-8				1809			0.0161	0.17
	B2-9				2035			0.0181	0.09
	B2-10				2261			0.0201	0.00

A_s : Çekme donatı alanı, A'_s : Basınç donatı alanı

Çizelge 2. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018)

Table 2. Parameters used in material models

Malzeme	Parametre	Değer
Beton Sınıfı: C20,30	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değiştirme değeri (ϵ_{co})	0.002
	Sargısız betonun nihai birim şekil değiştirmesi (ϵ_{cu})	0.0035
	Karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck})	20, 30MPa
Donatı Çeliği: S420	Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi (ϵ_{sy})	0.0021
	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirmesi (ϵ_{sp})	0.008
	Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi (ϵ_{su})	0.10
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550MPa

ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

Tip 1 Betonarme Kiriş Elemanları (Type 1 Reinforced Concrete Beam Elements)

Tip 1 olarak tasarlanan ve detayları Çizelge (1)'de verilen dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş modelleri için sabit çekme donatı oranı ve farklı basınç donatı oranına göre moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak kiriş modelleri için ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u ve μ değerleri hesaplanmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen dikdörtgen en-kesitli betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre akma durumu için θ_y değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 3). Tip 1 betonarme kiriş elemanların farklı parametrelere göre hesaplanan $\epsilon_c^{(SH)}$, $\epsilon_s^{(SH)}$, $\theta_p^{(SH)}$, $\epsilon_c^{(KH)}$, $\epsilon_s^{(KH)}$, $\theta_p^{(KH)}$, $\epsilon_c^{(GÖ)}$, $\epsilon_s^{(GÖ)}$, $\theta_p^{(GÖ)}$ değerleri sırasıyla Çizelge (4)'te verilmiştir.

Çizelge 3. Tip 1 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre hesaplanan ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u , μ ve θ_y değerleri

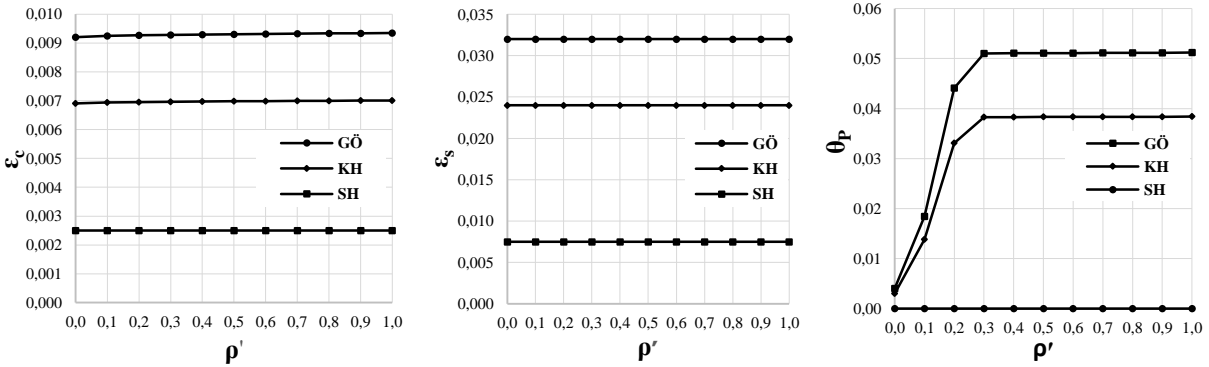
Table 3. ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u , μ and θ_y values of type 1 reinforced concrete beams calculated according to different parameters.

Kesit Grubu	Kesit No	Akma Durumu M_y	ϕ_y	Kırılma Durumu M_u	ϕ_u	$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y}$	θ_y
Tip-1	B1-0	244.0	0.01020	232.3	0.0238	2.3	0.01370
	B1-1	251.3	0.00993	283.4	0.0849	8.6	0.01338
	B1-2	251.4	0.00906	309.4	0.1932	21.3	0.01239
	B1-3	251.6	0.00850	314.7	0.2222	26.1	0.01174
	B1-4	251.9	0.00827	316.9	0.2222	26.9	0.01148
	B1-5	252.1	0.00812	319.0	0.2222	27.4	0.01131
	B1-6	252.7	0.00800	321.0	0.2222	27.8	0.01117
	B1-7	252.9	0.00787	323.1	0.2222	28.2	0.01102
	B1-8	253.0	0.00777	325.3	0.2222	28.6	0.01090
	B1-9	253.4	0.00767	327.5	0.2222	29.0	0.01078
	B1-10	253.7	0.00757	329.7	0.2222	29.4	0.01067

Çizelge 4. Tip 1 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre farklı performans düzeyleri için hesaplanan sonuç değerleri

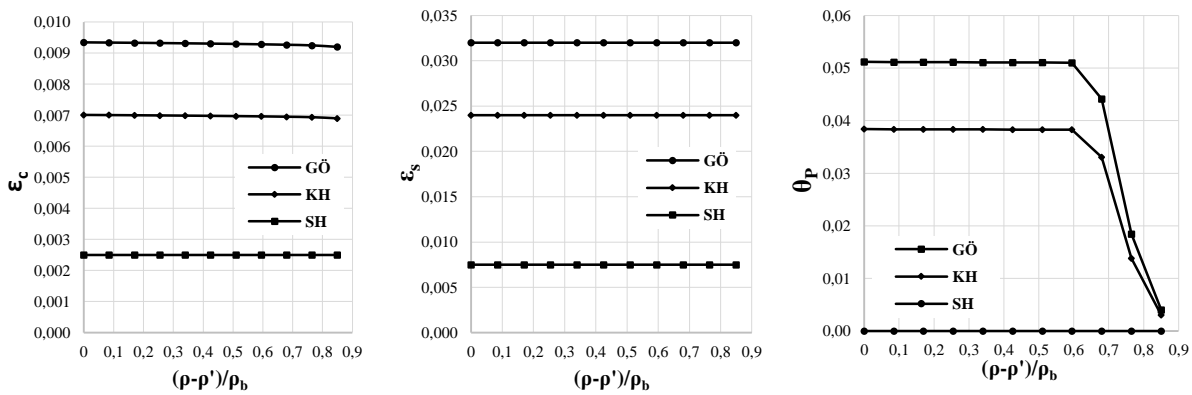
Table 4. Result values calculated for different performance levels of type 1 reinforced concrete beams according to different parameters.

Kesit Grubu	Kesit No	(SH)			(KH)			(GÖ)		
		ε_c^{SH}	ε_s^{SH}	θ_p^{SH}	ε_c^{KH}	ε_s^{KH}	θ_p^{KH}	$\varepsilon_c^{GÖ}$	$\varepsilon_s^{GÖ}$	$\theta_p^{GÖ}$
Tip 1	B1-0				0.00690		0.00300	0.00920		0.00400
	B1-1				0.00694		0.01383	0.00925		0.01844
	B1-2				0.00695		0.03308	0.00927		0.04411
	B1-3				0.00696		0.03828	0.00928		0.05104
	B1-4				0.00697		0.03830	0.00930		0.05107
	B1-5	0.0025	0.0075	0	0.00698	0.024	0.03832	0.00931	0.032	0.05110
	B1-6				0.00699		0.03834	0.00932		0.05112
	B1-7				0.00699		0.03835	0.00932		0.05114
	B1-8				0.00700		0.03836	0.00933		0.05115
	B1-9				0.00701		0.03838	0.00934		0.05117
B1-10				0.00701		0.03839	0.00935		0.05118	



Şekil 1. Tip 1 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre $(\varepsilon_c - \rho', \varepsilon_s - \rho', \theta_p - \rho')$ grafikleri

Figure 1. $(\varepsilon_c - \rho', \varepsilon_s - \rho', \theta_p - \rho')$ curves of type 1 reinforced concrete beams according to different parameters



Şekil 2. Tip 1 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre $(\varepsilon_c - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b}), (\varepsilon_s - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b})), (\theta_p - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b})))$ grafikleri

Figure 2. $(\varepsilon_c - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b}), (\varepsilon_s - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b})), (\theta_p - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b})))$ curves of Type 1 reinforced concrete beams according to different parameters

Tip 2 Betonarme Kiriş Elemanları (Type 2 Reinforced Concrete Beam Elements)

Tip 2 olarak tasarlanan ve detayları Çizelge 1’de verilen dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş modelleri için sabit çekme donatı oranı ve farklı basınç donatı oranına göre moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak kiriş modelleri için ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u ve μ değerleri hesaplanmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen dikdörtgen en-kesitli betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre akma durumu için θ_y değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 5).

Çizelge 5. Tip 2 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre hesaplanan ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u , μ ve θ_y değerleri

Table 5. ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u , μ and θ_y values of type 2 reinforced concrete beams calculated according to different parameters.

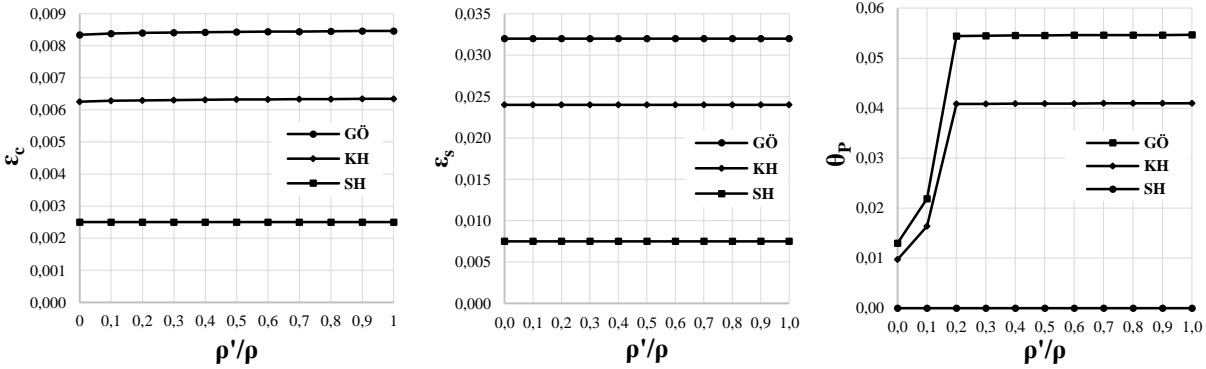
Kesit Grubu	Kesit No	Akma Durumu		Kırılma Durumu		$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y}$	θ_y
		M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u		
Tip-2	B2-0	362.3	0.01010	366.8	0.0580	5.7	0.01353
	B2-1	367.5	0.00962	425.1	0.0932	9.7	0.01298
	B2-2	367.6	0.00904	462.0	0.2222	24.6	0.01231
	B2-3	368.6	0.00858	465.1	0.2222	25.9	0.01178
	B2-4	368.7	0.00832	468.1	0.2222	26.7	0.01149
	B2-5	369.1	0.00820	471.2	0.2222	27.1	0.01135
	B2-6	370.3	0.00805	474.3	0.2222	27.6	0.01118
	B2-7	371.0	0.00796	477.0	0.2222	27.9	0.01107
	B2-8	372.0	0.00783	478.9	0.2222	28.4	0.01093
	B2-9	372.7	0.00774	480.8	0.2222	28.7	0.01083
	B2-10	373.0	0.00764	487.0	0.2222	29.1	0.01071

Tip 2 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre hesaplanan $\epsilon_c^{(SH)}$, $\epsilon_s^{(SH)}$, $\theta_p^{(SH)}$, $\epsilon_c^{(KH)}$, $\epsilon_s^{(KH)}$, $\theta_p^{(KH)}$, $\epsilon_c^{(GÖ)}$, $\epsilon_s^{(GÖ)}$, $\theta_p^{(GÖ)}$ değerleri sırasıyla Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 6. Tip 2 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre farklı performans düzeyleri için hesaplanan sonuç değerleri

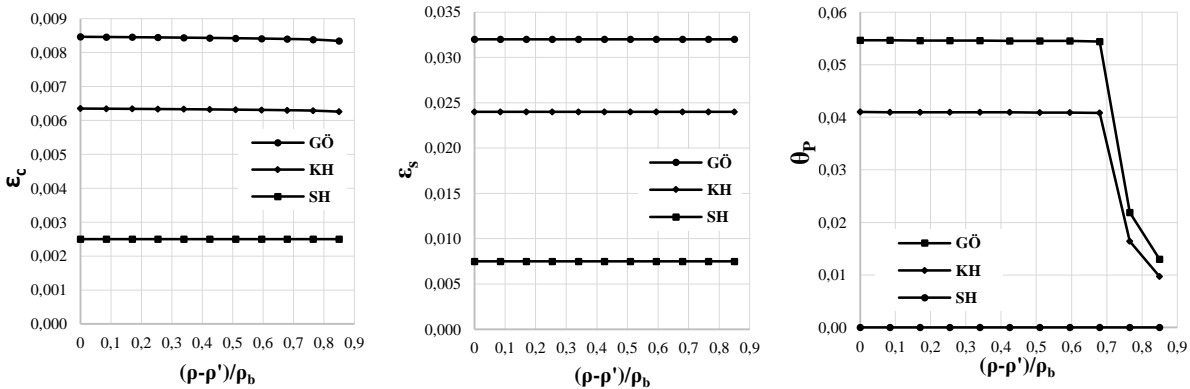
Table 6. Result values calculated for different performance levels of type 2 reinforced concrete beams according to different parameters.

Kesit Grubu	Kesit No	(SH)			(KH)			(GÖ)		
		ε_c^{SH}	ε_s^{SH}	θ_p^{SH}	ε_c^{KH}	ε_s^{KH}	θ_p^{KH}	$\varepsilon_c^{GÖ}$	$\varepsilon_s^{GÖ}$	$\theta_p^{GÖ}$
Tip 2	B2-0				0.00626		0.00974	0.00834		0.01298
	B2-1				0.00629		0.01643	0.00839		0.02190
	B2-2				0.00630		0.04083	0.00840		0.05444
	B2-3				0.00631		0.04089	0.00841		0.05451
	B2-4				0.00632		0.04092	0.00842		0.05455
	B2-5	0.0025	0.0075	0	0.00633	0.0240	0.04093	0.00843	0.0320	0.05457
	B2-6				0.00633		0.04095	0.00844		0.05460
	B2-7				0.00634		0.04096	0.00845		0.05461
	B2-8				0.00634		0.04097	0.00845		0.05463
	B2-9				0.00635		0.04098	0.00846		0.05465
B2-10				0.00635		0.04100	0.00847		0.05466	



Şekil 3. Tip 2 betonarme kiriş elemanlarının farklı parametrelere göre ($\varepsilon_c - \rho'$, $\varepsilon_s - \rho'$, $\theta_p - \rho'$) grafikleri

Figure 3. ($\varepsilon_c - \rho'$, $\varepsilon_s - \rho'$, $\theta_p - \rho'$) curves of type 2 reinforced concrete beams according to different parameters



Şekil 4. Tip 2 betonarme kiriş elemanlarının farklı parametrelere göre ($\varepsilon_c - (\rho - \rho')/\rho_b$, $\varepsilon_s - (\rho - \rho')/\rho_b$, $\theta_p - (\rho - \rho')/\rho_b$) grafikleri

Figure 4. ($\varepsilon_c - (\rho - \rho')/\rho_b$), ($\varepsilon_s - (\rho - \rho')/\rho_b$), ($\theta_p - (\rho - \rho')/\rho_b$) curves of Type 1 reinforced concrete beams according to different parameters

Bu çalışmada betonarme kiriş modellerinin TBDY (2018)'de betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. TBDY (2018)'de verilen hasar sınırlarını tanımlayan birim şekil değiştirme ve iç kuvvet değerleri dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş modelleri

için hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan betonarme kiriş kesitlerinin hesaplanan yer değiştirme taleplerine karşılık gelen kiriş hasarları gözlenmiş ve hasar sınırları değerlendirilmiştir. Bu bölümde özetlenen analiz sonuçları ışığında tasarlanan betonarme kirişlerin davranışı için elde edilen yorum ve değerlendirmeler Sonuç bölümüne detaylı bir şekilde maddeler halinde özetlenmiştir.

SONUÇ (RESULTS)

Araştırma Sonuçları ve Tartışma bölümünde betonarme kirişler için yapılan değerlendirmeler ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Betonarme kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranının artması ile moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen M_y , M_u ve Φ_u değerleri artmakta ve Φ_y değerleri azalmaktadır. Basınç donatı oranının artması kesitlerin maksimum moment taşıma kapasitesini ve sünekliğini artırmaktadır.
- Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerde artan beton basınç dayanımı ile M_y ve M_u değerleri artmakta, Φ_y ve Φ_u değerleri $\rho' = 0.40\rho$ oranına kadar azalmakta ve $\rho' = 0.50\rho$ oranından $\rho' = \rho$ oranına kadar Φ_y ve Φ_u sabit kalmaktadır. Beton basınç dayanımının artması maksimum moment kapasitesini artırmaktadır.
- Betonarme kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatı oranının artması ile μ değerleri artmaktadır.
- Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerinde artan beton basınç dayanımı ile hesaplanan μ değerleri $\rho' = 0.40\rho$ oranına kadar artmakta ve $\rho' = 0.50\rho$ oranından $\rho' = \rho$ oranına kadar azalmaktadır.
- Basınç donatısı oranının betonarme kirişlerin maksimum moment taşıma kapasitesini (M_u) ve eğrilik sünekliği (μ) üzerinde etkili olduğu ispatlanmıştır.
- Betonarme kirişlerde beton basınç dayanımı artması ile $\rho' = 0.40\rho$ oranına kadar maksimum eğrilik (Φ_u) ve eğrilik süneklik (μ) değerleri artmaktadır. $\rho' = 0.50\rho$ oranından $\rho' = \rho$ oranına kadar eğrilik sünekliği (μ) azalmakta ve maksimum eğrilik (Φ_u) değeri sabit kalmaktadır.
- Betonarme kirişlerde TBDY, 2018'e göre hesaplanan plastik mafsallık dönmesinin (θ_y) değeri; sabit çekme donatısı ve basınç donatısı oranları için, artan beton basınç dayanımı ile $\rho' = 0.30\rho$ oranına azalmakta ve $\rho' = 0.40\rho$ oranından $\rho' = \rho$ oranına kadar artmaktadır.
- Sabit çekme donatısı ve beton basınç dayanımına göre artan basınç donatı oranı ile hesaplanan θ_y değerleri azalmaktadır.
- TBDY (2018)'de donatı çeliği için GÖ ve KH performans düzeylerinde verilen hasar sınırları ($\varepsilon_s^{(KH)}$, $\varepsilon_s^{(GÖ)}$), donatı çeliğinin çekme dayanımına karşı gelen birim uzama değerini sabit katsayılar ile çarparak elde edilmektedir. SH performans düzeyi için verilen hasar sınırı ise sabit bir değer olarak verilmektedir ($\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075$).
- $\varepsilon_c^{(SH)}$ performans düzeyi için verilen hasar sınırı ise sabit değer olarak verilmektedir ($\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025$).
- Sabit çekme ve basınç donatısı oranı için artan beton basınç dayanımı ile $\varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_c^{(GÖ)}$ değerleri azalmaktadır.
- Sabit çekme donatısı oranı ve beton basınç dayanımı için artan basınç donatı oranı ile $\varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_c^{(GÖ)}$ değerleri artmaktadır.
- GÖ ve KH performans düzeyi için verilen plastik dönme hasar sınırları θ_p , Φ_y , Φ_u , L_p , L_s ve d_b 'nin fonksiyonudur. Dolayısıyla basınç donatısı oranı, sargı donatısı oranı ve çekme donatısı oranı gibi Φ_y ve Φ_u değerlerini etkileyen parametreler θ_p 'yi de etkilemektedir. SH performans düzeyinde taşıyıcı sistemlerde plastik mafsallık oluşmasına izin verilmediği için farklı parametrelere göre betonarme kiriş kesitlerinde $\theta_p^{(SH)} = 0$ elde edilmiştir.
- Sabit çekme ve basınç donatısı oranı için artan beton basınç dayanımı ile $\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$ değerleri artmaktadır.

- Sabit çekme donatısı oranı ve beton basınç dayanımı için artan basınç donatısı oranı ile $\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$ değerleri artmaktadır.
- Doğrusal olmayan hesap yöntemine göre performans değerlendirmelerinin en önemli aşamalardan birisi yapısal elemanlardaki GÖ, KH ve SH hasar düzeylerinin belirlenmesidir. Yapısal elemanlarda oluşacak hasarı belirlemek için değerlendirmeye esas alınan şekil değiştirme talepleri de büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aydemir, C., Kırçıl, M. S., Hancıoğlu, B., Zorbozan, M., 2011, *Betonarme Kolonların Hasar Sınır Eğriliklerinin Belirlenmesi*, İMO Teknik Dergi, Cilt 361, Sayı 22, ss. 5613-5642.
- Celep, Z., ve Kumbasar N., 2004, *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, Beta Dağıtım, İstanbul, 596s.
- SAP2000. Structural software for analysis and design, Computers and Structures, Inc. Version 20.0.0. USA.
- Sinani, B., 2014, *Mevcut betonarme yapıların deprem performansının analizi*. T.C. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- Sucuoğlu, H., 2015, *Performans Esaslı Deprem Mühendisliği*. 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 14-16 Ekim 2015, DEÜ, İzmir.
- TBDY, 2018, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- TS500, 2000, *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, TSE, Ankara.
- Yüksel, S.B., Jamal, R., Foroughi, S., 2020, *Kirişlerde Basınç Donatısı Oranının Moment-Eğrilik İlişkisine Etkisi*, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 8, Sayı 1, ss. 1-17.



SANDVIÇ KOMPOZİTLERDE ÇEKİRDEK KALINLIĞININ VE KARBON LİF YÖNLENMELERİNİN BASMA VE EĞİLME DAYANIMLARINA ETKİSİ

¹Serhat Osmanoğlu, ²Erdem Selver, ³Muharrem İmal

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü,
Bursa, TÜRKİYE

²Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü,
Kahramanmaraş, TÜRKİYE

^{1,3}Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Kahramanmaraş, TÜRKİYE

¹serhatosmanoglu@uludag.edu.tr, ²eselver@ksu.edu.tr, ³muharremimal@ksu.edu.tr

(Geliş/Received: 30.12.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.09.2019)

ÖZ: Sandviç kompozit malzemelerin yüksek mukavemet ve rijitlik istenen, aynı zamanda ağırlığın problem olduğu havacılık endüstrisi, denizcilik endüstrisi, uzay ve mimari yapılar gibi alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Kompozit malzemelerde kullanılan yüzey plakaları, çekirdek malzemenin cinsi, yoğunluğu, boyutları malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada kompozit sandviç panel malzemesinde çekirdek malzeme olarak farklı kalınlıkta PVC (PoliVinil Klorür) köpük kullanılmıştır. Vakum infüzyon yöntemiyle üretilen PVC köpüklü sandviç panellerin yüzey plakalarında tek yönlü ve çift eksenli karbon fiber kumaşlar kullanılmış, farklı fiber yönlenmelerine sahip panellere eğme ve basma deneyleri uygulanarak yüzey dayanımları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, PVC köpükten farklı kalınlıkta çekirdek malzemeler kullanılarak çekirdek kalınlığının çekirdek kayma gerilmesi ve eğilme dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, panel plakalarında fiber yönlerinin yüzey mukavemetini etkileyen önemli bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. PVC çekirdekli sandviç panellerde çekirdek kalınlığının artması sonucu basma ve eğilme dayanımının azaldığı ortaya çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Sandviç kompozitler, PVC köpük, Karbon lifi, Mekanik özellikler.

The Effect of Carbon Fibre Orientations and Core Thicknesses on Compression and Flexural Properties of Sandwich Composites

ABSTRACT: Sandwich composite structures are commonly used in different areas such as aerospace, marine, space, architectural structures where high strength and stiffness are required as well as the weight is a critical problem. Mechanical properties of the sandwich panels were affected by facesheets type, facesheet density and dimensions of the core materials. In this study, different thicknesses of PVC (polyvinyl chloride) foams were used as corepart of sandwich panels. PVC foam cores and sandwich composites with unidirectional and biaxial carbon fiber fabric face sheets were produced using vacuum infusion method and strength of the panels which have different fiber orientations were compared with 3-point bending and compression tests. Also, the effect of core thickness on core shear stress and flexural strength was investigated by using core materials of different thickness PVC foam. As a result, directions of fiber in facesheets was observed to be an important parameter in face strength. It was obtained that increasing the thickness of the core in the sandwich panels decreased the flexural and compressive strength of sandwich composites.

Keyword: Sandwich composites, PVC foam, Carbon fibre, Mechanical properties.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havacılık, otomotiv ve inşaat mühendisliği uygulamalarında sandviç kompozit yapıların hafif ve yüksek mukavemetleri nedeniyle kullanımı giderek artmaktadır (Hwang, 2016; Jin ve diğ., 2013; Kim ve diğ., 2016; Ning ve diğ., 2015; Park ve Seo 2012; Xu ve diğ., 2016; Wang ve diğ., 2016). Sandviç panelin ana bileşenleri; fiber, matris ve çekirdek (core) malzemeden oluşmaktadır. Panel tasarımı yapılırken karar verilmesi gereken bir sandviç yapının ana özellikleri arasında bulunan fiber malzeme, matris malzemesi ve liflerin yönelimi (oryantasyonu) ve çekirdek özellikleri bulunur (Chowdhury ve diğ., 2016; Dawood ve diğ., 2015; Lu ve Youngblood 2015; Yamamoto ve diğ., 2016). Sandviçin yüzey laminant malzeme seçiminde, ağırlık oranına göre yapılan kıyaslamalar incelendiğinde KFTP'nin (karbon fiber takviyeli plastik) tercih edildiği görülmektedir (Dhieb ve diğ., 2016; Luo ve diğ., 2017).

Literatürde birçok araştırmacı, fiber takviyeli kompozit malzemeler kullanarak sandviç panellerin tasarımı ve üretimini kapsayan çeşitli sayısal ve deneysel çalışmalar yürütmüştür. Bir çalışmada karbon lifli tabakalar ile alüminyum petek çekirdeği arasında kırılmış Kevlar kullanılarak fiber ara yüzey sertliğinin etkinliği incelenmiş, reçine ve Kevlar liflerinden oluşan yapının, bir kompozit haline geldiği gözlemlenmiştir (Shi ve diğ., 2014). Alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozitin çarpma/darbe özelliğinin değişimi deney ve simülasyon analizi ile incelenmiştir (Han ve Cho., 2014). Delikli düz bir yapıya sahip sandviç kompozit malzemelerin eğme, basma ve darbe deneyleri ile performansları karşılaştırılmış ve ana katkı maddesi köpük olan sandviç kompozitleri, daha basit bir malzeme ile takviye ederek mekanik performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır (Yalkın ve diğ., 2015). Grafit köpük dolgulu sandviç kompozit ile alüminyum ve karbon fiber yüzeyli ve de bal peteği çekirdek malzemesi kullanılarak üretilen sandviç kompozitin dayanımı mekanik testlerle karşılaştırılmıştır (Quintana ve Maver, 2017). Alüminyum petek sandviç kompozitlerin kırılma davranışlarını araştırmak için, üç nokta eğme ve panel içi sıkıştırma testleri yapılmış, sandviç panellerin eğme testinden büyük ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir (Sun ve Li, 2017). Yapıştırıcı bağlayıcılar kullanarak alüminyum yüzeyli levhalar ile güçlendirilmiş ve EPS (genleşmiş polistren köpük) çekirdekli sandviç kirişlerin düşük hızda darbe ve eğilme davranışı araştırılmıştır (Caliskan ve Apalak, 2017). Çeşitli eğilme davranışları sergileyen yeni bir sandviç kompozitin tasarım ve üretimi için 3B üretim tekniği, sayısal analiz ve deneyler birlikte kullanılmıştır (Wang ve diğ., 2018). Yeni bir oluklu sandviç yapısı tasarlanarak üretilen sandviç kompozitlerin mekanik davranışları ve bozulma mekanizması incelenmiş; mukavemet, sertlik ve basınç bozulma altında hasar tespiti için analitik modeller geliştirilmiştir (Xu ve diğ., 2018). Sandviç kompozit içerisine yerleştirilen z-pimleri için en uygun boyut ve hacimsel oran, basma testleri yapılarak belirlenmiş ve z-pimli sandviç kompozitlerin basma özelliklerini tahmin edebilmek için bir model sunulmuştur (Mouritz, 2006). PVC köpük dolgusu içine üçgen formunda prizmatik oluklu bir yapı oluşturmak için 3B dokunmuş cam elyafı ekleyerek takviye sağlanan sandviç panellerde, yarı-statik basma gerilme gerinim tepkisi deneysel olarak araştırıldı ve mikromekanik hesaplamalarla karşılaştırıldı (Malcom ve diğ., 2013). Yüzey plakası olarak kırılmış cam elyafı/polyester laminant ve dolgu malzemesi olarak poliüretan köpük kullanılarak üretilen sandviç panellerin içerisine yerleştirilen polyester pimlerin etkisi, farklı yükleme oranlarında uygulanan eğme ve basma testleriyle araştırılmıştır (Abdi ve diğ., 2014). Farklı kalınlıkta PVC köpük malzeme ve yüzeyde örgü dizimli karbon elyaf kumaşlar kullanılarak çekirdek kalınlığının eğilme direnci üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır (Geren ve diğ. 2017). Farklı bir çalışmada ise, köpük dolgulu bal peteği sandviç panellerde dolgu içine yerleştirilen farklı çaplardaki polyester pimlerin etkisi, basma ve düşük hızlı darbe testleri ile incelenmiştir (Jayaram ve diğ., 2018). Karbon ve cam epoksi yüzey plakalarına sahip (Ekstrüde Polistren) XPS çekirdekli sandviç kompozit panellere yerleştirilen karbon/cam çubukların eğilme mukavemetine katkısı araştırılmıştır (Selver ve Kaya, 2019).

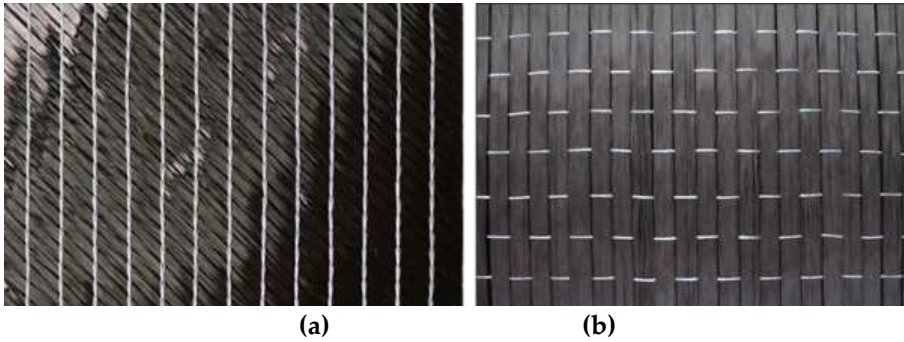
Genel olarak literatür incelendiğinde, çekirdek veya yüzey malzemesi değiştirilerek ya da özgün sandviç paneller tasarlanarak sandviç yapıların darbe direnci, eğilme ve basma dayanımı çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalarla araştırılmıştır. Bu çalışmada ise, çekirdek yapısında farklı kalınlıkta PVC köpük kullanılarak ve yüzey plakalarında fiber yönlendirmeleri değiştirilerek üretilen kompozit sandviç panellerin

eğilme ve basma dayanımları karşılaştırılmıştır. Sandviç paneldeki çekirdek kalınlığının etkisi üç nokta eğilme ve basma testi ile karşılaştırılmıştır. Yüzey plakalarındaki fiber yönlendirmelerinin etkisi ise, eğilme testinden elde edilen veriler ile yüzey gerilmeleri ve çekirdek kayma gerilmeleri bulunarak incelenmiştir. Panellerin KFTP kompozit yüzey plakalarında açılal yönlendirmeleri elde etmek için tek yönlü ve çift eksenli karbon fiber kumaşlar takviye olarak kullanılmıştır. Kullanılan iki farklı takviye kumaşın deneysel çalışmalara etkisini yorumlayabilmek için yüzeydeki plakalardan çekme ve basma numuneleri üretilerek mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

MATERYAL VE METOT (MATERIAL and METHOD)

Malzemeler (Materials)

Bu çalışmada KFTP, üretilecek sandviç paneller için yüzey plaka malzemesi olarak tercih edilmiştir. Farklı yönlendirmelerde 2 farklı tip karbon fiber kumaş, sandviç panellerin yüzey laminantında takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Kullanılan bu takviye kumaşlar, 300 g/m² tek yönlü (Unidirectional:UD) ve 300 g/m² çift eksenli (Biaxial:BA) karbon kumaşlardır (Şekil 1). Kumaşlar Dost Kimya'dan temin edilmiştir (Dost Kimya, 2018).



Şekil 1. Takviye karbon fiber kumaşlar, (a) BA (+45/-45) (b) UD

Figure 1. Carbon fiber fabrics (a) BA (+45/-45) (b) UD

KFTP matrisi için termoset grubuna giren BOND 300L-BOND300H epoksi reçine seti kullanılmıştır (Dost Kimya, 2018). Sandviç kompozit panelin çekirdeği için ise 10, 20 ve 30 mm kalınlığında 47 kg/m³ yoğunlukta PVC köpük malzeme kullanılmıştır.

Numunelerin hazırlanması (Sample preparation)

Çalışmada, 3 farklı kalınlıkta PVC köpük malzemesi çekirdek olarak kullanılmış ve 6 farklı yönlendirmede (Şekil 2) karbon fiber kumaşların serimi yapılmıştır. Bu farklı yönlendirmelerin ve çekirdek kalınlığının sandviç yapının mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sandviç önyapılarda (preform), PVC çekirdeğin alt ve üst laminant kaplamalarında farklı yönlendirmelere göre serilen 300 g/m² tek yönlü (UD) ve 300 g/m² çift eksenli (BA) +45/-45 olmak üzere iki farklı karbon fiber kumaş takviye olarak kullanılmıştır (Şekil 2). Epoksi reçine ve sertleştiriciden oluşan matris malzeme, vakum infüzyon yöntemini kullanarak sandviç ön yapıların üzerine aktarılmıştır. Vakum infüzyon yöntemiyle kompozit yüzey plakalarının üretimi ve plakaların çekirdek malzemeye yapışması tek bir işlemde sağlanarak sandviç kompozit malzemeler üretilmiştir. Reçine aktarılan sandviç yapılar tekstil mühendisliği bölümü kompozit laboratuvarında bulunan vakum infüzyon masasında 80° C'de 2 saat kürleşmeye bırakılmıştır (Şekil 3). Reçine üretici firmanın tavsiyesiyle post-cure işlemi yapılmamıştır.

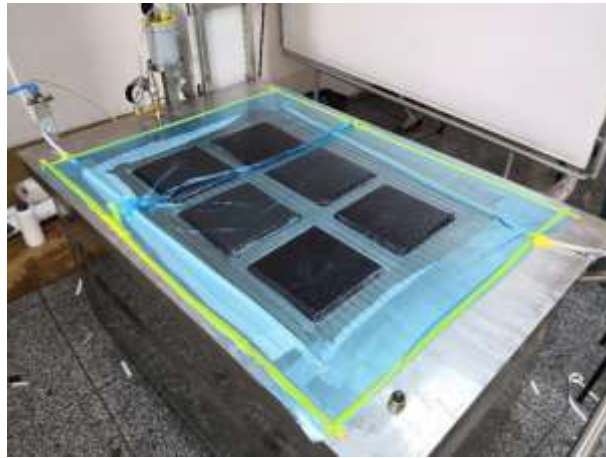
YÖNLENME 1 (Y1) [0/90/0] _s			YÖNLENME 2 (Y2) [+45/90/-45] _s			YÖNLENME 3 (Y3) [+45/-45/+45] _s		
0	0	0	+45	+45	+45	+45	+45	+45
90	90	90	90	90	90	-45	-45	-45
0	0	0	-45	-45	-45	+45	+45	+45
10	20	30	10	20	30	10	20	30
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC
0	0	0	-45	-45	-45	+45	+45	+45
90	90	90	90	90	90	-45	-45	-45
0	0	0	+45	+45	+45	+45	+45	+45

YÖNLENME 4 (Y4) [0/+45/90/-45] _s			YÖNLENME 5 (Y5) [45/90/45/90] _s			YÖNLENME 6 (Y6) [0/45/0/90] _s		
0	0	0	+45	+45	+45	0	0	0
+45	+45	+45	90	90	90	+45	+45	+45
90	90	90	-45	-45	-45	0	0	0
-45	-45	-45	90	90	90	90	90	90
10	20	30	10	20	30	10	20	30
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
PVC	PVC	PVC	PVC	core	PVC	PVC	PVC	PVC
-45	-45	-45	90	90	90	90	90	90
90	90	90	-45	-45	-45	0	0	0
+45	+45	+45	90	90	90	+45	+45	+45
0	0	0	+45	+45	+45	0	0	0

Şekil 2. Fiber yönlenmeleri

Figure 2. Fiber orientations

Sandviç panellerde kullanılan yüzey laminant kaplamaların (karbon/epoksi plakalar) mekanik özelliklerini tespit edebilmek için de ayrıca kompozit numuneler üretilmiştir. Laminantların çekme dayanımını belirlemek için tek yönlü (UD) ve çift eksenli (BA) takviye kumaşlardan 6'şar kat, kayma modülünü belirlemek için ise 8 kat takviye kumaş serilmiştir. Daha sonra serilen bu takviye kumaşlara vakum infüzyon masasında reçine emdirilerek sandviç yapı üretiminde olduğu gibi kürlenmeleri sağlanmıştır.



Şekil 3. Vakum infüzyon yöntemiyle sandviç kompozitlerin üretilmesi

Figure 3. Manufacturing of sandwich composites using vacuum infusion method

Test metotları (Test methods)

Üretilen karbon/epoksi plakalardan ve köpükten alınan numunelerin yoğunluk deneyi ASTM D792-08 standardına göre yoğunluk ölçer kullanılarak yapılmıştır. KFTP kompozit laminantların 3 farklı ekseninde (E_1, E_2, G_{12}) makro mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme dayanımını belirlemek için ASTM D 3039'a göre (şekil 4), kayma dayanımlarını belirlemek için ise ASTM D 3518 'e göre testler yürütülmüştür. Ayrıca laminantların boyuna ve enine basma dayanımlarını belirlemek için ASTM D 7137 standartlarına göre üretilen özel test aparatı kullanılarak testler yürütülmüştür. Test numunelerinin ölçüm bölgesinden kırılması için cam epoksi laminantlardan bantlama uygulaması yapılmıştır. Numuneler standartlara uygun olarak 250 mm boyunda ve 25 mm eninde olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Çekme testi numunesi ve tek yönlü bir laminantın eksenleri

Figure 4. Tensile test specimen and axis of unidirectional laminates

Çekme testinde, lif (1) yönündeki ve life normal (2) yöndeki elastisite modülü ve çekme dayanımları ile kayma modülü ve kayma dayanımı belirlenmiş, Poisson oranları ise teorik olarak (mikro mekanik) hesaplanmıştır. Testler, Zwick marka test cihazında 3 mm/dk hızda gerçekleştirilirken E_1, E_2, G_{12} her bir sabit için 5'er adet olmak üzere toplamda 15 numune test edilmiştir. Yüzey laminant kaplamalarının Poisson oranları mikro mekanik teorik hesaplama metoduna göre (denklem 1) yapılmıştır.

$$v_{12}^c = v_m V_m + v_f V_f \quad (1)$$

Sandviç kompozitin yüzeyindeki karbon plakaların fiber hacim oranları aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır;

$$V_f = \frac{\text{Fiber hacmi}}{\text{Kompozit hacmi}} = \frac{W_f/d_f}{L \times w \times h} = \frac{(n_{kat} \times g_r \times L \times w)/d_f}{L \times w \times h} = \frac{n_{kat} \times g_r}{h \times d_f} \quad (2)$$

Sandviç panellere ait eğme testi numuneleri ASTM C393'e göre uygun boyutlarda ve üç farklı kalınlıktaki altı ekseninde yönlenme için 3'er adet olmak üzere toplamda 54 eğme testi numunesi hazırlanmıştır (Şekil 5). Farklı kalınlıklarda kullanılacak olan PVC çekirdek malzemeleri 40 x 220 mm ebatlarında hazırlanmıştır. Mesnetler arası mesafe 120 mm iken mesnet silindir çapları 20 mm'dir. Eğme deneyinde 4 mm/dk hızında yürütülen deneylerde numunelerin eğilme dayanımları, çekirdek kayma gerilmeleri ve yüzey dayanımları denklem (3 ve 5) bağıntıları ile hesaplanmıştır.

$$\text{Eğilme Dayanımı (ASTM D790)} \quad \sigma_f = \frac{3PL}{bd^2} \quad (3)$$

$$\text{Çekirdek Kayma Gerilmesi (ASTM C393)} \quad F_s^{ult} = \frac{3P_{max}}{(d+c)b} \quad (4)$$

$$\text{Yüzey Gerilmesi (ASTM C393)} \quad \sigma = \frac{3P_{max}S}{2t(d+c)b} \quad (5)$$

Karbon/epoksi laminantlarla kaplanarak üretilen sandviç panellerin eğme deneyinde 10, 20 ve 30 mm PVC kalınlıklarına ve laminantlarının 6 farklı yönlenmesine göre eğilme dayanımları hesaplanmıştır.



Şekil 5. Sandviç kompozitlerin eğme deneyi

Figure 5. Flexural test of PVC foams and sandwich composites

Basma deneyi için, PVC köpüklerden 10, 20, 30 mm kalınlıklarındaki çekirdek malzemeler kullanılarak üretilen sandviç panellerin ASTM C365 standartlarına uygun numuneleri üretilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yoğunluk deneylerinde takviye kumaşlar farklı olsa da üretilen karbon-epoksi laminantların yoğunlukları UD için ortalama 1.47 g/cm^3 ve BA için 1.41 g/cm^3 bulunmuş ve birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca PVC köpük malzemenin ortalama 47 kg/m^3 yoğunluğa sahip olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Yüzey malzemeleri ve çekirdek malzemenin yoğunluk deneyi sonuçları

Table 1. Density test results of face and core materials

Numuneler	UD kompozit	BA kompozit	PVC köpük
Yoğunluk (g/cm^3)	1.47 (± 0.020)	1.41 (± 0.021)	0.047 (± 0.001)
Kalınlık (mm)	1.95(± 0.03)	2.14 (± 0.03)	10-20-30
Lif hacim oranı (%)	51.86	47.25	-

Yüzey kompozitlerin çekme ve basma test sonuçları (Tensile and compression test results of face materials)

Dış yüzeylerde kullanılan karbon epoksi laminantların kaplamaların mekanik özellikleri (Çizelge 2) irdelendiğinde UD takviye kumaş için fiber yönündeki dayanımın doğal olarak en yüksek sonucu verdiği, BA kumaş için ise simetrik yapıda dokumaya sahip olduğu için E_1 ve E_2 yönünde elastisite modüllerinin eşit olduğu görülmüştür. Enine ve boyuna basma dayanımları karşılaştırıldığında, UD kompozit plakanın fiber yönünde 918 MPa ile en yüksek dayanıma sahip olduğu BA kumaş takviyeli kompozit plakada ise 90 MPa ile enine ve boyuna basma dayanımlarının eşit olduğu görülmüştür.

Çizelge 2. Yüzey laminant kaplamaların mekanik özellikleri

Table 2. Mechanical properties of face laminates

Mekanik Özellikler	UD karbon kumaş	+45/-45 BA karbon kumaş
E ₁ (GPa)	101 (±9)	24 (±2.20)
E ₂ (GPa)	3.35 (±0.50)	24 (±2.20)
G ₁₂ (GPa)	7.15 (±0.90)	85 (±6)
Boyuna Çekme Dayanımı (MPa)	1410 (±136)	102 (±8)
Enine Çekme Dayanımı (MPa)	15.15 (±1.30)	102 (±10)
Kayma Dayanımı (MPa)	89.12 (±10)	413 (±36)
Boyuna basma dayanımı (MPa)	918 (±45)	90 (±12)
Enine Basma Dayanımı (MPa)	80 (±12)	90 (±12)
Poisson Oranı	0.32	0.31

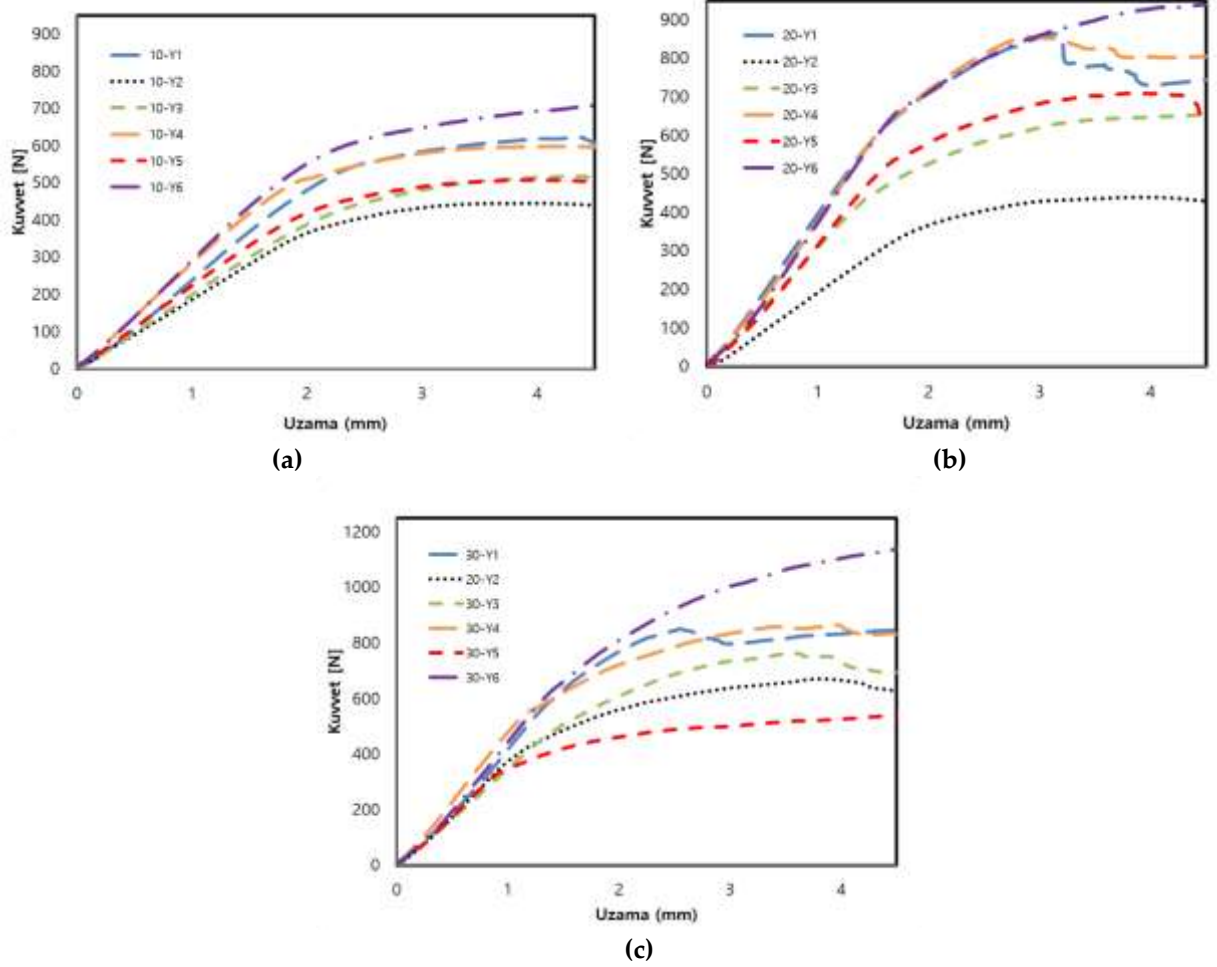
Sandviç kompozitlerin eğme testi sonuçları (Flexural test results of sandwich composites)

Üç nokta eğme deneyi sonrası numunelerde oluşan kalıcı bozulmalar Şekil 6'da verilmiştir. Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip panellerin eğme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-uzama grafikleri (Şekil 7 ve Çizelge 3) incelendiğinde kalınlık arttıkça maksimum kuvvetin arttığı ortaya çıkmıştır. 10 mm PVC panelde maksimum kuvvetin 726 N, 20 mm için 935 N, 30 mm için ise 1165 N olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Eğme deneyi sonrası numunelerde oluşan hasarlar

Figure 6. Damages of specimens after flexural testing



Şekil 7. Farklı kalınlıktaki PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait eğme testi sonucu oluşan kuvvet-uzama grafikleri: **(a)** 10 mm PVC çekirdekli paneller, **(b)** 20 mm PVC çekirdekli paneller, **(c)** 30 mm PVC çekirdekli paneller

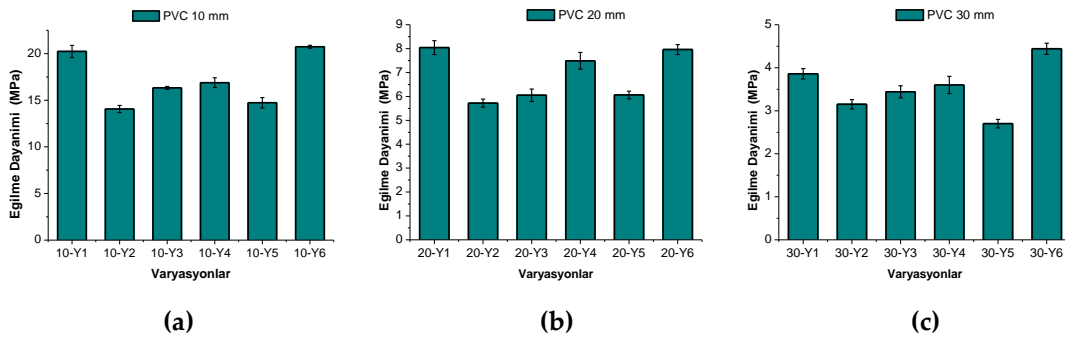
Figure 7. Force-elongation graphics obtained by the flexural test of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientations, **(a)** 10 mm PVC core panels, **(b)** 20 mm PVC core panels, **(c)** 30 mm PVC core panels

Çizelge 3. PVC sandviç kompozitlere ait eğme deneyi sonuçları

Table 3. Flexural test results of PVC sandwich composites

Sandviç Paneller	Maksimum Kuvvet (N)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Çekirdek Kayma Gerilmesi (kPa)	Yüzey Gerilmesi (MPa)
10-Y1	623 (±16)	20.23 (±0.65)	680 (±14.12)	41.04 (±1.13)
10-Y2	439 (±9)	14.06 (±0.80)	480 (±8.10)	28.83 (±0.70)
10-Y3	512 (±15)	16.32 (±0.16)	560 (±15.87)	33.67 (±0.98)
10-Y4	587 (±14)	16.88 (±0.52)	620 (±9.52)	18.63 (±0.39)
10-Y5	511 (±12)	14.73 (±0.56)	550 (±10.65)	16.45 (±0.64)
10-Y6	726 (±23)	20.73 (±0.16)	780 (±14.91)	23.31 (±0.97)
20-Y1	867 (±20)	8.04 (±0.29)	500 (±9.36)	29.86 (±1.20)
20-Y2	668 (±25)	5.72 (±0.17)	370 (±12.10)	22.12 (±0.63)
20-Y3	671 (±18)	6.05 (±0.26)	390 (±16.54)	23.15 (±0.74)
20-Y4	846 (±9)	7.49 (±0.35)	500 (±22.37)	15.02 (±0.79)
20-Y5	705 (±24)	6.06 (±0.16)	410 (±20.89)	12.23 (±0.71)
20-Y6	935 (±21)	7.96 (±0.21)	530 (±13.18)	15.86 (±0.54)
30-Y1	914 (±17)	3.86 (±0.12)	350 (±9.25)	19.10 (±0.80)
30-Y2	748 (±32)	3.15 (±0.11)	290 (±9.65)	17.52 (±0.51)
30-Y3	835 (±20)	3.44 (±0.14)	320 (±10.83)	25.58 (±0.76)
30-Y4	886 (±31)	4.44 (±0.20)	340 (±15.08)	10.20 (±0.29)
30-Y5	789 (±15)	2.7 (±0.10)	250 (±7.51)	7.54 (±0.38)
30-Y6	1165 (±19)	3.60 (±0.13)	430 (±10.76)	10.36 (±0.64)

Farklı yönlenmelerine göre eğilme dayanımları (Şekil 8) incelendiğinde fiber yönleri 90°'den 0°'ye doğru yaklaştıkça eğilme dayanımlarının arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, kompozit malzemelere yük uygulandığında, lif yönünde daha fazla yük taşınabilmesidir. Çizelge 2'den de görüldüğü gibi karbon plakaların E₁ değeri E₂ değerinden çok daha yüksek çıkmıştır. Bu bakımdan en yüksek dayanımların 3 katlı laminant yüzeylerde [0/90/0]_s 1.yönlenme, 4 katlı laminant modellerde ise [0/45/0/90]_s 6.yönlenmenin olduğu ortaya çıkmıştır.



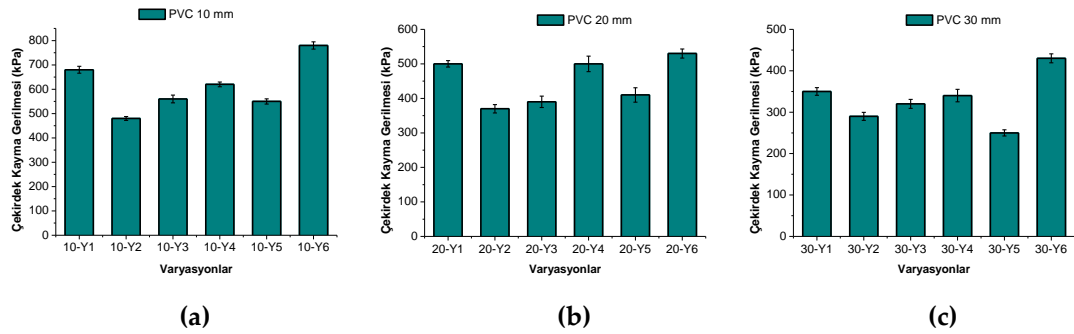
Şekil 8. Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait eğilme dayanımı sonuçları: (a) 10 mm PVC çekirdekli paneller, (b) 20 mm PVC çekirdekli paneller, (c) 30 mm PVC çekirdekli paneller

Figure 8. Flexural strength results of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientations: (a) 10 mm PVC core panels, (b) 20 mm PVC core panels, (c) 30 mm PVC core panels

Çekirdek kayma gerilmesinde (Şekil 9) 10, 20 ve 30 mm PVC köpükler kıyaslandığında, kalınlık arttıkça çekirdek kayma dayanımının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi çekirdek kayma dayanımı hesaplanırken kalınlığın iki kat artarken kuvvetin aynı oranda artmamasından dolayı kalınlık ve dayanım ters orantılı olarak değişmektedir. Bu sonuç aynı zamanda alan atalet momenti ile de ilişkilendirilebilir.

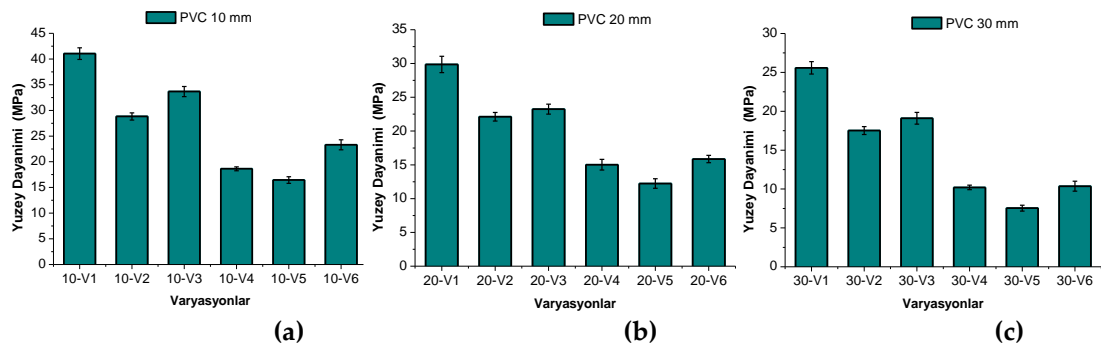
(Elemanter bir alana etkiyen elemanter bir kuvvet, mesafe ve diferansiyel alan ile orantılı olur). Yönlenme modellerine göre çekirdek kayma gerilmeleri incelendiğinde eğilme dayanımıyla benzer sonuçlar elde edilmiştir. 3 kat takviyeli laminantlardaki 1.yönlenme en yüksek, 4 katlı laminantlardan ise 6.yönlenmenin en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. 10 mm PVC köpük sandviçte en yüksek çekirdek kayma dayanımının 780 kPa (Y6), 20 mm PVC için 530 kPa (Y6), 30 mm için ise 430 kPa (Y6) değerleri ölçülmüştür (Çizelge 3).

Sandviç kompozit yapının üst ve alt plaka dayanımı sonuçları (Şekil 10) yönlenme tiplerine göre incelendiğinde, laminantlardaki 0° ve 45° yönelimlerini kıyaslamak için oluşturulan Y₁ ve Y₂ panellerinde, UD takviyeli laminanın E₁ (fiber yönü) modülünün BA +45/-45 takviyeli laminanın G₁₂ kayma modülünden yüksek olduğu (Çizelge 2), bu sebeple her iki modeldeki panellerin eğilme, çekirdek kayma ve yüzey dayanımları karşılaştırıldığında iki kat 0° yönünde UD laminaya sahip Y₁ modelinde daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. 45° ve 90° 'de serilen takviyeler Y₂ ve Y₃ yönlenmelerinden elde edilen dayanımlar karşılaştırıldığında 45° fiber yönündeki laminantların yüzey dayanımlarının 90° 'den üstün olduğu görülmektedir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde fiber yönleri 90° 'den 0° 'ye yaklaştıkça sandviç kompozitin eğilme, yüzey ve çekirdek dayanımının arttığı görülmüştür. PVC çekirdek kalınlıklarının etkisine bakıldığında ise kalınlık arttıkça eğilme, çekirdek kayma ve yüzey dayanımlarının nicel olarak azaldığı fakat ölçülen maksimum kuvvetlerin arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 9. Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait çekirdek kayma gerilmesi sonuçları: (a) 10 mm PVC çekirdekli paneller, (b) 20 mm PVC çekirdekli paneller, (c) 30 mm PVC çekirdekli paneller

Figure 9. Core shear stress results of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientation: (a) 10 mm PVC core panels, (b) 20 mm PVC core panels, (c) 30 mm PVC core panels

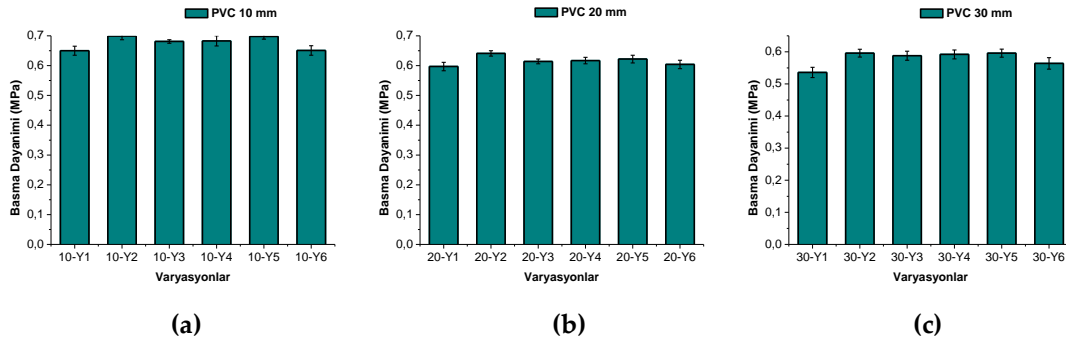


Şekil 10. Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait yüzey dayanımı sonuçları: (a) 10 mm PVC çekirdekli paneller, (b) 20 mm PVC çekirdekli paneller, (c) 30 mm PVC çekirdekli paneller

Figure 10. Face stress results of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientation: (a) 10 mm PVC core panels, (b) 20 mm PVC core panels, (c) 30 mm PVC core panels

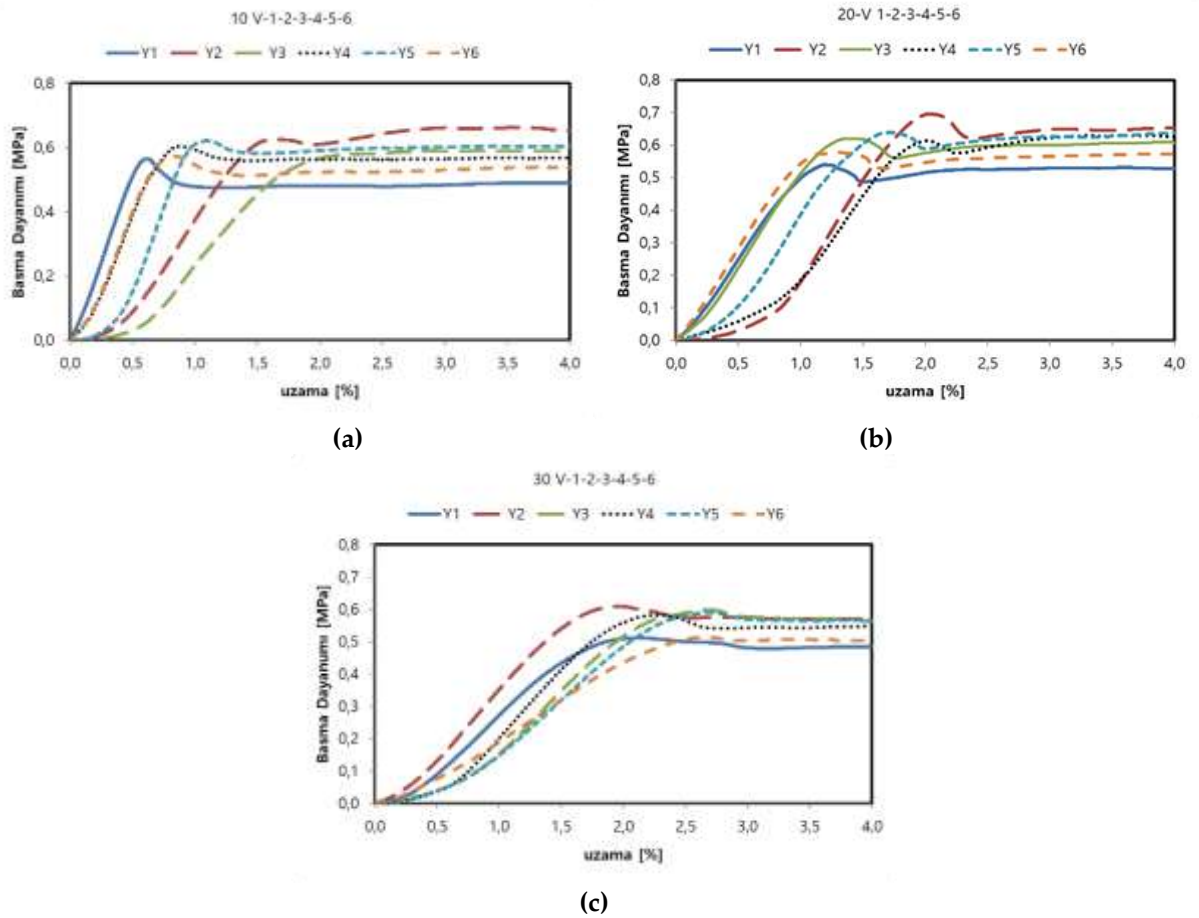
Sandviç kompozitlerin basma dayanımı test sonuçları (Compression test results of sandwich composites)

PVC çekirdekli sandviç panellerde, fiber yönlendirmelerinin basma dayanımı etkisi araştırıldığında yüzey plakalarının basma dayanımını çok fazla etkilemediği, fakat çekirdek kalınlığı arttıkça maksimum basma kuvvetinin azaldığı (Şekil 11 ve 12) tespit edilmiştir. Farklı yönlendirmelerde yapılan basma deneylerinde görülen maksimum kuvvetler PVC 10 mm sandviç kompozit için maksimum kuvvet 1119 N-1040 N, 20 mm için 1025 N-955 N, 30 mm için 954 N-855 N aralıklarında değiştiği görülmüştür. Standartlara (ASTM C365) uygun olarak yapılan basma deneyinde PVC panellere ait maksimum basma kuvveti değerlerinin kalınlık artmasına bağlı olarak ortalama %9 oranında azaldığı görülmüştür (Çizelge 4).



Şekil 11. Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlendirmede kaplamalarına ait basma dayanımı sonuçları: **(a)** 10 mm PVC çekirdekli paneller, **(b)** 20 mm PVC çekirdekli paneller, **(c)** 30 mm PVC çekirdekli paneller

Figure 11. Results of compressive strength of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientations: (a) 10 mm PVC core panels, (b) 20 mm PVC core panels, (c) 30 mm PVC core panels



Şekil 12. Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait gerilim-uzama (%) uzama grafikleri: **(a)** 10 mm PVC çekirdekli paneller, **(b)** 20 mm PVC çekirdekli paneller, **(c)** 30 mm PVC çekirdekli paneller

Figure 12. Strength-elongation graphics of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientation: **(a)** 10 mm PVC core panels, **(b)** 20 mm PVC core panels, **(c)** 30 mm PVC core panels

20 mm çekirdekli panelde 10 mm çekirdekli panele göre basma kuvvetinin ortalama %8 azaldığı, 30 mm çekirdekli panelde ise 20 mm çekirdekli panele oranla ortalama %10 azaldığı sonuçlarda görülmektedir. Bunun nedeni, çekirdek kalınlığı arttıkça PVC çekirdekte bulunan gaz molekül sayısı artmakta ve basma anında yüke karşı olan dayanım zayıflayarak malzeme daha kolay hasara uğramaktadır. Aynı kalınlıktaki tüm yönlenmelerde panellerin basma dayanımları sırası aynı eğilimi izlemiştir. 3 kat lamina kaplamaya sahip Y1,Y2,Y3 panellerinde basma dayanımı sırası $Y2 > Y3 > Y1$ şeklinde meydana gelirken, 4 kat tabakaya sahip Y4,Y5,Y6 yönlenmelerinde ise basma dayanımı $Y5 > Y4 > Y6$ olarak sonuçlanmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 4. Sandviç kompozitlerin basma testi sonuçları*Table 4. Compression test results of sandwich composites*

Sandviç Paneller	Maksimum Kuvvet (N)	Basma Dayanımı (MPa)
10-Y1	1040 (±40)	0.650 (±0.015)
10-Y2	1119 (±13)	0.699 (±0.012)
10-Y3	1089 (±18)	0.681 (±0.006)
10-Y4	1093 (±36)	0.683 (±0.017)
10-Y5	1116 (±27)	0.698 (±0.009)
10-Y6	1042 (±65)	0.651 (±0.016)
20-Y1	955 (±37)	0.597 (±0.014)
20-Y2	1025 (±25)	0.641 (±0.009)
20-Y3	982 (±42)	0.614 (±0.008)
20-Y4	987 (±70)	0.617 (±0.011)
20-Y5	995 (±15)	0.622 (±0.013)
20-Y6	967 (±22)	0.604 (±0.014)
30-Y1	858 (±36)	0.536 (±0.016)
30-Y2	954 (±52)	0.596 (±0.012)
30-Y3	941 (±19)	0.588 (±0.014)
30-Y4	947 (±52)	0.592 (±0.014)
30-Y5	953 (±38)	0.596 (±0.012)
30-Y6	903 (±26)	0.564 (±0.018)

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, PVC köpük çekirdek malzemesi ve yüzey laminant kaplamalarında karbon elyaf takviye içeren sandviç kompozit paneller üretilmiştir. PVC çekirdek malzemelerin yüzeyleri 6 farklı yönlenmede karbon fiber kompozit plakalarla kaplanarak fiber yönlenmelerinin sandviç panelin yüzey gerilmesine etkisi araştırılmıştır. Aynı zamanda PVC köpükler aynı yoğunlukta seçilirken 10, 20 ve 30 mm farklı kalınlıklarda kesilerek sandviç paneldeki çekirdek kalınlığının eğilme dayanımı, çekirdek kayma gerilmesi ve basma dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Ayrıca sandviç kompozit yüzeyindeki kompozit plakaların çekme ve basma deneyleri yürütülmüştür. Bu deneylerle kullanılan tek yönlü (UD) ve çift eksenli (BA) +45/-45 takviye karbon fiber kumaşlarla üretilen kompozit plakaların mekanik özellikleri elde edilmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlar ise;

- Sandviç panellerde üç nokta eğme testi sonucunda, eğilme dayanımı, basma dayanımı çekirdek kayma ve yüzey gerilmesinin kalınlık arttıkça azaldığı, fakat maksimum eğme kuvveti kalınlıkla doğru orantılı olarak ortalama %26 artmıştır.
- Yönlenmede ise fiber yönleri 90°'den 0°'ye yaklaştıkça plaka dayanımının arttığı görülmüştür.
- Panellerin basma dayanımlarının ve ölçülen maksimum basma kuvvetlerinin çekirdek kalınlığıyla doğru orantılı olarak azaldığı tespit edilmiştir.
- Sonuç olarak, panellerde çekirdek kalınlığının artmasıyla panelin daha fazla eğme kuvvetine karşı direnç gösterdiği fakat basma yüklerine maruz kalındığında ise çekirdek kalınlığının artmasıyla ters orantılı olarak basma mukavemetinin düştüğü tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No:2017/2-36-YLS).

SEMBOLLER (SYMBOLS)

- E_1 : Boyuna elastisite modülü
 E_2 : Enine elastisite modülü
 G_{12} : Kayma modülü
 ν_{12}^c, ν_m, ν_f : Sırasıyla kompozit, matris ve fiber Poisson oranları
 V_m, V_f : matris ve fiber hacim oranları (%)
 W_f : Takviye fiberin ağırlığı
 d_f : Takviye fiberin yoğunluğu
 L, w, h : Sırasıyla numune uzunluğu, genişliği ve kalınlığı
 g_f : Takviye kumaşın birim alan yoğunluğu
 n_{layer} : Laminanttaki tabaka sayısı
 σ_f : Eğilme Dayanımı
 F_s^{ult} : Maksimum çekirdek kayma gerilmesi
 P, P_{max} : Kuvvet
 L, S : Yükleme uzunluğu
 b : Numune genişliği
 d : Numune Kalınlığı
 c : Çekirdek Kalınlığı
 t : Yüzey laminant kalınlığı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdi, B., Azwan, S., Abdullah, M.R., Ayob, A., Yahya, Y., Xin, Li., 2014, "Flatwise compression and flexural behavior of foam core and polymer pin-reinforced foam core composites and sandwich panels", *Int. J. Mech. Sci.*, Cilt 88, ss. 138-144.
- Caliskan, U., Apalak, M.K., 2017, "Low velocity bending impact behavior of foam cores and sandwich beams: Experimental" *Compos Part B*, Cilt. 112, ss. 158-175.
- Chowdhury, N.M., Chiu, W.K., Wang, J., Chang, P., "Experimental and finite element studies of bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy panels used in aircraft structures", 2016, *Compos Part B*, Cilt 100, ss. 68-77.
- Dawood, M., El-Tahan, M.W., Zheng, B., 2015, "Bond behavior of super elastic shape memory alloys to carbon fiber reinforced polymer composites", *Compos Part B*, Cilt 77, ss. 238-247.
- Dhieb, H., Buijnsters, J.G., Elleuch, K., Celis, J.P., 2016, "Effect of relative humidity and full immersion in water on friction, wear and debonding of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy under reciprocating sliding", *Compos Part B*, Cilt 8, ss. 240-252.
- Dost Kimya, Karbon fiber takviyeler ve epoksi reçineler, <http://kompozit.net>, ziyaret tarihi:15Kasım 2018.
- Geren, N., Uzay, Ç., Boztepe, M.H., Bayramoğlu, M., 2017 "Sandviç Malzeme Geliştirmede Polimer Köpük Kalınlığının Eğilme Dayanımına Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 32(2), ss. 13-22.
- Han, M.S., Cho, J.U., 2014, "Impact damage behavior of sandwich composite with aluminum foam core", *Trans Nonferrous Met SocChina*, Cilt 24, ss. 42-46.
- Hwang, S., 2016, "Tensile, electrical conductivity and EMI shielding properties of solid and foamed PBT/carbon fiber composites", *Compos Part B*, Cilt 98, ss.1-8.
- Jayaram R.S., Nagarajan V.A., Vinod Kumar K.P., 2018, "Compression and low velocity impact response of sandwich panels with polyester pin-reinforced foam filled honeycomb core", *J. Sandwich Struct. Mater.*, Cilt 0(0), ss. 1-17.
- Jin. F.L., Lee S.Y., Park, S.J., 2013, "Polymer matrices for carbon fiber-reinforced polymer composites", *Carbohydr Lett*, Cilt 14, ss. 76-88.

