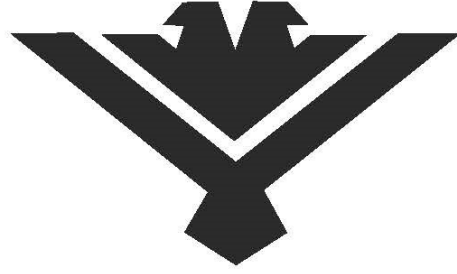


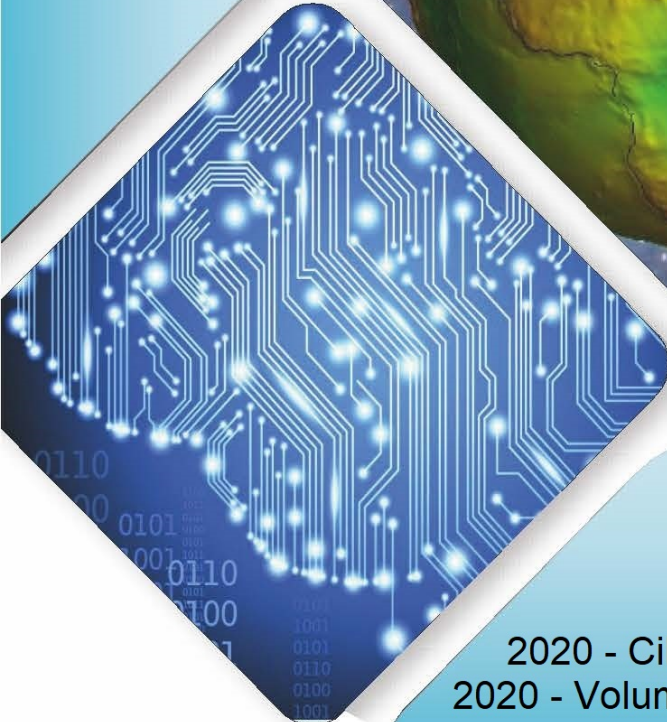


Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

Konya Journal of Engineering Sciences



(KONJES)
E-ISSN: 2667-8055



2020 - Cilt: 8 - Sayı: 3
2020 - Volume: 8 - Issue: 3

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 DINSEL
Res. Assist. Aybüke BABADAG

Correspondance Address/ Yazışma Adresi

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

Tel : 0 332 223 88 18
Fax : 0 332 241 06 35
E-mail : konjes@ktun.edu.tr
Web : <http://dergipark.org.tr/konjes>

Editorial Board/Yayın Kurulu

Ahmet Afsin Kulaksiz, Konya Technical University, TURKEY

Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA

Ashok K. Mishra, Clemson University, USA

Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY

Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA

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

Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE

Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY

Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA

Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN

Ihsan Ozkan, Konya Technical University, TURKEY

John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA

Kerim Kocak, Konya Technical University, TURKEY

Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA

Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA

Mohd Arif Wani, California State University, USA

Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN

Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN

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

Selim Dogan, Konya Technical University, TURKEY

Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA

Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN

Vladimir Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY

Alpaslan Yazar, 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	Eylül	2020	Sayı	3
Volume	8	September	2020	Issue	3

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

FETHİYE-BURDUR FAY ZONU'NUN BURDUR-KOZLUCA ARASINDAKİ BÖLÜMÜNÜN NEOTEKTONİK ÖZELLİKLERİ, GB ANADOLU, TÜRKİYE

Neotectonic Features of the Fethiye-Burdur Fault Zone between Burdur and Kozluca, SW Anatolia, Turkey

.....**Berkant COŞKUNER, Rahmi AKSOY 432-447**

PERFORMANCE EVALUATION OF AFYON GEOTHERMAL POWER PLANT WITH LOW GRADE ENERGY SOURCES

Düşük Enerji Seviyeli Kaynakla Çalışan Afyon Jeotermal Güç Santralinin Performans Değerlendirilmesi

.....**Ceyhan YILMAZ (English) 448-465**

ZEMİNLERDE TEK FAZLI GEOPOLİMERİZASYON UYGULAMASI VE GEOPOLİMERİZASYONUN SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

A Single Phase Geopolymerization Application In Soils And The Effect Of Geopolymerization On The Unconfined Compressive Strength

.....**Tuğba ESKİŞAR, Gizem AKSU 466-478**

POLİVİNİL Klorür (PVC) ULTRAFİLTRASYON MEMBRAN PERFORMANSININ ÇOK DUVARLI KARBON NANOTÜP KATKISI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Performance Enhancement of Polyvinyl Chloride (PVC) Ultrafiltration Membrane by Incorporation of Multi-Walled Carbon Nanotubes

.....**Elif DEMİREL 479-498**

MOODETECTR: MOOD DETECTION FOR TURKISH LYRICS THROUGH WORD VECTORS

MooDetectR: Kelime Vektörleri Vasıtasıyla Türkçe Şarkı Sözleri için Ruh Hali Tespiti

.....**Barış ÇİMEN, Ahmet Onur DURAHİM (English) 499-509**

GEÇ MESİNİYEN-ERKEN ZANKLEYAN DÖNEMİNDE ENEZ (EDİRNE) YÖRESİNİN BİTKİ ÖRTÜSÜNDEKİ DEĞİŞİMLER

Vegetation Changes of Enez (Edirne) During the Late Messinian-Early Zanclean

.....Demet BİLTEKİN, Namık ÇAĞATAY 510-521

DBD PLAZMA AKTÜATÖR SÜRÜM FREKANSININ UÇAK KANADI ETRAFINDAKİ AKIŞIN KONTROLÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Investigation of the Effect of DBD Plasma Actuator Excitation Frequency on Flow Control Around an Aircraft Wing

.....Hürrem AKBIYIK, Hakan YAVUZ 522-528

TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN TROMBE DUVARLARDA KULLANIMI ÜZERİNE BİR İNCELEME

Investigation of Phase Change Materials on the Use of Trombe Walls for Thermal Energy Storage Systems

.....Necla Seval BAYRAM , Ahmet Vefa ORHON 529-551

ALTI ROTORLU VE SEKİZ ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ FARKLI BOZUCU ETKİ ALTINDA UÇUŞ PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Comparison of Flight Performances of Unmanned Air Vehicle with Six Rotors and Eight Rotors Under Different Disturbance Effects

.....Şahin YILDIRIM, Nihat ÇABUK, Veli BAKIRCIOĞLU 552-562

ENDÜKTİF KUPLAJLI RFID'NİN TASARIM ESASLARI VE ARDUİNO'LU BİR UYGULAMASI

Working Principles of Inductive Coupled RFID and a RFID Design Application with Arduino

.....Yalçın EZGİNCİ 563-572

INNOVATIVE TREND ANALYSIS METHODOLOGY IN LOGARITHMIC AXIS

Logaritmik Ölçekte Yenilikçi Yönelim Çözümleme Yöntemi

.....Sadık ALASHAN (English) 573-585

EĞİK ÇATLAK İÇEREN ÇELİK PLAKANIN YORULMA DAVRANIŞININ FARKLI HASAR MODELLERİYLE TAHMİNİ

Prediction of Fatigue Behavior of Steel Plate with Inclined Crack Using Different Damage Models

.....Oğuzhan DEMİR 586-600

A PARAMETRIC STUDY OF THE OPTIMUM SHEAR WALL AREA FOR MID-TO HIGH-RISE RC BUILDINGS

Orta Yüksek ve Yüksek Betonarme Binalarda Optimum Perde Duvar Alanının Belirlenmesi Üzerine Parametrik Çalışma

.....Gökhan TUNÇ, Mustafa Khalid AL-AGEEDI (English) 601-617

IMPROVED SOCIAL SPIDER ALGORITHM FOR MINIMIZING MOLECULAR POTENTIAL ENERGY FUNCTION

Moleküler Potansiyel Enerji Fonksiyonu İçin Geliştirilmiş Sosyal Örümcek Algoritması

.....Emine BAŞ, Erkan ÜLKER (English) 618-642

AKSARAY HAMİDİYE BÖLGESİ ZEMİN DİNAMİK DAVRANIŞININ EŞDEĞER DOĞRUSAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

The Investigation of The Soil Dynamic Behavior of Aksaray Hamidiye Region by The Equivalent Analysis Method

.....Raziye BOZKURT, Atıla DEMİRÖZ 643-651

YALIN ÜRETİME GEÇİŞTE DEĞER AKIŞI ANALİZİ VE HARİTALANDIRMA İLE İSRAF KAYNAKLARININ BELİRLENMESİ: GÜNEŞ ENERJİSİ KOLLEKTÖRLERİ ÜRETEN BİR İŞLETMEDE UYGULAMA

Value Stream Analysis, Mapping and Identification on Wastes in the Transition to Lean Manufacturing: An Application in a Solar Thermal Collector Manufacturer

.....Halil İbrahim DAĞ, Yakup KARA 652-665

BATCH ORDERING INVENTORY MANAGEMENT UNDER THE MIXED DEMAND INFORMATION: A CASE STUDY

Karışık Talep Bilgisi Kapsamında Toplu Sipariş Envanter Yönetimi: Bir Durum Çalışması

.....Muzaffer ALIM, Patrick BEULLENS (English) 666-677

GÖRÜNTÜ İŞLEME VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE İLETİM HATLARINDA ARIZA YERİ BELİRLEME

Determination of Fault Location in Transmission Lines with Image Processing and Artificial Neural Networks

.....Serkan BUDAK, Bahadır AKBAL 678-692

DÜŞÜK MALİYET VE YÜKSEK ENERJİ TASARRUFUNA SAHİP TERMAL BOYA ÜRETİMİ

Thermal Paint Production with High Energy Saving and Low Cost

.....Şenay BALBAY 693-705

ÖSTENİTLEME SICAKLIĞININ EN-GJS-600-3 KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN ÖSTEMPERLENME DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Investigation of the Effects of Austenitizing Temperature on the Austempering Behavior of EN-GJS-600-3 Spheroidal Graphite Cast Iron

.....Erkan KONCA, Kâzım TUR 706-722



FETHİYE-BURDUR FAY ZONU'NUN BURDUR-KOZLUCA ARASINDAKİ BÖLÜMÜNÜN NEOTEKTONİK ÖZELLİKLERİ, GB ANADOLU, TÜRKİYE

¹Berkant COŞKUNER , ²Rahmi AKSOY

^{1,2}Konya Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 42250 Konya, TÜRKİYE
¹bcoskuner@ktun.edu.tr, ²raksoy@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 06.11.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 07.05.2020)

ÖZ: Batı Anadolu genişleme bölgesinin doğu sınırını oluşturan Fethiye-Burdur Fay Zonu, güneyde Fethiye körfezinden başlayıp kuzeyde Çay'a (Afyon) kadar uzanan, yaklaşık 310 km uzunluğunda, KD-GB gidişli sol yönlü doğrultu atım bileşenli oblik normal ve normal faylardan oluşan aktif bir fay zonudur. Bu çalışmanın amacını, zonun kuzeyinde Burdur-Kozluca arasında kalan bölümün jeolojik ve neotektonik özelliklerinin incelenmesi oluşturmaktadır. İnceleme alanının jeolojisini aşıl uyumsuzluklarla birbirinden ayrılan Geç Triyas-Geç Kretase yaşlı temel kayaları, Geç Miyosen-Erken Pleyistosen yaşlı eski havza çökelleri ve Kuvaterner yaşlı genç havza çökelleri teşkil eder. Eski havza çökelleri deformasyon geçirmiş göl ortamında çökelmiş sedimanter bir istif içeren Burdur formasyonu ile alüvyal yelpaze çökellerini içeren Tefenni formasyonundan oluşur. Genç havza çökelleri deformasyon geçirmemiş olan alüvyal yelpaze, asılı teras ve güncel akarsu sedimanlarından oluşur.

Fethiye-Burdur Fay Zonu'nun çalışma alanı içerisindeki en önemli yapısal unsurları KD-GB uzanımlı Burdur Havzası ile bu havzayı sınırlayan sol yanal oblik normal Burdur ve Karakent faylarıdır. Günümüz Burdur Havzası'nın gelişiminde önemli rol oynayan büyük ölçekli bu fayların yanı sıra, inceleme alanında KD-GB ve KB-GD uzanımlı sol yanal oblik normal ve normal faylar ile Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı çökeller içerisinde KD-GB, KB-GD ve K-G gidişli küçük ölçekli normal faylar da gelişmiştir. Yapısal analizler, bölgenin günümüzde KB-GD yönlü gerilme rejiminin hâkimiyetinde olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Fethiye-Burdur Fay Zonu, Burdur Havzası, Kinematik analiz, Neotektonik

Neotectonic Features of the Fethiye-Burdur Fault Zone between Burdur and Kozluca, SW Anatolia, Turkey

ABSTRACT: The Fethiye-Burdur Fault Zone is an active major break in the region and forms the easternmost extension of the west Anatolian extensional province. It extends from the Gulf of Fethiye northeastward to Çay (Afyon), a distance of about 310 km and has sinistral oblique-slip normal and normal movement. The purpose of this paper is to present the geology and neotectonic features of the fault zone between Burdur and Kozluca. Rock units found in the study area include basement rock units of Late Triassic-Late Cretaceous age, the Late Miocene-Early Pleistocene older basin fill and the Quaternary younger basin fill separated from each other by an angular unconformity. The older basin fill consists of deformed lacustrine sequence of the Burdur Formation and alluvial fan deposits of the Tefenni Formation. The younger infill of the Burdur Basin includes alluvial fan deposits, suspended-terrace deposits and recent fluvial sediments.

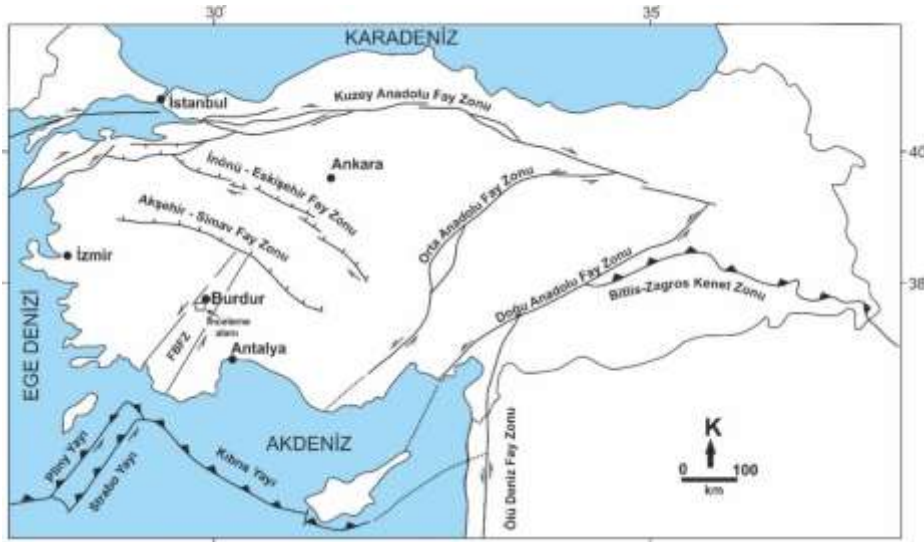
The NE-SW trending Burdur Basin and its margin-bounding sinistral oblique-slip normal Burdur and Karakent faults are the most important structural elements of the Fethiye-Burdur Fault Zone in the study area. The Burdur and Karakent faults are major faults and played an important role in the development of the modern Burdur Basin. In addition to these faults, there are also NE-SW and NW-SE trending sinistral

oblique-slip normal and normal faults and NE-SW, NW-SE and N-S trending small-scale normal faults cutting the Late Miocene-Pliocene aged deposits. Structural analysis indicates that the region has been dominated by NW-SE trending extensional stress regime.

Keywords: *Fethiye-Burdur Fault Zone, Burdur Basin, Kinematic analysis, Neotectonic*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güneybatı Anadolu, günümüzde sismik açıdan aktif kıta içi genişleme ve riftleşmenin ilk evrelerinin gelişim gösterdiği bölgelerden birisidir (McKenzie, 1972; Koçyiğit, 1984; Şengör ve diğ., 1985; Eyidoğan ve Jackson, 1985; Jackson ve McKenzie, 1988; Taymaz ve diğ., 1991; Bozkurt ve Mittwede, 2005). Fethiye-Burdur Fay Zonu Güneybatı Anadolu'da Batı Anadolu genişleme bölgesi ile Isparta Açısı'nın batı kanadı arasındaki sınırı oluşturur (Barka ve diğ., 1995; Barka ve Reilinger, 1997). Güneybatı Anadolu'da önemli kırık hatlarından biri olan Fethiye-Burdur Fay Zonu, güneyde Fethiye Körfezi ile kuzeyde Çay (Afyon) arasında yaklaşık 310 km uzunlukta, kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı, kademeli sol yönlü doğrultu atım bileşenli oblik ve normal faylardan oluşur (Yağmurlu, 2000; Elitez ve Yaltrak, 2014) (Şekil 1). Fay zonu, değişik kesimlerinde birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve Burdur Fayı, Burdur-Fethiye Fayı, Fethiye-Burdur Fay Zonu ve Burdur-Fethiye Makaslama Zonu olarak adlandırılmıştır (Dumont ve diğ., 1979; Taymaz ve Price, 1992; Karaman, 1994; Barka ve diğ., 1995; Eyidoğan ve Barka, 1996; Barka ve Reilinger, 1997; Yağmurlu ve diğ., 1997; Ten Veen, 2004; Bozcu ve diğ., 2007; Hall ve diğ., 2009; Elitez ve Yaltrak, 2014). Bazı araştırmacılar Fethiye-Burdur Fay Zonu'nu, Pliny-Strabo STEP fayının kuzeydoğuya doğru devamı olduğunu belirtmişlerdir (Hall ve diğ., 2014; Elitez ve diğ., 2016, 2017). Fay zonu sol yanal, sol yanal oblik ve normal faylarla karakteristiktir (Barka ve Reilinger, 1997; Elitez ve Yaltrak, 2014, 2016; Hall ve diğ., 2014; Elitez ve diğ., 2016; Aksoy ve Aksarı, 2016). Fethiye-Burdur Fay zonu kuzeybatı-güneydoğu gidişli faylara bağlı olarak güneyden kuzeye doğru Fethiye, Gölhisar, Tefenni ve Burdur şeklinde dört segmente bölünmüştür (Yağmurlu ve diğ., 2005). İnceleme alanı, fay zonunun Burdur segmenti içinde Burdur-Kozluca arasında 30 km'lik bir kesimini kapsamaktadır (Şekil 1). Bu segment bariz jeolojik ve morfolojik belirginliklerle ve genç fay aktivitesini yansıtan özelliklerle karakteristiktir. Bu nedenle, detaylı jeolojik haritalamanın segmentin neotektonik özelliklerinin belirlenmesine katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Bu makalenin amacı, jeolojik haritalama ile elde edilen ayrıntılı arazi verileri ışığında fay zonunun Burdur-Kozluca arasında kalan kesiminin neotektonik özelliklerini ve kinematikliğini tanımlamaktır.

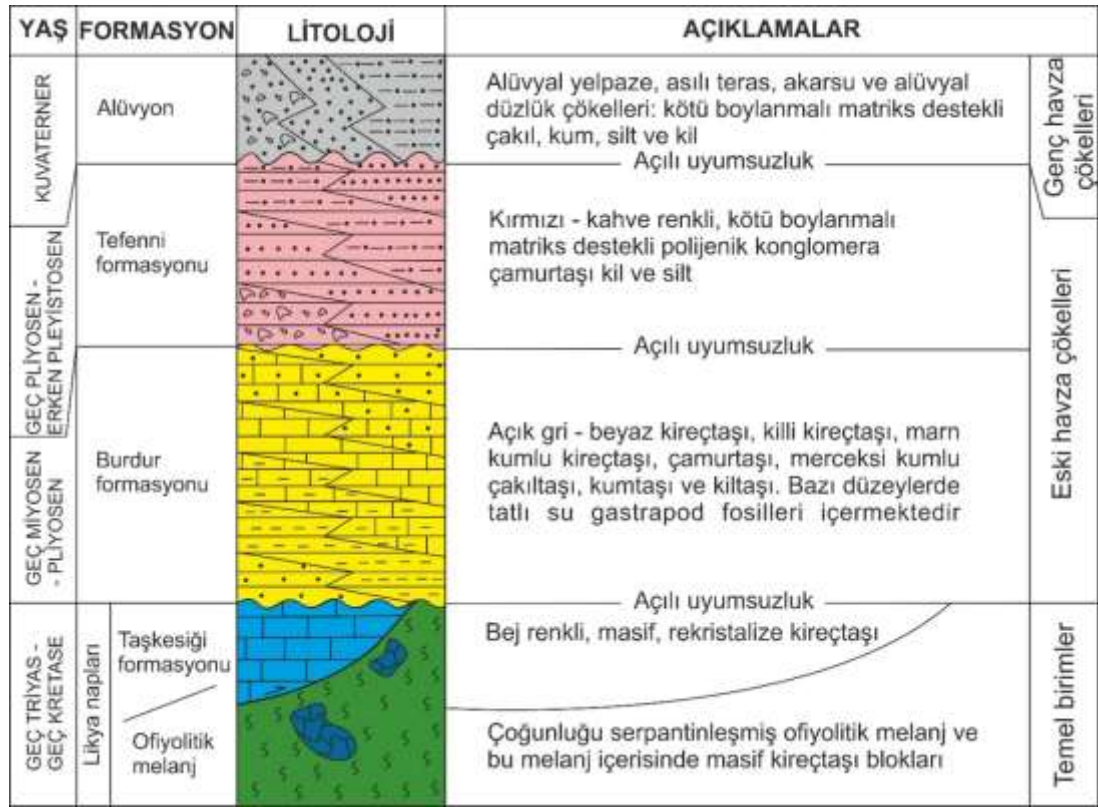


Şekil 1. Türkiye ve yakın çevresinin neotektonik yapısı içinde Fethiye-Burdur Fay Zonu'nu (FBFZ) ve inceleme alanını gösterir basitleştirilmiş harita (Barka ve diğ., 1995; Koçyiğit ve Özacar, 2003; Elitez ve Yaltrak, 2014'den değiştirilerek alınmıştır).

Figure 1. A simplified map showing the Fethiye-Burdur Fault Zone and the study area in the neotectonic framework of Turkey and surrounding areas (modified from Barka et al, 1995; Koçyiğit and Özacar, 2003; Elitez and Yaltrak, 2014).

STRATİGRAFİ (STRATIGRAPHY)

Çalışılan bölgede Triyas'tan günümüze kadar oluşmuş değişik kökenli kayaç birimleri yüzeyler (Şekil 2). Bölgede temeli Geç Triyas-Geç Kretase yaşlı ofiyolitler, ofiyolitik melanj ve kristalize kireçtaşlarını içeren Likya Napları oluşturmaktadır. Bu ofiyolitli melanj üzerine tektonik olarak rekristalize kireçtaşlarından oluşan Taşkesiği formasyonu gelir. Bu temel birimleri uyumsuz olarak Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı gölsel çökellerden meydana gelen Burdur formasyonu örter. Alüvyal yelpaze yığılması şeklindeki Geç Pliyosen-Erken Pleyistosen yaşlı Tefenni formasyonu ile Kuvaterner yaşlı alüvyonlar alttaki birimlerle açıktı uyumsuz bulunur (Şekil 2, 3).

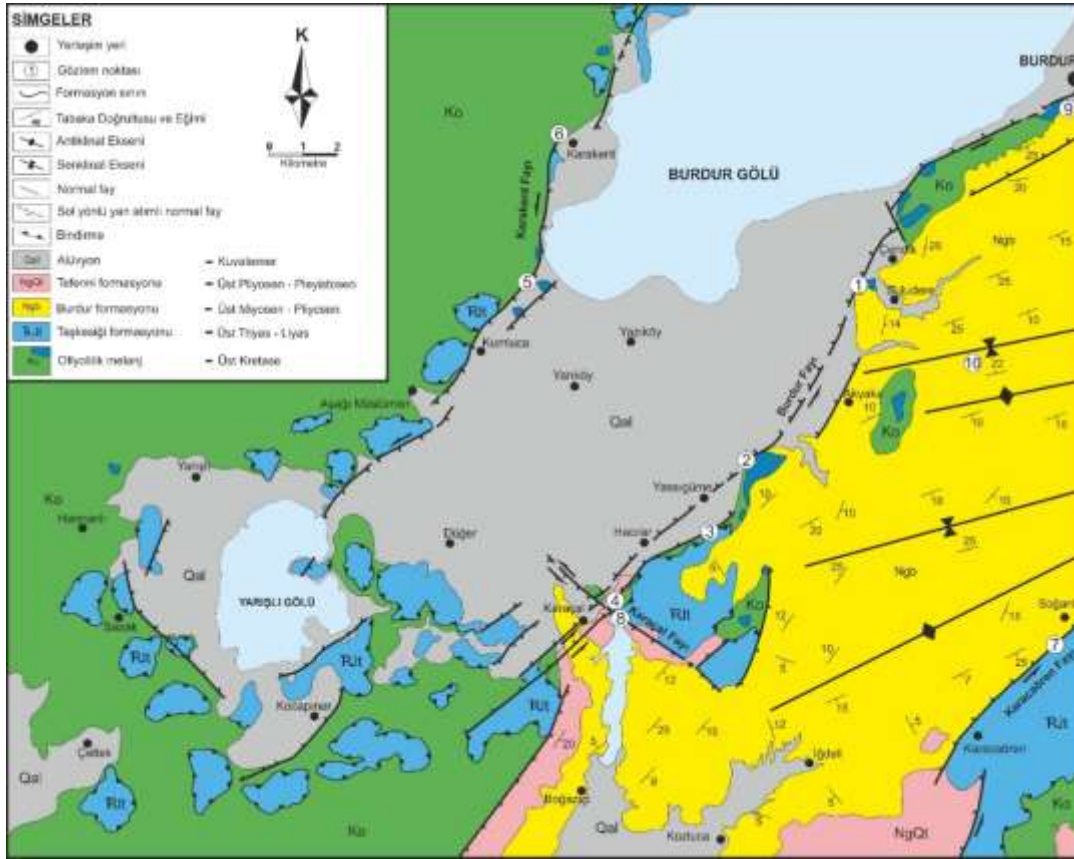


Şekil 2. İnceleme alanının genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti.

Figure 2. Generalized columnar section of the study area.

Temel Birimler (Basement Units)

İnceleme alanında en yaşlı oluşukları Likya Napları olarak bilinen çoğu serpantinleşmiş ofiyolitik kayalar ve içerisindeki yabancı (egzotik) kireçtaşı blokları ile bunları tektonik olarak örten kristalize kireçtaşları teşkil eder. Birim, bölgenin batı ve güneybatısında geniş alanda yayılım gösterir (Şekil 3). Allokon konumlu birim, Güneybatı Anadolu'da farklı tektonik ünitelerden oluşmaktadır (Brunn ve diğ., 1970; Graciansky, 1972; Poisson, 1977; Yılmaz ve Maxwell, 1982; Şenel ve diğ., 1986, 1987; Konak ve diğ., 1987; Şenel, 2001; Aksoy ve Aksarı, 2008). İnceleme alanında bu tektonik birimlerden ofiyolitik melanj ile üzerinde tektonik olarak yer alan Taşkesiği formasyonu (Şenel ve diğ., 1989) izlenir (Şekil 2 ve 3). Ofiyolitik melanj, ultramafit tektonitlerin serpantinleşmiş kayaları ile bunların piroklastikleri ve kumlu-killi çökellerden oluşan ve karmaşık bir örgülenme sunan matriks ile bu topluluk içinde haritalanabilir boyuttaki kireçtaşı bloklarından meydana gelir. Birimin oluşum yaşı, Poisson (1977), Ersoy (1990) ve Şenel ve diğ. (1989)'a göre Geç Kretase olarak saptanmıştır. Bu birimi, gri-beyaz renkli, genelde masif yapıya yer yer kalın tabakalı kristalize kireçtaşlarından oluşan, Geç Triyas-Liyas yaşlı (Poisson, 1977; Şenel ve diğ., 1989) Taşkesiği formasyonu tektonik olarak örter.



Şekil 3. İnceleme alanının jeoloji haritası.

Figure 3. Geological map of the study area.

Örtü Birimler (Cover Units)

Burdur formasyonu (Burdur formation)

İnceleme alanının güney-güneydoğusunda temel birimleri açılı uyumsuzlukla örten gölsel kireçtaşı ve kırıntılardan oluşan bir istif yüzeyler (Şekil 3). Bu istif, inceleme alanının bir bölümünü kapsayan araştırmalarında Karaman (1986) tarafından Burdur formasyonu adıyla incelenmiştir.