- Kim, M., Sung, D.H., Kong, K., Kim, N., Kim, B.J., Park, H.W., et al., 2016, "Characterization of resistive heating and thermoelectric behavior of discontinuous carbon fiber-epoxy composites" *Compos Part B*, Cilt 90, ss. 37-44.
- Lu, J.H., Youngblood, J.P., 2015, "Adhesive bonding of carbon fiber reinforced composite using UV-curing epoxy resin", *Compos Part B*, Cilt 82, ss. 221-225.
- Luo, B., Yan, R., Zeng, H., Xu, L., 2017, "The mechanical behavior of sandwich composite joints for ship structures", *Ocean Engineering*, Cilt 144, ss. 78-89.
- Malcom A.J., Aronson M.T., Deshpande V.S., Wadley H.N.G., 2013, "Compressive response of glass fiber composite sandwich structures", *Compos Part A*, Cilt 54, ss. 88-97.
- Mouritz., A.P., 2006, "Compression properties of z-pinned sandwich composites", *J. Mater. Sci.*, Cilt 41, ss. 5771-5774
- Ning F., Cong, W., Qiu, J., We,i J., Wang, S., 2015, "Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling", *ComposPart B*, Cilt 80, ss. 269-78.
- Park S.J, Seo M.K, 2012, "Carbon fiber-reinforced polymer composites: preparation, properties and applications", *Polymer composites*, Vol.1, Wiley-VCH VerlagGmbH&Co. KGaA., Weinheim, Germany.
- Quintana J.M., Maver T.M., 2017, "Thermomechanical behavior of sandwich panels with graphitic-foam cores" *Materials and Design*, Cilt 135, ss. 411-422.
- Selver, E., Kaya, G., 2019, "Flexural properties of sandwich composite laminates reinforced with glass and carbon Z-pins " *J Compos Mater*, Cilt 53 (10), ss. 1347-1359.
- Shi, S., Sun, Z., Hu, X., Chen, H., 2014, "Carbon-fiber and aluminum honeycomb sandwich composites with and without Kevlar-fiber interfacial toughening", *Compos Part A*, Cilt 67, ss. 102-110.
- Sun Y., Li Y., 2017, "Prediction and experiment on the compressive property of the sandwich structure with a chevron carbon-fibre-reinforced composite folded core", *Compos Sci Technol*, Cilt 150, ss. 95-101.
- Wang, F.S, Ji, Y.Y., Yu, X.S., Chen, H., Yue, Z.F., 2016, "Ablation damage assessment of aircraft carbon fiber/epoxy composite and its protection structures suffered from lightning strike", *Compos Struct*, Cilt 145, ss. 226-241.
- Wang, J., Shi, C., Yang, N., Liu, Y., Song, B., 2018, "Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composites and sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body", *Compos Struct*, Cilt 184, ss. 1189-1196.
- Xu, H., Zhang, X., Liu, D., Yan, C., Chen, X., Hui, D., 2016, "Cyclomatrix-type polyphosphazene coating: improving interfacial property of carbon fiber/epoxy composites and preserving fiber tensile strength" *Compos Part B*, Cilt 93, ss. 244-251.
- Xu, G., Wang,Z., Zeng, T., Cheng, S., Fang, D., 2018, "Mechanical response of carbon/epoxy composites and sandwich structures with three-dimensional corrugated cores", *Compos Sci Technol*, Cilt 156, ss. 296-304.
- Yalkin, H.E., Icten, B.M., Alpyildiz, T., 2015, "Enhanced mechanical performance of foam cores and sandwich composites with through the thickness reinforced core", *Compos Part B*, Cilt 79, ss. 383-391.
- Yamamoto, T., Uematsu, K., Irisawa, T., Tanabe, Y., 2016, "Controlling of the interfacial shear strength between thermoplastic resin and carbon fiber by adsorbing polymer particles on carbon fiber using electrophoresis", *Compos Part A*, Cilt 88, ss. 75-78.



THREE DEGREE OF FREEDOM LEG DESIGN FOR QUADRUPED ROBOTS AND FRACTIONAL ORDER PID ($PI\lambda D\mu$) BASED CONTROL

¹Muhammed Arif ŞEN , ²Veli BAKIRCIOĞLU , ³Mete KALYONCU 

^{1,3}Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Mechanical Engineering Department, Konya, TURKEY

²Aksaray University, Technical Science Vocational Education and Training School, Aksaray, TURKEY

¹masen@ktun.edu.tr, ²vbakircioglu@aksaray.edu.tr, ³mkalyoncu@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 16.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.10.2019)

ABSTRACT: Quadruped robots are legged mobile robots that increase their popularity in robotic and control areas due to their complex dynamic structure with high mobility in different terrain conditions compared to wheeled systems. In this study; A 3-DoF linear leg model and its control are provided in order to enable quick and effectively simulate about on such subjects that walking planning, foot trajectory design and body stability control of the robot. A realistic physical model with parameters such as the dimensions, masses, inertia of limbs and the stiffness and damping values of joints is designed and simulated on Matlab/Simulink/Simscape environment. By taking into account the angular position ranges of the joints required for the robot to perform a standard step trajectory during the walk, the linear State-Space model of the system (torque input-angular position output) is obtained using the linearization tools over the physical model. The unit step responses of the physical model are compared with the obtained linear model responses under constant torque input and it is understood to give similar results with small error values. Using the linear model, the angular position control of the system is achieved with $PI\lambda D\mu$ controllers designed by selecting various parameters of fraction orders as comparatively the classical PID controller. Simulation results are presented and investigated.

Key Words: 3-DoF quadruped robot leg, realistic model, linear modelling, $PI\lambda D\mu$ controller

Dört Ayaklı Robotlar için Üç Serbestlik Dereceli Bacak Tasarımı ve Kesir Dereceli PID ($PI\lambda D\mu$) Tabanlı Kontrolü

ÖZ: Dört ayaklı robotlar, tekerlekli sistemlere kıyasla farklı arazi şartlarında yüksek hareket kabiliyetine sahip, karmaşık dinamik yapısı nedeniyle robotik ve kontrol alanında popülerliğini artıran, bacaklı mobil robotlardır. Bu çalışmada; yürüyüş planlaması, adım yörüngesi tasarımı, gövdenin denge kontrolü gibi konularda hızlı ve etkili bir benzetim yapabilmek amacıyla, üç serbestlik dereceli doğrusal bacak modeli ve kontrolü sunulmuştur. Uzun boyutlar, kütle, atalet, eklem sertlik ve sönüm değerleri vb. gibi dinamik parametreleri içeren gerçekçi bir fiziksel model Matlab/Simulink/ Simscape'de tasarlandı ve benzetimi gerçekleştirildi. Robotun yürüyüşü boyunca standart bir adım yörüngesini gerçekleştirmek için gerekli eklemlere ait açılma konum aralıkları dikkate alınarak, fiziksel model üzerinden doğrusallaştırma araçları kullanılarak, girişi tork-çıkışı açılma konum olacak şekilde, sistemin doğrusal Durum-Uzay modeli elde edilmiştir. Sistemin doğrusal model ile fiziksel modelinin, sabit tork girişine karşın birim basamak cevapları karşılaştırılmış ve küçük hata değerleri ile modellere ait cevapların birbirine benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Doğrusal model üzerinden sistemin, farklı kesir dereceleri seçilerek tasarlanan

PIAD μ kontrolcüleri ile açısal konum kontrolü, klasik PID kontrolcü ile karşılaştırmalı olarak gerçekleştirmiştir. Benzetim sonuçları sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3-DoF dört ayaklı robot bacağı, gerçekçi model, doğrusal modelleme, PIAD μ kontrolc

INTRODUCTION

In the field of robotics, there are a growing interest in quadruped (four-legged) robots that mimic the dynamic characteristics of biological organisms. They can walk with agile mobility by imitating the dynamics of animals such as dogs, cheetahs, horses, etc. The inadequate mobility and limited diversity of wheeled robots on uneven terrain are motivating studies on quadruped robots (Raibert, 1986). Increase experimental and simulation studies in this field; It contributes to the development of skills to perform dangerous tasks for people such as search and rescue and cargo transportation in civil and military applications (Baudoin and Maki, 2010).

In recent years, there have been several successfully developed quadruped robots. Among the most important of these; The robots developed by Boston Dynamics; starting with the basic-stone study *BigDog* (Raibert et al., 2008) and continuing with *WildCat*, *LS3*, *Spot*, *SpotMini* (Boston Dynamics Company, 2019), *HyQ* (Semini et al, 2010) and *HyQ2Max* (Semini et al., 2017) which are developed by Semini et al. in Istituto Italiano di Tecnologia Institute (IIT) and *ANYmal* (Hutter et al., 2012) and *StarlETH* (Hutter et al., 2017) which are developed by Hutter et al. in ETH Zurich Institute. Presently, Semini et al. continue to develop a robot called *HyQReal* to support people in challenging tasks and emergencies. Hutter et al. is working on a robot named *ANYmal C*, which can be used in industrial applications. However, the system's very degree-of-freedom, complex, and floating type of dynamic structure makes the progress of studies difficult about quadruped robots.

In general, the dynamic model of a robotic system is obtained through the Lagrange Energy methods. However, in a multi-degree of freedom systems, the computational complexity of the Lagrange Equations may require very long formations (Wisama and Etienne, 2002). For this reason, systems can be defined by a mathematical model equivalent to Matlab/Simscape (The MathWorks) software, which saves time and troubles, where its physical structure is specified by some variables such as mass, geometry and kinematic relationships between its components. Another disadvantage is the nonlinear character of the system. In order to perform a fast and effective simulation with linear controllers, the equations of motion need to be simplified. In this case, model linearization is a common strategy that facilitates controller design.

Velásquez-Lobo et al. (2013) presented a study on the modeling and linearization of a two-legged robot with Simscape. The system was controlled by a PID controller via a linear model transferred to Simulink. Similarly, Rossell et al. (2015) presented the linearization of the system with Simscape and Simulink environments on the solid model of the Stewart platform developed and presented the trajectory control of the system in comparison with PID and LQR controllers.

In this study, the mathematical linear model of a leg is obtained via a realistic physical CAD model including parameters such as physical size, mass, inertia, joint stiffness, and damping which designed in Simscape. And, PID and PIAD μ controllers are designed and implemented using realistic inputs in Simulink. For a closer simulation to real systems, the system is generally referred to as 3-DoF (hip limb - hip/pitch joint, thigh limb-hip/roll joint, knee limb - knee joint), unlike studies designed as 2-DoF. In addition, the linearization is carried out within the joint angular position ranges, which could perform a standard footstep trajectory of the leg.

After the introduction, the continuation of the study is organized as follows; modeling and linearization of the system is presented in Chapter 2, and the controller design is presented in Chapter 3. In Section 4, the comparatively simulation results are given and the results are evaluated in Section 5.

SYSTEM MODELING

In this section, the design of the robot leg, physical modeling, and obtaining the linear state-space model of the system are presented.

Simscape is a block diagram modeling environment for modeling and simulating mechanical systems using standard Newtonian force and torque dynamics. A realistic physical model of the robot leg is created by defining coordinate systems, initial conditions of joints, and kinematic constraints. Many parameters such as the kinematic structure of the leg, dimensions, and masses of limbs, damping and stiffness values of joints have been determined by considering *HyQ* (Semini et al, 2010) and *HyQ2Max* (Semini et al., 2017) robots. The system consists of hip, thigh, knee limbs, and angular movement joints (hip/pitch, hip/roll, knee) of these limbs.

The physical model and block diagram of the system are given in Figure 1 and Figure 2. Table 1 shows the physical parameters of the system as well as the initial angular positions and the max. torque values of the joints are also given.

Table 1. System parameters and values

	Parameter	Value-Unit
Hip	Length (l_H)	0.1 m
	Weight (m_H)	3.5 kg
	Initial Angular Position (θ_H)	5°
	Max. Torque	120 Nm
Thigh	Length (L_T)	0.35 m
	Weight (m_T)	5 kg
	Initial Angular Position (θ_T)	-45°
	Max. Torque	245 Nm
Knee	Length (L_K)	0.4 m
	Weight (m_K)	1.5 kg
	Initial Angular Position (θ_K)	85°
	Max. Torque	250 Nm
	Limb Radius	0.01 m
	Stiffness Value of Joints (k)	70 Nm/rad
	Damping Value of Joints (b)	3 Nm/(rad/s)
	Gravity (g)	9,81 m/s ²

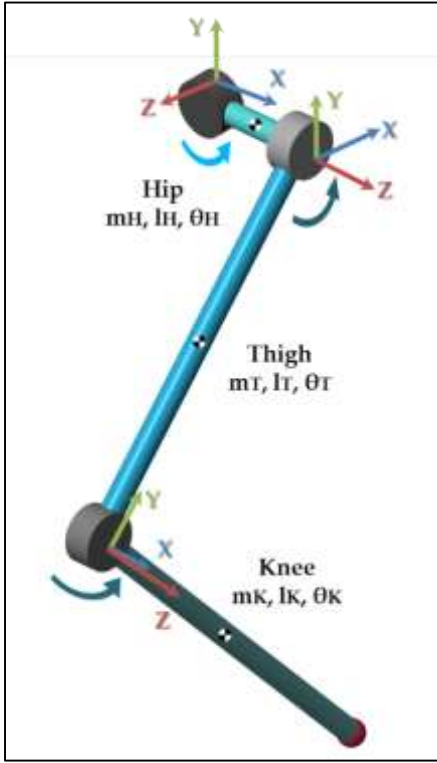


Figure 1. Physical model of the leg

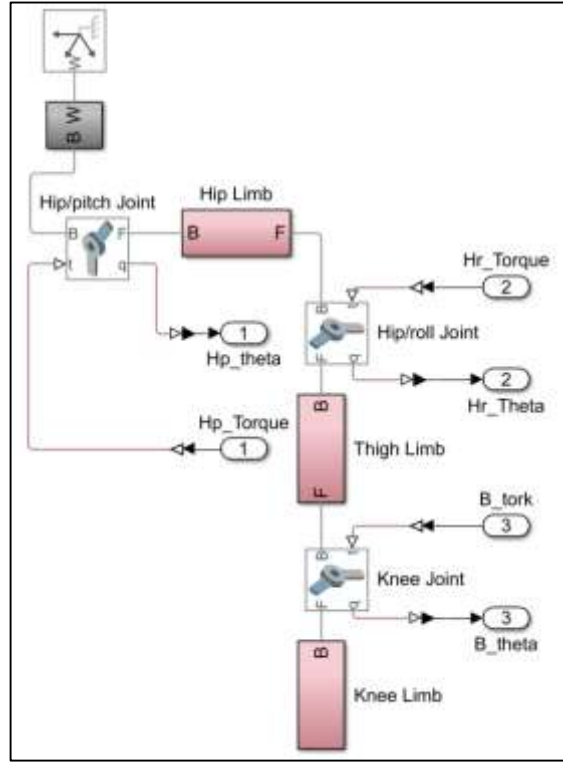


Figure 2. Simscape block diagram of the leg

After the physical model of the leg is created, the linear State-Space model of the system is obtained in order to make a fast and effective simulation in the studies such as gait planning of the robot, design of the foot trajectory, stability control of the main body. The reference joint angular position values ($\theta_{Hp} = 5^\circ \sim 25^\circ$, $\theta_{Hr} = -45^\circ \sim -15^\circ$, $\theta_K = 85^\circ \sim 110^\circ$) required for the linearization process to achieve a standard footstep trajectory (height of step - 0.1 m and width of step - 0.2 m). The needful background such as angular position values and footstep trajectory are obtained from the authors' previous studies about single leg; the design and tuning of PID controller using the Bees Algorithm (Sen and Kalyoncu, 2015; Bakircioglu et al, 2016a) and using Grey Wolf Optimizer Algorithm (GWO) (Sen and Kalyoncu, 2018), the design of Adaptive Neural-Network based Fuzzy Logic (ANFIS) controller (Bakircioglu et al, 2016b), the design of impedance controller (Sen et. al, 2017a), the inverse kinematics of a quadruped robot (Sen et. al, 2017b), the motion analysis of the leg (Bakircioglu et al, 2018), the design and tuning of hybrid LQR-PID controller using GWO (Sen and Kalyoncu, 2019).

The linear model of the system has been calculated with the 'linmod' function by specifying input-outputs. It is a Matlab command that is used to convert non-linear systems to linear systems, which are explained by a large number of variables. In this study, linmod command is used to obtain the State-Space linear model of ordinary differential equation systems created by block schemes. In addition, the 'minreal' command is used to minimize unnecessary situations by neglecting uncontrollable or unobservable states of this model. The structure of the general State-Space model and the state vector $[x]$, output vector $[y]$, control vector $[u]$ of the system are present in Eq.1. The state matrices $[A, B, C, D]$ of the obtained model are given in Eq. 2 and Eq. 3.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x^T &= [\theta_{Hp} \ \dot{\theta}_{Hp} \ \theta_{Hr} \ \dot{\theta}_{Hr} \ \theta_K \ \dot{\theta}_K] \\ y^T &= [\theta_{Hp} \ \theta_{Hr} \ \theta_K] \\ u^T &= [\tau_{Hp} \ \tau_{Hr} \ \tau_K] \end{aligned} \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_{21} = -284.3, A_{22} = -11.2, A_{23} = -57.8$$

$$A_{24} = -2.4, A_{25} = 129.2, A_{26} = 5.4$$

$$A_{41} = -63.1, A_{42} = -2.4, A_{43} = -414$$

$$A_{44} = -16.9, A_{45} = 456, A_{46} = 19.4$$

$$A_{61} = 140.8, A_{62} = 5.41, A_{63} = 447.2$$

$$A_{64} = 19.4, A_{65} = -1442, A_{66} = -60.4$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 3.75 & 0.80 & -1.80 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.80 & 5.65 & -6.5 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1.8 & -6.5 & 20.15 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 57.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 57.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 57.3 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

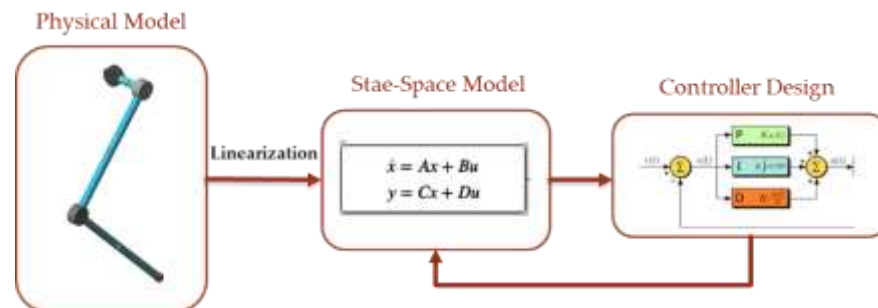


Figure 3. The general process of linearizing the system and designing the controller

The general process of linearizing the system and designing the controller is shown in Figure 3. In order to compare the State-Space model of the system with the physical model, the system is simulated in 3 seconds. The constant torque values reference inputs are determined by considering the maximum angular position values required for the step foot trajectory. In Figure 4, uncontrolled angular position responses of joints of physical and State-Space models are given. Figure 5 shows the open-loop control block diagram of both models.

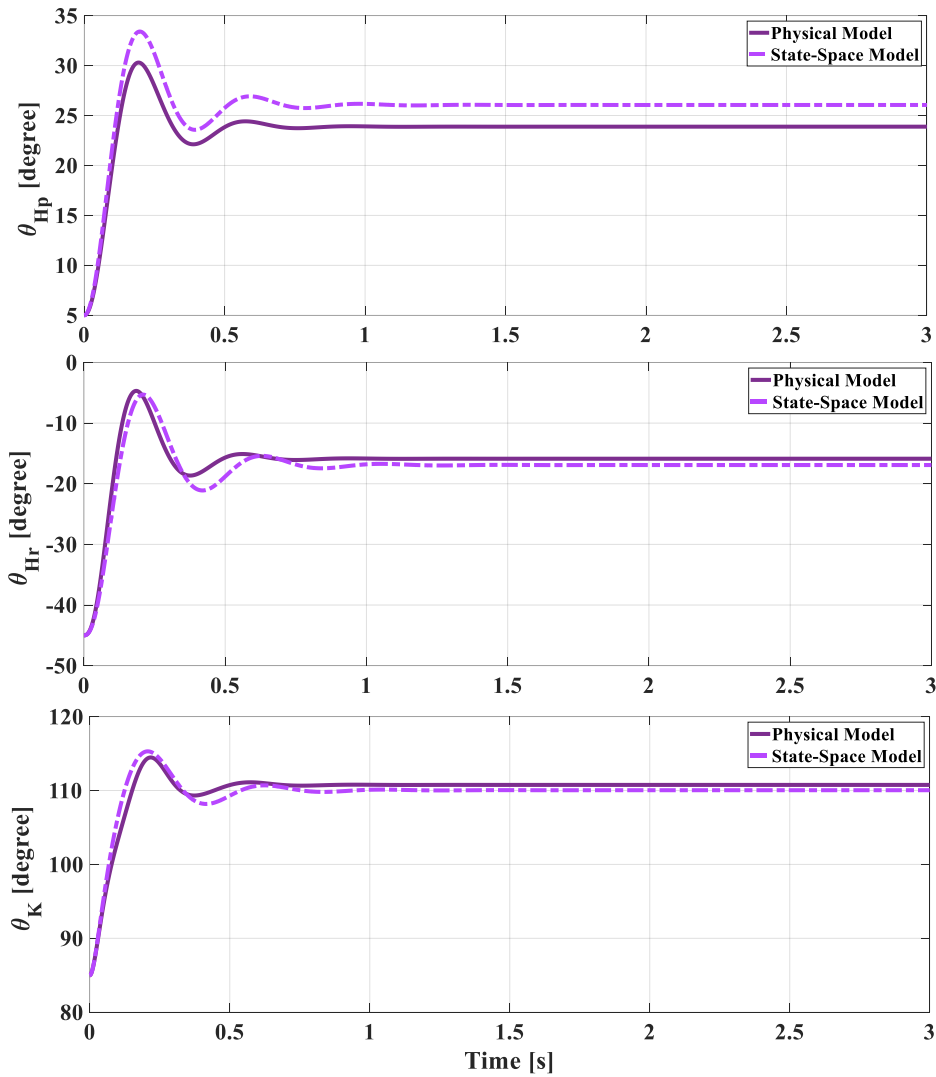


Figure 4. Open-loop control responses of the both models under unit step torque inputs

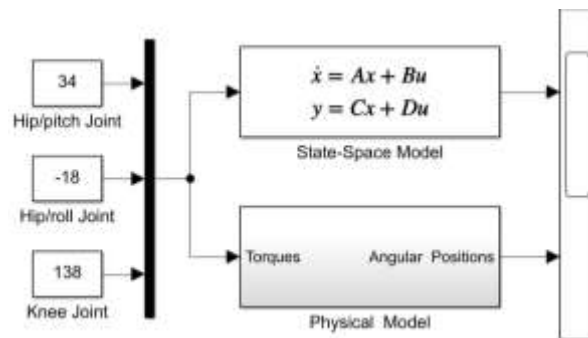


Figure 5. Open-loop control block diagram of Physical and State-Space models

As shown in Figure 4, both models showed a similar trend and at close value results. The maximum and average difference values between the angular position responses of the models are respectively; 3.2° and 2.1° for the Hip/pitch joint, 3.4° and 1.2° for the Hip/roll joint, 3.3° and 0.8° for the Knee joint.

THE PID and PIAD μ CONTROLLERS DESIGN

In this section, the fractional order Proportional-Integral-Derivative (FOPID) (Tepljakov,2019) controller and the classical PID are designed to comparative consider for the linear model of the robot leg are presented. PID controller is commonly preferred in experimental and simulation studies about single-leg of quadruped robots (Focchi et al., 2010). PIAD μ controller; in addition to the classical PID parameters, it is an advanced PID controller variant which includes the fractional derivative order (λ) and the fractional integral order (μ) parameters. It is stated that it is more flexible and durable because it has more adjustable design parameters. So, it can offer a wide controller response at higher performance (Podlubny et al., 1997; Podlubny, 1999). The block diagram of PID and PIAD μ controllers of system is given in Figure 6. The subsystem of controller blocks is shown in Figure 7.

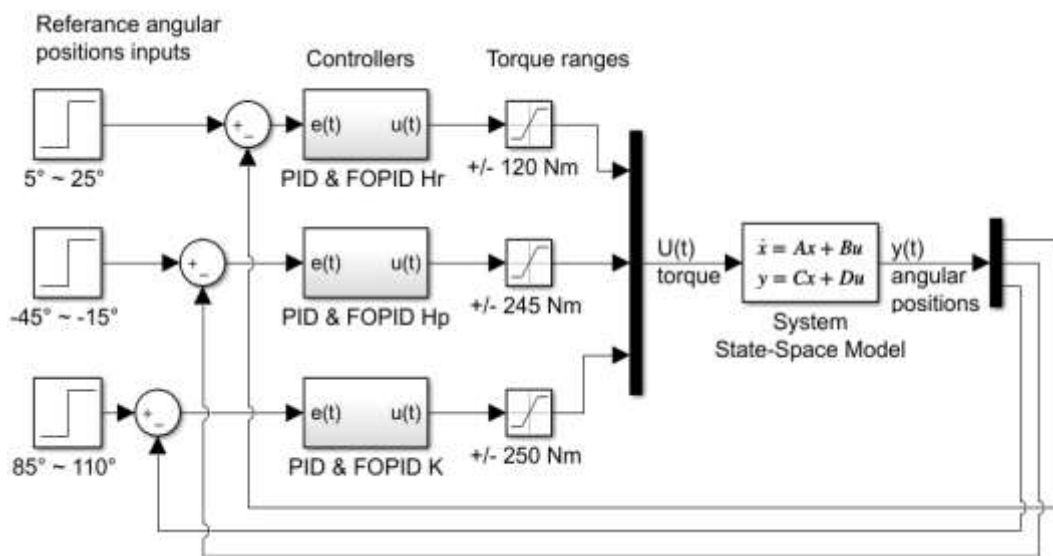


Figure 6. The block diagram of PID and PIAD μ controllers of system

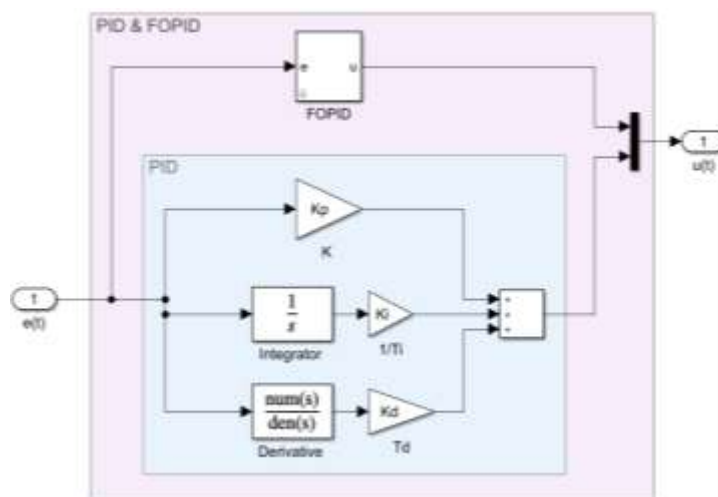


Figure 7. The subsystem of PID and PIAD μ controller blocks

And, the mathematical formula of classical PID controller and PIAD μ controller (externally includes fractional orders) are given in Eq. 4 and Eq. 5, respectively.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{4}$$

$$u(t) = K_p e(t) + \int_0^t e(t) d(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{4}$$

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \tag{5}$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) + K_d D^{-\mu} e(t)$$

SIMULATION RESULTS OF THE SYSTEM

In this section, the PID and PIAD μ controllers for the linear model of leg are designed and simulated for 1 second. To investigate the effect of fraction orders (λ , μ) on the system, three different PIAD μ controllers are designed by various order values. The controllers' responses to the angular positions of the three joints of the linear model obtained as a result of the simulation are given in Figure 8.

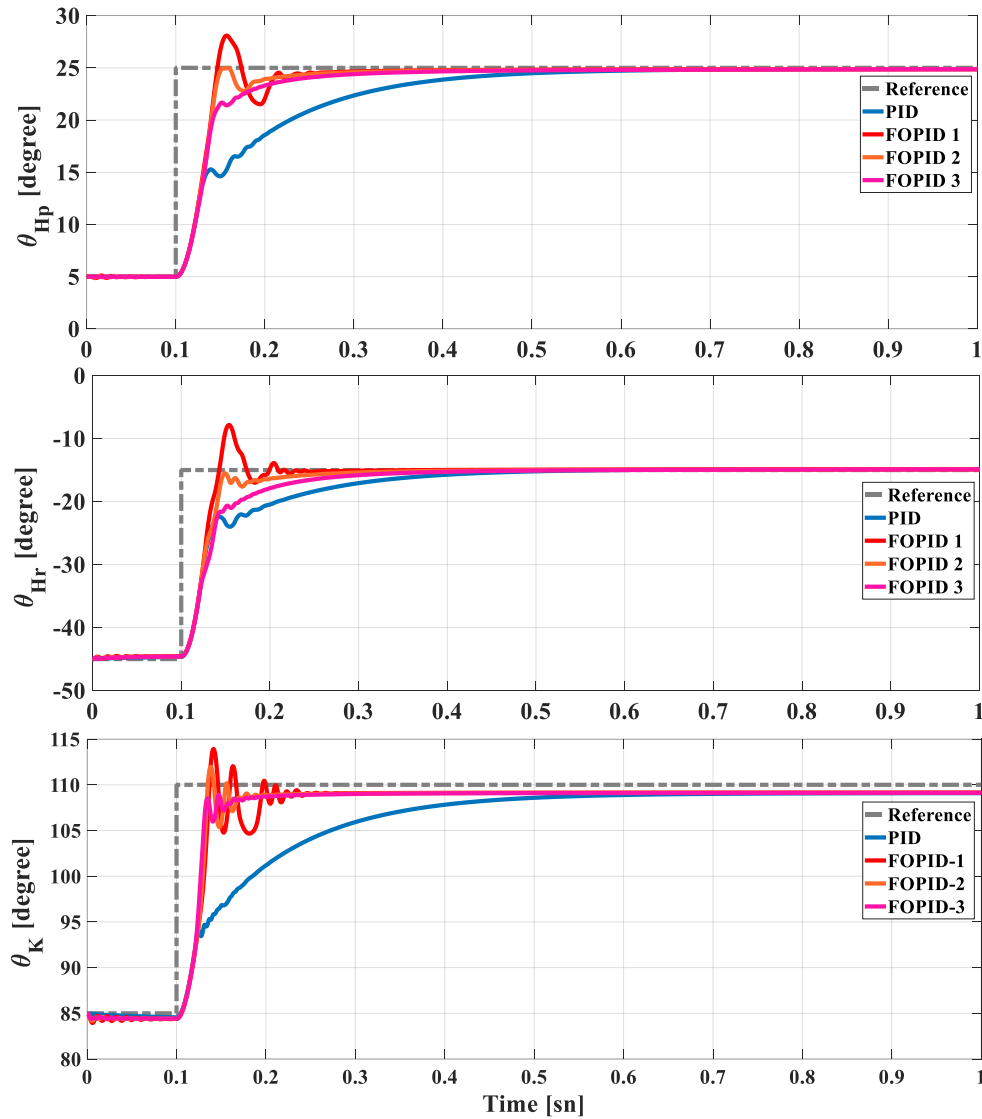


Figure 8. Control responses of the both models under unit step torque inputs

The designed parameters and the response specifications of controllers are presented in Table 2. The parameters of classical PID controllers are determined by basic Ziegler–Nichols methods (Ziegler and Nichols,1942) by also taking into consideration the previous studies (Bakircioglu et al, 2016a; Sen and

Kalyoncu, 2018). The parameters of the PIAD μ controllers are selected by trial and error methods based on experience and replaced by increased. In order to get more right comparison, the main gains of both controllers (K_p , K_i , K_d) are chosen the same. The simulations results are compared with regard to transient-response specifications such as *Rise Time* (Tr), *Settling Time* (Ts), *Maximum Overshoot* ($maxOS$), and *Steady-State Error* ($e(t)$).

Table 2. PID and PIAD μ controller parameters and response specifications

		Hip/picth	Hip/roll	Knee
PID	K_p	300	100	150
	K_i	0.3	0.1	0.15
	K_d	30	10	15
	Tr [s]	0.39	0.36	0.4
	Ts [s]	0.51	0.44	0.53
	$MaxOS$ [deg]	0	0	0
	$e(t)$ [deg]	0.12	0.15	1.02
FOPID-1	K_p	300	100	150
	K_i	0.3	0.1	0.15
	K_d	30	10	15
	λ	0.8	0.7	0.3
	μ	0.5	0.6	0.2
	Tr [s]	0.18	0.17	0.15
	Ts [s]	0.25	0.21	0.22
FOPID-2	$MaxOS$ [deg]	2.9	7.1	3.9
	$e(t)$ [deg]	0.09	0.11	0.93
	λ	0.9	0.8	0.4
	μ	0.6	0.7	0.3
	Tr [s]	0.13	0.13	0.12
	Ts [s]	0.26	0.28	0.18
	$MaxOS$ [deg]	0	0	2.5
FOPID-3	$e(t)$ [deg]	0.10	0.12	0.86
	λ	1.0	0.9	0.5
	μ	0.7	0.8	0.4
	Tr [s]	0.17	0.18	0.11
	Ts [s]	0.32	0.34	0.18
	$MaxOS$ [deg]	0	0	0
	$e(t)$ [deg]	0.10	0.10	0.86

As seen in Figure 8 and Table 2., the classical PID controller is insufficient in all response specifications. FOPID-1 ensure faster controller performance with less error despite a little overshoot. By increasing the value of fraction orders, FOPID-2 provided that time specifications and errors reduced, but there is still some overshoot in the knee joint. Finally, FOPID-3 ensured a faster and more effective than PID, but slightly less than other FOPIDs, controller performance with reasonable errors without overshoot.

CONCLUSIONS

The physical model of the 3-DoF linear leg is designed, the linear state-space model is obtained by using linearization methods and the two type controllers are designed and the system is simulated. The unit step responses of the physical model and linear state-space model are obtained very close. In order

to examine the effects of PIAD μ controller's fractional derivative (λ) and integral (μ) orders, the same controller gains with PID controller are determined and the unit step responses of the system for both controllers are compared. In general, it is seen that the PIAD μ controllers, thanks to the fractional orders, are more superior to classical PID in terms of all response specifications although the same main gains are used. Furthermore, the performance of PIAD μ controller can be improved by tuning the parameters (particular fractional orders) using various optimization techniques.

REFERENCES

- Bakırcıoğlu, V., Sen, M.A. and Kalyoncu, M., 2016a, "Optimization of PID Controller Based on the Bees Algorithm for One Leg of a Quadruped Robot", *MATEC Web of Conferences*, Vol. 42, No. 03004, pp. 1-4.
- Bakırcıoğlu, V., Sen, M.A. and Kalyoncu, M., "Adaptive Neural-Network Based Fuzzy Logic (ANFIS) Based Trajectory Controller Design for One Leg of a Quadruped Robot", *5th International Mechatronics and Control Engineering (ICMCE 2016)*, Venice, Italy, 82-85, 14-17 December, 2016b.
- Bakırcıoğlu, V., Sen, M.A. and Kalyoncu, M., "Motion Analysis of The Robotic Leg Mass Centre During Reference Trajectory Tracking" *2018 International Vocational Science Symposium (IVSS 2018)*, Antalya, Turkey, 420, 26-29 April, 2018.
- Baudoin, Y. and Maki K. Habib, 2010, *Using Robots in Hazardous Environments: Landmine Detection, De-Mining and Other Applications*, Woodhead Publishing, Cambridge, London, England.
- Boston Dynamics Company, <https://www.bostondynamics.com/robots>, access date: 12.09.2019.
- Focchi, Michele, et al. "Control of A Hydraulically-Actuated Quadruped Robot Leg", 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2010), IEEE, Alaska, United States, 4182-4188, 4-8 May, 2010.
- Hutter, M., et al., "StarLETH: A Compliant Quadrupedal Robot for Fast, Efficient, and Versatile Locomotion", *International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR)*, Baltimore, USA 483-490, 23-26 July, 2012.
- Hutter, M., et al., 2017, "Anymal-Toward Legged Robots for Harsh Environments", *Advanced Robotics*, Vol. 31, No. 17, pp. 918-931.
- Podlubny, I., 1999, "Fractional-Order Systems and PIAD μ Controllers", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 44, No. 1, pp. 208-214.
- Podlubny, I., Dorcak L. and Kostial I., "On Fractional Derivatives, Fractional-Order Dynamic Systems and PIAD μ Controllers", *36th IEEE Conference on Decision and Control*, IEEE, Kobe, Japan, 1-5, 13-13 December, 1997.
- Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G. and Playter, R., "Bigdog, The Rough-Terrain Quadruped Robot", In *17th World Congress the International Federation of Automatic Control*, Seoul, South Korea, 10822-10825, 6-11 July, 2008.
- Raibert, M.H., 1986, *Legged Robots That Balance*. MIT Press, Cambridge, London, England.
- Rossell, J. M., et al. "Tracking Control for A Stewart Platform Prototype" *2015 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA)*, IEEE, Resort, Surabaya, 58-63, 15-16 October, 2015.
- Semini, C., 2010, *Hyq-Design and Development of a Hydraulically Actuated Quadruped Robot*, Doctor of Philosophy (Ph.D.), University of Genoa, Italy.
- Semini, C., et al., 2017, "Design of the Hydraulically-Actuated Torque-Controlled Quadruped Robot HyQ2Max", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 22, No. 2, pp. 635-646.
- Sen, M.A. and Kalyoncu M., 2018, "Optimal Tuning of PID Controller Using Grey Wolf Optimizer Algorithm for Quadruped Robot", *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 29-35.
- Sen, M.A. and Kalyoncu M., 2019, "Grey Wolf Optimizer Based Tuning of a Hybrid LQR-PID Controller for Foot Trajectory Control of a Quadruped Robot", *Gazi University Journal of Science*, Vol. 32, No. 2, pp. 674-684.

- Sen, M.A. and Kalyoncu, M., 2015, "Optimisation of a PID Controller for an Inverted Pendulum Using the Bees Algorithm", *Applied Mechanics and Material, Section: Manufacturing Science and Technology VI, Chapter 7: Theory and Practice of Control*, Vol. 789-790, pp. 1039-1044.
- Sen, M.A., Bakircioglu V. and, Kalyoncu M., 2017b, "Inverse Kinematic Analysis of a Quadruped Robot" *International Journal of Scientific & Technology Research*, Vol. 6, No. 9, pp. 2277-8616.
- Sen, M.A., Bakircioglu, V. and Kalyoncu, M., "Design and Simulation Impedance Controller for Trajectory Control with Obstacle of Quadruped Robot's Leg", *International Advanced Researches & Engineering (IAREC 2017)*, Osmaniye, Turkey, 558-568, 16-18 November, 2017a.
- SimscapeUser's Guide R2019b, The MathWorks Inc., 2012., https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/sl_using.pdf, access date: 12.09.2019.
- Tepljakov A., FOMCON: Fractional-order Modeling and Control, <http://www.fomcon.net>, access date: 12.09.2019.
- Velásquez-Lobo, Marlon Fernando, et al. "Modeling A Biped Robot on Matlab/Simmechanics" *23rd International Conference on Electronics, Communications and Computing (CONIELECOMP)*, IEEE, Cholula, Mexico, 203-206, 11-13 March, 2013.
- Ziegler, J. G. and Nichols, N. B. "Optimum settings for automatic controllers", *Transactions of the ASME*, Vol. 64, No. 11, pp. 759-765, 1942.



AISI 304 PASLANMAZ ÇELİK SACIN HİDROMEKANİK DERİN ÇEKİLMESİ

Mevlüt TÜRKÖZ

*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE*
mturkoz@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 01.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.10.2019)

ÖZ: Korozyona karşı üstün dirençleri nedeniyle gıda, mutfak eşyaları, ev eşyaları, otomotiv, uzay ve havacılık ile tıp endüstrisinde sıklıkla kullanılan paslanmaz çelik sac malzemeler, genellikle klasik derin çekme yöntemi ile şekillendirilmektedir. Klasik yöntemlerle yapılan derin çekme işlemlerinde, kalıp yapımının maliyetli, zaman alıcı ve zahmetli olmasından dolayı bu yöntem ile üretim özellikle az sayıda parça üretiminde ekonomik olmamaktadır. Hidromekanik Derin Çekme (HDC) yönteminde ise sıvı basıncı yardımıyla tek bir kalıp kullanılarak üretim yapmak mümkündür. Böylece karmaşık geometriye ve farklı kalınlığa sahip saclar, kalıp uyumu aranmadan daha ekonomik ve daha kaliteli olarak şekillendirilebilmektedir. Bu çalışmada, AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemedeki silindirik bir parçanın HDC yöntemiyle şekillendirilmesi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sanal ortamda incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, sacda yırtılma ve buruşma oluşturmayacak en uygun kalıp tasarım parametreleri belirlenmiş ve bu parametreler kullanılarak deneysel olarak parça üretiminde tatbik edilmiştir. Sonuç olarak AISI 304 paslanmaz çelik sacın, HDC prosesiyle başarıyla şekillendirilmesi için gerekli olan optimum parametreler belirlenmiş ve sonlu eleman analizlerinin prosesdeki optimum parametrelerin belirlenmesinde güvenle kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sac metal şekillendirme, Hidroşekillendirme, Kalıp tasarımı

Hydromechanical Deep Drawing Of Aisi 304 Stainless Steel Blank

ABSTRACT: Stainless steel sheet materials, which are frequently used in food, kitchenware, household appliances, automotive, aerospace and medical industries with their superior resistance to corrosion, are generally formed by the classical deep drawing method. Due to costly, time consuming and troublesome manufacturing of dies in deep drawing, production with this method is not economical especially when producing a small number of parts. It is possible to produce such parts by Hydromechanical Deep Drawing (HDD) method which uses a single tool, and pressurized liquid. Thus, sheets with complex geometries and different thicknesses can be manufactured economically and with better quality without requiring mold compatibility. In this study, forming of a cylindrical part of AISI 304 quality stainless steel by HDD method was investigated numerically using finite element method. As a result of these examinations, the most suitable die design parameters that will not cause tearing and wrinkling in the sheet metal were determined and the parts were experimentally manufactured based on these parameters. As a result, it has been determined that the finite element analysis can be used safely in order to form the AISI 304 stainless steel sheet successfully with HDD process and in determining the optimum parameters in the process.

Keywords: Sheet metal forming, Hydroforming, Die design

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv, uçak, beyaz eşya ve savunma endüstrisinde yoğunlukla kullanılan sac metal parçalar genellikle kesme, bükme ve derin çekme gibi klasik işlemlerle şekillendirilmektedir. Bu işlemlerde her parça için kalıp tasarımı ve imalatı, özellikle az sayıda ürünün üretileceği durumlarda ekonomik olmamaktadır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak, hidroşekillendirme yönteminde erkek ya da dişi kalıptan biri üretilip, diğer kalıbın yerini yüksek basınçlı sıvı almaktadır. Tek bir kalıbın üretilmesi, alt-üst kalıp uyumu aranmaması, farklı kalınlıklı sacların tek bir kalıpta üretilmesi ve kalıbın daha az maliyetli malzemelerden üretilmesi nedeniyle kalıp maliyetleri %90'a varan oranda azalmaktadır. Bu nedenle hidroşekillendirme prosesi özellikle az sayıdaki parçaların üretiminde ekonomik olmaktadır. Bunun yanında üretilen parçaların yüzey kalitelerindeki artış, üretim kademe sayısında azalma ve parça konsolidasyonu sağlama gibi avantajları ile orta ve yüksek üretim kapasitelerinde de teknolojik avantajı yüksek olan parçalarda tercih edilmektedir.

Hidroşekillendirme ilk olarak 1890 yılında tatbik edilmiştir. Ancak asıl gelişimini 2. Dünya Savaşı'ndan sonra yaşamıştır. Endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşması ise 1990'lardan sonradır (Şahin, 2004). Proses, sac ya da tüp malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılabilir. Sac malzemelerin şekillendirilmesinde, kalıbın erkek ya da dişi kalıp olmasına göre iki farklı uygulama bulunmaktadır. Erkek kalıbın kullanıldığı yöntem Hidromekanik Derin Çekme (HDC) olarak isimlendirilmekte ve bu yöntemle diğerine göre çok daha derin parçalar üretilmektedir. HDC ile klasik derin çekme işleminde 2,2 olan sınır çekme oranı 2,7'ye kadar yükseltilebilmektedir (Zhang ve Danckert 1998; Lin ve diğ., 2009). Böylece derin çekme ile 3-4 kademede üretilebilecek bir parçanın tek kademede üretilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 1. Hidromekanik derin çekme prosesi (Akay ve diğ., 2014)

Figure 1. Process of hydromechanical deep drawing (Akay et al., 2014)

Sac malzeme, HDC prosesinde ıstampa ile şekillendirilirken klasik derin çekmeden farklı olarak ıstampanın karşı tarafından sacın diğer yüzeyine Şekil 1'de görüldüğü gibi yüksek basınçta sıvı uygulanır. Proseste sıvı basıncının ıstampa konumuna göre değişken değerlere sahip olması gerekmektedir (Yossifon ve Tirosh, 1988). Yine proses sırasında, klasik şekillendirmede olduğu gibi baskı plakası kuvveti ile sacın buruşmasının önüne geçilmesi gerekmektedir. HDC'de baskı plakası kuvvetinin sacın buruşmasını engellemenin yanında sızdırmazlığın sağlanması görevi de bulunmaktadır.

Başarılı bir parça üretimi için kontrol edilmesi gereken parametreler, değerleri ıstampa konumuna göre değişen sıvı basıncı ile baskı plakası kuvveti, sac ve kalıplar arasındaki sürtünme ve kalıp geometrik parametreleridir (Zhang ve diğ., 2000; Lang ve diğ., 2004). HDC prosesinde sıvı basıncının optimum eğrisinin uygulanmadığı durumda başarılı bir şekillendirme yapmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle kullanılan malzemeye ve parça geometrisine bağlı olarak değişen sıvı basıncı eğrisi ve baskı plakası kuvveti başta olmak üzere Şekil 1'de görülen kalıp giriş yarıçapı, ıstampa burun yarıçapı ve kalıpla

ıstampa arasındaki tek taraflı boşluk değeri gibi geometrik parametrelerin en uygun değerlerinin kalıplar imal edilmeden önce belirlenmesi gerekmektedir. Bu da HDCÇ prosesinin uygulanmasını zorlaştırmaktadır. En uygun parametrelerin deneme yanılma ile belirlenmesi çok zor, zahmetli ve maliyetli bir iştir. Bu nedenle proses için en uygun parametrelerin Sonlu Elemanlar Analizleri (SEA) ile belirlenmesi zaman ve maliyetten önemli derecede tasarruf sağlamaktadır.

Yazar tarafından daha önce gerçekleştirilen araştırmalarda AA 5754 alaşımlı alüminyum sac malzemenin HDCÇ prosesi ile şekillendirilmesinde, parametrelerin prosese etkilerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır (Tinkir ve diğ., 2015; Akay ve diğ., 2014; Halkacı ve diğ., 2014; Turkoz ve diğ., 2013; Halkacı ve diğ. 2012; Halkacı ve diğ., 2011). Bu çalışmalarda AA 5754 alaşımı için en uygun sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti eğrileri SEA ile tespit edilmiş, tek taraflı boşluk, ön şişirme yüksekliği ve basıncı, kalıp ve ıstampa yarıçapı, ıstampa yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerin prosese etkileri deneysel çalışmalarla ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada, kalıp parametrelerinden olan ıstampa yarıçapı, kalıp yarıçapı ve tek taraflı boşluğun farklı değerlerinin AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin şekillendirme işlemine etkisi SEA ile araştırılmış ve en uygun değerleri belirlenmiştir. Daha sonra, sayısal analizlerden elde edilen optimum proses parametre değerleri kullanılarak parçanın şekillendirilebilirliği deneysel olarak incelenmiştir. Böylece, AISI 304 paslanmaz çeliğin HDCÇ prosesiyle başarıyla şekillendirilmesi için kullanılması gereken optimum parametreler ortaya konulmuş ve HDCÇ prosesinin sayısal analizlerinin güvenilirliği kanıtlanarak yöntemin geliştirilmesi sağlanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Sonlu Elemanlar Analizleri (Finite Element Analysis)

Bu çalışmada, 100 mm dairesel kesitli ve 1 mm kalınlıklı AISI 304 sac kullanılarak, 40 mm çapındaki ıstampa ile HDCÇ prosesi ile parça şekillendirilebilirliği incelenmiştir. Bunun için öncelikle HDCÇ prosesinin SEA'leri gerçekleştirilmiştir. SEA'de geometrik modelleme için öncelikle kalıplar ve sac yüzey olarak modellenmiştir. Çünkü, sac şekillendirme işleminde en uygun analiz yöntemi sacın kabuk elemanlarla (shell) modellenmesidir. Daha sonra, geometri Ls-Prepost yazılımına aktararak sonlu elemanlara ayırma, malzeme modeli seçimi, sınır şartların ve temas şartlarının belirlenmesi adımları gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Ls-Dyna çözücüsü ile sonuçlar alındıktan sonra yine Ls-prepost yazılımında sacda oluşan gerilmeler, birim şekil değişimi değerleri değerlendirilmiştir.

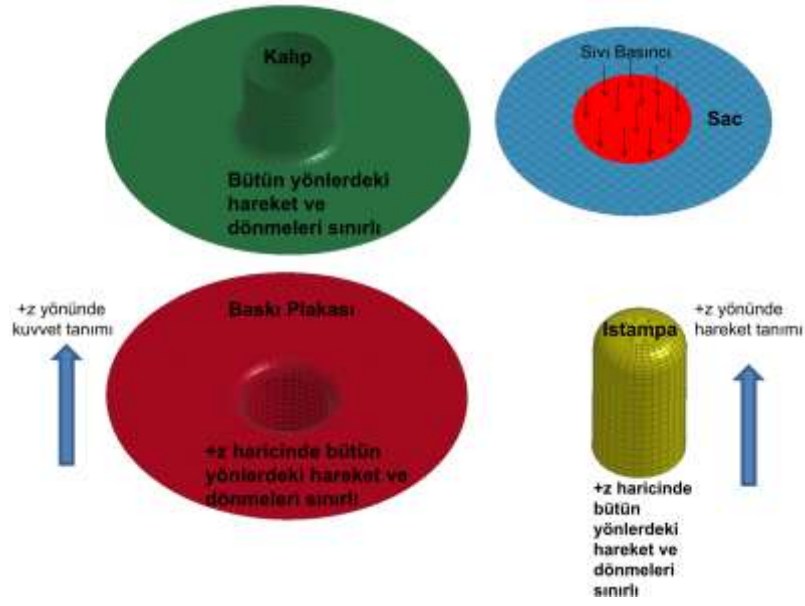
Çalışma kapsamında etkisi incelenen geometrik parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. İncelenen geometrik parametreler

Table 1. Investigated geometrical parameters

Parameter adı	Parametrelerin düzeyleri		
Istampa Burun Yarıçapı (mm)	4	5	6
Kalıp Giriş Yarıçapı (mm)	4	5	6
Tek Taraflı Boşluk (mm)	0.5	1	1.5

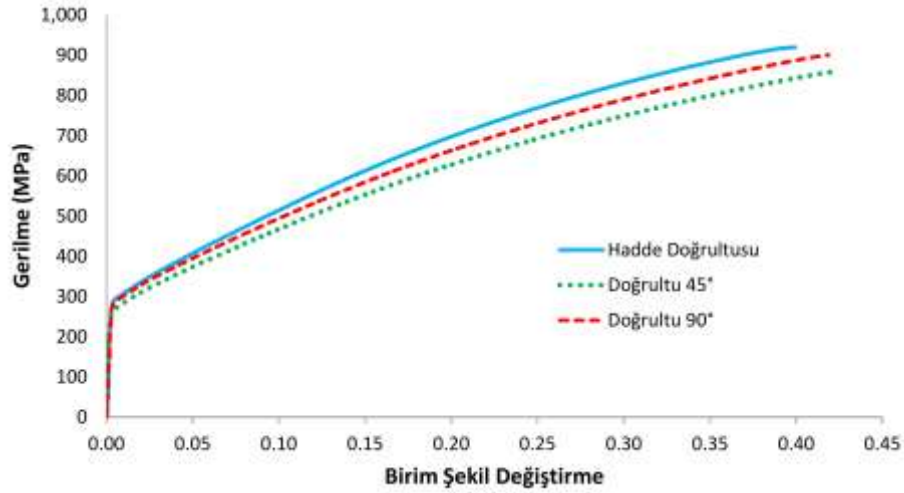
Kalıplar Çizelge 1'de belirtilen parametrelerle tasarlanmış ve 5 mm yarıçap değerleri ile 1 mm boşluk değeri sabit alınarak diğer parametrelerin değiştirilmesiyle toplamda 9 adet simülasyon gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Hidromekanik derin çekme prosesinin Sonlu Elemanlar Modeli ve sınır şartları

Figure 2. Finite element model and boundary conditions of hydromechanical deep drawing process

SE modelinde kalıplar rijit olarak tanımlanırken, sac ise “elasto-viscoplastik” olarak tanımlanmıştır. AISI 304 paslanmaz çelik için gerçek gerilme- gerçek birim şekil değiştirme eğrisi hadde doğrultusu ile hadde doğrultusuna göre 45° ve 90° doğrultularda çekme deneyi ile Şekil 3’teki gibi elde edilmiştir. Ortalamayı temsil eden 45° doğrultudaki malzeme verisi tablo olarak Ls-Prepost’ta 24 numaralı “Piecewise linear plasticity” malzeme kartına girilerek malzeme modellemesi yapılmıştır.

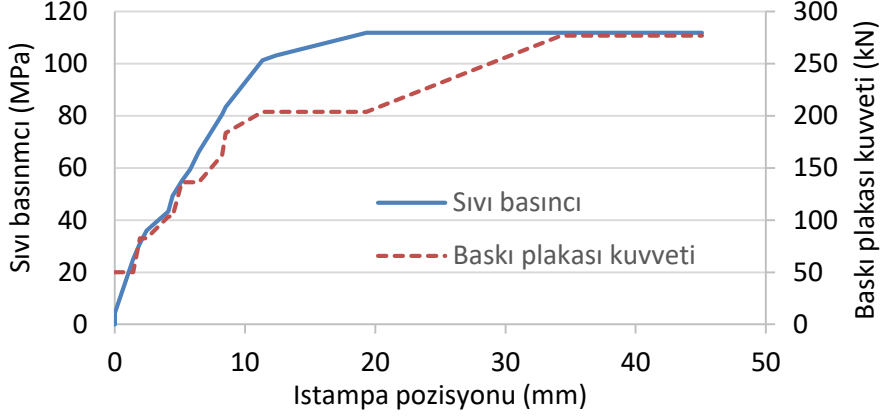


Şekil 3. AISI 304 paslanmaz çeliğin hadde doğrultusu ile hadde doğrultusuna göre 45° ve 90° doğrultulardaki gerçek gerilme ve gerçek BŞD grafiği

Figure 3. True stress and true strain graph of AISI 304 stainless steel in the rolling direction and 45° and 90° directions according to the rolling direction

Çalışmada geometrik parametreler incelenerek kalıp tasarımı araştırıldığı için HDC prosesinde sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri değiştirilmeden kullanılmıştır. Sıvı basıncı ve baskı plakası

kuvvetinin ıstampo pozisyonuyla değişimi grafiği Şekil 4’te verilmiştir. Eğriler elde edilirken daha önceki çalışmalarda aynı çaptaki silindirik parça için belirlenmiş olan AA 5754 alaşımına ait basınç değerleri, malzemelerin akma mukavemetlerinin oranı ile çarpılarak oluşturulmuştur.



Şekil 4. Malzemenin şekillendirilmesi için kullanılan sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri

Figure 4. Fluid pressure and blank holder force profiles used for forming of the materials

Sac ile kalıplar arasında Coloumb sürtünme modeli ve yağlama durumu için 0.05 sürtünme katsayısı tanımlanmıştır.

Deneysel alışma (Experimental Study)

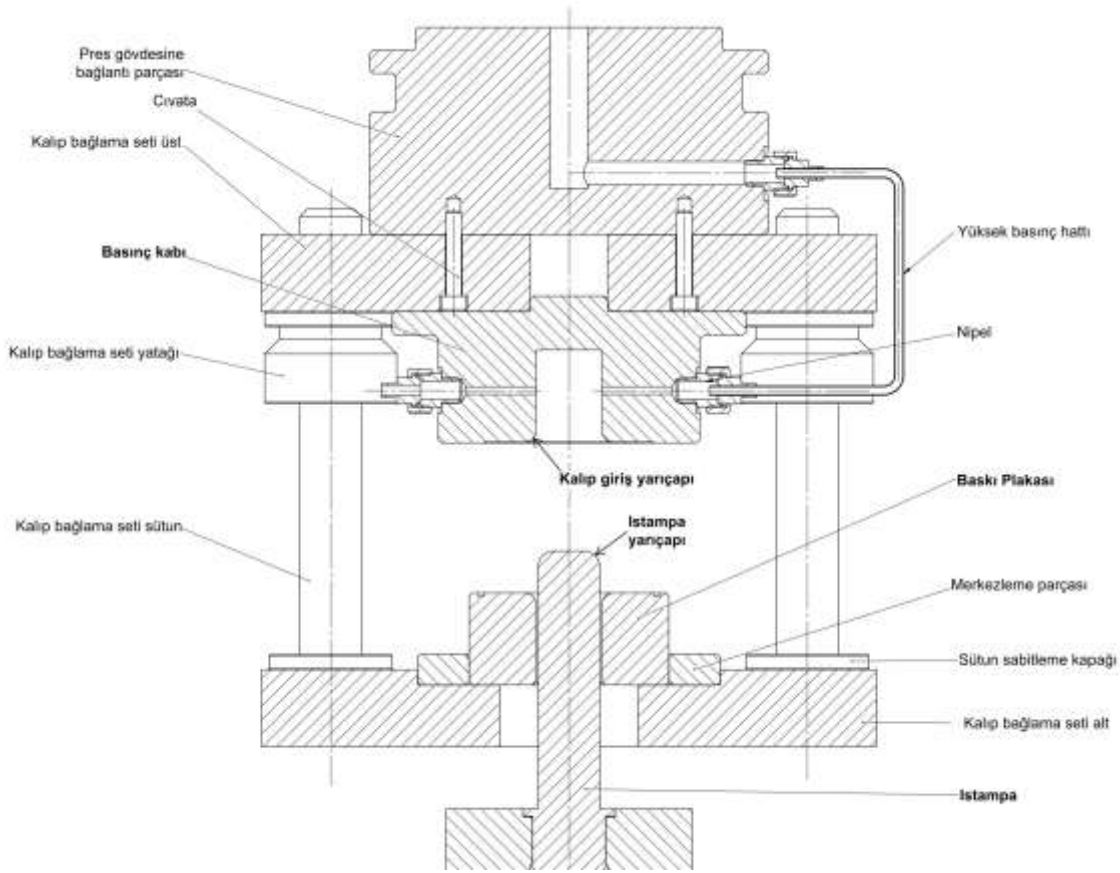
AISI 304 sac malzemedan 40 mm çapında silindirik bir parça üretilmesi için en uygun geometrik parametreler SEA ile belirlendikten sonra parçanın üretilirliği deneylerle test edilmiştir. Deneyler, Konya Teknik Üniversitesi Hidroşekillendirme Laboratuvarında bulunan 60 ton kapama kuvveti ve 1200 bar sıvı basıncı kapasiteli hidroşekillendirme presinde (Şekil 5) gerçekleştirilmiştir. Bu preste ıstampanın anlık konumuna karşılık gelen sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti değerleri interaktif olarak kontrol edilebilmektedir. SEA ile kalıplar için en uygun parametreler ıstampo burun yarıçapı için 4 mm, kalıp yarıçapı için 6 mm ve tek taraflı boşluk için 1.5 mm olarak belirlenmiştir. Kalıplar bu değerlere sahip olacak şekilde üretilip deney presine bağlanmıştır. Deney düzeneğinin resmi Şekil 6’da verilmiştir. Presin hidrolik nümerik kontrol (HNC) ünitesine, sayısal analizlerde de kullanılan Şekil 3’teki yüklenme eğrileri girildikten sonra sistem deney yapmaya hazır hale getirilmiştir. Başlangıç malzemesi olarak 1 mm kalınlığındaki AISI 304 kalite paslanmaz elik sacdan 100 mm çapında dairesel çapta numuneler hazırlanmış, sacın ıstampaya temas eden bölgesi haricindeki kısımları parafin ve polietilen film kullanılarak yağlanmış, böylece baskı plakası ve basınç kabı arasında sacın en az dirençle akması sağlanmıştır. Deneyler yapılırken:

- Sac, baskı plakası üzerine yerleştirilmiş,
- Baskı plakası yukarı yönde hareket ederek sac kalıpla baskı plakası arasında belirli bir kuvvetle sıkıştırılmış,
- Kalıp, sıvı ile doldurulmuş ve içerisindeki hava dışarı atıldıktan sonra çıkış hattındaki vana kapatılmış,
- Istampo, sacla temas edeceği pozisyona konumlandırılmış,
- Ön basınç uygulandıktan sonra ıstampo HNC ünitesinden girilmiş olan hızla yine üniteden girilmiş olan konuma ilerletilmiştir.
- Istampo ilerlerken sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti daha önce üniteye girilmiş olan eğriye göre uygulanmıştır.

- Istampacı son pozisyonuna gelinceye kadar basınçta ani bir düşme ve kalıplarda sızdırma olmamışsa parçanın başarıyla şekillendirildiği anlaşılmış, basınç değeri sıfırlanarak kalıplar açılmış ve parça kalıplar arasından alınmıştır.



Şekil 5. Çalışma kapsamında kullanılan hidroşekillendirme presi
Figure 5. Hydroforming press used in current study

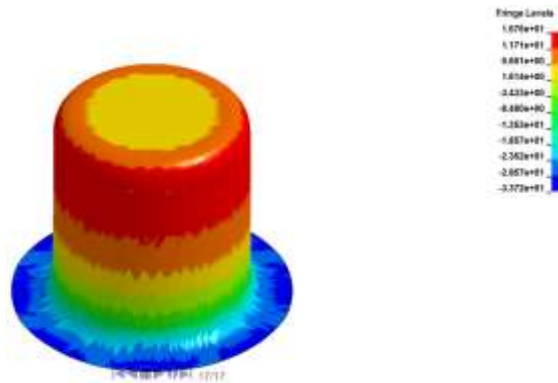


Şekil 6. Hidroşekillendirme kalıpları

Figure 6. Hydroforming tools

BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Farklı geometrik parametrelerle gerçekleştirilen sayısal analizlerden sonra, Şekil 7'de görüldüğü gibi kalıp yarıçapı için 4 mm ve ıstampa burun yarıçapı için 6 mm optimum parametre değerleriyle sac malzemenin 2.5 çekme oranına sahip olacak şekilde başarıyla şekillendirilebildiği görülmüştür.

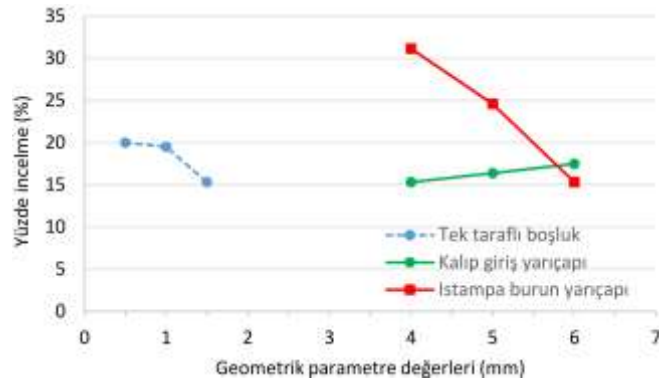


Şekil 7. 4 mm kalıp radyüsü 6 mm Stampa radyüsü için elde edilen SEA sonucu

Figure 7. FEA result obtained with 6 mm punch radius and 4 mm die radius

Tüm analizlerde parçalar başarıyla şekilleniyor gözükse de, sac parçada oluşan maksimum incelme değerleri değişkenlik arz etmektedir. Sac şekillendirmede malzemenin minimum oranda incelmesi arzu edilir. Çünkü minimum incelmeye daha mukavemetli bir parça elde edilmiş olur. Bunun yanında parçanın daha ince sac kullanılarak elde edilmesi de mümkün hale gelir. Kalıp ve ıstampa burun yarıçapı

ile tek taraflı boşluk değerinin sac parçanın maksimum incelme değerine olan etkisi Şekil 8’de verilmiştir. Sonuçlara göre şekillendirilebilirlik üzerinde en etkili parametre ıstampa burun yarıçapıdır. ıstampa burun yarıçapı 4 mm değerinde iken incelme %31 olarak gerçekleşirken, 6 mm ye çıkartıldığında bu değer %15.3’e kadar azalmıştır. Bunun yanında kalıp giriş yarıçapının farklı değerlerinde yüzde incelme çok daha az değişiklik göstermiştir. Kalıp giriş yarıçapı arttıkça az da olsa sacda oluşan maksimum yüzde incelme değerinde artış gözlemlenmiştir. Kalıp giriş yarıçapı 4 mm iken %15.3 olan incelme değeri, 6 mm değerinde %17.5’e çıkmıştır. Klasik derin çekmede, kalıp giriş yarıçapı arttıkça sacda oluşan incelmenin daha az eğme gerilmesi nedeniyle azalması beklenirken HDCÇ prosesinde bunun tam tersi gözlemlenmiştir. Bu duruma, kalıp yarıçapının artmasıyla sacın desteksiz durduğu bölgenin artmasının neden olduğu düşünülmektedir. Farklı tek taraflı boşluk değerlerinde, en az incelme 1.5 mm değerinde meydana gelirken 0.5 ve 1 mm değerlerinde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, sacda en az incelme meydana getiren ve kalıp tasarımında kullanılması en uygun olan geometrik parametreler; tek taraflı boşluk için 1.5 mm, kalıp yarıçapı için 4 mm ve ıstampa burun yarıçapı için 6 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 8. Farklı kalıp tasarım parametreleriyle sac parçada oluşan maksimum yüzde incelme değerleri

Figure 8. Maximum thickness reduction values that were obtained with different tool design parameters

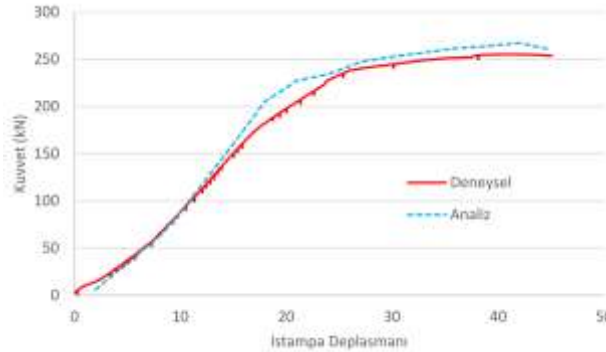
Deneyisel çalışmada ise, sayısal analizlerden elde edilen bilgiler ışığında 1 mm kalınlığında ve 100 mm çapında AISI 304 paslanmaz çelik malzeme kullanılarak hidromekanik derin çekme yöntemiyle sac parçalar üretilmiştir. Üretimde SE analizleriyle belirlenen parametreler kullanılmıştır. Deneyler sonunda Şekil 9’da görüldüğü gibi parçalar 2.5 Sınır Çekme Oranına (SÇO) sahip ve 3 tekrarlı olacak şekilde başarıyla üretilmiştir. Klasik derin çekmede sınır çekme oranı bilindiği gibi 2 olarak alınmaktadır. 2 değerini aşan çekme oranlarında birden fazla kademede parça üretilebilmektedir. HDCÇ prosesi ile 2.5 sınır çekme oranıyla parçanın başarıyla şekillendirilebilmesi, prosesin avantajını ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Deneylerden elde edilen AISI 304 paslanmaz çelik malzemeden 40 mm çapında ve 2.5 SÇO değerine sahip silindirik parçalar

Figure 9. Cylindrical cups made of AISI 304 stainless steel with a diameter of 40 mm and with LDR value of 2.5s obtained from the experiments

SE analizlerinden belirlenen parametrelerle deneysel olarak başarılı şekillendirmelerin yapılması, analizlerin güvenilirliğini ortaya koysa da daha somut bir değerlendirme için ıstampa üzerine gelen kuvvetler Şekil 10'daki gibi karşılaştırılmıştır. İstampa üzerine gelen kuvvet, kalıbın altındaki yük hücresi ile deneysel olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler ile analizlerden elde edilen değerlerin şekilde görüldüğü gibi oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Deneylerde ıstampa üzerine gelen maksimum kuvvet 255 kN iken analizlerde bu değer 267 kN olarak elde edilmiştir. Böylece, SE analizleri ile deneyler arasında sadece ~%5'lik bir fark olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Böylece SE analizlerinin doğruluk derecesi net bir şekilde ortaya koyulmuş olup, daha farklı malzemelerin şekillendirilmesi ve optimum kalıp geometrilerin elde edilmesinde SE analizlerinin güvenle kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 10. Deney ve SE analizlerinde ıstampa üzerine gelen kuvvetin karşılaştırması

Figure 10. Comparison of the force on the punch in Experiment and FE analyses

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada AISI 304 paslanmaz çelik sacın Hidromekanik Derin Çekme (HDC) prosesiyle şekillendirilmesinde, geometrik parametrelerin prosese olan etkisi, SE analizleri ile araştırılmış ve kalıp tasarımında kullanılması en uygun olan geometrik parametre değerleri belirlenmiştir. Daha sonra uygun parametre değerleri ile sac parçalar şekillendirilebilirliği deneysel olarak da araştırılmış ve SE analizleri ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

SS 304 malzeme kullanılarak 40 mm çapında ve 2.5 sınır çekme oranına sahip silindirik bir parça üretilirken en uygun kalıp tasarım parametrelerinin tek taraflı boşluk için 1.5 mm, kalıp yarıçapı için 4 mm ve ıstampa burun yarıçapı için 6 mm olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu değerlerle sacda oluşan maksimum incelmenin %15.3 olduğu belirlenmiştir. Sayılan parametrelerden ıstampa yarıçapının, malzemenin şekillendirilebilirliği üzerinde diğer iki parametreye göre çok daha etkili olduğu bulunmuştur. İstampa yarıçapının artmasıyla, kalıp yarıçapının ise azalmasıyla sacda meydana gelen

yüzde incelme değerinin azaldığı yani şekillendirilebilirliğin arttığı görülmüştür. Klasik derin çekmede, kalıp yarıçapı arttıkça sacda oluşan incelmenin daha az eğme gerilmesi nedeniyle azalması beklenirken HDÇ prosesinde bunun tam tersi gözlemlenmiştir. Bu duruma, kalıp yarıçapının artmasıyla sacın desteksiz durduğu bölgenin artmasının neden olduğu düşünülmektedir. SE analizleri ve deneylerden elde edilen sonuçlar arasında büyük bir uyum olduğu bulunmuştur. Analiz ve deneylerde ölçülen istampa kuvveti arasında sadece %5 bir fark olduğu belirlenmiştir. Böylece daha farklı malzemelerin şekillendirilmesi ve optimum kalıp geometrilerinin elde edilmesinde SE analizlerinin güvenle kullanılabilmesi sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akay S.B., Şükür E.F., Turkoz M., Halkacı S., Koç M., Avcı S., "Determination of Proper Loading Profiles for Hydro-mechanical Deep Drawing Process using FEA", ITMS 2014, 16-17 Sept 2014, Singapore.
- Halkacı, M., Türköz, M., Dilmec, M., Halkacı, H. S., Dağhan, B., "Increasing the Limiting Drawing Ratio of AA 5754 Aluminum Sheet by Hydromechanical Deep Drawing Process", 10th International Conference Technology Plasticity (ICTP 2011), 25-30 Sep 2011, pp. 472 476, 2011, Aachen, Germany.
- Halkacı M., Halkacı H. S., Türköz M., Dağhan B., "A Study on DOE Methods for Hydromechanical Deep Drawing Process Parameters", ADME 2012, Taiyuan, China, 16-18 August 2012.
- Halkacı H.S., Turkoz M., Dilmec M., 2014, "Enhancing Formability in Hydromechanical Deep Drawing Process Adding a Shallow Drawbead to the Blank Holder, Journal of Material Processing Technology", Vol. 214, No: 8, pp. 1638-1646.
- Lang L., Danckert J., Nielsen K. B., 2004, "Investigation into the effect of pre-bulging during hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 649-657.
- Lin J., Zhao S.D., Zhang Z.Y., Wang Z.W., 2009, "Deep drawing using a novel hydromechanical tooling", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 49, pp. 73-80.
- Şahin S., 2004, "Hidrolik şekillendirme yönteminin esasları ve sınıflandırılması", Mühendis ve Makina, 45, 533
- Tinkir M., Dilmec M., Türköz M., Halkacı H. S., 2015, "Investigation of the effect of hydromechanical deep drawing process parameters on formability of AA5754 sheets metals by using neuro-fuzzy forecasting approach", Journal of Intelligent and Fuzzy Systems Vol.28, No:2, pp. 647-659.
- Turkoz M., Halkacı H.S., Dilmec M., "Investigation on the Effect of the Part Shape to the Optimal Fluid Pressure Path in Hydromechanical Deep Drawing Process", MS&T 13, Montreal, Kanada, 27-31 October 2013
- Yossifon S., Tirosh J., 1988, "On the permissible fluid-pressure path in hydroforming deep drawing process- Analysis of failures and experiments", Transactions of the ASME, Vol. 110, pp.146-152.
- Zhang S. H., Danckert J., 1998, "Development of hydro-mechanical deep drawing", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 83, pp. 14-25.
- Zhang S.H., Jensen M.R., Danckert J., Nielsen K.B., Kang D.C., Lang L.H., 2000, "Analysis of the hydro-mechanical deep drawing of cylindrical cups", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 103, pp.367-373.



A MARKOV DECISION PROCESS APPROACH FOR MENTAL HEALTH

Yasin GÖÇGÜN

*Altınbaş University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Industrial Engineering Department, İstanbul,
TURKEY*
yasin.gocgun@altinbas.edu.tr

(Geliş/Received: 21.02.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 21.10.2019)

ABSTRACT: Mind has various functions such as remembering a certain event, processing information, and providing responses to information it faces. During depression, mind does not work in an efficient way because of wasteful thoughts constantly occupying it. In this paper, we study the problem of how to react during depression, focusing on two decisions: ignoring the effects of wasteful thoughts on mind, and attempting to resolve depression. We model the problem of how to react during depression as a Markov Decision Process and solve it optimally. We also test the performance of two easy-to-use decision rules under diverse scenarios: always ignoring and always attempting to resolve.

Keywords: *Markov Decision Processes, mental health, optimality equations*

Zihinsel Sağlık için Markov Karar Süreci Yaklaşımı

ÖZ: Zihin belirli bir olayı hatırlama, bilgiyi proses etme ve maruz kaldığı bilgiye tepki verme gibi çeşitli fonksiyonlara sahiptir. Depresyon boyunca zihin, kendisini sürekli olarak meşgul eden gereksiz düşüncelerden dolayı verimli bir şekilde çalışmaz. Bu makalede, şu iki karara odaklanarak depresyon boyunca nasıl tepki verilmesi gerektiği problemini çalışmaktayız: gereksiz düşüncelerin zihin üzerindeki etkisini ihmal etme ve depresyonu çözmeye çalışma. Depresyon boyunca nasıl tepki verilmesi gerektiği problemini Markov Karar Süreci ile modellemekteyiz ve problemi optimal olarak çözmekteyiz. Ayrıca çeşitli senaryolar altında şu iki kolay-kullanılabilir karar kurallarının performansını test etmekteyiz: her zaman ihmal etme ve her zaman çözmeye çalışma.

Anahtar Kelimeler: *Markov Karar Süreçleri, zihinsel sağlık, optimalite denklemleri*

INTRODUCTION AND LITERATURE REVIEW

Mind is always in a particular state; it receives what it reads or sees, and begins to process them. During depression, mind is continuously affected by the source of depression, which can be a tragic event such as getting divorced, death of a family member, being bullied, or the image of a perpetrator. As a result, the information mind receives includes memories of a tragic event, which decreases the efficiency of mind since it struggles with thoughts related to such an event when performing a usual activity such as reading a text or performing a daily task at workplace.

An individual facing the abovementioned situation can be thought to choose one of the following decisions: 1) ignoring the effects of wasteful thoughts (depression) on mind, 2) attempting to resolve depression. In the former case, mind is constantly occupied by wasteful thoughts while the individual is working on her task. In the latter case, the individual tries to resolve the issue by having a break from her task and focusing on a relaxing activity for a short period. Certainly, both decisions cause waste of time and decrease in attention level.

To that end, we consider the problem of how to react during depression, focusing on the abovementioned decisions. The problem has the feature that the cause of depression dynamically arrives

at mind over time, forcing the individual to either ignore or attempt to resolve. We formulate the problem as a discrete-time finite horizon Markov Decision Process (MDP), a mathematical framework used to model systems that evolve probabilistically over time (Puterman, 1994).

In this paper, the following contributions are made:

- We introduce a depression handling problem in which an individual seeks to find optimal policy with the objective of maximizing her well-being, which we define as attention level minus the amount of time wasted.
- We formulate the problem as an MDP and solve it optimally.
- We test the performance of easy-to-use decision rules under diverse scenarios.
- We derive certain policy insights from our computational results.

There have been numerous studies on mental health (Parker *et al.*, 2016), (Bettis *et al.*, 2017), (Momotani and Yamamoto, 2014), (Fergusson *et al.*, 2015), (Kessler *et al.*, 2015). Examples of topics studied in the literature include adult mental health, long-term effects of being bullied, workplace bullying as an antecedent of mental health problems, and child and adolescent mental health. The related literature is reviewed below.

Lereya *et al.* (2015) studied consequences of peer bullying in childhood. Their analysis revealed that young adults' mental health is adversely affected by being bullied by peers in childhood. Outcalt *et al.* (2015) focused on chronic pain and comorbid mental health conditions. They analyzed baseline data to investigate whether posttraumatic stress disorder and major depression are associated with factors such as psychological status and quality of life. Sigurdson *et al.* (2015) studied the effects of being bullied on health problems in adulthood. Their findings revealed that there is an association between involvement in bullying in adolescence and later mental health problems.

Cuijpers *et al.* (2016) conducted a comprehensive meta-analysis for interpersonal psychotherapy for mental health problems. Their results indicate that interpersonal psychotherapy can be used to treat depression effectively. Einarsen and Nielsen (2015) examined whether there is a relationship between exposure to workplace bullying and mental health. They found that health and well-being of workers are threatened by workplace bullying. Bor *et al.* (2014) conducted a literature review to examine whether "child and adolescent mental health problems are increasing in the 21st century". Their findings revealed that, compared with previous cohorts, internalizing symptoms appear increasingly in recent cohorts of adolescent girls. Bruffaerts *et al.* (2018) studied mental health problems in college freshman. They point out that there is an association between mental health problems in college freshman and lower academic functioning.

Boardman *et al.* (2011) addressed the question of how the stigma of depression is linked to the responses to depression. Their results revealed that stigma is associated with ideas about depressive symptoms. Buckaloo *et al.* (2009) performed research on the effects of exercise on prison inmates, and found that exercise is a proper strategy to tackle incarceration. Jorm *et al.* (2006) conducted research on the claim that dealing with depression alone is better than seeking help. They concluded that adults generally embrace the view that personal weakness causes depression.

Patten (2005) developed Markov models that represent incidence, prevalence, and recovery from depression, and used Monte Carlo simulation to constrain model parameters to the respective data. Their study reveals that incidence and episode duration influences the period prevalence of depression. Other methods to deal with depression include longitudinal cohort studies (Boardman *et al.*, 2011), data analysis and statistical methods such as prediction (Buckaloo *et al.*, 2009), and meta-analysis (Corrigan *et al.*, 2014).

Examples of studies focusing on the impact of mental health problems can be summarized as follows. Corrigan *et al.* (2014) studied the elements of mental illness stigma and investigate public policy considerations that tackle this illness. They concluded that it is necessary to resort to policy change in overcoming the structural stigma. Motivated by the impact of working conditions of academic settings on mental health, Levecque *et al.* (2017) evaluated the prevalence of mental health problems in a group of PhD students in Belgium. Their analysis revealed that factors such as job demands, the

supervisor's leadership style, and the culture of team decision making are associated with mental health problems. Reiss (2013) surveys the literature on the relationships between a variety of indicators of socioeconomic status and mental health outcomes for children. Their review emphasizes the need for early childhood interventions to improve mental health in children.

MDP has been applied to a variety of health problems. Examples of those problems include "optimal assignment of treatments to health states" (Bala and Mauskopf, 2006), control of patient admissions in hospitals (Nunes *et al.*, 2009), assessment of pharmacoeconomics and health technology (Stahl, 2008), and disease prevention, disease screening and surveillance, and treatment decisions (Denton *et al.*, 2011).

Unlike our work, the mental health literature does not contain any work that models a mental health problem using MDPs.

PROBLEM DESCRIPTION AND MATHEMATICAL FORMULATION

The problem of dealing with depression can be described as follows.

- We consider depression in the sense that persistent thoughts and memories constantly occupy mind, thereby focusing on the negative effects of depression on the way mind works.
- We consider a finite time horizon, considering the effect of depression on mind for certain number of periods. This corresponds to a period in which the individual works on a particular task. Once this period ends, the individual's performance is evaluated.
- The imagination of a person who is the source of depression or the remembrance of a tragic event arrives at mind randomly at each time period, with probability P_d . We assume that at most one arrival occurs at each time period. The probability that depression is resolved at any given period when the individual attempts to resolve it is represented by P_r . We assume that depression may be resolved by having a break from work for a little while and being involved in a relaxing activity.
- If the individual ignores the effect of depression, then her attention level decreases by y_1 units and time lost increases by x_1 units. If the individual attempts and resolves depression, with certain probability P_r , attention level decreases by y_2 unit and time lost increases by x_2 units; with probability $1 - P_r$, attention level decreases by y_3 units and time lost increases by x_3 units.
- If depression arises during a given period, at the beginning of the next period, the individual performs the decision of ignoring or attempting to resolve.
- There are weights for attention level and time lost, respectively. These weights represent the effect of attention level and time lost on the individual's well-being, and are denoted by W_{al} and W_{tl} respectively.
- The objective is to handle depression with the objective of maximizing the well-being of the individual.

Markov Decision Process Model

Markov Decision Process (MDP) is a mathematical framework used to model systems that evolve probabilistically over time. An MDP consists of the following components: (Gocgun, 2018)

- Stage: "It consists of time periods through which the system evolves."
- State: "States capture the key features of the system at various time-points."
- Action: At each state, one of the feasible actions is selected.
- Probabilistic state transitions: The process switches to a new state probabilistically after an action is chosen at each state.
- Reward/cost: A reward is obtained or a cost is incurred for each state-action pair.

The objective of an MDP is “to compute an action in each state so as to maximize expected net reward (or minimize expected cost)” (Gocgun, 2018).

State Space

The state space $s \in S$ takes the following form.

$$s = (al, tl, c),$$

where al is attention level, tl is time lost, and c is a binary variable indicating whether there is a depression to be dealt with or not.

Action Sets

The decision of the individual at the beginning of each period is to either ignore or attempt to resolve depression, if there is depression. Otherwise there is no decision to be made. A_s denotes the set of available actions in state s . Any action in s is represented by:

$$a = (d),$$

where d is *ignore* or *attempt to resolve*. Note that actions are chosen deterministically.

Transition Probabilities

After a decision is made, the state changes as follows.

If there is depression and the decision of the individual is to ignore,

$$s' = \begin{cases} (al - y_1, tl + x_1, 0), & \text{with probability } 1 - p_d \\ (al - y_1, tl + x_1, 1) & \text{with probability } p_d \end{cases} \quad (1)$$

If there is depression and the individual's decision is to attempt to resolve depression,

$$s' = \begin{cases} (al - y_2, tl + x_2, 0), & \text{with probability } (1 - p_d)(p_r) \\ (al - y_2, tl + x_2, 1) & \text{with probability } p_d(p_r) \\ (al - y_3, tl + x_3, 0) & \text{with probability } (1 - p_d)(1 - p_r) \\ (al - y_3, tl + x_3, 1) & \text{with probability } (p_d)(1 - p_r) \end{cases} \quad (2)$$

Rewards

The immediate reward is expressed as

$$r(a) = w_{al}(al) - w_{tl}(tl), \quad (3)$$

and represents the well-being of the individual at current stage.

Optimality Equations

Optimality equations for finding a policy that maximizes the expected well-being of the individual is expressed as follows:

$$v_n(s) = \max_{a \in A_s} \left\{ r(a) + \sum_{s' \in S} P(s' | s, a) v_{n+1}(s') \right\}, n = 1, \dots, N, \forall s \in S, \quad (4)$$

where $v_n(s)$ is the value function and gives us the optimal value of the MDP for state s , $P(s' | s, a)$ is the probability that the next state is s' given that action a is chosen at state s .

$$v_{N+1}(s) = al(w_{fa}) - tl(w_{ft}), \quad (5)$$

where w_{fa} is the end-of-period weight for attention level, and w_{ft} is end-of-period weight for time lost.

The following calculation is performed at each stage:

$$a^*(s) \in \operatorname{argmax}_{a \in A_s} \left\{ r(a) + \sum_{s' \in S} P(s' | s, a) v_{n+1}(s') \right\}, n = 1, \dots, N - 1. \quad (6)$$

At the end of the horizon (which could be a day), the individual's performance will be evaluated; these end-of-period weights are used to determine whether attention level or time lost is more important for the individual.

The solution of the above standard recursive equations for all s and $n = 1, \dots, N$ provides us an optimal policy (Puterman, 1994). In particular, we solve our finite-horizon MDP by using the backward induction technique (BIT). The BIT solves the optimality equations given in equations (4) and (5) backwards in time and then obtains the optimal actions given in Equations (6). We define initial conditions through Equation (1) and calculate the value function one stage at a time (Alagoz *et al.*, 2010).

NUMERICAL RESULTS

This section contains computational results obtained by employing optimal policy as well as easy-to-use decision rules. We used R, a free software environment for statistical computing, for employing these decision rules.

Experimental Design

We consider a depression handling problem in which the length of the finite horizon is 48 (the length of each period is 10 minutes; therefore the length of the horizon is 8 hours). Probability that depression occurs at any period (p_d) is assigned two levels: 0.9 and 0.5 (the first level corresponds to high-frequency depression situation and the second one corresponds to medium-frequency depression situation).

Probability that depression is resolved after the individual attempts to resolve has three levels: 0.25, 0.5, and 0.75 (corresponding to low, medium, and high levels). By varying the levels of w_{fa} , w_{ft} , w_{al} , w_{tl} and p_d , we created 15 scenarios, which are described in Table 1. The ratio of any of w_{al} and w_{tl} to any of w_{fa} and w_{ft} is set to at least 1/200 and at most 1/25 as end-of-period weights are expected to be reasonably higher than w_{al} and w_{tl} . In order to create enough trade-offs, the ratio of w_{al} to w_{tl} is set to two levels: 1 and 2.

Table 1. Scenarios used in testing decision rules.

Scenario	w_{al}	w_{tl}	w_{fa}	w_{ft}
1	1	1	50	100
2	1	1	100	50
3	1	1	50	200
4	1	1	200	50
5	1	1	100	200
6	1	1	200	100
7	2	1	50	50
8	2	1	50	100
9	2	1	100	50
10	2	1	50	200
11	2	1	200	50
12	2	1	100	100
13	2	1	100	200
14	2	1	200	100
15	2	1	200	200

Regarding the relationship between x_i 's and y_i 's, we consider the following two cases.

Case 1: $y_1 = y_3 = 4y_2$, $x_3 = 2x_1 = 2x_2$

Case-2: $y_1 = y_3 = 2y_2$, $x_3 = 2x_1 = 2x_2$

Without loss of generality, we set y_2 to 1 and x_2 to 2. Consider Case-1; if the individual ignores the effect of depression, then her attention level decreases by 4 units and time lost increases by 2 units. This is due to the fact that in this case wasteful thoughts will occupy the mind, which adversely affects attention level and cause waste of time due to decrease in the efficiency of mind. On the other hand, if the individual attempts to resolve depression, with probability p_r , attention level decreases by 1 unit and time lost increases by 2 units; with probability $(1 - p_r)$, attention level decreases by 4 units and time lost increases by 4 units. The reason is that when depression is resolved, attention level will decrease slightly and the amount of time lost will be moderate; if it is not resolved, attention level will decrease significantly and the amount of time lost will be high.

We generated 180 problem sets since the number of scenarios is 15, the probability that depression is resolved has three levels, the probability that depression occurs at a given period has two levels, and we have two cases regarding the values of x_i s and y_i s. For each problem set, we ran 1000 independent simulations for the policy retrieval process (i.e., utilizing the optimal action for each state visited). To be more specific, we first find the optimal policy for a given problem set using the BIT, which gives us the optimal action at each state. Then we simulate the system, which transitions to various states because of random arrivals of the source of depression. Since we know the optimal action for each state visited, we are able to calculate the resulting cost for each of 48 stages.

In this work, we tested the performance of the following decision rules.

Always Ignore (IGN): According to this rule, the individual always chooses to ignore in case of depression.

Always Attempt to Resolve (RES): In case of depression, this rule always chooses the option of attempting to resolve.

Results

Our results are presented in tables 2,3,4, and 5. Tables 2 and 3 correspond to Case-1, whereas tables 4 and 5 correspond to Case-2. Each row of the below tables corresponds to a different problem set. The

values provided in each table are percentage differences between the optimal policy and the respective decision rule. Further, "Best str" means best strategy, and IGN and RES correspond to "always ignore" and "always attempt to resolve" decision rules.

We begin with the analysis of Table 2 for which $p_d = 0.9$. Our results reveal that, for $p_r = 0.5$ (the probability that depression is resolved after the individual attempts to resolve it), the "always attempt to resolve" decision rule performs better in 10 out of 15 problem sets. Whereas the "always ignore" decision rule performs better in 4 out of 15 problem sets. Additionally, if average percentage difference between the optimal policy and the respective decision rule is considered, the "always attempt to resolve" decision rule performs significantly better than the other rule. When p_r is 0.25, the "always ignore" decision rule outperforms the other rule in 11 out of 15 problem sets, whereas the "always attempt to resolve" decision rule is the best rule in 2 out of 15 problem sets. The two decision rules perform nearly the same in the remaining 2 problem sets. Further, the "always attempt to resolve" decision rule performs better in all the problem sets when p_r is 0.75.

When the end-of-period weight for attention level (w_{fa}) is higher than the end-of-period weight for happiness level for time lost (w_{ft}), which corresponds to scenarios 2,4,6,9,11, and 14, the "always attempt to resolve" decision rule always outperforms the other rule for the $p_r = 0.5$ and $p_r = 0.75$ cases.

When depression occurs less frequently, which corresponds to $p_d = 0.5$, the only change with respect to Table 2 is in percentage differences between the optimal policy and the respective decision rule. In this case, the percentage difference values drop significantly. What is more, the "always attempt to solve" decision rule performs as well as the optimal policy in almost all the problem sets when p_r is 0.75 (see Table 3).

When the effect of the action of *ignore* is less severe (corresponding to Case-2), the "always ignore" decision rule generally performs better than the other decision rule for the $p_r = 0.25$ and $p_r = 0.5$ cases. On the other hand, for the $p_r = 0.75$ case, the "always attempt to resolve" decision rule generally performs better than the other rule (see tables 4 and 5).

Table 2. Case-1 results for $p_d = 0.9$.

Scenario	Resolve prob		0.25 best str	Resolve prob		0.5 best str	Resolve prob		0.75 best str
	IGN	RES		IGN	RES		IGN	RES	
1	247	386	IGN	245	260	IGN	177	91	RES
2	1025	1095	IGN	2804	1763	RES	1425	240	RES
3	165	306	IGN	147	201	IGN	100	81	RES
4	396	362	RES	1366	677	RES	2047	151	RES
5	230	361	IGN	223	244	IGN	155	88	RES
6	997	1035	IGN	2513	1568	RES	1167	211	RES
7	3836	4533	IGN	864	536	RES	2496	233	RES
8	426	617	IGN	181	161	RES	191	44	RES
9	3223	3226	BOTH	13688	6963	RES	1862	98	RES
10	206	362	IGN	78	105	IGN	69	34	RES
11	1316	1124	RES	1020	435	RES	697	27	RES
12	784	955	IGN	355	244	RES	375	52	RES
13	291	438	IGN	126	127	BOTH	114	36	RES
14	97	97	BOTH	1345	716	RES	1453	94	RES
15	517	640	IGN	252	186	RES	229	40	RES

Table 3. Case-1 results for $p_d = 0.5$

Scenario	Resolve prob		0.25 best str	Resolve prob		0.5 best str	Resolve prob		0.75 best str
	IGN	RES		IGN	RES		IGN	RES	
1	48	169	IGN	47	61	IGN	93	0	RES
2	631	832	IGN	187	12	RES	128	0	RES
3	26	123	IGN	24	64	IGN	32	13	RES
4	155	90	RES	121	3	RES	111	0	RES
5	38	131	IGN	34	50	IGN	61	0	RES
6	501	582	IGN	311	19	RES	151	0	RES
7	53	101	IGN	65	5	RES	82	0	RES
8	507	1566	IGN	2657	1747	RES	254	0	RES
9	62	62	BOTH	78	2	RES	88	0	RES
10	40	177	IGN	33	73	IGN	65	0	RES
11	74	36	RES	85	2	RES	91	0	RES
12	453	899	IGN	210	35	RES	132	0	RES
13	62	199	IGN	70	72	BOTH	142	0	RES
14	179	180	BOTH	127	2	RES	112	0	RES
15	137	278	IGN	312	86	RES	275	0	RES

Table 4. Case-2 results for $p_d = 0.9$

Scenario	Resolve prob		0.25 best str	Resolve prob		0.5 best str	Resolve prob		0.75 best str
	IGN	RES		IGN	RES		IGN	RES	
1	143,22	284,37	IGN	143,22	217,63	IGN	143,18	149,65	IGN
2	286,77	423,09	IGN	286,77	310,10	IGN	299,32	204,61	RES
3	119,42	260,90	IGN	119,42	203,61	IGN	117,94	143,73	IGN
4	586,57	710,43	IGN	586,57	509,69	RES	655,17	346,03	RES
5	145,62	285,95	IGN	145,62	221,21	IGN	145,18	154,97	IGN
6	321,95	455,45	IGN	321,95	337,27	IGN	337,05	228,49	RES
7	278,88	460,78	IGN	272,43	326,56	IGN	208,52	148,38	RES
8	181,32	342,25	IGN	171,79	245,17	IGN	128,93	120,79	RES
9	444,25	626,86	IGN	444,44	448,34	IGN	339,53	197,32	RES
10	135,91	287,08	IGN	127,67	210,06	IGN	91,92	107,97	IGN
11	1024,54	1209,61	RES	1131,13	944,68	RES	782,64	362,86	RES
12	246,62	406,32	IGN	238,15	292,40	IGN	181,02	140,40	RES
13	165,09	315,34	IGN	157,14	231,64	IGN	115,28	116,79	IGN
14	410,86	567,47	IGN	409,52	413,59	IGN	310,37	189,10	RES
15	229,93	378,15	IGN	222,62	276,95	IGN	166,89	136,30	RES

Table 5. Case-2 results for $p_d = 0.5$

Scenario	Resolve prob		0.25	Resolve prob		0.5	Resolve prob		0.75
	IGN	RES	best str	IGN	RES	best str	IGN	RES	best str
1	22	121	IGN	22	75	IGN	22	27	IGN
2	58	181	IGN	58	81	IGN	76	0	RES
3	18	108	IGN	18	72	IGN	17	33	IGN
4	162	313	IGN	203	103	RES	545	0	RES
5	22	112	IGN	22	71	IGN	21	28	IGN
6	57	160	IGN	57	71	IGN	73	0	RES
7	89	368	IGN	89	175	IGN	116	0	RES
8	32	165	IGN	32	96	IGN	34	25	RES
9	228	664	IGN	215	226	IGN	1289	0	RES
10	21	123	IGN	21	80	IGN	20	34	IGN
11	602	1090	IGN	417	137	IGN	158	0	RES
12	48	186	IGN	48	97	IGN	55	7	RES
13	26	129	IGN	26	79	IGN	26	28	IGN
14	94	251	IGN	91	96	IGN	146	0	RES
15	38	143	IGN	38	78	IGN	41	14	RES

In light of the abovementioned results, we have the following insights for the depression handling problem.

- Probability that depression is resolved is one of the determinants for the best decision rule.
- If probability that depression is resolved has moderate values, the “always attempt to resolve”[®] decision rule generally performs better than the “always ignore” decision rule when the effect of ignoring is severe (corresponding to Case-1). Whereas the “always ignore”[®] rule generally performs better than the other decision rule when the effect of ignoring is not severe.
- If probability that depression is resolved has small values, the individual should generally follow the “always ignore” decision rule.
- If probability that depression is resolved is considerably high, the individual should generally follow the “always attempt to resolve” decision rule.

CONCLUSIONS

We studied the problem of how to deal with depression, focusing on two decisions: : ignoring the effects of wasteful thoughts on mind, and attempting to resolve depression. We modeled the problem as an MDP, solved it optimally and assessed the performance of two easy-to-use decision rules under diverse scenarios. Our computational results revealed that the best decision rule to implement depends on the probability that depression is resolved.

Our work reveals that easy-to-use decision rules provide somewhat good solutions for the depression handling problem we introduced. Future research could consider similar problems that lead to more realistic models. In particular, different types of arrivals of events that cause depression can be considered, and models in which state space is more complex can be studied. It would also be interesting to use infinite-horizon MDPs for modeling such problems. In that case, because of the computational intractability, an approximate solution rather than an optimal solution can be obtained through approximate dynamic programming techniques.

REFERENCES

- Alagoz, O., Hsu, H., Schaefer, A.J., Roberts, M.S., Markov decision processes: a tool for sequential decision making under uncertainty. *Medical Decision Making*, 30 (4), pp. 474-483, 2010.
- Bala, M.V., Mauskopf, J.A.: Optimal assignment of treatments to health states using a Markov decision model: an introduction to basic concepts. *Pharmacoeconomics* **24**, 345-354, 2006.
- Bettis, A. H., Coiro, M. J., England, J., Murphy, L. K., Zerkowicz, R. L., Dejardins, L. and Compas, B. E. Comparison of two approaches to prevention of mental health problems in college students: enhancing coping and executive function skills. *Journal of American College Health*, 65:313-322, 2017.
- Bor, W., Dean, A.J., Najman, J. and Hayatbakhsh, R. Are child and adolescent mental health problems increasing in the 21st century? a systematic review. *Austral. N.Z. J. Psychiatry*, 48:606-616, 2014.
- Boardman, F., Griffiths, F., Kokanovic, R., Potiriadis, M., Dowrick, C., & Gunn, J. Resilience as a response to the stigma of depression: A mixed methods analysis. *Journal of Affective Disorders*, 135, 267-276, 2011.
- Bruffaerts, R., Mortier, P., Kiekens, G., Auerbach, R.P., Cuijpers, P., Demeyttenaere, K., Green, J.G., Nock, M.K. and Kessler R.C., Mental health problems in college freshmen: prevalence and academic functioning. *J Affect Disord*, 225:97-103, 2018.
- Buckaloo, B. J., Krug, K. S., & Nelson, K. B. Exercise and low-security inmate: Changes in depression, stress, and anxiety. *The Prison Journal*, 89, 328-343, 2009.
- Corrigan, P, Druss, B, Perlick, D. The impact of mental illness stigma on seeking and participating in mental health care. *Psychol Sci Public Interest*. 5(2):37-70, 2014.
- Cuijpers, P., Donker, T., Weissman, M.M., Ravitz, P. and Cristea, I.A., Interpersonal psychotherapy for mental health problems: a comprehensive meta-analysis. *Am J Psychiatry*, 173:680-687, 2016.
- Denton, B.T., Alagoz, O., Holder, A. and Lee, E.K. Medical decision making: open research challenges. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 1(3), 161-167, 2011.
- Einarsen, S. and Nielsen, MB. Workplace bullying as an antecedent of mental health problems: a five-year prospective and representative study. *Int Arch Occ Environ Health*, 88:131-142, 2015.
- Fergusson, D. M., McLeod, G. F., Horwood, L.J., Swain, N. R. , and Chapple, S., Life satisfaction and mental health problems (18 to 35 years). *Psychol Med*, 45:2427-2436, 2015.
- Gocgun, Y., Approximate dynamic programming for optimal search with an obstacle. *Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech*, 2018.
- Jorm AF, Kelly CM, Wright A, Parslow RA, Harris MG, McGorry PD: Belief in dealing with depression alone: results from community surveys of adolescents and adults. *J Affect Disord*. 96: 59-65, 2006.
- Kessler, R. C., N. A. Sampson, and P. Berglund. Life satisfaction and mental health problems (18 to 35 years). *Epidemiol Psychiatr Sci*, 24:210-226, 2015.
- Lereya, S.T., Copeland, W.E. Costello, E.J. and Wolke, D., Adult mental health consequences of peer bullying and maltreatment in childhood: two cohorts in two countries. *Lancet Psychiatry*, 2:524-531, 2015.
- Levecque, K., Anseel, F., De Beuckelaer, A., Van der Heyden, J., & Gisle, L. Work organization and mental health problems in PhD students. *Research Policy*, 46(4), 868-879, 2017.
- Momotani, H. and Yamamoto, H., Mental health problems. *Japanese Journal of Clinical Medicine*, 72:288-292, 2014.
- Nunes, L.G. Nadal, de Carvalho, S., Rodrigues, R. Markov decision process applied to the control of hospital elective admissions. *Artif. Intell. Med.*, **47**, 159-171., 2009.
- Outcalt, S.D., Kroenke, K. and Krebs, E.E., Chronic pain and comorbid mental health conditions: independent associations of posttraumatic stress disorder and depression with pain, disability, and quality of life. *J Behav Med*, 38:535-543, 2015.
- Parker, A.G. Hetrick, S.E. Jorm, A.F. Yung, A.R. McGorry, P.D. Mackinnon, A. Moller, B. and Purcell, R., The effectiveness of simple psychological and physical activity interventions for high

- prevalence mental health problems in young people: a factorial randomised controlled trial. *J. Affect. Disord.*, 196:200–209, 2016.
- Patten, SB: Markov models of major depression for linking psychiatric epidemiology to clinical practice. *Clin Pract Epidemiol Ment Health*. 1 (1): 2-10, 2005.
- Puterman, M., *Markov Decision Processes*. John Wiley and Sons, New Jersey, 1994.
- Reiss, F., Socioeconomic inequalities and mental health problems in children and adolescents: A systematic review, *Soc Sci Med*, 90, pp. 24-31, 2013.
- Sigurdson, J.F., A.M. Undheim, J.L. Wallander, S. Lydersen, and A.M. Sund. The long-term effects of being bullied or a bully in adolescence on externalizing and internalizing mental health problems in adulthood. *Child Adolesc Psychiatry Ment Health*, 9:42, 2015.
- Stahl, J.E., Modelling methods for pharmacoeconomics and health technology assessment: an overview and guide, *Pharmacoeconomics*, 26 (2), 131-148, 2008.



PROCESSING OF β -TYPE BIOMEDICAL $Ti_{74}Nb_{26}$ ALLOY BY COMBINATION OF HOT PRESSING AND HIGH TEMPERATURE SINTERING

¹Tarık AYDOĞMUŞ^{ID}, ²Nuaman Jasim Filamarz Al-ZANGANA^{ID}, ³Fevzi KELEN^{ID}

^{1,2}Van Yüzüncü Yıl University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Van, TURKEY

²Sulaimani Polytechnic University, Technical College of Engineering, Sulaimani, IRAQ

³Van Yüzüncü Yıl University, Van Vocational School, Department of Motor Vehicles and Transport Technologies, Van, TURKEY

¹aydogmus@yyu.edu.tr, ²nuaman.zangana@spu.edu.iq, ³fkelen@yyu.edu.tr

(Geliş/Received: 05.07.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.11.2019)

ABSTRACT: Titanium (Ti)-Niobium (Nb) alloys are generally produced by casting methods. Since the melting temperatures of pure Ti and Nb are quite high, their fabrication by casting techniques is costly. On the other hand, it is possible to produce these alloys economically at much lower temperatures (less than melting temperature of Ti), completely in solid state using powder metallurgy. In the present study, $Ti_{74}Nb_{26}$ alloys were produced using pure Ti and pure Nb powders by combination of hot pressing and high temperature sintering for the first time. The influences of processing temperature and time on density, microstructure, and mechanical behavior were investigated. Density measurements showed that hot pressing at 800 °C provided full density. XRD and SEM investigations revealed that amount of β phase formed increased with increasing sintering time. In addition to main phase β , little amount of α phase and a very small amount of pure Nb were observed in the microstructure. Mechanical properties were measured by means of uniaxial compression and micro Vickers indentation tests. The results indicated that 4 h of sintering at 1200 °C exhibited the highest value of hardness (336 HV), elastic modulus (44 GPa), yield strength (894 MPa), and compressive strength (1178 MPa).

Key Words: Titanium-Niobium alloys, Powder metallurgy, Hot pressing, Sintering, Microstructure, Mechanical properties.

Sıcak Presleme Ve Yüksek Sıcaklık Sinterleme Kombinasyonu İle B Tipi Biyomedikal $Ti_{74}Nb_{26}$ Alaşımının Üretimi

ÖZ: Ti-Nb alaşımları genellikle döküm yöntemi ile üretilirler. Saf Ti ve Nb'un erime sıcaklıkları oldukça yüksek olduğundan döküm yoluyla Ti-Nb alaşımlarını üretmek maliyetlidir. Toz metalurjisi yöntemi ile bu alaşımları çok daha düşük sıcaklıklarda (Ti erime sıcaklığından daha az) ve tamamen katı halde ekonomik olarak üretmek mümkündür. Bu çalışmada $Ti_{74}Nb_{26}$ alaşımları saf Ti ve saf Nb tozları kullanılarak, sıcak presleme ve yüksek sıcaklık sinterlemesinin ilk kez birlikte uygulanması ile üretilmiştir. Üretim sürecinde uygulanan işlem sıcaklığı ve zamanının yoğunluk, mikroyapı ve mekanik davranış üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yoğunluk ölçümleri, 800 °C'de yapılan sıcak presleme işleminin tam yoğunluğu sağladığını göstermiştir. XRD ve SEM incelemeleri, sinterleme süresinin artmasıyla birlikte β fazı oluşumunun arttığını ortaya koymuştur. Ana faz β 'ya ilaveten, mikroyapıda az miktarda α fazı ve çok az miktarda saf Nb gözlenmiştir. Mekanik özellikler tek eksenli basma ve mikro Vickers sertlik testleri ile belirlenmiştir. Mekanik test sonuçları, 1200 °C'de 4 saatlik sinterlemenin en yüksek sertlik (336 HV), elastik modül (44 GPa), akma mukavemeti (894 MPa) ve basma mukavemeti (1178 MPa) değerlerini sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Titanyum-Niobyum alaşımları, Toz metalurjisi, Sıcak presleme, Sinterleme, Mikroyapı, Mekanik özellikler

1. INTRODUCTION

Stainless steels, cobalt based alloys and Ti alloys are the most widely used metallic biomaterials. Among them Ti alloys show the highest biocompatibility, specific strength and corrosion resistance. The use of Ti alloys is not limited only to the biomaterials industry they are also used in aerospace applications since they have numerous favorable mechanical properties, such as good fatigue strength, high wear resistance, excellent fracture toughness and high strength to weight ratio compared to other materials or alloys (Elias *et al.*, 2006; Niinomi *et al.*, 2012; Zhuravleva *et al.*, 2013; Cremasco *et al.*, 2013; Sharma *et al.*, 2016).

Inadequate wear resistance, high oxidation at elevated temperatures, low hardness and low yield strength of pure Ti reduce the lifetime of parts and limit fields of its application (Shymanski *et al.*, 2015). Varying physical, chemical and mechanical properties for Ti alloys can be achieved by alloying Ti with several metallic elements, such as aluminum (Al), vanadium (V), iron (Fe), tin (Sn), molybdenum (Mo), chromium (Cr), zirconium (Zr), tantalum (Ta) and Nb. In order to solve the toxicity problems of some alloying elements, such as nickel (Ni), Al and V new Ti alloys were suggested (Niinomi *et al.*, 2012). These new metastable β -Ti alloys, such as Ti-Nb, Ti-Ta and Ti-Zr show considerable promise due to their superior properties including lower elastic moduli, higher strength, good ductility and compositions absent of potentially cytotoxic elements. Among them Ti-Nb based alloys display the lowest elastic moduli and better shape memory effect (Kim *et al.*, 2006; Niinomi *et al.*, 2012; Kent *et al.*, 2013). Pure Nb is a completely biocompatible material and doesn't cause any tissue reaction. Young's modulus of Ti alloys can be reduced by adding Nb acting as a β -phase stabilizing element in Ti alloys (Wang and Zheng, 2009; Niinomi *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2015). Nb also increase the resistance of Ti to oxidation and contributes to decrease of oxygen solubility and further oxygen diffusion into the alloy (Han *et al.*, 2015). These properties make Ti-Nb alloys faithful and possible candidate biomedical materials for replacing frequently used commercial Ti6Al4V and TiNi alloys (Kim *et al.*, 2006; Wang and Zheng 2009; McMahon *et al.*, 2012; Kent *et al.*, 2013; Andrade *et al.*, 2015; Bönisch *et al.*, 2015; Prokoshkin *et al.*, 2016).

Ti-Nb alloys are generally produced by casting techniques (Hon *et al.*, 2003; Ozaki *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2006; Chai *et al.*, 2008; Chai *et al.*, 2009; Ma *et al.*, 2010; Cremasco *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2015; Bönisch *et al.*, 2015; Prokoshkin *et al.*, 2016). Porosity, rough microstructure, and composition segregation are the main defects normally present by casting and greatly worsen the mechanical properties. Also, melting points of Ti and Nb, 1668 and 2477 °C, respectively, are extremely high that special furnaces (vacuum arc melting, VAM and vacuum induction melting, VIM), too much energy and expensive equipments such as vacuum are needed to produce Ti-Nb alloys via casting methods. Expensive machining operations and high cost of raw materials are other cost-increasing factors. Significant cost reductions can be achieved by using powder metallurgy techniques to get near net shapes while reducing processing temperature and machining time and material waste. Ti-Nb based alloys can be manufactured by powder metallurgical processing techniques using elemental powders, since they require relatively low temperatures (less than melting point of Ti) for sintering compared to higher casting temperatures needed for VAM or VIM.

The objective of the present study is to fabricate and characterize bulk Ti₇₄Nb₂₆ alloy which is a promising candidate material for metallic implant applications. The reason for choosing this composition is that it has the lowest elastic modulus value, ~60 GPa, (Ozaki *et al.*, 2004) among Ti-Nb binary alloys very important to prevent or minimize stress shielding effect occurring as a result of the mismatch between elastic modulus of the implant material and that of bone (less than 30 GPa, Li *et al.*, 2014) and may results in loosening of the implant. The alloy has been produced combining hot pressing (for full densification) and high temperature sintering (for Nb dissolution in Ti and accordingly to obtain β phase) for the first time since the previous studies such as carried out by Santos *et al.*, 2005 reported that conventional or pressureless powder metallurgy methods could not achieve full density and could not get rid of the porosity completely even for sintering temperatures as high as 1600 °C.

2. MATERIALS and METHODS

In the present study, elemental pure Ti (99.5%) and pure Nb (99.8 %) powders (both of them smaller than 45 μm and supplied by Alfa Aesar, Germany) were used to fabricate Ti-40Nb (wt. %) corresponding to Ti₇₄Nb₂₆ alloy by at. %. Scanning electron microscope (SEM) images given in Figure 11 show the morphological properties of as-received powders. The shapes of Ti and Nb powder particles were irregular since they were produced hydride dehydride conversion technique.

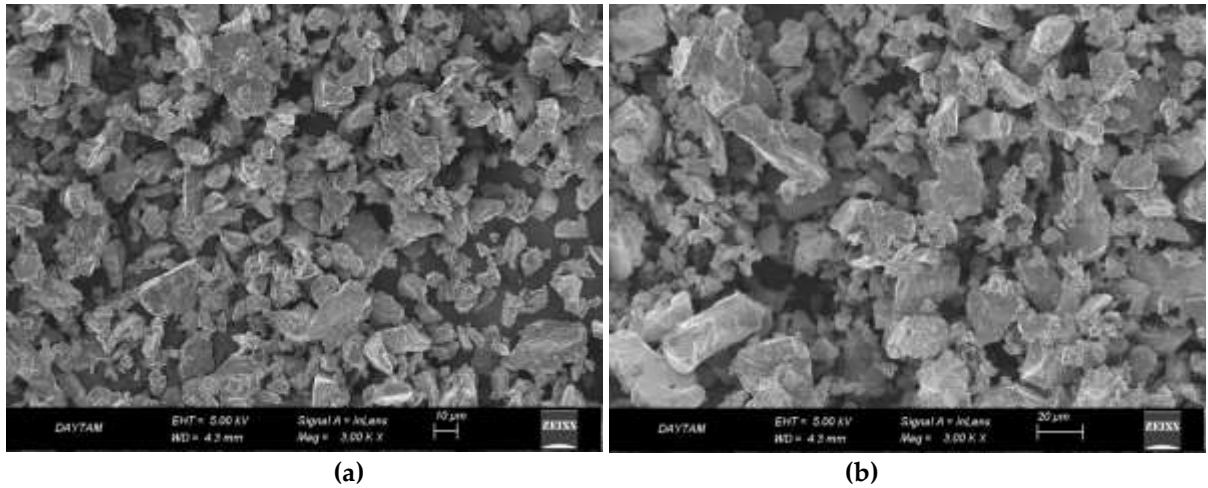


Figure 1. SEM micrographs of pure (a) Ti and (b) Nb powders.

Figure 2 presents the X-Ray Diffraction (XRD) results of starting raw powders. The phases existing in the microstructure of Ti and Nb powders were pure α -Ti with a hexagonal close packed (HCP) crystal structure and pure Nb with a body centered cubic (BCC) structure. None of the powders contained oxide or carbide phases so that they were free from any type of contamination.

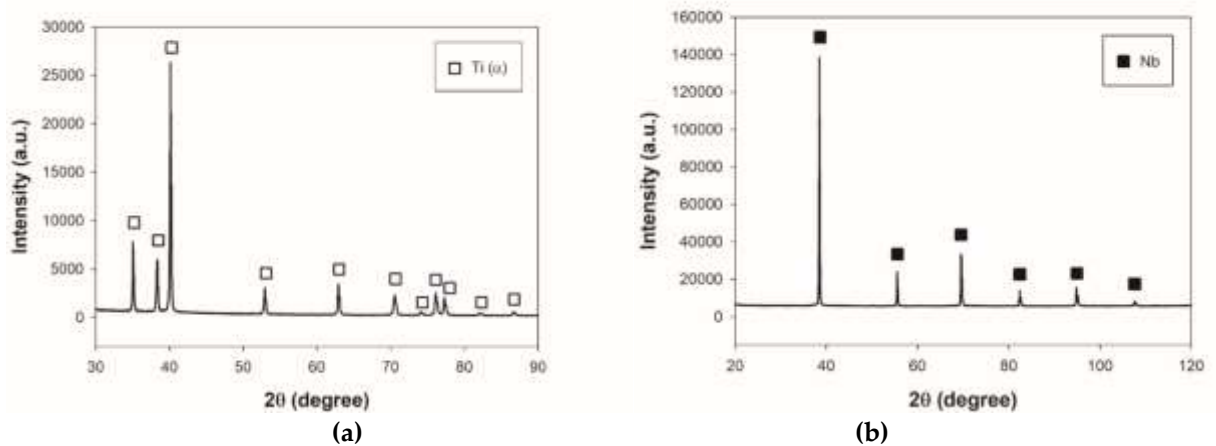


Figure 2. XRD patterns of as-received (a) Ti powders and (b) Nb powders

Composition of the Ti-Nb alloy is selected to be Ti₇₄Nb₂₆ because this composition has the lowest elastic modulus value as stated before. Weights of raw powders were calculated considering the selected composition and final dimensions of the cylindrical samples (15 mm in diameter and 10 mm in height). It was assumed that hot pressed samples would attain full density (zero porosity) in order to get the predetermined height or thickness of 10 mm. Powders were weighted using an electronic balance and mixed manually with the help of a binder, ethylene, for 15 minutes to obtain a homogeneous mixture. Afterwards, the mixture was charged into a hollow cylindrical graphite die with inner diameter of 15 mm.

The graphite die tool filled with Ti and Nb powder mixture was put into the pressing chamber. Then the door of hot pressing chamber was closed and the chamber was vacuumed. Following vacuuming the chamber was filled with pure argon gas. This procedure was repeated 3 times and all the residual air was swept away from the chamber. Specimens were heated to the hot pressing temperatures predetermined, pressed and sintered at those temperatures simultaneously for 1 h of constant time. The pressure applied during heating, pressing and cooling steps kept constant as 50 MPa. An MSE_M_HP_1300 model hot press was employed to produce samples and hot pressing operation was carried out at 600 °C, 650 °C and 800 °C. All the hot pressing experiments were done under flowing argon gas atmosphere to prevent oxidation of samples. Finally, hot pressed samples were left to cooling inside the chamber and taken from the chamber when the temperature decreased to 150 °C. The graphite deposited as a thin layer on the hot pressed sample surfaces were removed applying grinding for which a wheel rotating type machine (Struers Labo Pol 5) and 240 and 320 grit SiC papers were used. After grinding, samples were cleaned in an ultrasonic cleaner for 10 minutes to remove possible residues and left drying. Next, samples put in an alumina (Al_2O_3) crucible were further sintered at 1200 °C in a vertical tube furnace (Protherm PTF 14/50/450) for 1, 2, 3 and 4 h under flowing argon gas to obtain desired β phase providing Nb dissolution in Ti. Sintering temperature (1200 °C) was kept constant for all the specimens. After sintering, the samples were furnace cooled and removed from the furnace at 200 °C. Heating, sintering and cooling curves are given in Figure 3. Temperature-time curve of hot pressing has also been added into that figure for comparison. Initial linear region in the curves represents heating step where the heating rates were kept constant as 10 and 8 °C/min for hot pressing and sintering, respectively. Horizontal second region corresponds to hot pressing or sintering time and finally the third region shows the cooling step where the slopes of the curves at different points are variable, not constant. This means that cooling rate is not constant during cooling; it is maximum just after sintering completed (at the beginning of the cooling stage) and decreases with time.

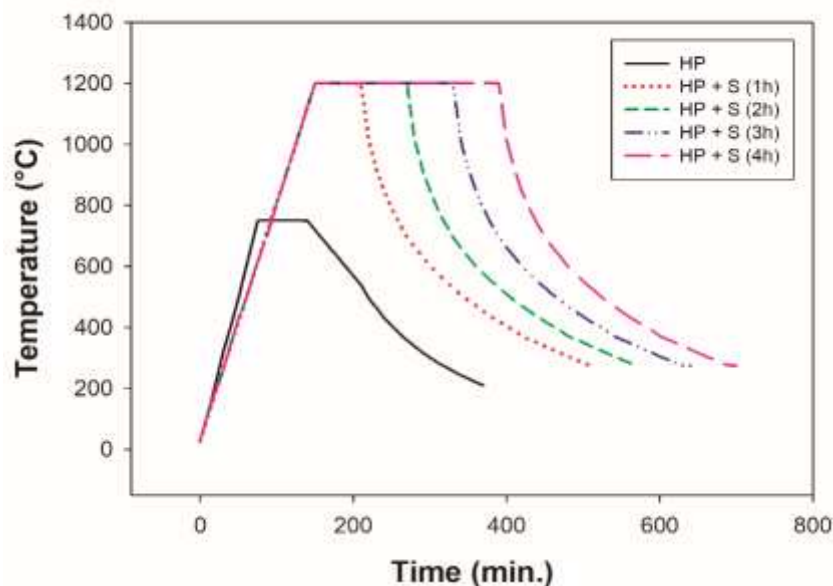


Figure 3. Temperature-time curves of hot pressing (HP) for 1h and following sintering (HP+S) processes for different times.

Density and the porosity of the samples in hot pressed and sintered conditions were measured using Archimedes' principle employing an electronic precision balance (X Precisa 321) equipped with a density determination kit by using the water replacement (suspension) method.

The samples for microstructural and mechanical characterization were cut in the dimensions of 5x5x10 mm using electrical discharge machine systems (EDM), Charmilles Robofil 290 and 310. Samples in

compression tests were used as they were cut. For XRD studies surface of the samples were grinded with 320 SiC papers to remove contamination residues left after cutting operation. For micro hardness and SEM investigations specimens were subjected to full metallographic preparation steps in which grinding (240-1200 grinding papers), polishing (diamond suspension, 3 μm) and finally etching was applied, respectively. Kroll's reagent (3 ml HF + 6 ml HNO₃ + 100 ml H₂O) was used to etch the samples for about 15 seconds.

XRD analysis were carried out using a PANalytical Empyrean model X-ray diffractometer with CuK α radiation ($\lambda=1.540598 \text{ \AA}$) at 45 kV, 40 mA within a range of diffraction angles 2θ from 20° to 90° at a scan speed of 2 degree/min. Microscopic investigation was performed by a Zeiss Sigma 300 SEM equipped with an energy dispersive spectroscopy (EDS) detector. Both secondary electron (SE) and backscattered electron (BSE) modes were applied to identify the different phases in the microstructure. Compositional analysis was done employing EDS point analysis technique.

Vickers hardness was measured on the polished specimens using a digital micro hardness tester (HVD-1000AP) with a load of 100 g force (981 mN) and 20 second dwell time. Uniaxial compression tests at ambient temperature ($25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) were conducted using a universal Raagen tension-compression testing device. Elastic modules were determined by applying least squares curve fitting to the linear portion of the stress-strain diagram while yield strengths of the sintered samples were determined using the 0.2%-offset method. Compression strengths were the maximum stresses achieved and as a measure of ductility fracture strains were used. Both surfaces of the compression test specimens were mechanically ground to render them parallel. Graphite was used to reduce friction between the samples and the compression plates and also to prevent or minimize barreling during uniaxial compression testing.

3. RESULTS and DISCUSSION

Theoretical density of Ti₇₄Nb₂₆ alloy is calculated as 5.578 g/cm³. Measured density and calculated porosity of the samples in hot pressed and sintered conditions are shown in Table 1. The density of the sample hot pressed at 600 °C was only 4.52 g/cm³ and its porosity was close to 17%. 50 °C increment in hot pressing temperature decreased the porosity to 12.5% so that hot pressing temperature was increased to 800 °C providing almost full density. Hot pressing at 800 °C resulted in a porosity of only 0.85%. This little amount of porosity would be eliminated during following high temperature sintering. Consequently, hot pressing temperature was optimized to be 800 °C and all the samples were pressed at that temperature prior to sintering. Actually, this was the idea behind combining hot pressing with high temperature sintering. Previous studies (Santos *et al.*, 2005) present in the literature showed that, conventional cold pressing and sintering could not eliminate all the porosity. On the other hand, only hot pressing is not sufficient for complete dissolution of Nb in Ti and accordingly getting β phase desired due to its limited temperature. As expected sintering carried out for different times eliminated the porosity remained from hot pressing and full density was achieved for all the sintering durations of 1 to 4 h.

Table 1. Density and porosity of the samples produced in different conditions

Specimen	Density (g/cm ³)	Porosity (%)
600 °C 1h (HP)	4.52	16.89
650 °C 1h (HP)	4.88	12.53
800 °C 1h (HP)	5.53	0.85
1200 °C 1h (HP+S)	5.58	0
1200 °C 2h (HP+S)	5.59	0
1200 °C 3h (HP+S)	5.59	0
1200 °C 4h (HP+S)	5.60	0

XRD patterns of the sintered samples revealed that β phase formed as a result of Nb dissolution in Ti as it can be seen from Figure 4 4. In addition to main phase β (BCC) little amount of α phase (HCP) were

also detected in the microstructure. Longer sintering times increased the intensity of β peaks while those of α phases decreased. Even 4 h of sintering at 1200 °C was not enough to eliminate all the α phase and to get single β phase. Nevertheless, amount of α phase was very low which can be seen comparing main peak intensities of two phases.

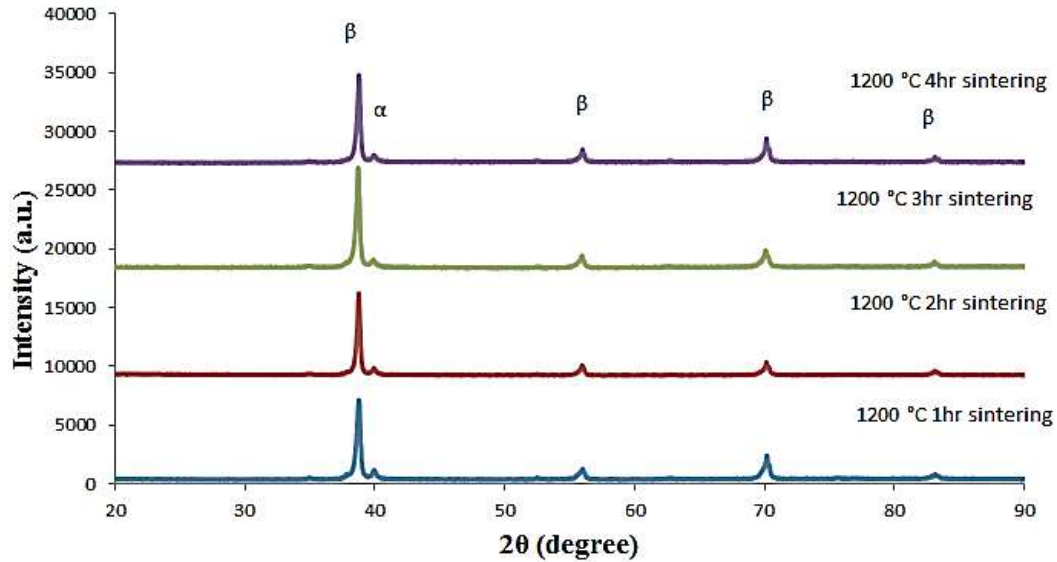


Figure 4. XRD patterns of specimens hot pressed at 800 °C for 1h and then sintered at 1200 °C for different times

The morphological characteristics of the sintered samples at 1200 °C for different times after hot pressing at 800 °C for 1h were examined with the SEM and the microstructures are presented in Figure 5. SEM micrographs revealed that with increasing sintering time from 1h to 4h amount of α phase decreased and the amount of β phase increased. The results were in good agreement with those obtained from XRD. EDS point analysis revealed that Nb contents of the α (Figure 5e) and β phase (Figure 5f) were 4.3 ± 0.5 (at. %) and 26.1 ± 3 (at. %), respectively.

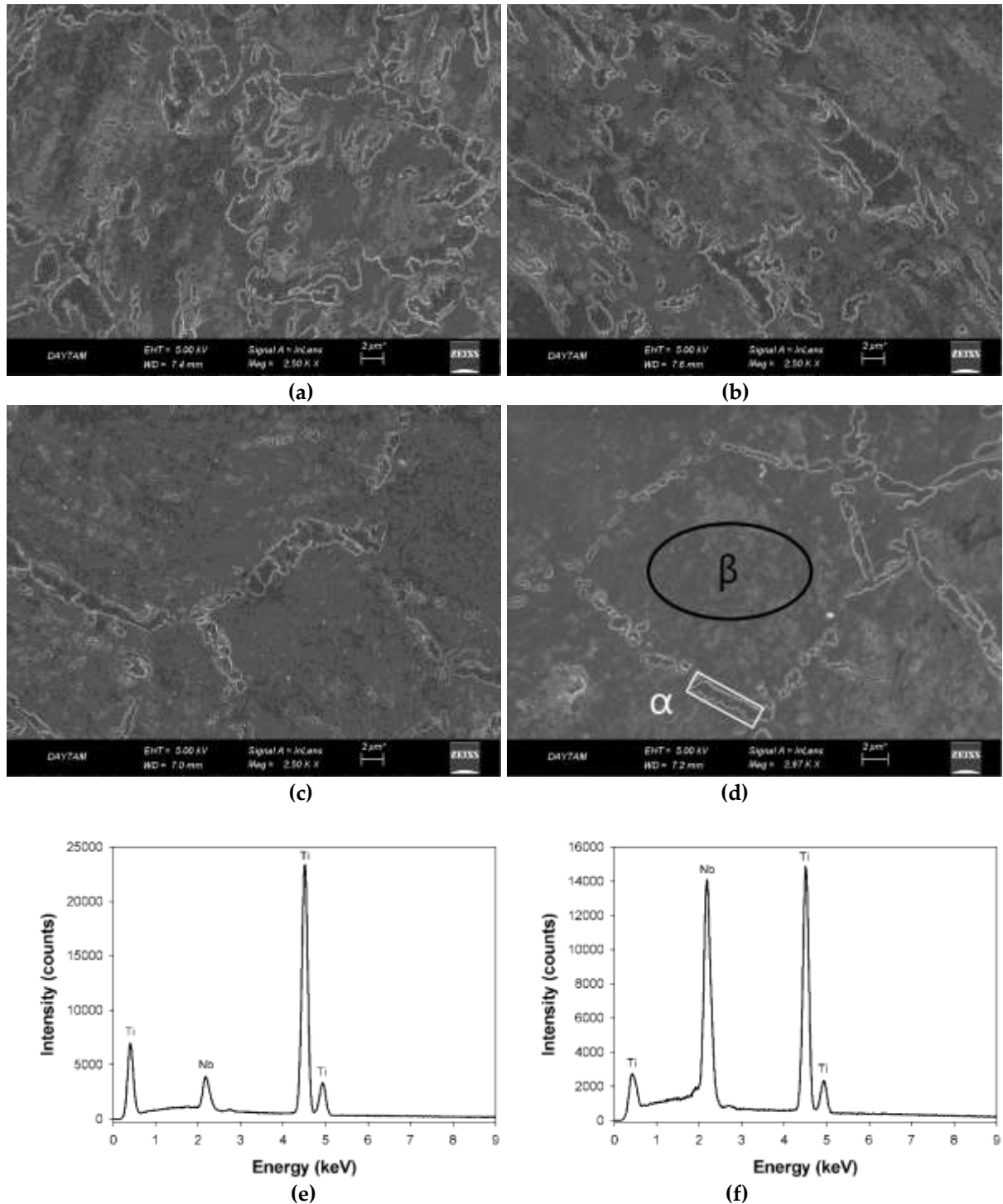


Figure 5. SEM images of Ti₇₄Nb₂₆ alloy sintered for (a) 1h, (b) 2h, (c) 3h and (d) 4h at 1200 °C and EDS point analysis results of (e) α phase and (f) β phase both shown in (d)

BSE mode was used in order to ensure whether undissolved pure Nb existed or not in the microstructure of the samples since it was quite difficult to differentiate in SE mode. BSE micrographs of bulk Ti₇₄Nb₂₆ alloys are given in Figure 6. The micrographs are similar and the microstructure consists of the same phases. The amount of α phase is very small as detected by XRD and SE mode in SEM, β is the main phase and a little undissolved pure Nb in white color was also observed. EDS point analysis given in Figure 6e proves that all the white regions in BSE images correspond to pure Nb. Although amount of

pure Nb decreased with increasing sintering time its complete elimination was not possible by sintering at 1200 °C even for the longest sintering time of 4h used in the present study.

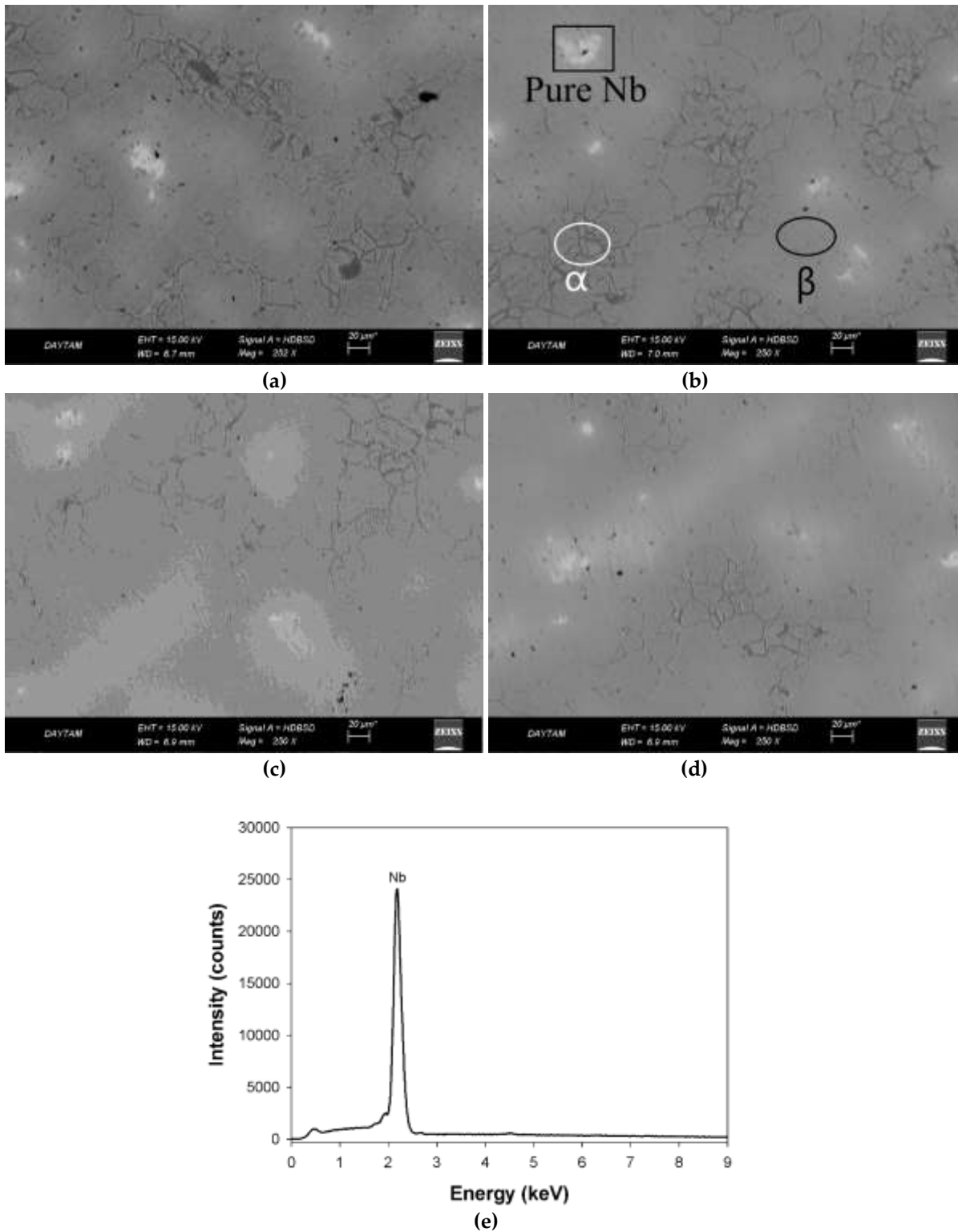


Figure 6. BSE micrographs of bulk Ti₇₄Nb₂₆ sintered at 1200 °C for (a) 1h, (b) 2h, (c) 3h and (d) 4h. (e) EDS point analysis result of white region shown in (b).

The micro hardness values presented a clear relation with sintering duration. Longer sintering times resulted in higher hardness as observed in Table 2. As expected, 4h of sintering at 1200 °C exhibited the

highest hardness value of 332 HV. The lowest hardness measured was 309 HV of 1h sintered sample at the same temperature. Increase in sintering time increased the amount of β phase which is harder than α phase (Lee *et al.*, 2002) and consequently, hardness value also increased.

Table 2. Vickers micro hardness tests results

Sintering time (h)	1	2	3	4
Mean Hardness (HV)	308.8 ± 21.1	315 ± 20.8	330.8 ± 29.2	332 ± 3.1

Figure 7 presents the stress-strain curves of sintered samples at 1200 °C for different times. Mechanical properties obtained from these curves are summarized in Table 3. Young's modulus of the samples sintered for 1, 2, 3 and 4h were 40, 41, 41.4 and 44 GPa, respectively as shown in Table 3. The lowest yield strength was measured to be 789 MPa for 1h sintered sample and increased with increasing sintering time up to 894 MPa for the sample sintered for 4h. Compressive strength values were also increased from 1020 (1h) to a maximum of 1178 MPa (4h). Fracture strains as a measure of ductility were very similar for all the sintering times and changing in the range of 18-21%. The value of elastic modulus (44 GPa), yield strength (894 MPa) and compression strength (1178 MPa) were the highest mechanical properties all obtained for 4 hours of sintering.

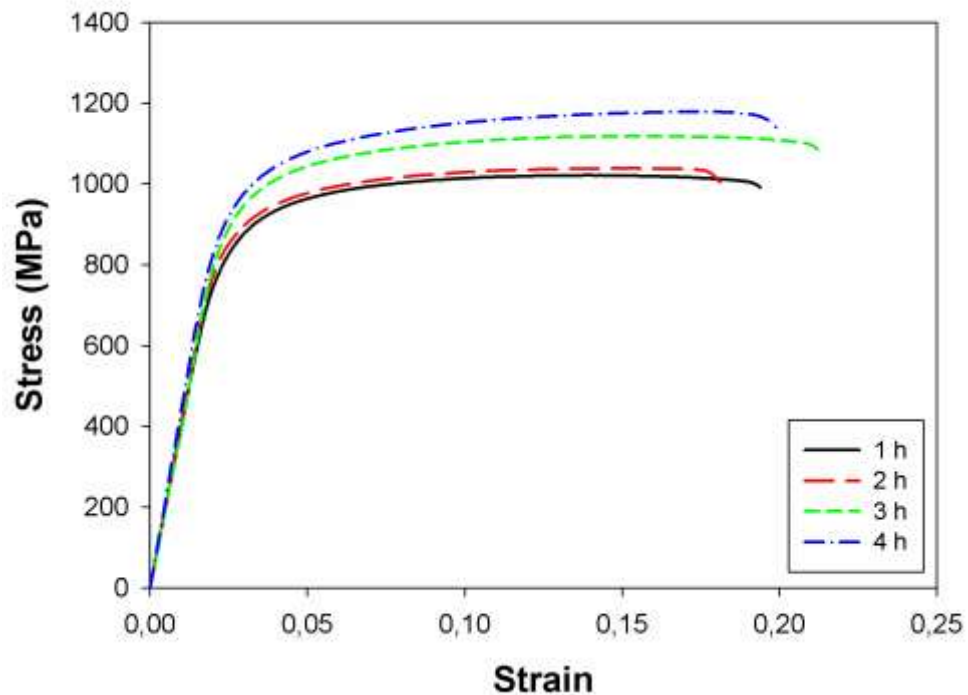


Figure 7. Stress-strain curves of sintered samples at 1200 °C for different times

Table 3. Mechanical properties of Ti₇₄Nb₂₆ alloys sintered at 1200 °C for variable times

Sintering time (h)	Elastic modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Compression strength (MPa)	Fracture strain (%)
1	40.1	789	1020	19.4
2	41	803	1038	18.1
3	41.4	856	1118	21.3
4	44	894	1178	19.9

The relations between mechanical properties and sintering time are plotted in Figure 8. Elastic modulus increases as the sintering time gets longer since the extended sintering times provides better bonding between the initial powders. However, in the present study increase of Young's modulus was only 4 GPa with the increment of sintering time from 1h to 4h. This is due to low elastic modulus of β phase. α has a higher elastic modulus and longer sintering times decreased the α phase amount. As a result, the increase in elasticity modulus was limited just too a few GPas. Yield and compressive strengths enhanced especially after 2h of sintering. This can be understood comparing the slope of the linear curves between 1 and 2h, and after 2h up to 4h. As it can be seen from Figure 8b the slope of the both curves increase after 2h. In addition to higher amount of β phase (Figure 5 and Figure 6), longer sintering times promote additional particle-to-particle bonding. Therefore, yield and compression strength of the samples increase with increasing sintering time.

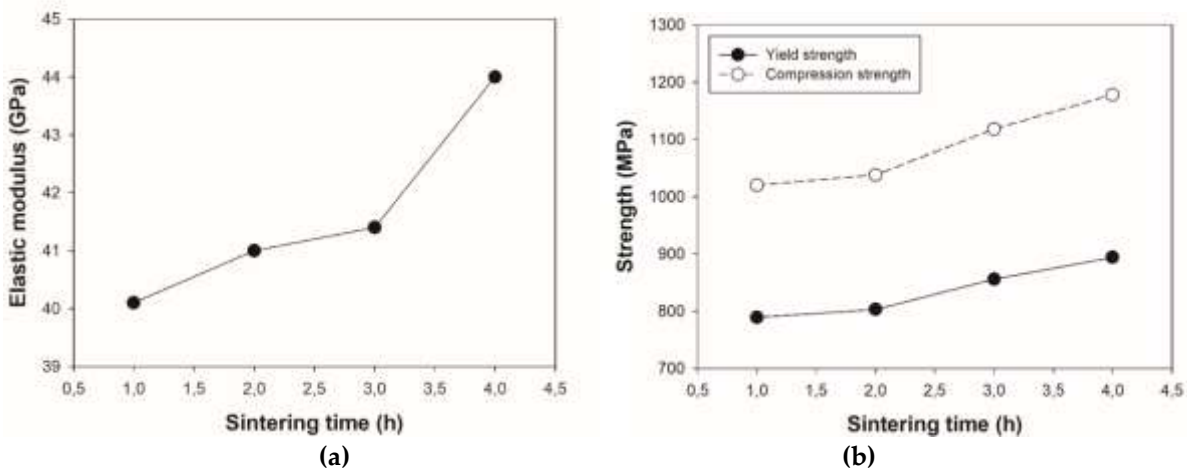


Figure 8. (a) Elastic modulus, (b) yield and compressive strength as a function of sintering time

In Table 4 mechanical properties of the samples produced in the present study has been compared to the results published already. The sample hot pressed at 800 °C for 1h and sintered at 1200 °C for 4h exhibited the lowest Young's modulus (44 GPa) and highest yield strength (894 MPa). It is clear from the table that, similar compositions (highlighted with bold style in the table) produced with casting methods resulted in elastic modulus values of 45-95 GPa. Yield strength values (250-722 MPa) on the other hand were quite low compared to the results of the present study. Hardness values were also in the range of (188-323 HV) comparable to our result of 332 HV. As a result, it can be concluded that hot pressing following high temperature sintering is a quite efficient method to produce bulk Ti-Nb alloys with superior mechanical properties. The mechanical properties of Ti-Nb alloys produced by other powder metallurgy techniques, although in different compositions, are also shown in the table to give an idea.