Birimin başlıca litolojilerini, beyaz, beyazımsı gri, bej, beyazımsı sarı ve yeşil renkli kiltası, killi-kumlu kireçtaşı, marn ve kireçtaşları oluşturur. Formasyon altta beyazımsı gri, yeşil renkli kiltaları ile başlar. Üste doğru ince-orta tabakalı marn, killi kireçtaşı ve açık krem-bej renkli çamurtaşı ardalanması ile devam eder. Formasyon içinde kumlu çakıltaşı mercekleri iyi tabakalı kumtaşı, çamurtaşı, kiltası ve marn ardalanmasına eşlik eder. İnceleme alanının kuzeydoğusunda çamurtaşı ve kiltası arasında ince kömürlü seviyelere rastlanmaktadır. Formasyonun üst düzeylerinde ise, gri-beyaz renkli, orta tabakalı, yer yer gözenekli kireçtaşları yer alır. Birim içinde bazı düzeylerde bol miktarda tatlı su gastropod fosilleri bulunur.

Temel birimleri açılı bir uyumsuzlukla örten birim, üstten Tefenni formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir (Şekil 2 ve 3). Burdur formasyonunun yaşı çeşitli araştırmacılar arasında tartışma konusudur. Burdur Havzası'nda 600 m (Karaman, 2000) kalınlığında olan birimin yaşı kömürlü seviyelerdeki polen ve palinomorflara ve ostrakod faunasına göre Geç Miyosen-Pliyosen (Karaman, 1986; Price, 1989), üst seviyelerindeki omurgalı fosillere göre Pliyosen-Erken Pleyistosen (Alçiçek ve diğ., 2013) ve paleomanyetik çalışmaya göre de (4.0-2.6 my) Pliyosen (Özkaptan ve diğ., 2018) olarak saptanmıştır. Bu veriler çalışma alanında Burdur formasyonunun çok muhtemelen Geç Miyosen-Pliyosen yaşında olduğunu gösterir.

Tefenni formasyonu (Tefenni formation)

İnceleme alanının güneyinde alttaki birimleri açılı bir uyumsuzlukla örten ve konglomera, kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı ardalanmasından oluşan bir birim yer almaktadır (Şekil 3). Bu çökeller, Aksoy ve Aksarı (2016) tarafından inceleme alanının güneyinde yaptıkları çalışmada Tefenni formasyonu adıyla incelenmiştir.

Formasyon tabanda kırmızı renkli, kötü boylanmalı, polijenik konglomeralar ile başlar. Bu konglomeralar tabanda boyutu 10-15 cm'ye erişen az yuvarlak-köşeli, temelden türeme çakıllardan oluşmuş, orta kalın tabakalar halindedir. Bunlar üste doğru kırmızı, kahve ve gri renkli kumlu konglomeralar, kumtaşı ve çamurtaşlarına geçerler ve yer yer ardalanmalı olarak gözlenirler. Havzayı kontrol eden fay kenarlarında alüvyal yelpaze çökelleri şeklinde gelişen Tefenni formasyonu üzerine diskordansla Kuvaterner yaşlı alüvyonlar gelir. Birimin yaşı stratigrafik konumu dikkate alınarak Pleyistosen (Küçükaptan, 1978), Geç Pliyosen-Pleyistosen (Price, 1989) ve Kuvaterner (Karaman, 2000) olarak belirtilmiştir.

Alüvyon (Alluvium)

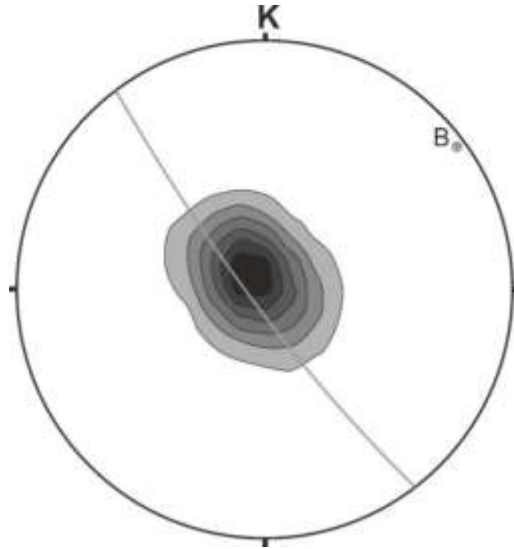
Çalışma alanında en genç oluşuklar, Burdur Gölü güneyinde ve Yarıklı Gölü çevresindeki havza tabanlarında ve yan vadiler içinde dar şeritler halinde yer alır (Şekil 3). Bunlar alttaki birimler üzerinde bağımsız gelişmiş gevşek, tutturulmamış çakıl, kum, silt ve kil içeren alüvyal yelpaze, asılı teras, güncel akarsu ve birikinti konisi çökellerinden oluşmaktadır.

YAPISAL JEOLJİ (STRUCTURAL GEOLOGY)

İnceleme alanında gözlenen ve ölçülen mesoskopik yapıları başta tabaka düzlemleri, fay düzlemleri ve fay kayma çizikleri oluşturur. Bu yapılar doku diyagramlarında değerlendirilmiştir. Fay kayma düzlemi verileri kullanılarak paleogerilme analizleri yapılmıştır. Çalışma alanındaki yapısal unsurlar; (1) kıvrımlar ve (2) faylar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Arazide ayrıntılı bir şekilde haritalanan bu yapılar aşağıda tanıtılacaktır.

Kıvrımlar (Folds)

KD-GB uzanımlı Burdur Havzası'nı dolduran Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı gölsel Burdur formasyonu iyi gelişmiş tabakalanma sergilemektedir. Eğimleri 5° ile 25° arasında değişen tabakalar kıvrımlanarak deforme olmuşlardır. Kıvrımlar uzunlukları birkaç kilometre ile 12 km arasında değişen, birbirlerine paralel eksenli bir seri antiklinal ve senklinalden oluşmaktadır (Şekil 3). Bu kıvrımlar eski havza çökellerinin iç deformasyonunu tanımlamaktadır. Kıvrım eksenleri KD-GB yönelimli olup, havzayı sınırlayan Burdur ve Karacaören faylarına oblik olarak uzanmaktadır. Haritalanan bu kıvrım-fay ilişkisi, Burdur ve Karacaören faylarının sol yanallı oblik normal faylar olduğunu ayrıca göstermektedir. Kıvrımlar yatay eksenli, hafifçe kuzeydoğuya dalımlıdır. Burdur formasyonuna ilişkin tabaka ölçümleri π -diyagramında aksiyal doku simetrisi yansıtmaktadır (Şekil 4). Bu doku diyagramı, (B) kıvrım eksen konumunun K54°D gidişli ve 5°KD'ya dalımlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Burdur formasyonunda tabaka ölçümüne ilişkin kontur diyagramı.

Konturlar: % 5-10-15-20-25 (30) (n=100).

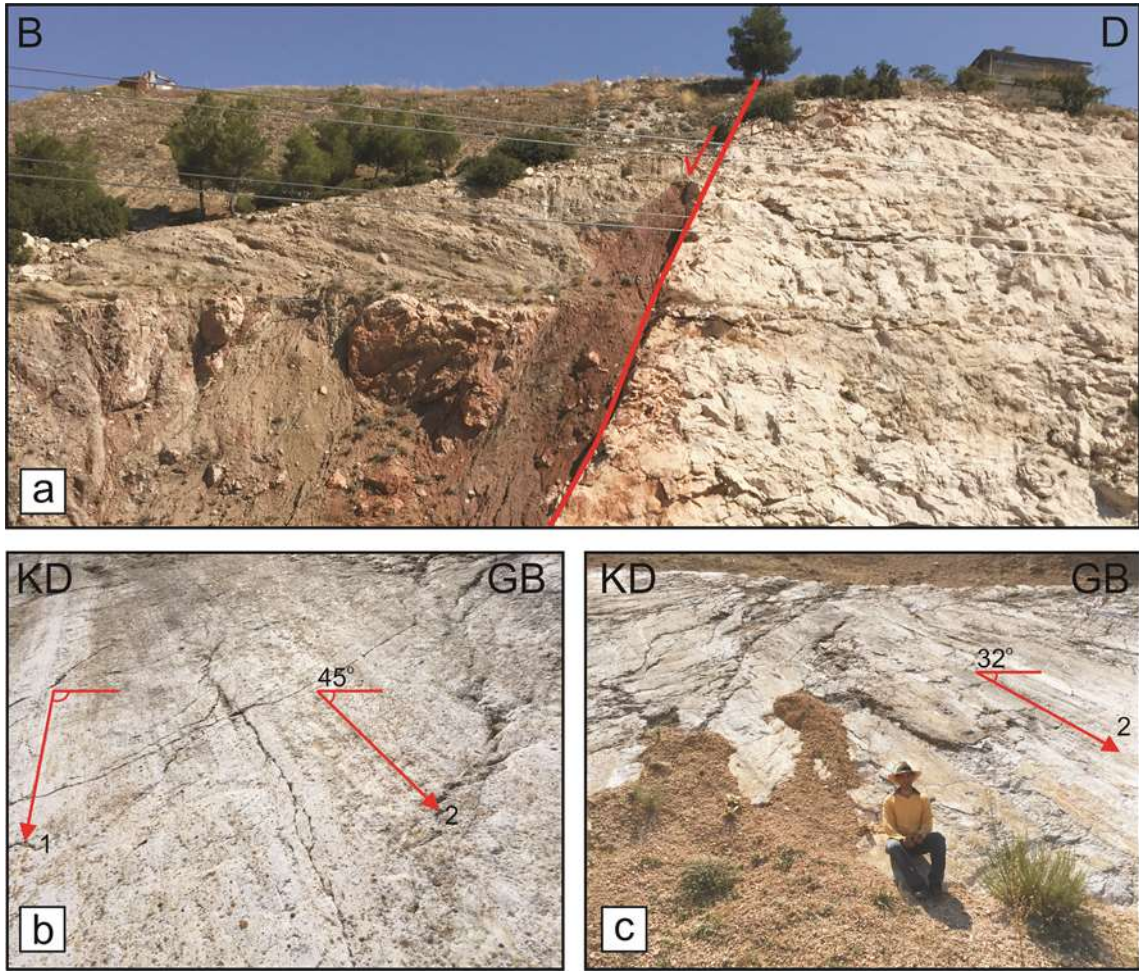
Figure 4. Contours of poles to bedding in Burdur Formation. Contour intervals are: 5-10-15-20-25 (30)% (n=100).

Faylar (Faults)

Fethiye-Burdur Fay Zonu'nun Burdur segmentinin inceleme alanı içinde kalan kesiminde bir takım KD-GB ve KB-GD gidişli sol yönlü yan atımlı normal faylar ile KD-GB, KB-GD ve K-G gidişli normal faylar bulunmaktadır. Burdur Havzası'nı sınırlayan ve kesen bu faylardan en önemlileri Burdur Fayı, Karakent Fayı, Karacaören Fayı ve Karaçal Fayı olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 3).

Burdur Fayı (Burdur Fault)

Burdur Fayı, Fethiye-Burdur Fay Zonu'nun inceleme alanı içindeki en önemli segmentini oluşturur. Burdur Gölü ve Havzası'nın güneydoğu kenarını sınırlayan fay, KD-GB gidişli, çalışılan alanında 27 km uzunlukta, güneybatıda Karaçal Köyünün güneyinden başlayıp kuzeydoğuda Burdur şehir merkezine doğru uzanan sol yanal oblik normal bir faydır (Şekil 3). Fay, Çendik kuzeyinde sola basamak yapmaktadır. Fay ortalama K40°D gidişli olup, kuzeybatıya eğimlidir. Burdur Fayı güneybatı kesiminde Geç Triyas-Geç Kretase yaşlı temel birimlerle Tefenni formasyonunu ve güncel çökelleri ve ayrıca Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı Burdur formasyonu ile güncel çökelleri karşı karşıya getirmektedir (Şekil 3). Fay yer yer güncel çökeller içinde de fay diklikleri oluşturarak devam etmektedir. Burdur Fayı'nın uzanımı boyunca yer yer ana faya paralel, uzunlukları 5-10 km arasında değişen ikinci dereceden eşlenik faylar da bulunmaktadır. Bu faylar doğrultusu boyunca iyi gelişmiş fay diklikleri ve yer yer iyi korunmuş fay düzlemi ve kayma çizikleri içermektedir (Şekil 5a-c). Bu fay düzlemlerinden birisi Yassıgüme Köyünün güneydoğusunda temele ait kireçtaşlarında gözlenmektedir. Bu lokasyonda kayma düzlemi üzerindeki ana hareket doğrultu atım bileşeni küçük sol yanal oblik normal bir fay şeklindedir. Ancak, burada sol yanal oblik normal fay hareketinden önce gerçekleşmiş normal fay hareketinin varlığını gösteren yapısal veriler bulunmaktadır. Bu fay düzlemlerinde iyi korunmuş kayma çizikleri iki farklı yönelime sahiptir. Daha yaşlı normal fay hareketi için hesaplanan sapma açısı 75°-90° aralığında iken, daha genç olan sol yanal oblik normal fay hareketi için sapma açısı 32°-45°G arasında değişmektedir (Şekil 5b-c).

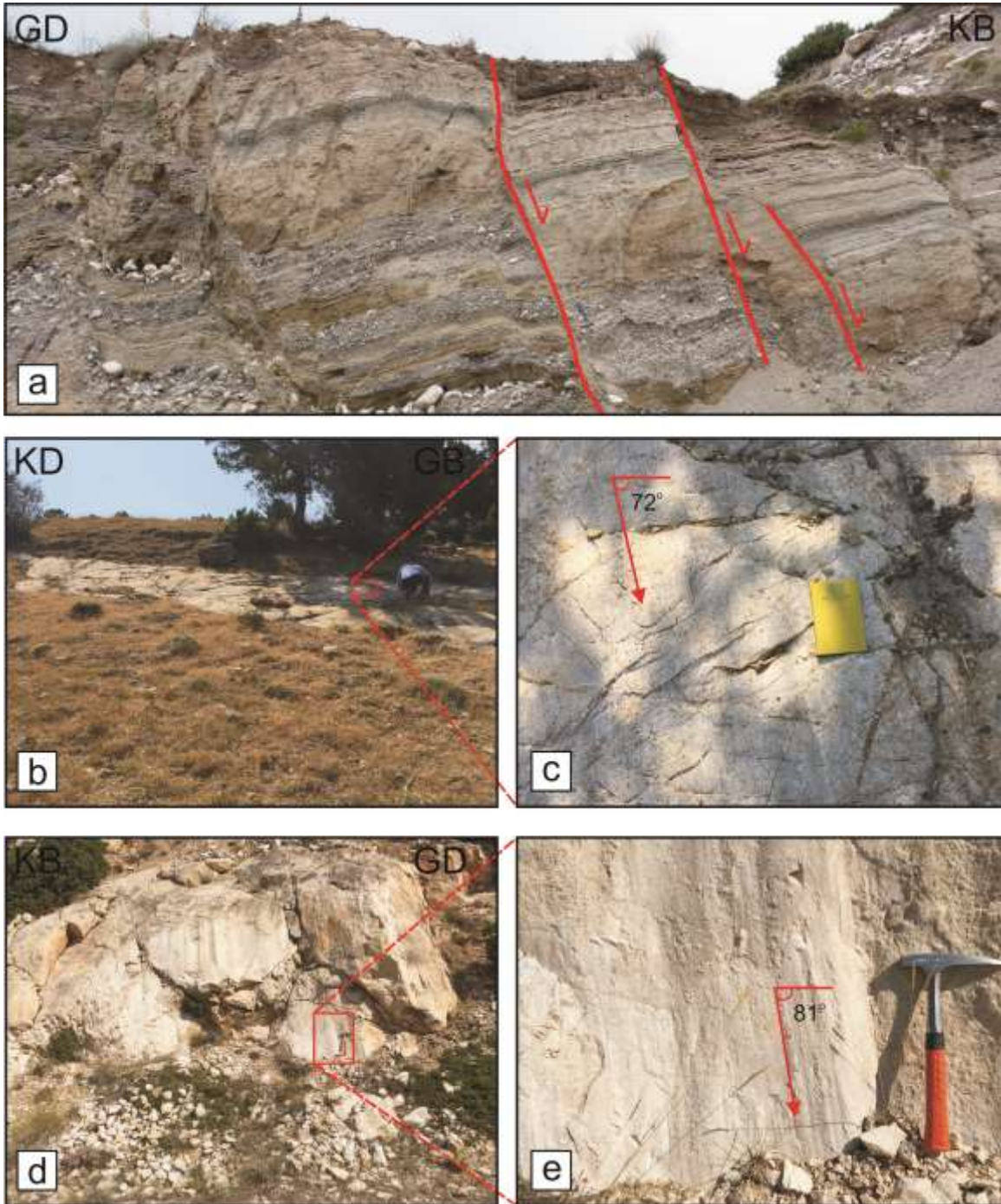


Şekil 5. Burdur Fayı'na ilişkin arazi fotoğrafları: (a) Karaçal kuzeydoğusunda KD-GB gidişli ve KB'ya eğimli fay. (b) ve (c) Yassigüme Köyünün GD'da fayda kayma düzlemi ve tekrarlanan hareket yapısının görünümü. Daha genç olan kayma lineasyonu (2) daha yaşlı kayma lineasyonu (1) üzerinde gelişmiştir.

Figure 5. Field photographs of the Burdur Fault: (a) NE-SW trending NW dipping fault segment at the northeast of Karaçal village. (b) and (c) show reactivated nature of the slip-plane at the SE of Yassigüme village. The older slickenlines (1) were superimposed by the younger slickenlines (2).

Karakent Fayı (Karakent Fault)

Karakent Fayı, Fethiye-Burdur Fay Zonu'nun çalışma alanı içinde yer alan önemli segmentlerinden birisidir. Fay güneybatıda Yarışlı Gölü'nden başlayıp kuzeyde Karakent kuzeydoğusuna doğru uzanan, KD-GB gidişli ve GD'ya eğimli sol yanal oblik normal faydır (Emre ve diğ., 2011) (Şekil 3). Fayın çalışılan alan içindeki uzunluğu yaklaşık 19 km'dir. Karakent Fayı Burdur Gölü ve Havzası'nın kuzeybatı sınırını oluşturur. Fay kuzeybatısında yer alan Likya Naplarına ait temel birimlerle güneydoğusunda yüzeyleyen alüvyonları yan yana getirmiştir. Fay doğrultusu boyunca iyi gelişmiş fay diklikleri ve yer yer iyi korunmuş kayma verileri içermektedir (Şekil 6a).



Şekil 6. (a) Kuvaterner yaşlı sedimanlar içinde kademeli olarak gelişmiş Karakent Fayı'na ilişkin arazi fotoğrafı; (b) Karacaören Fayı'na ait kayma düzlemi ve (c) bu kayma düzleminin yakından görünüşü; (d) Karaçal Fayı'na ilişkin kayma düzlemi ve (e) bu kayma düzleminin yakından görünüşü.

Figure 6. Field photographs showing (a) step-like pattern of the Karakent Fault developed in Quaternary sediments; (b) slip-plane of the Karacaören Fault; (c) close up view of the inset in figure (b); (d) slip-plane of the Karaçal Fault; (e) close-up view of the inset in figure (d).

Karacaören Fayı (Karacaören Fault)

Karacaören Fayı, çalışılan bölgede Soğanlı Köyü güneyinden başlayıp güneybatıda Karacaören güneyine kadar uzanır (Şekil 3). Fay bu sınırların her iki ucunda KD ve GB yönünde çalışma alanı dışında da devam etmektedir. Fay, inceleme alanı içinde yaklaşık 9 km uzunluğa sahip, KD-GB doğrultusunda

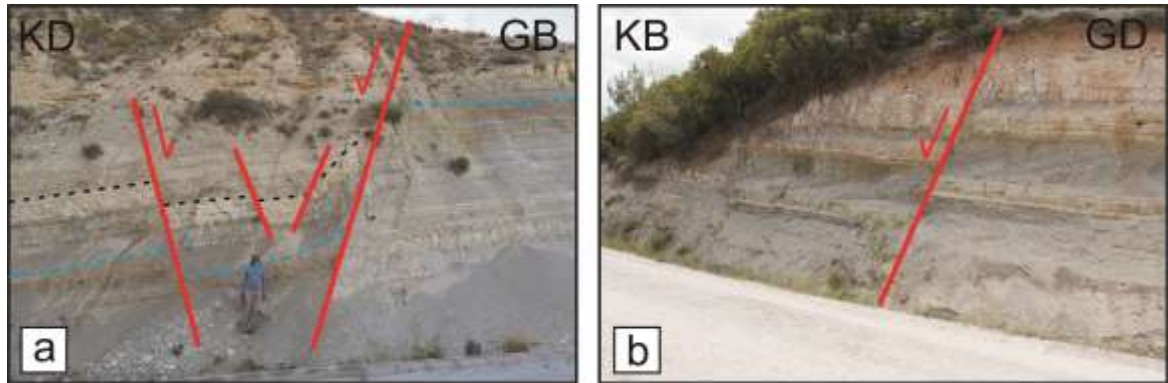
uzanan, kuzeybatıya eğimli sol yanal oblik normal bir faydır. Fay uzanımı boyunca güneydoğusunda yüzeyleyen temel birimler ile kuzeybatısında yer alan Burdur formasyonu ile Tefenni formasyonunu karşı karşıya getirmiştir. Karacaören Fayı uzanımı boyunca belirgin fay diklikleri ve yer yer iyi korunmuş kayma düzlemleri ile karakteristiktir (Şekil 6b-c).

Karaçal Fayı (Karaçal Fault)

Fethiye-Burdur Fay Zonu boyunca zonun genel gidişine aykırı gelişmiş KB-GD gidişli sol yanal oblik normal ve normal faylar bulunmaktadır (Yağmurlu ve diğ., 2005; Aksarı, 2016). İnceleme alanında KB-GD gidişli önemli faylardan birisi de Karaçal Fayıdır. Bu fay, Karaçal Köyünün hemen kuzeyinde yaklaşık 7 km uzunlukta, K55°B gidişli, GB'ya eğimli, sol yanal oblik normal bir faydır. Fay kuzey bloğunda yer alan temel birimlerle güney bloğunda yüzeyleyen Burdur ve Tefenni formasyonlarını yan yana getirmiştir (Şekil 3). Karaçal Fayı, kuzeybatı ucunda Kuvaterner çökeller içerisinde iyi gelişmiş fay dikliği ile belirli bir mesafede izlendikten sonra alüvyon altında izi takip edilememektedir. Bu faya ilişkin kayma verileri genel olarak temel birimlerden elde edilmiştir (Şekil 6d-e).

Küçük ölçekli faylar (Small scale faults)

Çalışılan bölgede harita ölçeğinde daha önce tanımlanan fayların yanı sıra Geç Miyosen-Pliyosen ve Kuvaterner yaşlı birimler içinde farklı doğrultularda gelişmiş çok sayıda küçük ölçekli normal faylar bulunmaktadır (Şekil 7). Bu fayların önemli bir bölümü havzayı sınırlayan ana faylara paralel olarak gelişen KD-GB gidişli normal faylardır. Bununla birlikte bu faylara zıt olarak gelişmiş KB-GD ve K-G gidişli normal faylar da bulunmaktadır.



Şekil 7. (a) ve (b) Burdur formasyonu içinde gelişmiş küçük ölçekli normal faylara ilişkin arazi fotoğrafları.

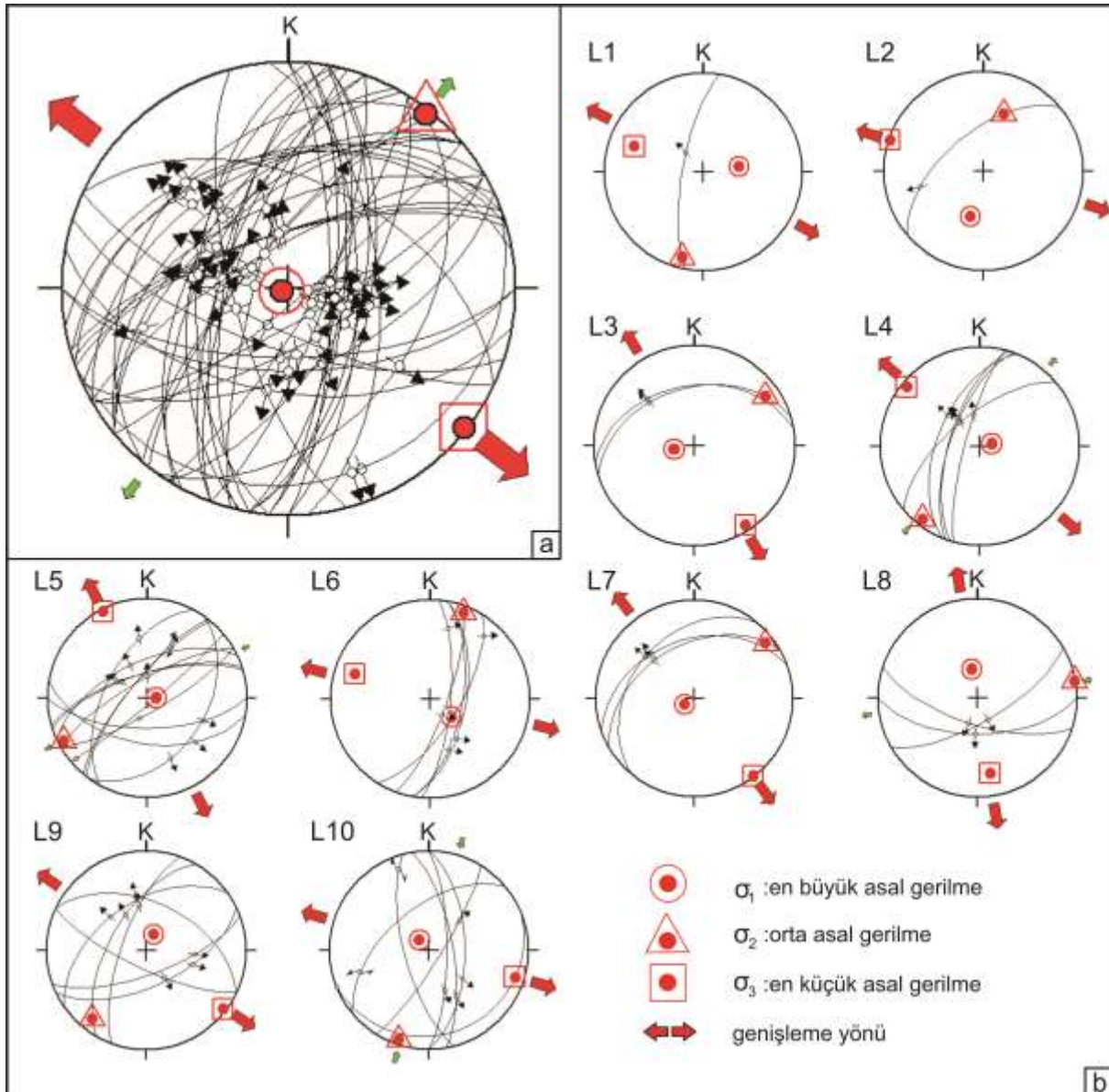
Figure 7. (a) and (b) field photographs of small scale normal faults developed in the Burdur Formation.

KİNEMATİK ANALİZ (KINEMATIC ANALYSIS)

İnceleme alanında haritalanan faylardan mümkün olan lokasyonlarda fay düzlemleri ve onların kinematik belirteçleri gibi yapısal veriler ölçülmüştür. Ölçülen bu veriler çalışılan bölgenin kinematik ve gerilme tarihçesini değerlendirmek için kullanılmıştır. Fay kayma verileri ölçüldüğü lokasyonlara ve ait oldukları faylara göre gruplandırılmıştır. Bu veriler Win-Tensor yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir (Delvaux ve Sperner, 2003). Haritalanan faylar üzerinde 10 lokasyonda (Şekil 3) toplam 48 adet kayma verileri ölçülmüştür (Şekil 8a). Fay düzlemlerinin doğrultuları KD-GB yönünde kümelenmektedir. Her ölçüm noktasından elde edilen veriler kendi içinde projeksiyon ağlarında değerlendirilerek, sonuçları asal gerilme eksenleri ile Şekil 8b'de verilmiştir.

Burdur Fayı (Burdur Fault)

Çalışma alanı içinde, Burdur Fayının gerilme tensörünü belirlemek için fay boyunca 4 lokasyonda kayma düzlemi verileri ölçülmüştür. Fay boyunca bu lokasyonlarda (L1-L4) ölçülen kayma verilerinden asal gerilme konumları L1-L4'te sırası ile σ_1 (082/60, 196/51, 260/73, 078/78), σ_2 (194/13, 020/39, 056/15, 218/10) ve σ_3 (290/26, 288/02, 147/06, 309/06) olarak hesaplanmıştır. Bu veri setinin kinematik analizi KB-GD yönlü bir gerilmenin etkili olduğu tektonik bir ortamı göstermektedir (Şekil 8 (L1-L4) ve Çizelge 1). Elde edilen kinematik analiz sonuçlarına göre Burdur Fayı, doğrultu atım bileşeninin küçük olduğu sol yanal oblik normal bir faydır.



Şekil 8. (a) İnceleme alanında ölçülen fay kayma düzlemi verilerinin tümünün stereografik projeksiyondaki gösterimi; **(b)** kayma düzlemi verilerinin kinematik analizleri ile elde edilen asal gerilme yönlerinin stereografik projeksiyonlardaki gösterimi (lokasyonlar Şekil 3'te, ayrıntılar Çizelge 1'de verilmiştir).

Figure 8. (a) Stereographic plots showing all of the slip-plane data measured in the study area; **(b)** stereographic plots of the principle stress directions obtained by analyses of the slip-plane data (see Figure 3 for locations and Table 1 for details).

Çizelge 1. Çalışma alanında fay kayma düzlemi verilerinden elde edilen paleogerilme analiz sonuçları ve faylanma türü.

Table 1. Results of paleostress analysis from slip-plane data and character of faulting in the study area.

Lokasyon	Fayın adı	Faylanma türü	Kayma veri sayısı	Asal gerilme eksenleri		
				σ_1	σ_2	σ_3
1	Burdur Fayı	sol yanal oblik normal	1	082/60	194/13	290/26
2		sol yanal oblik normal	1	196/51	020/39	288/02
3		sol yanal oblik normal	2	260/73	056/15	147/06
4		sol yanal oblik normal	5	078/78	218/10	309/06
5	Karakent Fayı	sol yanal oblik normal ve normal	12	090/76	243/14	333/03
6		sol yanal oblik normal ve normal	6	130/67	022/12	289/21
7	Karacaören Fayı	sol yanal oblik normal	3	238/73	052/14	143/01
8	Karaçal Fayı	sol yanal oblik normal	3	349/66	080/00	170/24
9	Küçük ölçekli faylar	Normal	7	025/76	218/14	127/03
10		Normal	8	318/79	198/06	107/10

Karakent Fayı (Karakent Fault)

Karakent Fayı, Emre ve diğ. (2011) tarafından sol yanal doğrultu atım bileşenli normal aktif bir fay olarak gösterilmiştir. Çalışma alanı içinde fay boyunca iki lokasyonda kayma çizikli kayma düzlemleri gözlemlenmiş ve ölçülmüştür (Şekil 8 (L5-L6)). Lokasyon 5'ten elde edilen fay kayma verilerinin kinematik analizine göre $\sigma_1 = 090^\circ/76^\circ$, $\sigma_2 = 243^\circ/14^\circ$ ve $\sigma_3 = 333^\circ/03^\circ$ olarak saptanmıştır (Şekil 8-L5 ve Çizelge 1). Lokasyon 6'dan elde edilen kayma verilerine göre $\sigma_1 = 130^\circ/67^\circ$, $\sigma_2 = 022^\circ/12^\circ$ ve $\sigma_3 = 289^\circ/21^\circ$ olarak elde edilmiştir (Şekil 8-L6 ve Çizelge 1). Her iki lokasyonda saptanan asal gerilme konumları normal faylarda olduğu gibi σ_1 düşey-düşeye yakın konumda iken σ_2 ve σ_3 yatay-yataya yakın konumda görülmektedir. Bu verilerin hesaplanan gerilme alanı KB-GD yönlü bir genişlemenin varlığını göstermektedir (Şekil 8 (L5-L6)).

Karacaören Fayı (Karacaören Fault)

Arazi gözlemleri Karacaören Fayı'nın sol yanal doğrultu atım bileşeni küçük normal bir fay olduğunu göstermiştir. Çalışılan bölgede küçük bir bölümü gözlenen bu fay üzerinde bir lokasyonda kayma verisi ölçülmüştür (Şekil 3). Bu lokasyonda elde edilen verilere göre asal gerilme eksenleri $\sigma_1 = 238^\circ/73^\circ$, $\sigma_2 = 052^\circ/14^\circ$ ve $\sigma_3 = 143^\circ/01^\circ$ olarak elde edilmiştir (Şekil 8-L7 ve Çizelge 1). Karacaören Fayının kinematik analiz sonucu kayma etkisi küçük olan KB-GD yönlü bir gerilme rejiminin etkili olduğunu göstermektedir.

Karaçal Fayı (Karaçal Fault)

Karaçal Fayı'nda kayma düzlemi verileri Karaçal baraj aksında tek bir lokasyonda ölçülmüştür. Kayma verilerinin doğrudan tersleme yöntemi ile yapılan gerilme analizi sonuçlarına göre $\sigma_1 = 349^\circ/66^\circ$, $\sigma_2 = 080^\circ/00^\circ$ ve $\sigma_3 = 170^\circ/24^\circ$ olarak elde edilmiştir (Şekil 8-L8 ve Çizelge 1). Bu gerilme tensörü yaklaşık K-G yönlü bir gerilmeyi göstermektedir. Fayın konumu (K55°B) ve gerilme yönü karşılaştırıldığında Karaçal Fayı'nın da sol yanal oblik normal bir fay olduğu görülmektedir.

Küçük ölçekli faylar (Small scale faults)

Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı Burdur formasyonu içinde KD-GB, KB-GD ve K-G doğrultulu küçük ölçekli normal faylar gelişmiştir. Bu faylarda kayma düzlemi verilerinin doğrudan terslenme yöntemi ile elde edilen asal gerilme eksenleri Lokasyon 9'da $\sigma_1 = 025^\circ/76^\circ$, $\sigma_2 = 218^\circ/14^\circ$ ve $\sigma_3 = 127^\circ/03^\circ$ ve Lokasyon 10'da $\sigma_1 = 318^\circ/79^\circ$, $\sigma_2 = 198^\circ/06^\circ$ ve $\sigma_3 = 107^\circ/10^\circ$ olarak belirlenmiştir (Şekil 8 (L9-10) ve Çizelge 1). Burdur formasyonu içindeki küçük ölçekli fayların kinematik analizlerine göre KB-GD yönlü bir genişlemenin varlığı tespit edilmiştir.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Fethiye-Burdur Fay Zonu'nun Burdur-Kozluca arasında kalan kesiminin yapısal ve kinematik özelliklerini ortaya koyma amacı ile yapılan bu araştırmada elde edilen genel sonuçlar şu şekildedir:

1. İnceleme alanında yüzeyleyen kayalar temel ve örtü birimleri olmak üzere iki bölümde incelenmiştir. Temel birimleri Geç Kretase yaşlı ofiyolitik melanj ile Geç Triyas-Liyas yaşlı rekristalize kireçtaşlarını içeren Likya Napları oluşturur. Temeli Geç Miyosen-Erken Pleyistosen yaşlı eski havza çökelleri ile Kuvaterner yaşlı genç havza çökelleri aşıl uyumsuzlukla örtmektedir.
2. Bölgede yapılan ayrıntılı jeolojik haritalama fay zonunun KD-GB gidişli, sol yanal oblik normal Burdur, Karakent ve Karacaören fay segmentlerinden oluştuğunu göstermiştir.
3. Fethiye-Burdur Fay Zonu üzerinde önemli yapısal elemanlardan biri olan Burdur Havzası, daha önce yarı graben (Price, 1989; Taymaz ve Price, 1992) ve graben (Karaman, 2000; Bozcu ve diğ., 2007) olarak tanımlanmıştır. Grabenin güneydoğu kenarını burada Karacaören Fayı olarak tanımlanan fay kontrol etmiştir. Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı göl ortamında çökelmiş sedimanter bir istiften oluşan Burdur formasyonu KB-GD yönlü gerilmeli bir tektonik rejimin kontrolünde bu graben içinde çökelmiştir. Sedimentasyondan sonra, birim KB-GD yönlü, kısa süreli sıkışma fazı ile KD-GB yönelimli bir seri antiklinaller ve senklinaller şeklinde deforme olmuştur. Bu kıvrımlar, havzayı sınırlayan Burdur ve Karacaören faylarına oblik olarak uzanmaktadır. Bu faylarda yapılan arazi gözlemleri ve ölçülen fay kayma verilerinin kinematik analizleri, Burdur ve Karacaören faylarının sol yanal oblik normal faylar olduğunu göstermiştir. Haritalanan kıvrım-fay ilişkisi de bu sonucu doğrulamaktadır.
4. Burdur Fayı'nda Yassıgüme Köyünün güneydoğusunda gözlenen fay düzleminde iki kayma çizdiği seti ayırt edilmiştir. Bunlardan $75^\circ-90^\circ$ sapma açısına sahip kayma çizdiği ortalama sapma açısı 35° olan kayma çizdiği tarafından üzerlenmiştir. Bu bulgular, Burdur fayında önce normal fay hareketinin ve daha sonra bunu izleyen sol yanal oblik normal fay hareketinin gerçekleştiğini göstermektedir.
5. Günümüz Burdur grabeni Burdur Fayı ile Karakent Fayı arasında gelişmiş bir çöküntü alanıdır. Bu havzayı dolduran deformasyon geçirmemiş yaşlı ve güncel alüvyal yelpaze, faylanma ile asılı kalmış teras ve güncel havza tabanı sedimanlarından oluşan Kuvaterner yaşlı birimler, yaşlı graben çökellerini ve diğer yaşlı birimleri açılı bir uyumsuzlukla örter. Bu güncel havzada sedimentasyon, havza kenar faylarında ölçülen fay kayma verilerinin kinematik analizlerinin gösterdiği gibi, KB-GD yönlü bir gerilme sisteminin etkisinde olasılıkla Orta Pleyistosen'den beri devam etmektedir.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma birinci yazarın, ikinci yazar danışmanlığında Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde tamamlamış olduğu yüksek lisans tez çalışmasının bir kısmını kapsamaktadır. Çalışma, Selçuk Üniversitesi ÖYP Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Yazarlar yapıcı eleştirileri ile bu makaleye katkı koyan tüm hakemlere teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aksarı, S., 2016, *Burdur - Fethiye Fay Zonunun Kemer (Burdur) - Çameli (Denizli) arasındaki bölümünün yapısal evrimi*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Aksoy, R., Aksarı, S., 2008, "Elmalı (Antalya, Batı Toroslar) kuzeyinde Likya Naplarının Jeolojisi", *J. Fac. Eng. Arch. Selcuk Univ.*, Cilt 23, Sayı 2, s.45-57.
- Aksoy, R., Aksarı, S., 2016, "Neogene-Quaternary evolution of the Tefenni basin on the Fethiye-Burdur fault zone, SW Anatolia-Turkey", *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 118, pp. 137-148.
- Alçiçek, M. C., Mayda, S., Titov, V. V., 2013, "Lower Pleistocene stratigraphy of the Burdur basin of SW Anatolia", *Comptes Rendus Palevol*, Vol. 12, pp. 1-11.
- Barka, A., Reilinger, R., 1997, "Active tectonics of the Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data", *Annale de Geofisika*, XL, pp. 587-610.
- Barka, A., Reilinger, R., Şaroğlu, F., Şengör, A., 1995, "The Isparta Angle: its importance in the neotectonics of the Eastern Mediterranean Region", *International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Region*, Vol. 1, pp. 3-17.
- Brunn, J. H., Graciansky, P. C., Gutnic, M., Juteau, T., Lefevre, T., Marcoux, J., Monod, O., Poisson, A., 1970, "Structures majeures et correlations stratigraphiques dans les Taurides occidentales", *Bulletin de la Societe Geologique de France*, Vol. 12, pp. 515-556.
- Bozcu, M., Yağmurlu, F., Şentürk, M., 2007, "Fethiye-Burdur Fay Zonunun Bazı Neotektonik ve Paleosismolojik Özellikleri, GB-Türkiye", *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, Cilt 31, Sayı 1, s. 25-48.
- Bozkurt, E., Mittweide, S.K., 2005, "Introduction: Evolution of continental extensional tectonics of western Turkey", *Geodinamica Acta*, Volume 18, Issue 3-4, p. 153-165.
- Delvaux, D., Sperner, B., 2003, "The TENSOR program for paleostress reconstruction: examples from the east African and the Baikal rift zones", *Terra Nova*, Vol. 5, No. 1, pp. 216.
- Dumont, J., Poisson, A., Şahinci, A., 1979, "Sur l'existence de coulissements sinistres recentes a l'extrémité orientale de l'arc ageen (sud-ouest de la Turquie)", *Comptes Rendus Academie Science Paris*, Vol. 289, pp. 261-264.
- Elitez, İ., Yaltrak, C., 2014, "Çameli Havzası'nın Miyosen-Kuvaterner Jeodinamiği, Burdur-Fethiye Makaslama Zonu (GB Türkiye)", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, Cilt 57, Sayı 3, s. 41-67.
- Elitez, İ., Yaltrak, C., 2016, "Miocene to Quaternary tectonostratigraphic evolution of the middle section of the Burdur-Fethiye Shear Zone, south-western Turkey: Implications for the wide inter-plate shear zones", *Tectonophysics*, Vol. 690, pp. 336-354.
- Elitez, İ., Yaltrak, C., Aktuğ, B., 2016, "Extensional and compressional regime driven left-lateral shear in southwestern Anatolia (eastern Mediterranean): The Burdur-Fethiye Shear Zone", *Tectonophysics*, Vol. 688, pp. 26-35.
- Elitez, İ., Yaltrak, C., Kürçer, A., Özdemir, E., Gündoğan, Ç. U., 2017, "A critical review of the Kıbyra Fault (Burdur-Fethiye Shear Zone, SW Turkey)", *Geodinamica Acta*, Vol. 29, No. 1, pp. 91-102.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., 2011, "1:250.000 ölçekli Türkiye diri fay haritası serisi, Isparta Paftası", Seri No: 17, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Ankara, Türkiye.
- Ersoy, Ş., 1990, "Batı Toros (Likya) naplarının yapısal öğelerinin ve evriminin analizi". *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, Cilt 37, s. 5-16.
- Eyidoğan, H., Jackson, J. A., 1985, "A seismological study of normal faulting in Demirci, Alaşehir and Gediz earthquake of 1970 in western Turkey: implications for the nature and geometry of deformation in the continental crust", *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 81, p. 569-607.
- Eyidoğan, H., Barka, A., 1996, "The 1 October 1995 Dinar earthquake, SW Turkey". *Terra Nova*, Vol. 8, No. 5, pp. 479-485.
- Graciansky, P. C., 1972, *Recherches géologiques dans le Taurus Lycien*, PhD Thesis, Université de Paris-Sud, Centre D'Orsay, Paris.
- Hall, J., Aksu, A., Elitez, I., Yaltrak, C., Çifçi, G., 2014, "The Fethiye-Burdur Fault Zone: A component of upper plate extension of the subduction transform edge propagator fault linking Hellenic and Cyprus Arcs, Eastern Mediterranean", *Tectonophysics*, Vol. 635, pp. 80-99.

- Hall, J., Aksu, A., Yaltrak, C., Winsor, J., 2009, "Structural architecture of the Rhodes Basin: a deep depocentre that evolved since the Pliocene at the junction of Hellenic and Cyprus Arcs, eastern Mediterranean", *Marine Geology*, Vol. 258, No. 1, pp. 1-23.
- Jackson, J.A., McKenzie, D.P., 1988, "Rates of active deformation in the Aegean Sea and surrounding regions", *Basin Research*, Volume 1, p. 121-128.
- Karaman, M., 1986, "Burdur dolayının genel stratigrafisi", *Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 2, s. 23-35.
- Karaman, M., 1994, "Isparta-Burdur arasının jeolojisi ve tektonik özellikleri", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, Cilt 37, Sayı 2, s. 119-134.
- Karaman, M., 2000, "Isparta ve Burdur dolayının tektono-stratigrafik özellikleri", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, Cilt 43, Sayı 2, s. 70-81.
- Koçyiğit, A., 1984, "Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişim", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, Cilt 27, Sayı 1, s. 1-16.
- Koçyiğit, A., Özacar, A.A., 2003, "Extensional neotectonic regime through the NE edge of the Isparta Angle, SW Turkey: new field and seismic data", *Turkish Journal of Earth Sciences*, Vol. 12, p. 67-90.
- Konak, N., Hepşen, N., Öztürk, E., Öztürk, Z., Çakmakoglu, A., Göktaş, F., Serdaroğlu, M., "Menderes Masifinin güney - güneydoğusundaki Mesozoyik istiflerinin karşılaştırılmalı stratigrafisi ve konumları", 41. *Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, s. 5, 16-20 Şubat 1987.
- Küçükaptan, H., 1978, Burdur-Tefenni-Başpınar 1975 yılında yapılan sondajların neticesi hakkında rapor. *MTA Enstitüsü Raporları*, Rapor No: 1681, Ankara.
- McKenzie, D. P., 1972, "Active tectonic of the Mediterranean region", *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 30, p. 109-185.
- Özkaptan, M., Kaymakçı, N., Langereis, C.G., Gülyüz, E., Özacar, A.A., Uzel, B., Sözbilir, H., 2018, "Age and kinematics of the Burdur basin: Inferences for the existence of the Fethiye-Burdur Fault Zone in SW Anatolia (Turkey)", *Tectonophysics*, Vol. 744, pp. 256-274.
- Poisson, A., 1977, *Recherches géologiques dans les Taurides occidentales (Turquie)*, PhD Thesis, Université de Paris-Sud, Centre D'Orsay, Paris.
- Price, S., 1989, *Sedimentation and Neotectonic of the Burdur Region, SW Turkey*, PhD Thesis, University of Leicester, Leicester.
- Şenel, M., 2001, "Geology Map of Türkiye with 1: 500.000 scale", *General Directorate of Mineral Research and Exploration*, Ankara.
- Şenel, M., Arbas, A., Bilgi, C., Bilgin, Z., Dinçer, M., Durukan, E., Şen, A., "Gömbe Akdağ'ın stratigrafisi ve yapısal özellikleri", 40. *Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Kaş – Antalya, s. 51, 10-14 Şubat 1986.
- Şenel, M., Selçuk, H., Bilgin, Z., Şen, A., Karaman, T., Dinçer, M., Bilgi, C., 1989, "Çameli (Denizli)-Yeşilova (Burdur)-Elmalı (Antalya) ve Dolayının Jeolojisi", *MTA Raporu*, 9429.
- Şenel, M., Selçuk, H., Bilgin, Z., Şen, A., Karaman, T., Erkan, M., Bilgi, C., "Likya napları ön cephe özellikleri (GB Türkiye)", 41. *Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, s. 6, 16-20 Şubat 1987.
- Şengör, A.M.C., Görür, N., Şaroğlu, F., 1985, "Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: in: Biddle, K., Christie-Blick, N., Eds, Strike-slip deformation basin formation and sedimentation", *Special Publications, SEPM Society for Sedimentary Geology*, Tulsa, Vol. 37, p. 277-264.
- Taymaz, T., Jackson, J., McKenzie, D. P., 1991, "Active tectonics of the North and central Aegean Sea", *Geophysical Journal International*, 106, p. 433-490.
- Taymaz, T., Price, S., 1992, "The 1971 May 12 Burdur earthquake sequence, SW Turkey: a synthesis of seismological and geological observations", *Geophysical Journal International*, Vol. 108, No. 2, pp. 589-603.
- Ten Veen, J. H., 2004, "Extension of Hellenic forearc shear zones in SW Turkey: the Pliocene-Quaternary deformation of the Eşen Çay Basin", *Journal of Geodynamics*, Vol. 37, No. 2, pp. 181-204.
- Yağmurlu, F., Savaşçın, Y., Ergün, M., 1997, "Relation of alkaline volcanism and active tectonism within the evolution of the Isparta Angle, SW Turkey", *The journal of geology*, Vol. 105, No. 6, pp. 717-728.

- Yağmurlu, F., "Burdur fayının sismotektonik özellikleri", *Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu*, İzmir, Bildiriler, s. 143-151, 24-27 Mayıs, 2000.
- Yağmurlu, F., Bozcu, M., Şentürk, M., 2005, Burdur-Fethiye Arasındaki Bölgede Burdur Fayının Sismotektonik Özellikleri, *Tübitak ÇAYDAG Projesi*, Proje No. 101Y027.
- Yılmaz, P., Maxwell, J., 1982, "K–Ar investigations from the Antalya complex ophiolites, SW Turkey", *Ofioliti*, Vol. 2, pp. 527-538.



PERFORMANCE EVALUATION OF AFYON GEOTHERMAL POWER PLANT WITH LOW GRADE ENERGY SOURCES

Ceyhun YILMAZ 
ceyhunyilmaz@aku.edu.tr

Department of Mechanical Engineering, Afyon Kocatepe University, 03200 Afyonkarahisar, TURKEY

(Geliş/Received: 30.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.01.2020)

ABSTRACT: Exergoeconomic performance evaluation of 2700 kW binary cycle design geothermal power plant in western Turkey is conducted using actual plant operating data, and potential improvements are identified. Afyon Geothermal Power Plant is thermodynamically modeled in a computer environment using current working parameters in a comprehensive way for the use of geothermal energy in electricity generation. To simulate the plant during thermodynamic conditions with exergoeconomic analysis, the Engineering Equation Solver (EES) software is used. Geothermal water temperature and mass flow rate of the plant are 110°C, and 150 kg/s, respectively. Energy and exergy efficiencies of the plant are calculated as 10.4%, and 29.7%. The potential annual revenue of geothermal electricity is calculated to be 2,880,277 \$/yr. The exergetic cost of the electricity from the plant is calculated as 0.0233 \$/kWh, respectively.

Key Words: Geothermal power plant, thermodynamic analysis, exergoeconomic analysis

Düşük Enerji Seviyeli Kaynakla Çalışan Afyon Jeotermal Güç Santralinin Performans Değerlendirilmesi

ÖZ: Türkiye'nin batısındaki 2700 kW'lık binary jeotermal santralinin termoeekonomik performans değerlendirmesi ve mevcut işletme verileri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve potansiyel iyileştirmeler tespit edilmiştir. Afyon Jeotermal Santrali, elektrik üretiminde jeotermal enerjinin kullanımı için mevcut çalışma parametrelerini kapsamlı bir şekilde kullanarak bilgisayar ortamında termodinamik olarak modellenmiştir. Santralin modellenmesinde termodinamik koşullar altında ekergoeekonomik analiz için Mühendislik Denklem Çözme (EES) yazılımı kullanılmıştır. Jeotermal suyun sıcaklığı ve kütleli debisi sırasıyla 110°C ve 150 kg/s'dir. Santralin enerji ve ekserji verimliliği %10.4 ve %29.7 olarak hesaplanmıştır. Yıllık ortalama jeotermal elektrik geliri 2,880,277 \$/yıl olarak hesaplanmaktadır. Santralden üretilen elektriğin ekserjetik maliyeti ise 0.0233 \$/kWh olarak hesaplanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji santrali, termodinamik analiz, eksergoekonomik analiz

1. INTRODUCTION

Today, energy consumption appears to be directly related to the level of population and degree of industrialization of the country. Those countries that have abundant supplies of energy available to them have realized substantially higher rates of industrial growth. In many cases, the availability low-cost energy has led to the inefficient utilization of energy and to harmful environmental effects. However, it is obvious that in order to raise the level of the world population, the present rate of energy consumption must be greatly expanded. Currently, the major energy source of the world is a conventional energy source called fossil fuels. This source supplies about 70 percent of the total fuel of energy in the world. The other 30 percent is renewable energy sources (Kasaei *et al.*, 2017). The utilization of renewable energy sources is

very attractive because they are continuing or non depletion sources of energy and because they are relatively non pollutant a very important consideration. In the industrial application, energy is the most important material to solve the problem of requirements. Especially developing countries need too much energy consumption that machines work with consumed in the industrial applications. For that reason, this problem should be solved by the alternative energy resources. Currently, the most commonly used energy resources are the fossil-based energy sources in the world. These conditions bring with some problems. Some of these are the depletion of fossil fuels, the harmful effect on the environment and human health. The exhaust of the plants is one of the major contributors to the world's air pollution problem. Four major emissions produced by fossil-based energy sources using are hydrocarbons, carbon monoxide, oxides of nitrogen, and solid particles (Balcilar *et al.*, 2018). Two methods are used to reduce the harmful effects of fossil fuel emissions. One is to improve the technology of energy conversion systems and fuels better combustion occur and fewer emissions are produced. The second method is alternative energy resources. For instance, this issue has led us to alternative energy sources, which are renewable and sustainable energies. Today, the best known alternative energy sources are renewable energy sources which wind, solar, hydro, geothermal, and biomass are the most common. Produced renewable electricity must be economically competitive level with against fossil-based energy resources. Geothermal binary cycle power plants tend to have low environmental impacts because the geothermal water which can contain toxic gases is not sprayed to the atmosphere, except during well drilling (Yilmaz, 2017).

In the open literature, some relevant studies have been conducted on geothermal energy for electricity production. Kanoglu (2002) was performed an exergy analysis of 12.4 MW existing binary geothermal power plant. The exergetic efficiency of the plant was found to be 29.1% based on the exergy of the geothermal water at the inlet state, and 34.2% based on the exergy loss of the preheater system. The corresponding thermal efficiencies for the plant were calculated to be 5.8 and 8.9%, respectively. DiPippo (2007) was reviewed as to its appropriateness to serve as the ideal model for geothermal binary power plants. He showed that the Carnot cycle sets a theoretical upper limit on the thermal efficiency of these plants. He found that actual binary plants can achieve relative efficiencies as high as 85%. Yari (2010) was proposed an exergetic analysis of various types of geothermal power plants. The maximum thermal efficiency was found to be related to the binary cycle with R123 as the working fluid and was calculated to be 7.65%. Karadas *et al.* (2015) were conducted a regression analysis of 7.35 MW existing binary geothermal power plant using actual plant data to assess the plant performance. According to their analyses, since 2009, the plant performance was started to decline with 270 kW electricity generation capacities. Wang *et al.* (2015) performed a thermodynamic analysis and optimization of a flash-binary geothermal plant. The effects of some thermodynamic parameters on system performance were examined. A parametric optimization was performed to obtain the optimum system performance. Hanbury and Vasquez (2018) were performed a life cycle analysis of geothermal energy for power and transportation with a stochastic approach. They showed that geothermal energy extraction is not without environmental cost. Aksoy (2014) was provided information on power generation via geothermal resources and sector development. He considered by a power plant at Kızıldere in Denizli, whereas the first private sector investment was the Dora-I power plant, commissioned in 2006. Koroneos *et al.* (2017) studied an exergy analysis for a proposed binary geothermal power plant in Nisyros Island, Greece. According to their study, a system exergetic efficiency of 41% and a thermal one of 12.8% has been resulted in supporting the technical feasibility of the proposed geothermal plant. Kolahi *et al.* (2018) were presented a novel approach for optimizing and also improving a flash binary geothermal power plant. They have shown an investigation on flash chamber pressure effect on the system performance was accomplished. Shokati *et al.* (2015) were compared a basic, dual-pressure, and dual-fluid ORCs and Kalina cycle for power generation from the geothermal fluid reservoir from energy, exergy, and exergoeconomic viewpoints. Heberle *et al.* (2017) were investigated a techno-economic analysis of a solar thermal retrofit for an air-cooled geothermal Organic Rankine Cycle power plant. Their analysis results indicated that the detailed simulations throughout one year show up to 7.8% more electricity, a solar-to-electric efficiency of 10% and a significant power gain during summer. Unverdi and Cerci (2013) were performed a performance analysis of Germencik Geothermal Power

Plant. They calculated the second law efficiency of overall plant has been found to be 35.34%. The study results were given in tables and the largest loss of exergy was determined to occur in separators. Zare (2015) investigated and compared the performance of three organic Rankine cycles (ORC) for binary geothermal plants and evaluated three ORC configurations that considered product cost optimization and proper model selection for the plants. Bina *et al.* (2018) were evaluated an exergoeconomic analysis and optimization of single and double flash cycles for Sabalan geothermal power plant. Their evaluation of the plant showed that in double flash energy and exergy efficiency were increased from 16.26% and 40.06% to 17.73% and 50.89%, respectively. Rachmat *et al.* (2018) were conducted an exergoeconomic analysis and optimization of a combined double flash binary cycle for Ulubelu geothermal power plant in Indonesia. The proposed system was used current data and properties of brine exploited from the Ulubelu geothermal well in Indonesia and four working fluid candidates, namely n-Pentane, R141b, R123, and R245fa are used in binary cycles. The results showed that n-pentane is the best working fluid where optimization indicated that the system can be generated 63.5 MW electricity with thermal and exergy efficiencies of 17.6% and 65.2% and a specific cost of 1.70 \$/GJ, respectively.