Table 4. Comparison of mechanical properties with the ones existing in the literature

Composition	Elastic Modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Hardness (HV)	Fabrication method and condition		Reference
Ti-35Nb (wt. %)	94.9 ± 5.7	722 ± 21	323 ± 15	VAM, HT @ 1000 °C, 24h	Furnace Cooled	Cremasco <i>et al.</i> , 2010
	75.2 ± 15.7	343 ± 1	188 ± 4		Water Quenched	
Ti-10Nb (wt. %)	85.2±9.0	552±19	.....	MIM, 1500 °C, 4h		Zhao <i>et al.</i> , 2013
Ti-16Nb (wt. %)	78.4±5.6	589±20	.....		
Ti-22Nb (wt. %)	70.9±7.2	649±31	.....		
Ti-10Nb (wt. %)	90.1±6.1	612±3.6	.....	MIM, 1500 °C, 4h + HIP, 915 °C, 2h		Zhao <i>et al.</i> , 2013
Ti-16Nb (wt. %)	82.2±5.0	661±14	.....		
Ti-22Nb (wt. %)	75.6±7.6	687±34	.....		
Ti-24Nb (at. %)	50	250	.....	CCIM + HT @ 950 °C, 20h + CW 95% reduction in thickness + ST @ 900 °C, 1h		Elmay <i>et al.</i> , 2014
Ti-26Nb (at. %)	45	300	.....		
Ti-26Nb (at. %)	44	894	332	HP @ 800 °C, 1h + S @ 1200 °C, 4h		Present study

VAM: Vacuum Induction Melting, HT: Homogenization Treatment, MIM: Metal Injection Molding, HIP: Hot Isostatic Pressing
CCIM: Cold Crucible Induction Melting or Cold Crucible Levitation Melting, CW: Cold work, ST: Solutionizing Treatment

4. CONCLUSIONS

In this study, binary Ti₇₄Nb₂₆ alloys were produced combining, for the first time, hot pressing with high temperature sintering. General conclusions obtained from the study are as follows:

- Density measurements (Archimedes' technique) showed that optimum hot pressing temperature of Ti-Nb alloys for 1h is 800 °C. Almost full density (over 99%) was achieved at 800 °C.
- The microstructures of Ti₇₄Nb₂₆ alloys sintered at 1200 °C for different times consist of small amount of α and very little undissolved pure Nb in addition to the main phase β and amount of β increases with increasing sintering time according to XRD and SEM investigations.
- Even 4 h of sintering at 1200 °C was not sufficient to obtain single β phase. Therefore, sintering temperature should be higher than 1200 °C to get only β phase free from α and pure Nb.
- Mechanical properties enhanced by increasing sintering time. 4h of sintering exhibited the highest mechanical properties including elastic modulus (44 GPa), yield strength (894 MPa), compression strength (1178 MPa) and microhardness (332 HV). Ductility (18-21%) on the other hand was almost the same for all the sintering temperatures.
- Samples produced combining hot pressing and high temperature sintering were found to be suitable in terms of mechanical properties for bone replacement applications although they have higher elastic modulus (40-44 GPa) compared to that of bone ($E_{bone} < 30$ GPa).

REFERENCES

- Andrade, D.P., Vasconcellos, L.M.R., Carvalho, I.C.S., Forte, L.F.B.P., Santos, E.L.S., Prado, R.F., Santos, D.R., Cairo, C.A.A., Carvalho, Y.R., 2015, "Titanium-35Niobium Alloy as a Potential Material for Biomedical Implants: In vitro Study", *Materials Science and Engineering C*, Vol. 56, pp. 538-544.
- Bönisch M., Calin, M., Humbeek, J.V., Skrotzki, W., Eckert, J., 2015, "Factors Influencing the Elastic Moduli, Reversible Strains and Hysteresis Loops in Martensitic Ti-Nb Alloys", *Materials Science and Engineering C*, Vol. 48, pp. 511-520.

- Chai, Y.W., Kim, H.Y., Hosoda, H., Miyazaki, S., 2008, "Interfacial Defects in Ti-Nb Shape Memory Alloys", *Acta Materialia*, Vol. 56, pp. 3088-3097.
- Chai, Y.W., Kim, H.Y., Hosoda, H., Miyazaki, S., 2009, "Self-accommodation in Ti-Nb Shape Memory Alloys", *Acta Materialia*, Vol. 57, pp. 4054-4064.
- Cremasco, A., Ferreira, I., Caram R., 2010, "Effect of Heat Treatments on Mechanical Properties and Fatigue Behavior of Ti-35Nb Alloy Used as Biomaterial", *Materials Science Forum*, Vol. 636-637 pp. 68-75.
- Cremasco, A., Lopes, E.S.N., Cardoso, F.F., Contieri, R.J., Ferreira, I., Caram, R., 2013, "Effects of the Microstructural Characteristics of a Metastable β Ti Alloy on its Corrosion Fatigue Properties", *International Journal of Fatigue*, Vol. 54, pp. 32-37.
- Elias, L.M., Schneider, S.G., Schneider, S., Silva, H.M., Malvisi, F., 2006, "Microstructural and Mechanical Characterization of Biomedical Ti-Nb-Zr (-Ta) Alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 432, No. 1-2, pp. 108-112.
- Elmay, W., Patoor, E., Gloriant, T., Prima, F., Laheurte, P., 2014, "Improvement of Superelastic Performance of Ti-Nb Binary Alloys for Biomedical Applications", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 7, pp. 2471-2476.
- Han, M.K., Kim, J.Y., Hwang, M.J., Song, H.J., Park Y.J., 2015, "Effect of Nb on the Microstructure, Mechanical Properties, Corrosion Behavior, and Cytotoxicity of Ti-Nb Alloys", *Materials*, Vol. 8, No. 9, pp. 5986-6003.
- Hon, Y.H., Wang, J.Y., Pan, Y.N., 2003, "Composition/Phase Structure and Properties of Titanium-Niobium Alloys", *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 11, pp. 2384-2390.
- Kent, D., Wang, G., Dargusch, M., 2013, "Effects of Phase Stability and Processing on the Mechanical Properties of Ti-Nb based β Ti Alloys", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 28, pp. 15-25.
- Kim, H.Y., Kim, J.I., Inamura, T., Hosoda, H., Miyazaki, S., 2006, "Effect of Thermo-mechanical Treatment on Mechanical Properties and Shape Memory Behavior of Ti-(26-28) at.% Nb Alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 438-440, pp. 839-843.
- Lee, C.M., Ju, C.P., Chern Lin, J.H., 2002, "Structure-property relationship of cast Ti-Nb alloys", *Journal of Oral Rehabilitation*, Vol. 29, No. 4, pp. 314-322.
- Li, Y., Yang, C., Zhao, H., Qu, S., Li, X., Li, Y., 2014, "New Developments of Ti-based Alloys for Biomedical Applications", *Materials*, Vol. 7, No. 3, pp. 1709-1800.
- Ma, J., Karaman, I., Maier H.J., Chumlyakov, Y.I., 2010, "Superelastic Cycling and Room Temperature Recovery of Ti₇₄Nb₂₆ Shape Memory Alloy", *Acta Materialia*, Vol. 58, pp. 2216-2224.
- McMahon, R.E., Ma, J., Verkhoturov, S.V., Munoz-Pinto, D., Karaman, I., Rubitschek, F., Maier, H.J., Hahn, M.S., 2012, "A Comparative Study of the Cytotoxicity and Corrosion Resistance of Nickel-Titanium and Titanium-Niobium Shape Memory Alloys", *Acta Biomaterialia*, Vol. 8, No. 7, pp. 2863-2870.
- Niinomi, M., Nakai, M., Hieda, J., 2012, "Development of New Metallic Alloys for Biomedical Applications", *Acta Biomaterialia*, Vol. 8, No. 11, pp. 3888-3903.
- Ozaki, T., Matsumoto, H., Watanabe, S., Hanada, S., 2004, "Beta Ti Alloys with Low Young's Modulus", *Materials Transactions*, Vol. 45, No. 8, pp. 2776-2779.
- Prokoshkin, S., Brailovski, V., Dubinskiy, S., Zhukova, Y., Sheremetyev, V., Konopatsky, A., Inaekyan, K., 2016, "Manufacturing, Structure Control, and Functional Testing of Ti-Nb-Based SMA for Medical Application", *Shape Memory and Superelasticity*, Vol. 2, No. 2, pp. 130-144.
- Santos, D.R., Henriques, V.A.R., Cairo, C.A.A., Pereira, M.S., 2005, "Production of a Low Young Modulus Titanium Alloy by Powder Metallurgy", *Materials Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 439-442.
- Sharma, B., Vajpai, S.K., Ameyama, K., 2016, "Microstructure and Properties of Beta Ti-Nb Alloy Prepared by Powder Metallurgy Route Using Titanium Hydride Powder", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 656, pp. 978-986.

- Shymanski, V.I., Cherenda, N.N., Uglov, V.V., Astashynski, V.M., Kuzmitski, A.M., 2015, "Structure and Phase Composition of Nb/Ti System Subjected to Compression Plasma Flow Impact", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 278, pp. 183-189.
- Wang, Y.B., Zheng, Y.F., 2009, "Corrosion Behaviour and Biocompatibility Evaluation of Low Modulus Ti-16Nb Shape Memory Alloy as Potential Biomaterial", *Materials Letters*, Vol. 63, pp. 1293-1295.
- Zhao, D., Chang, K., Ebel, T., Qian, M., Willumeit, R., Yan, M., Pyczak, F., 2013, "Microstructure and Mechanical Behavior of Metal Injection Molded Ti-Nb Binary Alloys as Biomedical Material", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 28, pp. 171-182.
- Zhao, D., Chang, K., Ebel, T., Nie, H., Willumeit, R., Pyczak, F., 2015, "Sintering Behavior and Mechanical Properties of a Metal Injection Molded Ti-Nb Binary Alloy as Biomaterial", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 640, pp. 393-400.
- Zhuravleva, K., Bönisch, M., Prashanth, K.G., Hempel, U., Helth, A., Gemming, T., Calin, M., Scudino, S., Schultz, L., Eckert, J., Gebert, A., 2013, "Production of Porous β -Type Ti-40Nb Alloy for Biomedical Applications: Comparison of Selective Laser Melting and Hot Pressing", *Materials*, Vol. 6, No. 12, pp. 5700-5712.



2007 VE 2018 TÜRK DEPREM YÖNETMELİKLERİNE GÖRE YEREL ZEMİN SINIFLARININ YAPILARDAKİ BURULMA DÜZENSİZLİĞİNE ETKİSİ

¹Kabil ÇETİN , ²Ali DEMİR , ³Taha Yasin ALTIÖK 

¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Manisa, TÜRKİYE

^{2,3}Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa, TÜRKİYE

¹kabil.cetin@cbu.edu.tr, ²ali.demir@cbu.edu.tr, ³taha.altiok@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 14.06.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 12.11.2019)

ÖZ: Türkiye'nin büyük bir çoğunluğu aktif deprem kuşakları üzerinde yer almaktadır. Bu zamana kadar birçok yapı depremin yıkıcı etkileri nedeniyle hasar görmüş hatta göçmüştür. Depremler büyük oranda can ve mal kaybına neden olmuştur. Kaçınılmaz deprem gerçeği, depreme dayanıklı tasarım kavramını ortaya çıkarmıştır. Yapıların, depreme dayanıklı yapı tasarım ilkelerine göre yeterli rijitlik ve dayanıma sahip olması gerekmektedir. Bu iki yapısal özelliğin dağılımı ve taşıyıcı sistem simetrik ve düzenli bir şekilde oluşturulmalıdır. Ancak mimari nedenlerden dolayı düzensiz yapılar inşa edilmektedir. Yapı geometrisi ve rijitlik dağılımı bakımından düzensiz olan bu yapılarda burulma düzensizliği görülmektedir. Burulma düzensizliği, yapının deprem performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle titizlikle araştırılması gereken bir konu haline gelmektedir.

Bu çalışmada, Türk Deprem Yönetmeliği-2007 ve Türk Bina Deprem Yönetmeliği-2018'e göre farklı yerel zemin sınıflarının yapılardaki burulma düzensizliğine etkisi araştırılmıştır. Modelleme ve deprem analizleri SAP 2000 programında yapılmıştır. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve Mod Birleştirme Yöntemi kullanılarak 5 farklı yapı tipi için 270 adet yapının deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. 4-6 ve 8 katlı yapılar için, farklı zemin sınıflarındaki yapıların burulma düzensizliği katsayıları elde edilmiştir. Sonuçlar, her iki deprem analiz yöntemi ve deprem yönetmeliklerine göre karşılaştırılmıştır. Türk Bina Deprem Yönetmeliği-2018'de düzenli yapıların burulma düzensizliği katsayıları Türk Deprem Yönetmeliği-2007'e göre azalırken, düzensiz yapıların burulma düzensizliği katsayılarında ciddi bir artış olduğu görülmüştür. Yerel zemin sınıflarının hesaplamalara olan etkisi Türk Bina Deprem Yönetmeliği-2018 ile daha gerçekçi hale gelmiştir. Yerel zemin sınıfının Türk Bina Deprem Yönetmeliği-2018'de burulma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve burulma düzensizliğine sahip yapıların tasarım ve değerlendirilmesinde yerel zemin sınıfının bu etkisinin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Burulma düzensizliği, Yerel zemin sınıfı, Deprem analizi, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018, Türk Deprem Yönetmeliği-2007.

Effect of Local Site Classes on Torsional Irregularity in Structures According to Turkish Seismic Codes 2007 and 2018

ABSTRACT: A major parts of Turkey is located on the active seismic belts. Until now, many structures have been damaged and even collapsed due to the destructive effects of the earthquake. The earthquakes have caused largely in loss of life and property. The inevitable earthquake fact has revealed the concept of earthquake resistant design. The structures must be had sufficient rigidity and strength according to earthquake resistant structure design principles. Load-bearing system and the distribution of these two structural properties must be formed symmetrically and regularly. However, irregular structures are constructed due to architectural reasons. In these structures which are irregular in terms of structure geometry and distribution of rigidity, is seen torsional irregularity. Torsional irregularity negatively affects

the earthquake performance of the structure. Therefore, it becomes a subject that needs to be meticulously investigated.

In this study, effect of different local site classes on torsion irregularity in structures have been investigated according to Turkish Seismic Code-2007 and Turkish Building Earthquake Code-2018. Modeling and earthquake analyses have been performed in SAP 2000 program. Earthquake analyses of 270 structures for 5 different structure types have been carried out by using the Equivalent Seismic Load Method and Mode Superposition Method. Torsional irregularity coefficients of the structures on different local site classes have been obtained for 4, 6 and 8-storey structures. The results have been compared according to both earthquake analysis methods and Turkish Seismic Codes. In the Turkish Building Earthquake Code-2018, torsional irregularity coefficients of the regular structures have decreased compared to the Turkish Seismic Code-2007, while there has been seen a substantial increase in torsional irregularity coefficients of the irregular structures. The effect of local site classes on the calculations has become more realistic along with the Turkish Building Earthquake Code-2018. It has been concluded that local site class has a significant effect on torsional behavior in Turkish Building Earthquake Code-2018 and this effect must be taken into consideration in the design and evaluation of the structures with torsional irregularity.

Key Words: *Torsional irregularity, Local site class, Earthquake analysis, Turkish Building Earthquake Code-2018, Turkish Seismic Code-2007.*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nüfus ve şehirleşmedeki artış, inşaat sektörünün hızlanmasına neden olmuştur. Bu süreçte ülkemizde çok sayıda yapı inşa edilmiş ve halen hızlı bir şekilde inşa edilmeye devam edilmektedir. Modern yaşam ve teknolojiye yeni teknolojiler, farklı fonksiyonel ve mimari özelliklere sahip yapıların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Yapı planları ciddi bir şekilde değişikliğe uğramış ve bu durum yapı içerisinde bir düzensizlik oluşturmuştur. Düzensizlikler, yapı performansını olumsuz yönde etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Bu nedenle, bu tip yapıların deprem performansının yapısal güvenlik açısından araştırılması gerekmektedir.

Plan düzensizliklerinden biri olan burulma düzensizliğiyle yapılarda sıklıkla karşılaşmaktadır. Burulma problemi, geometri ve rijitlik dağılımı bakımından düzensiz olan yapılarda görülmektedir. Nitekim, 1999 yılındaki Marmara depreminden sonra yapılan saha çalışmalarında, düzensiz yapılarda burulma kaynaklı birçok hasar gözlenmiştir. Dolayısıyla, burulma düzensizliğine sahip yapıların deprem davranışı oldukça önemlidir. Burulma düzensizliği neredeyse tüm deprem yönetmeliklerinde dikkate alınmaktadır. Türk Deprem Yönetmeliğinde de bu düzensizlik için çeşitli önlemler ve yaptırımlar mevcuttur. Mevcut deprem yönetmeliğinde burulma düzensizliği Denklem 1 ile ifade edilir.

$$\eta_{b(i)} = \frac{(\Delta_i)_{\max}}{(\Delta_i)_{\text{ort}}} \quad (1)$$

Burulma düzensizliği, herhangi bir kattaki en büyük görelî kat ötelemesinin $(\Delta_i)_{\max}$, aynı kattaki ortalama görelî kat ötelemesine $(\Delta_i)_{\text{ort}}$ oranıdır. Bu düzensizliğin kontrolü burulma düzensizliği katsayısı (η_b) ile yapılır. Yapılarda burulma olup olmadığı, bu katsayının değerine bağlıdır. η_b değeri 1,2 ile 2 arasında olduğunda, yapıda burulma düzensizliği olduğu söylenebilir. Türk Deprem Yönetmeliği, bu katsayı değerinin 2'yi aşması halinde, dinamik hesaplama yönteminin tercih edilmesi gerektiğini söylemektedir. Bu düzensizliğin olmadığı yapılarda, her iki deprem doğrultusu için $\pm\%$ 5 ek dışmerkezliğe göre deprem hesaplamaları yapılır. Yapılarda burulma düzensizliği varsa, ek dışmerkezlik hesaplanmalıdır. Oluşacak bu ek dışmerkezliliğin değeri, $\pm\%$ 5 ek dışmerkezliğin D_i katsayısı ile çarpılmasıyla elde edilir. D_i katsayısı Denklem 2 ile hesaplanır.

$$D_i = \left(\frac{\eta_{b(i)}}{1.2} \right)^2 \quad (2)$$

Burulma etkisi, zemin hareketlerinden kaynaklı yapısal hasarların ana nedenlerinden birisidir. Yapıların göçmesine neden olan bu tehlike karşısında özellikle düzensiz yapıların deprem etkilerine karşı daha savunmasız oldukları görülmüştür. Burulma, kütle ve rijitlik bakımından asimetrik bir dağılıma sahip yapıların göçme modunu ciddi şekilde etkiler. Bu nedenle burulma düzensizliğinin, yapıların deprem yükü altındaki davranışlarına etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Çetin ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, yerel zemin sınıflarının yapıların burulma düzensizliği üzerindeki etkisini, Türk Deprem Yönetmeliği-2007 (TDY-2007) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'e (TBDY-2018) göre araştırmışlardır. 5 farklı yapı modeli oluşturulmuş, Mod Birleştirme yöntemi kullanılarak yapıların deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir yerel zemin sınıfı için yapıların burulma düzensizliği katsayıları elde edilmiştir. TDY-2007 ve TBDY-2018'e göre elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. TBDY-2018'de tüm yapı tiplerinde, yerel zemin sınıflarının η_b katsayılarını etkilediği, TDY-2007'de ise yerel zemin sınıflarının sadece asimetrik yapı tipine ait burulma düzensizliği sonuçlarını etkilediği görülmüştür. Yerel zemin sınıflarının, yapılardaki burulma düzensizliği katsayılarını TBDY-2018'de maksimum 0,16 değerinde etkilediği sonucuna varılmıştır. Tengli ve Hussain (2018), burulmanın çok katlı yapıların deprem performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Plan geometrisi açısından düzenli ve düzensiz şekle sahip iki farklı yapının dinamik analizi yapılmıştır. Yapıların periyot değerleri, katlara gelen kesme kuvvetleri ve katlara ait deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Düzensiz yapılardaki deplasman ve kesme kuvvetlerinin önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmıştır. Ravindra ve Ramya (2018), plak döşemelerin yapıların burulma davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Perde duvarların yerleşimi bakımından asimetrik bir yapının, Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Analiz Yöntemi kullanılarak deprem analizleri yapılmıştır. Yapı kat planının en boy oranı değiştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Yapı kat planının en boy oranı büyüdüğünde, yapının deplasman ve ivme değerlerinin arttığı görülmüştür. Kardoğan ve Demircan (2016), perde duvarların yapılardaki burulma düzensizliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Analizlerde Mod Birleştirme Yöntemi kullanılmıştır. Yapıların burulma düzensizliği katsayıları ve deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Burulma düzensizliğinin, yapıların zayıf eksenlerindeki taşıyıcı elemanlar üzerinde yapılacak düzenlemelerle büyük ölçüde ortadan kaldırılabilceği sonucuna varılmıştır. Öztürk (2013) yapılarda çeşitli nedenlerden dolayı bulunan döşeme boşluklarının yapının deprem davranışına olan etkisini araştırmıştır. Zemin sınıfı, kat adedi, boşlukların yapı içerisindeki konumları ve boyutları gibi birçok parametre kullanılarak yapıların taşıyıcı sistem davranışı incelenmiştir. A2 döşeme süreksizliği için yönetmelikte belirtilen boşluk oranı sınırı kadar, boşluğun simetrik olup olmaması da çok önemlidir. Nitekim bu sınırın aşıldığı ancak boşluğun simetrik düzenlendiği yapı modellerinde döşemenin rijit diyafram davranış sergilediği görülür iken, bu sınırın aşılmadığı ancak boşluğun asimetrik düzenlendiği yapı modellerinde ise döşemenin bu davranışı sergileyemediği görülmüştür. Zemin sınıfının kötüleşmesi, kat adedinin artışı, döşeme boşluğunun yapının deprem davranışına olan olumsuz etkisinin artmasına neden olmaktadır. Simetrik olmayan döşeme boşlukları burulma etkilerini arttırmaktadır. Özmen (2000) yapı tiplerinin burulma düzensizliğine olan etkisini araştırmıştır. Bu kapsamda düzenli ve düzensiz olmak üzere, iki farklı yapı modeli oluşturularak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bazı yapı modellerinde geometri ve rijitlik bakımından simetriklik şartı sağlanmış olmasına rağmen burulma düzensizliği katsayılarının 1.2 sınır değere yaklaştığı görülmüştür. Rijitlik dağılımının, plan geometrisine göre burulma düzensizliği üzerinde daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

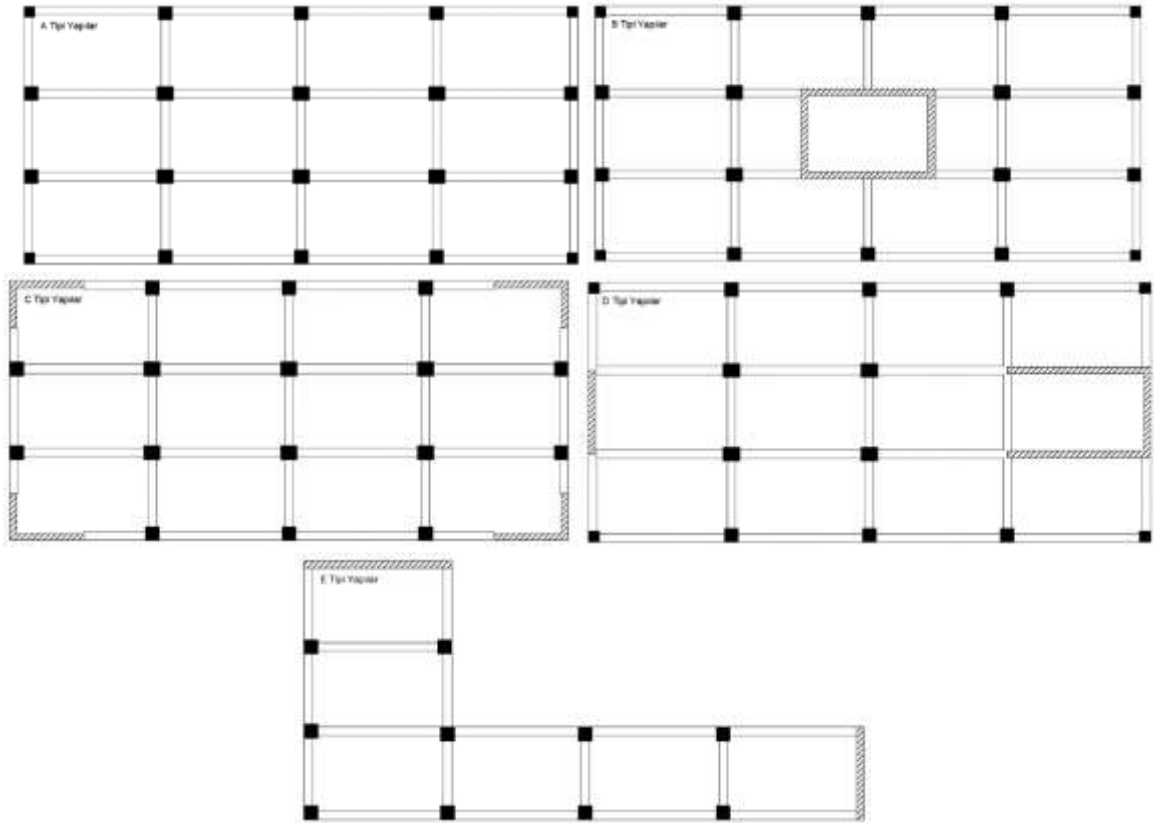
Burulma düzensizliğe sahip yapıların deprem performansı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Haque ve diğ., 2016, Shajee ve Thaskeen 2016, Akhare ve Maske 2015). Plan geometrisi bakımından düzenli ve düzensiz şekilli yapılar modellenmiştir. Yapılan analizlerde yapılara ait deplasman ve taban

kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Düzensiz yapıların deprem kuvvetlerine karşı normal yapılara göre daha savunmasız olduğu sonucuna varılmıştır. Özmen ve diğ. (2014), çok katlı yapıların burulma düzensizliğini araştırmıştır. Burulma düzensizliği katsayıları ile katlarda meydana gelen dönme sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında, katlardaki dönme değerlerinin burulma davranışını daha gerçekçi olarak yansıttığı belirlenmiştir. Katlardaki dönmenin dikkate alındığı yeni bir burulma düzensizliği katsayısı formülasyonu önerilmiştir. Çok katlı yapılarda yerel zemin sınıflarının burulma düzensizliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılarda maksimum burulma düzensizliğine neden olan faktörler belirlenmiştir (Demir ve Dönmez 2008, Demir ve diğ., 2010).

Bu çalışmada, simetrik ve asimetrik perde yerleşimine sahip beş farklı düzenli ve düzensiz yapı dikkate alınmıştır. Dikdörtgen ve L formunda kat planlarına sahip olan yapıların deprem analizleri Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında farklı değişkenlere sahip 270 adet yapının deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve Mod Birleştirme Yöntemi'ne göre yapıların maksimum burulma düzensizliği katsayıları TDY-2007 ve TBDY-2018 için kat sayısı ve yerel zemin sınıfları değişken olarak kullanılarak incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Farklı yapısal geometri ve perde yerleşimine sahip beş yapı tipi modellenmiştir. Modelleme ve analiz işlemi SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. A, B, C, D ve E olarak isimlendirilen yapı tiplerine ait kat planları Şekil 1'de gösterilmiştir. A tipi yapılar betonarme çerçeve sistem, diğer yapı tipleri ise betonarme perdeli-çerçevesel sistem olarak tasarlanmıştır. A, B, C ve D tipi yapılar plan geometrisi açısından düzenli, E tipi yapılar ise düzensizdir. Tüm yapısal elemanların yerleşimi A, B ve C tipi yapılarda simetrik olarak düzenlenmiştir. D tipi yapılarda perdeler y yönünde simetrik olarak, E tipi yapılarda ise perde yerleşimi düzensiz bir şekilde oluşturulmuştur (Demir ve Dönmez 2008).



Şekil 1. Yapı tiplerine ait kat planları (Demir ve Dönmez 2008)*Figure 1. Floor plans of structure types (Demir ve Dönmez 2008)*

Modellenen yapı tiplerine ait özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Yapı tiplerinin özellikleri (Demir ve Dönmez 2008)*Table 1. Properties of structure types (Demir ve Dönmez 2008)*

Yapı Tipleri		A	B	C	D	E
x ve y doğrultusundaki aks açıklıkları		5m, 3m				
Deprem bölgesi		1				
Kat yüksekliği		3 m				
Kiriş boyutları		0,3 m×0,3 m				
Kolon Tipi/Kolon boyutları	Köşe kolon	0,4 m×0,4 m			-	
	Merkez kolon	0,6×0,5 m			-	
	Kenar kolon	0,5×0,5 m			0,5×0,5 m	
Perde kalınlığı		0,25 m				
Malzeme	Beton	C25				
	Çelik	S420				

Yapılardaki burulma düzensizliği sadece geometriden kaynaklı bir problem değildir. Bu düzensizliğin hesaplanması için gerekli olan görelî kat ötelemeleri binaya etki eden deprem kuvvetleri ile ilgilidir. Zemin davranışı bozuldukça zemin periyot değerleri artış göstermektedir. Sağlam zeminden zayıf zemine doğru maksimum deprem ivmesinin görüldüğü periyot aralığı uzar. Bu yapıların deprem kuvvetlerinden daha fazla etkilenmesine neden olur.

İncelenen bu yapıların 1. derece deprem bölgesindeki Manisa'da olduğu varsayılmıştır. TBDY-2018'e göre yapılacak olan hesaplamalar için, yapıların konumu, istenen yerel zemin sınıfı ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyi Türkiye Deprem Tehlikesi Haritası'ndan seçilmiştir. Haritadan elde edilen verilere göre, 4, 6 ve 8 katlı olarak modellenen bu yapıların ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE yerel zemin sınıfları için deprem analizleri yapılmıştır. TDY-2007'deki Z1, Z2, Z3 ve Z4 yerel zemin sınıfları ile birlikte analizlerde toplam dokuz adet yerel zemin sınıfı dikkate alınmıştır.

Perde elemanları kabuk sonlu eleman olarak modellenmiştir. TBDY-2018 için tasarımda etkin kesit rijitliği çarpanları kullanılmıştır. Bu rijitlik çarpanları, TDY-2007'deki çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitliğine benzetilebilir. Bu katsayı, taşıyıcı sistem elemanlarının rijitliğini azaltır. TBDY-2018'de kullanılan etkin kesit rijitliği çarpanları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. TBDY-2018'deki etkin kesit rijitliği çarpanları

Table 2. Effective cross section multipliers in TBDY-2018

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018				
Yapısal Eleman	Modelleme Elemanı	Eğilme	Kesme	Eksenel
Kiriş	Çubuk	0,35	1	-
Kolon	Çubuk	0,7	1	-
Perde	Eşdeğer Çubuk	0,5	0,5	-
Perde (Düzlem İçi)	Sonlu Eleman	-	0,5	0,5
Perde (Düzlem Dışı)	Sonlu Eleman	-	1,00	0,25

Ek dışmerkezlik, yapının kütle ve rijitlik merkezlerinin üst üste denk gelmemesi sonucu oluşur. İki merkez noktası arasındaki mesafe olarak ifade edilir. Ek dışmerkezlik yapıda burulma momentine neden olur. Perde yerleşimi ve plan geometrisi açısından düzenli olan A, B ve C tipi yapıların deprem analizleri, TDY-2007 ve TBDY-2018'e göre $\pm\%$ 5 ek dışmerkezlik için yapılmıştır. D tipi yapılar perde yerleşimi bakımından y eksenine göre simetrik olarak düzenlenmiştir. Bu nedenle bu yapılarda x yönünde ek dışmerkezlik mevcuttur. Asimetrik olan E tipi yapılarda ise, her iki yöndeki ek dışmerkezlik hesaplanmıştır. D ve E tipi yapılardaki, x ve y yönlerindeki ek dışmerkezlik Şekil 2'de gösterilmektedir (Demir ve Dönmez 2008).

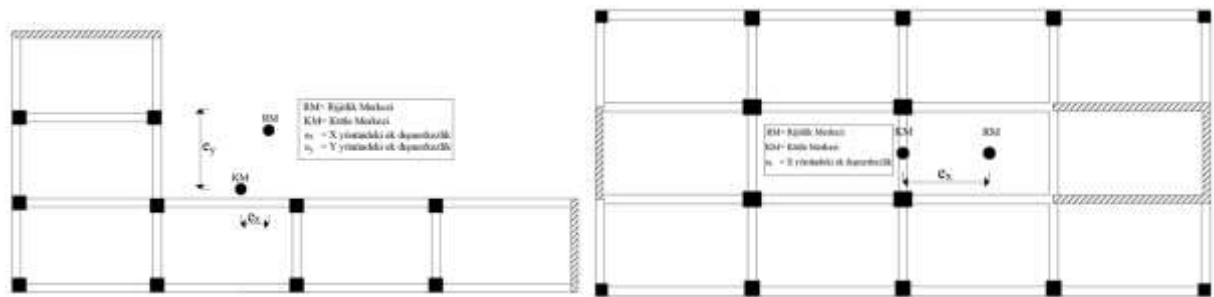
**Şekil 2.** Yapıdaki ek dışmerkezlik

Figure 2. Additional eccentricity in structure

Bu çalışmada, Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemleri kullanılarak yapıların deprem analizleri yapılmıştır. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi, deprem yüklerinin yapılarda yatay biçimde tekil yük olarak uygulandığı statik bir analiz yöntemidir. Mod Birleştirme Yöntemi, uygulanan deprem yönündeki deprem tasarım spektrumunu kullanarak her bir titreşim modundaki en büyük davranışsal büyüklüklerin elde edildiği dinamik bir analiz yöntemidir. TDY-2007 ve TBDY-2018'e göre her iki deprem yöntemi kullanılarak yapıların burulma düzensizliği katsayıları hesaplanmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

BULGULAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yapıların burulma düzensizliği katsayıları y yönündeki deprem kuvveti için maksimum elde edilmiştir. Yapılardaki burulma düzensizliği katsayılarının değişimi kat sayısı ve yerel zemin sınıfına göre incelenmiştir. Düz ve kesikli çizgiler, sırasıyla Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi (EDYY) ve Mod Birleştirme

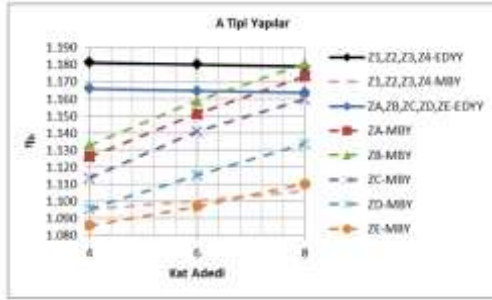
Yöntemini (MBY) temsil etmektedir. Yerel zemin sınıfları Z4 ve ZE için 4 katlı yapılara ait burulma düzensizliği katsayıları Çizelge 3'te açıkça sunulmuştur.

Çizelge 3. Yapı tiplerine göre hesaplanan η_b değerleri

Table 3. Calculated η_b values according to structure types

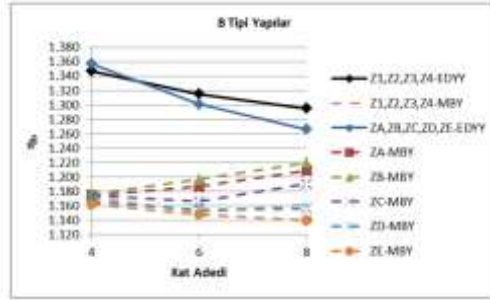
Türk Deprem Yönetmeliği	Analiz Yöntemi	A	B	C	D	E
2007	EDYY	1,181	1,347	1,100	1,5510	1,5673
	MBY	1,095	1,171	1,051	1,67	1,646
2018	EDYY	1,166	1,357	1,059	1,627	1,788
	MBY	1,086	1,162	1,030	1,716	1,834

TDY-2007 ve TBDY-2018'e göre maksimum burulma düzensizliği katsayıları, Şekil 3, 4, 5, 6 ve 7'de verilmiştir.



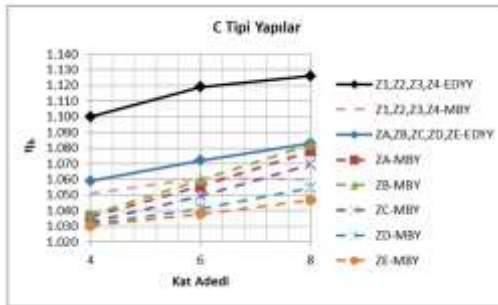
Şekil 3. A tipi yapılar için η_b değerleri

Figure 3. η_b values of A type structures



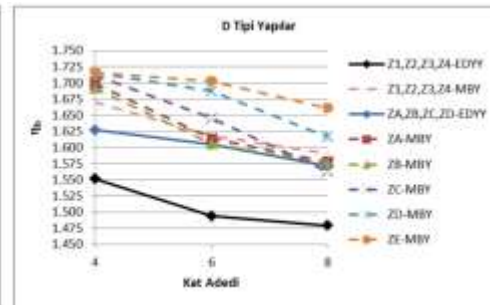
Şekil 4. B tipi yapılar için η_b değerleri

Figure 4. η_b values of B type structures



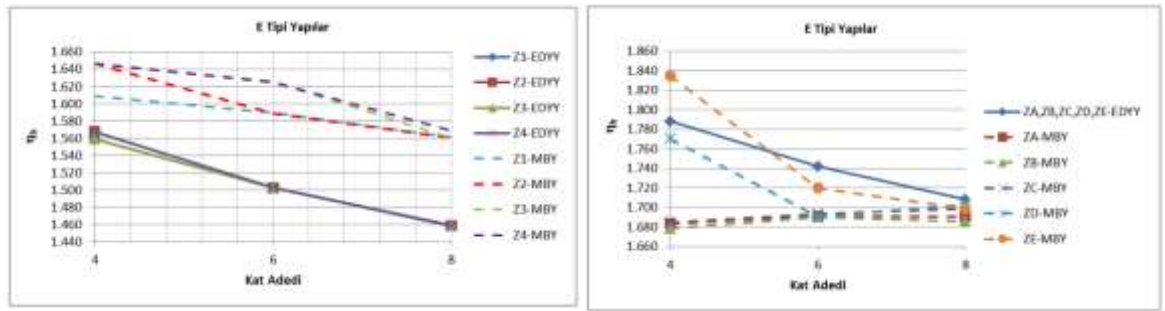
Şekil 5. C tipi yapılar için η_b değerleri

Figure 5. η_b values of C type structures



Şekil 6. D tipi yapılar için η_b değerleri

Figure 6. η_b values of D type structures



Şekil 7. E tipi yapılar için η_b değerleri

Figure 7. η_b values of E type structures

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılardaki kat sayısı, yerel zemin sınıfı, plan geometrisi, perde yerleşimi ve kullanılan deprem analiz yönteminin η_b değerleri üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Burulma düzensizliği katsayılarının A ve C tipi yapılarda 1,2 sınır değerinin altındayken, B, D ve E tipi yapılarda bu sınır değerini geçtiği görülmektedir. Bu sonuç, perde yerleşiminin ve plan simetrisinin yapısal davranıştaki önemini açıkça göstermektedir. Simetrik olmayan ve perde elemanların yapının merkezine yerleştirildiği yapılarda daha büyük η_b değerleri elde edilmiştir. D tipi yapıların burulma düzensizliği katsayısının B ve C ile kıyaslandığında daha büyük bir değere sahip olduğu görülmektedir. Buradan üç yapı tipinin de plan geometrisi bakımından düzenli olduğu düşünülürse, rijitlik bakımından düzensizliğin burulma düzensizliği üzerinde daha etkili olduğu sonucuna varılabilir (Özmen 2000). Nitekim en büyük burulma düzensizliği değeri her iki düzensizliğin birlikte görüldüğü E tipi yapılarda elde edilmiştir.

Çizelge 3'te sunulan sonuçlar analiz edildiğinde, TBDY-2018'e göre A, B ve C tipi yapıların η_b değerleri, TDY-2007'den daha küçük hesaplanmıştır. D ve E tipi gibi düzensiz yapılarda ise, η_b değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür. TDY-2007 ve TBDY-2018, Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemine göre karşılaştırıldığında, A, B, C, D ve E tipi yapıların η_b değerleri sırasıyla % 1,27, % 0,74, % 3,72, % 4,90 ve % 14,08 oranında değişmiştir. Mod Birleştirme Yönteminde sonuçlar arasındaki bu farkın azaldığı gözlemlenmiştir. A, B, C, D ve E tipi yapılarda sırasıyla % 0,82, % 0,76, % 1,99, % 2,75 ve % 11,42 olarak hesaplanmıştır. Sonuçların en çok etkilendiği yapı tipi E'dir. Kat sayısı arttıkça TDY-2007 ve TBDY-2018'e göre hesaplanan η_b değerleri arasındaki fark ta büyümektedir. 8 katlı E tipi yapılarda bu farkın % 20'ye kadar çıktığı görülmüştür. TBDY-2018'e göre, yerel zemin sınıfları Mod Birleştirme Yöntemi için tüm yapı tiplerinde η_b değerlerini etkilerken, TDY-2007'de sadece E tipi yapıların η_b değerlerini etkilemiştir. Sonuçlar, Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi için analiz edildiğinde, sadece E tipi yapıların TDY-2007'de yerel zemin sınıflarından etkilendiği ve TBDY-2018'de ise hiçbir yapı tipinin yerel zemin sınıflarından etkilenmediği görülmüştür. Dolayısıyla TDY-2007'de yerel zemin sınıfları plan geometrisi bakımından düzenli olan yapıları etkilememiştir. Çünkü bu yapı tiplerinde rijitlik değişimi olmamıştır. Deprem kuvvetlerinin, yerel zemin sınıflarının değişiminin etkisiyle yapıların her bir katını benzer bir şekilde etkilediği düşünülmektedir (Demir ve Dönmez 2008). Yerel zemin sınıfları, TBDY-2018'de Mod Birleştirme Yöntemine göre D ve E tipi yapılarda burulma düzensizliği katsayılarını 0,015-0,1 değerleri arasında etkilemiştir. TDY-2007'de Mod Birleştirme Yöntemine göre yerel zemin sınıfı değişiminden etkilenen tek yapı tipi olan E tipi yapılarda ise bu değer yaklaşık 0,09'dur. TDY-2007 ve TBDY-2018'e göre Mod Birleştirme Yöntemi için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, E tipi yapıların η_b değerlerinin yerel zemin sınıflarından eşit miktarda etkilendiği belirlenmiştir. TBDY-2018 ile birlikte, yerel zemin sınıfı etkisinin hesaplamalar üzerinde daha gerçekçi bir şekilde dikkate alındığı görülmüştür. Son olarak,

düzensiz yapıların deprem etkilerinden daha fazla etkilendiği ve TBDY-2018 ile bu etkinin arttığı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akhare, A.R., Maske, A.A., 2015, "Performance Based Seismic Design of R.C.C. Buildings with Plan Irregularity", *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, Cilt 2, ss. 1-6.
- Çetin, K., Altıok, T.Y., Demir, A., "Investigation of Torsional Behaviors of Structures with Mode Superposition Method According to Turkish Seismic Codes 2007 and 2018", 2. Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık Kongresi, Muğla, 674-682, 22-24 Nisan 2019.
- Demir, A., Demir, D.D., Erdem, R.T., Bağcı, M., 2010, "Torsional Irregularity Effects of Local Site Classes in Multiple Storey Structures", *International Journal of Recent Research and Applied Studies*, ss. 258-262.
- Demir, A., Dönmez, D., 2008, "Çok Katlı Yapılarda Burulma Düzensizliğine Etki Eden Faktörler", *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 4, ss. 31-36.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- Haque, M., Ray, S., Chakraborty, A., Elias, M., Alam, I., 2016, "Seismic Performance Analysis of RCC Multi-Storied Buildings with Plan Irregularity", *American Journal of Civil Engineering*, Cilt 4, ss. 68-73.
- Kardoğan, P.S.Ö., Demircan, R.K., 2016, "Betonarme Perdelerin Yapılardaki Burulma Düzensizliğine Etkileri", 1. Uluslararası Akdeniz Bilim ve Mühendislik Kongresi, Adana, 647-654, 26-28 Ekim 2016.
- Özmen, G., Girgin, K., Durgun, Y., 2014, "Torsional Irregularity in Multi-Story Structures", *Int. J. Adv. Struct. Eng.*, Cilt 6, ss. 121-131.
- Özmen, G., 2000, "Plan Geometrisinin Burulma Düzensizliğine Olan Etkisi", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 410, ss. 37-41.
- Öztürk, T., 2013, "Binalarda Döşeme Boşluklarının Taşıyıcı Sistem Davranışına Etkisi", *İMO Teknik Dergi*, ss. 6233-6256.
- Ravindra, P.M., Ramya, S.R., 2018, "Torsional and Seismic Behavior of Shear Wall Dominant Flat Plate Buildings", *International Research Journal of Engineering and Technology*, Cilt 5, ss. 1493-1499.
- SAP2000, *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual*, Computers and Structures Inc, Berkeley (CA, USA).
- Shajee, S., Thaskeen, R., 2016, "Torsional Irregularity of Multi-Storey Structures", *International Journal of Innovative Research in Science*, *Engineering and Technology*, Cilt 5, ss. 18861-18871.
- Tengli, S.K., Hussain, S.M., 2018, "Study on Torsional Effects of Irregular Buildings Under Seismic Loads", *International Journal of Applied Engineering Research*, Cilt 13, ss. 55-60.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018, Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Ankara.



EFFECTS OF IGNITION ADVANCE ON COMBUSTION, FUEL CONSUMPTION AND EMISSION AT 13B WANKEL ENGINE

¹Ömer CİHAN^{ID}, ²Osman Akın KUTLAR^{ID}, ³Abdurrahman DEMİRCİ^{ID}, ⁴Hüseyin Emre DOĞAN^{ID}

¹Hakkari University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Hakkari, TURKEY

²Istanbul Technical University, Mechanical Faculty, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, TURKEY

^{3,4}Karamanoğlu Mehmetbey University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Karaman, TURKEY

¹omercihan@hakkari.edu.tr, ²kutlar@itu.edu.tr, ³arahmandemirci@kmu.edu.tr, ⁴hemredogan@kmu.edu.tr

(Geliş/Received: 08.10.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.11.2019)

ABSTRACT: In this study, the optimum advances for parameters such as specific fuel consumption, emissions were investigated in ignition advances below 10° EA and above 10° EA. Cylinder pressure was measured for calculating the heat release rate. 13B MSP (Multi Side Port) single rotor and port fuel injection Wankel engine was used in the experiments. In this context, single rotor Wankel test engine was operated at 2000, 3000 and 4000 rpm engine speed, part loads and $\lambda = 1$ condition. The optimum ignition advance is based on the value at which the maximum torque is obtained. Thus, the effect of ignition advance was investigated on Wankel engine. As a result, it is observed that ignition advance has a significant effect on emissions, in-cylinder pressure and fuel consumption in Wankel engine.

Key Words: Ignition advance, Exhaust emissions, Break specific fuel consumption, Combustion, Wankel engine.

13B Wankel Motorunda Ateşleme Avansının Yanma, Yakıt Tüketimi ve Emisyona Etkileri

ÖZ: Bu çalışmada, optimum avans, 10 derece EMA altı ve 10 derece EMA üstü avanslarda özgül yakıt tüketimi, emisyonlar, silindir içi basınç ve ısı salımı oranları gibi parametreler incelenmiştir. Motor olarak deneyde 13B-MSP tek rotorlu ve manifolda püskürtmeli bir Wankel motor kullanılmıştır. Bu kapsamda, tek rotorlu Wankel deney motoru 2000, 3000 ve 4000 dev/dak motor hızında, kısmi yüklerde ve $\lambda=1$ koşulunda çalıştırılmıştır. Optimum ateşleme avansı maksimum momentin elde edildiği değer baz alınmıştır. Böylece, ateşleme avansının Wankel motordaki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak ateşleme avansının Wankel motorda emisyonlar, silindir içi basınç ve yakıt tüketimi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ateşleme avansı, Egzoz emisyonları, Özgül yakıt tüketimi, Yanma, Wankel motor.

INTRODUCTION

Internal combustion engines have a history of approximately 150 years. Today, it is widely used in sea, air and land. Reciprocating engines convert the reciprocating motion to a rotational motion using a crank-connecting rod mechanism (Ansdale, 1968). To date, the basic parts of the

piston engine have not been changed. The best alternative to reciprocating engines is rotary engines. Wankel engines, which are in the class of rotary piston engines, operate with a four-stroke operating principle (Bensinger, 1973).

Wankel engines have many advantages according to piston engines. Wankel engines do not have a crank-connecting rod mechanism like piston engines. In the Wankel engine, the charge change is provided through the ports on the side housings. Advance is determined by the geometry of the port (Yamamoto, 1971). The lateral surface of the rotor limits the opening and closing of the intake and exhaust ports. Simultaneously opening of the intake and exhaust port is extremely short or absent. As the intake and exhaust time is greater, more fresh charge is taken into the engine (Warner, 2009). In the Wankel engine, the rotor serves as the piston-connecting rod mechanism, thus achieving high speeds. Also, it is simpler because of the crank-connecting rod mechanism did not (Froede, 1961). It is light and takes up less space than the piston engine of the same power (Ohkubo *et al.*, 2004). Wankel engine provides minimum noise, inertia momentum in full balance and less torque fluctuation than a piston engine. Thus, the noise level is lower (Froede, 1965). Looking at the other advantages of the Wankel engine, the power obtained from the unit volume is higher, NO_x emissions and vibration are lower (Froede, 1968).

There are studies in the literature on the ignition system in Wankel engine. In a study, the effect of leading and trailing spark plugs on combustion was investigated. The use of the trailing spark plug reduces the possibility of knocking in the rear region of the chamber and the likelihood of better combustion inside the chamber (Yamamoto *et al.*, 1972). The number of spark plugs and operating order of the leading and trailing spark plugs affect engine performance and emissions (Kohno *et al.*, 1979).

Shi *et al.* different ignition advances were given for different mean flow rates in CFD modeling using CONVERGE software. For best mean flow rates, the best ignition advances were obtained at 25 CA BTDC (Before Top Dead Center) for the leading spark plug, while the best results were obtained at 35 CA BTDC for the trailing spark plug (Shi *et al.*, 2019a). Amrouche *et al.* worked experimentally on a 530 cc single rotor Wankel engine. The engine was operated at 3000 rpm, full load and lean mixture. It was concluded that the optimum ignition advance was 15°. Thus, the best results were obtained in mass fraction burnt, flame development, maximum heat release rate and indicated mean effective pressure (Amrouche *et al.*, 2018). In another study, the optimization of the ignition advance is suitable for improving combustion performance and is particularly effective in reducing the unburned area due to the large combustion chamber. Experimental and 3-D CFD analysis was performed. When trailing spark plug 335° EA, leading spark plug 325° EA and trailing spark plug when the minor axis is shifted 20.7 mm, thus, high spark energy, mixture consumption faster, combustion pressure higher and shorter combustion time is obtained (Shi *et al.*, 2019b). Finkelberg *et al.* are concluded that the ignition advance difference between the two spark plugs is 15° EA (Finkelberg *et al.*, 2019). Raju in his study, the single spark plug and double spark plug operation of the Wankel engine discussed with a numerical model. It was observed that fuel consumption decreased by 7.5% as a result of the engine working with double spark plugs at part loads (Raju, 1992). In CFD modeling using CONVERGE software, optimum ignition advance selection was made for maximum cylinder pressure considering NO_x emission (Shi *et al.*, 2019c). In an experimental study, the effect of ignition timing was investigated by using a dual fuel (hydrogen and n-butanol) in Wankel engine. Peak pressure and temperatures increased as ignition advance increased. The propagation process of the flame was shortened. Also, HC and NO_x emissions increased (Su *et al.*, 2018). Ji *et al.* in the conducted numerical study, it was observed that the leading spark plug was kept constant and the trailing spark plug slightly affected the mean flow rate (Ji *et al.*, 2019). Fan *et al.*, the effect of ignition parameters on the combustion process as a result of working with natural gas in Wankel engine was investigated. As a result, the tumble near the trailing spark plug was beneficial for the combustion process (Fan *et al.*, 2015). Another study has assessed that the Wankel engine self-ignition process on its own when it reaches high temperatures

at high speeds (Iskra and Babiak, 2007). Hwang et al., effect on combustion characteristics was examined in spark plug timing ve leading side spark plug location. The ignition advance had been found that better improve the flame propagation in the combustion chamber (Hwang *et al.*, 2016). Ignition timing is very important in the combustion process. Optimum ignition time increases in-cylinder pressure and reduces soot emissions (Otchere *et al.*, 2019).

Especially in this regard, no studies have been found belong to the 13B-MSP Wankel engine. In this study, a single rotor 13B Wankel engine was used. In this engine, the optimum ignition advance is determined according to the operating condition. Then, the engine was operated with advances of $+10^\circ$ EA and -10° EA from this optimum advance. Break specific fuel consumption, emissions, in-cylinder pressure and heat release rates of the engine were investigated.

EXPERIMENTAL STUDY

In this study, a single rotor Wankel engine was used (Cihan, 2017). 13B type Wankel engine was used in the experiment. This Wankel engine is a new generation and available on the market. The technical specifications of the used engine were given in Table 1. All devices were calibrated in the test room (Kutlar *et al.*, 2018). The experimental setup showing the used devices and engine was shown in Figure 1. Experiments were performed at 2, 3 and 4 bar loads. The test performed in stoichiometric mixture was carried out at 2000, 3000 and 4000 rpm. The ignition advance in which the obtained maximum torque is called as 0_{IA} under different operating conditions. Ignition advances below 10° EA and above 10° EA of this ignition advance had been tested. These were called -10_{IA} and $+10_{IA}$ respectively. In this study, break specific fuel consumption, emissions, in-cylinder pressure and heat release rates of Wankel engine were investigated in different ignition advances. The cylinder pressure was measured by Kistler 6118BF107Q01 piezoelectric sensor which was placed on the leading side with a spark plug adaptor. In the experiments, Bosch BEA 350 exhaust emission device was used for emission tests. The fuel consumption measurement system consists of the weighting unit (AVL 733S) and the fuel conditioning unit (AVL 753C). The measuring device used in the experiments operates according to the gravimetric measuring principle and the fuel temperature is set to 25°C and the fuel pressure is set to 4 bar, recommended for the 13B-MSP Wankel engine.

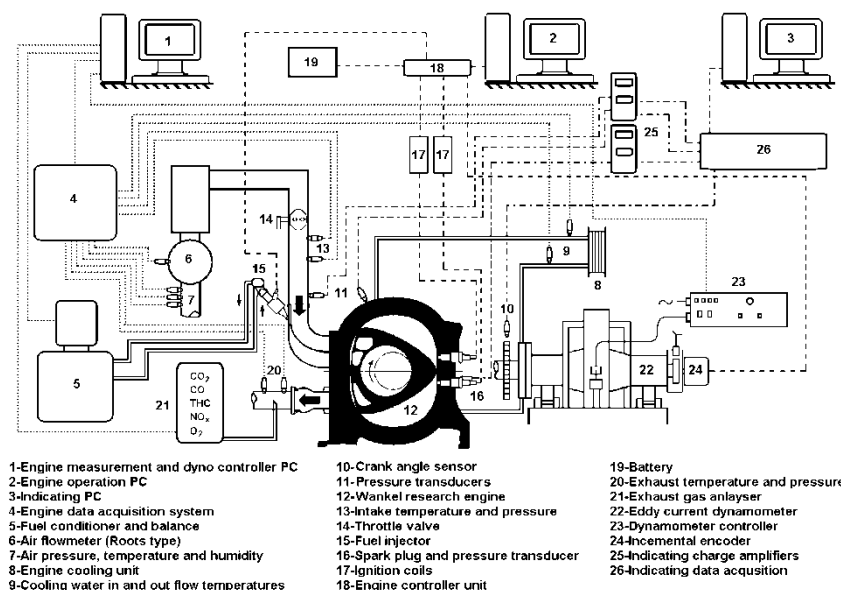


Figure 1. Schematic representation of the experimental setup.

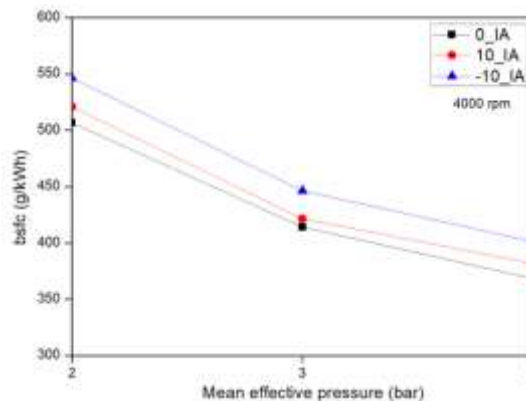
Table 1. Basic and geometric data related to 13B MSP Wankel engine.

Term		Value	Unit	
Ignition (Twin spark plug)		Spark ignition	-	
Mixture preparation		Port fuel injection	-	
Fuel		Gasoline	-	
R (Rotor corner-center length)		105	mm	
e (Eccentricity)		15	mm	
b (Rotor width)		80	mm	
ϵ (Compression ratio)		10	-	
Vh (Stroke volume)		654	cm ³	
Port Timing	Intake port	Open (ATDC)	12 ^o	EA
	Intake port	Close (ABDC)	36 ^o	EA
	Exhaust port	Open (BBDC)	50 ^o	EA
	Exhaust port	Close (BTDC)	3 ^o	EA
Intake Charge Type		Natural Aspiration		

RESULTS

Experiments were performed under different engine speeds (2000, 3000 and 4000 rpm) and mean effective pressure of 2, 3 and 4 bar and homogenous condition. The advance where the maximum torque value is obtained for each test point is called 0_{IA}. The effects of ignition points $\pm 10^\circ$ EA different from this advance were investigated. The advance difference between the leading spark plug and the trailing spark plug is kept constant at 15^o EA. As shown in Figure 2, a lower break specific fuel consumption was obtained in the optimum ignition advance, in the 0_{ID} ignition advance. This sequence was then followed by 10^o EA more than the optimum advance and 10^o EA missing advance than the optimum advance respectively in Figure 2. As a result of over or under ignition advances, engine torque decreased and specific fuel consumption increased.

THC (Total Hydrocarbon) emissions decrease with increasing speed in Wankel engine. Changing the ignition advance affects THC emissions at different loads and 2000, 3000 and 4000 rpm. However, when the advance decreased (-10_{IA}) at 4 bar mean effective pressure, HC emissions inside exhaust gases were reduced. It was seen from the combustion chamber pressure data that increasing the ignition advance in the experiment did not cause knocking at determined all points (Figure 3).

**Figure 2.** The effect of different ignition advances on break specific fuel consumption at 4000 rpm.

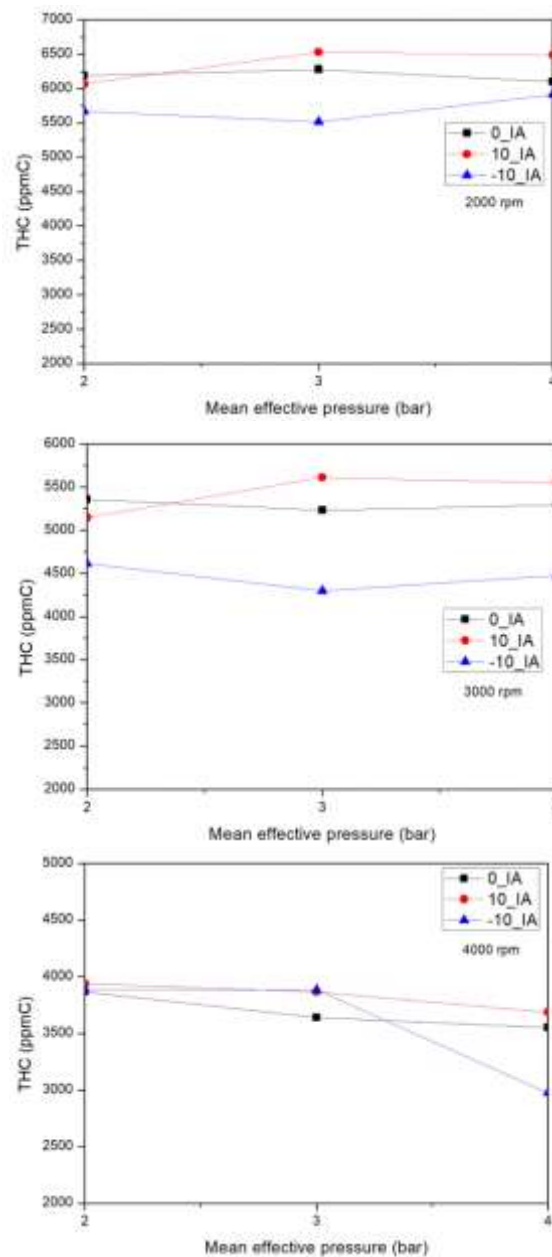


Figure 3. Effect of different ignition advances on THC emissions.

The other combustion products CO, CO₂ and O₂ have not been changed significantly in this operating conditions. Since the experiment was carried out under stoichiometric condition, CO₂ concentration was measured around 14%, CO concentration was 0.8% and O₂ concentration was measured as 1.5%.

Figure 4 showed that the effect of different ignition advances on NO emissions at 3000 rpm engine speed and under different load conditions. Nitrogen oxides are formed by the combination of nitrogen in the air with oxygen at high temperatures reached as a result of combustion. The parameters which affect nitrogen formation are temperature, time and excess air coefficient. The increasing of engine speed and load rises temperature and pressure. Nitrogen oxide emissions increase with rising temperature and pressure. The NO emission values have increased due to sufficient time to complete combustion. When the advance was reduced, NO emissions were reduced due to combustion chamber temperatures and pressures decreased and the progression of

combustion to expansion. In the experiment, it was observed that the velocity did not affect NO emissions.

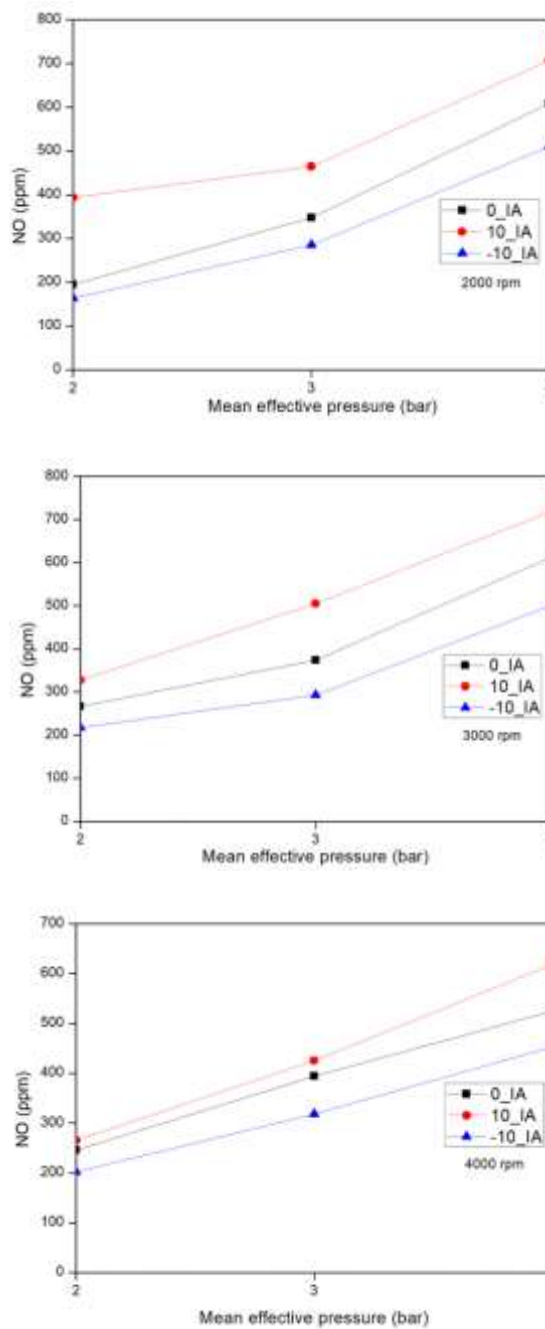


Figure 4. Effect of different ignition advances on NO emissions at different engine speeds.

Figure 5 showed that the p-V diagrams and heat release rates at 4 bar engine load and 4000 rpm. As seen in the p-V diagrams, the pressure obtained from the engine increased as the ignition advance increased. As the advance increases, the highest pressure approaches the top dead center (TDC). As the advances increase, NO emissions have increased for the temperature and pressure will increase in the chamber (Figure 4). As the ignition advance is reduced, the combustion shifts towards expansion stroke. This situation is reflected in the graphs that give the cumulative heat release rates (Figure 5). Also, it was seen that as the advance of ignition increased, combustion occurred earlier and faster.

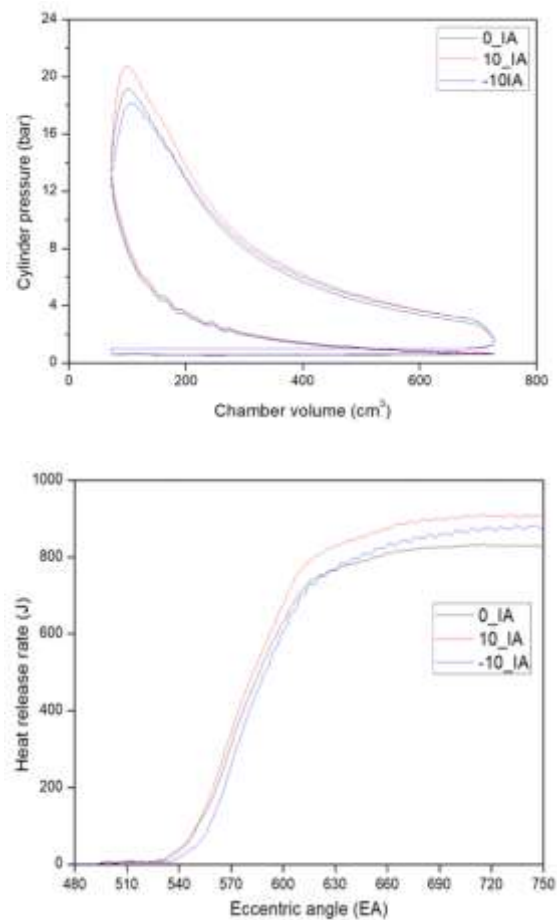


Figure 5. The effect of ignition advance on the heat release rate and p-V diagram.

CONCLUSIONS

In this study, experiments were carried out under stoichiometric conditions at different engine speeds (2000, 3000 and 4000 rpm) and mean effective pressures of 2, 3 and 4 bar. For each experiment point, ignition delay obtained maximum break torque was called as 0_IA. The effect of $\pm 10^\circ$ EA ignition advance difference from the 0_IA (optimum advance) was investigated on the engine. The ignition advance difference between the leading spark plug and the trailing spark plug is kept constant at 15° EA (Optimum value).

As a result, there was observed a decrease in engine torque and an increase in specific fuel consumption due to more ($+10^\circ$ EA) and less (-10° EA) ignition advance in operating conditions. At 4 bar mean effective pressure, the HC emissions in the exhaust gases were reduced with the advance reduction (-10 _IA). There was no change in the CO, CO₂ and O₂ values of exhaust emissions. When the advance was reduced, NO emissions were reduced with the combustion shifted to expansion process and the combustion chamber temperatures and pressures decreased. As seen in the p-V diagrams, the pressure obtained from the engine increased as the ignition advance increased. According to the results obtained from heat release rate and pressure data, As the advance increased, the highest pressure approached TDC. As the ignition advance is reduced, the combustion shifts towards expansion process.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey -TÜBİTAK (Project No: 115M690)

REFERENCES

- Amrouche, F., Erickson, P.A., Varnhagen, S., Park, J.W., 2018, "An experimental analysis of hydrogen enrichment on combustion characteristics of a gasoline Wankel engine at full load and lean burn regime", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(41), pp. 19250-19259.
- Ansdale R. F., 1968, *The Wankel RC Engine*, Iliffe Books Ltd., London, England.
- Bensinger W.D., 1973, *Rotationskolben-Verbrennungsmotoren*, Berlin, Deutsche: Springer-Verlag.
- Cihan, Ö., 2017, *Experimental and numerical investigation of the Wankel engine and skip cycle system*, Doctoral thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Istanbul.
- Fan, B., Pan, J., Liu, Y., Zhu, Y., 2015, "Effects of ignition parameters on combustion process of a rotary engine fueled with natural gas", *Energy Conversion and Management*, 103, pp. 218-234.
- Finkelberg, L., Kostuchenkov, A., Zelentsov, A., Minin, V., 2019, "Improvement of Combustion Process of Spark-Ignited Aviation Wankel Engine", *Energies*, 12(12), 2292, pp. 1-11.
- Froede, W.G., 1961, "The NSU-Wankel rotating combustion engine", SAE paper, 610017, pp. 179-203.
- Froede, W.G., 1965, "The Rotary Engine of the NSU Spider", SAE paper, 650722, pp. 414-436.
- Froede, W.G., 1968, "NSU's Double Bank Production Rotary Engine", SAE paper, 680461, pp. 1-10.
- Hwang, P.W., Chen, X.C., Cheng, H.C., 2016, "Influences of ignition timing, spark plug and intake port locations on the combustion performance of a simulated rotary engine", *Journal of Mechanics*, 32(5), pp. 579-591.
- Iskra, A., Babiak, M., 2007, "Real possibilities of construction of CI Wankel engine", *Jour*, pp. 1-6.
- Ji, C., Shi, C., Wang, S., Yang, J., Su, T., Wang, D., 2019, "Effect of dual-spark plug arrangements on ignition and combustion processes of a gasoline rotary engine with hydrogen direct-injection enrichment", *Energy Conversion and Management*, 181, pp. 372-381.
- Kohno, T., Lto, R., Morita, M., Mizuno, N., 1979, "Analysis of light-load performance in rotary engines", SAE paper, 790435, pp. 1637-1652.
- Kutlar, O.A., Cihan, Ö., Doğan, H.E., Demirci, A., 2018, "The effect of different intake port geometries of a single - rotor Wankel engine on performance and emissions at part-load conditions", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol. 33, No. 3, pp. 809-819.
- Ohkubo, M., Tashima, S., Shimizu, R., 2004, "Developed Technologies of the New Rotary Engine (RENESIS)", SAE technical paper, 2004-01-1790, pp. 1-10.
- Otchere, P., Pan, J., Fan, B., Chen, W., Yao, L., Jianxing, L., 2019, "Numerical investigation of the effect of advance ignition timing on combustion process in direct injection rotary engine fueled with biodiesel", *Sustainable Energy*, pp. 1-34.
- Raju, R.S., 1992, "Heat transfer and performance characteristics of a dual-ignition Wankel engine", SAE technical paper, 920303, pp. 1-46.
- Shi, C., Ji, C., Wang, S., Yang, J., Li, X., & Ge, Y. 2019a, "Numerical simulation on combustion process of a hydrogen direct-injection stratified gasoline Wankel engine by synchronous and asynchronous ignition modes", *Energy conversion and management*, 183, pp. 14-25.
- Shi, C., Ji, C., Ge, Y., Wang, S., Bao, J., Yang, J., 2019b, "Numerical study on ignition amelioration of a hydrogen-enriched Wankel engine under lean-burn condition", *Applied Energy*, 255, 113800, pp. 1-12.

- Shi, C., Ji, C., Wang, S., Yang, J., Li, X., Ge, Y., 2019c, "Effects of hydrogen direct-injection angle and charge concentration on gasoline-hydrogen blending lean combustion in a Wankel engine", *Energy Conversion and Management*, 187, pp. 316-327.
- Su, T., Ji, C., Wang, S., Shi, L., Cong, X., 2018, "Effect of ignition timing on performance of a hydrogen-enriched n-butanol rotary engine at lean condition", *Energy Conversion and Management*, 161, pp. 27-34.
- Warner M., 2009, *Street Rotary*, Penguin Group, New York, USA.
- Yamamoto K., 1971, *Rotary Engine*, Toyo Kogyo Co., Ltd., Hiroshima, Japan.
- Yamamoto, K., Muroki, T., Kobayakawa, T., 1972, "Combustion characteristics of rotary engines", SAE paper, 720357, pp. 1296-1302.



GMak YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ HARDOKS500 - ST52 NUMUNENİN ÇEKME DAYANIMI VE SERTLİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

¹Şeyma KORKMAZ , ²M. Hüseyin ÇETİN , ³Muhammed ADAR , ⁴Abdulkadir ORAK 

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE

¹korkmaz.syma@gmail.com, ²hctin@karabuk.edu.tr, ³muhammedadarr@gmail.com,

⁴abdulkadiorak06@gmail.com

Geliş/Received: 26.08.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.11.2019

ÖZ: Makine konstrüksiyonunda yüksek dayanım, aşınma ve korozyon direnci gibi farklı endüstriyel gereksinimlerin karşılanması farklı malzemelerin birlikte kullanımı ile sağlanabilir. Özellikle metalik malzemelerin birlikte kullanımı sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır. Farklı metalik malzemelerin birlikte kullanımı, her iki malzemenin birleştirilebilme kabiliyetine bağlıdır ve birleştirilebilirlik kabiliyetinin analizi için deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, Hardoks500 ve St52 (S355) çeliğinin farklı akım ve voltaj parametreleri kullanılarak GMak (Gaz Metal Ark Kaynağı) yöntemiyle kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. İki farklı çelik alaşımının kaynak edilebilirliği çekme testi, mikro sertlik ölçümü, SEM ve mikro yapı görüntüleme teknikleri ile incelenmiştir. Kaynaklanmış numunelere çekme deneyleri uygulanmış, elde edilen grafiklerde oluşan kritik noktalar ve numunelerin deformasyon karakteristikleri, belirlenen giriş parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Numunelerin mikro sertlik değerleri Vickers (HV) sertlik ölçme yöntemine göre ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre; düşük akım ve voltaj değerlerinde Hardoks500 ile St52 malzemesinin kaynak edilebilirlik kabiliyetinin düşük olduğu ve sertlik dağılımının düzensiz bir şekilde gerçekleştiği belirlenmiştir. Yüksek akım ve yüksek voltaj değerlerinde çekme eğrilerinin daha kararlı davranış ortaya koyduğu ve homojen bir sertlik dağılımı gerçekleştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaynak edilebilirlik, Hardoks500, St52, GMak

Investigation of Tensile Strength and Hardness Behaviour of Hardox500 – St52 Specimen Joined by GMAW Method

ABSTRACT: In mechanical construction, meeting different industrial requirements such as high strength, wear and corrosion resistance can be achieved by using different materials together. Especially the usage of metallic materials together is important for sustainability. The use of different metallic materials together depends on the joining ability of the materials and experimental studies are needed for the analysis of joining ability. In this study, the weldability of Hardox500 and St52 (S355) steel by GMAW (Gas Metal Arc Welding) method was investigated using different current and voltage parameters. Weldability of two different steel alloys were examined by tensile test, micro hardness measurement, SEM and microstructure imaging techniques. Tensile tests were applied to the welded samples and the critical points and deformation characteristics of the samples were evaluated according to the determined input parameters. Micro hardness values of the samples were determined by Vickers (HV) hardness measurement method. According to the results, it was determined that the welding capability of Hardox500 and St52 material was low at low current and voltage values and that the hardness distribution

occurred irregularly. It was determined that the tensile curves at high current and high voltage values exhibited more stable behaviour and a homogeneous hardness distribution occurred.

Key Words: Weldability, Hardox500, St52, GMAW

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kaynak bağlantıları endüstriyel olarak büyük önem taşımakta ve kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Gemi inşaatı, basınçlı kaplar, demiryolları, damper ve vinç imalatları gibi özellikle ağır sanayi sektöründe kullanılan makine sistemlerinde bağlantıların büyük çoğunluğu kaynak işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Ağır sanayi makinelerinde oluşan masif gerilmeler, yüksek mukavemetli malzemeler ve bağlantılar ile karşılanmaktadır. Fakat yüksek mukavemetli malzemelerin maliyet ve temin edilebilirlik problemi, farklı malzeme çiftlerinin birlikte kullanılabilirliği yaklaşımını doğurmaktadır. Aşınma ve gerilmenin yüksek olduğu konstrüktif uygulamalarda yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımı tercih edilirken, aşınma ve gerilmenin daha düşük olduğu uygulamalarda ise nispeten düşük mukavemetli ve maliyet açısından daha uygun bir malzemenin kullanımı tercih edilebilir.

İki veya daha fazla malzemenin kullanılabilirliği için en uygun konstrüksiyonlardan birisi de ağır taşıtlardır. Günümüzde ağır taşıtların şase ve damper imalatında ağırlıklı olarak Hardoks serisi malzeme kullanılmaktadır. Hardoks malzeme her ne kadar mukavemetli ve aşınma dayanımı yüksek olsa da maliyeti de bir o kadar yüksektir. Bu sebepten dolayı nispeten daha düşük aşınma ve gerilmelerin olduğu bölgelerde, düşük mukavemet ve aşınma dayanımına sahip St52 malzemesi tercih edilebilir.

Literatürde, düşük maliyetle yüksek mekanik performans elde edilebilmesi için iki farklı malzemenin kaynak edilebilirliğinin araştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Abioye ve arkadaşları (Abioye ve diğ., 2019), AISI 304 paslanmaz çelik ve düşük karbonlu çelik malzemenin GMAK (gaz metal ark kaynak) bağlantısını farklı kaynak hızlarında elde etmişler ve hız parametresinin kaynak bölgesinin korozyon davranışına ve mikro yapısına etkisini incelemişlerdir. Sabit tel besleme hızı (84 mm/s), voltaj (22V) parametrelerinde üç farklı kaynak hızı (3 mm/s, 4,5 mm/s, 6 mm/s) uygulanarak hazırlanan numuneler korozyon testine tabi tutulmuş ve kaynak bölgesinin mikro yapısı EDX (Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi) analizi ile incelenmiştir. Analiz sonucunda düşük kaynak hızında bağlantı bölgesinin korozyon direncinin arttığı görülmüştür. EDX analizi sonuçlarına göre ise kaynak hızı arttıkça delta ferrit hacminin arttığı belirlenmiştir.

Vijay ve arkadaşları (Vijay ve diğ., 2019), Al2024 ve Al6063'ün TIG (Tungsten Asal Gaz) kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin bağlantı bölgesinin mekanik özelliklerine etkisini deneysel çalışmalar ve görsel analizler ile incelemişlerdir. Voltaj, akım, kaynak ağzı açıklığı, gaz akış hızı parametreleri için üç farklı seviye belirlenmiş, parametre değişimlerinin bağlantı bölgesinin mekanik davranışına etkisi sertlik, çekme, korozyon testleri ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleriyle analiz edilmiştir. Analiz sonucunda optimum kaynak kabiliyeti 0,5 mm- 1,5 mm kaynak ağzı açıklığı, 70-80 amper akım ve 18-20 lt/dk gaz akış hızı parametrelerinde elde edilmiştir.

Sharma ve Dwivedi (Sharma ve Dwivedi, 2019), P92 çeliği ve 304H östenitik paslanmaz çeliğinin A-TIG (Aktif-Tungsten Asal Gaz) kaynağı ile birleştirilmesinde farklı kaynak tozlarının nüfuziyet derinliğine etkisini incelemişlerdir. Kaynak işlemi esnasında dört farklı kaynak tozu (Cr_2O_3 , MoO_3 , SiO_2 ve TiO_2) kullanılmış ve mikro yapı incelemeleri sonucunda en iyi penetrasyonu sağlayan kaynak tozunun TiO_2 olduğu belirlenmiştir. TiO_2 ile birleştirilen numunenin kaynak bölgesine yapılan çekme, çentik darbe ve mikro sertlik testleri ile kaynak bölgesinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre, kaynak bölgesinin ana metale kıyasla daha yüksek çekme dayanımı (1042,6 MPa) gösterdiği ve numunenin 304H malzemesi (688,6 MPa) bölgesinden kırıldığı belirlenmiştir. Darbe dayanıklılık testinde ise, kaynak bölgesi ana metale kıyasla daha düşük darbe mukavemeti göstermiştir. Bu durumun sebebi, kaynak bölgesindeki temperlenmemiş martensitik yapı oluşumu ile açıklanmıştır.

Wang ve arkadaşları (Wang ve diğ., 2016), MIG kaynağı ile birleştirilmiş 6N01S-T5 ve 7N01P-T4 alüminyum alaşımlarının kaynak bölgesinin mekanik ve mikro yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak ısısının baz metallere ve füzyon bölgesine etkisi mikro sertlik testi, çekme testi ve EBSD (Enerji

Geri Saçılım Elektron Kırınımı), TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu), mikro yapı görüntüleri ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 6N01S-T5 alaşımında ısıdan etkilenen iki farklı bölgenin oluştuğu (ITAB) ve baz metal bölgenin en düşük gerilme mukavemetine, füzyon bölgenin ise en yüksek uzama miktarına sahip olduğu görülmüştür. 7N01P-T4 alaşımında ise sadece bir ITAB oluştuğu, bu bölgenin daha düşük mukavemet ve sünek davranış sergilemesinin yanı sıra baz metalle benzer sertlikte olduğu belirlenmiştir.

Nie ve arkadaşları (Nie ve diğ., 2018), 6061-T6 ve A356-T6 alüminyum alaşımlarının darbeli MIG kaynağı ile birleştirilmesiyle elde edilen kaynak bölgesinin mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, kaynak işlemi farklı hareket hızlarında (8, 10, 12 ve 16 mm/s) fakat diğer kaynak parametreleri (tel besleme hızı, kaynak akımı, darbe süresi, darbe frekansı, kaynak voltajı) sabit tutularak gerçekleştirilmiş, hareket hızının kaynak bölgesine etkisi mekanik testler (çekme testi ve mikro sertlik ölçümü) ve mikro yapı (optik mikroskop, SEM, EPMA) görüntüleriyle analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, çekme mukavemeti ve mikro sertlik değerinin 12 mm/s hızda maksimum değere ulaştığı görülmüş, hareket hızı arttıkça çekme mukavemeti ve ergimiş bölge genişliğinin azaldığı gözlenmiştir.

Emre ve arkadaşları (Emre ve diğ., 2017), AISI 316L ve AISI 2205 paslanmaz çeliklerinin kaynak edilebilirliğini, elektrik ark kaynağı (EAK) ve gaz metal ark kaynağı (GMAK) yöntemlerini kıyaslayarak araştırmışlardır. EAK yöntemi için östenitik (E308L-16) ve dubleks (E2209-17) elektrotlar, GMAK yöntemi için ise östenitik (TETRAV316L-G) ve dubleks (TETRAS2293L-G) ilave metalleri kullanılarak, farklı elektrot ve ilave metallerin kaynak kabiliyetine etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen kaynaklı numuneler çekme testine tabi tutulmuş ve sonrasında mikro sertlik ölçümü yapılarak numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca numunelerin mikro yapı analizi için SEM ve optik mikroskop (OM) görüntüleri incelenmiştir. Mekanik testler ve ölçümler sonucunda, dubleks elektrot ve ilave metalinin kullanıldığı kaynaklı bağlantıların akma mukavemeti, çekme mukavemeti, sertlik ve yüzde uzamasının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çekme testi sonucunda kopmaların AISI 316L malzemesinin ITAB'ında(Isı Tesiri Altındaki Bölge) gerçekleştiği görülmüştür. Kaynak yöntemleri genel olarak değerlendirildiğinde ise GMAK yöntemi ile elde edilen kaynaklı malzemelerin EAK yöntemi ile elde edilen kaynaklı malzemelere kıyasla daha mukavemetli olduğu belirlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde GMAK yöntemi ile elde edilen yüzeylerde daha küçük boyutlu çukurcuk oluşumu görülmüş ve daha sünek bir yapı elde edilmiştir. SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlar da deneysel sonuçları destekler niteliktedir.

Okay ve arkadaşları (Okay ve diğ.,2015), elektrik ark kaynağı ile birleştirilmiş S235JR ve Hardoks400 çeliklerinin kaynak edilebilirlik kabiliyetini mekanik testler ve mikro yapı incelemeleri ile araştırmışlardır. Kaynak bağlantısının mekanik özelliklerinin analizi için çekme, çentik darbe ve eğme deneyleri yapılmış, ayrıca numunenin baz metal ve kaynak bağlantısı bölgelerinin sertlik değerleri ölçülmüştür. Bağlantı bölgelerinin mikro yapı analizi için SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. Çekme deneylerinde kaynaklı numunenin, S325JR malzemesinin ITAB bölgesinden kırıldığı, darbe çentik testinde sıcaklık azaldıkça malzemenin gevrekleştiği, eğme testinde ise şekillendirilen numunede herhangi bir çatlak görülmediği, en düşük sertlik değerinin S235JR malzemesinin ITAB bölgesinden elde edildiği sonucuna varılmıştır. SEM ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde daha çok küçük boyutlu çukurcukların oluşması sebebiyle malzemenin sünek kırılmaya maruz kaldığı ve S235JR malzemesinin ITAB bölgesinde daha büyük tane oluşumu sebebiyle kopmanın bu bölgede gerçekleştiği belirlenmiştir.

Özen ve arkadaşları (Özen ve diğ., 2016), Hardoks400 çeliklerinin elektrik ark kaynağı ile birleştirilebilme kabiliyetini mekanik testler ve metalografik incelemeler ile araştırmışlardır. Çalışmada ilk olarak çekme, çentik darbe testi, eğme testleri yapılarak kaynaklı malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiş, daha sonra SEM ve EDS analizleri ile yüzey morfolojisi incelenmiştir. Çekme deneyleri sonucunda kaynaklı numunenin ana malzemedan kırıldığı ve kaynak bölgesinin çekme dayanımının ana malzemeye kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Eğme testi sonucunda ise kaynaklı malzemedede herhangi bir çatlama görülmemiştir. Ayrıca SEM görüntüleri analizinden, sıcaklık düştükçe kırılma mekanizmasının düzgün tane içi kırılma şeklinde gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Yapılan mekanik ve

metalografik incelemeler sonucunda Hardoks400 çeliğinin elektrik ark kaynağı ile başarılı bir şekilde kaynaklanabildiği belirlenmiştir.

Kaçar ve arkadaşları (Kaçar ve diğ., 2018), Hardoks400 ve AISI 304 çeliklerinin elektrik ark kaynağı ve gaz altı kaynak yöntemleri ile elde edilen kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikro yapısal özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada farklı iki yöntemle kaynaklanmış numunelerin mekanik özelliklerinin analizi için çekme, eğme ve Charpy çentik darbe testleri gerçekleştirilmiş, yüzey morfolojisi ve içyapı analizi için ise mikro yapı, SEM ve EDS görüntüleri incelenmiştir. Çekme testi sonucunda her iki yöntemle birleştirilen malzemenin de kaynak bölgesinden kırıldığı görülmüştür. Fakat eğme testi, darbe testi ve görsel analizler birlikte değerlendirildiğinde gaz altı kaynak yöntemi ile elde edilen kaynaklı bağlantının elektrik ark kaynağı ile elde edilen kaynaklı bağlantıya kıyasla daha mukavemetli olduğu belirlenmiştir.

Hardoks500 malzemesi yüksek aşınma direnci, kolay şekillendirilebilme ve kaynak edilebilme kabiliyetine sahip olması sebebiyle endüstride ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan malzemelerden biridir (Brezová ve diğ., 2014; Dudziński ve diğ., 2008; Konat ve diğ., 2006; Konat, 2019; Konat ve diğ., 2017). Aşınmaya maruz ve yüksek gerilme etkisi altındaki uygulamaların büyük çoğunluğunda, farklı özelliklere sahip malzemelerin birlikte kullanımı tercih edilmektedir. Bu sebeple yüksek mekanik özelliklere sahip Hardoks500 malzemesi ile nispeten daha düşük mekanik özelliklere sahip ve kolay temin edilebilen St52 malzemesinin birlikte kullanımı mühendislik açısından büyük önem taşımaktadır. Mevcut çalışmaların büyük bir bölümünde alüminyum alaşımlarının ve paslanmaz çelik malzemelerin kaynak edilebilme kabiliyeti, bağlantı bölgesinin mekanik ve mikro yapı özellikleri analiz edilerek incelenmiştir. Fakat ağır taşıtların imalatında kullanılan Hardoks500 malzemesinin kaynak edilebilme kabiliyetinin incelendiği yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmanın amacı, Hardoks500 - St52 çeliğinin kaynak edilebilme kabiliyetinin incelenmesidir. Hardoks500 - St52 kaynak bölgesinin mekanik davranışı ve mikro yapı özellikleri deneysel, istatistiksel ve görsel analizler ile araştırılmıştır. İlk olarak voltaj ve akım parametreleri için üç farklı seviye belirlenmiş ve belirlenen parametre değerlerinde elde edilen numuneler çekme testi ve sertlik testine tabi tutulmuştur. Deney sonrasında kaynak bölgelerinin SEM/OM görüntüleri elde edilerek mikro yapı oluşumları yorumlanmıştır. Ayrıca elde edilen deney sonuçlarına bağlı olarak S/N oranı belirlenerek deney esnasında kontrol edilemeyen (cihaz kalibrasyonu, titreşim vb.) faktörlerin sebep olduğu deneysel hata oranları belirlenmiştir. Voltaj ve akım parametrelerinin deney sonuçlarına etkisi ise ANOVA ile analiz edilerek, kaynak kabiliyetine en çok etki eden parametre belirlenmiştir. İstatistiksel analizler ile deney numunelerinden elde edilen yüzey görüntüleri kıyaslanarak yapılan analizlerin doğruluğu teyit edilmiştir.

MALZEME VE METOT (MATERIAL and METHOD)

Yapılan deneylerde Çizelge 1'de kimyasal bileşenleri verilen Hardoks500 çelik ile St52 (S355) çelik malzemeler kullanılmıştır. Kaynak işleminden önce malzemelerin karbon eşdeğerleri hesaplanmış ve malzemeler uluslararası standartlarca belirlenmiş sıcaklık değerlerinde (150 °C-250 °C arası) ön tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu sayede malzemelerin ısıya maruz kalan bölgelerinde martenzit fazının artışı ve buna bağlı olarak gerçekleşen çatlak oluşumu önlenmiştir (Çam ve diğ., 1999; Kaçar ve diğ., 2018; Yılmaz, 2010). Birleştirme işlemi ~ 690 MPa akma ve ~ 900 MPa çekme dayanımına sahip çelik tel elektrot malzeme kullanılarak gaz metal ark kaynağı (GMAK) metoduyla (Şekil 1) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Malzemelerin Ağırlıkça % Kimyasal Bileşimi

Table 1. Chemical composition of materials (wt.%)

Malzeme	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe	C _{eş}
Hardoks500	0,30	1,62	0,78	1,12	0,22	0,26	0,020	0,010	Kalan	0,86
St52	0,20	1,60	0,25	0,24	-	-	0,035	0,032	Kalan	0,51



Şekil 1.GMAK kaynak makinesi

Figure 1.GMAW welding machine

Çizelge 2. Kaynak Parametreleri

Table 2. Welding parameters

Akım (A)	Voltaj (V)	Kaynak Süresi (s)	Tel Besleme Hızı (mm/dk.)	Kaynak Kalınlığı (mm)
180	26,6	30	~720	10
190	27,2			
200	27,8			

Deneyisel çalışma için, tel besleme hızı (720 mm/dk.) sabit tutularak 3 farklı voltaj ve akım parametresi belirlenmiş ve bu parametrelere göre tam faktöriyel deney tasarımı ile 9 farklı deney koşulu oluşturulmuştur. Tam faktöriyel tasarıma göre elde edilen parametreler Çizelge 3'te verilmiştir. Ayrıca Çizelge 3'te Eşitlik 1'e göre hesaplanan kaynak bölgesine aktarılan enerji değerleri de verilmiştir. Eşitlik 1'de "V" ark voltajı değerini (volt), "I" kaynak akım değerini (amper), "s" ise zamanı (saniye) temsil etmektedir (Çetin ve diğ., 2018).

Kaynak Enerjisi (Joule) = $V \cdot I \cdot s$

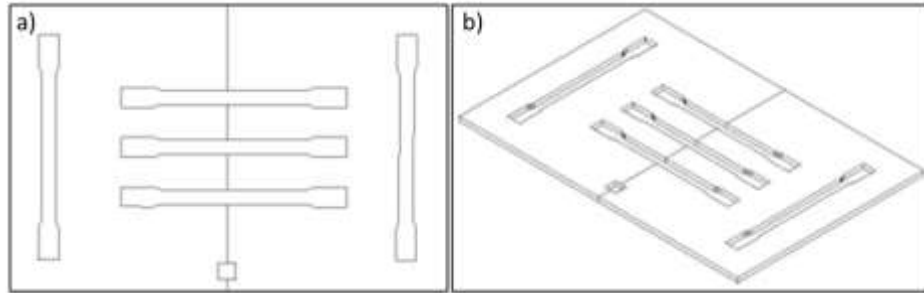
(1)

Çizelge 3. Tam faktöriyel deney tasarımı

Table 3. Full factorial experimental design

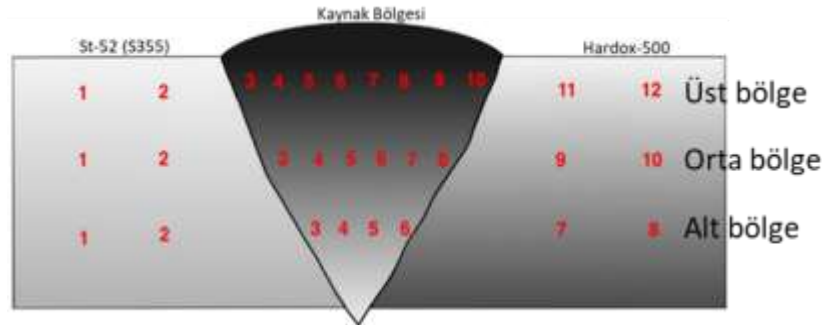
Deney Numarası	Akım (A)	Voltaj (V)	Kaynak Süresi (s)	Kaynak Enerjisi (Joule)
1	180	26,6	30	143640
2	180	27,2	30	146880
3	180	27,8	30	150120
4	190	26,6	30	151620
5	190	27,2	30	155040
6	190	27,8	30	158460
7	200	26,6	30	159600
8	200	27,2	30	163200
9	200	27,8	30	166800

Kaynak işlemi uygulanmış çelik malzemelerin mekanik özellikleri, çekme deneyleri ve mikro sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Çekme testi Shimadzu Autograph AGS-X Universal test cihazı (100 kN) ile oda sıcaklığında TS EN ISO 6892-1 standartlarına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri için hazırlanan numuneler, Şekil 2’de şematik olarak gösterilen geometride plazma ile kesilerek elde edilmiştir. Vickers mikro sertlik (HV) testi ise Bruker UMT Universal sertlik ölçüm cihazı kullanılarak, 15 saniye süreyle 0,5 kg yük altında uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerin üst-orta ve alt bölgesi olmak üzere 3 farklı konumdan sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Her bir kademedeki St52 malzeme – kaynak bölgesi – Hardoks500 malzeme bölgesinde mikro sertlik değerleri alınmıştır. Ölçüm alınan noktalar ve ölçüm noktası sayısı Şekil 3’de gösterilmiştir. Kaynak bölgesi mikro yapısının görsel analizleri için optik mikroskop (OM-Nikon Ters Metalurjik Mikroskop) ve taramalı elektron mikroskopundan (SEM-Carl Zeiss Gemini FESEM) elde edilen görüntüler kullanılmıştır.



Şekil 2. Kaynaklanan ve üzerinden çekme numuneleri çıkartılan parçaya ait (a) üstten görünüş ve (b) perspektif teknik resimler

Figure 2. (a) Top view and (b) perspective technical drawings of the welded and extruded specimen



Şekil 3. Sertlik ölçüm noktaları

Figure 3. Hardness measurement points

DeneySEL sonuçların analizi için varyans analizi (ANOVA) ve korelasyon yöntemleri ile parametreler arasındaki ilişki incelenmiş, Taguchi yöntemi ile de giriş parametreleri optimize edilmiştir. Taguchi ve ANOVA yöntemlerinin uygulanmasında Minitab paket programı kullanılmıştır. Korelasyon katsayısı hesabı Eşitlik 2 dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Eşitlik 2’de r korelasyon katsayısını, X ve Y ise incelenen parametrelere ait sayısal değerleri ifade etmektedir. Parametre optimizasyonunda sinyal/gürültü (S/N) oranı dikkate alınarak, Eşitlik 3’de matematiksel modeli verilen “en yüksek en iyi” yaklaşımına göre gerilme ve sertlik deneyi sonuçları değerlendirilmiştir (Nalbant ve diğ., 2007). Eşitlik 3’de n değeri toplam deney sayısını, y değeri de deneysel sonucu ifade etmektedir.

$$r = \frac{\sum(xy) - (\sum x)(\sum y) / n}{\sqrt{(\sum x^2 - (\sum x)^2 / n)(\sum y^2 - (\sum y)^2 / n)}} \quad (2)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3)$$

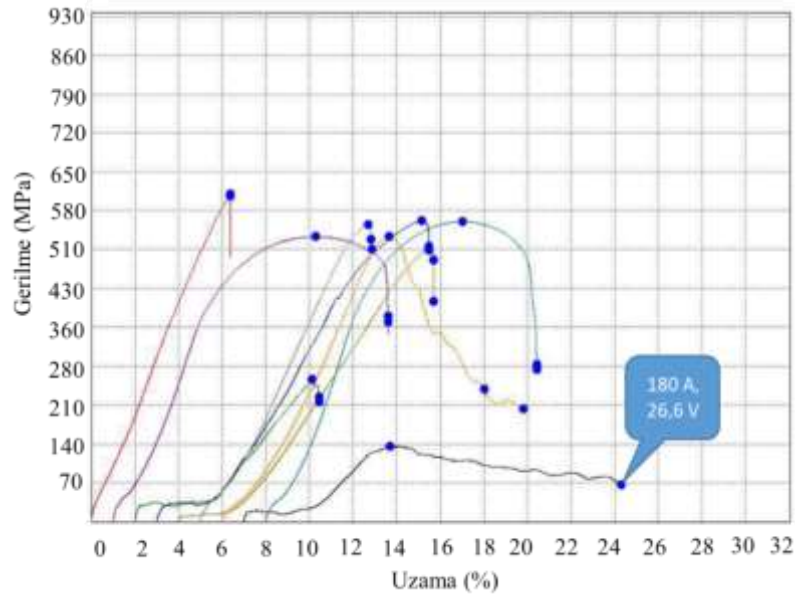
SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Çekme deneylerinden elde edilen σ - ε grafikleri Şekil 4'te, her bir deney koşulu için elde edilen maksimum gerilme değerleri Çizelge 4'te verilmiştir. Çekme deneyi sonuçlarına göre 180 A, 26,6 V deney koşulu (1 numaralı deney – Şekil 5) hariç bütün deneylerde deformasyonun kaynak bölgesi dışında oluştuğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar Kaçar ve arkadaşlarının çalışması referans alınarak kıyaslanmıştır (Kaçar ve diğ., 2018). Referans alınan çalışmada numunelerin kaynak bölgesinden kırıldığı belirlenmiştir. Hardoks500 malzemesinin şekillendirilebilme ve kaynak edilebilme kabiliyetinin Hardoks400'den daha iyi olması sebebi ile mevcut çalışmada deformasyonlar kaynak bölgesi dışında gerçekleşmiştir (Sarıgün, 2016).

Şekil 4'te verilen grafiklerde sadece 1 numaralı deney koşuluna ait grafiğin kararlı bir davranış göstermediği görülmektedir. Çizelge 4'te 1 numaralı deney için ölçülen maksimum gerilme değeri 290,346 MPa'dır. Deneylerde kullanılan malzemelerin maksimum gerilme değerleri; St52 malzeme için ~500 MPa, Hardoks500 için ~1400 MPa ve kaynak teli için ~900 MPa'dır. Belirtilen 3 malzemenin kaynak ortamında oluşturacağı kompozit yapının gerilme değerinin 290 MPa değerinden yüksek olması beklenen bir durumdur. Bu sebeple 1 numaralı deney koşulu, kaynak bölgesinde yeterli penetrasyonun gerçekleşmemesi sonucu kaynak edilebilirlik açısından olumsuz sonuç vermiştir. Bu durum 180 A ve 26,6 V kaynak parametrelerinin bağlantı için yeterli kaynak enerjisi sağlayamadığını göstermektedir. Tekrarlı deneylerde de (Şekil 5) benzer sonuçların elde edilmesi parametrelerin yetersizliğini doğrulamaktadır. 2 numaralı deneyde ise (180A, 27,2V) deformasyon çizgisinin ITAB bölgesinden (Şekil 6.c) başlayarak St52 (S355) malzemeye doğru ilerlediği görülmektedir. 1 ve 2 numaralı deneyler hariç diğer bütün deneylerde ise deformasyonun kaynak ve ITAB bölgesinin dışında, St52 malzeme bölgesinde ve sünek bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 6.d'de görülen kırılma davranışı 3-9 numaralı deneylerin hepsinde benzer şekilde gerçekleşmiştir. Bu duruma bağlı olarak 180 A deney koşulunda voltaj artışının etkisiyle kabul edilebilir kaynaklı bağlantısı gerçekleşebilmektedir. 190 A ve 200 A deney koşullarında ise belirlenen bütün akım değerlerinde kaynaklı bağlantı emniyetli bir şekilde sağlanabilmiştir.

Çizelge 4'te verilen maksimum çekme gerilmesi değerlerine bakıldığında, St52 bölgesinde gerçekleşen deformasyonlarda değerlerin 480 MPa ile 640 MPa arasında oluştuğu görülmektedir. St52 malzemesinin çekme gerilmesi değerinin 500 MPa olduğu dikkate alındığında, deformasyon oluşan bölgelerde kaynak ısısına bağlı olarak içyapı değişimi gerçekleştiği iddia edilebilir. Kaynak kompozisyonunu oluşturan metallerin yüksek mukavemet değerleri sebebiyle kaynak bölgesine aktarılan yüksek miktarda enerji, kaynak bölgesi dışındaki malzemenin mekanik özelliklerini yaklaşık %20 oranında değiştirebilecek kadar etki oluşturmaktadır.

Gerilme ile kaynak prosesi arasındaki ilişki istatistiksel olarak incelenerek, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar desteklenmiştir. Çekme gerilmesi değerleri (Çizelge 4) ile akım ve voltaj parametreleri arasındaki ilişki korelasyon analizi ile incelenmiştir. Akım ve voltaj parametreleri zaman parametresi ile çarpılarak her bir koşulda kaynak bölgesine aktarılan enerji miktarı belirlenmiş (Çizelge 3) ve korelasyon analizinde enerji miktarı ile çekme gerilmesi değeri arasındaki ilişki niceliksel olarak elde edilmiştir. Eşitlik 2'ye göre enerji ve gerilme arası korelasyon değeri +0,57 olarak bulunmuştur. Elde edilen değer kaynak bölgesine aktarılan enerji ile kaynaklı numunelerin maksimum gerilme değerleri arasında pozitif yönlü bir ilişkinin varlığını göstermektedir. İki değer arasındaki ilişkinin etki oranı ise %57 seviyesindedir. Enerji değişimi ile açıklanamayan %43'lük kısım ise kaynağın yapıldığı ortamdaki hava akımında artış, kaynak sonrası soğuma süresi ve elektrottaki nem oranı gibi faktörlerle açıklanabilir.



Şekil 4. Çekme deneyi sonuçları

Figure 4. Results of tensile test

Çizelge 4. Çekme deneyi ve sertlik ölçüm sonuçları

Table 4. Results of tensile test and hardness measurement

Giriş Parametreleri	Çekme Mukavemeti	Ortalama Sertlik
Akım: 180 A	$\sigma_{çekme}$: 290,346 MPa	370,67 HV
Voltaj: 26,6 V		
Kaynak Enerjisi: 143640 J		
Akım: 180 A	$\sigma_{çekme}$: 591,003 MPa	434 HV
Voltaj: 27,2 V		
Kaynak Enerjisi: 146880 J		
Akım: 180 A	$\sigma_{çekme}$: 613,144 MPa	456,33 HV
Voltaj: 27,8 V		
Kaynak Enerjisi: 150120 J		
Akım: 190 A	$\sigma_{çekme}$: 504,427 MPa	416,08 HV
Voltaj: 26,6 V		
Kaynak Enerjisi: 151620 J		
Akım: 190 A	$\sigma_{çekme}$: 512,216 MPa	443,75 HV
Voltaj: 27,2 V		
Kaynak Enerjisi: 155040 J		
Akım: 190 A	$\sigma_{çekme}$: 531,797 MPa	467,75 HV
Voltaj: 27,8 V		
Kaynak Enerjisi: 158460 J		
Akım: 200 A	$\sigma_{çekme}$: 615,850 MPa	410,58 HV
Voltaj: 26,6 V		
Kaynak Enerjisi: 159600 J		
Akım: 200 A	$\sigma_{çekme}$: 489,630 MPa	430,5 HV
Voltaj: 27,2 V		
Kaynak Enerjisi: 163200 J		
Akım: 200 A	$\sigma_{çekme}$: 637,536 MPa	456,92 HV
Voltaj: 27,8 V		
Kaynak Enerjisi: 166800 J		



Şekil 5. 180 A ve 26,6 V koşullarında tekrarlı deneyler
Figure 5. Repeated experiments at 180 A and 26.6 V conditions



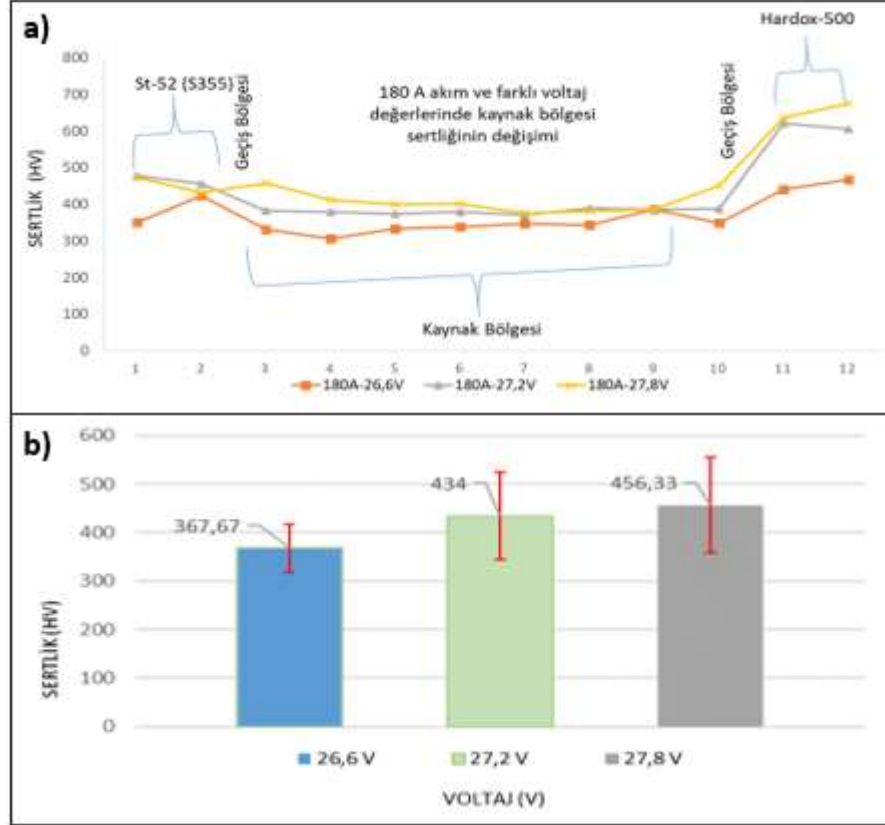
Şekil 6. (a) 200 A ve 27,8 V, (b) 180 A ve 26,6 V, (c) 180 A ve 27,2 V, (d) 180 A ve 27,8 V koşullarında elde edilen numuneler

Figure 6. Specimens obtained under conditions of (a) 200 A ve 27,8 V, (b) 180 A ve 26,6 V, (c) 180 A ve 27,2 V, (d) 180 A ve 27,8 V

Kaynaklı numunelerin mukavemetine etki eden önemli faktörlerden bir diğeri ise sertlik değeridir. 180A,190A,200A akım değeri için farklı voltaj değerlerinde ana malzemeler ve kaynak bölgesinin çekme mukavemeti ve sertlik değerleri Çizelge 4'te, sertlik değerlerinin değişim grafikleri Şekil 7-9'de verilmiştir.

Grafikler sadece üst bölgeden alınan değerlere göre oluşturulmuştur. Diğer bölgelerden elde edilen sonuçlar üst bölge ile benzer nitelik taşıdığı için dikkate alınmamıştır. Sertlik testlerinden elde edilen ölçüm sonuçlarına göre St52 ve Hardoks500 malzemelerinin kaynak bölgesine kıyasla daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. St52 malzeme bölgesinde sertlik değeri ~500 HV, Hardoks500 malzemede ~600 HV ve kaynak bölgesinde ise ~400 HV sertlik değerleri oluşmaktadır. Bu değerlere göre kaynak bölgesinde; Hardoks500'den %25 oranında, St52'den ise %20 oranında daha düşük sertlik oluşmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda kaynak bölgesi sertliğinin ana malzemelere göre daha yüksek

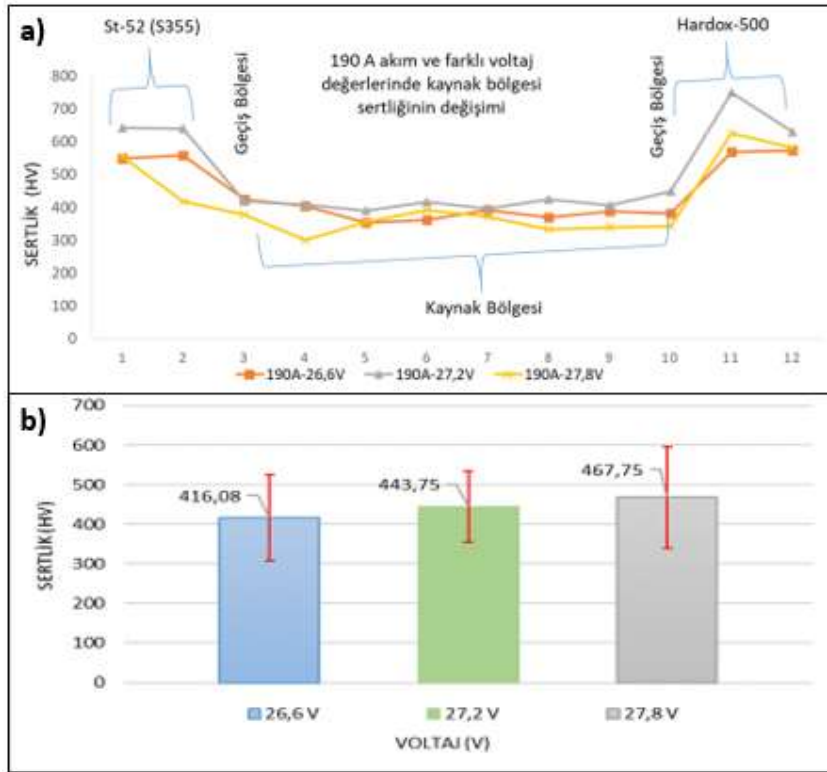
olduğu belirlenmiştir (Bertrand ve diğ., 2019; Fei ve diğ., 2019). Fakat bu çalışmada ana malzemelerin kaynak bağlantısına göre daha yüksek sertlikte olması, kaynak bölgesine yüksek ısı girdisi sebebiyle bölgede tane irileşmesi oluşumu ve bölgenin tokluk değerindeki düşüşle açıklanabilir (Eryürek ve Odabaş, 2007; Kaya, 2010).



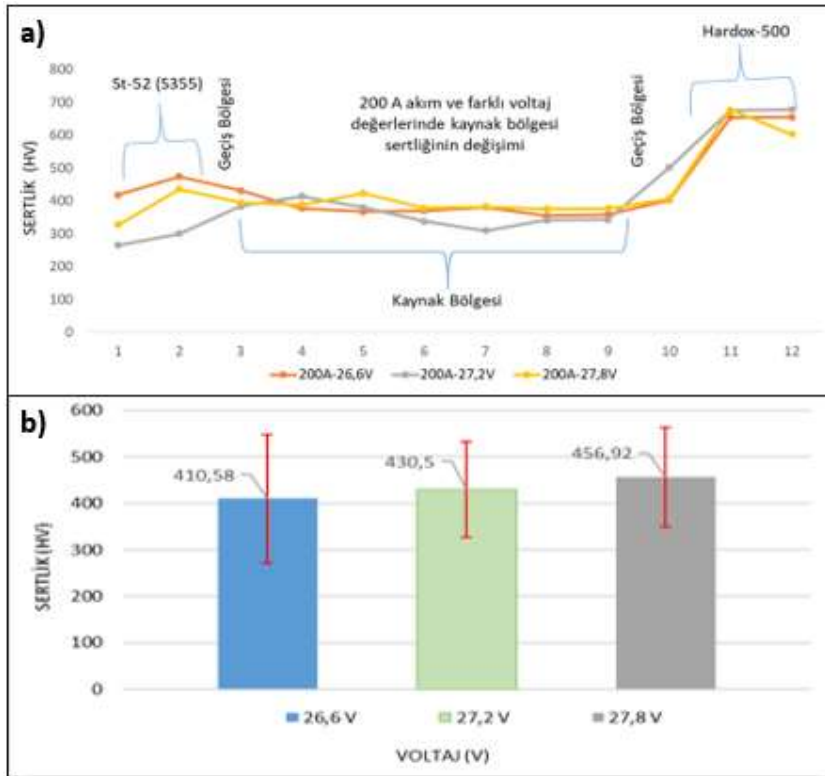
Şekil 7. 180 A akımda kaynak bölgesi için; a) sertlik değişim grafiği, b) ortalama sertlik değerleri

Figure 7. At 180 A current for welding zone; a) hardness variation graph, b) average hardness results

Kaynak bölgesine aktarılan enerji miktarı ile sertlik değeri arasındaki ilişki korelasyon yöntemi ile istatistiksel olarak da analiz edilmiştir. Analizden elde edilen sonuca göre enerji miktarı ile sertlik değeri arasında korelasyon değeri +0,50 olarak bulunmuştur. Bu durum enerji girdisi değişimi ile sertlik değerindeki değişim arasında %50 oranında bir anlamlılık olduğunu ve aralarında pozitif yönlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Açıklanamayan %50'lik kısım ise soğuma hızı ve malzemelerin ısı iletim kabiliyetiyle ilişkilendirilebilir.



Şekil 8. 190 A akımda kaynak bölgesi için; a) sertlik değişim grafiği, b) ortalama sertlik değerleri
Figure 8. At 190 A current for welding zone; a) hardness variation graph, b) average hardness results



Şekil 9. 200 A akımda kaynak bölgesi için; a) sertlik değişim grafiği, b) ortalama sertlik değerleri
Figure 9. At 200 A current for welding zone; a) hardness variation graph, b) average hardness results

Akım ve voltaj parametrelerinin gerilme ve sertlik parametreleri üzerindeki etki oranlarının sayısal olarak analiz edilebilmesi için ANOVA testi yapılmıştır. Gerilme parametresi için ANOVA sonuçları Çizelge 5’de verilmiştir. Çizelge 5’e göre kaynak bölgesinin gerilme değerindeki değişimin, akım ve voltaj parametreleri ile %95,01 ($R-Sq$ (adj)) oranında açıklanabildiği belirlenmiştir. Gerilme parametresi üzerindeki etkili parametrenin voltaj (%59,68) olduğu, akımın (%7,56) ise düşük oranda etkisi olduğu görülmektedir. Sertlik değeri için akım ve voltaj parametrelerinin etki oranları Çizelge 6’da verilen ANOVA sonuçları ile değerlendirilmiştir. Çizelge 6’ya göre akım ve voltaj parametrelerinin sertlik değişimini açıklayabilme oranı %89,61($R-Sq$ (adj)) olarak belirlenmiştir. Kaynak bölgesi sertliği üzerinde etkili parametrenin voltaj olduğu (%79), akımın (%3,20) ise düşük oranda etkisi olduğu görülmektedir. Akım ve voltaj parametreleri kıyaslandığında, akımın etkin bir şekilde hissedilmesi voltaj değerinin yüksekliğine bağlıdır. Bu sebeple voltaj arttıkça daha fazla akım kaynak bölgesine transfer edilerek kaynak enerjisi arttırılmıştır. Bu duruma bağlı olarak voltaj değişiminin gerilme ve sertlik değişimi üzerinde yüksek etki göstermesi beklenen bir durumdur. Çizelge 5-6’da verilen diğer bir parametre de üstel etki oranlarıdır. Üstel etki, ilgili parametrenin değişimine bağlı olarak ortaya çıkan ve ikinci dereceden denklemlerle ifade edilebilen davranış oranını açıklamaktadır. Hem doğrusal hem de üstel etkinin yüksek değerlerde olması kararsızlık davranışının yüksek olması ile ilişkilendirilebilir. Bu sebeple anlamlı bir deney tasarımında doğrusal veya üstel etkiden herhangi birinin yüksek oranda çıkması beklenir. Çizelge 5 incelendiğinde, akım² parametresinin gerilme değişimi üzerinde %11,93 oranında, voltaj² parametresinin ise %13,32 oranında etkili olduğu görülmektedir. Bu değerlere bağlı olarak, voltaj parametresinin gerilme değişimi üzerinde doğrusal etkisinin yüksek olduğu, fakat akım parametresinin değişimi ile gerilme değerlerinin bazen doğrusal bazen ikinci dereceden değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Benzer durum Çizelge 6’da verilen sertlik değerleri içinde geçerlidir. Bu sonuca bağlı olarak, kaynak parametrelerinin ayarlanmasında sabit akım değişken voltaj ile oluşturulan çalışma koşullarında daha kararlı kaynak işlemi yapılabileceği görülmektedir. Çizelge 5-6’da verilen akım-voltaj etkileşiminin etki oranları gerilme değişimi için %5,62, sertlik değişimi için %5,44 değerlerindedir. Akım ve voltaj parametreleri bağımsız fiziksel büyüklükler olmaları sebebiyle etkileşimleri düşük etki göstermektedir.

Çizelge 5. Gerilme parametresi için ANOVA sonuçları

Table 5. ANOVA results for stress parameter

	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Oranı ($\alpha = \%5$)	P	Etki Oranı (%)
Model	5	133526	26705,2	31,48	0,009	98,13
Lineer	2	91512	45755,9	53,94	0,004	67,25
Akım	1	10294	10293,9	12,13	0,040	7,56
Voltaj	1	81218	81217,9	95,74	0,002	59,68
Üstel Etki (2)	2	34368	17183,8	20,26	0,018	25,25
Akım*Akım	1	16238	16237,8	19,14	0,022	11,93
Voltaj*Voltaj	1	18130	18129,8	21,37	0,019	13,32
Etkileşim	1	7647	7646,8	9,01	0,058	5,62
Akım*Voltaj	1	7647	7646,8	9,01	0,058	5,62
Hata	3	2545	848,3			1,87
Toplam	8	136071				100
Anlamlılık		$R-sq = \% 98,13$		$R-sq$ (adj)= % 95,01		

Çizelge 6. Sertlik parametresi için ANOVA sonuçları

Table 6. ANOVA results for hardness parameter

	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Oranı ($\alpha = \%5$)	P	Etki Oranı (%)
Model	5	6831,78	1366,36	14,80	0,025	96,10
Lineer	2	5850,61	2925,31	31,69	0,010	82,30
Akım	1	228,17	228,17	2,47	0,214	3,20
Voltaj	1	5622,44	5622,44	60,90	0,004	79
Üstel Etki (²)	2	594,65	297,32	3,22	0,179	8,36
Akım*Akım	1	513,71	513,71	5,56	0,099	7,23
Voltaj*Voltaj	1	80,94	80,94	0,88	0,418	1,14
Etkileşim	1	386,52	386,52	4,19	0,133	5,44
Akım*Voltaj	1	386,52	386,52	4,19	0,133	5,44
Hata	3	276,96	92,32			3,89
Toplam	8	7108,74				
Anlamlılık	R-sq = % 96,10			R-sq (adj)= % 89,61		

Gerçekleştirilen analizlerle akım-voltaj-kaynak enerjisi ile gerilme ve sertlik arasındaki ilişki nicel olarak belirlenmiştir. Ayrıca, kaynak işlemi sonrası maksimum gerilme ve sertlik değerlerini verecek akım ve voltaj değerlerinin belirlenmesi optimizasyon çalışması ile mümkündür. Çalışma kapsamında Taguchi optimizasyon yaklaşımı kullanılarak optimum akım ve voltaj değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Taguchi'nin S/N oranı değerlerine göre maksimum gerilme ve sertlik sağlayan optimum akım değeri 200A, optimum voltaj değeri ise 27,8 V'dir (Şekil 10). Kaynaklı numunelerin deformasyon davranışları açısından durum kıyaslandığında ise, 1 ve 2 numaralı deney hariç bütün deney koşulları optimum nokta ile benzer deformasyon davranışı göstermiştir. Bu sebeple, her ne kadar optimum değerler 200 A ve 27,8V olsa da, 3-8 numaralı deney koşulları da optimuma eşdeğer şartlar olarak nitelendirilebilir.

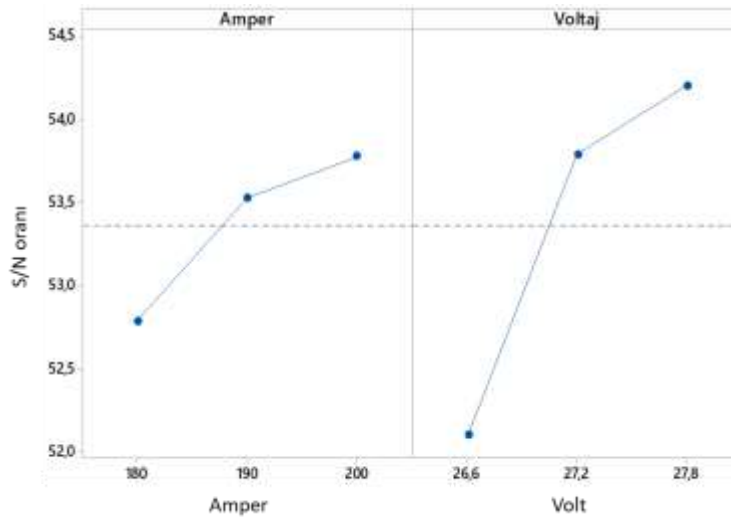
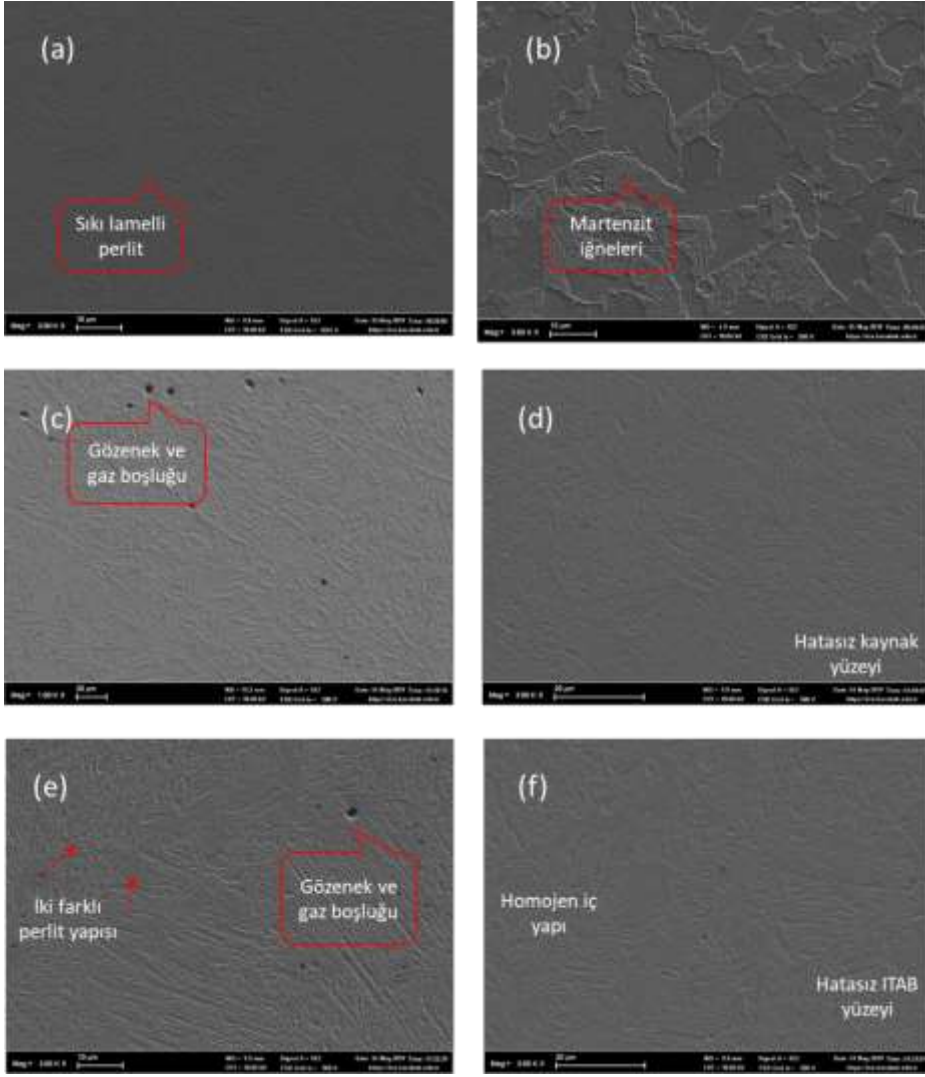
**Şekil 10.** S/N oranları

Figure 10. S/N ratios

Deney sonuçlarının görsel analizi için kaynak bağlantılarının içyapısı OM ve SEM görüntüleri ile analiz edilmiştir. Görüntüler baz malzemeler, kaynak bölgesi ve geçiş bölgesi (ITAB) olmak üzere 3 farklı noktadan alınmıştır. En başarısız (180A- 26,6V) ve en başarılı (200A-27,8V) deney koşulları için elde edilen mikro yapı görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11'e göre St52 malzemenin içyapısında sıkı lamelli perlit fazı (Şekil 11.a), Hardoks500 malzemesinde ise martenzit fazı (Şekil 11.b) görülmektedir. Martenzit

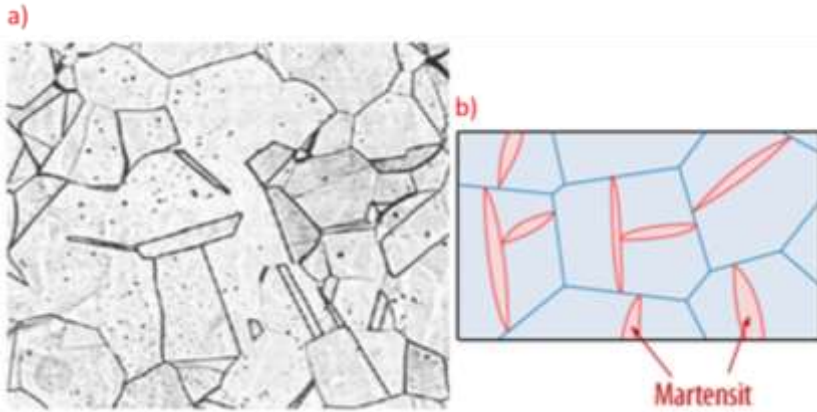
fazı literatür referans alınarak belirlenmiştir (Kaçar ve diğerleri, 2018). Fazın şekli ve oluşumuna ilişkin görseller Şekil 12'de verilmiştir (Çetin, 2019; Küçükyıldırım, 2019). Kaynak bağlantısının başarısız olduğu deney koşulunda (1 numaralı deney) gözenek oluşmuş (Şekil 11.c), kaynağın optimum şartlarda gerçekleştirildiği koşulda (9 numaralı deney) ise kaynak bağlantısında yüzey kusuru görülmemiştir (Şekil 11.d). Şekil 11.c'de görülen gözenekler, Şekil 6.b'de resmi verilen numunenin kaynak bölgesinde oluşan deformasyonu açıklamaktadır. Yetersiz kaynak enerjisine bağlı olarak penetrasyonun yeterli oranda gerçekleşmemesi sebebiyle oluşan gözenekler ve gaz boşlukları, çekme deneyi esnasında deformasyonun kaynak bölgesinde oluşmasına sebebiyet vermiş ve çekme eğrisi de kararlı bir davranış gösterememiştir. 1 numaralı deney koşulu hariç diğer deney şartlarında gözeneklilik kusuru görülmemiştir. 1 ve 9 numaralı deney koşullarında oluşan ITAB bölgeleri incelendiğinde, Şekil 11.e'de 1 numaralı deney koşulunda 2 farklı fazın oluştuğu, Şekil 11.f'de 9 numaralı deney koşulunda ise homojen bir içyapının oluştuğu görülmektedir. 2 farklı fazın oluşumu, kaynak bölgesine enerji girişi yetersizliği nedeniyle oluşan dengesiz ısı dağılımı ile açıklanabilir. 1 numaralı deney koşulu hariç diğer deney şartlarında ITAB'da homojen ve kusursuz bir içyapının oluştuğu gözlenmiştir.

1 ve 9 numaralı deney koşulları için elde edilen OM görüntüleri, St52 ile Hardoks500'ün kaynak edilebilirliği hakkında SEM görüntülerini destekler nitelikte bilgi vermektedir (Şekil 13-Şekil 14). Şekil 13.a'da 1 numaralı deney koşulu için kaynak bölgesinden St52 malzemeye geçiş bölgesi, Şekil 13.b'de ise 1 numaralı deney koşulu için kaynak bölgesinden Hardoks500 malzemeye geçiş bölgesi görülmektedir. Şekil 14.a'da 9 numaralı deney koşulu için kaynak bölgesinden St52 malzemeye geçiş bölgesi, Şekil 14.b'de ise 9 numaralı deney koşulu için kaynak bölgesinden Hardoks500 malzemeye geçiş bölgesi görülmektedir. Hardoks500 malzeme yüksek mukavemete sahip olduğu için her iki şekilde de belirgin geçiş çizgisi görülmektedir. Fakat Şekil 14.b'deki geçiş çizgisi Şekil 13.b'ye göre daha belirgin ve düzgün bir geometriye sahiptir. St52 malzemeye ait geçiş çizgisi Şekil 13.a'da düzensiz yapıda iken, Şekil 14.a'da belirgin ve düzgün bir geometriye sahiptir. Elde edilen sonuçlar kaynak bölgesine enerji girişi artışına bağlı olarak kararlı bir kaynak işleminin gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Hardoks500 malzemenin her iki deney koşulunda da belirgin kaynak geçiş çizgisi oluşturması, Hardoks500 malzemenin kimyasal bileşiminde bulunan %0,78 Si, %0,22 Ni ve %0,26 Mo elementlerinin varlığı ile açıklanabilir. Si elementi oksidasyonu engelleyerek kaynağın kararlı bir davranış göstermesini sağlamıştır. Ni ve Mo elementleri ise malzemenin tane boyutunu küçülterek kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini iyileştirmektedir (Vural ve diğ., 2003).



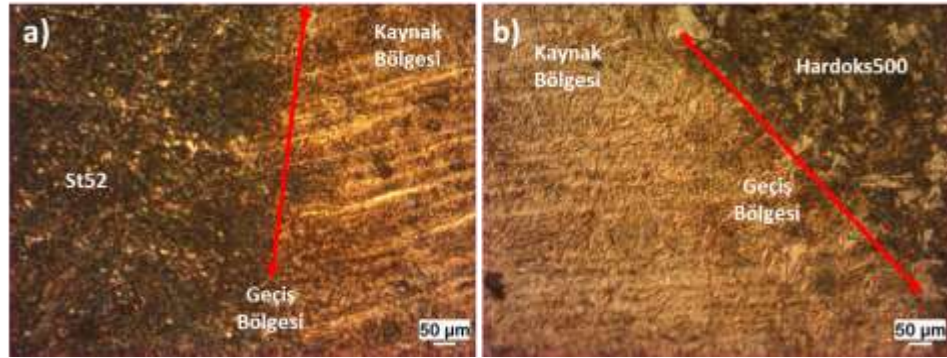
Şekil 11. SEM görüntüleri: (a) St52 baz malzeme, (b) Hardox500 baz malzeme, (c) 180 A, 26,6 V kaynak bölgesi, (d) 200 A, 27,8 V kaynak bölgesi, (e) 180 A, 26,6 V ITAB bölgesi, (f) 200 A, 27,8 V ITAB bölgesi.

Figure 11. SEM images of (a) St52 base material, (b) Hardox500 base material, (c) 180 A, 26,6 V welding zone, (d) 200 A, 27,8 V welding zone, (e) 180 A, 26,6 V ITAB, (f) 200 A, 27,8 V ITAB.



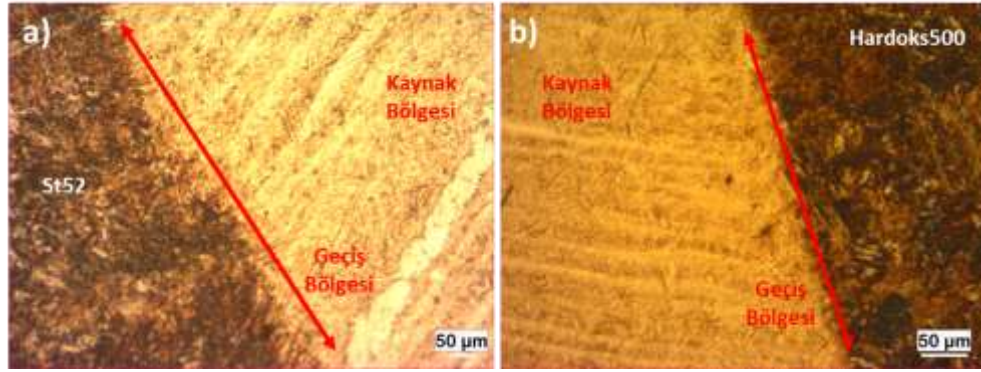
Şekil 12. a) Martenzit fazının şekli ve b) fazın oluşumu (Çetin, 2019; Küçükıldırım, 2019)

Figure 12.a) Shape of martensite phase and b) formation of phase



Şekil 13. 180 A ve 26,6 V koşulları için OM'den elde edilengeçiş bölgesi görüntüleri; (a) St52 ile kaynak bölgesi, (b) Hardoks500 ile kaynak bölgesi

Figure 13. Transition zone images obtained from OM for conditions of 180 A and 26,6 V; (a) Welding zone with St52, (b) Welding zone with Hardox500



Şekil 14. 200 A ve 27,8 V koşulları için OM'den elde edilen geçiş bölgesi görüntüleri; (a) St52 ile kaynak bölgesi (b) Hardoks500 ile kaynak bölgesi

Figure 14. Transition zone images obtained from OM for conditions of 200 A and 27,8 V; (a) Welding zone with St52, (b) Welding zone with Hardox500

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada yüksek mukavemet ve aşınma direncine sahip Hardoks500 malzeme ile genel makine imalatında kullanılan St52 (S355) malzemenin GMAK yöntemi ile kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Farklı akım ve voltaj parametrelerinde tam faktöriyel tasarıma göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Kaynaklanan numunelerin birleşme kabiliyeti çekme deneyleri ve sertlik ölçüm testleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Deney sonuçları istatistiki olarak analiz edilmiş ve SEM-OM görüntüleri ile nicel analiz sonuçları doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

1. En iyi sonuçların elde edildiği kaynak parametreleri 200 A ve 27,8 V'dir.
2. 180 A - 27,8 V altı değerlerde kararlı bir kaynak yapısı elde edilememiştir. 180 A - 26,6 V koşullarında elde edilen kaynaklı bölgenin iç yapısında gözeneklilik kusurları olduğu görülmüş ve çekme deneyinde deformasyon kaynak bölgesinde gerçekleşmiştir.
3. Akım ve voltaj değerlerine bağlı olarak hesaplanan kaynak enerjisi ile kaynaklı numunelerin maksimum çekme gerilmesi ve sertlik değerleri arasında sırasıyla +0,57 ve +0,50 oranlarında pozitif yönlü korelasyon ilişkisi bulunmaktadır.
4. ANOVA sonuçlarına göre; gerilme parametresi üzerinde voltaj parametresinin %59,68, akım parametresinin ise %7,56 oranında etkili olduğu, sertlik parametresi üzerinde ise voltaj parametresinin %79, akım parametresinin ise %3,20 oranında etkili olduğu belirlenmiştir.
5. Kaynak parametrelerinin ayarlanmasında, sabit akım değişken voltaj ile oluşturulan çalışma koşullarında daha kararlı kaynak işlemi yapılabileceği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

- Abioye, T. E., Ariwoola, O. E., Ogedengbe, T. I., Farayibi, P. K. ve Gbadeyan, O. O. (2019). Effects of Welding Speed on the Microstructure and Corrosion Behavior of Dissimilar Gas Metal Arc Weld Joints of AISI 304 Stainless Steel and Low Carbon Steel. *Materials Today: Proceedings*, 17, 871–877. doi:10.1016/j.matpr.2019.06.383
- Bertrand, R., Robe, H., Texier, D., Zedan, Y., Feulvarch, E. ve Bocher, P. (2019). Analysis of AA2XXX/AA7XXX friction stir welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 271(November 2018), 312–324. doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.03.027
- Brezová, E., Mäsiar, * -Harold ve Radič, -Pavol. (2014). Welding of High Strength Materials Used in the Manufacture of Special Equipment. *University Review*, 8(4), 51–61.
- Çam, G., Erim, S., Yeni, C. , ve Koçak, M. (1999). Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 78(6).
- Çam, G., Yeni, Ç., Erim, S., Ventzke, V. ve Koçak, M. (1998). Investigation into properties of laser welded similar and dissimilar steel joints. *Science and Technology of Welding and Joining*, 3(4), 177–189. doi:10.1179/stw.1998.3.4.177
- Çetin, A. (2019). Martensit dönüşümünün mikroskobik ölçekteki işleyişi. <https://muhendishane.org/kutuphane/malzeme-biliminin-fiziksel-temelleri/martensit-donusumunun-mikroskobik-olcekteki-isleyisi/> adresinden erişildi.
- Çetin, M. H., Korkmaz, Ş., ELGADDAFI, K. A. B. ve Çuğ, H. (2018). Östenitik Paslanmaz Çelik ile Düşük Karbonlu Çeliğin Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 1068–1081.
- Dudziński, W., Konat, Ł. ve Pękalski, G. (2008). Structural and strength characteristics of wear-resistant martensitic steels. *Archives of Foundry Engineering*, 8(2), 21–26. <http://www.afe.polsl.pl/index.php/en/404/structural-and-strength-characteristics-of-wear-resistant-martensitic-steels.pdf> adresinden erişildi.
- Emre, H. E., Kaçar, R., Bülbül, A. ve Manisalı, B. (2017). AISI 316L-AISI 2205 Farklı Paslanmaz Çelik Çiftinin Kaynak Kabiliyeti. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 244–256.
- Eryürek, B. ve Odabaş, C. (2007). Çelikler İçin Örtülü Elektrot Seçimi, Gazaltı Kaynağı, Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı (ss. 109–113). İstanbul: Askaynak Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticareti A.Ş. Yayını.
- Fei, Z., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Van Duin, S. ve Yu, Z. (2019). Microstructural characterization and mechanical properties of K-TIG welded SAF2205/AISI316L dissimilar joint. *Journal of Manufacturing Processes*, 45(July), 340–355. doi:10.1016/j.jmapro.2019.07.017
- Kaçar, R., Emre, H. E., İşineri, A. Ü. ve Najafiharehtapeh, A. (2018). Effects of welding methods on the mechanical properties of joining dissimilar steel couple. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 255–265. doi:10.17341/gazimmfd.406797
- Kaya, Y. (2010). An Investigation on Joinability of the AISI 304 and AISI 430 Stainless Steel by TIG, MIG and Shielded Metal Arc Welding Methods. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25(3), 549–557.
- Konat, Ł., Pękalski, G. ve Oskwarek, M. (2006). Macro and Microstructural Properties of Welded Joints of Hardox 400 and Hardox 500 Steels. In *XIX Scientific Conference "Development Problems of Working Machines"* içinde (ss. 15–27).
- Konat, Ł. (2019). Structural aspects of execution and thermal treatment of welded joints of hardox extreme steel. *Metals*, 9(9). doi:10.3390/met9090915
- Konat, Ł., Białobrzaska, B. ve Bialek, P. (2017). Effect of welding process on microstructural and mechanical characteristics of Hardox 600 steel. *Metals*, 7(9). doi:10.3390/met7090349
- Küçükyıldırım, B. O. (2019). *Mikro Yapı İncelemeleri Numune Hazırlama*.
- Nalbant, M., Gökkaya, H. ve Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials and Design*, 28(4), 1379–1385.

doi:10.1016/j.matdes.2006.01.008

- Nie, F., Dong, H., Chen, S., Li, P., Wang, L., Zhao, Z., ... Zhang, H. (2018). Microstructure and Mechanical Properties of Pulse MIG Welded 6061/A356 Aluminum Alloy Dissimilar Butt Joints. *Journal of Materials Science and Technology*, 34(3), 551–560. doi:10.1016/j.jmst.2016.11.004
- Okay, T., Najafgharehtapeh, A., Ertek Emre, H. ve Kaçar, R. (2015). S235JR – HARDOKS400 Çelik Çiftinin Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması. 2. *Uluslar arası Demir Çelik Sempozyumu* içinde . Karabük.
- Özen, M., Emre, H. E., Najafgharehtapeh, A. ve Kaçar, R. (2016). HARDOKS400 Çeliklerin Elektrik Ark Kaynak Kabiliyeti, (November).
- Sarıgün, C. (2016). Hardox - Aşınma Direnciyle Öne Çıkan Özel Bir Çelik. 31 Ekim 2019 tarihinde <https://malzemebilimi.net/hardox-asinma-direnciyle-one-cikan-ozel-bir-celik.html> adresinden erişildi.
- Sharma, P. ve Dwivedi, D. K. (2019). A-TIG welding of dissimilar P92 steel and 304H austenitic stainless steel: Mechanisms, microstructure and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 44(January), 166–178. doi:10.1016/j.jmapro.2019.06.003
- Vijay, S., Rajanarayanan, S. ve Ganeshan, G. N. (2019). Analysis on mechanical properties of gas tungsten arc welded dissimilar aluminium alloy (Al2024 & Al6063). *Materials Today: Proceedings*, (xxxx). doi:10.1016/j.matpr.2019.06.136
- Vural, M., Piroğlu, F., Çağlayan, Ö. ve Uzgider, E. (2003). Yapı Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği. *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 47–51.
- Wang, X., Mao, S., Chen, P., Liu, Y., Ning, J., Li, H., ... Han, X. (2016). Evolution of microstructure and mechanical properties of a dissimilar aluminium alloy weldment. *Materials and Design*, 90, 230–237. doi:10.1016/j.matdes.2015.10.134
- Yılmaz, T. (2010). *Masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen Hardox 400 çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri*. Sakarya Üniversitesi.