The study presents an exergoeconomic performance evaluation of an existing Afyon Geothermal Power Plant. Exergoeconomic approach was developed and used to determine the optimum working conditions in the plant. In this context, an exergoeconomic performance analysis of the plant was performed. As can be seen in the open literature, there is no thermodynamic and economic analysis for the plant. A detailed thermodynamic and exergoeconomic analyses of this plant has not been done before in the current status of the literature. Therefore this study is almost original and new for this plant. The novelty of the study is performance analysis of the existing plant, which is currently installed and operating. The plant is performed the economics of thermodynamically modeled in a computer environment using exergoeconomic cost method in a comprehensive way for the use of geothermal energy in power generation. This study was performed by (1) thermodynamic analysis under current working conditions of the plant, (2) conducting exergy and exergetic cost analyses for each component of the plant and (3) the optimum working conditions and costs concerning the exergoeconomic analysis.

2. PLANT DESCRIPTION AND OPERATION CHARACTERISTICS

Only a fraction of geothermal resources have relatively high temperatures making them suitable for electricity production. Geothermal power plants have been in operation for decades in many parts of the world. Figure 1 shows the general overview of Afyon Geothermal Power Plant. It is an existing geothermal plant located at 10 km north side of the city center of Afyonkarahisar in western of Turkey. Geothermal liquid water at 110°C is extracted from two resource wells (AF-23 and R-260) at a rate of 150 kg/s. The production wells AF-23 and R-260, built between 2012 and 2014, are 800 m and 1800 m in depth, respectively. Opened on 13 July 2017, the plant started to produce electricity on 16 August 2017. This water is pumped to the energy conversion heat exchanger of the thermodynamic cycle. The installed capacity of Afyon geothermal power plant located in Afyonkarahisar is 2.76 MW and it provides energy requirements of an average 4762 dwellings. A natural landscape of the Omer Gecek binary geothermal power plant is given in Fig. 1. The plant consists of three parts. These are the cycle of the geothermal water, the cycle of the ORC (R134a), and the cycle of cooling water. In order to convert the vapor form of R134a that reaches high pressure with the cooling water cycle to the geothermal water at the turbine outlet, the working fluid is supplied to the condenser at the correct flow and temperature, and it is necessary for efficient energy conversion of geothermal water. For this reason, when the average monthly air temperatures in Afyonkarahisar province are examined, it will help us to predict the cooling fluid temperature and performance graphs regarding the approach to the design values of cooling water. The plant modeling and SCADE view are given below in Fig. 1.

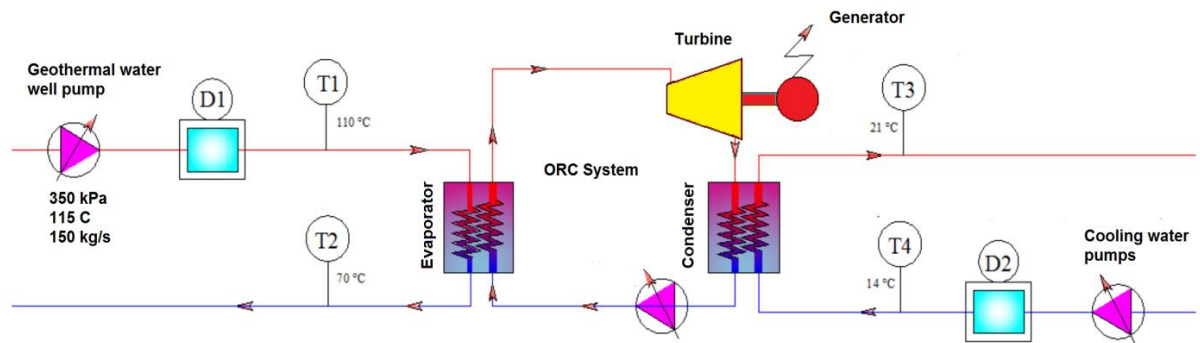


Figure 1. Afyon Geothermal Power Plant SCADA view (Sahin, 2016).

3. PLANT WORKING PRINCIPLE

Different thermodynamic cycles can be used for producing power from geothermal resources. The readers are referred to Kanoglu (2002) for a detailed coverage of geothermal power plants. A case study on an existing binary geothermal power plant is available in this study. Binary cycle plants use the geothermal brine from liquid-dominated resources at relatively low temperatures. The binary plant in Afyonkarahisar uses a geothermal resource at 110°C (Sahin, 2016). These plants operate on a Rankine cycle with a binary working fluid that has a low boiling temperature. The working fluid is completely vaporized and usually superheated by the geothermal water in a heat exchanger network, as shown in Fig. 2. In this configuration, the resulting vapor expands in the turbine, and then condenses in an air-cooled condenser (dry cooling tower) before being pumped back to the heat exchangers to complete the cycle. Fig. 2 shows the water cooled binary geothermal cycle. R134a was assumed for the working fluid which is the most efficient working fluid in the low-temperature binary cycle power plants. The thermodynamic details of the working fluid selection are given in comparison to the results and discussion section. The vaporized working fluid is expanded through a binary turbine to generate electricity. The expanded working fluid in the turbine is subsequently condensed in a water cooler and returned to the heat exchangers to be heated by hot geothermal water again. Generally, an air-cooled condenser is used, but water-cooled condenser is used in this plant. The reason for this is that it is a river basin suitable for cooling near the power plant. Therefore, more efficient cooling can be achieved. The geothermal water is often reinjected into the reservoir via the reinjection well. When the binary cycle is used in the geothermal power plants are insensitive to the presence of non-condensable gases and produce nearly no environmental emissions. The binary geothermal power plant is a heat engine that converts energy in geothermal water into shaft work of turbine, usually made available on a steam turbine shaft. The Afyon geothermal plant uses geothermal water at 110°C as the heat source of the binary cycle (Sahin, 2016).

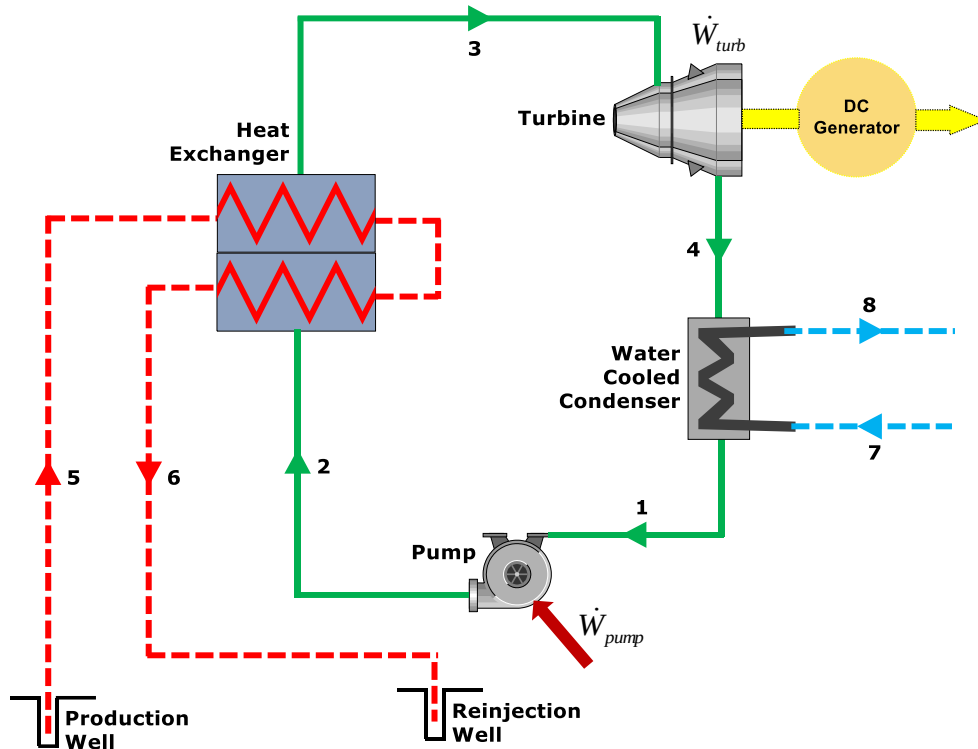


Figure 2. Simplified schematic configuration of Afyon Geothermal Power Plant.

4. THERMODYNAMIC MODELING

Afyon Binary Geothermal Power Plant operates on a steady state and steady flow condition. For thermodynamic analysis, we use properties of water for geothermal water. Control volume has been conserved mass, energy, entropy, and exergy. The equation equilibriums for the plant are as follows (Abusoglu and Kanoglu, 2008).

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (2)$$

$$\sum \frac{\dot{Q}}{T_s} + \dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \quad (3)$$

$$\dot{E}x_{heat} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e ex_e - \sum \dot{m}_i ex_i + \dot{E}x_{dest} \quad (4)$$

where ex is the specific flow exergy, $\dot{W}$ and $\dot{Q}$ are the net work and heat transfer, the mass flow rate is denoted by $\dot{m}$, enthalpy is represented by h , $\dot{E}x_{dest}$ is the amount of exergy destruction and $\dot{E}x_{heat}$ is the amount of exergy transfer by heat. Although we will select real operation values for the geothermal water and the cycle parameters, the results will be almost realistic. Here are assumed parameters: geothermal water temperature, $T_5 = 110^\circ\text{C}$. Geothermal water mass flow rate, $\dot{m}_{geo} = 150 \text{ kg/s}$. Dead state temperature, $T_0 = 14^\circ\text{C}$. Optimum flash process pressure, $P_5 = 143.4 \text{ kPa}$. Binary turbine inlet pressure, $P_3 = 2800 \text{ kPa}$. Turbine isentropic efficiencies, $\eta_{turb} = 90\%$. Analysis environment dead state pressure, $P_0 = 89.4 \text{ kPa}$, respectively. Mass, energy and exergy balance equations applied to the all components are expressed in the Table 1, according to the above thermodynamic considerations and assumptions.

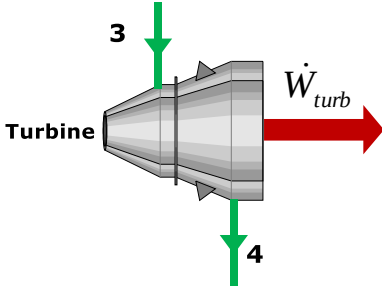
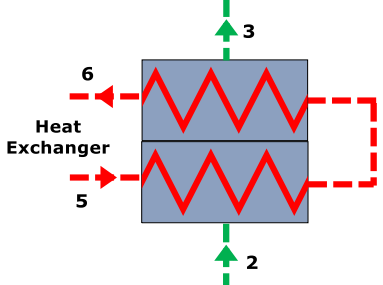
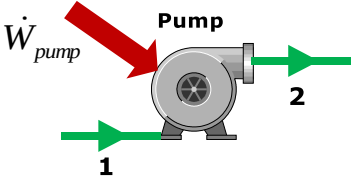
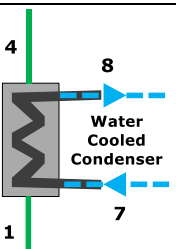
The energy efficiency of the binary geothermal power plant can be written according to the above equations as:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net,geo}}{\dot{E}_{geo}} = \frac{\dot{W}_{net,binary} - \dot{W}_{parasitic}}{\dot{m}_{geo}(h_{geo} - h_0)} \quad (5)$$

The exergy efficiency of the combined geothermal power plant can be written using exergy of the geothermal water at well head as:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_{net,geo}}{\dot{E}x_{geo}} = \frac{\dot{W}_{net,binary} - \dot{W}_{parasitic}}{\dot{m}_{geo}(h_{geo} - h_0 - T_0(s_{geo} - s_0))} \quad (6)$$

Table 1. Thermodynamic balance equations applied to the all system components.

System component	Mass, energy and exergy equations
	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$ $\dot{W}_{turb,act} = \dot{m}_3(h_3 - h_4)$ $\dot{W}_{turb,rev} = \dot{m}_3(ex_3 - ex_4)$ $\dot{E}x_{turb,dest} = \dot{W}_{turb,rev} - \dot{W}_{turb,act}$ $\varepsilon = \frac{\dot{W}_{turb,act}}{\dot{W}_{turb,rev}}, \eta_{turb} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$
	$\dot{m}_3 = \dot{m}_2, \dot{m}_6 = \dot{m}_5$ $\dot{m}_2(h_3 - h_2) = \dot{m}_5(h_5 - h_6)$ $\dot{E}x_{BHE,dest} = \dot{m}_5(ex_5 - ex_6) - \dot{m}_2(ex_3 - ex_2)$ $\varepsilon = \frac{\dot{m}_2(ex_3 - ex_2)}{\dot{m}_5(ex_5 - ex_6)}$
	$\dot{m}_2 = \dot{m}_1$ $\dot{W}_{pump,act} = \dot{m}_2(h_2 - h_1)$ $\dot{W}_{pump,rev} = \dot{m}_2(ex_2 - ex_1), \varepsilon = \frac{\dot{W}_{pump,rev}}{\dot{W}_{pump,act}}$ $\dot{E}x_{pump,dest} = \dot{W}_{turb,act} - \dot{W}_{turb,rev}$
	$\dot{m}_4 = \dot{m}_1, \dot{m}_8 = \dot{m}_7$ $\dot{m}_4(h_4 - h_1) = \dot{m}_7(h_8 - h_7)$ $\dot{E}x_{WCC,dest} = \dot{m}_4(ex_4 - ex_1) - \dot{m}_7(ex_8 - ex_7)$ $\varepsilon = \frac{\dot{m}_7(ex_8 - ex_7)}{\dot{m}_4(ex_4 - ex_1)}$

Binary heat exchanger pinch analysis is performed as the design consideration of the binary plant. The power consumption to the production and pumps is usually small compared to the turbine power. However, the power consumed by the cooling fans in the condenser can be up to 20% of the turbine power (Kanoglu and Dincer, 2009). Energy and exergy characteristics for each state of the system in Fig. 2 are calculated in Table 2. The thermodynamic properties of the liquid and gaseous phases of the geothermal water and of the selected working fluid of R134a in the binary cycle are calculated by computer software program EES (F-Chart Software, 2015). The thermodynamic analysis is critical because it forms the basis of exergoeconomic analysis. For this reason, the thermodynamic analysis must be done correctly. In Table 2, exergy values of all states in the plant are calculated and are given in detail. These values are calculated taking into account the actual operating conditions of the plant as mentioned before.

Table 2. Plant thermodynamic performance analysis results.

State	Fluid	P (kPa)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg°C)	ex (kJ/kg)	$\dot{E}x$ (kW)
0	Geothermal	89.4	11.3	-	47.56	0.1703	-	-
0'	R-134a	89.4	11.3	-	265.1	1.076	-	-
0''	Water	89.4	11.3	-	47.52	0.1701	-	-
1	R-134a	1650	15.7	108	73.33	0.2802	34.54	3731
2	R-134a	120	17.0	108	75.51	0.2814	36.39	3931
3	R-134a	120	100	108	309	0.9644	75.74	8182
4	R-134a	1650	34.1	108	276.9	0.9831	38.29	4137
5	Geothermal	1650	110	150	461.4	1.419	58.9	8835
6	Geothermal	720	70	150	293.1	0.9552	22.38	3357
7	Water	100	11.3	541.9	47.52	0.1701	0	0
8	Water	100	21	541.9	88.1	0.3104	0.6976	378

5. EXERGEOECONOMIC MODELING

Exergoeconomic analysis is a highly realistic method of assessing the cost of a thermal system that inevitably interacts with the environment. Since the available thermodynamic values of mass, heat, and work in the systems can be determined by exergy, it is significant that the exergy is used when cost allocation is made in thermal systems. We refer to this approach as exergy costing. Thus, the cost of power and heat flow associated with exergy entering and leaving the system can be expressed by the following equations. The purchase equipment costs and the operating maintenance costs of the plant equipment are considered as the fundamental part of the system costs. These two main cost parameters include all other cost parameters of the plant. Thus, the cost balance for system equipment can be written as (Bejan *et al.*, 1996):

$$\sum_{in} \dot{C}_{k,in} + \dot{Z}_k^T + \dot{C}_k^Q = \sum_{out} \dot{C}_{k,out} + \dot{C}_k^W \quad (7)$$

Here

$$\dot{C} = c \times \dot{E}x \quad (8)$$

For any k component, the exergy rates of inlet and exit are calculated by using exergy relations. $\dot{Z}_k^T$ is the cost ratio for a component in \$/h. The general equation of the cost ratio associated with initial cost and operating-maintenance costs for a component can be expressed as (Bejan *et al.*, 1996):

$$\dot{Z}_k^T = \dot{Z}_k^{IC} + \dot{Z}_k^{OMC} \quad (9)$$

The economic analysis results of the power plant and equipments with Aspen Plus program in the computer environment are given in Table 3.

Table 3. The cost rates associated with the components of the plant (F-Chart Software, 2015; Aspen Plus, 2015).

Components	PEC (\$)	$\dot{Z}_k^{IC}$ (\$/h)	$\dot{Z}_k^{OMC}$ (\$/h)	$\dot{Z}_k^T$ (\$/h)
Binary Heat Exchanger	300,000	4.233	3.488	7.722
Binary Turbine	750,000	10.584	8.722	19.306
Water cooled condenser	300,000	4.233	3.488	7.722
Binary pump	100,000	1.411	1.162	2.574
Other system outlays	100,000	1.411	1.162	2.574
Total purchase equipment cost (PEC)	1,550,000	21.872	18.022	39.894
Operating and maintenance cost (OMC)	150,000			

6. EXERGOECONOMIC COST RELATIONS

The cost of power and heat flow associated with exergy entering and leaving the system can be expressed by the following equations. Exergoeconomic cost balance equations can be expressed as (Bejan *et al.*, 1996):

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}x_i = c_i (\dot{m}_i e_i) \quad (10)$$

$$\dot{C}_e = c_e \dot{E}x_e = c_e (\dot{m}_e e_e) \quad (11)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (12)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}x_q \quad (13)$$

From here, the exergetic cost balance due to the heat generated and power for a system component can be written as:

$$\sum_e (c_e \dot{E}x_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}x_{q,k} + \sum_i (c_i \dot{E}x_i)_k + \dot{Z}_k^T + \sum_i (c_i \dot{E}x_i) \quad (14)$$

The above equation states that the total cost of the exergy flow from the system for a system component is equal to all the expenditure required to calculate this cost: the cost of the incoming exergy flow plus the initial investment and other costs. All equipment of the plant exergy costing are expressed as in Table 4.

Table 4. Cost balance equations and auxiliary equations of the system.

Component	Exergetic cost rate balance equation	Auxiliary Equations
Binary Heat Exchanger	$\dot{C}_5 + \dot{C}_2 + \dot{Z}_{BHE} = \dot{C}_6 + \dot{C}_3$	$c_5 = c_6$ c_3 (variable)
Binary Turbine	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_{BT} = \dot{C}_{WIT} + \dot{C}_4$	$c_3 = c_4$ $c_{electricity}$ (variable)
Water cooled condenser	$\dot{C}_4 + \dot{C}_7 + \dot{Z}_{WCC} = \dot{C}_8 + \dot{C}_1$	$c_8 = c_7$ $c_7 = 0$
Binary pump	$\dot{C}_1 + \dot{C}_{Wp} + \dot{Z}_{BP} = \dot{C}_2$	c_1 (known) c_2 (variable)

7. RESULTS AND DISCUSSION

7.1. Thermodynamic Analysis

As a result of the thermodynamic analysis, the energy efficiency of the Afyon Geothermal binary power plant was calculated as 10.4% based on the energy input to the R134a binary cycles, according to the states at 7 and 8. Approximately 90% of the geothermal water energy in the reservoir means that it cannot be used and is rejected as heat or reinjected back to the ground. The exergy rate input the plant was calculated as 8835 kW by approaching the approximate value of the exergy transferred from the geothermal water to the binary plant supported by the secondary working fluid (R134a). The net power production from the binary plant was calculated as 2622 kW. The exergy change of geothermal water is thought to be the additional exergy input to the cycle in the well state. According to these conditions, the exergy efficiency of the dual geothermal power plant was calculated to be 29.7%.

The exergy rates and distributions of the components exergy destruction of the Afyon Geothermal Power Plant is given in Figures 3 and 4. After using in the plant, geothermal water is reinjected into the underground. The geothermal water reinjection exergy loss of geothermal water is calculated to be 3357 kW. In geothermal power plants, reinjection is the most loss of exergy destruction. The large part of the energy from the geothermal water is rejected from the plant without being used. The most destructive components are the binary heat exchanger and turbine, representing 1227 kW and 572.6 kW of the total exergy destruction. This power plant is used Akarçay river water as cooling water in the condenser unit (Sahin, 2016).

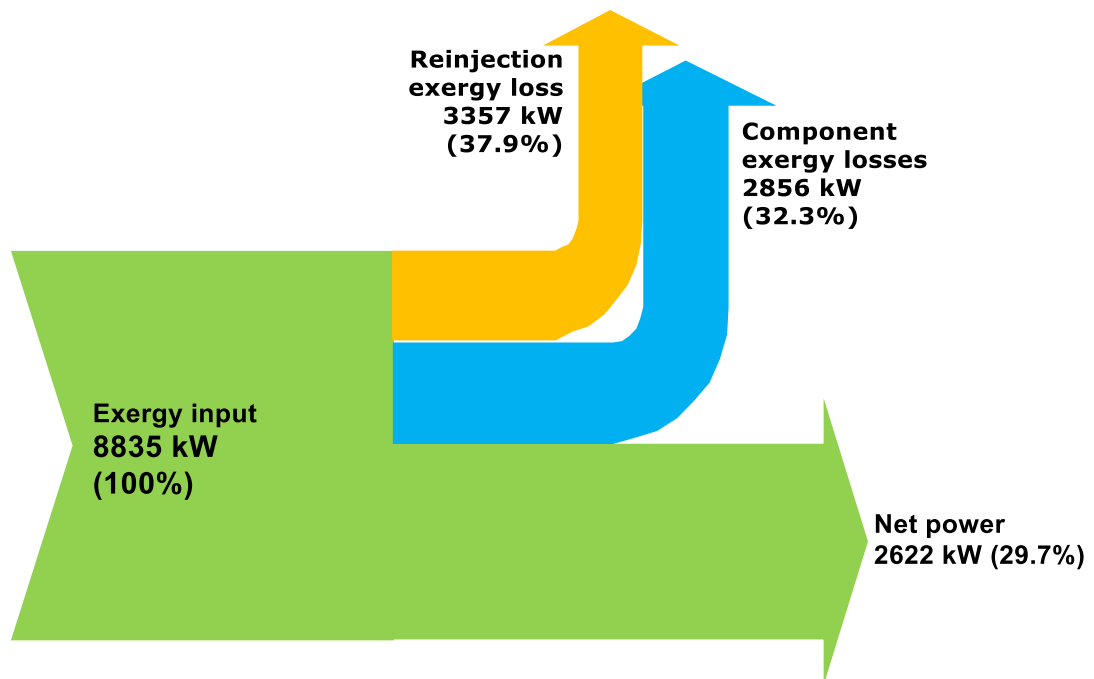


Figure 3. Exergy flow diagram of Afyon Geothermal Power Plant.

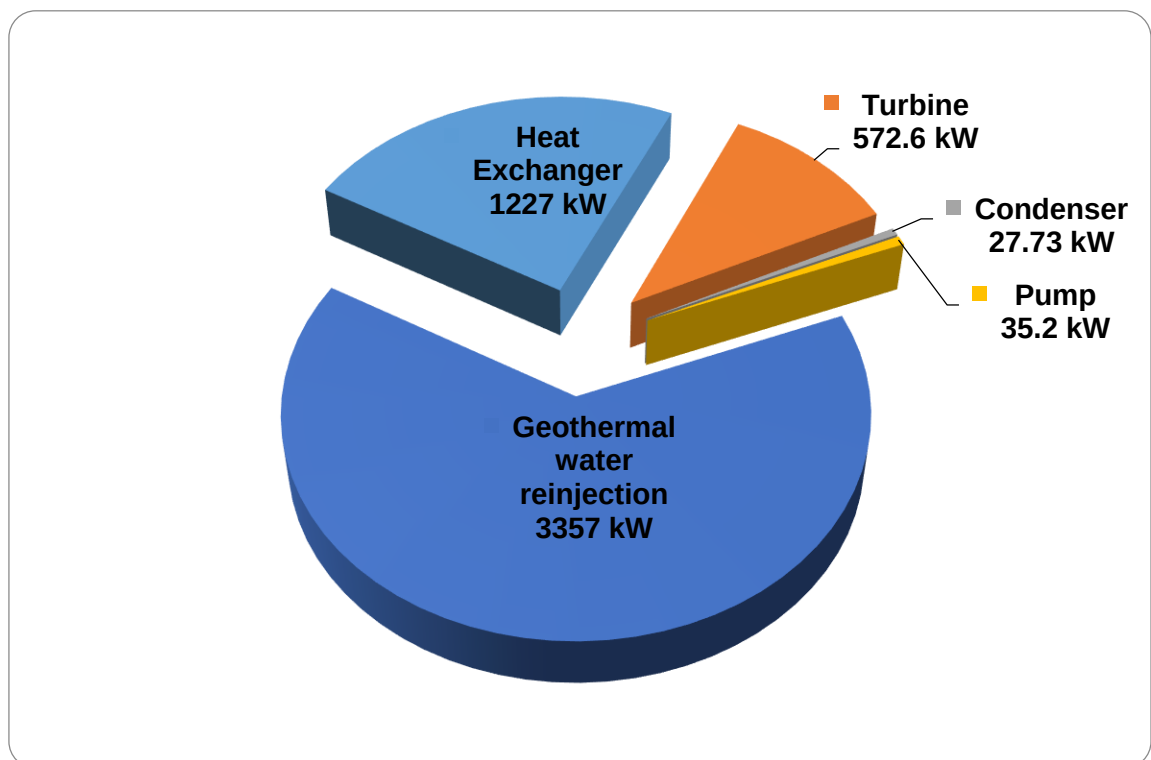


Figure 4. Exergy destructions in the components of the plant.

7.2. Exergoeconomic analysis

The total purchase and equipment costs and exergetic cost rates of the plant components are given in Table 3. The unit cost of the geothermal water as a fuel input to the plant is calculated to be 1.372 \$/GJ and the exergetic cost of binary working fluid R134a is 3 \$/kg and the exergetic cost of the working fluid R134a is calculated to be 2.86 \$/GJ (Ergun *et al.*, 2017). According to the exergoeconomic method, a sufficient number of auxiliary equations have been developed with the help of Fuel and Product principles for the system components and the cost equilibrium equations related to these equations are given in Table 4. The results in Table 5 are obtained when the exergy cost equations are written in the EES program and simultaneously solved in the computer environment. From this analysis, the exergy cost ratio of the R134a working fluid is evaluated to be 49.7 \$/h at the exit state of the binary system pump. The unit exergy cost of the produced electricity by making technical assumptions and solving with auxiliary equations from the plant is calculated to be 6.47 \$/GJ or 0.0233 \$/kWh, respectively.

Table 5. Exergoeconomic results of the plant.

State	$\dot{E}_x$ (kW)	C (\$/GJ)	$\dot{C}$ (\$/h)
1	3731	3.099	41.62
2	3931	3.51	49.68
3	8182	2.867	84.46
4	4137	2.867	42.7
5	8835	1.372	43.64
6	3357	1.372	16.58
7	0	6.47	0
8	378	6.47	8.803
$\dot{W}_{Turbine}$	3473	6.47	80.88
$\dot{W}_{Pump}$	235.6	6.47	5.486
$\dot{W}_{Parasitic}^2$	615.1	6.47	14.32
$\dot{W}_{Plant}$	2622	6.47	61.07

Fig.5 shows the exergy cost destruction under real operating conditions for the plant components. The binary heat exchanger is the higher exergy cost destructive component compared to the other plant components. The way of the reducing the cost of electricity generated in the power plant is to reduce the exergy cost destruction of the plant. It is also considered to increase plant efficiency, to reduce exergy losses and to optimize operating conditions of the plant.