KALSİNASYONUN MG-FE HİDROTALSİT (FEHT) ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

¹Taha BOYRAZ , ²Tuğba TÜRK , ³İbrahim ALP

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE
¹tahaboyraz@ktu.edu.tr, ²tugbayilmaz@ktu.edu.tr, ³ialp@ktu.edu.tr

(Geliş/Received: 24.05.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.11.2019)

ÖZ: Adsorpsiyon, sularda bulunan kirleticilerin giderilmesinde etkili ve basit bir tekniktir. Bu çalışmada sularda bulunan kirletici anyonların giderilmesinde kullanılmak üzere yüksek yüzey alanlı özgün bir adsorbent geliştirilmesi ve karakterizasyonunun yapılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda çift tabakalı hidroksit olarak da bilinen Fe-Hidrotalsitin kalsinasyonu incelenmiştir. FeHT ve K-FeHT numuneleri; X-ışını difraktogramı (XRD), termal gravimetrik analiz (TGA), diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), taramalı elektron mikroskopu (SEM), tane boyut analizi ve Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey alan ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Kalsine FeHT'nin özgül yüzey alanının kalsinasyon sıcaklığı ve süresinden etkilendiği gözlemlenmiştir. Kalsinasyon sonucunda tabakalar arasındaki H₂O, OH ve CO₂ içeriklerinin kaybolarak periklaz yapılarının oluştuğu belirlenmiştir. Optimum kalsinasyon şartlarında FeHT'nin yüzey alanı yaklaşık iki kat artırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fe-Hidrotalsit (FeHT), Kalsinasyon, Karakterizasyon

Investigation of the effect of Calcination on Mg-Fe Hydrotalcite (FeHT)

ABSTRACT: Adsorption is an effective and simple technique for removing contaminants in water. The development and characterization of the novel adsorbent with high surface area, which is effective for removal of arsenic from water, was targeted. For this purpose, calcination conditions on the structure of FeHT, known as LDH was investigated. Fe-Hydrotalcite (FeHT) and calcined Fe-Hydrotalcite (K-FeHT) were characterized by X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TGA), differential scanning calorimeter (DSC), scanning electron microscopy (SEM), particle size analysis and Brunauer-Emmett-Teller (BET) specific surface area analysis. It was observed that the specific surface area of K-FeHT significantly affected by the calcination temperature and time. As a result of the calcination, H₂O, OH and CO₂ contents between the layers were disappeared, and pericase structures was formed. The surface area was approximately doubled at optimum calcination conditions.

Key Words: Fe-Hydrotalcite (FeHT), Calcination, Characterization.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çift tabakalı hidroksitler (ÇTH) olarak bilinen anyonik killer arsenik başta olmak üzere sularda bulunan kirletici anyonların giderimi için kullanılmaktadır. Çift tabakalı hidroksitler doğal olarak oluşabildikleri gibi basit ve ekonomik olarak da sentezlenebilmektedirler (Bruna ve diğ., 2006). Hidrotalsit gibi çift tabakalı hidroksitler düşük maliyet, mükemmel adsorpsiyon kapasitesi gibi özelliklerinden dolayı adsorpsiyon ve iyon değişim proseslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Yang ve diğ., 2015). ÇTH'nin genel formülü $[M_{1-x}^{+2} M_x^{+3}(OH)_2]^{+x} A_{x/m}^{-m} \cdot nH_2O$ olarak ifade edilmektedir. M⁺² ve M⁺³ sırasıyla 2 ve 3 değerlikli olan katyonu temsil etmektedir. M⁺³/(M⁺²+M⁺³) molar oranı X değerine eşit olup 0,2 ve 0,33

arasında değerler almaktadır (Yang ve diğ., 2006). A ile iç tabaka bölgesindeki m değerlikli anyon gösterilmektedir. M^{+2} ve M^{+3} iyonları benzer iyon çaplarına sahiptirler (Seron ve Delorme, 2008). M^{+2}/M^{+3} oranı ile ÇTH'nin anyon değiştirme kapasitesi kontrol edilebilmektedir (Ferreria ve diğ., 2004). 2 ve 3 değerlikli katyon olarak sırasıyla Mg ve Al kullanıldığında genel formülü $[Mg_6Al_2^{+3}(CO_3)(OH)_{16}.4H_2O]$ olan hidrotalsit üretilmektedir (Seida ve Nakano, 2000). Hidrotalsit, yapısına farklı iyonlar ilave edilerek modifiye edilebilmektedir (Palmer ve diğ., 2008). ÇTH sentezlenmesinde birlikte çöktürme, üre hidroliz ve hidrotermal yöntemler kullanılmaktadır. Birlikte çöktürme yöntemi en basit ve en yaygın üretim yöntemi olarak dikkat çekmektedir (Yang ve diğ., 2006). Bu teknikte genellikle iki farklı metal tuzu, CO_2 'den arındırılmış suya eklenmekte ve şiddetli bir şekilde karıştırılmaktadır. Karışım pH'ı 9-10 arasında tutularak birlikte çökme işleminin olması sağlanmaktadır (Nalawade ve Hirlekar, 2009).

ÇTH ile oksianyonların uzaklaştırılmasını etkileyen en önemli parametrelerden birisi ÇTH'nin kalsinasyonudur (Yang ve diğ., 2005). 100 °C'de bünyesinde fiziksel olarak soğurulan suyun, 140-260 °C'de ara katmanda bulunan su moleküllerinin, 260-500 °C arasında ise yapısından karbonatların ve hidroksitlerin uzaklaştığı bilinmektedir. 700 °C ve üzeri sıcaklıklarda kalsinasyon yapıldığında ise ÇTH'nin yapısı tamamen bozulmakta ve tekrar kullanılamamaktadır. 1000 °C civarında ise kalıcı spinel olarak ifade edilen MgO ve $MgAl_2O_4$ karışımı oluşmaktadır (Auxilio ve diğ., 2009).

Kalsine ÇTH, sulu ortamda rehidrasyona uğrar ve kalsinasyon sırasında bozulan hidroksit yapısı tekrar oluşur. Bu işlem memory effect olarak adlandırılır (Cheitia ve diğ., 2012). ÇTH'nin kalsine edilmesi sonucunda daha büyük yüzey alanı, daha küçük kristal boyutu ve *memory effect* yapısı gibi olumlu gelişmeler meydana gelmektedir (Yi ve diğ., 2011).

Bu çalışmada; yüksek yüzey alanlı bir adsorbentin geliştirilmesi ve karakterizasyonu hedeflenmiştir. Bu amaçla çift tabakalı hidroksit (ÇTH) olarak bilinen ve BET yüzey alanı 97,2 m²/g olan FeHT'nin yapısı üzerine kalsinasyon şartlarının etkisi araştırılmıştır.

MATERYAL VE METHOD (MATERIAL AND METHOD)

Karakterizasyon Çalışmaları (Characterization Studies)

Adsorbentin mineralojik bileşimi, X-Işını Difraktometresi (XRD) ile Rigaku marka SmartLab model cihazda incelenmiştir. X ışınları Spektroskopisi analizleri; toz numunenin, 4^o-70^o tarama aralığında dakikada 1,176^o taranacak şekilde gerçekleştirilmiştir. BET yüzey alanı ise Quantachrome® marka ASiQwin™ model cihaz ile ölçülmüştür. Analiz işleminde degaz sıcaklığı 105°C ve degaz süresi 8 saat olarak belirlenmiştir. Adsorbent seçiminde en önemli parametrelerden biri olan spesifik yüzey alanları m²/g olarak belirlenmiştir. Adsorbentlerin kalsinasyon işlemi öncesinde termal özelliklerini incelemek amacıyla termal gravimetrik analizi (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ölçümleri Linseis marka STA PT 1600 model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Literatür incelendiğinde ÇTH'lerin azot (Wang ve diğ., 2005; Thesis ve diğ., 2013), argon (Mahjoubi ve diğ., 2017) ve hava (Lins ve diğ., 2018) gibi gazlar kullanılarak 2,5 °C/dk (Thesis ve diğ., 2013), 10 °C/dk (Lins ve diğ., 2018) ve 20 °C/dk (Wang ve diğ., 2005) hızlarında termal karakteristiğinin araştırıldığı görülmektedir. Numunelerin TGA ve DSC grafikleri, kalsinasyon ortamının hava olması ve malzemenin içerisinde havadaki oksijen ile reaksiyona girecek bir yapının bulunmaması nedeniyle atmosferik hava ortamında 2 °C/dk hızla 1200 °C sıcaklığa kadar elde edilmiştir. Analiz hızı, eğri çözünürlüklerinin daha iyi olması ve dönüm noktalarının daha net tespit edilebilmesi için 2 °C/dk olarak seçilmiştir. Bu analizler sonucunda adsorbentlerin kalsinasyon işlemindeki ağırlık kayıpları ve termal karakteristiği belirlenmiştir. Kalsinasyon sonrası elde edilen malzemenin tane boyut dağılımının belirlenmesi için Malvern marka Master Sizer 2000 model cihaz ile tane boyut dağılım analizi yapılmıştır. Adsorbentlerin elektron mikroskopisi yardımıyla morfolojik özellikleri belirlenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) incelemeleri için numuneler önce toz haline getirilmiş ve çok ince (yaklaşık 3 Å/saniye) iletken malzemeyle (Au) kaplanarak incelenebilir hale getirilmiştir. Hazırlık basamaklarından geçtikten sonra numune elektron mikroskopunda incelenmeye hazır hale gelmiştir. Vakum süresi olarak 30 dakika seçilmiştir. Vakum süresi tamamlandıktan sonra numunenin yüzey görüntüsü alınmıştır. Son olarak adsorbentlerin sıfır yük noktasının tayini, sahip

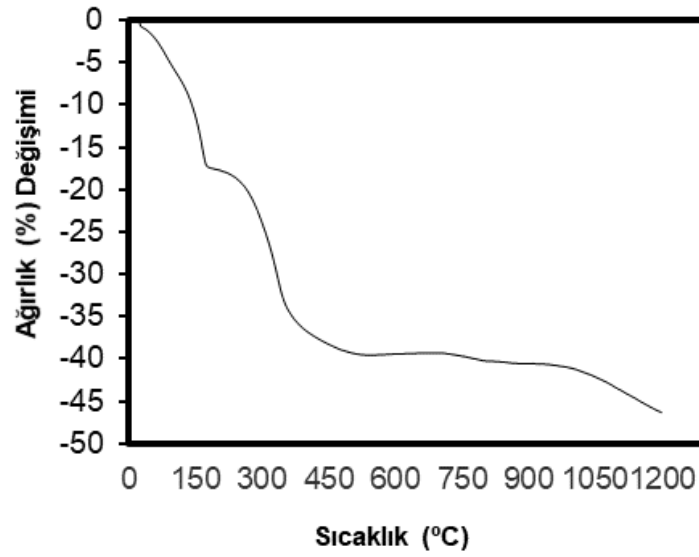
oldukları yüzey yüklerinin metal iyonu giderimi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Malzemenin pH_{syn} değeri, Pecenyuk (1999) tarafından kullanılan yöntemle gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem için farklı pH 'larda 0,1 M derişime sahip NaCl çözeltileri hazırlanmıştır. Çözeltilerin hazırlanmasında kullanılan saf su çözünmüş CO_2 'yi uzaklaştırmak için kaynatılmıştır. pH ayarlamak için 0,1 M HCl ve 0,5 M NaOH kullanılmıştır. 100 mg adsorbent 20 mL hacimli farklı pH 'lardaki 0,1 M'lık NaCl çözeltilerine ilave edilmiştir. 50 mL hacimli, erlen meyerler 48 saat oda sıcaklığında çalkalanmış ve adsorbentın dibe çökmesi için bekletilmiştir. Ve son pH ölçülmüştür. NaCl çözeltisinin pH 'sının adsorbentle temasından sonra hiç değışmediğı nokta olan pH_{syn} belirlenmiştir.

Kalsinasyon Çalışmaları (Calcination Studies)

Kalsinasyon çalışmaları, Protherm marka PAF 11016 model fırın kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalsinasyon işlemi izotermal şartlar altında yapılmıştır. Numuneler önceden istenilen sıcaklığa getirilmiş fırına doğrudan konulmuş ve işlem sonunda soğuması beklenmeden doğrudan dışarıya alınmıştır. Kalsinasyon sıcaklığını ve süresini belirlemek amacıyla optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu bölümde kalsinasyon sıcaklığı ve süresinin, numunenin ağırlık kaybı ve yüzey alanı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Öncelikli olarak kalsinasyon süresi 3 saat seçilerek farklı sıcaklıklarda (250-700 °C arasında) kalsinasyon yapılmıştır. Spesifik yüzey alanı ölçümleri yapılmış ve en yüksek yüzey alanı ölçümünün yapıldığı kalsinasyon sıcaklığı belirlenmiştir. Sıcaklık belirlendikten sonra farklı sürelerde (30-270 dakika arasında) kalsinasyon yapılmıştır. Yapılan bu testler sonucunda en yüksek yüzey alanı değerinin (m^2/gr) elde edildiğı kalsinasyon sıcaklığı ve süresi belirlenerek optimizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Gerçekleştirilen tüm deneylerden sonra numuneler 2 saat desikatörde bekletilmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA (FINDINGS and DISCUSSIONS)

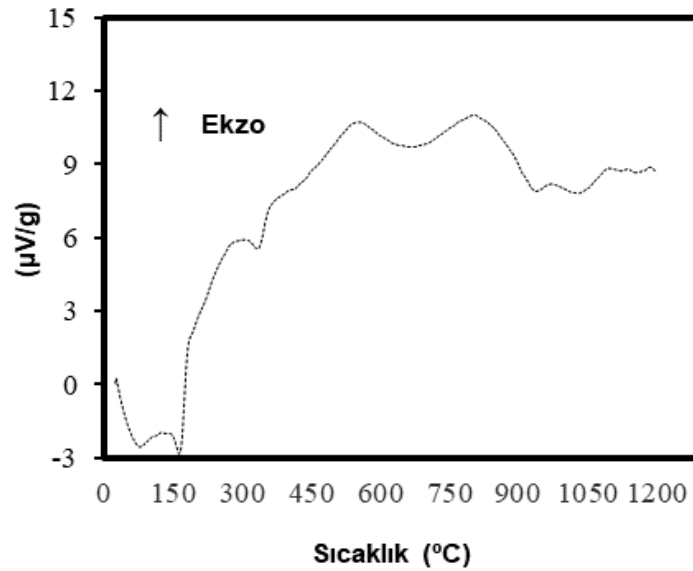
Kalsinasyon çalışmalarında kullanılan FeHT, birlikte çöktürme yöntemi ile elde edilmiştir (Türk ve diğ., 2016). FeHT'nin BET yüzey alanı $97,2 m^2/g$ ve ortalama tane boyutu (d_{50}) 25 mikrondur. FeHT'nin termal gravimetrik analizi (TGA) ile kalsinasyondaki sıcaklık artışı ve adsorbentte meydana gelen ağırlık kaybı (%) arasındaki ilişki belirlenmiştir (Şekil 1). ÇTH'nin 100 °C'de bünyesinde fiziksel olarak soğurulan suyun, 140-260 °C'de ara katmanda bulunan su moleküllerinin, 260-500 °C arasında ise yapısından karbonatların ve hidroksitlerin uzaklaştığı bilinmektedir (Ulibarri ve diğ., 1994). 700 °C ve üzeri sıcaklıklarda kalsinasyon yapıldığında ise ÇTH'nin yapısı tamamen bozulmakta ve tekrar kullanılamamaktadır. Ayrıca, 700 °C'de kalsine edilen FeHT'nin X-ışını difraktogramı incelendiğinde yapının tamamen bozularak yeni piklerin meydana geldiğı görülmektedir. 1000 °C civarında ise MgO ve $MgAl_2O_4$ karışımı oluşmaktadır (Auxilio ve diğ., 2009).



Şekil 1. FeHT'ye ait TGA grafiği

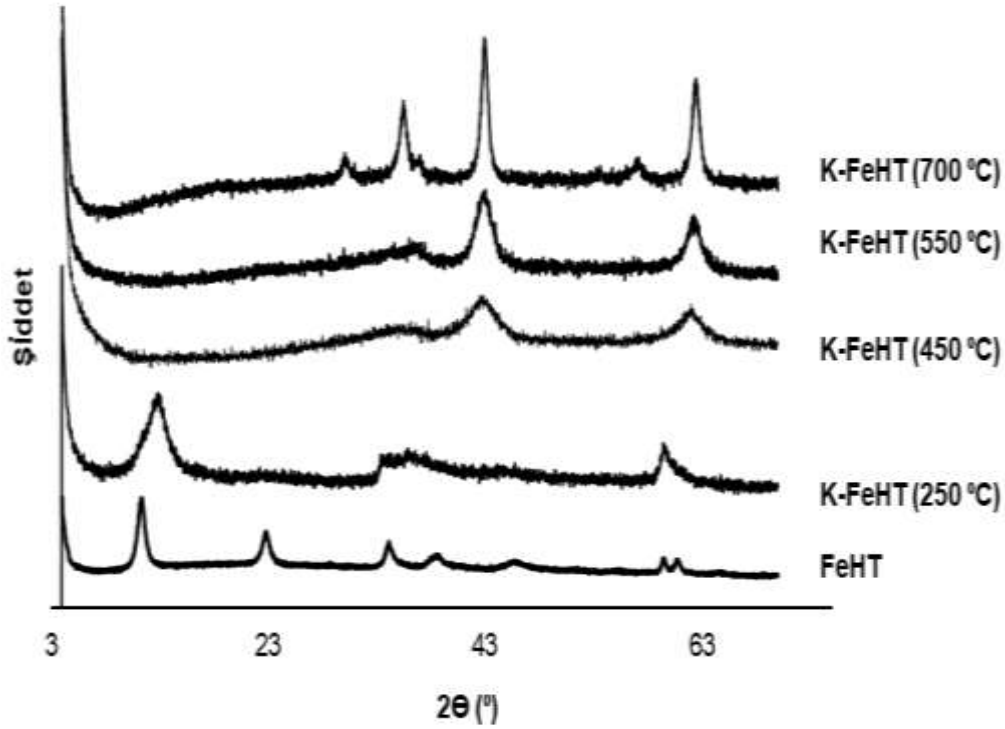
Figure 1. TGA curve for FeHT

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi sonucunda adsorbentin kalsinasyon işlemindeki termal karakteristiği belirlenmiştir (Şekil 2). 70 °C, 163 °C, 334 °C, 670 °C, 958 °C ve 1030 °C'de pikler oluşmuştur. DSC piklerinin yönü incelendiğinde tüm adımlarda endotermik bir bozunma olduğu görülmektedir.



Şekil 2. FeHT'ye ait DSC grafiği

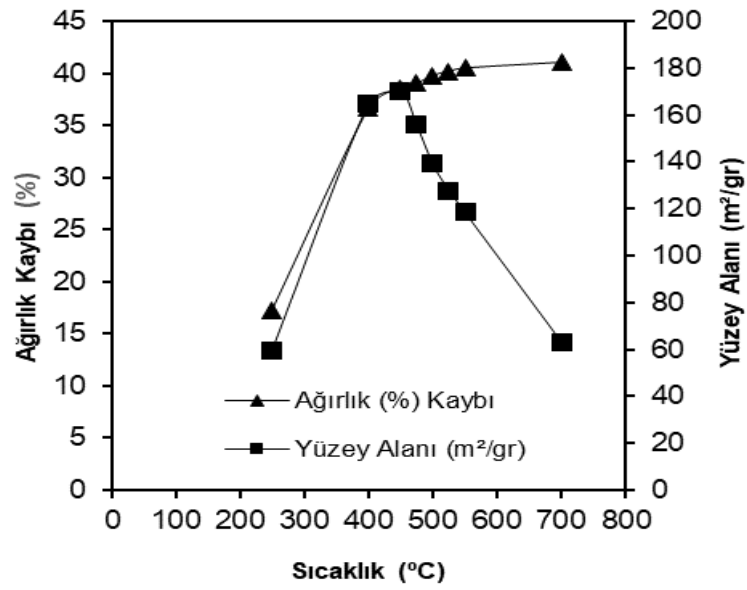
Figure 2. DSC curve for FeHT



Şekil 3. FeHT ve farklı kalsinasyon sıcaklarında elde edilen K-FeHT'ye ait X-ışını difraktogramı
Figure 3. X-ray diffractogram of FeHT and K-FeHT obtained at different calcination temperatures.

Numunelerin X-ışını difraktogramı (Şekil 3) incelendiğinde kalsine edilmemiş FeHT'nin 11,2 ve 22,9 derecedeki pikleri, brusit tabakasının bir göstergesi olan bazal yansımalara attir. Bu iki pikin keskinliği örneğin kristalliliğini ve tabakalı yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Nishida ve diğ., 2004). 450 °C'de hidrotalsit yapısına ait piklerin büyük oranda kaybolduğu görülmüştür. Bu sıcaklıkta kalsinasyon yapıldığında hidrotalsit yapısını oluşturan minerallerin düzeni bozulmaktadır. 450 °C'de kalsine edilen FeHT'nin pikleri ise Fe-Mg oksitlerinin oluştuğunu göstermektedir (Violante ve diğ., 2009). 700 °C'de kalsine edilen FeHT'nin X-ışını difraktogramı incelendiğinde yapının tamamen bozularak yeni piklerin oluştuğu görülmüştür (Şekil 3).

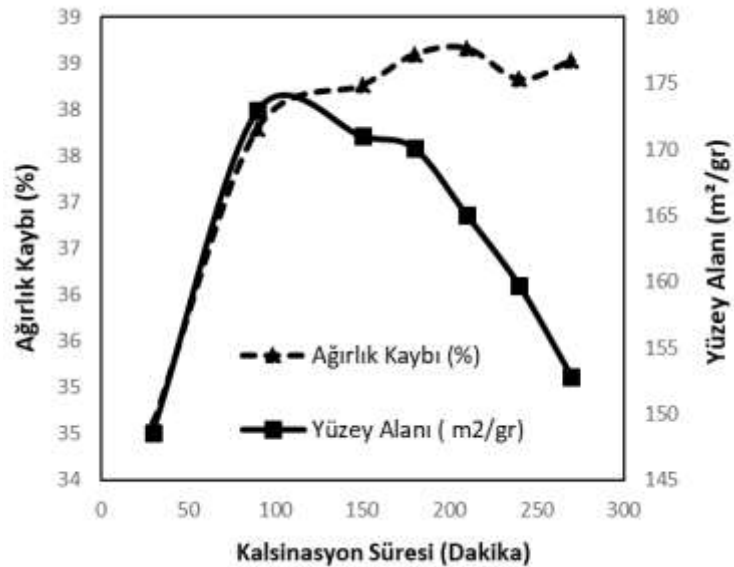
Kalsinasyon sıcaklığı ile ağırlık kaybı ve yüzey alanı arasındaki değişim Şekil 4'te verilmiştir. Kalsinasyon sıcaklığı 250 °C'den 450 °C'ye doğru arttıkça yüzey alanı da artmıştır. Sıcaklık 450 °C'den 700 °C'ye yükseltildiğinde ise yüzey alanı azalmıştır. TGA grafiğinde de görüleceği üzere 450 °C'de ağırlık kaybı yavaşlamaktadır. Bu sıcaklıkta hidroksitler ve karbonatların tamamen uzaklaştığı bilinmektedir (Ulibarri ve diğ., 1994). K-FeHT (250 °C) ve K-FeHT (450 °C)'nin X-ışını difraktogramları incelendiğinde 250 °C'de hidroksit ve karbonatlar gibi yapıların bir göstergesi olan pikin tamamen yok olmadığı görülmüştür. 450 °C'de kalsine edilen FeHT'de ise bazal piklerin tamamen kaybolmuş ve kalsinasyonunun amacına ulaşmıştır. Geçmişteki çalışmalar incelendiğinde 550 °C (Yang ve diğ., 2012), 450 °C (Violante ve diğ., 2009), 400 °C (Bhuiyan ve diğ., 2014) ve 350 °C (Yi ve diğ., 2011) gibi farklı kalsinasyon sıcaklıklarının uygulandığı görülmektedir.



Şekil 4. Kalsinasyon sıcaklığı ile ağırlık kaybı ve yüzey alanı arasındaki değişim

Figure 4. Change between calcination temperature and weight loss and surface area

En yüksek yüzey alanının elde edildiği sıcaklık olan 450 °C'de farklı sürelerde kalsinasyon yapılmıştır. Şekil 5'te ise ağırlık kaybı-yüzey alanı-kalsinasyon süresi arasındaki ilişki verilmiştir. Kalsinasyon süresi 45 ve 90 dakika arasında olduğunda yüzey alanı artmaktayken, süre 90 dakikanın üzerine çıkarıldığında yüzey alanında azalma meydana gelmiştir. Grafik incelendiğinde 90 dakikanın üzerinde ağırlık kaybı artarken yüzey alanında azalma meydana gelmiştir. FeHT'nin 450 °C'de 90 dakikadan fazla kalsine edilmesi durumunda adsorbentin yapısının bozularak yüzey alanının düştüğü görülmüştür.

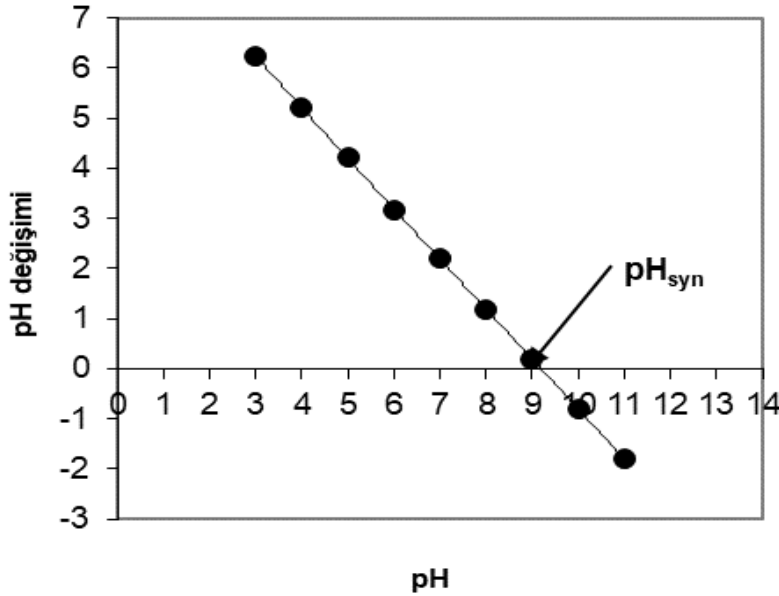


Şekil 5. Ağırlık kaybı-yüzey alanı-kalsinasyon süresi arasındaki ilişki

Figure 5. Relationship between weight loss surface area calcination time

Karakterizasyon grafikleri (TGA, DSC ve XRD), geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar ve gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları değerlendirilmiştir. Kalsinasyon sıcaklığı için en yüksek yüzey alan değerinin (173 m²/g) elde edildiği nokta olan 450 °C belirlenmiştir.

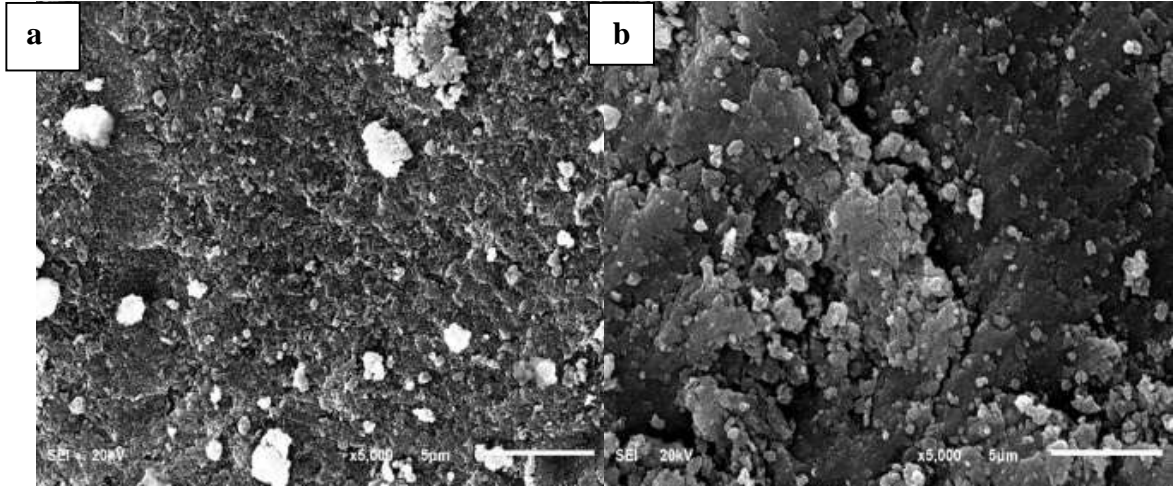
450 °C'de kalsine edilen FeHT (K-FeHT) örneğine yapılan kimyasal analiz sonucunda malzemenin %21,43 Fe ve %29,03 Mg içerdiği tespit edilmiştir. Bu analiz sonucu ile XRD piklerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Tane boyutu adsorpsiyonu etkileyen parametrelerden biridir. Tane boyutu, adsorpsiyon hızını etkilemektedir. Tane boyutu azaldıkça adsorpsiyon hızı artmaktadır. Ancak adsorpsiyon kapasitesi tane boyutundan bağımsızdır (Yang ve diğ., 2006). K-FeHT numunesine lazerli tane iriliği analizi yapılmış ve ortalama tane boyutu 28,83 µm olarak belirlenmiştir. Adsorplama kapasitesi ve yüzey alanı arasında önemli bir ilişki vardır (Beyhan, 2003). Bu çalışmada kalsinasyon öncesi 97,2 m²/g olan BET yüzey alanı, kalsinasyon sonrasında 173 m²/g olarak ölçülmüştür. Coulomb kanuna göre katıların yüzeyleri zıt yüklü iyonları çekmektedir. Belli bir pH değerinde yüzey nötr olur ve bu noktaya sıfır yük noktası denir. pH değeri sıfır yük noktasının altında olduğunda yüzey pozitif, üstünde olduğunda ise yüzey negatiftir (Korkmaz, 2008). K-FeHT için pH_{syn} (Sıfır yük noktası) değeri 9,2 olarak belirlenmiştir (Şekil 6). Bir grup farklı araştırmacı, yaptıkları çalışmada kalsine ÇTH için sıfır yük noktasını 9,6 olarak belirlemişlerdir (Elhalil ve diğ., 2016).



Şekil 6. K-FeHT için Farklı pH değerlerinde pH_{syn} değeri

Figure 6. pH_{syn} value for K-FeHT at different pH values

Numunelerin elektron mikroskopisi yardımıyla morfolojik özellikleri belirlenmiştir. FeHT ve K-FeHT'ye ait SEM görüntüleri incelendiğinde, FeHT'nin kalsine edilmesi ile daha poroz ve taneli bir adsorbent elde edildiği görülmüştür (Şekil 7).



Şekil 7.(a) FeHT ve (b) K-FeHT'ye ait SEM görüntüleri

Figure 7. SEM images of (a) FeHT and (b) K-FeHT

SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTION)

Yüzey alanı adsorpsiyonu etkileyen önemli parametreler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada sularda bulunan kirletici anyonların giderilmesinde kullanılmak üzere yüksek yüzey alanlı bir adsorbentin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ÇTH olarak bilinen yüzey alanı $92 \text{ m}^2/\text{gr}$ olan FeHT'nin kalsinasyon parametreleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar K-FeHT'nin özgül yüzey alanı üzerindeki en önemli parametrelerin kalsinasyon sıcaklığı ve kalsinasyon süresi olduğunu göstermiştir. Düşük ve yüksek kalsinasyon sıcaklıklarında yüzey alanı değerleri düşüş gösterirken ($250 \text{ }^\circ\text{C}$ - $60 \text{ m}^2/\text{gr}$, $700 \text{ }^\circ\text{C}$ - $62 \text{ m}^2/\text{gr}$), $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de yüzey alanı 2 kat artarak $173 \text{ m}^2/\text{gr}$ değeri ile maksimuma ulaştığı belirlenmiştir. En iyi yüzey alanı değerinin elde edildiği kalsinasyon sıcaklığı olan $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 45 dakika süren kalsinasyonda yüzey alanı $145 \text{ m}^2/\text{gr}$ olurken, 90 ve 270 dakikalık kalsinasyonda sırasıyla 173 ve $153 \text{ m}^2/\text{gr}$ olan yüzey alanı değerleri elde edilmiştir. Bu durum kalsinasyon süresinin de önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda kalsinasyon ile FeHT'nin tabakaları arasındaki H_2O , OH ve CO_2 içeriklerinin kaybolarak periklaz yapılarının oluştuğu görülmüştür. Çalışma sonucunda kalsinasyon işlemi ile tabakalı yapı bozulmadan yüzey alanının iki katına kadar artırılarak daha poroz bir adsorbentin üretilebileceği belirlenmiştir. Kalsinasyon yoluyla FeHT adsorbentinde meydana gelen yüzey alanı artışlarının adsorpsiyon kapasitesinde de benzer oranlarda iyileşmelere ve desorpsiyon özellikleri üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye sebep olup olmadığının gelecek çalışmalarda detaylı olarak araştırılması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Z111 no'lu proje kapsamında yapılmıştır. Yazarlar TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Auxilio, A. R., Andrews, P. C., Junk, P. C. ve Spiccia, L., 2009. The adsorption behavior of C.I. Acid Blue 9 onto calcined Mg–Al layered double hydroxides, *Dyes and Pigments*, 81, 103–112.
- Beyhan, M., 2003. Atık Çamurlar ve Doğal Malzemeler ile Sulardan Florür İyonu Gideriminin Araştırılması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bhuiyan, M. M. R., Lin, S.D. ve Hsiao, T.C., 2014. Effect of calcination on Cu–Zn loaded hydrotalcite catalysts for C–C bond formation derived from methanol, *Catalysis Today*, 226, 150–159.

- Bruna, F., Pavlovic, I., Barriga, C., Cornejo, J. ve Ulibarri, M. A., 2006. Adsorption of pesticides carbetamide and metamitron on organohydrotalcite, *Applied Clay Science*, 33, 116–124.
- Chetia, M., Goswamee, L. R., Goswamee, L. R., Banerjee, S., Chatterjee, S., Singh, L., Srivastava, R. B. ve Sarma, H. P., 2012. Arsenic removal from water using calcined Mg–Al layered double hydroxide, *Clean Techn. Environ. Policy*, 14, 21–27.
- Elhalil, A., Qourzal, S., Mahjoubi, F. Z., Elmoubarki, R., Farnane, M., Tounsadi, H., Sadiq, M., Abdennouri, M. ve Barka, N., 2016. Defluoridation of groundwater by calcined Mg/Al layered double hydroxide, *Emerging Contaminants*, 2, 42–48.
- Ferreira, O. P., Alves, O. L., Gouveia, D. X., Souza, A. G., Paiva, J. A. C. ve Filho, J., 2004. M., Thermal decomposition and structural reconstruction effect on Mg–Fe-based hydrotalcite compounds, *Journal of Solid State chemistry*, 177, 3058–3069.
- Korkmaz, E., 2008. Eskişehir Yöresi Sepiyoliti'nin Zeta Potansiyellerinin Tayini, Yüksek Lisans, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Lins, L. C., Bugatti, V., Livi, S. ve Gorrasi, G., 2018. Phosphonium ionic liquid as interfacial agent of layered double hydroxide: Application to a pectin matrix, *Carbohydrate Polymers*, 182, 142–148.
- Mahjoubi, F. Z., Khalidi, A., Abdennouri, M. ve Barka, N., 2017. Zn–Al layered double hydroxides intercalated with carbonate, nitrate, chloride and sulphate ions: Synthesis, characterisation and dye removal properties, *Journal of Taibah University for Science*, 11, 90–100.
- Nalawade, P. ve Hirlekar, R., 2009. Layered Double Hydroxides: A review, *Journal of Scientific and Industrial Research*, 68, 267–272.
- Nishida, S., Takesoe, S., Yamasaki, Y. ve Nakahira, A., 2004. Attempt of arsenic removal in wasted water by inorganic materials, 14th International Conference on the Properties of Water and Steam, Japan.
- Palmer, S. J., Frost, R. L. ve Nguyen, T., 2008. Hydrotalcites and their role in coordination of anions in Bayer liquors: Anion binding in layered double hydroxides, *Coordination Chemistry Reviews*, 253, 250–267.
- Pecenyuk, S. I. 1999. The use of the pH at the point of zero charge for characterizing the properties of oxide hydroxides, *Russian Chemical Bulletin*, 48, 1017–1023.
- Seida, Y. ve Nakano, Y., 2000. Removal of humic substances by layered double hydroxide containing iron, *Water Research*, 34, 1487–1494.
- Seron, A. ve Delorme, F., 2008. Synthesis of layered double hydroxides (LDHs) with varying pH A valuable contribution to the study of Mg/Al LDH formation mechanism, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 69, 1088–1090.
- Theiss, F. L., Ayoko, G. A. ve Frost, R. L., 2013. Thermogravimetric analysis of selected layered double hydroxides, *J Therm Anal Calorim*, 112, 649–657.
- Türk, T., Alp, İ. ve Boyraz, T., Investigation production of the high surface area double layer hydroxide production procedure with co-precipitation methods, *International Black Sea Mining & Tunneling Symposium*, 2-4 November 2016, Trabzon-Turkey, pp 471–477.
- Ulibari, M. A., Labajos F. M., Rives, V., Trujillano, R., Kagunya, W. ve Jones, W., 1994. Comparative Study of the Synthesis and Properties of Vanadate-Exchanged Layered Double Hydroxides, *Inorg. Chem.*, 33, 2592–2599.
- Violante, A., Pucci, M., Cozzolino, V., Zhu, J. ve Pigna, M., 2009. Sorption/desorption of arsenate on/from Mg–Al layered double hydroxides: Influence of phosphate, *Journal of Colloid and Interface Science*, 333, 63–70.
- Yang, L., Dadwhal, M., Shahrivari, Z., Ostwal, M., Liu, P. K. T., Sahimi, M. ve Tsotsis, T. T., 2006. Adsorption of arsenic on layered double hydroxides: Effect of the particle size, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45, 4742–4751.
- Yang, L., Shahrivari, Z., Liu, P. K. T., Sahimi, M. ve Tsotsis, T. T., 2005. Removal of trace levels of arsenic and selenium from aqueous solutions by calcined and uncalcined layered double hydroxides (LDH), *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 6804–6815.

- Yang, Y., Gao, N., Chu, W., Zhang, Y. ve Ma, Y., 2012. Adsorption of perchlorate from aqueous solution by the calcination product of Mg/(Al-Fe) hydrotalcitelike compounds, *Journal of Hazardous Materials*, 209–210, 318–325.
- Yang, Z., Mo, Z. ve Niu, X., 2015. Perchlorate uptake from aqueous solutions by calcined Mg-Al layered double hydroxides, *Separation Science and Technology*, 50, 99–109.
- Yi, H., Zhao, S., Tang, X., Ning, P., Wang, H. ve He, D., 2011. Influence of calcination temperature on the hydrolysis of carbonyl sulfide over hydrotalcite-derived Zn-Ni-Al catalyst, *Catalysis Communications*, 12, 1492–1495.
- Wang, G. O., Wang, C. C. ve Chen, C. Y., 2005. Preparation and Characterization of Layered Double Hydroxides – PMMA Nanocomposites by Solution Polymerization, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 15, 2, 239-251.



THE INFLUENCE OF PRESSURE STIFFNESS ON THE TORSIONAL BUCKLING OF LAMINATED COMPOSITE CYLINDERS UNDER EXTERNAL HYDROSTATIC PRESSURE

Izzet U. CAGDAS 

Akdeniz University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Antalya, TURKEY
izzetufuk@akdeniz.edu.tr

(Geliş/Received: 14.08.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.11.2019)

ABSTRACT: In this study, the influence of pressure stiffness on the torsional buckling of thin and moderately thick laminated composite perfect cylinders under external hydrostatic pressure is investigated. A degenerated-curved shell element is used to obtain the numerical results. First, a verification problem is solved and the element is validated for stability analysis including pressure stiffness. Then, cross-ply and angle-ply laminated composite cylinders are examined for selected length-radius ratios and stacking sequences. The results obtained show that, pressure stiffness may have a stabilizing effect against torsional buckling especially for thick orthotropic cylinders.

Keywords: Pressure stiffness, torsional buckling, composite cylinder, hydrostatic pressure

Basınç Rijitliğinin Hidrostatik Basınç Etkisi Altındaki Katmanlı Kompozit Silindirlerin Burulmalı Burkulmalarına Etkisi

ÖZ: Bu çalışmada hidrostatik basınç altındaki ince ve orta kalınlıkta katmanlı kompozit kusursuz silindirlerin burkulmasında basınç rijitliğinin etkisi araştırılmıştır. Sayısal neticeler dejenere-eğri bir kabuk elemanı kullanılarak elde edilmiştir. Öncelikle bir doğrulama problem çözülmüş ve eleman basınç rijitliğini içeren stabilite tahkiki için doğrulanmıştır. Daha sonra, dik-açılı ve eğik-açılı katmanlı kompozit silindirler seçilen uzunluk/çap değerleri ve katman düzenleri için incelenmiştir. Elde edilen neticeler basınç rijitliğinin özellikle kalın ortotropik silindirlerde burulmalı burkulmayı engellediğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Basınç rijitliği, burulmalı burkulma, kompozit silindir, hidrostatik basınç

INTRODUCTION

In this study, the influence of pressure stiffness (PS) on the torsional buckling of thin and moderately thick laminated composite perfect cylinders under external hydrostatic pressure is investigated.

One of the most comprehensive studies on buckling of composite shells was performed by Seide *et al.*(1968) who has prepared the NASA-SP8007 monograph. Nemeth and Starnes (1998) has improved this monograph by considering imperfections. However, the literature on the influence of PS on shell stability is not extensive. PS is known to have a detrimental effect on the stability of shells under compressive loads and the related functional was derived by Koiter (1967). Schokker *et al.* (1996), Sridharan and Kasagi (1997) and Kardomateas (1996, 2000) have also considered the influence of PS on buckling of composite cylinders. In more recent studies, Cagdas and Adali (2011) have shown that due to pressure stiffness, a reduction of up to 30% in buckling pressure is possible for cross-ply laminated cylinders under hydrostatic pressure. The influence of PS has recently been considered for filament wound cones by Cagdas (2017), for cylindrical panels by Smitha and Nandakumar (2018), for thick

laminated composite shells by Khayat *et al.* (2016), and for functionally graded shells under external pressure by Khayat *et al.* (2017). In a more recent study, Basaglia *et al.* (2019) have considered *PS* for pipes under hydrostatic pressure and have stated that the buckling pressure will be overestimated if *PS* is not taken into account.

As shell thickness increases, the flexural stiffness terms increase much more rapidly than the shear stiffness terms. Thus, for thicker cylinders, torsional buckling may become more critical than flexural buckling. However, it will be shown in this study that this may not be the case taken into account.

A degenerated composite shell element based on the shell element developed by Kant (1992) is used to conduct the related structural analyses. This same element was used by Cagdas and Adali (2012a, 2012b) for linearized stability analysis and design optimization of composite shell structures. This element was recently modified by Cagdas (2017) for stability analysis considering *PS*. Similar shell finite elements were used by Ram and Babu (2002), and Barbosa and Ferreira (2009), Bakshi and Chakravorty (2014). ANSYS shell element "Shell 99" is a similar shell element, which can be used for stability analysis of thin-walled composite structures; see, for example Öner *et al.* (2007) and Shen *et al.* (2017).

First, the shell element used is validated by comparing the results obtained here with the analytical results presented by Kardomateas (1996) and with the numerical results presented by Cagdas and Adali (2012) for an orthotropic composite cylinder problem. Then, numerical results are presented for cross-ply and angle-ply laminated composite cylinders. The results obtained in the present study show that *PS* considerably interferes with the buckling behavior of relatively thick laminated composite cylinders.

RESEARCH SIGNIFICANCE

The results presented in this study will provide further insight into the issue of laminated composite cylinder buckling under hydrostatic pressure. It is aimed to show that the inclusion of pressure stiffness eliminates the torsional buckling mode and increases the buckling parameter for cross-ply laminated/orthotropic composite perfect cylinders under hydrostatic pressure. This finding is of practical importance as construction of orthotropic cylinders may be advantageous or more economical.

PROBLEM DEFINITION

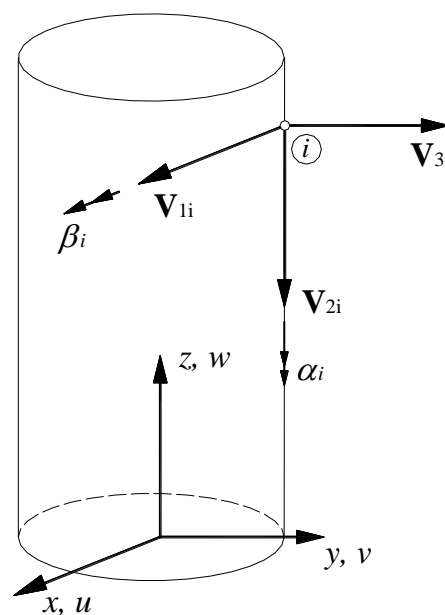


Figure 1. The global, and nodal coordinate systems

The shell element is based on the following displacement field;

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{nn} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}_{mid} S_i(\xi, \eta) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{nn} S_i \zeta \mathbf{V}_{3i} \tag{1}$$

where, $nn, S_i(\xi, \eta), \mathbf{V}_{3i}$ denote the total number of nodes, the value of the i^{th} shape function at (ξ, η) , and the unit surface normal vector at node i . respectively. The range of ξ and η are -1 to 1 and the range of ζ is $-t/2$ to $t/2$, where t denotes thickness. α_i , and β_i denote the rotations about \mathbf{V}_{2i} , and \mathbf{V}_{1i} as shown in Fig. 1. For the problem under consideration, \mathbf{V}_{3i} is selected as the outward unit normal and the unit vector \mathbf{V}_{1i} is calculated by multiplying \mathbf{V}_{3i} with the unit vector in z direction, \mathbf{e}_3 ; i.e. $\mathbf{V}_{1i} = \mathbf{V}_{3i} \times \mathbf{e}_3$ as shown in Fig. 1. The details of formulation will not be given here as related information can be found elsewhere; for example see Reddy (2003). Note that, the lamination angle is taken as the angle between the fiber direction and \mathbf{V}_{1i} .

NUMERICAL RESULTS

First a verification problem is solved and then numerical results are presented for cross-ply and angle-ply laminated cylinders.

Verification Problem

Circumferentially reinforced graphite/epoxy cylinders of length L , external radius 1 m., constant thickness H , and length to external radius ratio $L/R_{ext} = 10$ under external pressure are analyzed here using the 2D shell element modified for the PS effect. At the ends of the shells, only radial and circumferential displacements are set equal to zero. Comparisons are made with the analytical results for orthotropic cylinders under external pressure, obtained by Cagdas and Adali (2011) and Kardomateas (1996) who have considered the effect of non-conservative loading.

The material properties are given below;

$$E_1 = 140 \text{ GPa}, E_2 = 9.1, E_3 = 9.9 \text{ GPa}, G_{12} = 4.3 \text{ GPa}, G_{13} = 4.7 \text{ GPa}, G_{23} = 5.9 \text{ GPa}, \nu_{12} = 0.3, \nu_{13} = 0.02, \nu_{23} = 0.49.$$

The results obtained for $L/R_{ext} = 10$ and for R_{ext}/R_{int} ratios between 1.05 and 1.25 are presented in Table 1 in comparison with the results obtained by Kardomateas (1996) and Cagdas and Adali (2011), where $n=2$ for all cases. In Table 1, \bar{q}_{cr}, R_{int} and R_{ext} denote external pressure, internal radius, and external radius of the cylinder, respectively. The pressure acts at the outer surface, so the axial compressive force acting on top of the cylinder is calculated as $f = q\pi(R_{int} + H)^2$. The non-dimensional buckling parameter is defined as;

$$\bar{q}_{cr} = \frac{q_{cr} R_{ext}^3}{E_1 H^3}. \tag{2}$$

The percentage change in buckling pressure $\eta(\%)$ is defined as;

$$\eta(\%) = \frac{\lambda_{cr,PS} - \lambda_{cr}}{\lambda_{cr}} \times 100 \tag{3}$$

where λ_{cr} denotes buckling parameter and subscript PS indicates that PS is taken into account.

Table 1. \bar{q}_{cr} for orthotropic cylinders with $L/R_{ext} = 10$.

$\frac{R_{ext}}{R_{int}}$	Elasticity ⁽¹⁾	FEM ⁽²⁾ (without <i>PS</i>)	FEM ⁽²⁾ (with <i>PS</i>)	Present	Present	$\eta(\%)$
				2D Shell 40×8 mesh (without <i>PS</i>)	2D Shell 40×8 mesh (with <i>PS</i>)	
1.05	0.2576	0.3447	0.2687	0.3444	0.2686	-22.0
1.10	0.2513	0.3211	0.2581	0.3192	0.2573	-19.4
1.15	0.2347	0.2878	0.2467	0.1484 *	0.2447	64.9
1.20	0.2166	0.2535	0.2308	0.0873 *	0.2276	160.7
1.25	0.1978 (?)	0.2227	0.2128	0.0583 *	0.2007	244.3

⁽¹⁾ Kardomateas (1996), ⁽²⁾ Cagdas and Adali (2011), * torsional buckling mode

As can be observed from Table 1, the results obtained using the 2D shell model are in good agreement with the elasticity solution presented by Kardomateas (1996) and in excellent agreement with the results obtained using the axisymmetric shell model with and without the inclusion of the *PS* effect for $R_{ext}/R_{int} \leq 1.10$. However, when *PS* was not taken into account, a torsional buckling mode was observed for the case $R_{ext}/R_{int} \geq 1.15$. This torsional buckling mode shape, captured by the 2D shell model only, is shown in Fig. 2(a). However, with the inclusion of *PS*, the buckling mode shape changes as shown in Fig. 2(b) and the buckling parameter increases and gets closer to the one calculated using the axisymmetric model. Similarly, it can be seen from Figures 2(c) and 2(d) that, for R_{ext}/R_{int} , torsional buckling does not occur when *PS* is taken into account. Also, as can be seen from Table 1, when *PS* is taken into account, the torsional buckling mode shape vanishes and this implies that *PS*, which is expected to be detrimental, unexpectedly stabilizes the cylinders with $R_{ext}/R_{int} \geq 1.15$ against torsional buckling. In Table 1, the variable η values are also presented as 64.9%, 160.7%, and 244.3% for $R_{ext}/R_{int} = 1.15, 1.20,$ and 1.25 respectively.

Next, the problem is solved again for the fully clamped boundary conditions, except for the axial displacement at one of the ends, but the buckling parameters did not significantly change and therefore the results obtained are not presented here. It therefore may be stated that the influence of *PS* is not related with the rotational boundary conditions.

It should also be stated that, even though the formulation of the 2D degenerated shell element employed here is not based on a specific shell theory and is not as sophisticated as the shell theory based axisymmetric shell element of Cagdas and Adali (2011), where the thickness/radius ratio is also taken into account, the results obtained using the 2D shell element, presented in Table 1, are found out to be more accurate for some cases as complicated buckling mode shapes can be better captured by the 2D shell model comparing with the axisymmetric model.

Cross-ply Laminated Cylinders

Numerical results obtained for graphite-epoxy cylinders with S3 B.C., stacking sequence $[90^\circ/0^\circ]_s$, and varying R_{ext}/R_{int} ratios are presented for $L/R_{ext} = 5$, and 10 in Tables 2 and 3, respectively. It can be observed from Table 2 that, the stabilizing influence of *PS* is minimal for $L/R_{ext} = 5$ as flexural buckling occurs for the R_{ext}/R_{int} ratios considered. However, as can be observed from Table 3, the influence of *PS* is much higher for $L/R_{ext} = 10$ due to the fact that a greater surface area is under hydrostatic pressure comparing with the case $L/R_{ext} = 5$. This behavior was also observed by Cagdas and Adali (2011). It can be observed from Table 3, that the percentage increase is nearly 250% for $R_{ext}/R_{int} = 1.25$, which also was

the case for the verification problem solved. The buckling mode shapes for $R_{ext}/R_{int} = 1.25$ with and without *PS* effect are given in Figures 3(a) and 3(b), which clearly show that the inclusion of *PS* in stability analysis yields a flexural buckling mode shape instead of a torsional one.

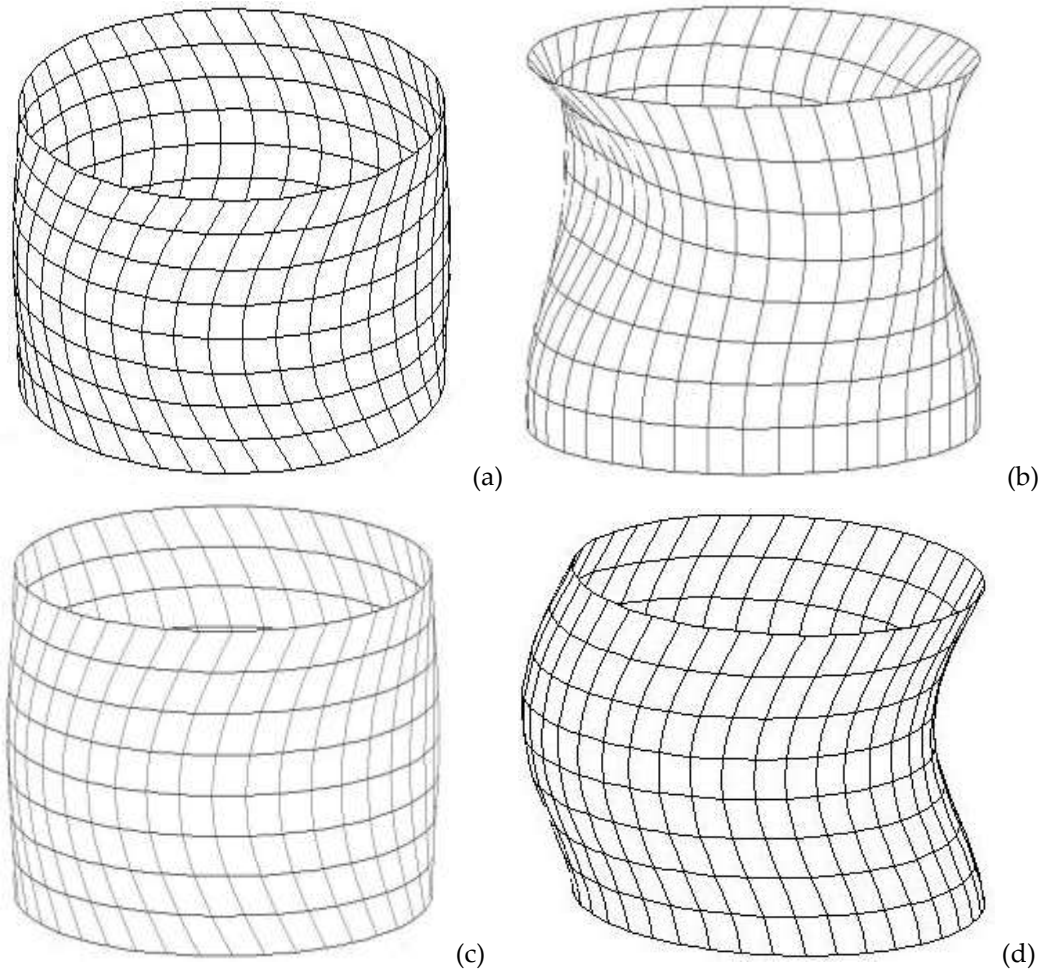


Figure 2. Buckling mode shapes for cross-ply laminated cylinders under hydrostatic pressure with $L/R_{ext} = 10$ (a) $R_{ext}/R_{int} = 1.15$, without *PS* (b) $R_{ext}/R_{int} = 1.15$, with *PS* (c) $R_{ext}/R_{int} = 1.3$, without *PS* (d) $R_{ext}/R_{int} = 1.3$, with *PS*

Table 2. \bar{q}_{cr} for $[90^\circ/0^\circ]_s$ cross-ply laminated cylinders with $L/R_{ext} = 5$.

$\frac{R_{ext}}{R_{int}}$	Present	Present	$\eta(\%)$
	2D Shell 40×8 mesh (without <i>PS</i>)	2D Shell 40×8 mesh (with <i>PS</i>)	
1.05	0.6503	0.51410	-20.9
1.10	0.3711	0.29810	-19.7
1.15	0.3067	0.25120	-18.1
1.20	0.2714	0.22704	-16.3
1.25	0.20677	0.20868*	0.9

* torsional buckling mode

Table 3. \bar{q}_{cr} for $[90^\circ/0^\circ]_s$ cross-ply laminated cylinders with $L/R_{ext} = 10$.

$\frac{R_{ext}}{R_{int}}$	Present	Present	$\eta(\%)$
	2D Shell 40×8 mesh (without PS)	2D Shell 40×8 mesh (with PS)	
1.05	0.3601	0.2774	-23,0
1.10	0.3075	0.2712	-11,8
1.15	0.1483	0.2286	54,1
1.20	0.0872	0.21650	148,3
1.25	0.0583	0.2037	249,4

* torsional buckling mode

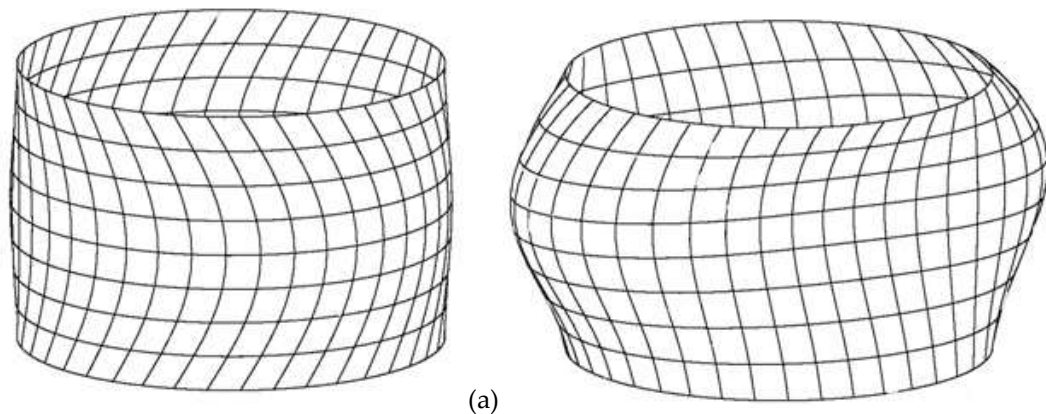


Figure 3. Buckling mode shapes for cross-ply laminated cylinders under hydrostatic pressure with $L/R_{ext} = 10$, and $R_{ext}/R_{int} = 1.25$ (a), without PS (b) with PS

Angle-ply Laminated Cylinders

Finally, numerical results are presented in Table 4 for angle-ply graphite-epoxy cylinders with S3 B.C., stacking sequence $[55^\circ/-55^\circ]_s$, $L/R_{ext} = 10$, and varying R_{ext}/R_{int} ratios. The lamination angle is selected as equal to 55° as this angle maximizes the static strength; see Messenger *et al.* (2002).

Table 4. \bar{q}_{cr} for $[55^\circ/-55^\circ]_s$ angle-ply laminated cylinders under hydrostatic pressure, $L/R_{ext} = 10$.

$\frac{R_{ext}}{R_{int}}$	Present	Present	$\eta(\%)$
	2D Shell 40×8 mesh (without PS)	2D Shell 40×8 mesh (with PS)	
1.05	0.1888	0.1459	-22.7
1.10	0.1617	0.1276	-21.1
1.15	0.1418	0.1142	-19.5
1.20	0.1301	0.1065	-18.1
1.25	0.1216	0.1011	-16.9

It can be observed from Table 4, that PS has no positive influence for all of the R_{ext}/R_{int} values considered and the maximum decrease percentage is equal to 22.7% for $R_{ext}/R_{int} = 1.05$. The buckling

mode shape for $R_{ext}/R_{int} = 1.25$ shown in Figure 4 is almost the same for both cases, which indicates that for the angle-ply cylinders considered, the buckling mode did not change with the inclusion of PS .

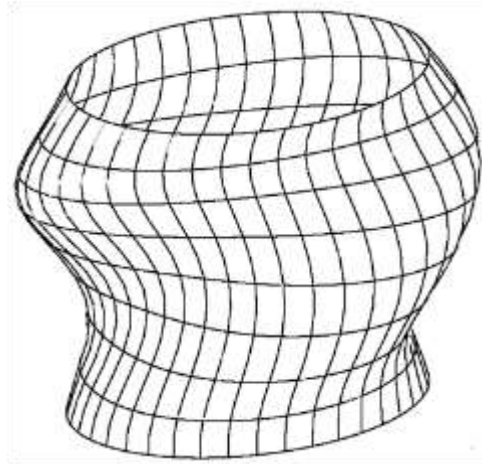


Figure 4. Buckling mode shape for angle-ply laminated cylinders under hydrostatic pressure with $L/R_{ext} = 10$, and $R_{ext}/R_{int} = 1.25$, with and without PS

CONCLUSIONS

In this study, the influence of pressure stiffness (PS) on torsional buckling of thin and moderately thick laminated composite perfect cylinders under external hydrostatic pressure is investigated using a degenerated shell finite element.

First, verification problems are solved and the super parametric shell finite element used in this study is validated for stability analysis including pressure stiffness. The results obtained for the verification problems show that the torsional buckling mode shape vanishes for orthotropic cylinders with $R_{ext}/R_{int} \geq 1.15$ when PS is taken into account. In order to more thoroughly investigate the problem, buckling parameters are presented for cross-ply and angle-ply laminated composite cylinders under external hydrostatic pressure and the following observations are made;

i. For cross-ply laminated cylinders, the influence of PS decreases with decreasing L/R_{ext} ratio and increases with increasing thickness. The positive influence of PS is higher for $L/R_{ext} = 10$, and for the cross-ply cylinders considered, a nearly 250% increase in buckling pressure is observed for $R_{ext}/R_{int} = 1.25$ and $L/R_{ext} = 10$. However, for $R_{ext}/R_{int} \leq 1.1$, the influence of PS is detrimental as expected.

ii. For angle ply cylinders, an increase in buckling pressure due to PS is not observed as the in-plane shear stiffness values of angle-ply cylinders are higher than the ones for cross-ply cylinders. It is also shown for angle-ply cylinders that, the buckling mode shape does not change with the inclusion of PS .

In conclusion, it may be stated that for composite cylinders under external hydrostatic pressure PS should be included in the finite element model, as failure to do so may lead the designer to reach wrong estimates about both the buckling pressure, and the mode shape.

REFERENCES

- Seide P, Weingarten VI, Peterson JP., 1968, "Buckling of thin-walled circular cylinders", NASA SP-8007.
- Nemeth MP, Starnes Jr JH., 1998, "The NASA monographs on shell stability design recommendations: a review and suggested improvements", NASA-TP1998-206290, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center.
- Koiter, W. T. 1967, "General equations of elastic stability for thin shells", In: Proceedings, Symposium on the Theory of Shells to Honor Lloyd Hamilton Donnett pp. 187-227.

- Schokker, A., Sridharan, S., Kasagi, A., 1996, "Dynamic buckling of composite shells", *Computers & Structures*, 59(1), 43-53.
- Sridharan, S., Kasagi, A., 1997, "On the buckling and collapse of moderately thick composite cylinders under hydrostatic pressure", *Composites Part B*, 28B, 583-596.
- Kardomateas, G.A., 1996, "Benchmark three-dimensional elasticity solutions for the buckling of thick orthotropic cylindrical shells", *Composites Part B*, 27B, 569-580.
- Kardomateas, G.A., 2000, "Effect of normal strains in buckling of thick orthotropic shells", *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, 13(3), 85-91.
- Cagdas IU, Adali S., 2011 "Buckling of cross-ply cylinders under hydrostatic pressure considering pressure stiffness", *Ocean Engineering*, 38: 559-569.
- Cagdas, I. U. 2017, "Optimal design of variable stiffness laminated composite truncated cones under lateral external pressure", *Ocean Engineering*, 145, 268-276.
- Smitha, K. K., Nandakumar, C. G., 2018, "Assessment of Collapse Pressure of Laminated Composite Subsea Shells Subjected to Hydrostatic Follower Force", *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 99(4), 617-626.
- Khayat, M., Poorveis, D., Moradi, S., Hemmati, M., 2016, "Buckling of thick deep laminated composite shell", *Structural Engineering and Mechanics*, 58(1), 59-91.
- Khayat, M., Poorveis, D., Moradi, S., 2017, "Semi-Analytical Approach in Buckling Analysis of Functionally Graded Shells of Revolution Subjected to Displacement Dependent Pressure", *Journal of Pressure Vessel Technology*, 139(6), 061202.
- Basaglia, C., Camotim, D., & Silvestre, N., 2019, "GBT-based buckling analysis of steel cylindrical shells under combinations of compression and external pressure", *Thin-Walled Structures*, 144, 106274.
- Kant, T., 1992, "A general fibre-reinforced composite shell element based on a refined shear deformation theory", *Computers & Structures*, 42(3), 381-388.
- Cagdas, I. U., Adali, S., 2012a, "Effect of Fiber Orientation on Buckling and First-Ply Failures of Cylindrical Shear-Deformable Laminates", *Journal of Engineering Mechanics*, 139(8), 967-978.
- Cagdas, I., Adali, S., 2012b, "Design of a laminated composite variable curvature panel under uniaxial compression", *Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software*, 29(1), 48-64.
- Ram, K. S., Babu, T. S., 2002, "Buckling of laminated composite shells under transverse load", *Composite Structures*, 55(2), 157-168.
- Barbosa, J. A. T., Ferreira, A. J. M., 2009 "Geometrically nonlinear analysis of functionally graded plates and shells", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 17(1), 40-48.
- Bakshi, K., Chakravorty, D., 2014, "Geometrically linear and nonlinear first-ply failure loads of composite cylindrical shells", *Journal of Engineering Mechanics*, 140(12), 04014094.
- Öner, G. A., Temiz, Ş., Akbulut, H., Özel, A. 2007, "İnce cidarlı, çapraz takviyeli, tabakalı kompozit tüplerde sonlu elemanlar yöntemi ile burulmalı burkulma analizi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(1), 35-44.
- Shen, K. C., Pan, G., Lu J., 2017, "Buckling and layer failure of composite laminated cylinders subjected to hydrostatic pressure", *Science and Engineering of Composite Materials*, 24(3), 415-422.
- Reddy, J. N., 2003, *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis*. CRC press.
- Messenger, T., Pyrz, M., Gineste, B., Chauchot, P., 2002, "Optimal laminations of thin underwater composite cylindrical vessels", *Composite Structures*, 58(4), 529-537.



ZASEY'E DAYALI HARMONİKLİ YÜK VE DENGESİZ BESLEME GERİLİMİ ALTINDA TRANSFORMATÖRÜN İNDİRGENMESİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Atabak NAJAFİ

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Eskişehir, TÜRKİYE
atabak.najafi61@gmail.com

(Geliş/Received: 12.06.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.12.2019)

ÖZ: Endüstri ve dağıtım merkezlerinde yaygın olarak kullanılan dağıtım trafoları, gerilim dengesizliğinden ve harmonik yüklerden en fazla etkilenen elektrik makinalarıdır. Bu durumlar dağıtım trafoların verimini, nüve kaybı ve bakır kaybı gibi parametreleri üzerinde olumsuz etkisi vardır. Bu makalede, harmonikli yükler ve dengesiz besleme gerilimi koşulları altında Dağıtım Trafosunun İndirgenmesi ve kayıplardaki artış incelenmiştir. Transformatorün indirgemelerini gerçekleştirmek için k-faktörü ve harmonik kayıp faktörü (H_{FL}) kullanılmıştır. Bu çalışmada dağıtım transformatorünün sargılarında ve çekirdeğinde oluşan manyetik akı yoğunluğunu gözlemlemek için üç boyutlu zaman adımı sonlu elemanlar yönteminden (ZASEY) faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre IEEE standardının yüksek harmonikli akım (THDI) ve dengesiz koşulları altında transformatorün indirgenmesi için yetersiz, ZASEY'nin ise daha uygun doğru bir yöntem olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İndirgeme, ZASEY, harmonik yük, dengesiz gerilim

Comparison of Derating in Transformer under Non-Linear Load and Imbalanced Supply Voltage Based on Tsfem

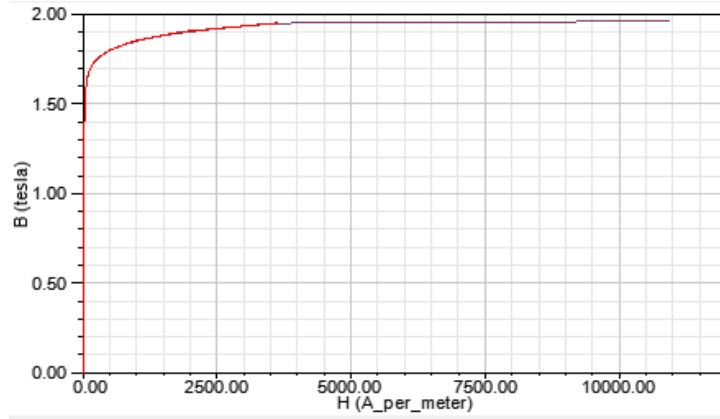
ABSTRACT: Distribution transformers which are widely used in industry and distribution centers are the most affected by voltage imbalance and harmonic loads. These situations have a negative impact on efficiency, core loss and winding loss of distribution transformers, In this article, derating as well as losses increase of transformer under non-linear loads and imbalanced supply voltage conditions are examined. Harmonic loss factor (H_{FL}) and K-factor have been used to perform the transformer derating. In this study, 3D time-step finite element method (TSFEM) used to observe the magnetic flux density formed in the windings and core of the distribution transformer. According to the results obtained, it is seen that the IEEE standard is insufficient for the derating of the transformer under high harmonic current (THDI) and unbalanced conditions and Time Stepping Finite Element Method is a more suitable method.