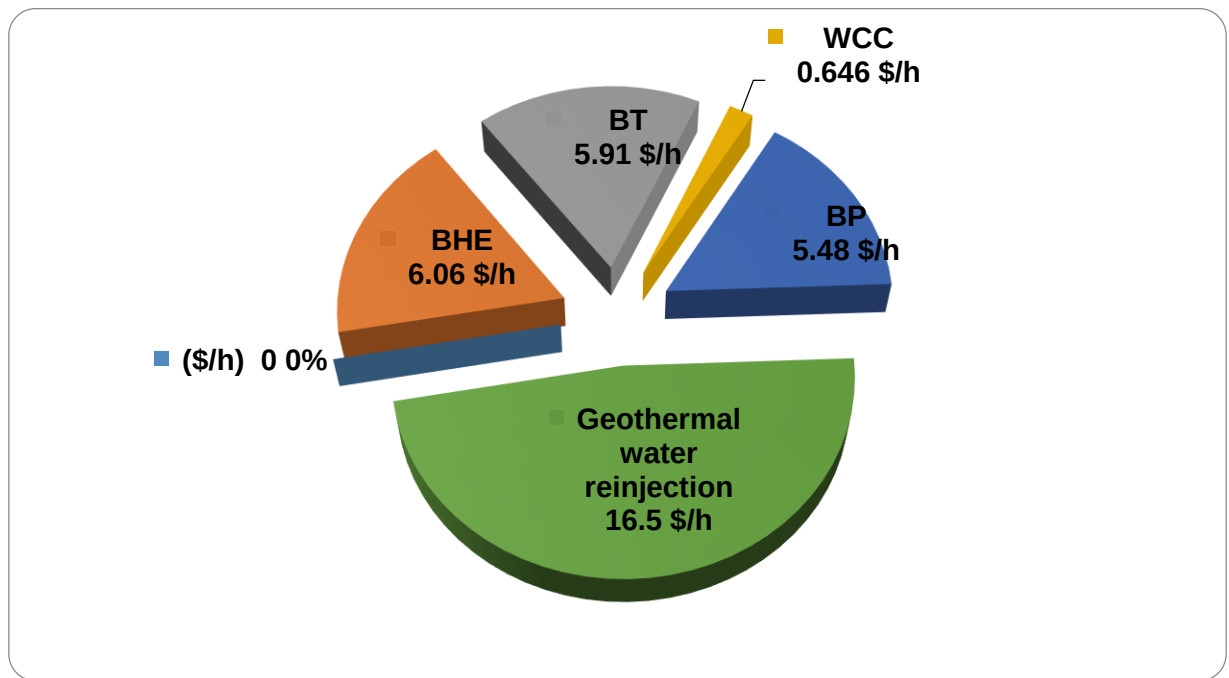


Figure 5. Distrubution of exergetic cost destruction rate diagram of the plant.

In this section, we also investigated how the results changed if different working fluids are used. Currently, installed plant is started with R134a binary fluid and we have also investigated for the most commonly used working fluids, Isobutane and n pentane. Some basic results of the plant are given in Table 6. The results are obtained for the same value of the working conditions in the plant as $T_{geo,in} = 110^{\circ}\text{C}$ and $T_{geo,out} = 70^{\circ}\text{C}$. Different working fluids cost comparisons of electricity production from the plant are evaluated in Table 6. At the same time, this comparison shows the optimum working fluid selection for the binary geothermal plant according to the operating conditions of the plant. The optimization is showed that R134a is caused to be the most efficient power production, and also has the lowest cost of the electricity production from the plant. The difference in the production costs evaluated with R134a and Isobutane is about 4.9%. The difference between the R134a and n-pentane working fluids is about 65.4%, whereas the difference between the Isobutane and n-pentane as to be used working fluid is about 63.6%.

Table 6. Different working fluids cost comparisons of electricity production.

Fluids	$\dot{W}_{net}$ (kW)	η (%)	ε (%)	$C_{electricity}$ (\$/kWh)
R134a	2622	10.4	29.7	0.0233
Isobutane	2351	9.3	26.6	0.0245
n-pentane	1170	4.6	13.24	0.0674

Table 7 illustrates the use of the exergoeconomic variables introduced thus far for the evaluation of the geothermal plant. First, the design evaluation of the plant is presented, and then the performance evaluation of an existing plant is described. When applying the exergoeconomic methodology, recognize that the values of all exergoeconomic variables depend on the components (binary heat exchanger, turbine, pump, water-cooled condenser). The accompanying Table 7 summarizes the exergoeconomic parameters calculated for each component of the binary geothermal power plant using data from Fig. 2., and definitions from Tables 4 and 5.

Table 7. Exergoeconomic performance analysis results of the plant.

Components	$\dot{E}x_F$ (kW)	$\dot{E}x_P$ (kW)	$\dot{E}x_D$ (kW)	y^* (%)	ε (%)	$C_{F,k}$ (\$/GJ)	$C_{P,k}$ (\$/GJ)	$\dot{C}_D$ (\$/h)
Binary heat exchanger	5478	4251	1227	23.5	77.6	1.372	2.867	6.06
Binary turbine	4045	3473	572.6	10.9	85.8	2.867	6.470	5.91
Water cooled condenser	405.7	378	27.73	0.5	93.1	6.469	3.099	0.646
Binary pump	235.6	200.4	35.2	0.67	85.0	6.469	3.510	5.486
Geothermal water reinjection	8835	2622	3357	-	-	-	-	16.58
Overall System	10,164	8302	5219	35.7	81.6	1.372	6.470	13.44

7.3. Parametric analysis of the plant

In the system, the unit kJ is the amount of energy generated from the geothermal water. In the system, the amount of unit kJ energy is increased with increasing geothermal water temperature from the unit kg of geothermal water. In this context, parametric studies have been performed to observe how some critical parameters of the system variation with the temperature of the geothermal source. In particular, the power obtained from the plant and the exergy cost of electricity generated by the geothermal water temperature was investigated. The power generation from the plant increases almost linearly with the geothermal water temperature as shown in Fig. 6. The parametric study showing the power output was performed at temperatures between 100 and 150°C. Fig. 6 shows that the geothermal water temperature directly affects the net power output of the system. The net power production from the plant increased from 2622 kW at 110°C to 6633 kW at 150°C, respectively.

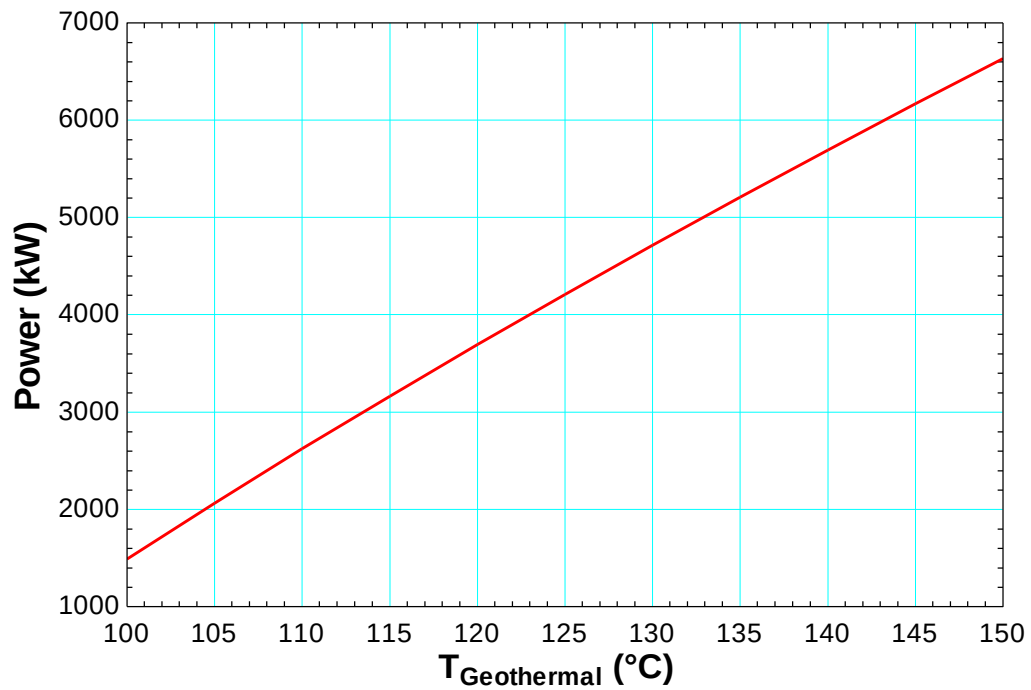


Figure 6. Power production of plant with geothermal water temperature.

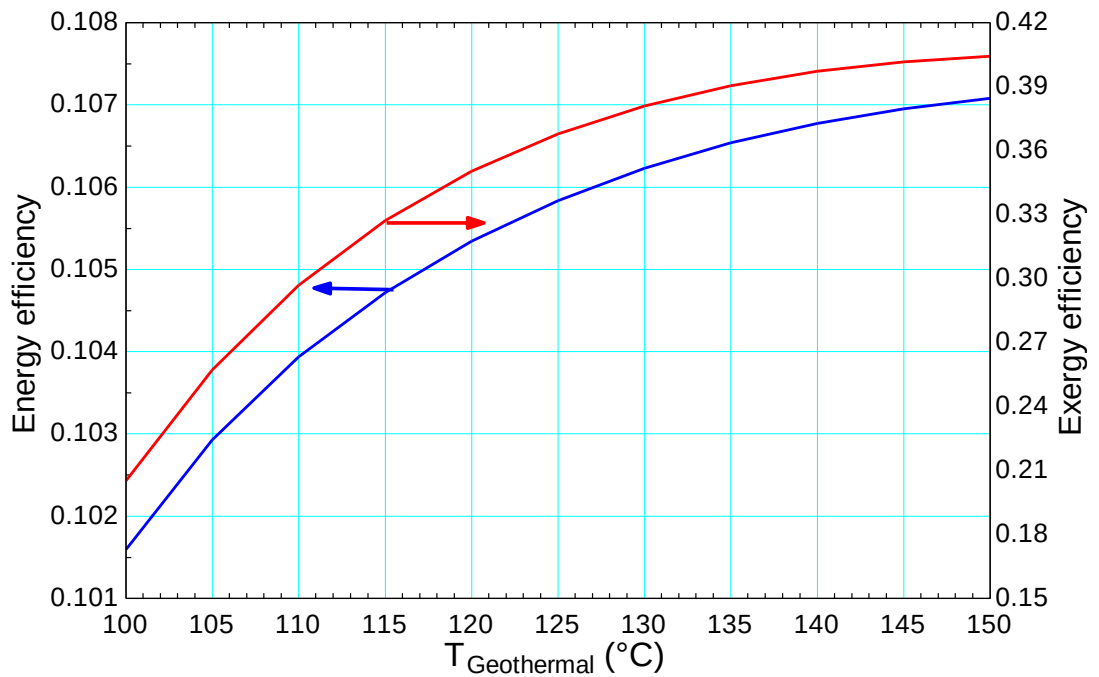


Figure 7. Thermodynamic performance evaluation of the plant.

The variation of electricity cost concerning the geothermal water temperature is shown in Fig. 8. The unit exergetic cost of electricity decreases with the geothermal temperature increases. In the current working condition of the plant, the unit exergetic cost of electricity is 0.0233 \$/kWh at 110°C.

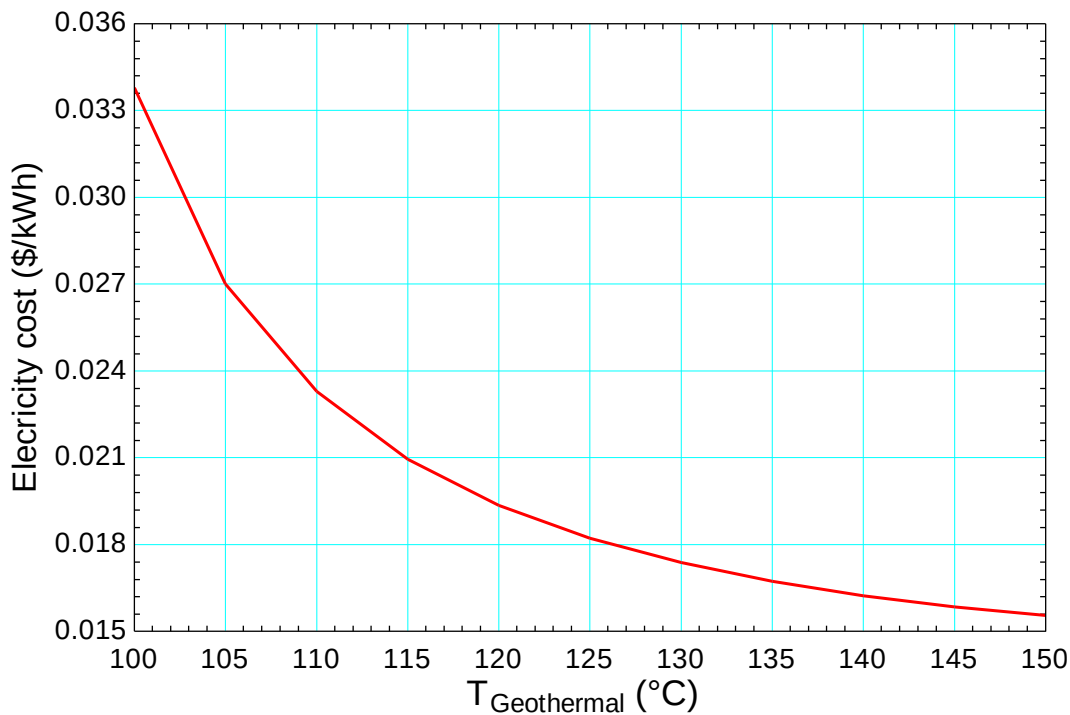


Figure 8. Electricity cost with geothermal water temperature.

8. CONCLUSIONS

The generating electricity using binary cycle by the direct or indirect heating method according to geothermal source temperature and capacity is a more advantageous and profitable investment compared to district heating. Therefore, this study will guide the determination of optimum power plant installed capacity in low temperature and capacity geothermal fields. Thermophysical properties of the working fluids (geothermal water, water, isobutene and air) are obtained from EES software with built-in thermodynamic property functions. In this study, the performance evaluation of the geothermal power plant, which became operational in Afyonkarahisar province in July 2017, was performed by using actual plant data. The optimum operating conditions of the system and the optimum value of the electricity cost were investigated. In this context, the study has been presented to the authorities, and it has been an innovative and useful research to increase the feasibility and energy efficiency of the existing plant. Some important results obtained are summarized from the plant as follows:

- Energy and exergy values inputs from the geothermal water are evaluated with the base assumptions to be 62,079 kW and 8835 kW, respectively.
- The plant, the exergy input by the power plant is 8835 kW and the rate of heat rejection is to be determined as 6213 kW and this value correspond to 29.7 % of totally exergy input by the geothermal water.
- The energy and exergy efficiencies were evaluated as 10.4 % and 29.7 % for Afyon Geothermal Power Plant (AFJES).
- The unit exergy cost of the produced electricity by making technical assumptions and solving with auxiliary equations from the plant is calculated to be 0.0233 \$/kWh, respectively.

9. NOMENCLATURES

- β geothermal water specific energy consumption, kg/kJ
- c specific exergy cost, \$/kJ

C	cost associated with exergy flow, \$
$\dot{C}$	cost rate associated with exergy, \$/h
$\dot{E}x$	exergy rate, kW
ex	specific exergy, kJ/kg
h	enthalpy, kJ/kg
$\dot{m}$	mass flow rate, kg/s
PEC	purchased equipment cost, \$
s	entropy, kJ/kg K
T	temperature, °C
$\dot{W}$	power, kW
$\dot{Z}$	equipment cost rate, \$/h

Greek symbols

η	energy efficiency
ε	exergy efficiency
\$	United State Dollars, US\$

Subscripts

0	dead states
act	actual
BHE	binary heat exchanger
BT	binary turbine
dest	exergy destruction
e	exit state
$elec$	electricity
F	exergy of fuel
geo	geothermal
IC	investment cost
i	inlet state
k	k-th equipment
P	exergy of product
rev	reversible
turb	turbine
T	total
WCC	water cooled condenser

Superscripts

- time rate

IC investment cost

OMC operation maintenance

REFERENCES

- Abusoglu A., Kanoglu M., 2008. First and second law analysis of diesel engine powered cogeneration systems. *Energy Conversion and Management* 49(8), 2026-2031.
- Aksoy N., 2014. Power generation from geothermal resources in Turkey. *Renewable Energy* 68, 595-601.
- Aspen Plus. Version 8.4, 2015. Aspen Technology Incorporated., Ten Canal Park, Cambridge, MA, USA. www.aspentech.com.
- Balcilar M., Ozdemir Z.A., Ozdemir H., Shahbaz M., 2018. The renewable energy consumption and growth in the G-7 countries: Evidence from historical decomposition method. *Renewable Energy* 126, 594-604.
- Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. J., 1996. Thermal design and optimization. John Wiley & Sons.
- Bina, S. M., Jalilinasrabady, S., & Fujii, H., 2018. Exergoeconomic analysis and optimization of single and double flash cycles for Sabalan geothermal power plant. *Geothermics* 72, 74-82.
- DiPippo R., 2007. Ideal thermal efficiency for geothermal binary plants. *Geothermics* 36(3), 276-285.
- Ergun A., Ozkaymak M., Aksoy Koc G., Ozkan S., Kaya D., 2017. Exergoeconomic analysis of a geothermal organic Rankine cycle power plant using the SPECO method. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 36(3), 936-942.
- F-Chart Software, EES, engineering equation solver. In: F-Chart Software, 2015. Inter-net Website, www.fchart.com/ees/ees.shtml
- Heberle F., Hofer M., Ürlings N., Schröder H., Anderlohr T., Brüggemann D., 2017. Techno-economic analysis of a solar thermal retrofit for an air-cooled geothermal Organic Rankine Cycle power plant. *Renewable Energy* 113, 494-502.
- Hanbury O., Vasquez V.R., 2018. Life cycle analysis of geothermal energy for power and transportation: A stochastic approach. *Renewable Energy* 115, 371-381.
- Kanoglu M., 2002. Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant. *Geothermics* 31(6), 709-724.
- Kanoglu M., Dincer I., 2009. Performance assessment of cogeneration plants. *energy conversion and management* 50(1), 76-81.
- Karadas M., Celik H.M., Serpen U., Toksoy M., 2015. Multiple regression analysis of performance parameters of a binary cycle geothermal power plant. *Geothermics* 54, 68-75.
- Kasaei M.J., Gandomkar M., Nikoukar J., 2017. Optimal management of renewable energy sources by virtual power plant. *Renewable Energy* 114, 1180-1188.
- Kolahi M.R., Nemati A., Yari M., 2018. Performance optimization and improvement of a flash-binary geothermal power plant using zeotropic mixtures with PSO algorithm. *Geothermics* 74, 45-56.
- Koroneos C., Polyzakis A., Xydis G., Stylos N., Nanaki E., 2017. Exergy analysis for a proposed binary geothermal power plant in Nisyros Island, Greece. *Geothermics* 70, 38-46.
- Rachmat, A., Wibowo, A. S., & Surachman, A., 2018, January. Exergoeconomic analysis and optimization of a combined double flash–binary cycle for Ulubelu geothermal power plant in Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 105, No. 1, p. 012087). IOP Publishing.
- Sahin C., 2016. Electricity Generation with Organic Rankine Cycle (Orc) In Low Temperature Geothermal Field and Modelling of Afyon Geothermal Electric Production Co., Electrical and Electronics Engineering, M.S. Thesis.

- Shokati N., Ranjbar F., Yari M., 2015. Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: A comparative study. *Renewable Energy* 83, 527-542.
- Unverdi, M., and Cerci, Y., 2013. Performance analysis of Germencik geothermal power plant. *Energy* 52, 192-200.
- Wang J., Wang J., Dai Y., Zhao P., 2015. Thermodynamic analysis and optimization of a flash-binary geothermal power generation system. *Geothermics*, 55, 69-77.
- Yari M., 2010. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renewable Energy* 35(1), 112-121.
- Yilmaz C., 2017. Thermodynamic and economic investigation of geothermal powered absorption cooling system for buildings. *Geothermics* 70, 239-248.
- Zare, V., 2015. A comparative exergoeconomic analysis of different ORC configurations for binary geothermal power plants. *Energy Conversion and Management* 105, 127-138.



ZEMİNLERDE TEK FAZLI GEOPOLİMERİZASYON UYGULAMASI VE GEOPOLİMERİZASYONUN SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

¹Tuğba ESKİŞAR , ²Gizem AKSU

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir, TÜRKİYE

¹tugba.eskisar@ege.edu.tr, ²91170001103@ogrenci.ege.edu.tr

(Geliş/Received: 27.08.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.01.2020)

ÖZ: Bu çalışmada likit aktivatörler ile yapılan tek fazlı geopolimerizasyon sonucu kil, killi kum, kum zeminlerde gözlenen mukavemet değişimleri incelenmiştir. Örnek grupları deney planına uygun olarak 7 günden 90 güne değişen sürelerde küre tabi tutulmuştur. Geopolimerizasyon metodunun, aktivatör içeriğinin ve oranlarının, kür sürelerinin ve donma-çözünme çevrimlerinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Farklı likit aktivatör içeriklerinin başarısının, zeminin türü ve geopolimerizasyon metodundan önemli ölçüde etkilendiği bulunmuştur. Kum ve killi kum örneklerinde optimum su içeriği kadar likit aktivatör kullanılması iyileştirme sağlarken, kil zemin örneklerinde optimum su içeriğinin yaklaşık iki katı kadar likit aktivatör kullanılması mukavemeti artırmaktadır. Mukavemet ayrıca kür süresinin uzaması ile artmaktadır. İşlem görmeyen kil zeminin mukavemeti 315 kPa iken 90 gün sonunda aynı zemin örnekleri 1114 kPa mukavemete ulaşmıştır. Donma-çözünme çevrimleri uygulanan zeminlerde ise belirgin bir mukavemet azalımı görülmüştür. En fazla mukavemet kaybı yine kil zeminlerde gözlemlenmiş ve 3 çevrim sonunda mukavemet %55 kadar azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kil, Killi kum, Kum, Aktivatör, Serbest basınç mukavemeti.

A Single Phase Geopolymerization Application In Soils And The Effect Of Geopolymerization On The Unconfined Compressive Strength

ABSTRACT: In this study, single phase geopolymerization with liquid activators were applied to clay, clayey sand and sand soils and unconfined compressive strength developments due to this process was investigated. The samples were subjected to curing times varying between 7 and 90 days of curing in accordance with the experimental programme. The effects of geopolymerization method, activator content and rate, curing time and of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of the soils were determined. It has been found that the success of different liquid activator contents is significantly affected by the type of soil and geopolymerization method. It was sufficient to treat sand and clayey sand samples with liquid activator amounts that are equal to the optimum water contents of the soils, while the use of liquid activator approximately twice the optimum water content in clay soil samples was necessary to increase the strength. The increase in the curing times also increased the strength of the samples. While the untreated clay samples had an unconfined compressive strength of 315 kPa, after 90 days of curing, 1114 kPa strength was observed. The application of freeze-thaw cycles decreased the strength of the soils. Major loss of strength was observed in clay soils with a decrease of %55 strength.

Key Words: Clay, Clayey sand, Sand, Activator, Unconfined compressive strength

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde artan çevre sorunlarıyla birlikte mühendislik açısından doğa dostu yeşil çözümler üretilmesi sıklıkla gündeme gelmektedir. Geopolimer bilimindeki gelişmeler doğayı koruyan çözümlerin

üretilmesine katkıda bulunmaktadır (Uddin ve Saraswathy, 2018). Geoteknik mühendisliği uygulamalarında da geopolimerlerden zemin iyileştirmesi alanında yararlanmak mümkündür. Yıllardır geopolimerin performansı birçok alanda araştırmacılar tarafından değerlendirilmiş ve test edilmiştir. İleri araştırmalar geopolimerin yapı ve geoteknik bilimlerini içeren inşaat mühendisliği çalışmalarında uygulanmasının iyi bir sonuç verdiğini göstermiştir (Abdullah ve diğ., 2015).

Geopolimerler zemin iyileştirmesinde bir stabilizasyon malzemesi olarak kullanılan çimentonun yerine geçebilecek etkidedir. Bu yenilikçi ürün çimento oranla çok daha düşük karbon ayak izine sahip olup çimento üretimi sırasında yüksek oranda salınan karbondioksiti de bertaraf etmektedir (Zhang ve diğ., 2013; Adhikari ve diğ., 2018).

Phetchuay ve diğ., (2016), kil zemin ile kalsiyum karbür kalıntısı ve uçucu kül bazlı bir geopolimer oluşturarak kilin mukavemetinin gelişimini ve karbon ayak izini araştırmışlardır. Kullanılan sıvı alkali aktivatör, sodyum silikat çözeltisi (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) karışımıdır. Kil zeminin mukavemetinin, uçucu kül içeriğine ve NaOH konsantrasyonuna bağlı olduğu bulunmuştur. Geopolimer uygulaması yapılan zeminlerin karbon ayak izleri çimento ile stabilize edilmiş zeminlerden %22-%43 aralığında daha düşüktür.

Killi zemin, sodyum silikat eklenmesiyle iyileştirilme potansiyeline sahiptir. Moayed ve diğ. (2011), tarafından yapılan bir çalışmada, kaolinit kili kullanılarak sodyum silikat ile stabilizasyon uygulaması yapılmıştır. Bu çalışmada 5 mol/L sodyum silikatın eklenmesi, en yüksek serbest basınç mukavemeti sonuçlarını vermiştir.

Swain (2015), çalışmasında hem geopolimer bileşenlerinin hem de biyopolimer bileşenlerinin etkilerini incelemiştir. Sodyum bazlı alkali aktivatörler ve katkı maddesi olarak uçucu kül geopolimer bileşenleri olarak, ayrıca zantan sakızı ve guar sakızı da biyopolimer bileşenleri olarak kullanılmıştır. Geopolimerin etkinliği, serbest basınç mukavemeti açısından incelenmiştir. Serbest basınç mukavemeti sonuçları için %40 uçucu kül ve %10 aktivatör eklenen zeminin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Geopolimerin stabilizasyon açısından biyopolimerden daha etkili olduğu da gözlenmiştir.

Ghadir ve Ranjbar (2018), volkanik kül bazlı geopolimer ve normal portland çimentosu kullanarak killi zemin stabilizasyonunun mekanik performansını karşılaştırmışlardır. Sertleşme koşullarının ve zamanın, alkali aktivatör / kil ve alkali aktivatörün molaritesi ve volkanik kül / kil oranının etkileri belirlenmiştir. İşlem görmemiş killi zemin örneklerinin basınç mukavemeti, ıslak ve kuru koşullarda, zemin bağlayıcıların %15'i ile yer değiştirdiğinde, sırasıyla 0,2MPa'dan 4MPa'a ve 2,0 MPa'dan 12MPa'a yükselmiştir. Portland çimentosunun ıslak koşullarda başarı ile uygulanabildiği, geopolimer işleminin kuru koşullarda daha verimli olduğu gözlenmiştir. Alkali aktivatör ve alkali aktivatör / kil molaritesinin artırılması, geopolimerle iyileştirilmiş zeminin serbest basınç mukavemetini arttırmıştır. Ayrıca, tüm geopolimer örneklerinde daha yüksek enerji emilimi gözlenmesi, bu malzemenin normal portland çimentosundan daha sünek bir malzeme olduğunun kanıtı olarak sunulmuştur.