Keywords: derating, TSFEM, harmonic load, unbalanced voltage

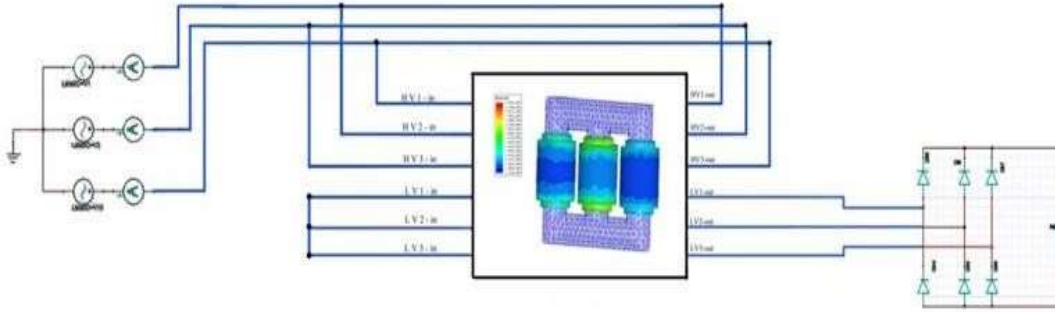
GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç transformatorleri enerji sisteminin temel parçasıdır ve yatırımların en pahalı kısmıdır. Endüstride enerji verimliliğindeki sürekli artış evirici, doğrultucu, yumuşak yol verici gibi güç elektroniği elemanlarının kullanımını da arttırmaktadır. Bu tip doğrusal olmayan yükler güç sistemlerini ve elemanlarını olumsuz yönde etkileyen harmonik akımlarına sebep olmaktadır (Emadi ve diğ., 2008). Ayrıca dengesiz gerilimler de ek kayıpların yanında güvenlik problemlerine neden olur (Taiwo ve diğ., 2018). Günümüzde harmonikli yük ve dengesiz besleme gerilimi, güç sistemlerinde meydana

getirdiği ek bakır kayıpları, transformator içindeki sıcaklık artışı, yalıtımın zarar görmesi, transformatorün ömrünün azaltılması ve sonuç olarak transformatorün bozulması gibi problemlerden dolayı güç kalitesi ile uğraşan uzmanlar için önemli bir konu haline gelmiştir (Najafi ve diğ., 2014). Sinüzoidal olmayan yük akımı ve dengesiz besleme gerilimi ile çalışma durumunda transformatorün indirgenmesi güvenli çalışma için basit ve kullanışlı bir yöntemdir. İndirgeme harmonikli yük ve dengesiz çalışma durumunda yük kapasitesini azaltmaktır. IEEEc57.110 bilinen yöntemleri açıklar ve harmonik yük altında, k-faktörü ve harmonik kayıp faktörü F_{HL} 'ye bağlı basit ve temel indirgeme için çözümler sunar (ANSI/IEEE Std., 1988).k-faktörüne bağlı transformatorün indirgemesi özellikle yük akımları yüksek harmonikli olduğu zaman ısınmanın tehlikeli boyutta olmayacağını göstermekte kullanılabilir. Sinüzoidal olmayan besleme gerilimi olduğu zaman indirgeme faktörünü hesaplamak için (Taheri ve diğ., 2012)'de iteratif bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma frekans ve zaman domeni tekniklerinin birleşiminden oluşmaktadır. İndirgeme faktörünü hesaplamak için yazarlar tarafından nominal kayıplar ve çıkış gerilimi durumunda görünür gücü kullanılmıştır. IEEEc57.110 standartlarına bağlı k-faktörü (Gouda ve amer.2011)'in açıkladığı harmonikli yük akımının neden olduğu aşırı ısınmaya karşı korunmak için tasarlanmıştır. Bu makalede 25 MVA, 220/ 66 KV transformatorlü Toshke pompa incelenmiştir. k-faktörü harmonik filtreli ve harmonik filtresiz durumları için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonucu harmonik filtresiz hesaplanan k-faktörünün harmonik filtreli hesaplanan k-faktörünün değerinden yüksek olduğunu göstermiştir.(Faiz ve diğ., 2015)'de, sinüzoidal olmayan yük durumunda transformatorün indirgenmesi için IEEE standartları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Eşdeğer KVA'yı hesaplamak için girdap akımı kayıpları ve diğer sargı kaçak kayıpları için F_{HL} hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda harmonik yüklerin transformator kayıplarında artışa sebep olduğu görülmüştür. Bu sebeple harmonikli durumda transformatorün eşdeğer KVA'sı azalır. (Rahmat, 2013)'de, harmonik akımlarının sebep olduğu ısınmalara karşı transformatorün korumasında k faktörünün önemini örneklerle gösterilmiştir. Çalışmamızın bir diğer kısmı dengesiz besleme gerilimi üzerinedir. Çoğunlukla, üç faz gerilimlerin dengesizlik yüzdesini belirlemek için negatif bileşenin pozitif bileşenine oranı kullanılır (Taghikhani ve rafiei.2011). Bu oran gerilim dengesizlik faktörü olarak tanımlanır (VUF). Gerilim dengesizliğinin tam tanımı için genlik ve açı bileşenlerinden oluşan kompleks gerilim dengesizlik faktörü (CVUF) kullanılır. (Bhushan ve diğ., 2012)'de bir indüksiyon motorunun performansını değerlendirmek için CVUF kullanmıştır. Endüstriyel güç sistemlerinde tek fazlı indüksiyon motorları, lokomotifler, indüksiyon ısıtma gibi büyük tek fazlı yükler gerilim dengesizliği oluşturan tipik örneklerdir. (Patne ve Takhre.2010)' da transformator bağlantı tiplerinin gerilim ve akım dengesizlik yayılımı üzerine etkilerini göstermiştir. Bu çalışmada dengesizlik yayılımını hesaplamak için VUF ve IUF indeksleri kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda transformatorün bağlantı tipinin dengesizlik yayılımı üzerinde önemli rol oynadığı gösterilmiştir. Asimetrik yük koşulları altında wye/wye ve delta/wye bağlantı şekillerinin büyük dengesiz gerilim ve akım yayılımına neden olmaktadır. Bu çalışmada, dengesiz besleme gerilimi ve harmonik yük altında transformatorü modellemek için zaman adımlı sonlu elemanlar yöntemi (ZASEY) kullanılmıştır. ZASEY bu koşullar altında dağıtım transformatorünün modellenmesi ve analizi için etkin bir yöntemdir. IEEEc57.110 standardına ve ZASEY'den elde edilen verilere dayanarak, bir dağıtım transformatorü farklı harmonik yükler ve dengesiz besleme gerilimi durumlarında harmonik kayıp faktörü (F_{HL}) ve k-faktörünü kullanılarak indirgenmiştir.



Şekil 1. M5 malzemesi B-H eğrisi
Figure 1. B-H curve of M5 material



Şekil 2. Harmonik yük altında Δ / Y bağlı üç fazlı transformatör
Figure 2. Three-phase transformer Δ / Y connected under harmonic load

Çizelge 1. Transformatörün elektriksel parametreleri

Table 1. Electrical parameters of the transformer

Nicelik	Değer	Birim
Birincil gerilim	34.5	KV
İkincil gerilim	0.4	KV
Anma gücü	100	KVA
Birincil sargının sarım sayısı	7469	.....
İkincil sargının sarım sayısı	50	.....
Pencere genişliği	180	Mm
Pencere yüksekliği	360	Mm
AG sargısı yüksekliği	310	Mm
YG sargısı yüksekliği	254	Mm

Euler, Runge Kutta gibi standart yöntemler, Klasik diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılabilir. SEY'in temelinde çalışılan bölgenin sonlu elemanlar olarak adlandırılan çok küçük alt bölgelere ayırmaktadır. Bu çalışmada 3 fazlı, Dy11, 100 kVA, 34.5kV/400V dağıtım transformatörü analiz edilmiştir. Kullanılan transformatörün karakteristik özellikleri Çizelge 1'de kısaca gösterilmektedir. Üç boyutlu modelde tüm ağ hücreleri tetrahedral şeklindedir. Transformatörün manyetik parametreleri ve geometrik büyüklükleri kullanılarak, transformatör içindeki manyetik alan dağılımını hesaplamak için SEY uygulanmıştır. (Ahn ve diğ., 2011)'da, manyetik vektör potansiyeli A 'nın geçici ve uzaysal değişimini:

$$\nabla^2 A - \mu\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu J_0 = 0 \quad (1)$$

olarak göstermiştir. Verilen eşitlikte μ manyetik geçirgenlik, σ elektriksel iletkenlik ve J_0 ise uygulanan akım yoğunluğudur.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = j\omega A \quad (2)$$

Kartezyen koordinatlarda, üç boyutlu modelde, manyetik alanın karmaşık modeli kullanılarak:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - j\omega \sigma A + J_0 = 0 \quad (3)$$

elde edilir. Manyetik vektör potansiyeli,

$$B = \nabla \times A \quad (4)$$

Elektrik devresinin temel eşitliği:

$$V_s = R_s i + L_s \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Bu çalışmada transformatör çekirdek laminasyonu için 0.30 mm kalınlığında silikon alaşımlı çelik levhalar kullanılmıştır. Şekil 1'de manyetik malzemenin B-H eğrisi gösterilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi doymuş akı yoğunluğu 1.9 tesladır. Şekil 2'de sinüzoidal kaynağa ve doğrusal olmayan yüke bağlı Δ/Y bağlı 3 fazlı transformatör gösterilmiştir. Diğer bir ifade ile transformatör manyetik modeli ile elektrik devresi arasındaki bağlantı gösterilmiştir. 0.2 ms zaman adımı ile geçici durum analizi benzetim çalışması yapılmıştır. Şekil 3'te farklı harmonik yükleri altında transformatör sargılarındaki vektörel akı dağılımı gösterilmiştir. Çizelge 2'de farklı harmonik koşullar altında transformatör sargılarındaki maksimum akı yoğunluğu gösterilmiştir. Benzetim sonuçlarına dayanarak, Şekil 3 ve Çizelge 2'den harmonik yük altında ve yük akımının THD_i'sı artarken transformatör sargılarındaki maksimum akı yoğunluğunun da arttığı anlaşılmaktadır. Sinüzoidal yük akımı durumunda, transformatör sargısındaki maksimum akı yoğunluğu 0.424 T'dir.

Çizelge 2. Transformatör sargılarındaki maksimum akı yoğunluğu

Table 2. Maximum flux density in transformer windings

Yük profili	Maksimum akı yoğunluğu (T)	Akı yoğunluğunun artışı
Sinüzoidal durum	0.424	.....
Harmonikli durum 1 (THD _i =12%)	0.466	9.9%
Harmonikli durum 2 (THD _i =23%)	0.471	11%

Çizelge 3. Harmonik yük akımı

Table 3. Harmonic load current

H	5	7	11	13	17	19	THD _i
Durum 1	0.104	0.061	0.02	0.0095	0	0	12%
Durum 2	0.22	0.064	0.04	0.034	0.012	0.0098	23%

Eğer harmonik yük akımı durumunda maksimum akı yoğunluğunun artışı sinüzoidal durumdaki ile karşılaştırılırsa, Çizelge 2'den de görülebileceği gibi, THD_i %12 iken %9.9, THD_i %23 iken %11 artış olmuştur. Şekil 4'te, verilen transformatör için farklı THD_i durumlarında sinüzoidal ve bozulmuş dalga şekilleri gösterilmiştir. Akımın harmonik spektrumu şekil 5'te görülmektedir. Çizelge 4'te THD_i=%12 ve THD_i=%23 için harmonik yük akımının özellikleri özetlenmiştir.

HARMONİK YÜK AKIMININ KAYIPLARA ETKİSİ (THE EFFECT OF HARMONIC LOAD CURRENT ON LOSSES)

Harmonik yük akımının transformatör üzerindeki en önemli etkisi nominal güç kayıplarını arttırmasıdır. Bu kayıplar da transformatör içinde ilave ısınmalara sebep olacaktır. Sıcaklıktaki ilave artışlar yalıtımın zarar görmesine ve arızalara neden olur. Harmonik akımın transformatör üzerindeki etkisi DC kayıplar, sargı girdap akımı kayıpları ve diğer kaçak kayıplardır.

DC Kayıplar (DC Losses)

Harmonik yük, yük akımının etkin değerinde artışa sebep olur. Sonuç olarak DC kayıplar yük akımının karesi ile orantılı olarak artacaktır.

$$P_{dc} = R_{dc} \times I^2 = R_{dc} \times \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_{h,\max}^2 \quad (6)$$

Sargı Girdap Akımı Kayıpları (Winding Eddy Current Losses)

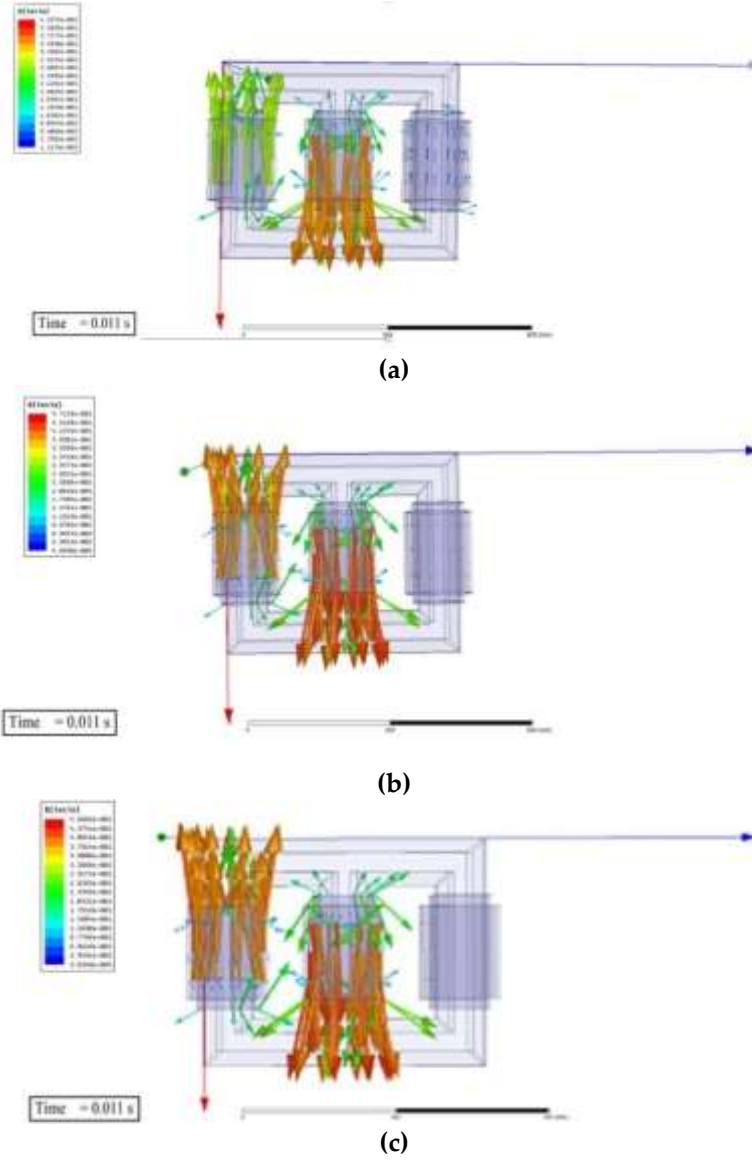
Sargı girdap akımı kayıpları yük akımının karesi ve harmonik frekansı ile orantılıdır. Harmonik yük akımının artması durumunda sargı girdap akımı kayıpları da artacaktır.

$$P_{EC} = P_{EC-o} \times \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2 \quad (7)$$

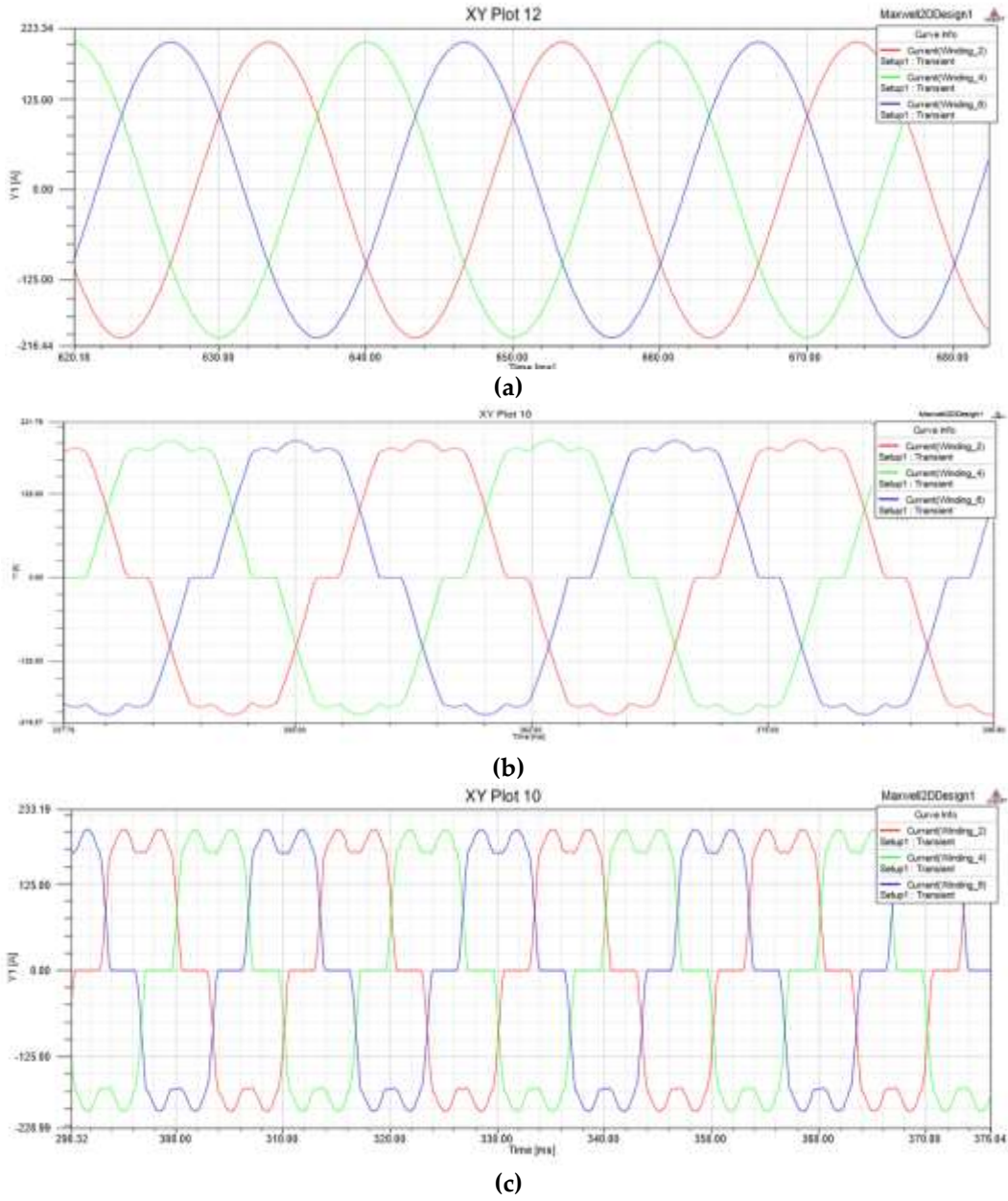
Sargı girdap akımları için harmonik kayıp faktörü:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-o}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 (\text{pu}) \times h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h)^2 (\text{pu})} \quad (8)$$

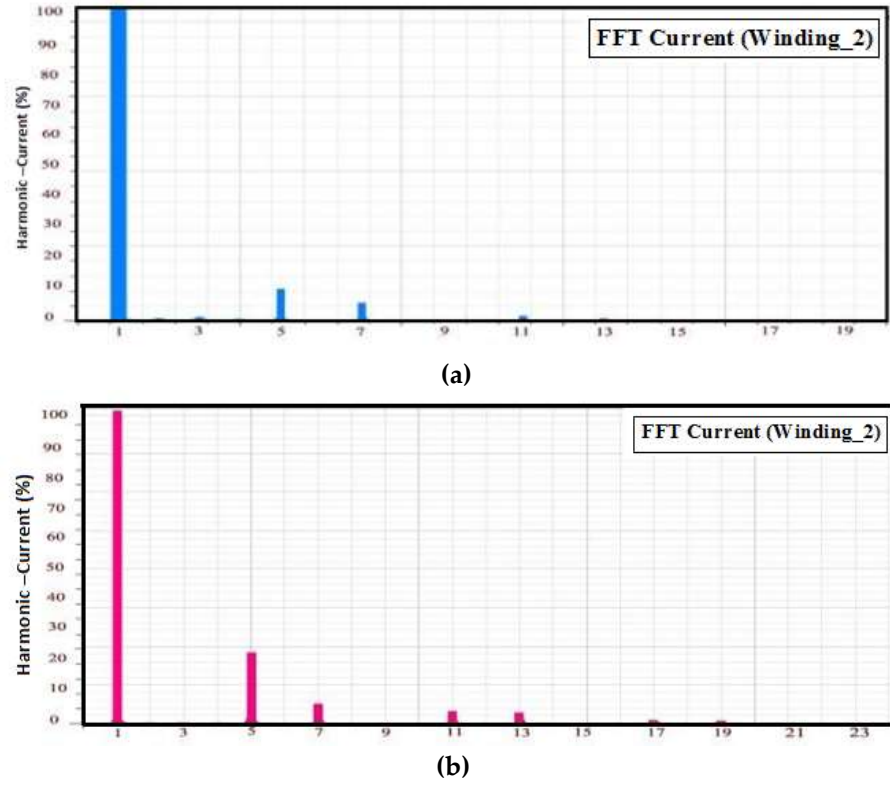
şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 3: Vektör akı yoğunluk dağılımı a) Sinüzoidal durum b) $THDI = 23\%$ c) $THDI = 12\%$
Figure 3: Vector flux density distribution a) Sinusoidal case b) $THDI = 23\%$ c) $THDI = 12\%$



Şekil 4: Yük akımı a) Sinüzoidal durum b) $THD_I = 12\%$ c) $THD_I = 23\%$
 Figure 4: Load current a) Sinusoidal case b) $THD_I = 12\%$ c) $THD_I = 23\%$



Şekil 5: Yük akımının harmonik spektrumu a) $THDI = 12\%$ b) $THDI = 23\%$

Figure 5. Harmonic spectrum of load current a) $THDI = 12\%$ b) $THDI = 23\%$

Diğer Kaçak Kayıplar (Other Stray Losses)

Diğer kaçak kayıplar akımın etkin değerinin karesi ve harmonik derecesinin 0.8. kuvveti ile orantılıdır. Diğer kayıplar için harmonik kayıp faktörü:

$$P_{OSL-L} = P_{OSL-o} \times \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0.8} \quad (9)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Çizelge 4. Sinüzoidal ve harmonik yük durumunda transformatör kayıpları ($THDI = 12\%$)

Table 4. Transformer losses in case of sinusoidal and harmonic load ($THDI = 12\%$)

Kayıp türü	Anma kayıp gücü (w)	Harmonik yük akımı durumunda kayıplar ($THDI = 12\%$) (w)	Harmonik kayıp faktörü (SEY&IEEE)	Harmonik yük durumunda düzeltilmiş kayıplar (w)
Yüksüz	271	271	-----	271
DC	1575	1711	-----	1711
Sargı girdap akımı	50	63.34 (SEY)	1.266 (SEY)	80.188 (SEY)
		75,7 (IEEE)	1.49 (IEEE)	112.793 (IEEE)
Toplam	1896	2045,34 (FEM)	-----	2062,188 (FEM)
		2057.7 (IEEE)	-----	2094.793 (IEEE)

Çizelge 5. Sinüzoidal ve harmonik yük durumunda transformatör kayıpları (THD₁ %23)*Table 5. Transformer losses in case of sinusoidal and harmonic load (THDI 23%)*

Kayıp türü	Anma kayıp gücü (w)	Harmonik yük akımı durumunda kayıplar (THD ₁ =%23)(w)	Harmonik kayıp faktörü (SEY&IEEE)	Harmonik yük durumunda düzeltilmiş kayıplar(w)
Yüksüz	271	271	-----	271
DC	1575	1809	-----	1809
Sargı girdap akımı	50	88.53 (SEY)	1.77 (SEY)	156.69 (SEY)
		147 (IEEE)	2.78 (IEEE)	408,66 (IEEE)
Toplam	1896	2169 (FEM)	-----	2236.69 (FEM)
		2227 (IEEE)	-----	2488.66 (IEEE)

Diğer kaçak kayıplar için harmonik kayıp faktörü şöyle hesaplanır:

$$F_{HL-STR} = \frac{P_{OSL}}{P_{OSL-o}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 (pu) \times h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h)^2 (pu)} \quad (10)$$

Çizelge 4 ve 5, harmonik yükten dolayı oluşan bakır kaybı ve girdap akımı kayıplarındaki artışı göstermektedir. Çizelgelerde görüldüğü üzere, harmonik yük altında ve THD₁ %12 iken toplam kayıp SEY'ye göre %8.7, IEEE standardına göre %10.4 artmıştır. Harmonik yük altında ve THD₁ %23 iken toplam kayıp, SEY'e göre %17.9, IEEE standardına göre %31.2 artmıştır.

F_{HL} ve K-FAKTÖRÜNE GÖRE HARMONİK YÜK AKIMI ALTINDA TRANSFORMATÖRÜN İNDİRGENMESİ (DERATING OF TRANSFORMER UNDER HARMONIC LOAD CURRENT ACCORDING TO F_{HL} and K-FACTOR)

Transformatörün indirgenmesi sinüzoidal olmayan ve dengesiz çalışma koşullarında güvenli işletme için basit ve faydalı bir yöntemdir. Denklem (8) IEEE c57.110 standardına göre harmonik kayıp faktörünün hesaplanmasını göstermektedir. Bu eşitlikte F_{HL}'nin harmonik derecesinin karesi ile orantılı olduğu görülmektedir. Bu hipotez küçük transformatörler için geçerlidir, fakat yüksek THD₁'ya sahip büyük transformatörler için bu hipotez yetersiz kalabilir. Çizelge 6 ve 7, THD₁=%23 ve THD₁=%12 için IEEE standardına göre hesaplanmış F_{HL} değerlerini göstermektedir. Çizelge (8) ise IEEE standardına ve SEY'e göre harmonik kayıp faktörü değerlerini göstermektedir. Çizelge 8'e göre THD₁ arttıkça IEEE ve SEY'e göre hesaplanan F_{HL} arasındaki fark artmaktadır. Durum 1 (THD₁=%12) için, F_{HL}, IEEE standardına göre 1.49, SEY'e göre 1.266 çıkmıştır. Durum 2 (THD₁=%23) için, F_{HL}, IEEE standardına göre 2.78, SEY'e göre 1.77 çıkmıştır. Sonuçlara göre fark %36.3 olmuştur. Elde edilen verilere göre, yüksek THD₁ durumunda IEEE standardı ve SEY'e göre hesaplanan F_{HL} değerleri arasındaki fark artmaktadır.

Çizelge 6. IEEE standartlarına göre hesaplanan harmonik kayıp faktörü (THD_i=%23)*Table 6. Harmonic loss factor calculated according to IEEE standards (THDI = 23%)*

H	I _h /I ₁	(I _h /I ₁) ²	h ²	(I _h /I ₁) ² *h ²
1	1	1	1	1
5	0.22	0.0484	25	1.21
7	0.064	0.004	49	0.196
11	0.04	0.0016	121	0.193
13	0.034	0.00156	169	0.263
17	0.012	0.00014	289	0.041
19	0.009	0.00009	361	0.0346
	8	6		
		Σ=1.055		Σ=2.94
F_{HL} = 2.78				

Çizelge 7. IEEE standartlarına göre hesaplanan harmonik kayıp faktörü (THD_i=%12)*Table 7. Harmonic loss factor calculated according to IEEE standards (THDI = 12%)*

H	I _h /I ₁	(I _h /I ₁) ²	h ²	(I _h /I ₁) ² *h ²
1	1	1	1	1
5	0.104	0.0108	25	0.27
7	0.061	0.0037	49	0.181
11	0.02	0.0004	121	0.048
13	0.009	0.00009	169	0.0152
	5			
		Σ=1.0149		Σ=1.514
F_{HL} = 1.49				

Çizelge 8. IEEE standartlarına ve SEY'e göre hesaplanan harmonik kayıp faktörü (THD_i=%12)*Table 8. Harmonic loss factor calculated according to IEEE standards and FEM (THDI = 12%)*

	F _{HL} (SEY)	F _{HL} (IEEE)
Durum 1 (THD _i =12%)	1.266	1.49
Durum 2 (THD _i =23%)	1.77	2.78

Gücü 630 kVA'dan az olan transformatörler için maksimum girdap akımı kayıpları,

$$P_{EC-max}(pu) = \frac{0.8P_{EC-R}}{I_{2-R}^2 R_2} \quad (11)$$

Gücü 630 kVA'dan fazla olan transformatörler için,

$$P_{EC-max}(pu) = \frac{2.8P_{EC-R}}{3I_{2-R}^2 R_2} \quad (12)$$

şeklinde hesaplanabilir. İzin verilen maksimum sinüzoidal olmayan akımın etkin değeri,

$$I_{mak}(pu) = \left[\frac{P_{LL-R}(pu)}{1+F_{HL}P_{EC-max}(pu)} \right]^{0.5} \quad (13)$$

şeklinde hesaplanır.

Çizelge 9. (FHL) kullanılarak IEEE ve FEM'e göre harmonik yük akımı altında trafo indirgenmesi

Table 9. Derating of transformer under harmonic load current using (FHL) according to IEEE and FEM

	Durum1 THDI=%12	Durum 2 THDI =%23
FHL 'e göre Imak FHL (SEY)	0.917	0.885
FHL 'e göre Imak (IEEE)	0.90	0.83
Kapasitedeki azalışın yüzdesi (SEY)	8.3	11.5
Kapasitedeki azalışın yüzdesi (IEEE)	10	17
FHL 'e göre eşdeğer kapasite (SEY)	91.7	88.5
FHL 'e göre eşdeğer kapasite (IEEE)	90	83

Çizelge 9, izin verilebilecek maksimum sinüzoidal olmayan yük akımı ve harmonik kayıp faktörü kullanılarak IEEE standardı ve sonlu elemanlar yöntemine göre harmonikli yük akımı durumunda transformatörün indirgeme sonucunu göstermektedir. Ayrıca, durum 1 (THDI=%12) için SEY'e göre 91.7 IEEE'ye göre 90 kVA ve fark %1.7, durum 2 (THDI=%23) için SEY'e göre 88.5 IEEE'ye göre 83 kVA ve farkın %5.5 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek THDI için, IEEE standardı ile SEY'e göre hesaplanan değerler arasındaki fark artmaktadır. Başka bir ifade ile, IEEE standardına göre hesaplanan eşdeğer kVA, SEY'e göre hesaplanan değerden daha küçüktür. Bu nedenle yüksek THDI durumunda, transformatörün indirgenmesi için IEEE standardı basit ve yetersiz bir yöntem iken SEY daha kesin ve doğru sonuç veren bir yöntemdir.

IEEE Standardı Ve ZASEY İle k-Faktörüne Dayalı Transformatörün İndirgenmesi (Derating of transformer based on k-factor with IEEE Standard and TSFEM)

Harmonik yük akımı durumunda, standart transformatörler aşırı ısınabilir ve erken arıza verebilir. K-oranlı transformatörler harmonik akımlarından dolayı oluşan ısınmayı analiz etmek için tasarlanmıştır. Standart transformatörlerde k-faktörünün değeri birdir. K-faktörünü hesaplamak için ilk adım toplam akımın etkin değerinin hesaplanmasıdır. Durum 1 (THDI=%12) için bu değer 1.0074, durum 2 (THDI=%23) için ise 1.027 A'dır. Daha sonra, her bir harmonik akımın orantısal kareleri hesaplanabilir ve k-faktörünün değeri hesaplanabilir. k-faktörü

$$K - \text{faktör} = \sum_{h=1}^{h=h_{\text{mak}}} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 = \frac{1}{I_R^2} \sum_{h=1}^{h=h_{\text{mak}}} I_h^2 h^2 \quad (14)$$

şeklinde verilebilir. Çizelge (10) ve (11), THDI=%12 ve THDI=%23 durumları için IEEEc57.110 standardına göre hesaplanmış k-faktörünün değerlerini göstermektedir. Çizelge (12), THDI artarken, IEEE standardı ve SEY'e göre hesaplanan k-faktörleri arasındaki farkın arttığını göstermektedir. Durum 1 (THDI=%12) için, k-faktörü IEEE standardına göre 1.495, SEY'e göre 1.284 bulunmuştur ve hesaplanan değerler arasındaki fark %14.1'dir. Durum 2 (THDI=%23) için, k-faktörü IEEE standardına göre 2.73, SEY'e göre 1.867 bulunmuştur ve hesaplanan değerler arasındaki fark %31.6'dir. k-faktörünü ve transformatör parametrelerini kullanarak, sinüzoidal olmayan yük akımının maksimum izin verilebilen etkin değeri

$$I_{\text{mak}}^{\text{pu}} = \sqrt{\frac{R_{\text{DC}} + R_{\text{ECL-R}}(1-k) \frac{\Delta P_{\text{fe}} + \Delta P_{\text{osl}}}{I_R^2}}{R_{\text{DC}}}} \quad (15)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Çizelge 10. THD_r=%12 için hesaplanan k-faktörü*Table 10. k-factor calculated for THDI =12%*

H	I _h /I ₁	(I _h /I ₁) ²	I _h /I	(I _h /I) ²	(I _h /I) ² *h ²
1	1	1	0.992	0.984	0.984
5	0.104	0.0108	0.1032	0.0106	0.27
7	0.061	0.0037	0.060	0.0036	0.178
11	0.02	0.0004	0.0198	0.00039	0.048
13	0.0095	0.00009	0.0094	0.000088	0.015
	ΣToplam rms = 1.0074	Σ=1.0149			Σ=1.495
k-faktör = 1.495					

Çizelge 11. THD_r=%23 için hesaplanan k-faktörü*Table 11. k-factor calculated for THDI = 23%*

H	I _h /I ₁	(I _h /I ₁) ²	I _h /I	(I _h /I) ²	(I _h /I) ² *h ²
1	1	1	0.973	0.948	0.948
5	0.22	0.0484	0.214	0.0459	1.147
7	0.064	0.00409	0.062	0.0039	0.191
11	0.04	0.0016	0.0389	0.00156	0.188
13	0.034	0.00115	0.0331	0.0011	0.186
17	0.012	0.000144	0.0116	0.000137	0.0395
19	0.0098	0.000096	0.0095	0.000091	0.0328
	ΣToplam r.m.s=1.027				Σk-faktör=2.73
k-faktör=2.73					

Çizelge 12. IEEE standardı ve FEM'e göre hesaplanan k-faktörü*Table 12. K-factor calculated according to IEEE standard and FEM*

	k-faktör (SEY)	k-faktör (IEEE)
Durum 1 (THDI =%12)	1.284	1.495
Durum 2 (THDI =%23)	1.867	2.73

Denklem (15)'te, R_{DC} sargı direnci, RECL-R nominal frekansta oluşan girdap akımlarını temsil eden dirençtir ve ölçüm yöntemleri ile hesaplanabilir.

I_{mak}^k ve I^{FHL}_{mak} arasındaki ilişki

$$I_{\text{mak}}^{K2} = I_{\text{mak}}^{\text{FHL}^2} + F_{\text{HL}} P_{\text{EC-R}} (I_{\text{mak}}^{\text{FHL}^2} - I^2) \quad (16)$$

olarak verilebilir.

Çizelge 13. Harmonik yük akımı altında k-faktörünü kullanarak SEY ve IEEE standardına göre transformatörün indirgenmesi

Table 13. Derating of transformer according to FEM and IEEE standard using k-factor under harmonic load current

	Durum 1 THD _i =%12	Durum 2 THD _i =%23
K-fakör'üne bağlı I _{max} (FEM)	0.90	0.876
K-fakör'üne bağlı I _{max} (IEEE)	0.893	0.81
Kapasitedeki azalmanın yüzdesi (FEM)	10	12.4
Kapasitedeki azalmanın yüzdesi (IEEE)	0.107	0.19
k-faktör'üne göre eşdeğer kapasite (FEM)	90	87.6
k-faktör'üne göre eşdeğer kapasite (IEEE)	89.3	81

Çizelge 13, k-faktörü kullanılarak IEEEc57.110 standardına ve sonlu elemanlar yöntemine göre izin verilen azami sinüzoidal olmayan yük akımını ve harmonik yük akımı altında trafo indirgeme sonucunu göstermektedir. Çizelge 13'e göre durum 1 (THD_i=%12) için zaman adımlı sonlu elemanlar yöntemine ve IEEE standardına göre hesaplanan KVA değeri sırasıyla 90 ve 89.3'tür ve nominal KVA durumuna göre fark %0.7 olmuştur. Ayrıca durum 2 (THD_i=%23) için zaman adımlı sonlu elemanlar yöntemine ve IEEE standardına göre hesaplanan KVA değeri sırasıyla 87.6 ve 81 ve nominal KVA durumuna göre fark %6.6 olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre THD_i arttıkça IEEE standardı ve SEY'e göre hesaplanan değerler arasındaki fark artmaktadır. Başka bir ifadeyle, IEEE standardına göre hesaplanan eşdeğer KVA SEY'e göre hesaplanan değerden daha düşüktür. Eğer k-faktörü ve F_{HL}'ye dayanan transformatör indirgeme sonuçlarını karşılaştırırsak, k-faktörüne göre hesaplanan KVA F_{HL}'ye göre hesaplanan değere göre daha doğru ve kapsamlı, F_{HL}'ye göre hesaplanan I_{max} ise daha ekonomiktir. Bu nedenle k-faktörü tasarımdaki uygun trafoyu seçmek için kullanışlıdır.

DENGESİZ GERİLİM DURUMUNDA DAĞITIM TRANSFORMATÖRÜNÜN İNDİRGENMESİ (DERATING OF DISTRIBUTION TRANSFORMER IN UNBALANCED VOLTAGE CASE)

Gerilim Dengesizliğinin Büyüklüğünü Belirleme (Determining the Voltage Unbalanced Factor)

Dengesiz gerilim miktarını belirlemek için birkaç tanım mevcuttur.

IEEE Tanımı (IEEE Definition)

Son IEEE Std.1159 hem IEEE 112 ve 936 tanımlarını hem de negatif ve pozitif seri gerilimin ("gerçek değer") oranını vermektedir. IEEE gerilim dengesizliği miktarı

$$\%PVUR = \frac{\text{ortalama faz gerilimden maksimum sapma}}{\text{ortalama faz gerilimi}} \%100 \quad (17)$$

$$VUF = \frac{\max(V_a, V_b, V_c) - \min(V_a, V_b, V_c)}{V_{\text{ort}}} \quad (18)$$

şeklinde verilmektedir.

Doğru Miktar (IEC)

Fortescue bileşenleri veya simetrik bileşenler, üç fazlı bir sistemlerde gerilim veya akımındaki dengesizliği belirlemek için kullanılır. Üç fazlı sistem doğru veya pozitif bileşen ters veya negatif bileşen ve sıfır bileşen olarak üç sisteme ayrılmaktadır.

IEC tanımı:

$$\%VUR = \frac{\text{negatif dizi gerilim bileşeni}}{\text{pozitif dizi gerilim bileşeni}} \times \%100 \quad (19)$$

şeklinde verilmektedir.

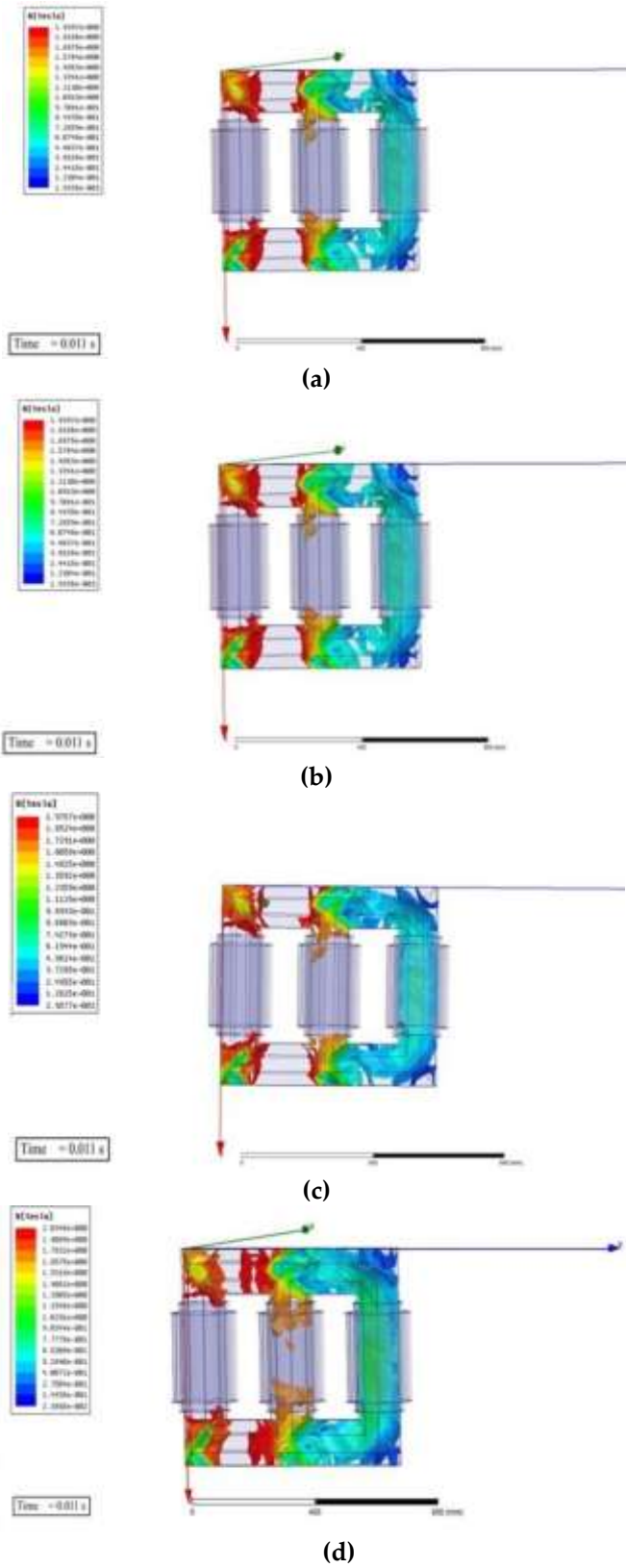
Yaklaşık Tanım (Approximate Description)

Gerilim Dengesizliğinin Yaklaşık Değeri Şöyle Hesaplanabilir:

$$VUF = \sqrt{\frac{1-\sqrt{(3-6\beta)}}{1+\sqrt{(3-6\beta)}}} \times \%100 \quad (20)$$

$$\beta = \frac{v_{ab}^4 + v_{bc}^4 + v_{ca}^4}{(v_{ab}^4 + v_{bc}^4 + v_{ca}^4)^2} \quad (21)$$

Burada V_{ab} , V_{bc} ve V_{ac} temel frekanstaki 3 fazlı sistemdeki faz-faz gerilim fazörlerini temsil etmektedir. Şekil (6) dengeli ve farklı dengesiz gerilim değerleri altında transformatör çekirdeğindeki akı yoğunluk dağılımını göstermektedir. Manyetik akı yoğunluğu ve manyetik vektör potansiyeli birbiri ile bağlantılıdır. Dengesiz gerilim altında transformatör çekirdeği içindeki akı yoğunluğu ve akı yoğunluğu dağılımı asimetrikdir. Bu nedenle çekirdek ve bakır kayıpları artmaktadır. Çizelge (14) VUF artışına karşı maksimum akı yoğunluğundaki artışı göstermektedir. Çizelge (14)'teki değerlere göre, kaynak gerilimi dengeli olduğu zaman maksimum akı yoğunluğu 1.91 tesla olmaktadır.



Şekil 6: Transformör çekirdeğindeki manyetik alan dağılımı a) dengeli gerilim b) dengesiz gerilim (durum 1) c) dengesiz gerilim (durum 2) d) dengesiz gerilim (durum 3)

Figure 6: Distribution of the magnetic flux density in the transformer core a) balanced voltage b) unbalanced voltage (state 1) c) unbalanced voltage (state 2) d) unbalanced voltage (state 3)

Eğer dengeli ve farklı dengesiz kaynak gerilimleri altındaki maksimum akı yoğunluğundaki artış karşılaştırılırsa, Çizelge 14'te görüldüğü gibi, birinci durumda VUF=0.015 iken artış %1.5, ikinci durumda VUF=0.032 iken artış %3.1 ve üçüncü durum için VUF=0.037 iken artış %6.3 olmuştur.

Çizelge 14. Transformatör çekirdeğindeki maksimum akı yoğunluğu

Table 14. Maximum flux density in transformer core

Gerilim tipi	Maksimum akı yoğunluğu (T)	
Dengeli durum	1.91	.....
Dengesiz durum 1	1.94	1.5%
Dengesiz durum 2	1.97	3.1%
Dengesiz durum 3	2.03	6.3%

Çizelge 15. Dengesiz gerilim altında kayıplardaki artışlar

Table 15. Increases in losses under unbalanced voltage

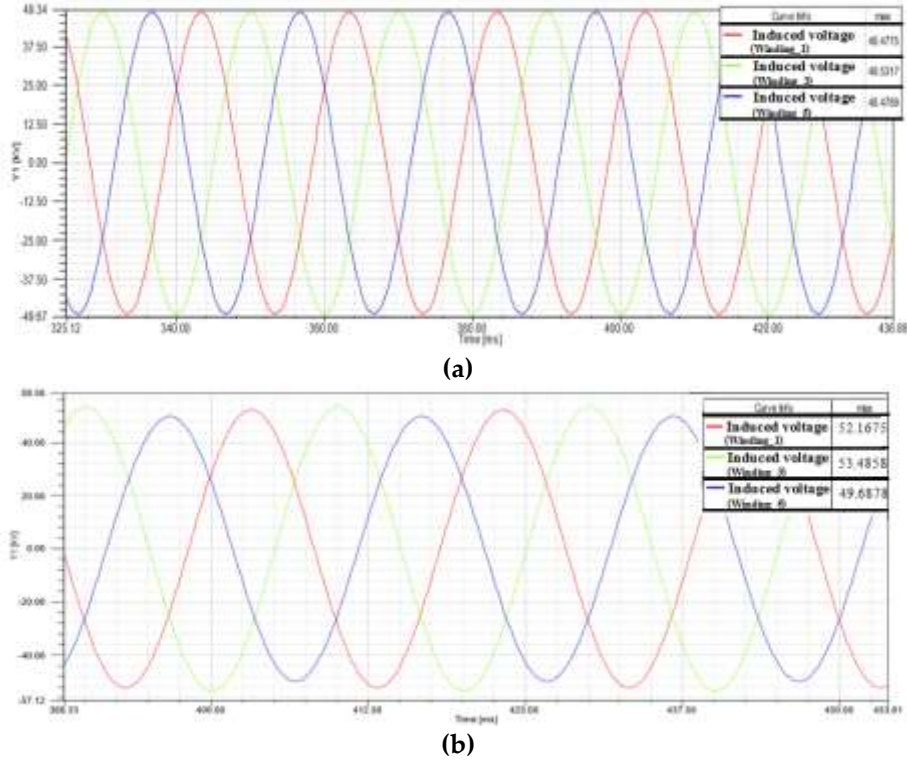
Besleme Gerilimi	Faz (a-b-c)	P fe(w)	P cu (w)	AC Kayıp (w)	Toplam Kayıp (w)	IEEE VUF %	Yaklaşık VUF %
Dengeli Durum	%0-%0-%0	271	1575	50	1896	-----	-----
Dengesiz Durum 1	0.015-0.043-0.03	288,13	1725	52,87	2066	0.015	0.017
Dengesiz Durum 2	0.07-0.09-0.025	307,49	1947	55.51	2310	0.032	0.035
Dengesiz Durum 3	0.12-0.10-0.08	332,55	1963	56.45	2351	0.037	0.039

Çizelge 16. Uygulanan indirgeme sonuçları

Table 16. Results of applied Derating

Dengesiz Gerilim	Dengesiz Gerilim Durum 1	Dengesiz Gerilim Durum 2	Dengesiz Gerilim Durum 3
I _{max} (pu)	0.931	0.92	0.90
Eşdeğer KVA	93.1	92	90

Şekil 7, verilen transformatörün denge ve dengesiz gerilim için indüklenen birincil maksimum gerilimi göstermektedir (durum 2). Çizelge 15 farklı dengesiz kaynak gerilimi altında çekirdek ve bakır kayıplarının önemli ölçüde arttığını ve VUF yüzdesindeki artışın, bu kayıplarda büyük bir artışa neden olduğunu göstermektedir. Çizelge 15'ten girdap akımı kayıplarındaki artışın az olduğu görülmektedir. Çizelge 16'da, gerilim dengesizliğinin yüzdesi artarken, üç durum için uygulanan indirgemenin sonuçları gösterilmiştir. Çizelge 16'ya göre gerilim dengesizliğinin derecesi artarken çekirdek ve bakır kayıpları artmaktadır ve bu nedenle indirgeme faktörü artmaktadır.



Şekil 7. Birincil sargıda indüklenen gerilim a) dengeli gerilim b) dengesiz gerilim (durum 2)
 Figure 7. Induced voltage in primary winding a) balanced voltage b) unbalanced voltage (case 2)

SONUÇ (RESULT)

Bu çalışmada, harmonik yük akımı ve zaman bölgesinde sonlu elemanlar yöntemi ile üç fazlı Dy11, 100 kVA, 34.5Kv/400V dağıtım transformatörünün benzetim çalışması yapılmıştır. Dağıtım transformatöründeki manyetik alan dağılımını görselleştirmek için üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (3-D SEY) kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları Çizelge 4 ve 5'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre harmonik yük altında bakır ve girdap akımı kayıpları artmaktadır. Çizelge 2' de gösterildiği gibi THD'nun artması ile transformatör sargısındaki maksimum akı yoğunluğu artmaktadır. F_{HL} ve k-faktörü kullanılarak IEEE standardı ve SEY'e göre yapılan transformatör indirgeme sonuçları Çizelge 9 ve 13'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre yüksek THD_i durumunda IEEEc57.110 standardı daha koruyucu bir yöntemdir çünkü IEEE standardına göre hesaplanan eşdeğer KVA, SEY'e göre hesaplanan KVA değerinden daha düşüktür. Bu nedenle SEY transformatörün indirgenmesi için daha kesin bir yöntemdir. Çizelge 14 farklı dengesiz gerilim durumlarında transformatör çekirdeğindeki maksimum akı yoğunluğunu göstermektedir. Sonuçlar, dengesi gerilim ve VUF oranında artış olması durumunda transformatör çekirdeğindeki akı yoğunluğu artmaktadır. Çizelge 15'e göre dengesiz gerilim durumunda çekirdek ve bakır kayıpları önemli ölçüde artmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- A. Emadi , Y. J. Lee , K. Rajashekara "Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles" IEEE Transactions on Industrial Electronics , Volume: 55 , Issue: 6 , Page(s): 2237 - 2245 ,June 2008 .
- O. P. Taiwo , R. Tiako, I. E. Davidson "Voltage Unbalance Mitigation and Voltage Profile Enhancement in Secondary Distribution System Using Dynamic Voltage Restorer" International Journal of Engineering Research in africa ,Volume 34,pages : 81-101, 2018.

- A. Najafi, I. Iskender, N. Genc, "Evaluating and Derating of Three-Phase Distribution Transformer Under Unbalanced Voltage and Unbalance Load Using Finite Element Method" *IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO-2014*.
- S. Taheri, A. Gholami, I. Fofana, H. Taheri "Modeling and simulation of transformer loading capability and hot spot temperature under harmonic conditions" *Electric Power Systems Research*, Volume 86, Pages 68-75, May 2012.
- O. E. Gouda, G. M. Amer, "A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation, ETASR-Engineering, Technology & Applied Science Research, 114-120, Vol. 1, no. 5. 2011.
- J. Faiz, M. Ghazizadeh, H. Oraee "Derating of transformers under non-linear load current and non-sinusoidal voltage—an overview" *IET Electric Power Applications*, Volume 9, Issue 7, p. 486 – 495, 2015.
- M.A. Taghikhani, M. Rafiei "Thermal coefficient measurements of typical distribution transformers operating under imbalance conditions, 16th Electrical Power Distribution Conference, 2011.
- S. Bhushan, K. Asheesh, P. Thakur "Assessment of induction motor performance under voltage unbalance condition" *IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Hong Kong, 2012.
- N.R. Patne¹ and K.L. Thakre¹ "Effect of transformer type on estimation of financial loss due to voltage sag-PSCAD/EMTDC simulation study" *IET Generation, Transmission & Distribution*, Volume 4, Issue 1, pages:104-114, 2010.
- Hyun-Mo Ahn, Ji-Yeon Lee, Joong-Kyoung Kim "Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer" *IEEE Transactions on Industry Applications* (Volume: 47, Issue: 3, Page(s): 1267 – 1272, May-June 2011).
- E. Rahmat "Analisa Pengaruh Harmonisa Terhadap Faktor-K Pada Transformator" *SP - Electrical Engineering'* <http://respository.usu.ac.id/handle>, 2013.



DEVELOPMENT OF A WEBGIS BASED AIR QUALITY GEOPORTAL FOR MONITORING AND MANAGING AIR QUALITY IN ISTANBUL

Fatih SARI

Selçuk Üniversitesi, Çumra Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Konya, TURKEY
fatih.sari@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 31.10.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.12.2019)

ABSTRACT: This study describes the development of an Air Quality GeoPortal (AQG) via a Web-based Geographic Information System (WebGIS) in Istanbul in Turkey. The system has been developed for online use to present the concentrations of PM10, SO2, NOX, NO, NO2 CO, as well as meteorological data (temperature, humidity, wind speed and direction) based on hourly data from each air quality monitoring station. A prototype system is providing the viewing, querying and downloading of up-to-date air quality maps on web pages via a Web Based GIS system based on Open Geospatial Consortium (OGC) web services. Furthermore, the integration of a Web Map Service-Time (WMS-T) with air quality data allows users to access previous data and related maps by specifying a time value on a web page. Thus, it is possible to download air quality parameters in desktop GIS systems and web pages in map format for a desired time interval. The system architecture is based on open source software integration including GeoServer and OpenLayers functions, MySQL database for data management, with HTML, JavaScript and PHP as programming languages in both the server and client scripting. Furthermore, the user interfaces are programmed to provide user-data interaction via web. The application includes the facility to download air quality data on an hourly basis raster (Tiff, Bmp, and Jpeg) and vector (ShapeFile, GML, Json and CSV) format.

Key Words: Air Quality Monitoring, WebGIS, GeoPortal, Web Services, Interoperability

İstanbul İlinde Hava Kalitesi İzleme ve Yönetimi için WebGIS Tabanlı Hava Kalite GeoPortalı Tasarımı

ÖZ: Bu çalışmada İstanbul ili için WebCBS tabanlı Hava Kalite Geoportalı (HKG) tasarımını içermektedir. Sistem, havada bulunan PM10, SO2, NOX, NO, NO2 CO konsantrasyonlarını ve bununla birlikte meteorolojik parametrelerin de (sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve rüzgar yönü) ölçüm istasyonları bazında saatlik olarak online şekilde görülebilmesini sağlamaktadır. HKG sistemi Open Geospatial Consortium (OGC) web servislerini kullanarak hava kalite haritalarının sunumunu, indirilmesini ve sorgulanmasını sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Ayrıca WMS-T web servis standardının da sisteme entegre edilmesi ile birlikte belirli bir zamana ait haritalara ulaşma ve sorgulama mümkün olabilecektir. Böylelikle istenilen zamana ait hava kalitesi verileri masaüstü CBS yazılımlarında kullanılabilir yada web sayfasında görüntülenebilecektir. HKG sistemi openlayers ve Geoserver entegrasyonu ile oluşturulmuş olup MySQL veritabanı yönetim sistemi ve hem sunucu hem de istemci taraflı kodların yazılması için HTML, PHP ve JavaScript kodlarını içermektedir. GeoPortal ara yüzü kullanıcı odaklı olarak ve verilerle etkileşim içerisinde bulunulabilecek şekilde tasarlanmıştır. Uygulama aynı zamanda saatlik hava kalitesi verisini raster (Tiff, Bmp, and Jpeg) ve vektör (ShapeFile, GML, Json and CSV) formatta indirmeye olanak verecek şekilde tasarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hava Kalitesi İzleme, WebCBS, GeoPortal, Web Servisleri, Birlikte Çalışabilirlik

INTRODUCTION

Monitoring and determining air quality is becoming more important in fast developing cities, various authors have reported that rapid economic development, urbanization and population growth in large cities has led to severe air pollution in urban areas (Liu et al., 2008; Guéguen et al., 2011; Ma et al., 2011). As cities expand the level of the emissions of air pollutants increases due to home heating, vehicles and industrial activities. These pollutants include; carbon monoxide (CO), particulate matter (PM₁₀), ground level ozone (O₃), nitrogen dioxide (NO₂), nitrogen oxides (NO_x), and sulfur dioxide (SO₂) (Lippmann, 2003; Brunekreef and Holgate, 2002; Kassomenos et al., 2008). The outdoor level of nitrogen dioxide (NO₂) is an indicator of any combustion-related process. SO₂ and chemical substances such as polychlorinated biphenyls (PCBs) and PAHs are a result of industrial and human activities, such as use of vehicles and residential heating facilities (Cooper et al., 1996; Biterna and Voutsas, 2005). Particulate matter (PM) can carry multiple trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) that can have harmful effects on reproductive health (Zhou et al., 2014). The amount of pollution in cities has an effect on human health with children and the elderly particularly at risk therefore, it is important to monitor air quality continuously to determine the distribution and levels of pollutants. It is estimated that more than 1 billion people are exposed to outdoor air pollution annually. Urban air pollution is linked to up to 1 million premature deaths and 1 million pre-native deaths each year (UNEP, 2015). Douglas et al, (1993) declared that there is a association between particulate air pollution and daily mortality rates and ground-level ozone O₃ and fine particulate matter PM_{2.5} are associated with increased risk of mortality (Fann et al, 2011).

To ensure the public good, air quality information must be transparently available to all stakeholders, from citizens to authorities to industry. Hence the need for a portal, and its supporting needs for data storage, management, retrieval and visualization. Many cities have continuous ambient air quality stations located in urban areas with measurements typically used to assess the ambient air quality against national standards for air pollutants (Elangasinghe et al., 2014). Since air quality is a public good its socially optimal level of provision cannot be ensured through markets. Therefore, the responsibility for this provision is generally allocated to the environmental authorities, which have to set policies and regulations to mitigate pollution externalities (Westerlund et al., 2014). Air quality monitoring is one of the tools available to these institutions to manage effects of air pollution. Thus, data storage, management, analysis and mapping platform is required to monitor air quality efficiently.

Geographical Information Systems (GIS) plays a major role in interacting with spatial data in the view, analyze, query and storage fields. Thus, GIS facilities allow for the evaluation, modeling, analyzing, determining and mapping of air quality. However, multi-disciplinary projects that work with distributed databases and access the updated data requires an interoperability concept and there must be some protocols to access the spatial data. However, with desktop GIS systems, it is being expensive to get licenses of softwares. Currently, Web based GIS systems (WebGIS) provide a way of interacting with spatial data through internet without installing any software and entirely open source.

In addition to desktop GIS, over the past decade WebGIS have been making rapid progress and due to the innovations and developments in software, hardware and networking, WebGIS have become the preferred system. Fast processing units, a large amount of memory allows the analysis of high-resolution raster images, intensive algorithms, data visualizations and spatial analysis (Kulawiak et al., 2010). Additionally, network bandwidths and sharing large amount of data through the internet makes WebGIS applications more suitable and useful for multi-user systems.

Another concept in the WebGIS structure is the GeoPortal system, which allows users to access spatial data and its metadata via web interfaces. GeoPortal Systems are generated to provide accessing, querying, visualizing functions of spatial data based on WebGIS structure. There are many different GeoPortal definitions are available in the literature which highlight accessing spatial data via the web. BEA (2008) systems defined the GeoPortal as a website, which is only one way to access spatial data and its applications. The Java Portlet specification defines the GeoPortal as personal or common web applications which combine spatial data from different sources or data providers (Abdelnur and Hepper, 2003).

According to the ESRI, (2013), GeoPortal is a system to access spatial data without depending on location, format and data types. The Open Geospatial Consortium (OGC) defines the GeoPortal as a human interface to collect online spatial data sources, spatial datasets and services together (OGC, 2004).

In the literature, there are several GIS based applications that model and analyze air quality to determine air pollution. This research aims to constitute a model to measure air quality and include spatial analysis, data store and GIS based solutions. Although there are several GIS based solutions for determining air quality, unfortunately there are few models that integrate WebGIS solutions and web services to monitor or measure air quality.

It is possible to divide air quality literature into modeling, modeling via GIS and determination via WebGIS. Modelling refers to a set of scientific methods that are used to represent the complicated processes that govern meteorology and the behavior of pollutants in the atmosphere (British Columbia, 2014). The use of GIS adds extra value to air quality modeling with data management, visualization and query functions. Lin and Lin, (2002), Jensen et al., (2001) and Bellander et al., (2001) have developed systems to measure transport and traffic-related air pollution and air quality according to the streets through GIS. Some research on GIS based air quality determining in urban areas has been developed by Puliafito et al., (2003), Cyrus et al., (2005), Elbir et al., (2010), Vienneau et al., (2009), Bealey et al., (2007) and Dalvi et al., (2006) including air quality management systems and GIS based air pollution models. Elbir, (2004), Cinderby and Forrester, (2005) and Lim et al., (2005) have developed GIS based air quality monitoring systems as decision support system and air quality monitoring tools.

Although various authors have developed GIS based solutions for determining air quality the results are never fully used because other users such as local institutes and scientific organizations are unable to access the data. In order to efficiently use and analyze the air quality data, the concept of interoperability should be established for the sharing and accessing data via WebGIS. The limited amount of research into WebGIS (Gkatzoflias et al., 2013) and (Triantafyllou et al., 2006) shows that there is a gap in the field of management and modeling air quality via this system. Real-time Air Quality Index Visual Map (AQI, 2015) is serving air quality index value around the world. The system is only serving AQI values and not including any map illustration of parameters and also download option. The download option is only provided by EarthExplorer (USGS, 2015), however, this system is not serving air quality data and including MODIS land surface temperature and emission data. Tropospheric Emission Monitoring Internet Service (TEMIS, 2015) is supplying air quality parameters with radar illustrations. The data are being provided at world scale and it is possible to query with time parameter. Airnow AQI forecast is applied by Airnow (2015), to visualize AQI in America. The system only serves AQI value with limited map illustration.

The Air Quality GeoPortal (AQG) aims to add functionality to air quality researches through a new approach and resolve the problem of both the accessibility of the raw and analyzed air quality data in an innovative way. The main aim of the current study is to create a GeoPortal system based on WebGIS via web services to provide accessible and usable air quality data and maps through the web with user-friendly interfaces. Due to the interoperability platform the AQG system can be easily used by environmental authorities and scientific organizations. Web services and time based web services are used to generate maps through the interaction of web interfaces and OGC standards. One of the important objectives of the AQG is demonstrated by the download service within the GeoPortal which allows users to obtain air quality data in both map and numerical format for desired time interval. Thus, this download service and the WMS-T application, which WMS-T is a OGC standard to retrieve data according to time parameter, fill the gap in the existing air quality research via WebGIS.

Development of the Air Quality GeoPortal

GIS is important in terms of analyzing air quality, however, it is easier to share-view data and establish interoperability concept between all stakeholders via WebGIS. The system aims to provide an infrastructure for air quality data to ensure use of data both web pages or within GIS softwares via WMS or WFS database connection tools. Viewing and downloading options of historic data for both GIS and

non GIS expertise users become possible with this system. The system is also become a technical platform for all air quality data users without installing any software with adhering to OGC standards. The data to examine air quality will be accessible with a single web site with all other functions as like download ability of common data formats, query according to a time interval and view maps via web pages. These facilities will be achieved by constituting a GeoPortal system based on WebGIS but some options such as download and temporal query should be programmed manually within the GeoPortal system. The details of developed interface and services are explained in this section with the main structure of the GeoPortal given in Fig.1.

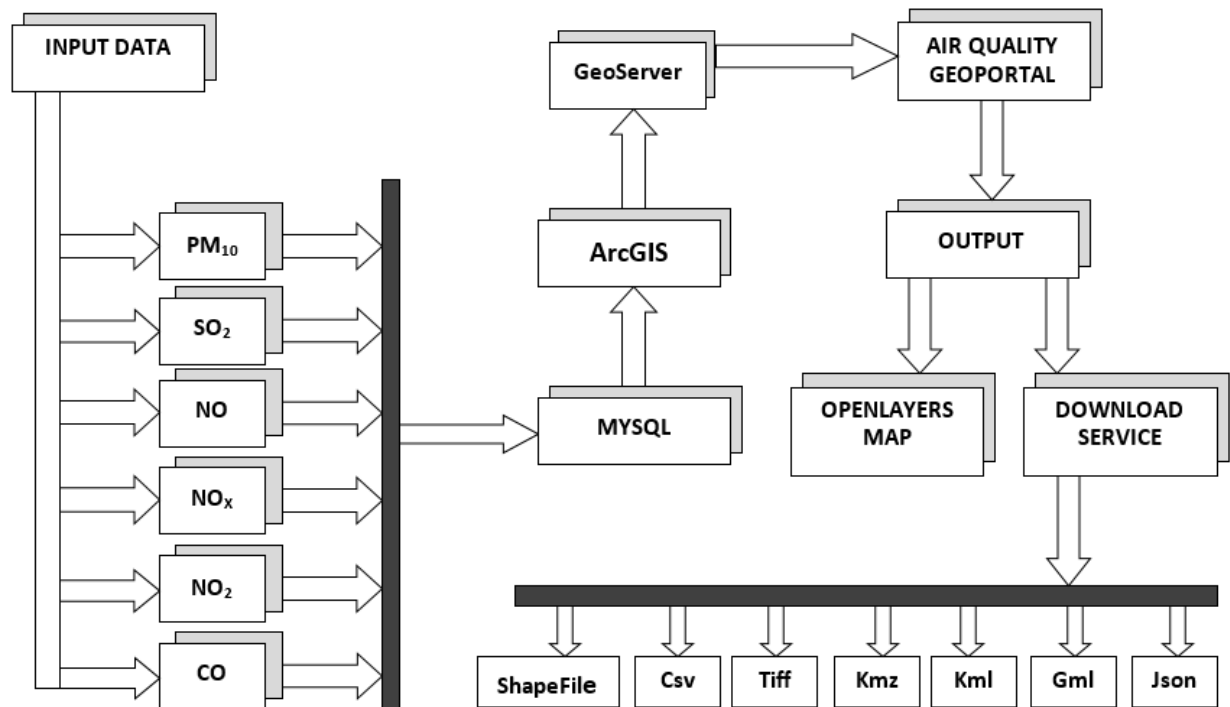


Figure 1. Air quality geoportal system structure

As can be seen in Figure 1, The AQG uses several softwares which are orchestrated to constitute AQG including database, GIS, Geographical Data Server and additional JavaScript codes. The output of any software is being an input data to another software and the processes are realized considering the requirements of softwares. Constituted platform requires to consider data formats, coordinate systems, licenses and web protocols to transfer data between softwares.

Study Area

Istanbul has a population of 14,16 million and it is one of fastest growing mega cities. The large population together with the rapid growth of the urban area, inappropriate site selection for industrial facilities, the use of old technologies in industry and vehicles all contribute to air pollution, which is a serious problem in the city. Monitoring the air quality in the city is an essential first step to determining the measures to reduce air pollution. There are ten air quality observation stations located around Istanbul city centre. These stations observe and record ambient temperature, wind direction, wind speed, relative humidity, pressure, rain, PM10, SO2, NO, NO2, NOX and CO values. The stations and the surrounding study area are given in Fig.2.



Figure 2. Study area and monitoring stations

Air Quality Data Preparation

The Air Quality GeoPortal (AQG) retrieve hourly measurements of PM₁₀, SO₂, NO_x, NO, NO₂ and CO from 01.03.2014 to 01.03.2000 for each of the stations. Since the air quality is measured hourly, it is necessary to use a database system. In the current study, the values are stored in MySQL database; both the GeoServer and ArcGIS include connection tools to the MySQL database. The GeoServer software can retrieve data from the MySQL database and present the data via web services. However, presenting table data without any map presentation limits the objective of the AQG thus the MySQL database is used in ArcGIS to produce the maps. The combination of ArcGIS and MySQL constitutes good integration for data management and mapping functions in GIS and WebGIS concept. AQG retrieves data from ArcGIS automatically, thus up-to-dated data can be integrated without any user interact processes. Part of the MySQL table for the measurements taken at 01.03.2014-14:00:00 are given in Table 1.

Table 1. Mysql table and stored parameters

Station_id	Station_name	PM10	SO2	NO	NOX	NO2	CO	TEMP.	WIND_SPEED	TIME
1025	Aksaray	1	38	1	70	75	434	15,2	4,8	2014-03-01- 14:00:00
1048	Alibeyköy	1	27	1	65	69	524	14,1	5,4	2014-03-01- 14:00:00
1049	Beşiktaş	1	56	1	84	54	387	15,3	4,3	2014-03-01- 14:00:00
1052	Esenler	2	42	2	74	55	354	17,2	6,4	2014-03-01- 14:00:00
1054	Kadıköy	4	19	3	52	28	308	12,6	5,5	2014-03-01- 14:00:00
1055	Kartal	3	33	4	65	36	422	14,5	4,6	2014-03-01- 14:00:00
1065	Sarıyer	1	27	3	54	62	412	16,8	4,8	2014-03-01- 14:00:00
1067	Ümraniye	3	65	2	51	67	405	17,0	3,1	2014-03-01- 14:00:00
1068	Üsküdar	2	33	2	65	71	577	15,4	2,9	2014-03-01- 14:00:00
1070	Yenibosna	3	34	2	15	69	365	14,3	4,0	2014-03-01- 14:00:00

Programming languages

The AQG using Php, JavaScript and Html programming languages with the AQG interfaces and functions are being programmed with JavaScript to provide client-side operations. For temporal queries, the server-side system architecture must be used to send the time variable to server for processing. Thus, the Php programming language is used for the downloading and temporal queries. The AQG interface is programmed with HTML codes and styled with Css files.

Web Services and GeoPortal interface

Web Services are the core objective of Geoportal systems in implementing existing OGC standards for air quality monitoring and serving data to the users such as scientific researchers, institute and organizations staff that are working on air quality, GIS users and citizens. Web service standards are developed under OGC specifications such as Web Map Service (WMS), Web Feature Service (WFS) and Web Coverage Service (WCS). WMS represents spatial data as dynamic images which are referenced geographically (Beaujardiere, 2006). WMS establishes a bridge between clients and servers to obtain the digital image of spatial data. The web services are generated with GeoServer open source software compiled in the Java programming language and includes functions for the sharing, serving and editing

spatial data. GeoServer is supported and developed by several organizations around the world. GeoServer is a reference application of some of the OGC standards as like WFS, WCS and WMS.

GeoServer generates web services pertaining to spatial data including spatial data management and web service configuration interfaces. The GeoServer software is integrated with the OpenLayers JavaScript library to allow the viewing web services on web pages. OpenLayers is a JavaScript Library that is under an open source initiative to develop dynamic map applications on web pages. OpenLayers can be utilized without depending on server computers. Thus, it provides efficient and advanced applications for client-side programming and working with Google Maps API to realize geographical applications on the web.

Air quality parameter values are provided in table format in the MySQL database however, presenting air quality parameters in a visual format as a map makes the data understandable and clear for the user. Thus, density maps are produced in ArcGIS software to present air quality as raster image. ArcGIS software has efficient tools to produce maps of good cartographic design. For each variable and time, density maps are produced to be able to constitute web services in raster format in GeoServer. In Fig.3, some examples of the time request results for NO₂ values are presented over every 3-hour period for 20.02.2014.

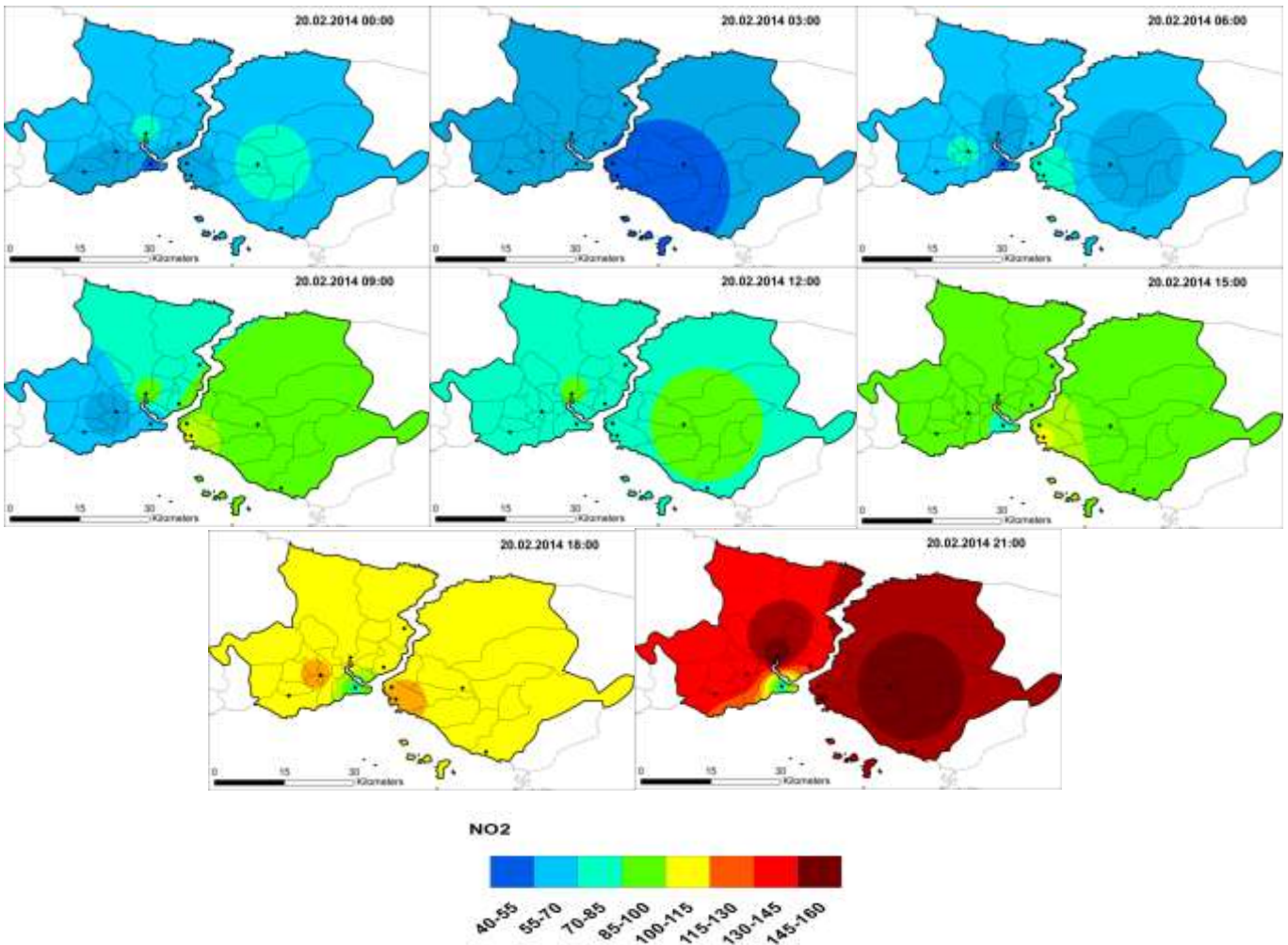


Figure 3. Density maps for NO₂ at 20.02.2014 for each 3-hour period

The output raster images (in tif format) are integrated into web services with GeoServer software. In total, six web services (for PM₁₀, SO₂, NO_x, NO, NO₂, CO, temperature and wind speed) were generated within the GeoServer software and integrated into AQQ to be able to view and download. For the purpose

of viewing raster image on web pages, an URL must be entered into web browsers. The URL is generated by the GeoServer software which includes web service parameters such as layer name, coordinate system, geographical extent values, symbology file and output format. An example URL is given below.

```
http://127.0.0.1:8081/geoserver/cite/wms?service=WMS&version=1.1.0&request=GetMap&layers=cite:raster&styles=&bbox=30.0,25.0,45.0,70.0&width=550&height=330&srs=EPSG:4326&format=application/openlayers
```

The map is simple and provides users with only view functions. A sample map with the GeoServer layer preview option in OpenLayers is given in Fig.4.

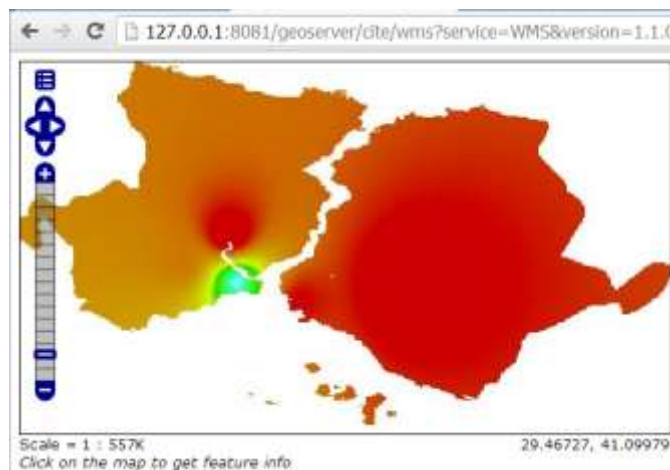


Figure 4. Default OpenLayers layer preview option

Since the air quality values were being measured hourly and daily, it was very important to request web services temporally. To achieve this, Web Map Service –Time (WMS-T) standard is used to interact with map services with time parameter. WMS-T is a standard which is similar to WMS specification and requires a time parameter to generate GetMap request. A WMS-T GetMap request is required to define a time variable as “TIME=” code at the end of request. WMS-T supports the time from years to seconds as YY/MM/DD HH:MM:SS. For instance, if a user wishes to display air quality for 23.04.2014 at 14:00 PM, the request is generated as “TIME=2014-04-23 14:00:00”. This system provides access to the air quality value for any desired time within the same web service. The structure also provides a view of the raster images at any time with a single web service. A GetMap request with time variable is given below.

```
http://127.0.0.1:8081/geoserver/it.geosolutions/wms?service=WMS&version=1.1.0&request=GetMap&layers=it.geosolutions:raster&styles=&bbox=30.0,25.0,45.0,70.0&width=550&height=330&srs=EPSG:4326&format=application/openlayers&TIME=2014-04-23T14:00:00Z
```

As can be seen in the URL above, there are too many parameters to define and it is possible to make mistakes when typing the URL. Therefore, it is necessary to develop advanced web applications and use WMS functions to create a script that operates within the interfaces. Thus, clicking or adding a layer will generate the URL and other related functions. The best way to interact with WMS and use all the functions is to utilize the Heron Mapping Client (MC) JavaScript library.

Heron-MC provides a user interface for the GeoPortal and WebGIS applications by supplying JavaScript libraries. Heron-MC supports a flexible and open source development environment for users and developers. Adding new functions and integrate new services into the client is possible and easy with its flexible structure with JavaScript and HTML programming languages. Heron-MC interface is suitable

for use as a GeoPortal interface due to the functions of view, query, display attribute data and other tools with client-side application. Because of GeoPortal system is just a web site, users are not required to download any installation files or setup any software environments.

Heron-MC GeoPortal interface contains the necessary tools to interact with the spatial data and plays a holder role for all the toolbars and operation buttons. The interface consists of a map window to display the spatial data, an attribute table to view attribute data of desired geographic object in spatial dataset, a legend window to display symbology and the legend information of spatial data displayed in the map window, an information bar to display the coordinate system name and coordinate values of the mouse cursor and a map toolbar to interact with the map window to change current the view of the map. The interface is a management platform of the web services and its properties.

Fig.5 shows the AQG interface which consists of five modules. One the left, a layer tree is established in order to o select web services and view. Each layer tree item is related to the web service URL. In the middle of the page, a map window is inserted to view data. In addition, global maps such as Google, Yahoo and Bing Maps can be integrated into the map window. On the right a legend window is inserted to explain the selected layers. At the bottom of the interface, an attribute table window is established to view the attribute data of selected items on the maps.

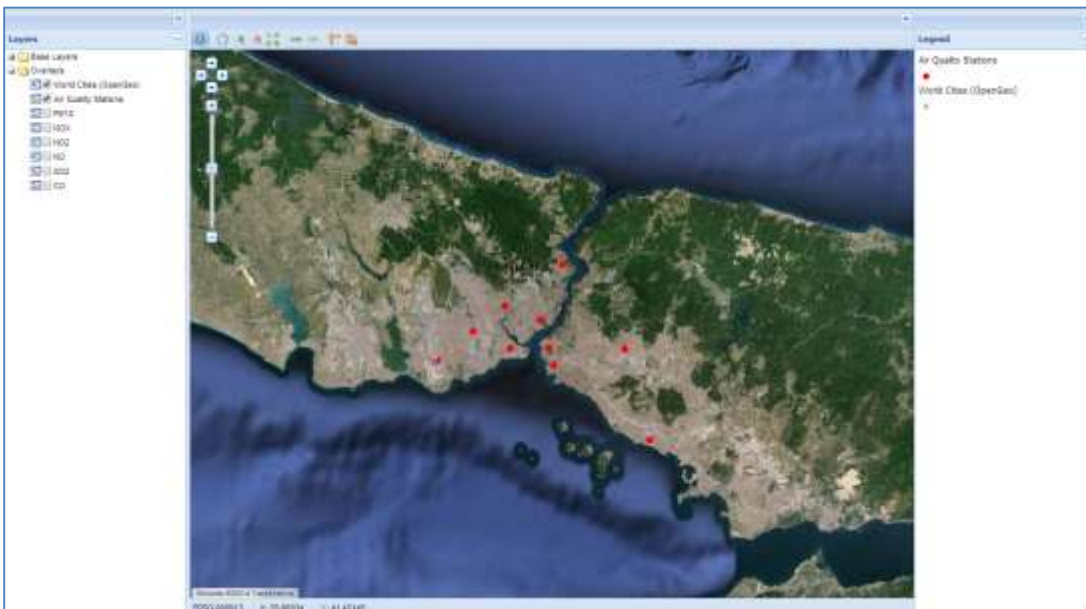


Figure 5. AQG interface

Sample codes to define the AQG map and web services are given below. `map.settings` and `map.layers` define the web service and map relation for each web service. Thus, web service integration is achieved within the AQG interface.

```
Heron.options.map.settings = {projection: 'EPSG:4326',units: 'm',maxExtent: '-180.0, -90.0, 180.0, 90.0',
center: '32.498, 37.884',xy_precision: 3,zoom: 14,theme: null
};
```

```

Heron.options.map.layers = [
new OpenLayers.Layer.WMS
("Air_Quality_25741", "http://193.255.248.21:8080/geoserver/wms?",
{ layers: "Air:CO_Istanbul", transparent: true, format: "image/gif" },
{ isBaseLayer: false, buffer: 0, visibility: false, featureInfoFormat: "application/vnd.ogc.gml" }
).]

```

In Figs.6a, 6b, 6c and 6d, the AQG interface is given for NO₂ at 20.02.2014. The legend window displays the legend of the selected web services to identify the classes of maps.

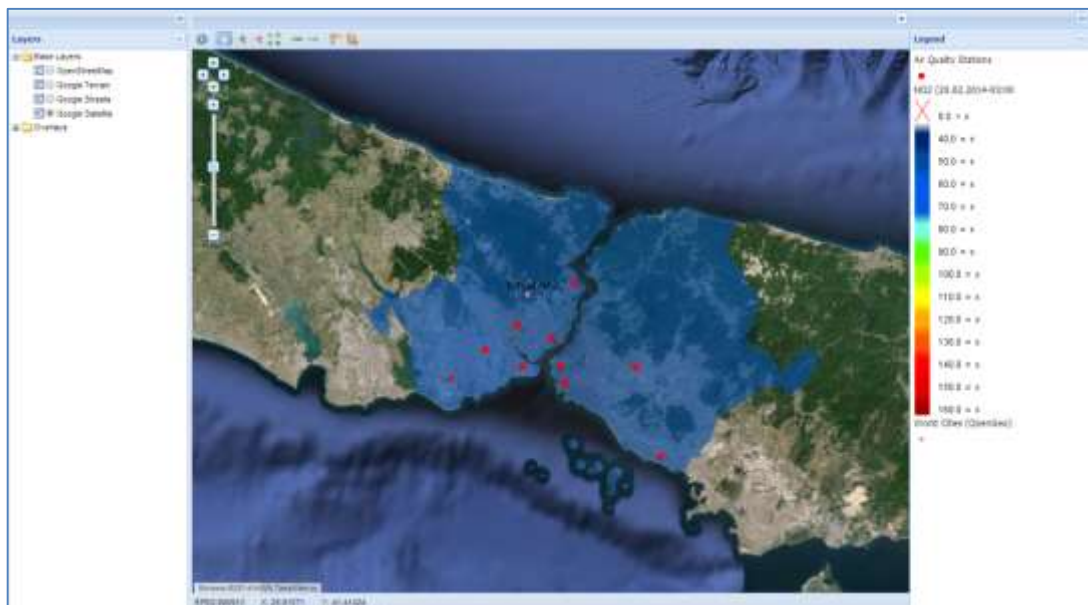


Figure 6a.NO₂ at 20.02.2014 00:00

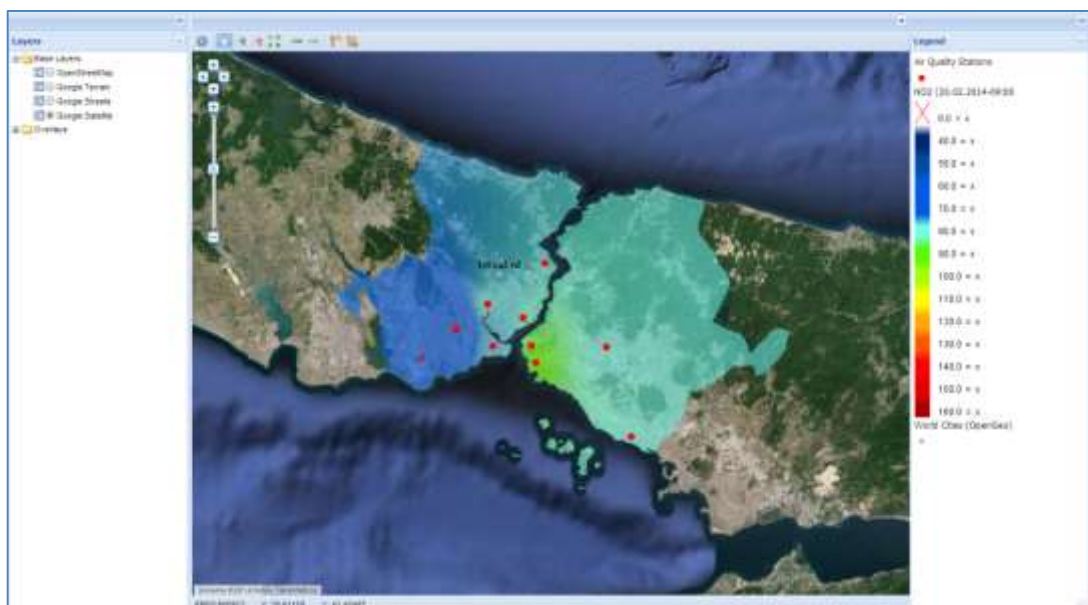


Figure 6b.NO₂ at 20.02.2014 09:00

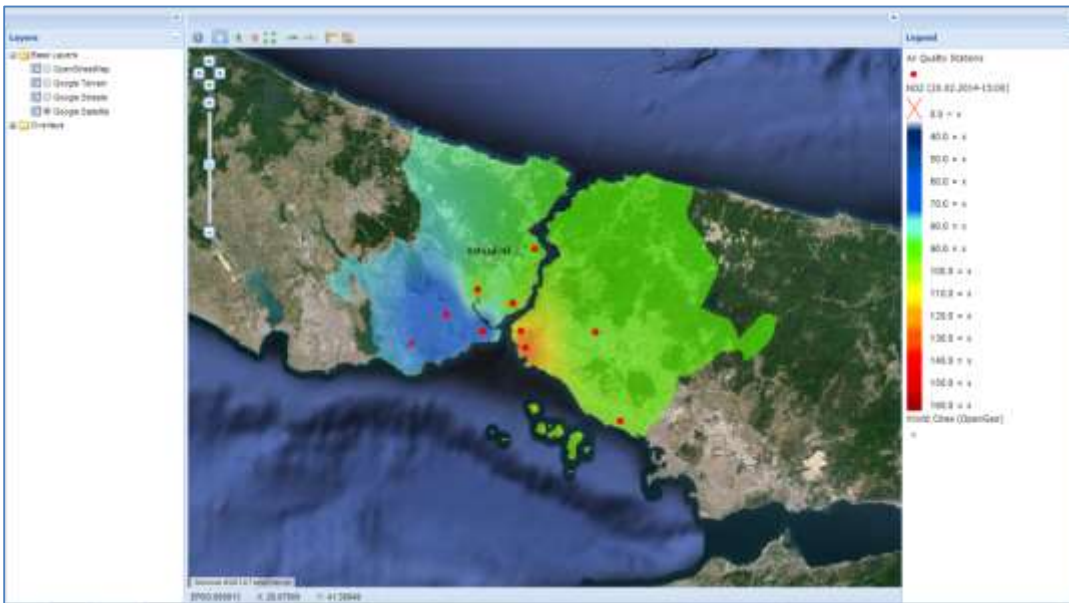


Figure 6c.NO2 at 20.02.2014 15:00

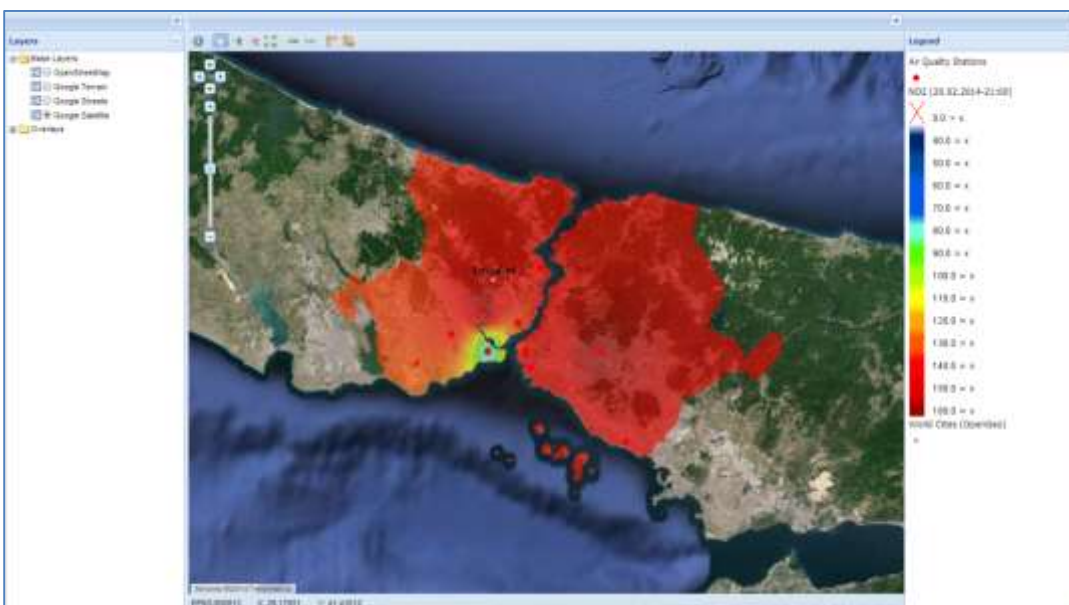


Figure 6d.NO2 at 20.02.2014 21:00

To define the time parameter, a calendar is integrated to the GeoPortal interface. Specified time parameter will be added at the end of GetMap URL in "TIME=" format.

Download Service

As mentioned above, downloading data is an important function in determining air quality. In particular, GIS users and environmental authorities are required to access air quality data within a GIS platform or any other software. To respond to this demand the download service was developed to provide access to the daily historic air quality data. This service is based on GetMap request "FORMAT=" parameter to define the file format.

However, the output format are specified according to the web service type; WMS supports Kml, Kmz and Tiff with WFS supporting Json, Shapefile, Csv and Gml2 file formats. Thus, GetMap requests the

appropriate URL according to the file format. The GetMap request URL for WMS and WFS are given in Table 2.

Table2.WMS and WF output formats

Web Service	Format	Format parameter in URL
WMS	Kml	format=kml
	Kmz	format=kmz
	Tiff	format=image/tiff
WFS	Json	outputFormat=application/json
	Shapefile	outputFormat=shape-zip
	Csv	outputFormat=csv
	Gml2	outputFormat=GML2

In contrast, the format of time variable is created in keeping with the file format parameter. If the time parameter is not specified, the file will be downloaded in default time which is specified in GeoServer software for each layer in this case the data cannot be downloaded for desired time. Sample URLs for WFS GML2 and WMS KML output formats are given in Table 3.

Table3.WMS and WFS output format URL

Web Service	Download URL
WFS	http://193.255.248.21:8080/geoserver/ows?service=WFS&version=1.0.0&request=GetFeature&typeName=PORTAL:auAdministrativeBoundaryCountry&maxFeatures=50&outputFormat=GML2&TIME=2014-04 23T14:00:00.000Z
WMS	http://193.255.248.21:8080/geoserver/wms?service=WMS&version=1.1.0&request=GetMap&layers=PORTAL:auAdministrativeBoundaryCountry&styles=&bbox=26.024,35.81,44.879,42.092&width=990&height=330&srs=EPSG:4326&format=kml&TIME=2014-04 23T14:00:00.000Z

The download service was developed using the Php programming language to send the user selection file format and generate the GetMap request in the client computers. The generated GetMap request will be sent to the server computer and GeoServer software will process the request. At the same time, in response to the request, the selected file format will sent from the server to the client computer. Since the download service operates by generating GetMap request, it is very easy to add new file formats according to the WMS and WFS output formats considering the desired use. The flexible structure of download service gives functionality to the AQG. The download interface is presented in Fig.7.



Figure 7. Download service interface

CONCLUSIONS

The Air Quality GeoPortal (AQG) provides a platform to access and share air quality data. Between institutes and scientific organizations involved in air quality monitoring. The Web interfaces are based on the interoperability concept and the accessing and downloading data options are realized with AQG. The air quality data becomes accessible via web pages within the GIS functions. On the other hand, with sharing WMS addresses, it is possible to use the air quality data in desktop GIS systems. Thus, users can select options to generate map and graphic illustrations, undertake spatial analysis, and make queries in desktop GIS software. AQG is an example of open source software and OGC standard implementation in air quality monitoring. Applying the WMS-T web service standard to air quality data is the main contribution of this study. Furthermore, the interfaces for WMS-T that were developed provides a good example of a model of integration between the WMS-T standard, the programming language (Php) and GeoPortal systems.

Because of air quality has a vital importance on human health, additional to air quality parameters data, some environmental data can be supplied such as traffic density, industrial areas, health status and home heating type distribution data to consider all the factors which are contribute to air pollution. These data can be easily added to the AQG considering the user needs and aims. The availability of all air quality data will contribute to analyze of the predictions and precautions at regional scales.

Recommended future work is related to the field of applying OGC Web Processing Standard (WPS). Applying WPS and developing web interfaces for WPS will add functionality to air quality monitoring in the field of spatial analysis and geographical data processes. Furthermore, the development of web interfaces for WPS according to the users' air quality monitoring requirements will provide interoperability between the GIS analysis and the functions.

REFERENCES

- Abdelnur, & A., Hepper, S. 2003. Java Portlet Specification, Version 1.0, Status: FCS Specification, Specification Lead: Sun Microsystems, Inc., Release: August 29.
- Airnow, 2015. Airnow AQI Forecast web site, available at "http://www.airnow.gov/index.cfm?action=airnow.local_state&stateid=16&mapcenter=0&tabs=0#tabs-0", (23.02.2015).

- AQI, 2015. Real Time Air Quality Index web site available at "http://aqicn.org/map/turkey/#@g/37.6468/38.63/6z", (23.02.2015).
- BEA, 2008. BEA WebLogic Portal, Portal Development Guide, BEA Systems, Inc.
- Bealey, W.J., McDonald, E., Nemitz, R., Donovan, R., Dragosits, U., Duffy, T.R., Fowler, D., 2007. Estimating the reduction of urban PM10 concentrations by trees within an environmental information system for planners. *Journal of Environmental Management* 85, 44–58.
- Beaujardiere, J., OpenGIS® Web Map Server Implementation Specification, Version 1.3.0, Open Geospatial Consortium Inc. 2006-03-15.
- Bellander, T., Berglund, N., Gustavsson, P., Jonson, T., Nyberg, F., Pershagen, G., Jarup, L., 2001. Using geographic information systems to assess individual historical exposure to air pollution from traffic and house heating in Stockholm. *Environmental Health Perspectives* 109, 633-639.
- Biterna, M., Voutsas, D., 2005. Polychlorinated biphenyls in ambient air of NW Greece and in particulate emissions. *Environ. Int.* 31, 671-677.
- British Columbia, 2014. <http://www.bcairquality.ca/assessment/air-modelling.html> (April 21, 2014).
- Brunekreef, B., Holgate, S.T., 2002. Air pollution and health. *Lancet* 360, 1233-1242. DANE, 2006. Series de Población 1985-2020. Available at: www.dane.gov.co (April 25, 2012).
- Cinderby, S., Forrester, J., 2005. Facilitating the local governance of air pollution using GIS for participation. *Applied Geography* 25, 143–158.
- Cooper, D.A., Peterson, K., Simpson, D., 1996. Hydrocarbon, PAH and PCB emissions from ferries: a case study in the SkagerakeKattegatteÖresund region. *Atmospheric Environment*. 30, 2463-2473.
- Cyrus, J., Hochadel, M., Gehring, U., Hoek, G., Diegmann, V., Brunekreef, B., Heinrich, J., 2005. GIS-based estimation of exposure to particulate matter and NO2 in an urban area: stochastic versus dispersion modeling. *Environmental Health Perspectives* 113, 987-992.
- Dalvi, M., Beig, G., Patil, U., Kaginalkar, A., Sharma, C., Mitra, A.P., 2006. A GIS based methodology for gridding of large-scale emission inventories: Application to carbon-monoxide emissions over Indian region. *Atmospheric Environment* 40, 2995–3007.
- Douglas, W., Pope, C.A., Xu, X., Spengler, D.J., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G., Speizer, E.F., 1993. An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *The New England Journal of Medicine*. 329, 1753-1759.
- Elangasinghe, M.A., Dirks, K.N., Singhal, N., Costello, S.B., Longley, I., Salmond, J.A., 2014. A simple semi-empirical technique for apportioning the impact of roadways on air quality in an urban neighbourhood. *Atmospheric Environment* 83, 99-108.
- Elbir, T., 2004. A GIS based decision support system for estimation, visualization and analysis of air pollution for large Turkish cities. *Atmospheric Environment* 38, 4509-4517.
- Elbir, T., Mangir, N., Kara, M., Simsir, S., Eren, T., Ozdemir, S, 2010. Development of a GIS-based decision support system for urban air quality management in the city of Istanbul. *Atmospheric Environment* 44, 441-454.
- ESRI, 2013. GIS Portal Technology, ESRI White Paper, <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/geospatial-portal-technology.pdf>, (10.05.2013).
- Fann, N., Lamson, A.D., Anenberg, S.C., Wesson, K., Risley, D., Hubbell, B.J., 2011. Estimating the National Public Health Burden Associated with Exposure to Ambient PM2.5 and Ozone. *Risk Analysis*. 32, 81-95.
- Guéguen, F., Stille, P., Millet, M., 2011. Air quality assessment by tree bark biomonitoring in urban, industrial and rural environments of the Rhine Valley: PCDD/Fs, PCBs and trace metal evidence. *Chemosphere* 85, 195-202.
- Gkatzoflias, D., Mellios, G., Samaras, Z., 2013. Development of a web GIS application for emissions inventory spatial allocation based on open source software tools. *Computers & Geosciences*, 52, 21-33.

- Jensen, S.S., Berkowicz, R., Hansen, H.S., Hertel, O., 2001. A Danish decision-support GIS tool for management of urban air quality and human exposures. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 6, 229-241.
- Kassomenos, P., Papaloukas, C., Petrakis, M., Karakitsios, S., 2008. Assessment and prediction of short term hospital admissions: the case of Athens, Greece. *Atmospheric Environment* 42, 7078-7086.
- Kulawiak.M., A.Prospathopoulos.A., Perivoliotis.L., Luba.M., Kioroglou.S., Stepnowski.A., 2010. Interactive visualization of marine pollution monitoring and forecasting data via a Web-based GIS. *Computers & Geosciences* 36, 1069-1080.
- Lim, L.L., Hughes, S.J., Hellawell, E.E., 2005. Integrated decision support system for urban air quality assessment. *Environmental Modelling & Software* 20, 947-954.
- Lin, M.D., Lin, Y.C., 2002. The application of GIS to air quality analysis in Taichung city, Taiwan, ROC. *Environmental Modelling and Software* 17, 11-19.
- Lippmann, M., 2003. Air pollution and health e studies in the Americas and Europe. In: McGranahan, G., Murray, F. (Eds.), *Air Pollution and Health in Rapidly Developing Countries*. Stockholm Environment Institute, pp. 35-48.
- Liu, S., Tao, S., Liu, W.X., Dou, H., Liu, Y.N., Zhao, J.Y., Little, M.G., Tian, Z., Wang, J., Wang, L., Gao, Y., 2008. Seasonal and spatial occurrence and distribution of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in rural and urban areas of the North Chinese Plain. *Environ. Pollut.* 156, 651-656.
- Ma,W.L., Qi, H., Li, Y.F., Liu, L.Y., Sun, D.Z.,Wang, D.G., Zhang, Z., Tian, C.G., Shen, J.M., 2011. Seasonal and spatial variations of air concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in Northeastern Chinese urban region. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 86, 43-49.
- OGC, 2004. *Geospatial Portal Reference Architecture, A Community Guide to Implementing Standards-Based Geospatial Portals*, Version: 0.2, OGC 04-039, OGC Discussion Paper.
- Puliafita, E., Guevara, M., Puliafita, C., 2003. Characterization of urban air quality using GIS as a management system. *Environmental Pollution* 122, 105-117.
- TEMIS, 2015. Tropospheric Emission Monitoring Internet Service web site, available at "<http://www.temis.nl/protocols/O3global.html>", (23.02.2015).
- Triantafyllou, A.G. Evagelopoulos, V., Zoras, S., 2006. Design of a web based information system for ambient environmental data. *Journal of Environmental Management* 80, 230-236.
- United Nations Environment Programme, (2015). UNEP web site available at "http://www.unep.org/urban_environment/issues/urban_air.asp", (23.02.2015).
- Vienneau, D., Hoogh, K., Briggs, D., 2009. A GIS-based method for modelling air pollution exposures across Europe. *Science of the Total Environment* 408, 255-266.
- Westerlund, J., Urbain, J.P., Bonilla, J., 2014. Application of air quality combination forecasting to Bogota. *Atmospheric Environment* 89, 22-28.
- Zhou, N., Cui, Z., Yang,S., Han, X., Chen,G., Zhou, Z., Zhai,C., Ma, M., Li,L., Cai,M., Li,Y., Ao,L., Shu,W., Liu,J., Cao, J., 2014. Air pollution and decreased semen quality: A comparative study of Chongqing urban and rural areas. *Environmental Pollution* 187, 145-152.



A DECISION-MAKING MODEL PROPOSAL (AAV) FOR SELECTION OF AMPHIBIOUS ATTACK VEHICLES FOR LANDING PLATFORM DOCK (LPD) BY INTEGRATED MCDM METHODS

¹Abdullah YILDIZBASI , ²Mustafa Burak ÖZDEMİR 

Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Industrial Engineering, Ankara, TURKEY

¹ayildizbasi@ybu.edu.tr, ²mustafaburakozdemir.mail@gmail.com

(Geliş/Received: 12.07.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.12.2019)

ABSTRACT: Landing Platform Dock (LPD) designed to have the primary task functions of "Transferring of Forces" and "Amphibious Operations" has been fully equipped for those operations. Selecting the best vehicles for LPD used to fulfill the specified operations is a complex process. In this article, the ELECTRE method, which is one of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), has applied the selection of Amphibious Assault Vehicles (AAV) deployed in LPD. For this case study, firstly, information about AAVs is given, and the Analytical Hierarchy Process (AHP) used for the research and the ELECTRE method, which is the basis of the study are explained. Within the scope of the study, the criteria required for the model have been determined by a delegation in the field of amphibious operations in the Naval Forces, four different AAVs in the international defense industry markets have been examined by the same delegation. The criteria weights, which use for the application of the ELECTRE method, have been determined by AHP.

Key Words: Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), Analytical Hierarchy Process (AHP), ELECTRE, Landing Platform Dock (LPD), Amphibious Assault Vehicles (AVV), Defense Industry

Bütünleşik ÇKKV Metotları ile Çok Maksatlı Amfibi Hücum Gemisi için Zırhlı Amfibi Araçların (AAV) Seçimine İlişkin Bir Karar Verme Model Önerisi

ÖZ: Çok Maksatlı Amfibi Hücum Gemileri (LPD) "Kuvvet Aktarımı" ve "Amfibi hareket" ana görev fonksiyonlarına sahip olacak şekilde tasarlanmış ve bu hareket fonksiyonları için gerekli bütün araçlarla donatılmış olmalıdır. Belirtilen görev fonksiyonlarını gerçekleştirmek için hangi tip aracın en uygun olduğuna karar verme ve seçim süreci ise zor ve birden fazla kriterin bir arada değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu makalede, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden AHS ve ELECTRE yaklaşımları birlikte kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve çalışmanın temeli olan ELECTRE yöntemi açıklanmış ve AAV'ler hakkında bilgi verilmiştir. Çalışma kapsamında, model için gerekli kriterler amfibi hareket alanında tecrübeli bir kurul tarafından belirlenmiş, uluslararası savunma sanayi pazarlarında dört farklı AAV aynı kurul tarafından incelenmiştir. ELECTRE yönteminin uygulanmasında kullanılan ölçütler AHP tarafından belirlenmiştir. Daha sonra ELECTRE yöntemi ile LPD'de konuşlandırılacak Zırhlı Amfibi Araçlar (AAV) arasında bir sıralama yapılmış ve en uygun olan AAV seçilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), ELECTRE, Çok maksatlı amfibi hücum gemisi (LPD), Zırhlı Amfibi Araçları (AAV), Savunma Sanayi

INTRODUCTION

The military developments of the 21st century have brought a new concept on the military campaign. After World War II and The Post-Cold War, the Probability of conventional war over the border of the countries has almost come to an end. Nowadays, conflicts occur in the beyond the border and far away from the homeland. In this war environment, the countries need to be able to transfer the necessary forces on the conflict zone via the fastest ways. The most accessible and comprehensive approach for the transfer of these forces is carried out by sea transportation. For this transportation, A variety of vessels which provide permissiveness at a certain level for operation and logistic issue without the support of their main base in the conflict zone are required. The Countries which conduct this type of operation in the World use aircraft carriers and the LPDs. Navy Forces needs this type of vessel, which can transport the forces that need for operation anywhere on time. Because of this requirement, the construction of LPD has started

LPD will be able to use in operational areas of the Black Sea, Mediterranean, and the Aegean Sea and also will be used in the Indian Ocean and the Atlantic Ocean. Besides, that LPD, which will have a full-fledged hospital with 34 beds, will be able to serve on a humanitarian operation such as disaster relief and peacekeeping support operations.

LPD, which is constructed to have the primary task functions of "Transferring of Forces" and "Amphibious Operations," has been assigned the necessary staff who shall be controlling those functionings. LPD has the abilities in terms of operational speed and agility, by carrying the amphibious vessels; Landing Craft Marine (LCM), Landing Craft Air Cushion (LCAC), Landing Craft Vehicle Personnel (LCVP) and Assault Amphibious Vehicles (AAVs) to the operation region. The LPD is equipped with the essential landing/take-off and distribution capabilities/capabilities for helicopters and rotational rotor aircraft that provide support for the air campaign in Amphibious Operations.

Selecting the best vehicle used to fulfill the specified skills is a complex process. There are a lot of questions asked about which type of aircraft, helicopters, and other air platforms will be deployed on board, and what type of AAVs will be MCDM can be used to determine which vehicles been on the International Defense Industry market is more appropriate.

In this study, The ELECTRE model, which is one of MCDM, has applied the selection of AAVs deployed in LPD. For this purpose, the AHP and the ELECTRE method, which is the basis of the study are explained. Within the scope of the study, the criteria required for the model have been determined by a delegation in the field of amphibious operations in the Naval Forces, Four different AAVs in the international defense industry market have been examined by the same delegation. Criteria's weights, which use for the application of the ELECTRE method, have been determined by AHP. Four different AAV which is available on the market sequences with the ELECTRE method, the results have been discussed, and suggestions have been presented.

LITERATURE SURVEY

MCDM is used in many areas by decision-makers. The areas in which are using the MCDM can be defined as; Environmental management and natural resources, Business management, Energy management, Structural, construction, and transportation engineering, Logistics and supply chain management, Information technology, Financial management, Policy, social and education, Chemical and biochemical engineering, Agriculture and horticulture, Health, Other areas and non-specific applications(Govindan and Jepsen 2016)

Even though the defense industry does not entirely been defined to relate which category of MCDM, it can be evaluated in the selection of suppliers in the area of logistics and supply chain management.

The choice of AAV for LPD can be evaluated as the supplier selection problem in the defense industry. In the literature survey section, first summarizes the work done with the MCDM in the defense industry. Later, works that apply in the other sectors of MCDM was mentioned. Then it is investigated how the use of the ELECTRE method, which is planned to solve the problem of selection of AAV for LPD.

MCDM in Defense Industry

A study on the selection of weapon systems was conducted using the AHP to select the best light machine gun Alternative weapons considered to be procured were evaluated with the help of the prepared survey. Alternatives are listed using Super Decisions 1.6.0 (Gençer et al., 2009).

In work done with the selection of suppliers in the defense industry, an important system integrator company is listed by the TOPSIS method, which will work together in visual direction. Supply chain and MCDM methods are described under study. As a result, an application was made to combine the procurement process with the MCDM procedure. Within the scope of implementation, four suppliers selected on a total of 5 criteria were evaluated by four decision-makers, and the most suitable supplier for the firm was selected (Çelikel, 2017).

Within the scope of the master thesis study related to the best pistol selection problem, the experience of the expert staff in the field was used to determine the criterion and the fuzzy AHP in which the importance weights were expressed as fuzzy numbers. In addition to AHP resolution, two different methods have been used to deal with the problem in the fuzzy logic environment. These are compared with the fuzzy suitability index of the pistols by the direct weighting method and compared with the fuzzy suitability index of the pistols using the relative measures obtained by AHP. The same sequence was handled in all methods applied (Tekeş, 2002).

Submarine types required by the submarine fleet were assessed relative to the project selection methods using the AHP method. Criteria for selection of submarine vessels have been identified and evaluated by expert personnel. Super Decision and Expert Choice programs were used for the evaluation. Values are the same in both programs. At the end of the study, the essential criterion for submarine selection was identified. Recommended providing the most suitable submarine according to the criteria set (Palaz and Kovancı, 2008).

Technology transfer techniques that were used in the defense industry were listed by the AHP method. Technology transfer techniques have been discussed in detail, and it has been researched that hangs are used in defense. Criteria which were used for AHP were determined on the basis of interviews with officials responsible for technology management of defense companies in Ankara, officials of public institutions related to researchers and defense industry, and the most suitable technology transfer method was provided by comparing with AHP method (Balci, 2013).

The problem of investment project selection for an enterprise operating in the air defense industry from the lower branches of the defense industry is discussed. Criteria and alternatives have been identified and evaluated by 20 investment specialists. The obtained data were weighted using the AHP method. The obtained weights were applied to the VIKOR method to obtain a ranking (Uçakcıoğlu and Eren, 2017)

The evaluation of the navy tactical missile system was carried out with the Fuzzy AHP technique. Criteria for all options were evaluated by experts using the fuzzy method. The practical grade membership function grade is calculated to find out the performance scores. The criterion value is calculated according to missile performances. With the fuzzy AHP method, the total weights of the options were obtained. A ranking was made between the options (Cheng, 1997)

The AHP method was addressed in the problem of the selection of attack helicopters. The criteria and alternatives are determined by experts, and the values obtained are listed by AHP (Cheng et al., 1999).

Use of MCDM in Different Sectors

A problem with the choice of facility location selection Isparta / Turkey AHP has also been used to determine the place where animal husbandry. Within the scope of the study, seven districts of Isparta province were evaluated according to five different criteria (location, environmental factors, labor force, investment costs, laws). Environmental factors were chosen as the most important criteria affecting the place of establishment in the study conducted with AHP. The result is a ranking between the counties (Ömürbek, 2013).

It has been evaluated that a solution can be found in the field of logistics with the ELECTRE method, which is one of the multi-criteria decision-making methods. Cargo companies located in the city of Malatya were surveyed, and the weight of the charters determined by using the ELECTRE method was analyzed. The location of the cargo company's newly opened store was tried to be determined through the analyzes. It was thought that the analysis would give the firm an idea of where to find a place for the new store (Yücel and Ulutaş, 2009).

Fuzzy PROMETHEE technique is used in MCDM study with automobile selection and price, fuel, performance, and safety criteria are applied for seven different types of automobiles in the same class. It is very difficult and complex that the classic PROMETHEE method can work with linguistic values. Hence the linguistic values were used in the PROMETHEE method after the fuzzy. The obtained data were evaluated by Decision Lab software and PROMETHEE I and II. It has been seen that the results obtained in the study are consistent and appropriate (Ballı, 2007).

The problem of choosing a procurement planning engineer for an operator operating in the food industry related to the selection problem of personnel in operation is addressed. AHP, which is an effective method for evaluating qualitative and quantitative variables, has been used in the selection of personnel by defining the qualitative and quantitative criteria which are important for the operation. In the evaluation of the criteria and alternatives, the priority values of the main criterion were obtained with the Extended Analysis Method using linguistic variables and fuzzy numbers. When the designed system is examined, the results show that this method provides a visible solution to decision-making by providing a numerical solution to staff selection (Özgörmüş, 2005).

Fuzzy MCDM was used to select the main battle tank. Experts' views are explained in terms of trapezoidal (or triangular) fuzzy numbers, and the hierarchical structure of the decision problem is established. Fuzzy DELPHI method is used to set the blurriness ratio to reach the consensus of all experts. Subsequently, the fuzzy decision matrix is multiplied by the corresponding fuzzy feature weights to obtain the total number of fuzzy numbers. Herrera & Martinez's method, which is a synthetic method, was chosen as the best main battle tanks (Cheng and Lin, 2002).

Studies Conducted by Applying the Method ELECTRE

A business operating, which is a problem of supplier selection in the machinery sector, was dealt with Analytical Network Process (ANP), and ELECTRE methods that are multi-criteria decision-making techniques for supplier selection were applied in an integrated manner to solve the problem. The five main criteria and 15 sub-criteria, which are related to the probing, are weighted by the ANP method. Subsequently, the ANP method was used in the ELECTRE matrix, and 12 suppliers were evaluated using the ELECTRE method to determine the best supplier for the business (Çakın and Özdemir, 2013)

The detection problem of the echocardiography device, which was considered to be taken to the Cardiology Department of the hospitals was discussed. Criteria were determined by three physicians from the field of cardiology, and the criteria to be identified were evaluated using the AHP method. The obtained data and alternatives were ranked by the TOPSIS method to provide optimal options. (Erenet al., 2017).

The TOPSIS and fuzzy AHP methods have been used together to determine the most appropriate binding shape that can be used by the gas companies located in the Yarımca openings in the east of the Marmara Sea. Twelve different multi-point tanker-float linkage systems were considered, and while fuzzy AHP was used to reveal the weights of the traits to select the best among these options, fuzzy TOPSIS methods were used during the ordering and selection of the linkage systems (Menteş, 2010)

In the 2012-2013 season in Turkey, the performance of 6 football players who scored 15 goals or more in the soccer league. The weights of the criteria were determined by the Analytic Hierarchy Process (AHS) method. The obtained criteria weights were first ranked by evaluating the performances of the soccer players in the method of TOPSIS in the method of Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution. The obtained criteria weights were first ranked by evaluating the performances of the soccer players in the method of TOPSIS after ranked by VIKOR (Karaatlı et al., 2014).

Criteria for selecting laptop computers to be used in enterprises are weighted to the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (BAHP) method because the classical AHP method is insufficient to handle the subjective judgments of decision-makers. The ELECTRE method was used for the selection of the essential products via the obtained data. An approach based on the combination of the methods of ELECTRE and FAHP was presented (Ertuğrul and Karakaşoğlu, 2010)

It is aimed to select the most suitable supplier considering more than one qualitative and quantitative criteria. ELECTRE and AHP techniques were used to evaluate. ELECTRE, which is multi-criteria decision-making techniques, was presented as a technique to evaluate alternatives according to the sorting principle, and the AHP was used to determine the weight of the selection criteria (Soner and Önüt, 2006).

MCDM tested the quality assessment of websites for advertising tourist destinations. For this problem, experienced personnel has demonstrated a hierarchical structure of the criteria. ELECTRE-III-H was thought to contribute to the solution of the problem, and the accuracy of the sequencing results was checked in different cases. Robustness analysis yielded almost accurate results in rankings for all cases. (Del Vasto-Terrientes et al., 2015).

In the study exploring the areas in which the ELECTRE method was used, the fields were collected in 13 categories. Categories were determined as Natural resources and environmental management (Water management.- Waste management- Land management, geology, and cartography- Forestry, natural reserves, and ecotourism- Other papers on natural resources and environmental management). Business management (Performance and benchmarking.- Human resources. - Investment decisions.- Other business management applications.). Energy management (Large scale energy management.). HVAC systems and small scale energy management (Design, mechanical engineering, and manufacturing system). Structural, construction, and transportation engineering. Logistics and supply chain management (Facility layout and location- Supplier selection.- Other logistics and supply chain management applications.). Information technology (Software evaluation- Network selection - E-commerce and m-commerce - Other information technology applications). Financial management (Portfolio and investment management- Other financial management applications). Policy, social, and education). Chemical and biochemical engineering. Agriculture and horticulture. Health, safety, and medicine various. Other areas and non-specific applications (Govindan et al., 2016).

For the construction projects, the ELECTRE method was used for the selection of subcontractors. The problem is focused on the result, and where there is no knowledge of relative importance, decision-makers were offered a very specific set of decision models. The model considered consists of three steps. Firstly, the individual ranking was obtained by the method of ELECTRE II. In the second stage, a matrix of alternatives to a wide range of decision-makers has been established. Finally, individual preferences were collected were applied by the ELECTRE IV method, and final collective evaluation was performed (Alencar et al., 2010).

In the study, an approach to the mutual discussion of messages to e-services has been worked on to help consumers reach a reasonable composite e-service solution. A variety of information on an e-service composition has been given and worked with a material tender and e-service process for property management in Taiwan. For each e-service component's step, e-service formalization, an e-service program model and the ELECTRE method, were used to determine the optimal selection order of e-services. Then, the e-service selected for each step was created with a message evaluation process. As a result, consumers are offered a reasonable composite e-service solution (Ke and Chen, 2012).

The intuitionistic fuzzy ELECTRE method was used to solve the plant location problem. The expressions of alternatives for each criterion and the weights of each criterion which are treated as linguistic terms characterized by triangular heuristic fuzzy clusters. As a result, the ranking for the selection of decision-makers were made (Cheng and Lin, 2002,)

Studies conducted with MDCM were examined. Different techniques were used to guide decision-makers in different sectors. The studies were generally formed as a combination of two methods. Firstly, the criteria and values determined by the experts are weighted by the AHP method. Then, according to another method chosen by the author, alternatives are listed. The works were improved by using the fuzzy

technique. It was determined that the ELECTRE method was not used in defense industry as far as the author knows. Therefore, it was decided to use the ELECTRE method for the choice of AAV for LPD.

MCDM

MCDM is the most commonly used method of decision-making. It is the branch of a general Operational Research (OR) model that seeks solutions to decision problems according to some decision criteria. This widely used decision-making model is defined as MCDM.

AHP Method

Multi-dimensional and complex problems are be solved effectively by the AHP. AHP solve MCDMs with different and contradictious criteria via carrying out pairwise comparison matrices to decompose. The AHP has three main pillars of the decision-making process; introducing the model, comparison of criteria and/or alternatives, evaluating priority among alternatives (Jagadish and Ray, 2015).

Step 1: Introducing the hierarchical system.

A decision problem was identified as a hierarchical system. The objective of AHP is to achieve a hierarchical system by branching decision criteria and alternatives. (Albayrak and Erensal, 2004; Liu et al., 2012)

Step 2: Perform the pairwise comparisons.

In this step, comparison matrices are found out, and pairwise comparisons are evaluating. The determined decision criteria were compared with each other by making use of the corresponding basic level scale comparison. Table 1 below presents the comparison scale used by AHP (Dağdeviren, 2009).

Table 1. The Basic Level Scale For Pairwise Comparison

Intensity of importance	Explanation
1	Two activities or criteria contribute equally to the objective
3	Experience and judgment slightly favor one over another
5	Experience and judgment strongly favor one over another
7	An activity or criteria is strongly favored and its dominance is demonstrated in practice
9	Importance of one over another affirmed on the highest possible order
2,4,6,8	When compromise is needed

A square and reciprocal matrix can be identified via this pairwise comparison. A square and reciprocal matrix, see Eq. (1). The result of the pairwise comparison on *n* criteria can be summed up in an (*n* * *n*) assessment matrix.

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

Step 3: Determining the relative importance of weights.

In the last step, all matrix obtained is normalized and apply computations to examination consistency. Via normalization, As a result of the calculations, the order of normalized weight vectors and criteria is determined. The random index is given in Table 2, and the maximum acceptable consistency ratio (CR) was determined as (0.1). CR is the ratio of the consistency index (CI) and the random index (RI). The CI and CR are obtained by using the following equations (Rouyendegh, 2014).

$$CI = \frac{\gamma_{max} - n}{n - 1} \tag{2}$$

$$CR = \frac{CI}{IR} \tag{3}$$

Table 2. Random Index

n	1	2	3	4	5	6	7	8
R	0,0	0,0	0,5	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4

3.2. ELECTRE Method

The ELECTRE method is a crucial MCDM method based on the comparison of the degree of dual significance between different decision options for each rating factor. (Rouyendegh and Erol, 2012). The procedure to be followed during the application of the ELECTRE method is set out below.

Step 1: Determination of Decision Matrix

Within the scope of the applied method, we set the criteria (n) in the columns of the relevant matrix and show the alternatives (m) from the lines. This generated matrix will give the standard matrix for the basis of the application.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Step 2: Creating a normalized decision matrix as a result of operations

By using the formula shown below, a normalized decision matrix is obtained by normalizing the decision matrix.

$$x_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M r_{ij}^2}} \quad i = 1,2, \dots, m; j = 1,2, \dots, n \tag{5}$$

The mathematical formula for the cost criteria other than the gain obtained is formed below.

$$x_{ij} = \frac{\frac{1}{r_{ij}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \left(\frac{1}{r_{ij}}\right)^2}} \quad i = 1,2, \dots, m; j = 1,2, \dots, n \tag{6}$$

Within the scope of mathematical solutions, normalized decision matrix (X) was obtained;

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \tag{7}$$

Step 3: Detection of weighted normalized decision matrix

The binary comparison matrix obtained by the AHP method as a result of the previous calculations will be multiplied by the normalized matrix. The result is a weighted normalized matrix.

$$v_{ij} = w_j \cdot x_{ij} \quad (8)$$

As a result of calculations, the matrix W is a diagonal matrix which values of its main diameter is W and rest values are zero.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & w_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

Step 4: Determine the concordance and discordance sets

Blocks obtained from the net weighted normalized matrix are evaluated for each pair, and the outputs obtained are tested as follows. If the alternative considered is more beneficial or equal in terms of a benefit than the other elements of the couple, the Concordance set is obtained and defined by C

$$C(p, q) = \{j, v_{pj} \geq v_{qj}\}, (a_1, a_2 = 1, 2, \dots, m, \wedge a_1 \neq a_2) \quad (10)$$

the evaluated alternative is less useful than the other elements of the pair for the identified criteria. Discordance set is obtained and defined by D

$$D(p, q) = \{j, v_{pj} < v_{qj}\}, (a_1, a_2 = 1, 2, \dots, m, \wedge a_1 \neq a_2) \quad (11)$$

Step 5: Calculate the concordance matrix

Concordance matrix is the matrix generated by adding the values of weights of Concordance set elements.

$$C_{pq} = E_j * W_j \quad (12)$$

Step 6: Calculate the discordance matrix

Discordance matrix is prepared by dividing discordance set members' values to the total value of the whole set.

$$D_{pq} = \frac{\sum_j |v_{pj} - v_{qj}|}{\sum_j |v_{pj} - v_{qj}|} \quad (13)$$

Step 7: To reveal the calculation of the advantages obtained

As a result of all the calculations obtained, concordance averages and discordance values are considered. Any C_{pq} value greater than or equal to the C average in the resulting Concordance matrix is specified as Yes. Any value less than or equal to the average D in the conflict matrix is specified as No.

Step 8: As a result of the determination of the net compliance and non-compliance matrix

In order to obtain a ranking among the alternatives put forward, it is necessary to determine the net conformity and discrepancy values. As a result of the sequence obtained, the sequences C and D may be the same, in which case more than one of the most useful options may be obtained. It is necessary to present the result ranking according to the ranking obtained.

$$C_p = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^m C_{pk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^m C_{kp} \quad (14)$$

$$D_p = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^m D_{pk} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^m D_{kp} \tag{15}$$

CASE STUDY

There are different criteria for the selection of AAVs which are in the market. These criteria play an important role in the selection of AAVs. Criteria used during the decision phase were chosen according to the usage concept of LPD by a team of personnel who have worked on amphibious operations in naval forces. These criteria are determined as cruise speed, land speed, endurance on water, Sea State Degree, weapon systems, and personnel capacities. Selected AAVs are given code names A, B, C, and D AAVs' are selected by the same delegation for evaluation of AAV in international markets. The selected criteria and selected AVVs are evaluated by the same committee, according to the evaluation table in Table 3.

As a first step in the solution of the problem, the evaluations made by the expert delegation are collected. In the second step, the criteria weights and decision matrix, which need the ELECTRE method is created with the help of the AHP method and the data collected from the delegation. In the third step, the problem is solved by the ELECTRE method with the decision matrix and criteria weights.

Step 1: The criteria selected by the delegation and the evaluation table of the AAVs selected according to these criteria are presented in Table 3 and Table 4.

Table 3. Pairwise Comparisons of Criteria's Matrix

	CS	SL	EW	SD	WS	PC
Cruising Speed (CS)	1	1/3	1/2	1	1/5	1/5
Speed on Land (SL)	3	1	3	1	1/2	1/5
Endurance on Water (EW)	2	1/3	1	1/3	1/5	1/7
Sea State Degree (SD)	1	1	3	1	1/3	1/5
Weapon System (WS)	5	2	5	3	1	1/2
Personal Capacity (PC)	5	5	7	5	2	1

Table 4. Pairwise Comparison Matrix of the Cruising Speed (CS) Criterion

	A	B	C	D
A	1	1/3	1/2	1
B	3	1	3	1
C	2	1/3	1	1/3
D	1	1	3	1

Pairwise Comparison Matrixes of other criteria were obtained using the same method.

Step 2: The Decision Matrix and Weighting the Decision Matrix, which require for the ELECTRE method, is calculated by using the AHP method.

Once the matrix A is built, it is possible to derive from A the normalized pairwise comparison matrix A_{norm} by making equal to 1 the sum of the entries on each column, each entry a_{jk} of the matrix A_{norm} is computed as

$$a'_{jk} = \frac{a_{jk}}{\sum_{i=1}^m a_{ik}}, A_{norm} \text{ matrix is presented in Table 5 and Table 6.}$$

Table 5. A_{norm} Matrix of Criteria

	CS	SL	EW	SD	WS	PC
Crousing Speed (CS)	0,06	0,03	0,03	0,09	0,05	0,09
Speed on Land (SL)	0,18	0,10	0,15	0,09	0,12	0,09
Endurance on Water (EW)	0,12	0,03	0,05	0,03	0,05	0,06
Sea State Degree (SD)	0,06	0,10	0,15	0,09	0,08	0,09
Weapon System (WS)	0,29	0,21	0,26	0,26	0,24	0,22
Personal Capacity (PC)	0,29	0,52	0,36	0,44	0,47	0,45

Table 6. A_{norm} Matrix of AAV's Cruising Speed (CS)

	A	B	C	D
A	0,21	0,32	0,20	0,31
B	0,07	0,11	0,12	0,19
C	0,62	0,54	0,60	0,44
D	0,10	0,04	0,08	0,06

A_{norm} Matrix of other criteria was obtained using the same method.

After, the criteria weight vector w (that is an m -dimensional column vector) is built by averaging the entries on each row of A_{norm} . w_i is computed as $w_j = \frac{\sum_{l=1}^m a_{jl}}{m}$. The weight matrix of the criteria calculating with the help of the above formula for all w_i is given Table 7, which is described as W matrix, and Table 8, which is described as Decision Matrix.

Table 7. Matrix of The Criteria's Weights

	CS	SL	EW	SD	WS	PC
w_i	0,06	0,12	0,06	0,10	0,25	0,42

Table 8. Decision Matrix

	CS	SL	EW	SD	WS	PC
A	0,26	0,23	0,35	0,28	0,28	0,57
B	0,12	0,23	0,35	0,45	0,45	0,06
C	0,55	0,12	0,11	0,16	0,16	0,13
D	0,07	0,42	0,19	0,11	0,11	0,24

Step 3: The problem is solved by the ELECTRE method. So the normalized matrix and weighted normalized matrix is calculated by using the following equation:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M a_{ij}^2}}$$

Normalized Decision Matrix is obtained after all calculation with an equation which mentions above. Normalized Decision Matrix, which is described as X matrix, is shown in Table 9.

Table 9. Normalized Decision Matrix

	CS	SL	EW	SD	WS	PC
A	0,42	0,42	0,65	0,50	0,50	0,90
B	0,19	0,42	0,65	0,79	0,79	0,09
C	0,88	0,22	0,20	0,29	0,29	0,21
D	0,11	0,78	0,35	0,19	0,19	0,38

After the calculated normalized decision matrix. Weighting the Normalized Decision Matrix is calculated by an equation which is shown as $Y = X \times W$. Weighting the Normalized Decision Matrix (Y matrix) is shown Table 10

Table 10. Weighting Normalized Decision Matrix

	CS	SL	EW	SD	WS	PC
A	0,0159	0,0601	0,0390	0,0736	0,1603	0,3902
B	0,0074	0,0601	0,0390	0,0736	0,1271	0,0368
C	0,0337	0,0323	0,0121	0,0300	0,0675	0,0788
D	0,0034	0,1120	0,0211	0,0211	0,0416	0,1518

After calculating the weighting normalized decision matrix, concordance and discordance sets are applied to describe the dominance query and the discordance interval set.

The concordance and discordance sets are given as;

$$\begin{array}{llll}
 C_{12} = \{1,2,3,4,5,6\} & C_{21} = \{2,3,4\} & C_{31} = \{1\} & C_{41} = \{2\} \\
 C_{13} = \{2,3,4,5,6\} & C_{23} = \{2,3,4,5\} & C_{32} = \{1,6\} & C_{42} = \{1,2,6\} \\
 C_{14} = \{1,3,4,5,6\} & C_{24} = \{1,3,4,5\} & C_{34} = \{1,4,5\} & C_{43} = \{2,3,6\} \\
 D_{12} = & D_{21} = \{1,5,6\} & D_{31} = \{2,3,4,5,6\} & D_{41} = \{1,3,4,5,6\} \\
 D_{13} = \{1\} & D_{23} = \{1,6\} & D_{32} = \{2,3,4,5\} & D_{42} = \{3,4,5\} \\
 D_{14} = \{2\} & D_{24} = \{2,6\} & D_{34} = \{2,6\} & D_{43} = \{1,4,5\}
 \end{array}$$

Calculation of the concordance interval matrix: The concordance interval index (C_{ab}) between $A_a \wedge A_b$ can be obtained using the following equation and the concordance interval matrix can be formulated as

$$C_{a_1a_2} = \sum_j w_j$$

The concordance interval matrix is shown in Table 11.

Table 11. The Concordance Interval Matrix

0,0000	1,0000	0,9619	0,8557
0,3148	0,0000	0,5342	0,4281
0,0381	0,4658	0,0000	0,3678
0,1443	1,2194	0,6322	0,0000

Calculation of the discordance interval matrix: we consider the discordance index of d_{ab} . Then, using discordance interval index set, the concordance interval matrix can be formulated as

$$D_{ab} = \frac{\max_{j \in D_{ab}} |v_{aj} - v_{bj}|}{\max_{j \in J, m, n \in I} |v_{mj} - v_{nj}|}$$

The discordance interval matrix (D) is shown in Table 12.

Table 12. The Discordance Interval Matrix

0,0000	0,0000	0,0573	0,2175
1,0000	0,0000	0,7039	1,3449
1,0000	1,0000	0,0000	1,0000
1,0000	0,7436	0,3806	0,0000

Determine the concordance index matrix: The concordance index matrix for satisfaction measurement problem can be written as follows:

$$\bar{c} = \sum_{a=1}^m \sum_b^m \frac{c(a,b)}{m(m-1)} \quad e(a,b) = 1Fc(a,b) \geq \bar{c}$$

$$e(a,b) = 1Fc(a,b) < \bar{c}$$

$$\bar{c} = \frac{5.95}{4(4-2)} = 0,49$$

Concordance index matrix (E) is shown in Table 13

Table 13. The Concordance Index Matrix (E)

0	1	1	1
0	0	1	0
0	0	0	1
0	1	1	0

Determine the discordance index matrix: On the contrary, the preference of dissatisfaction can be measured by discordance index, the discordance index matrix (F) is given by:

$$\bar{d} = \sum_{a=1}^m \sum_b^m \frac{d(a,b)}{m(m-1)} \quad f(a,b) = 0Fd(a,b) \geq \bar{d}$$

$$f(a,b) = 0Fd(a,b) < \bar{d}$$

$$\bar{d} = \frac{8,39}{4(4-2)} = 0,66 \text{ and discordance index matrix (F) is shown in Table 14}$$

Table 14. The discordance index matrix (F)

0	0	0	0
0	0	1	0
0	0	0	0
0	1	0	0

Calculation of Net Concordance and Net Discordance Values: Net concordance and net discordance values are presented in Table 15.

$$c_1 = (1,00 + 0,9619 + 0,8557) - (0,3148 + 0,0381 + 0,1443) = 2,320$$

$$c_2 = (0,3148 + 0,5342 + 0,4281) - (1 + 0,4658 + 1,2194) = -1,4080$$

$$c_3 = (0,0381 + 0,4658 + 0,3678) - (0,9619 + 0,5342 + 0,6322) = -1,2565$$

$$c_4 = (0,1443 + 1,2194 + 0,6322) - (0,857 + 0,4281 + 0,3678) = 0,3442$$

$$d_1 = (0,0573 + 0,2175) - (1,00 + 1,00 + 1,00) = -2,7552$$

$$d_2 = (1,00 + 0,7039 + 1,3449) - (1,00 + 0,7436) = 1,3052$$

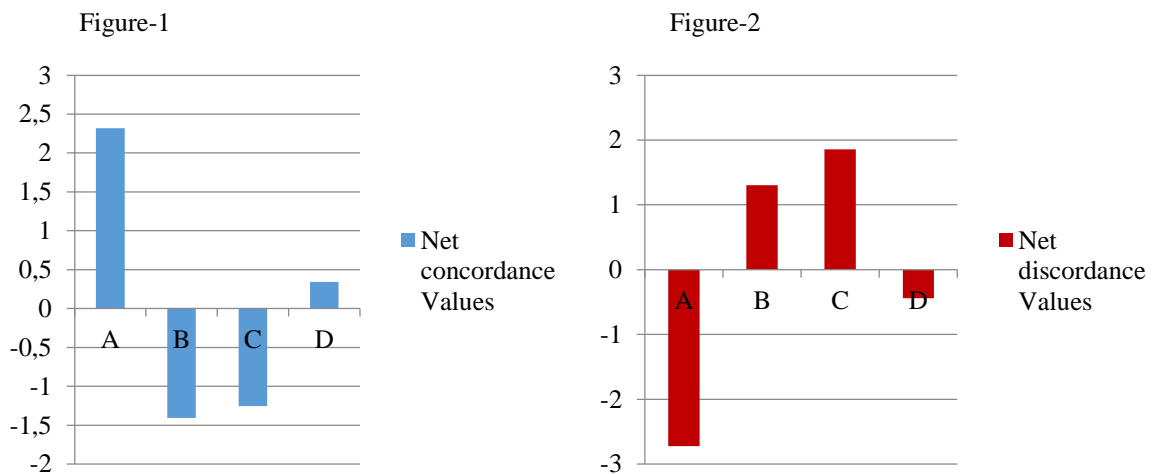
$$d_3 = (1,00 + 1,00 + 1,00) - (0,0573 + 0,7039 + 0,3806) = 1,8582$$

$$d_4 = (1,00 + 0,7436 + 0,3806) - (0,2175 + 1,3449 + 1,00) = -0,4383$$

Table 15. Net Concordance and Net Discordance Values

	Net concordance Values	Net discordance Values	Ranking of Net Top Values	Ranking of Net Lowest Values
A	2,320	-2,7252	1	1
B	-1,4080	1,3052	4	3
C	-1,2565	1,8582	3	4
D	0,3442	-0,4383	2	2

Net concordance and net discordance values are also presented graphically in Figure-1 and Figure-2.



The AAVs are on the market compare in Table 15. Net Concordance and Net Discordance Values of the AVVs are found, and rank among the AAVs is found. According to this ranking, A is found to be the most appropriate AAV when considering net highest values and net lowest values.

CONCLUSIONS

LPD is considered to add a critical capacity that is at a strategic level to Navy Forces. Landing Platform Dock (LPD) constructed to have the primary task functions of "Transferring of Forces" and "Amphibious Operations" has been fully equipped for those operations. Selecting the best vehicles for LPD used to fulfill the specified operations is a complex process. In this article, the ELECTRE method, which is one of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) has applied the selection of Amphibious Assault Vehicles (AAV) deployed in LPD. For this reason, the selection of weapons and vehicles is an essential part of LPD projects.

In this study, the selection of AAVs, which are the vehicles deployed on this ship, are dealt with MCDM have been used to determine the most appropriate AAV with the usage concept of LPD and the concept of Naval Forces. Alternatives and criteria are evaluated in terms of their technical characteristics.

The criteria required for the model have been determined by a delegation in the field of amphibious operations in the Naval Forces, and four different AAVs in the international defense industry markets have been examined by the same commission. These criteria are determined as cruise speed, land speed, endurance on water, Sea State Degree, weapon systems, and personnel capacities. Selected AAVs are given code names A, B, C and D. Criteria's weights and Alternative's weights have been determined by the AHP method in terms of technical data obtained from open sources.

The ELECTRE method was applied to data, and the net concordance and net discordance values are determined by using the ELECTRE method. In the direction of the obtained data and the suitability of the alternatives are evaluated from the technical point of view.

As a result of the study, A is found to be the most suitable alternative when the net concordance and net discordance values are evaluated. The selection of the AAV is assessed to involve the front panel of the A alternative.

Different results will be obtained when criteria such as cost of AAVs and logistic sustainability (maintenance, repair, spare part etc.) are included in the work done. In addition, this study could be improved using a fuzzy logic framework with different multi-criteria decision-making methods to more effectively analyze cases having uncertainty.

REFERENCES

- Albayrak E., Erensal Y. C., 2004, "Using analytic hierarchy process (AHP) to improve human performance. An Application Of Multiple Criteria Decision-making Problem, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 15, pp 491-503.
- Alencar L. H., de Almeida, Morais D. C., 2010, A Multicriteria Group Decision Model Aggregating the. *Pesqui. Operacional*30,A. T. 687-702.
- Balci H.,2013,Determination Of The Criteria For Selecting Technology Transfer Methods For Defence Industry And Choosing The Appropriate Method By Using AHP,*Turkish Military Academy, Defense Science Institute, Master Thease*.
- Ballı S., Karasulu B., Korukoğlu S., 2007, Application Of A Fuzzy Promethee Method For The Most Suitable Car Selection Problem, *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*22, 139-147.
- Cheng C. H., 1997. Evaluating Naval Tactical Missile Systems by Fuzzy AHP Based on the Grade Value of Membership Function. *Eur. J. Oper. Res.*96, 343-350.
- Cheng C. H, Yang K. L., Hwang C. L., 1999, Evaluating Attack Helicopters by AHP Based on Linguistic Variable Weight. *Eur. J. Oper. Res.*116,423-435.
- Cheng C., Lin Y. E., 2002, Evaluating The Best Main Battle Tank Using Fuzzy Decision Theory, *European Journal of Operational Research* 142,174-186.
- Cheng C.,Lin Y., 2002, The Best Main Battle Tank Using Fuzzy Decision Theory,*European Journal of Operational Research* 142, 174-186.
- Çakın E., Özdemir A., 2013, *Using Anal. Netw. Process(AHP)ELECTRE Methods Supplier Sel. Decis. and Appl. Afyon Kocatepe Üniversitesi, İİBF Dergisi (C. XV, S. II),* 339-364.
- Çelikol M., 2017, Supplier Selection Problem An Application in Defenc. *Working Paper*, Doi:10.13140/RG.2.2.27815.24485.
- Dağdeviren M., Yavuz S.,Kılınç N., 2009, Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment, *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp. 8143- 8151.
- Del Vasto-Terrientes L., Valls A., Slowinski R., Zielniewicz P., 2015, ELECTRE-III-H: An outranking-based decision aiding method for hierarchically structured criteria. *Expert Syst. Appl.*42, 4910-4926.
- Eren T., Cihan Ş., Ayan E., Topal T., Yıldırım E. K.,2017,Echocardiography Device Selection with Multicriteria Decision-making Methods , *Research*,DOI: 10.17681/hsp.285651.
- Ertuğrul İ.,Karakoşoğlu N., 2010, ELECTRE ve Bulanık AHP Yöntemleri ile Bir İşletme için Bilgisayar Seçimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*25, 23-41.
- Gençer C., E. K. Aydoğan, Aytürk S.,2009,Selection of Light Machine Gun Via Using Analytic Hierarchy Process, *Defence Science Journal*, vol.59,pp.273-283.
- Govindan K., Jepsen M. B.,2016 ,ELECTRE: A Comprehensive Literature Review On Methodologies And Applications. *Eur. J. Oper. Res.*250,1-29.
- Jagadish, A. Ray, 2015, Green Cutting Fluid Selection using Multi-attribute Decision-making Approach, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, Vol. 96, No. 1, pp. 35-39.
- Karaatlı M., Ömürbek N., Köse G., 2014, Analyzing the Performances of Football Players Using Analytic Hierarchy Process based TOPSIS and VIKOR Methods,*Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*29,25-61.
- Ke C.K., Chen Y.-L., 2012, A Message Negotiation Approach To E-Services By Utility Function And Multi-Criteria Decision Analysis, *Computers and Mathematics with Applications* 64,1056-1064.

- Liu C., Serrano A. R., Yin G., 2012, An optimum design selection approach for product customization development, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 23, No. 4, pp. 1433-1443.
- Menteş A., 2010, Application of Fuzzy Multicriteria Decision-making Methods from Design of Open Sea Structural Bonding Systems, *İTÜ Master Thease*.
- Ömürbek N., Üstündağ S., Helvacıoğlu Ö. C., 2013, Use of Analytic Hierarchy Process (AHP) in Location Decision: A Study in Isparta Region, *Yönetim Bilimleri Dergisi*, Cilt: 11, Sayı: 21, ss. 101-116.
- Özgörmüş E., Mutlu Ö., Güner H., 2005, Personnel Selection With Fuzzy Analytical Hierarchy Process And An Application. *V. Ulus. Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, pp- 21–33.
- Palaz, H., Kovancı, 2008, A. Evaluate the Selection of Turkish Navy Submarines By Using Ahp. *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi* 3, 53–60.
- Rouyendegh B. D., 2014, Developing An Integrated Ahp And Intuitionistic Fuzzytopsis Methodology, *Technical Gazette* 21-6, p.p.1313-1319.
- Rouyendegh B. D., Erol S., 2012, Selecting the Best Project Using the Fuzzy ELECTRE Method, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 790142, (2012), 12 page.
- Soner S., Önüt S., 2006, Multi-Criteria Supplier Selection: an ELECTRE-Ahp Application, *J. Eng. Nat. Sci. Sigma*, pp- 110–120.
- Tekeş M., 2002, Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ve TSK' da Kullanılan Tabancaların Bulanık Uygunluk İndeksli Analitik Hiyerarşi Prosesi İle Karşılaştırılması. *İTÜ Master Thease*.
- Uçakcıoğlu B., Eren T., 2017, Investment Selection Project in Air Defense Industry with Analytic Hierarchy Process and VIKOR Methods. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2, pp-35–53.
- Yücel M., Ulutaş A., 2009, Selection of Place For A Cargo Company In Malatya With Multi Criteria Decision Methods's ELECTRE, *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, p.p. 327-344.