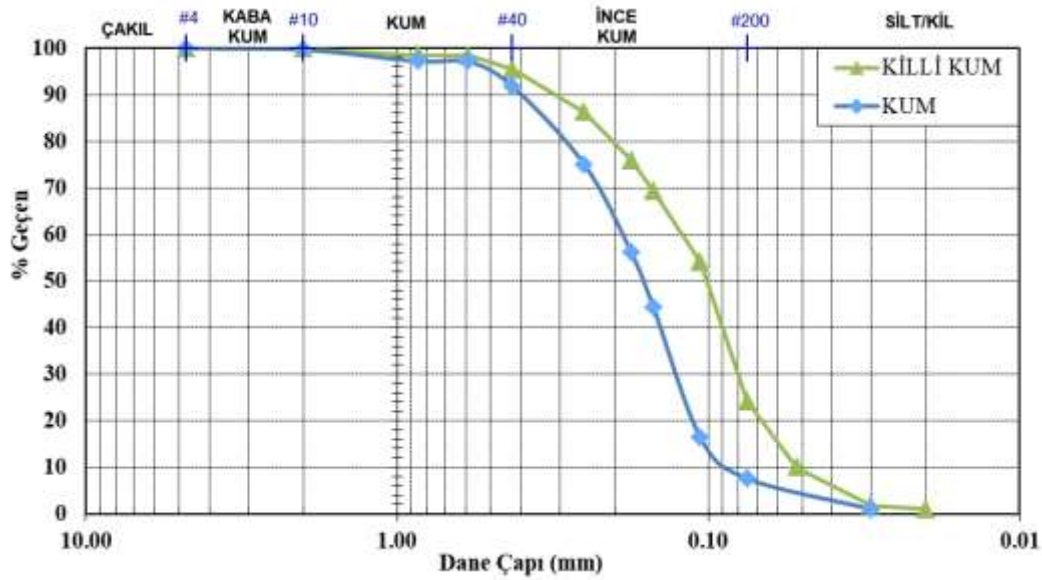
Ayyappan ve diğ. (2017), yumuşak kil ve kum karışımlarında geopolimerin, yüksek mukavemet, düşük maliyet, düşük enerji tüketimi ve düşük CO_2 emisyonları ile umut verici bir alternatif olduğunu belirtmektedir. (%2 ve %4) metakaolin bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş killi zemin örneklerinde serbest basınç mukavemeti artmış ve bu yöntemin etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olabileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada kil, killi kum ve kum örnekler üzerinde tek fazlı bir geopolimerizasyon uygulaması yapılmıştır. Literatür incelemesinden anlaşıldığı üzere killi kum ve kum zeminler ile yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu sebeple bu çalışmada kil zeminler ile birlikte killi kum ve kumun geopolimerizasyonu da dikkate alınmıştır. Likit aktivatör olarak iki farklı oranda cam suyu (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) solüsyonu kullanılmıştır. Ek bir prekürsör kullanılmadan sadece likit aktivatör kullanılarak bir iyileştirme çalışması yapılmıştır. Geopolimerizasyon sürecinde sıcaklıkların değişken olduğu iki farklı metot denenmiştir. Bu metotlar dahilinde kür süresi etkisi, NaOH molaritesinin etkisi ve donma-çözünme etkisi incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Zeminlerin Geoteknik Özellikleri (Geotechnical Properties of Soils)

Çalışmada kullanılan kil Çanakkale merkezli üretim yapan bir tesisden temin edilmiş olup kilin türünün kaolinit olduğu kimyasal analiz sonucu belirlenmiştir. Kum zemin, İzmir'deki bir inşaatın temel çalışması esnasındaki kazıdan elde edilmiştir. Killi kum olarak nitelendirilen zemin ise bu iki zeminin karışımı ile oluşturulmuştur. Bu zeminde kil oranı %45, kum oranı ise %55'dir. Elek analizi sonucunda kum malzemenin %90'ından fazlasının kum-ince kum boyutunda olduğu, killi kumun ise %75'inin kum-ince kum boyutunda olduğu görülmektedir (Şekil 1). Kum ve killi kum zeminin sınıflandırılması ASTM D2487'ye (2017) uygun olarak birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre yapılmıştır. Kum zeminin USCS zemin sınıfı sembolü SP-SM olarak bulunmuştur. Tüm zeminlerin indeks özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kum İle Killi Kum Zeminlerin Gradasyon Eğrileri

Figure 1. Granulometry curves of sand and clayey sand soils

Çizelge 1. Zeminlerin İndeks Özellikleri

Table 1. Index properties of soils

Özellik Adı	KUM	KİLLİ KUM	KİL
Likit Limit (%)	-	27	48
Plastik Limit (%)	-	16	20
Plastisite İndisi (%)	NP	11	28
D ₁₀ (mm)	0,09	0,05	-
D ₃₀ (mm)	0,13	0,08	-
D ₆₀ (mm)	0,19	0,12	-
Cu	2,11	2,4	-
Cc	0,99	1,07	-
USCS Sembolü	SP-SM	SC	CL
Zeminin Tanımı	Silt içeren kötü derecelenmiş kum	Killi kum	Düşük plastisiteli kil

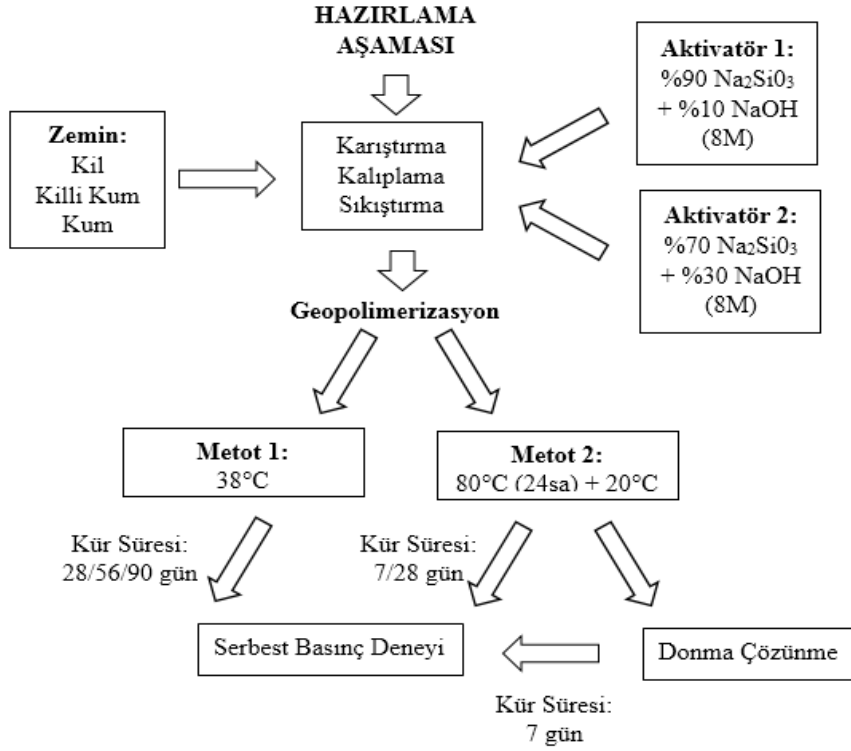
Deneyisel Çalışmada Kullanılan Malzemeler (Materials Used in The Experimental Studies)

Geopolimerizasyonu gerçekleştirebilmek için sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksitten (NaOH) faydalanılmıştır. Çalışmaya uygun molaritedeki sodyum hidroksit çözeltisi çeşitli ön deneyler sonucunda belirlenmiş olup 8 mol olarak kullanımına karar verilmiştir. İlerleyen bölümlerde yapılan bu seçimin detayları açıklanmıştır. Geopolimerizasyon işlemi örneklere bir kez uygulanmıştır, herhangi bir ikincil işlem yapılmamıştır. Bu sebeple yapılan bu uygulama tek fazlı geopolimerizasyon sınıfına girmektedir. Sodyum silikat ve suda çözünmüş sodyum hidroksit bileşimi olan solüsyon uygulandığı ortamda kimyasal reaksiyonları tetiklediği için aktivatör görevi görmektedir. Ancak seçilen aktivatörün içeriği uygulamanın başarısını değiştirecek özelliktedir. Bu nedenle iki farklı aktivatör içeriği ile çalışılarak elde edilen sonuçlardan söz konusu zeminler için en uygun aktivatör içeriği belirlenmiştir. Burada % cinsinden verilen miktarlar sıvı karışım içindeki ağırlıkça oranı temsil etmektedir:

Aktivatör 1: %90 sodyum silikat - %10 sodyum hidroksit (Grafiklerde 9010 şeklinde gösterilmiştir.) ve Aktivatör 2: %70 sodyum silikat - %30 sodyum hidroksittir (Grafiklerde 7030 şeklinde gösterilmiştir.). Her iki aktivatör, çalışma öncesinde büyük miktarlarda hazırlanmış ve büyük cam bidonlar içinde hava almayacak şekilde, gün ışığı ve sıcaklık değişiminden etkilenmeyecekleri bir ortamda muhafaza edilmişlerdir. Böylece örnek hazırlanması sırasında aktivatör içeriklerinin her zaman aynı kaynaktan gelmesi sağlanmıştır.

Çalışma kapsamında hava sıcaklığının geopolimerizasyon metodu üzerindeki etkileri bu 2 aktivatör uygulanarak dikkate alınmıştır (Çizelge 2). Geopolimerler, 100°C'nin altındaki sıcaklıklarda sertleşen, dayanıklı bağlayıcı özellikli malzemeler grubuna aittir (Rovnanik, 2010). Temel olarak 38°C ve 20°C sıcaklıkların etkisinin araştırılması düşünülmüştür. Ön deneylerle, sadece 20°C'de kürleme işleminin likit aktivatörün etkinliğini göstermede yetersiz olacağı tespit edilmiştir. Bu sebeple iki farklı geopolimerizasyon uygulaması yapılmasına karar verilmiştir. Metot 1'de örnekler direkt özel olarak teşkil edilmiş 38°C sıcaklığındaki bir kür odasında saklanmışlardır. Metot 2'de ise öncelikle örnekler 24 saat boyunca 80°C'lik bir etüvde bekletilmişlerdir, ardından kür süresi boyunca 20°C sıcaklıktaki (%95 r.n.) bir kür odasında saklanmışlardır. 24 saat 80°C'lik etüvde bekletmenin kimyasal reaksiyonları tetikleyici bir görevi vardır (Alshaaer, 2013; Morsy ve diğ., 2014).

Şekil 2'de örneklerin hazırlanma aşamasından mukavemet ölçümlerinin yapılmasına kadar olan çeşitli deney süreçleri bir şema halinde özetlenmektedir.



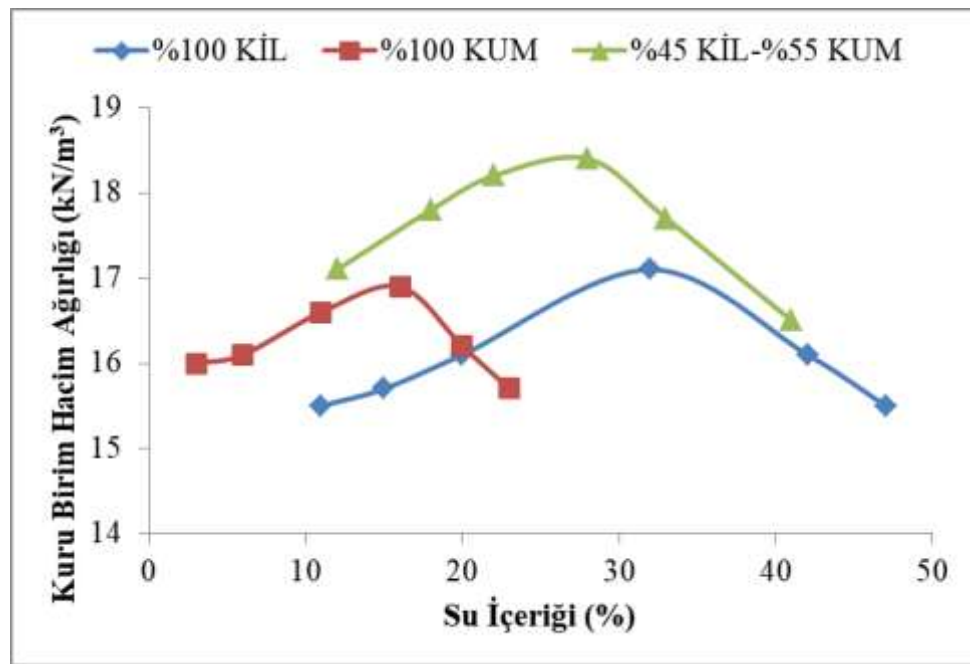
Şekil 2. Geopolimer Örneklerinin Hazırlanması ve Deney Aşamaları

Figure 2. Preparation of geopolymer samples and the experiment stages

Örneklerin Hazırlanması (Preparation of The Samples)

Örneklerin proktor sıkılığında hazırlanması planlanmıştır. Bu amaçla öncelikle örneklerde kullanılacak optimum su içeriğini belirlemek amacıyla kil, kum ve killi kum karışımı örnekler standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmış ve kompaksiyon eğrileri elde edilmiştir (Şekil 3). Kompaksiyon deneyleri ASTM D698'e (2012) uygun olarak yapılmıştır. Aktivatör 1 veya 2'nin zemine, zeminin optimum su içeriği kadar eklenmesi planlanmıştır.

Kilin optimum su içeriği %32, kumun optimum su içeriği %16, killi kum zeminin optimum su içeriği %28 bulunmuştur. Sırasıyla bu zeminlerin kuru birim hacim ağırlıkları 17,10 kN/m³, 16,90 kN/m³, 18,40 kN/m³ olarak bulunmuştur. Kil zemin ve kum zeminle kıyaslandığında killi kum zeminin homojen karışımı sonucu en yüksek kuru birim hacim ağırlığa ulaşılmaktadır. Burada kil danelerinin kum danelerinin boşluklarındaki yerleri doldurmasının önemli bir etkisi olmaktadır. Böylece çok daha yoğun bir zemin matrisi oluşabilmektedir. Aynı zamanda bu zemin, kil zemin ile kum zemin arasında kalan bir optimum su içeriğine sahiptir. Kum zeminin gerek maksimum kuru birim hacim ağırlığı gerekse optimum su içeriği diğer zeminlere kıyasla daha düşüktür. Bu durum plastik özelliği olmayan bir zeminle uyumlu bir sonucu işaret etmektedir (Holtz ve Kovacs, 1981).



Şekil 3. Kil, Killi Kum ve Kum Zeminlerin Kompaksiyon Eğrileri

Figure 3. Compaction curves of clay, clayey sand and sand soils

Örneklerin hazırlanması sırasında, öncelikle zemin ile optimum su içeriğine eşit miktarda aktivatörün homojen karışımı sağlanmıştır. Ardından Standart Proktor sıkılığında üç tabaka halinde sıkıştırma gerçekleştirilmiştir. 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde örnekler hazırlanmıştır. İstemeyen dış etmenlerden korumak amacıyla örnekler LLDPE film ile sarılmıştır.

Örnek isimlerinin birbirine karışmasına engel olmak için kil zemin (C), kum zemin (S), killi kum zemin (CS) harfleri ile kodlanarak ifade edilmiştir. Aynı kodlama, makale içinde de bulgu ve sonuçların irdelendiği ilgili şekil ve tablolarda da kullanılmıştır.

Yöntem (Method)

Çalışma kapsamında hazırlanan örnekler kür süresi sonunda ya direkt ya da donma-çözünme çevrimlerini tamamladıktan sonra tek eksenli serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyleri ASTM D2166'ya (2016) uygun olarak yapılmıştır. Uygulanan yükün %1/dk kadar eksenel şekil değiştirme oluşturmaya dikkat edilmiştir. Deneylerin 15 dakikanın altında tamamlanmasına dikkat edilmiştir. Tüm deneyler bir veri toplama ünitesince kayıt altına alınmış ve en büyük mukavemet değeri gözlemlendikten sonra yüklemeye devam edilerek mukavemet değerlerinin düşüşü de takip edilmiştir. Şekil değiştirme miktarının en fazla %15 olmasına dikkat edilmiştir.

Donma-çözünme deneylerinde kapalı sistem kullanılmıştır. Bu sistemin avantajı donma sırasında zeminin boşluk oranı değişimini ve çözünme sırasında dışarıdan şişme potansiyeli olan zeminlerin su alımını sınırlandırmasıdır. Zeminde göreceli olarak daha küçük örneklerle çalışıldığından bu sistemin kullanılması örneğin içerisinde sıcaklık dağılımının kontrollü bir biçimde oluşmasını sağlar (Wong ve Haug, 1991). Konrad ve Samson (2000), kapalı sistemle hazırlanan örneklerin arazi şartlarını temsil etmede daha başarılı olduğunu göstermiştir. Kür süresini tamamlayan örnekler -18°C sıcaklığa kadar dondurulmuştur. Bu işlem 24 saat sürmüştür. Ardından 20°C'de çözünme işlemine tabi tutulmuşlardır. Bu işlem de 24 saat sürmüştür. Toplamda 48 saat olan bu işlemler 1 donma-çözünme çevrimi olarak belirlenmiştir (ASTM D560). Zeminlerin maruz kalacakları yıllık donma-çözünme çevrim sayısı Binal vd. (1997) tarafından İzmir için 1 ile 5 çevrim olarak saptanmıştır. Çalışmada bu değerlerin ortalaması alınarak her örnek 3 çevrime bırakılmıştır. Son çözünme işleminden sonra serbest basınç deneyine tabi tutularak örnekte oluşan deformasyon ve eksenel yük verileri kaydedilmiştir. Kaydedilen bu veri daha sonra aynı

grupta yer alan fakat donma-çözünme işlemine girmemiş örneklerle karşılaştırılarak örnekte oluşan dayanım kaybı ile ilgili sonuçlar elde edilmiştir.

BULGULAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS AND DISCUSSIONS)

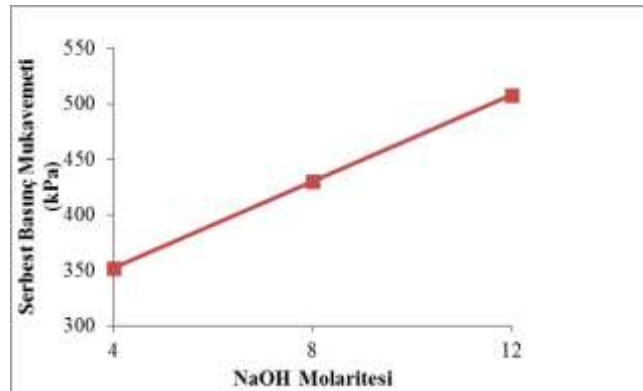
Bu çalışmada kil, killi kum ve kum zeminlerde iki farklı metot ile tek fazlı geopolimerizasyon uygulaması yapılmıştır. Aynı içeriği (Na_2SiO_3 ve NaOH) farklı oranlarda bulunduran iki adet aktivatör kullanılmıştır. Böylece hangi aktivatör solüsyonunun hangi geopolimerizasyon metoduna daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Kimyasal reaksiyonlar geopolimerizasyonda ortam sıcaklığından etkilenir (Rovnanik, 2010; Heah ve diğ., 2011). Geopolimerizasyonu tetiklemek için iki metot düşünülmüştür. Bunlardan birincisinde (metot 1) örnekler kür süreleri boyunca özel tasarlanmış 38°C sıcaklıkta bir odada bekletilmiştir. İkinci yaklaşımda (metot 2) ise örnekler 1 gün boyunca 80°C sıcaklıkta bir etüvde bekletilerek ardından 20°C (%95 r.n.) sıcaklıktaki kür odasında küre bırakılmıştır (Alshaaer, 2013; Bing-hui ve diğ., 2014). Kür süresinin gün bazında sayımı örnekler etüvden çıktıktan sonra olmuştur. Her iki geopolimerizasyon şeklinin serbest basınç mukavemetleri açısından karşılaştırması yapılmıştır. Bunun dışında bir grup örneğe donma-çözünme deneyi 3 çevrim halinde uygulanarak serbest basınç mukavemeti değişimleri incelenmiştir.

Bu bölüm, NaOH molaritesinin etkisini, sıcaklık etkisini, aktivatör içeriği etkisini, aktivatör 1'in zeminin optimum su içeriğinden farklı bir miktarda kullanılması sonucu gelişen etkiyi, kür süresinin etkisini ve 3 çevrim donma-çözünmenin etkisini serbest basınç mukavemeti cinsinden incelemektedir.

Likit Aktivatör İçindeki NaOH Molaritesinin Etkisi (Effect of NaOH Molarity in Liquid Activator)

Sodyum hidroksit (NaOH), bu çalışma içindeki maliyetler düşünüldüğünde en pahalı olan malzemedir. Bu sebeple, optimum miktarda kullanılması gerçek arazi uygulamalarında en ekonomik koşulun tercih edilmesi açısından önem arz etmektedir. Aktivatör 1, sadece %10 NaOH içerdiğinden bu aktivatörle hazırlanan örneklerde optimum molaritenin bulunması en ekonomik çözümü sağlayacaktır. Zemin örnekleri 4, 8 ve 12 mol NaOH içeren aktivatör 1 ile işleme tabi tutulmuş ve 28 günlük kür sürelerini tamamlamalarının ardından serbest basınç mukavemetleri ölçülmüştür. Tüm örnekler benzer eğilimi gösterdiği için bir örnek olarak Şekil 4'te kil zeminlerde molaritenin etkisi sunulmuştur. Molaritenin artmasıyla zeminlerin serbest basınç mukavemetleri artmıştır. Bu sebeple NaOH , 4 mol iken serbest basınç mukavemeti en küçüktür. Oysa, aktivatör içindeki NaOH 8 molden 12 mole çıkarıldığında serbest basınç mukavemeti %15 artmaktadır. Diğer örnek gruplarında da artış %10-%15 mertebesinde. Ancak, NaOH molaritesinin artması iyileştirme projesinin maliyetlerinin de artması anlamına gelmektedir. Bu sebeple 8 mol NaOH kullanımı tercih edilmiştir (Somna ve diğ., 2011; Palanisamy ve Suresh Kumar, 2018).



Şekil 4. C9010 Örneklerinde NaOH Molaritesinin Etkisi

Figure 4. Effect of NaOH molarity on C9010 samples

Sıcaklık Etkisi - Metot 1 ile Geopolimerizasyon (Temperature Effect – Geopolimerization with Method 1)

Çizelge 2’de kil (C), killi kum (CS) ve kum (S) örneklerin aktivatör 1 ve 2 ile hazırlanarak 38°C sıcaklıkta 28, 56 ve 90 gün küre tabi tutulduktan sonraki serbest basınç mukavemeti değerleri özetlenmektedir. Çalışmada 28 gün üzerinden metot 1 ve metot 2 arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Metot 1 uygulaması yaz sıcaklığına uygun bir derecede olduğundan sahada uygulanması kolay bir yol izlediği için, daha uzun dönem mukavemetlerin incelenmesi bu metot ile yapılmıştır.

Aktivatör 1’in zeminin optimum su içeriğinde eklendiği örneklerde 28 günde daha büyük mukavemet değerleri elde edilmiş olup, kil zeminlerde 245 kPa, kum zeminlerde ise 861 kPa mukavemet gözlenmiştir. Aktivatör 2’nin kullanıldığı kil zeminlerde 236 kPa, kum zeminlerde ise 353 kPa mukavemet gözlenmiştir. Killi-kum örnekler ise her iki likit aktivatör oranında da kil ve kum zemin örneklerinden daha yüksek mukavemet değerleri vermiştir. Aktivatör 1 ilavesinin etkin olduğu kanısına varılmıştır. Ayrıca, Na_2SiO_3 miktarının artışı ile en büyük mukavemet değerlerine karşılık gelen eksenel şekil değiştirmeler de artmaktadır. Bu da mekanik davranışın daha sünek olduğunu ifade etmektedir.

Çizelge 2. Metot 1’e Göre Hazırlanan 28, 56 ve 90 Gün Küre Bırakılan Örneklerin Serbest Basınç Mukavemetleri (SBM)

Table 2. Unconfined compressive strength of specimens prepared with method 1 and cured for 28, 56, and 90 days

Örnek Adı	28 Gün (kPa)	56 Gün (kPa)	90 Gün (kPa)	28 Gündeki SBM’ye Karşılık Gelen Eksenel Şekil Değişirme (%)
C7030	236	354	456	1,53
C9010	245	918	1114	2,15
CS7030	740	1467	2562	1,40
CS9010	1075	2131	2895	2,68
S7030	353	904	1648	1,80
S9010	861	3681	4784	4,28

Çizelge 2’ye bakıldığında S9010 kum örneğinin oldukça yüksek mukavemete ulaştığı görülmektedir. 90 günde 4784 kPa mukavemete ulaşılmıştır. Killi kum örnekler de ise 3000 kPa’ya yaklaşan serbest basınç mukavemeti göze çarpmaktadır. Zemin örnekleri için metot 1 uygulandığında %90 Na_2SiO_3 -%10 NaOH likit aktivatörü 28 günlük örneklerle uyumlu olarak 90 günde de daha etkin bir aktivatördür.

Sıcaklık Etkisi - Metot 2 ile Geopolimerizasyon (Temperature Effect – Geopolimerization with Method 2)

Çizelge 3'te kil (C), killi kum (CS) ve kum (S) örneklerin her iki aktivatör ile hazırlanarak 1 gün 80°C sıcaklıkta bir etüvde bekletilip ardından 20°C sıcaklıkta 7 ve 28 gün küre tabi tutulduktan sonraki serbest basınç mukavemeti (SBM) değerleri özetlenmektedir.

Örneklerin geopolimerizasyon metodunun serbest basınç mukavemetlerini önemli ölçüde etkilediği, hatta kullanılacak likit aktivatör oranlarının da kür metoduna uygun olarak seçilmesi gerektiği görülmüştür. Çizelge 3'te aktivatör 2 kullanılarak hazırlanan örneklerin mukavemetleri aktivatör 1 kullanılarak hazırlanan örneklerin mukavemetinden büyüktür. Bu durum bir önceki başlıkta incelenen durumun tam tersidir. Bununla birlikte her likit aktivatör oranında ulaşılan mukavemet mertebeleri de farklı olmuştur.

Çizelge 3. Metot 2'ye Göre Hazırlanan 7 ve 28 Gün Küre Bırakılan Örneklerin Serbest Basınç Mukavemetleri (SBM)

Table 3. Unconfined compressive strength of specimens prepared with method 2 and cured for 7 and 28 days

Örnek Adı	Kürsüz (kPa)	7 Gün (kPa)	28 Gün (kPa)	28 Gündeki SBM'ye Karşılık Gelen Eksenel Şekil Değiştirme (%)	38°C ile 28 Gün SBM Karşılaştırması
C	315	-	-	3,88	-
C7030	-	239	271	1,64	%13 artış
C9010	-	168	215	2,19	%13 azalma
CS	316	-	-	2,58	-
CS7030	-	890	985	1,42	%33 artış
CS9010	-	747	860	2,37	%20 azalma
S7030	-	320	385	1,87	%8 artış
S9010	-	564	830	2,89	%4 azalma

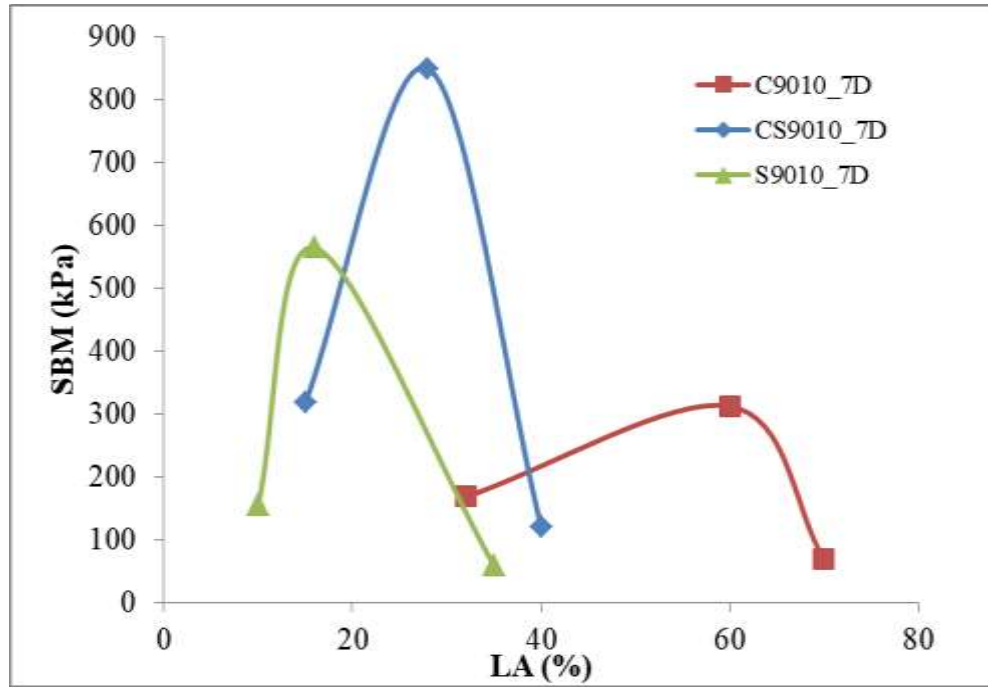
En belirgin değişim CS7030 örneğinde gözlenmiş olup serbest basınç mukavemeti %33 artmıştır. Örnekler en yüksek mukavemet değerlerine daha küçük eksenel şekil değiştirme yüzdelерinde ulaşmışlardır, diğer bir deyişle bu kür metodunda pik mukavemet gevrek davranış gösteren örneklerle elde edilmiştir.

Likit aktivatör içermeyen kil örnekler (C grubu) incelendiğinde ise likit aktivatör eklenmesinin kür metodundan bağımsız olarak serbest basınç mukavemeti değerlerini erken dönemde (28 gün) azalttığı gözlenmiştir. Metot 2 ile bu çalışmada 28 güne kadar inceleme yapılabilmektedir ve sadece kil örnek gruplarında katkısız zeminin mukavemetinden daha yüksek mukavemete ulaşamamıştır. Ancak bu zeminlerde 7 günde katkısız zemine göre daha düşük mukavemet gözlenirse de 28 günde mukavemet 7 güne kıyasla artmaktadır. Bu durum kil örneklerin uzun dönem mukavemetlerin gözlenmesinin gerekli olduğunu göstermektedir. Metot 1 ile yapılan geopolimerizasyon uygulamasında (Çizelge 2) 90 günde katkısız kil örneklerin 1,5-3,5 katı mukavemete ulaşılmıştır. Metot 2'nin uygulandığı killi kum örneklerinde ise aktivatör 2'nin kullanıldığı durumda iyileştirmenin gerçekleştiği görülmüştür.

Likit Aktivatör Miktarının Değişken Olduğu Örnekler (Samples with Varying Amount of Liquid Activator)

Gerek metot 1 gerekse metot 2 ile hazırlanan kil örneklerin serbest basınç mukavemeti değerlerinin katkısız kil örneklerden daha düşük mukavemet vermesi ilgi çekicidir. Bu durumda ortama eklenen likit aktivatör miktarının (bağlayıcı malzemeyi artırmak) arttırılması gereklidir. Bu fikirle, zeminin optimum su içeriğinden farklı oranlarda aktivatör ilavesinin etkileri incelenmiştir. Kil örneklerde %32-60-70 (optimumun sağında iki adet), kum örneklerde %10-16-35 (optimumun solunda ve sağında), killi kum örneklerde %15-28-40 (optimumun solunda ve sağında) oranlarında likit aktivatör ile çalışarak sonuçlar raporlanmıştır. Birim maliyetleri düşürmek adına, aktivatör 1 kullanıldığında düşük mukavemet veren geopolimerizasyon metodu 2 ile hazırlanarak en az iyileştirmenin beklendiği şartlar temsil edilmiştir. Bu

şartlar altında serbest basınç mukavemetlerinin artmasının mümkün olup olmadığı da belirlenmiştir. Bu bölümde örneklerin kür süresi 7/28 gündür.



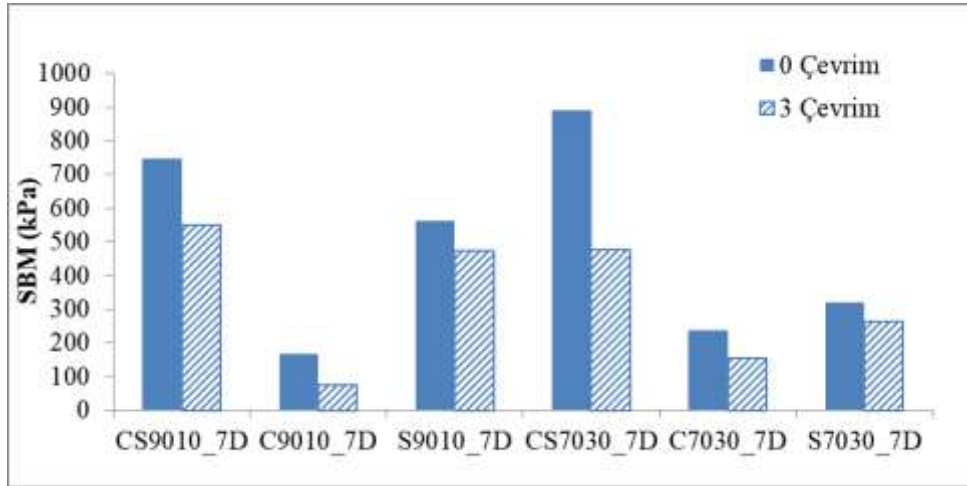
Şekil 5. Farklı Likit Aktivatör Oranlarında Hazırlanan Zemin Örneklerinin Serbest Basınç Mukavemeti Değerleri (D: Kür süresidir)

Figure 5. Unconfined compressive strength of soil samples prepared with different liquid activator ratios (D: curing time)

Killi kum ve kum örnekler, 7 günde optimum su içerikleri olan %28 ve %16 likit aktivatör içeriklerinde en yüksek serbest basınç mukavemetleri olan 747 ve 564 kPa değerlerine ulaşmıştır. 28 günde killi kum örnekler 860 kPa, kum örnekler 830 kPa mukavemete ulaşmıştır. Kil zeminlerin likit aktivatör oranı optimum su içeriği kadar olduğunda bu değer %32'dir ve 168 kPa mukavemete sahiptir. Oysa likit aktivatör oranı yaklaşık 2 katına çıkarıldığında (%60) mukavemet 7 günde 312 kPa olup yaklaşık zeminin katkısız haline eşittir. 28 günde ise 555 kPa mukavemet ölçülmüştür. Bu da katkısız zemine göre %43'lük bir artış demektir. Bu durum kil içeren örneklerde mukavemet artışının daha geç gerçekleştiği görüşünü kuvvetlendirmekte ve Heah ve diğ. (2012)'nin bulguları ile örtüşmektedir.

Donma -Çözünme Etkileri (Freeze - Thaw Effects)

Metot 2 ile geopolimerizasyonu sağlanan örnekler 7 gün küre bırakılmıştır. Ardından 3 çevrim donma-çözünme sonundaki mukavemetleri de belirlenmiştir (Şekil 6). 3 çevrim sonunda en büyük mukavemet azalımı C9010 (%55) ve CS7030 (%46) örneklerinde tespit edilmiştir. Genel olarak kum zeminlerin donma-çözünme çevrimlerine karşı daha dayanıklı oldukları tespit edilmiştir. Bu örneklerde mukavemet ortalama %17 azalmıştır.



Şekil 6. 3 Çevrim Donma Çözünme Soncu Gözlemlenen Mukavemet Kayıpları (D: Kür süresidir)

Figure 6. Strength decrements due to 3 cycles of freeze-thaw (D: curing time)

Zeminlerin donma-çözünme etkilerine olan hassasiyetleri kapilarite ve permeabilite gibi hidrolik özelliklerinden etkilenmektedir. Bu bağlamda killerin ve kil içeren zeminlerin dikkatle ele alınması önerilmektedir (FHWA, 2006). Killi zeminler, donma sıcaklığına ve su içeriği değişimine duyarlıdır. Sıcaklık 0 °C'nin altına düştüğünde, boşluk sıvısı kısmen buz kristaline dönüşür ve hacim genişlemesi nedeniyle donmaya başlar. Sıcaklık 0° C'nin üzerine çıktığında, zemin buz kristali erir ve çözünme ile zayıflama görülür (Andersland ve Ladanyi, 2003). Eskişar ve diğ. (2015), zemindeki mikrofisürlerin oluşumu ile boşluk hacminin artarak killi zeminlerin permabilitesinin arttığını, Kravchenko ve diğ. (2018) ise kil minerallerinin temas noktalarında bozunma gerçekleşerek zemin bileşiminin değiştiğini söylemektedir. Bu bilgiler kil (C) ve killi kum (CS) zemin gruplarında neden daha fazla mukavemet kaybının oluştuğunun sebeplerini açıklamaktadır. Bir başka yaklaşım ise şudur, boşluk sıvısının alkali aktivatör olması nedeniyle permeabilitesi kilden daha yüksek olan kum örneklerde, kile göre daha büyük ölçekli boşlukların bu sıvı ile dolması sonucu, sıvının 7 günlük kür süresi boyunca sertleşmesi sonucunda daha rijit bir yapı elde edilmiştir, bu durum kum zeminlerde donma-çözünme çevrimleri sonrasında oluşan mukavemet kaybını azaltıcı bir etkiye sahip olmuştur. Ancak, zeminin boşluk sıvısının içeriğinden ziyade zemin türünün daha önemli bir faktör olduğu görülmüştür.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, geopolimerizasyon metoduna bağlı olarak NaOH molaritesinin etkisi, sıcaklık etkisi, %70 Na₂SiO₃-%30 NaOH ve %90 Na₂SiO₃-%10 NaOH kullanılarak hazırlanan iki aktivatörün etkisi, aktivatör 1'in miktarının değiştirilmesi sonucu gelişen etki, kür süresi ile mukavemetteki değişimler ve 3 çevrim donma-çözünmenin serbest basınç mukavemeti üzerindeki değişimleri araştırılmıştır.

Sonuçlar özetlenecek olursa şu çıkarımlar yapılabilir.

28 günlük örnekler için:

- Metot 1 tercih edildiğinde likit aktivatörde kullanılacak Na₂SiO₃ yüzdesinin de artması gerekmektedir.
- Metot 1 uygulandığında aktivatör 1 kullanılarak geopolimerizasyonu sağlanan örneklerin kırımı ile pik mukavemetler elde edilmiş ve davranış aktivatör 2'ye göre daha sünek gelişmiştir. Oysa, metot 2'de genel olarak aktivatör 2 daha etkin olmuştur; pik mukavemetler aktivatör 1 ile hazırlanan örneklerle kıyasla, daha gevrek kırılmaları işaret etmektedir. Kısaca, geopolimerizasyonun uygulama şartları zeminin performansını önemli ölçüde değiştirebilecek güce sahiptir.
- Bu çalışmada en yüksek mukavemet değeri CS9010 örneklerinde 1075 kPa olarak bulunmuştur.

- Kil zeminlerde likit aktivatör oranının optimum su içeriğinin yaklaşık 2 katına çıkarılması gerekmektedir. Ancak iki kat likit aktivatör kullanıldığında, mukavemet gelişimi 28. günde ortaya çıkmakta yani mukavemet gelişimini kısa sürede tespit etmek mümkün olmamaktadır.

Diğer örneklerde ise:

- Uzun dönem mukavemetlerde ise S9010 örnekleri en iyi performansı göstermiştir.
- Likit aktivatör içindeki NaOH molaritesinin artışı mukavemeti olumlu yönde etkiler, ancak maliyetleri arttırır. Molarite değişiminin sahaya uygun bir fizibilite çalışması sonucunda kararlaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada 8 mol NaOH kullanımı ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur.
- 7 günlük örneklerde 3 çevrim sonunda en büyük mukavemet azalımı C9010 (%55) ve CS7030 (%46) örneklerinde tespit edilmiştir. Genel olarak kum zeminlerin donma-çözünme çevrimlerine karşı daha dayanıklı oldukları tespit edilmiştir. Bu örneklerde mukavemet ortalama %17 azalmıştır.

Sonuçta, sadece likit aktivatör katkısının geopolimerizasyon metodunun doğru seçildiği durumda (sıcaklığın etkisi de dikkate alındığında) zeminlerin mukavemetlerini ortalama 2,5-3 kat arttırıcı bir etkisi olduğu görülmüştür. Daha yüksek mukavemetlere ihtiyaç duyulduğunda zeminlere uçucu kül, pirinç kabuğu külü veya volkanik kül gibi bir prekürsör ilavesinin gerekli olacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdullah, M.S., Ahmad F., Mustafa Al Bakri, A.M., 2015, "Geopolymer Application in Soil: A Short Review", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 754-755, pp. 378-381.
- Adhikari, S., Khattak, M.J., Adhikari, B., 2018, "Mechanical Characteristics of Soil RAP-Geopolymer Mixtures for Road Base and Subbase Layers", *International Journal of Pavement Engineering*.
- Alshaaer, M., 2013, "Two-Phase Geopolymerization of Kaolinite-Based Geopolymer". *Applied Clay Science*, Vol. 86, pp. 162-168.
- Andersland, O.B., Ladanyi, B., 2003, *Frozen Ground Engineering*, John Wiley and Sons Ltd., ASCE.
- ASTM D560, 2016, *Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures*, pp.6.
- ASTM D698, 2012, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*, pp. 13.
- ASTM D2166, 2016, *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, pp. 7.
- ASTM D2487, 2017, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, pp. 11.
- Ayyappan, A., Palanikumar, S., Kumar, D., Vinoth, M., 2017, "Influence of Geopolymers in The Stabilization of Clay Soil", *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*, Vol. 5, pp 108-120.
- Binal, A., Kasapoğlu, K.E., Gökçeoğlu, C., 1997. "The surficial physical deterioration behaviour of Neogene volcanosedimentary rocks of Eskişehir-Yazılıkaya". In: Marinos, Koukis, Tsiambaos, Stournaras (Eds.), *Proceedings of Engineering Geology and the Environment*, A.A. Balkema Publishers, The Netherlands, pp. 3065-3069.
- Bing-hui M., Zhu, H., Xue-min, C., Yan, H., Si-yu, G., 2014, "Effect of Curing Temperature on Geopolymerization of Metakaolin-Based Geopolymers", *Applied Clay Science*, Vol. 99, pp. 144-148.
- Eskişar, T., Altun, S., Kalıpcılar, İ., 2015, "Assessment of strength development and free-ze-thaw performance of cement treated clays at different water contents", *Cold Reg.Sci. Technol.*, 111, pp. 50-59.
- FHWA (Federal Highway Administration), 2006, "Geotechnical Aspects of Pavements Reference Manual", U.S. Department of Transportation Publication No. FHWA NHI-05-037, May 2006, NHI Course No. 132040.
- Ghadir, P., Ranjbar N., 2018, "Clayey Soil Stabilization Using Geopolymer and Portland Cement", *Construction and Building Materials*, Vol. 188, pp. 361-371.

- Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Lugman, M., Nizar, I.K., Ruzaidi, C.M., Liew, Y.M., 2011, "Effect of Curing Profile on Kaolin-based Geopolymers", *Physics Procedia*, Vol. 22, pp. 305 – 311.
- Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Lugman, M., Nizar, I.K., Ruzaidi, C.M., Liew, Y.M., 2012, "Study on Solids – to-Liquid and Alkaline Activator Ratios on Kaolin – Based Geopolymers", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 912-922.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981, *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 07632, New Jersey.
- Konrad, J.M., Samson, M., 2000, "Hydraulic Conductivity of Kaolinite-Silt Mixtures Subjected to Closed-System Freezing and Thaw Consolidation", *Can. Geotech. J.*, Vol. 37, pp. 857–869.
- Kravchenko, E., Liu, J.K., Niu, W.W., Zhang, S.J., 2018, "Performance of clay soil reinforced with fibers subjected to freeze-thaw cycles", *Cold Reg. Sci. Technol.* 153, pp.18–24.
- Moayedi, H., Huat, B.K., Moayedi, F., Asadi, A., Parsaie, A., 2011, "Effect of Sodium Silicate on Unconfined Compressive Strength of Soft Clay", *EJGE*, Vol. 16, pp. 289-295.
- Morsy, M.S., Alsayed, S.H., Al-Salloun, Y., Almusallam, T., 2014, "Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder", *Arabian Journal For Science and Engineering*, Vol. 39, pp. 4333–4339.
- Palanisamy, P., Suresh Kumar, P., 2018, "Effect of Molarity in Geopolymer Earth Brick Reinforced with Fibrous Coir Wastes Using Sandy Soil and Quarry Dust As Fine Aggregate. (Case study)", *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 8, pp. 347-358.
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., Udomchai, A., 2016, "Strength Development in Soft Marine Clay Stabilized by Fly Ash and Calcium Carbide Residue Based Geopolymer", *Applied Clay Science*, Vol. 127–128, pp. 134–142.
- Rovnanik, P., 2010, "Effect of Curing Temperature on The Development of Hard Structure of Metakaolin-based Geopolymer", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1176–1183.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., Chindaprasir, P., 2011, "NaOH-activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature", *Fuel*, Vol. 90, pp. 2118–2124.
- Swain, K., 2015, *Stabilization of Soil Using Geopolymer and Biopolymer*, National Institute of Technology, Rourkela.
- Uddin, M.N., Saraswathy, V., 2018, " A Comparative Study on Clay and Red Soil Based Geopolymer Mortar", *Civil Engineering and Architecture*, Vol. 6, pp. 34-39.
- Wong, L., Haug, M., 1991, " Cyclical Closed-System Freeze-Thaw Permeability Testing of Soil Liner and Cover Materials", *Can. Geotech. J.*, Vol. 28, pp. 784-793.
- Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G., Tao, M., 2013, "Experimental Feasibility Study of Geopolymer As The Next-Generation Soil Stabilizer", *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 1468–1478.

POLİVİNİL KLORÜR (PVC) ULTRAFİLTASYON MEMBRAN PERFORMANSININ ÇOK DUVARLI KARBON NANOTÜP KATKISI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Elif DEMİREL 

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 26555, Eskişehir, TÜRKİYE
elifyildiz@eskisehir.edu.tr

(Geliş/Received: 16.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.01.2020)

ÖZ: Bu çalışmada, faz dönüşüm tekniği ile polivinil klorür (PVC) esaslı karbon nanotüp katkılı nanokompozit membranlar hazırlanmıştır. En uygun membran reçetesinin belirlenmesi amacıyla en yüksek saf su akısı ve madde giderimini veren PVP/PVC/çözücü oranı araştırılmıştır. Farklı yükleme oranlarında (%0,1-3,0, a/a) membran çözeltisine ilave edilen oksitlenmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (o-MWCNT) ile hazırlanan membranların özellikleri saf membranın özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Hazırlanan membranların saf su geçirgenliği ve madde giderimi gibi filtrasyon performans özellikleri belirlenmiştir. Membranların morfolojik özellikleri (gözenekliliği, gözenek boyutu ve dağılımı) Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi, hidrofilikliği temas açısı ganyometresi, içerdiği fonksiyonel gruplar Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi analizi, ısı kararlılığı Termogravimetrik Analiz (TGA), mekanik dayanımı ise nanoindentasyon analizi ile tespit edilmiştir. Hidrofobik olan PVC esaslı saf membran matrisine eklenen o-MWCNT'lerin membran hidrofilikliğini artırarak sadece geçirgenliği ve madde giderimini değil, aynı zamanda membranın yapısal özelliklerini de iyileştirdiği görülmüştür. Deneysel çalışmalardan, %0,5 o-MWCNT'leri içeren nanokompozit membranın en düşük temas açısı ve en yüksek porositeye sahip olmasından dolayı, en yüksek akı (356 L/m²sa) ve madde giderimine (%95,6) sahip olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ultrafiltrasyon, Membran, Karbon Nanotüp, PVC, Nanokompozit

Performance Enhancement of Polyvinyl Chloride (PVC) Ultrafiltration Membrane by Incorporation of Multi-Walled Carbon Nanotubes

ABSTRACT: In this study, polyvinyl chloride (PVC) based nanocomposite membranes incorporated with carbon nanotubes were fabricated using phase inversion technique. PVP/PVC/solvent ratio was investigated for the highest pure water flux and rejection in order to determine the most suitable membrane recipe. The properties of nanocomposite membranes fabricated in the presence of oxidized multiwalled carbon nanotubes (o-MWCNT) with varying loading levels (0.1-3.0%, by mass) were compared with those of pristine membranes. Filtration performance such as pure water flux and rejection values of the fabricated membranes were determined. Morphological properties (porosity, mean pore diameter and pore distribution), contact angles, functional groups, thermal stability and mechanical strength of the fabricated membranes were determined using Scanning Electron Microscopy (SEM), a contact angle goniometer, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and a nanoindenter, respectively. It has been demonstrated that incorporating hydrophilic o-MWCNTs into the hydrophobic polymeric matrix not only improved the permeability and rejection but also enhanced the membrane structural properties. The results revealed that addition of 0.5% o-MWCNTs into the casting solution provided the highest flux (356 L/m²h) and rejection rate (%95.6) due to having lowest contact angle and highest porosity.

Keywords: Ultrafiltration, Membrane, Carbon Nanotube, PVC, Nanocomposite

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte son yıllarda su talebi giderek artmakta olup taze su kaynaklarına ulaşım insanlık için daha fazla önem kazanmaktadır. Dünya Su Konseyi, 2030 yılına kadar 3,9 milyar insanın su kıtlığı yaşanan bölgelerde yaşam mücadelesi vereceğini rapor etmiştir (Dünya Su Konseyi raporu, 2007). Ayrıca, iklim değişikliği, evsel ve yeterince artılmayan sanayi atıklarından dolayı taze su kaynağı sıkıntısı gün geçtikçe artmakta olup günümüzde uygulanmakta olan su ve atık su arıtım teknolojileri ve altyapısı, insan ve çevrenin ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalmaktadır (Dünya Su İyileştirme Raporu, 2013). Bu nedenle, hem yeni nesil su ve atık su arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi hem de mevcut yöntemlerde karşılaşılan problemlerin çözülmesi için araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç vardır.

Sürücü kuvveti basınç farkı olan mikrofiltrasyon (MF), nanofiltrasyon (NF), ultrafiltrasyon (UF) ve ters osmoz (RO) gibi gelişmiş membran teknolojileri yüksek kalitede güvenli içme suyu sağlamak için kullanılan gelişmiş arıtma yöntemlerindendir (Goh ve diğ., 2013). UF membranların düşük enerji tüketimi, bulanıklık ve organik maddeleri giderebilme özellikleri sebebiyle NF ve ters osmoz RO yöntemlerine göre içme suyu arıtımında daha düşük maliyetli etkin bir seçenek olduğu bilinmektedir (Gao ve diğ., 2011). Ayrıca, içme suyu arıtımının yanı sıra NF ve RO proseslerine bir ön arıtma seçeneği olarak da kullanılmaktadır. İyi bir ultrafiltrasyon membranından beklenen özellikler, belirli bir zaman boyunca mekanik ve kimyasal etki altında yüksek akı, düşük kirlenme eğilimi ve yüksek madde giderimine sahip olmasıdır (Wu ve diğ., 2013). Gözenekli bir yapıya sahip olan polimerik ultrafiltrasyon membranların üstün kimyasal, mekanik ve ısıl özelliklerine rağmen, düşük yüzey enerjisi ve yüksek hidrofobikliğinden dolayı ciddi miktarda kirliliğe maruz kalması, düşük akış hızı geri kazanımı ve düşük mekanik dayanımı gibi nedenlerden dolayı geliştirilmesine yönelik araştırmalara gereksinim duyulmaktadır (Goh ve diğ., 2015). Bu nedenle, son on yılda polimerik ultrafiltrasyon membranların, mekanik dayanım, kirlenme ve akı düşüşüne karşı yüksek dirençli davranış gösterebilmeleri için modifiye edilmiş üstün özelliklere sahip alternatif membranlar geliştirmeye yönelik çalışmalar artmaktadır (Arthanareeswaran ve Thanikaivelan, 2010). Son yıllarda nano yapı malzemelerin ve nanotaniciklerin üretimi için geliştirilen teknikler, yüksek madde giderimi ve akıya sahip membran üretimi için yeni bir çalışma alanı olarak ortaya çıkmaktadır (Stone ve diğ., 2010; Low ve diğ., 2015). Nanokompozit ultrafiltrasyon membranların gelişmiş polimerik ağ yapısı, artan gözenek çapı ve hidrofiliklikleri nedeniyle sahip oldukları yüksek mekanik dayanım, yüksek akı, düşük kirlenme eğilimi ve uzun ömürleri sayesinde su ve atık su arıtımında kullanımı saf membranlara göre daha yaygın hale gelmiştir (Majumder ve Corry, 2011; Goh ve diğ., 2015). Nanokompozit membranlar, geçirgenlik, mekanik dayanım ve kirlenme direncinin yanı sıra süzüntü kalitesini arttırmak için silika, zeolit, grafit, metal oksit ve karbon nanotüp gibi birçok nanoparçacık varlığında üretilmektedir (Bottino ve diğ., 2002; Merkel ve diğ., 2002; Uragami ve diğ., 2002; Kim ve diğ., 2003; Lu ve diğ., 2006; Rahimpour ve diğ., 2008; Taurozzi ve diğ., 2008; Li ve diğ., 2009). Son yıllarda gerek sentez yöntemlerinin geliştirilmesi, gerekse birçok alanda kullanılması açısından oldukça popüler olan karbon nanotüpler (CNTler), yüksek esnekliği, düşük yoğunluğu, yüksek boy-en oranı, çekme katsayısı ve dayanımının iyi olması gibi özelliklerinden dolayı yüksek performanslı polimer kompozit maddelerin üretimi için kullanılan gelişmiş nanomateryaller arasında yer almaktadır (Kong ve diğ., 2000; Appenzeller ve diğ., 2002; Sakintuna ve Yurum, 2005). Karbon nanotüplerin asitlendirme işlemi ile fonksiyonel hale getirildiği ve bu işlem sayesinde karbon nanotüp yapısına polar grupların bağlanarak yüzey modifikasyonunu gerçekleştirdiği bilinmektedir. Bu durumda karbon nanotüplerin, polimer yapısına daha çok tutunduğu, polimer içerisinde homojen olarak dağıldığı gözlenmiş ve artan hidrofiliklik sayesinde yüksek geçirgenlik, daha iyi kirlenme direnci ile birlikte madde giderimini iyileştiren gelişmelerin olduğu yapılan çalışmalarla vurgulanmaktadır (Liu ve diğ., 1998; Eitan ve diğ., 2003; Qu ve diğ., 2004; Choi ve diğ., 2006).

Bu çalışmanın amacı, polivinil klorür (PVC) bazlı ultrafiltrasyon membran matrisine farklı yükleme oranlarında çok duvarlı karbon nanotüpler (o-MWCNT) ilave edilerek membranın su akısı ve madde giderimi gibi filtrasyon performans özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra hazırlanan nanokompozit membranların yapısal özelliklerinin belirlenerek saf membranın özellikleriyle karşılaştırılmasıdır.

Nanokompozit membran hazırlanmadan önce membran filtrasyon performansına önemli ölçüde etkisi olan döküm çözeltisinin bileşimi saf PVC membranlar için araştırılarak en uygun PVP/PVC/çözücü oranı belirlenmiştir. Ticari saf MWCNT'lere hidrofilik özellik kazandırmak ve membran döküm çözeltisi içerisindeki dağılımını iyileştirmek için asit ile ön muamele edilerek fonksiyonel gruplarla modifiye edilmiştir. Değişen oranlara sahip fonksiyonelleştirilmiş MWCNT'ler, faz dönüşüm tekniği kullanılarak PVC matrisine gömülmüştür. Hazırlanan o-MWCNT katkılı nanokompozit membranların saf su akısı ve sodyum aljinat giderimi ölü uçlu ultrafiltrasyon test sisteminde belirlenmiş olup saf membran değerleriyle karşılaştırılmıştır. Membranların morfolojik özellikleri (gözeneklilik, gözenek boyutu ve dağılımı, parmaklı yapıların dağılımı) SEM analizi, hidrofiliklikliği teması açısı ganyometresi, içerdiği fonksiyonel gruplar FTIR analizi, ısı kararlılığı TG analizi, mekanik dayanımı ise nanoindentasyon analizi ile belirlenmiş olup saf ve nanokompozit membranlar yapısal ve yığın özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu testlerin sonucunda en iyi o-MWCNT yükleme oranını içeren membran reçetesi belirlenmiştir.

DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Malzemeler (Materials)

Kompozit membran üretiminde kullanılan saf çok duvarlı karbon nanotüpler (Nanografi), 6-13 nm çapında ve 1-3 µm uzunluğunda olup %96'dan yüksek saflığa sahiptir. Membran polimeri olarak polivinil klorür (PVC, yüksek molekül ağırlıklı, Aldrich), gözenek oluşturuç olarak polivinilpirolidon (PVP, molekül ağırlığı= 40.000 Da, Alfa Aesar), çözücü olarak ise N-metil-2-pirrolidon (NMP, susuz, %99,5 saflıkta, Sigma-Aldrich) kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan diğer kimyasallar ise sülfürik asit (%95-98, Isolab), nitrik asit (≥%65 saflıkta, Sigma-Aldrich), deiyonize su (Milli-Q), sodyum aljinat (Sigma-Aldrich) ve sodyum klorür (Millipore)'dür.

Oksitlenmiş çok duvarlı karbon nanotüplerin (o-MWCNT) Sentezlenmesi (Synthesis of Oxidized MWCNTs)

o-MWCNT'ler kullanılarak üretilen nanokompozit membranlarda, membran matrisi ve morfolojisi değişmekte olup ultrafiltrasyon membranların filtrasyon performansı iyileşmektedir. MWCNT'lerin çözücü içerisindeki dağılımını iyileştirmek için asit ile muamele edilmiştir. 1 gr saf MWCNT, 300 mL H₂SO₄/HNO₃ (1:3, h/h) karışımına eklendikten sonra çözelti, 12 saat boyunca 95°C'de'ki su banyosunda geri soğutucu altında kaynatılmıştır. Daha sonra deiyonize su ile nötralize edilerek, 0,45 µm selüloz asetat membran ile filtre edilmiş ve pH nötr olana kadar saf su ile yıkanmıştır. Nötralliği sağlanan oksitlenmiş MWCNT'ler 70°C'de vakum altında kurutulmuştur (Qiu ve diğ., 2009; Çelik ve diğ., 2011; Rahimpour ve diğ., 2011; Vatanpour ve diğ., 2011, Majeed ve diğ., 2012).

Saf ve Nanokompozit Membranların Hazırlanması (Preparation of Pristine and Nanocomposite Membranes)

PVC bazlı saf membranların hazırlanması için değişen oranlarda PVC ve gözenek oluşturuç PVP karışımı NMP içerisinde çözülerek 60°C'de homojen bir çözelti (döküm çözeltisi) oluşuncaya kadar 24 saat boyunca karıştırılmıştır. Çözelti, içerisindeki hava kabarcıklarının tamamen yok olması için bir süre ultrasonik su banyosunda tutulduktan sonra oda sıcaklığında statik olarak bekletilmiş ve daha sonra bir cam plaka üzerine dökülerek ayarlanabilir film aplikatörü ile 200 µm kalınlığında ince bir film haline getirilmiştir. Dökülen ince film, saf su içeren bir çöktürme banyosuna yerleştirilerek faz dönüşüm sürecinin gerçekleşmesi sağlanmıştır (Qiu ve diğ., 2009).

Saf membranların hazırlanması için en uygun PVP/PVC/çözücü oranı araştırılmıştır. Öncelikle, döküm çözeltisi içerisindeki polimer (PVC+PVP) oranı %12-24 arasında (ağırlıkça) değiştirilmiş olup uygun polimer oranı belirlendikten sonra, PVP:PVC oranı (0:1, 1:1, 1:2, 1:4, a/a) araştırılmıştır. En uygun saf su akısı (L/m²sa) ve sodyum aljinat giderimini veren PVP/PVC/çözücü oranı nanokompozit membran hazırlanmasında kullanılmıştır.

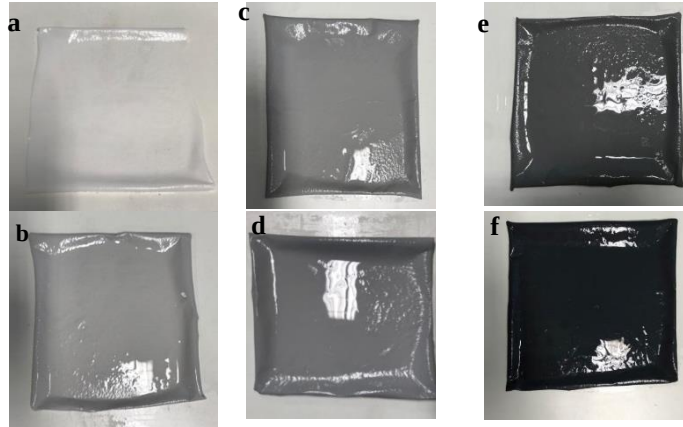
Nanokompozit membranların homojen döküm çözeltisini hazırlamak için, NMP'ye değişen miktarlarda (%0,1-3,0, a/a) o-MWCNT'ler ilave edilmiş ve çözücü içerisinde daha iyi şekilde dağılması için uzun bir süre ultrasonik su banyosunda bekletilmiştir (Çelik ve diğ., 2011). Uygun miktarda PVP ve PVC ilavesinden sonra, 24 saat boyunca 60°C'de homojen bir çözelti elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Elde edilen homojen çözelti, ince film haline getirilmiş ve faz dönüşüm tekniği kullanılarak nanokompozit membranlar üretilmiştir.

Saf ve nanokompozit membranlar için döküm çözeltisinin bileşimi Çizelge 1'de, hazırlanan saf ve nanokompozit membranlar ise Şekil 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. Saf ve nanokompozit membranlar için döküm çözeltilerinin bileşimi.

Table 1. Composition of casting solutions for the pristine and nanocomposite membranes.

Membran Kodu	PVC (g)	PVP (g)	NMP (g)	o-MWCNT (g)	o-MWCNT/PVC (% a/a)
Saf PVC	6,4	1,6	42,000	-	0
PVC/0,1o-MWCNT	6,4	1,6	41,990	0,0064	0,1
PVC/0,5o-MWCNT	6,4	1,6	41,968	0,032	0,5
PVC/1,0o-MWCNT	6,4	1,6	41,936	0,064	1,0
PVC/2,0o-MWCNT	6,4	1,6	41,872	0,128	2,0
PVC/3,0o-MWCNT	6,4	1,6	41,808	0,192	3,0



Şekil 1. Hazırlanan saf ve nanokompozit membranlar (a) saf PVC, (b) PVC/0,1o-MWCNT, (c) PVC/0,5o-MWCNT (d) PVC/1,0o-MWCNT (e) PVC/2,0o-MWCNT (f) PVC/3,0o-MWCNT.

Figure 1. Fabricated pristine and nanocomposite membranes (a) pristine PVC, (b) PVC/0.1o-MWCNT, (c) PVC/0.5o-MWCNT (d) PVC/1.0o-MWCNT (e) PVC/2.0o-MWCNT (f) PVC/3.0o-MWCNT.

Filtrasyon Performansı (Filtration Performance)

Hazırlanan saf ve nanokompozit membranların filtrasyon performansı saf su akışı ve sodyum aljinat giderimi ile belirlenmiştir. Membran filtrasyon testlerinde ölü uçlu ultrafiltrasyon sistemi (Millipore) kullanılmıştır. Tipik bir testte, 28,7 cm²'lik aktif alana sahip bir membran numunesi, 200 mL'lik karıştırmalı bir membran hücresine yerleştirilmiştir. Besleme tankına konulan saf su azot gazı ile sisteme gönderilerek membran gözeneklerinden geçmesi sağlanmış ve süzüntü bir toplama kabında biriktirilip miktarı zamana bağlı olarak akış sabitleninceye kadar ölçülmüş ve değerler Collect (+) yazılımı ile kaydedilmiştir. Sistemde uygulanan transmembran basıncı (TMP) 0,69 bar olarak sabit tutulmuştur. Saf su akışı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$J_s = \frac{Q}{A \times \Delta t} \quad (1)$$

Eşitlikteki J_s saf su akısı (L/m^2sa), Q toplanan süzüntünün miktarı (L), A aktif membran yüzey alanı (m^2) ve Δt ölçüm için geçen zaman aralığıdır (sa).

Her bir membran için saf su akı deneyleri tamamlandıktan sonra, membranlar akının sıkışma veya şişme gibi etkiler nedeniyle zamanla değişmediğinden emin olmak için 10 mM NaCl çözeltisi ile şartlandırılmıştır (Kang ve diğ., 2007, Liu ve diğ., 2013). Madde gideriminin belirlenmesi için kirletici olarak polisakkarit yapılı model bileşen sodyum aljinat (SA) kullanılmıştır. Membranlar şartlandırıldıktan sonra, 10 mg/L SA konsantrasyona sahip kirletici çözelti besleme tankına ilave edilip yaklaşık 8 saat gözeneklerden geçmesi sağlanmıştır. Kirlilik gideriminin hesaplanması için ilk 10 dakika sonunda süzüntü (permeate) örneği alınmıştır. Toplanan süzüntü ve beslemenin konsantrasyonları TOC-L Cihazı (Toplam Organik Karbon, Shimadzu) ile kantitatif olarak belirlenmiştir. Madde giderimi (R , %) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (2)$$

Eşitlikteki R , madde giderimi (%), C_p ve C_f değerleri ise sırasıyla süzüntü ve besleme çözeltilerinin konsantrasyon (ppm) değerleridir.

Gerek saf PVC, gerekse nanokompozit membran döküm çözeltisinin hazırlanmasında kullanılmak üzere en uygun PVP/PVC/NMP oranı araştırılmış olup farklı oranlarda PVP/PVC/NMP içeren membranlar hazırlanmış, en yüksek saf su akısı ve sodyum aljinat giderimini veren membran reçetesi nanokompozit membran hazırlanmasında kullanılmıştır. Bu amaçla literatür taramasına bağlı olarak öncelikle PVP:PVC oranı sabit tutulup (1:4, a/a) polimer oranı (%12-24, a/a) değiştirilmiştir. Uygun polimer oranı belirlendikten sonra PVP/PVC oranı (0:1-1:4, a/a) değiştirilerek hazırlanan saf su akısı ve SA giderimine bağlı olarak en uygun PVP/PVC/NMP oranı tespit edilmiştir.

Karakterizasyon (Characterization)

Saf ve oksitlenmiş MWCNT'lerin içerdiği fonksiyonel grupların belirlenmesi için Fourier Transform Infrared (FTIR) Spektroskopisi, morfoloji ve yapısal görüntülerinin belirlenmesi için ise Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizi kullanılmıştır. Hazırlanan saf ve nanokompozit membranların yüzey ve kesit morfolojileri SEM analizi, hidrofilikliği temas açısı gonyometresi, içerdiği fonksiyonel gruplar FTIR analizi ve mekanik özellikleri nanoindentasyon analizi ile tespit edilmiştir.

Taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi (Scanning electron microscopy (SEM) analysis)

Saf ve oksitlenmiş MWCNT'lerin morfolojisi, saf ve nanokompozit membraların yüzey ve kesit görüntüleri doğrudan Field Emisyon Taramalı Elektron Mikroskopu (ZEISS, Ultraplus) ile gözlemlenmiştir. Membran yanal kesit analizinden önce, uygun boyuttaki membran kesiti önce propanol daha sonra sıvı azota daldırılarak düzgün bir şekilde kırılması sağlanarak analize hazır hale getirilmiştir. Membranların yüzey görüntülemesi için ise uygun kesitteki membran numuneleri karbon bantların üzerine yerleştirildikten sonra 2-3 nm kalınlığında altın ile kaplanmış ve analizi gerçekleştirilmiştir. Membran yüzey görüntüleri 50000, kesit görüntüleri ise 2000 kat büyütülerek gözlemlenmiştir (Demirel ve diğ., 2017).

Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizi (Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis)

s-MWCNT'ler ve o-MWCNT'lerdeki işlevselleştirilmiş grupların varlığı toplam refraksiyon tekniği ile FTIR analizi (ThermoFisher Scientific, Nicolet iS10) ile tespit edilmiştir. Ayrıca, saf ve nanokompozit membranlardaki fonksiyonel grupların varlığını belirlemek için FTIR analizi kullanılmıştır (Choi ve diğ., 2006).

Temas açısı analizi (Contact angle analysis)

Hazırlanan membranların statik su temas açıları, temas açısı gonyometresi (Attension, Theta) kullanılarak ölçülmüştür. Membran örnekleri, ölçümlerden önce 24 saat boyunca vakum altında etüvde kurutulmuştur. Membran yüzeyinin üç farklı kısmına saf su damlatılarak 10 saniyede temas açıları ölçülmüştür. Her üç ölçümün ortalama değerleri hesaplanarak rapor edilmiştir (Demirel ve diğ., 2017).

Termogravimetrik (TG) analiz (Thermogravimetric (TG) analysis)

Saf ve o-MWCNT içeren nanokompozit membranların ısı kararlılığı termogravimetrik analiz cihazı (Perkin Elmer, STA 6000) ile belirlenmiştir. Her bir membran örneği 30 mL/dk. azot gazı akışı altında, 20°C/dk. hızla 800°C'e kadar ısıtılarak yakılmıştır. Ölçümler, 6-10 mg numune kullanılarak gerçekleştirilmiş olup numunenin kütle kaybının sıcaklıkla değişimi kaydedilmiştir (Li ve diğ. 2009).

Nanoindentasyon analizi (Nanoindentation analysis)

Hazırlanan membranların mekanik özellikleri yüzey sertliği (H) açısından nanoindentasyon (Hysitron, TI 950) analizi ile belirlenmiştir. Nanoindentasyon testlerinde çentici ucu olarak elmas Berkovich uç kullanılmış olup testler 3x3 analiz matrisi ile 800 µN'luk maksimum kuvvet altında, 5s boyunca yükün lineer olarak arttığı, 2s boyunca yükün sabit kaldığı ve 5s'de yükün kademeli olarak kaldırıldığı trapezoidal bir yük fonksiyonu kullanılarak kuvvet kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarından yük yer değiştirme eğrisi oluşturulmuş olup eğriden yararlanılarak numunenin sertliği tespit edilmiştir (Mahdi ve diğ. 2016).

Gözeneklilik ve ortalama gözenek çapı tayini (Determination of porosity and mean pore diameter)

Saf suda tutulan membran numunesi yüzeyindeki fazla suyun alınmasının ardından tartılmıştır. Daha sonra, numunenin gözenekleri içindeki bütün su vakum altında kurutularak uzaklaştırılmıştır. Gözeneklilik, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon(\%) = \frac{W_t - W_k}{\pi \rho_s (r^2 l)} \times 100 \quad (3)$$

Eşitlikteki ε membran gözenekliliği (%), W_t ve W_k sırasıyla ıslak ve kuru membranların (g) kütleleri, ρ_s suyun oda sıcaklığındaki yoğunluğu (g/cm³), r membran numunesinin yarıçapı (cm), l ise kalınlığıdır (cm).

Hazırlanan membranların ortalama gözenek çapları aşağıdaki eşitlikle belirlenmiştir (Goh ve diğ., 2015):

$$a = \frac{\sqrt{(2,9 - 1,75 \times \varepsilon) \times (8 \mu l Q_s)}}{\varepsilon A \Delta P} \quad (4)$$

Eşitlikteki a ortalama gözenek çapı (m), ε membran gözenekliliği, μ oda sıcaklığında filtre edilen suyun viskozitesi, (Pa.s), l membranın kalınlığı (m), Q_s suyun akışı (m³/s), A membran filtrasyon yüzey alanı (m²), ΔP ise transmembran basıncıdır (Pa).

SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

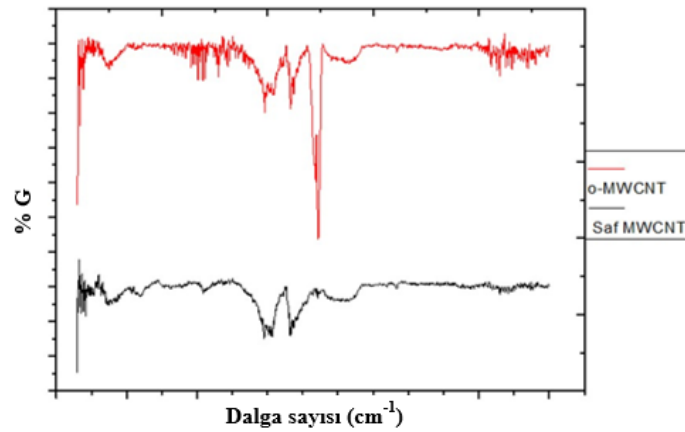
MWCNT'lerin Karakterizasyonu (Characterization of MWCNTs)

Saf karbon nanotüplerin hidrofobik bir yapıya sahip olduğu bilinmekte olup, asitle oksidasyon işlemi ile karbon nanotüplerin yüzeyi karboksil (-COOH) ve hidroksil (-OH) grubu ile modifiye edilerek kısmen hidrofilik bir yapıya sahip olması sağlanmıştır. Ayrıca yüzeydeki asidik gruplardan dolayı organik

çözücülerde daha iyi dağılması sağlamaktadır (Huang ve diğ., 2018). Saf karbon nanotüp yüzeyinin başarılı bir şekilde karboksil ve/veya hidroksil grubu ile kaplandığını belirlemek için FTIR ve SEM analizleri uygulanmıştır.

FTIR analizi (FTIR analysis)

Ticari saf MWCNT nanotanciklerinin asitle muamele edildikten sonra nanotüp yüzeylerine $-OH$ ve/veya $-COOH$ gruplarının bağlanıp bağlanmadığını tespit etmek amacıyla her iki malzeme FTIR spektroskopisi ile analiz edilerek içerdikleri fonksiyonel gruplar belirlenmiştir (Şekil 2).



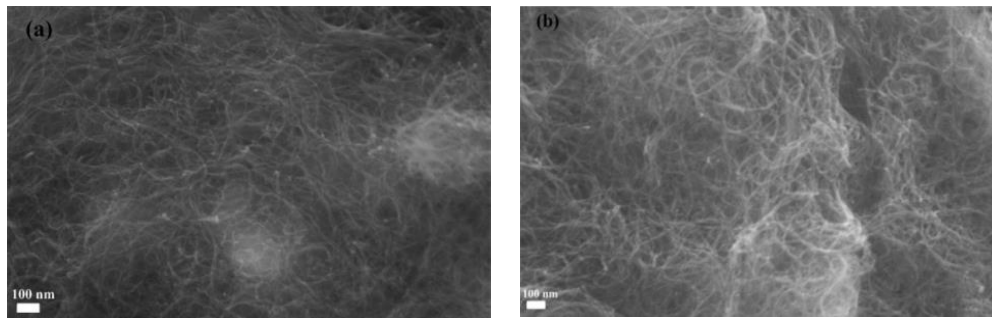
Şekil 2. Ham ve oksitlenmiş çok duvarlı karbon nanotüplerin FTIR spektrumları.

Figure 2. FTIR spectrum of raw and oxidized carbon nanotubes.

Asitle muamele edilerek oksitlenip işlevselleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (o-MWCNT)'e ait FTIR spektrumunda 1717 ve 3442 cm^{-1} 'de görülen absorpsiyon pikleri sırasıyla karboksil grubunda bulunan $C=O$ gerilme titreşimini ve hidroksil grubunu (O-H) ifade etmektedir (Choi ve diğ., 2006, Yin ve diğ., 2010, Vatanpour ve diğ., 2011). Oksitlenmemiş ham MWCNT'ler için bu belirgin karakteristik piklerin olmadığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar saf çok duvarlı karbon nanotüp yüzeyine $-COOH$ ve $-OH$ gruplarının bağlanarak oksitlenmiş MWCNT'ye dönüştürüldüğünü göstermektedir. s-MWCNT spektrumunda görülen $\sim 3440\text{ cm}^{-1}$ 'deki düşük yoğunluklu pikin, absorbe olup uzaklaştırılamamış suyun O-H gruplarının gerilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Feller ve diğ., 2011).

SEM analizi (SEM analysis)

Çok duvarlı karbon nanotüplerin asitle muamele işleminden önce ve sonraki morfolojisi SEM ile karakterize edilmiş olup görüntüleri Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. (a) s-MWCNT ve (b) o-MWCNT SEM görüntüsü.

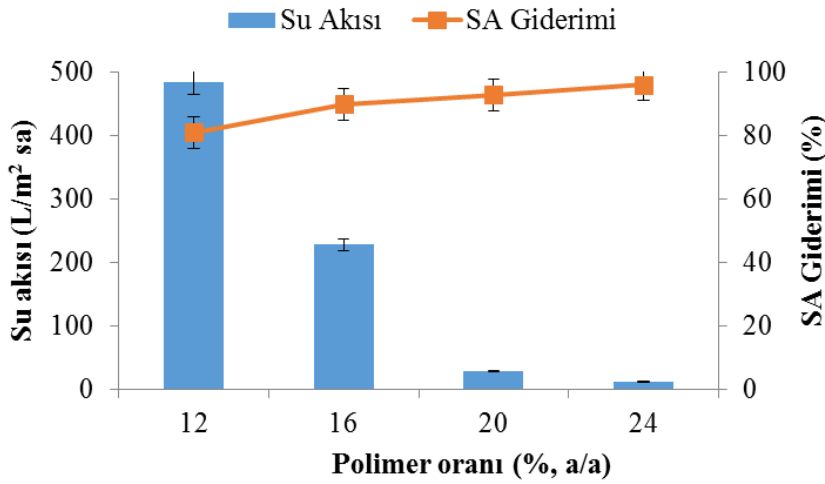
Figure 3. SEM images of (a) r-MWCNT and (b) MWCNT.

Oksitlenmiş çok duvarlı karbon nanotüplerin ham çok duvarlı karbon nanotüplere kıyasla daha belirgin uçlara ve daha büyük ara boşluklara sahip olduğu görülmektedir. Asit ile işleminden geçirildikten sonra tüp duvarları boyunca çapta belirgin bir değişiklik ve yüzey pürüzlülüğü meydana gelmiştir. Asitle muamele edilen s-MWCNT'lerin yüzeylerinin, ince bir malzeme tabakası ile muntazam bir şekilde çevrelenerek daha kalın hale geldiği gözlenmiştir (Şekil 3)(Qiu ve diğ., 2009).

Membran Filtrasyon Performansı (Filtration Performance)

PVP/PVC/çözücü oranının belirlenmesi (Determination of PVP/PVC/solvent ratio)

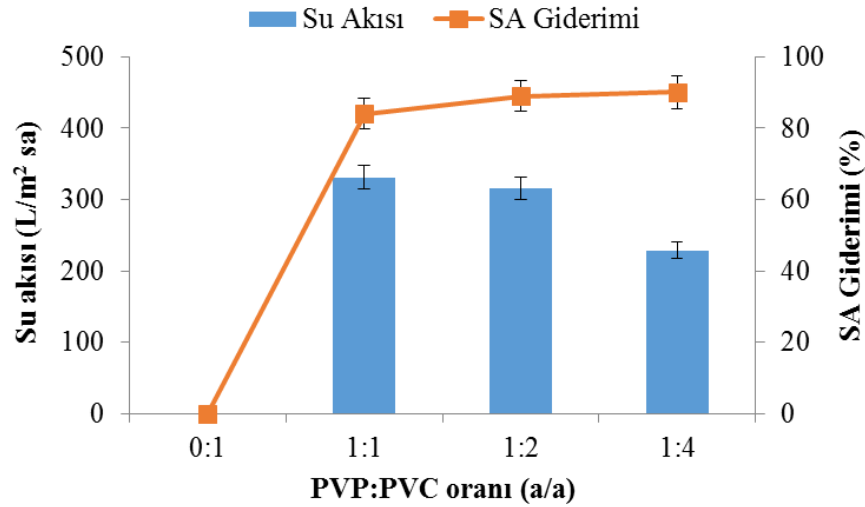
Membran döküm çözeltisinde en uygun PVP/PVC/NMP oranını belirlemek üzere en yüksek saf su akısı ve sodyum aljinat giderimini veren membran reçetesi nanokompozit membran hazırlanmasında kullanılmıştır. Bu amaçla literatür taramasına bağlı olarak öncelikle PVP:PVC oranı sabit tutulup (1:4, a/a) polimer oranı (%12-24, a/a) değiştirilmiştir. Uygun polimer oranı belirlendikten sonra PVP/PVC oranı (0:1-1:4, a/a) değiştirilerek farklı kompozisyonlarda membranlar hazırlanmış ve en yüksek saf su akısı ve SA giderimini veren membran reçetesi tespit edilmiştir. Döküm çözeltisindeki polimer oranının saf su akısı ve sodyum aljinat giderimine etkisi Şekil 5'de verilmektedir.



Şekil 4. Polimer oranının membran saf su akısı ve SA giderimine etkisi (PVP:PVC oranı:1:4, a/a).

Figure 4. Effect of PVC ratio on pure water flux and SA rejection (PVP:PVC ratio: 1; by weight).

Şekil 4'de görüldüğü gibi, en yüksek saf su akısı (484,8 L/m²sa) %12 polimer oranına sahip membran için elde edilmiştir. Ancak, %12 polimer oranı ile hazırlanan membran en düşük sodyum aljinat giderimine (%81) sahiptir. PVC oranındaki artış ile birlikte saf su akısında azalma gözlenirken, sodyum aljinat giderimi kayda değer bir miktarda artış göstermektedir. Polimer oranı %16'yı geçtiğinde, saf su akısında hızlı bir düşüş gözlenmektedir. Bunun nedeni yüksek polimer konsantrasyonunun membran gözenekliliğinin oluşmasına engel olmasıdır (Mulder, 1991). Membran performansında, saf su akısı ve madde giderimi eş değer bir öneme sahip olduğundan iki değer belirlenirken dengede tutulması gerekir. Akı ve madde gideriminin belirli bir dengede olduğu değerin %16 polimer oranı olduğu sonucuna varılmış olup bu değerler sırasıyla, 228,5 L/m²sa ve %90 olarak tespit edilmiştir. Döküm çözeltisindeki PVP:PVC oranının saf su akısı ve sodyum aljinat giderimine etkisi Şekil 5'de verilmektedir.



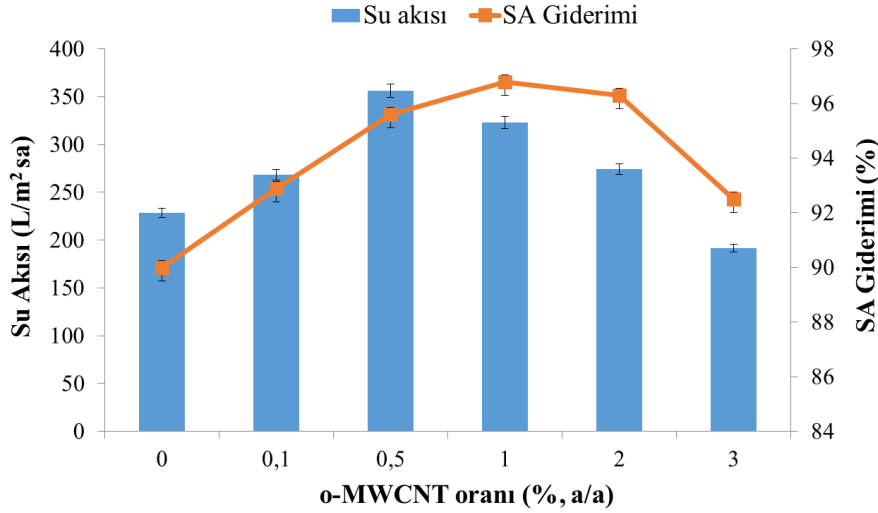
Şekil 5. PVP:PVC oranının membran saf su akısı ve SA giderimine etkisi (Polimer oranı: %16).

Figure 5. Effect of PVP:PVC ratio on pure water flux and SA rejection (PVC ratio: 16%).

Şekil 5’de görüldüğü gibi, PVP:PVC oranı 0:1 olduğunda, membranda saf su akısının neredeyse olmadığı görülmektedir; bundan dolayı bu koşulda SA giderimi ölçülememiştir. PVP, membran üretiminde gözenek oluşumunu sağlayan bir polimer olup döküm çözeltisindeki PVP miktarının artırılması, membranın daha gözenekli bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Buna bağlı olarak saf su akısında artış sağlanmıştır ve en yüksek saf su akısı (300 L/m²sa) 1:1 PVP:PVC oranında gözlenmiştir. PVP, koagülasyon banyosunda çözücünün su ile kütle transferini hızlandırarak gözenekliliğin artırılması için katkı maddesi olarak kullanılan bir hidrofilik polimerdir ve bu da PVC’nin geçirgenliğinin artışına neden olmaktadır (Mahendran ve diğ., 2004). Fakat, PVP oranındaki artış kirlilik gideriminde azalmaya neden olmuştur. Ayrıca, PVP oranı kritik bir değerin üzerine çıktığı zaman, membranın mekanik dayanımının keskin bir şekilde azalacağı bilinmektedir; bu durum, belirli bir süre yüksek basınca maruz bırakılan membranın uzun süreli stabilite performansını olumsuz olarak etkileyecektir (Aani ve diğ., 2017). En uygun PVP:PVC oranının 1:4 olduğu sonucuna varılarak bu koşullarda elde edilen saf su akısı ve SA giderimi sırasıyla 228,5 L/m²sa ve %90 olarak tespit edilmiştir.

Saf ve nanokompozit membranların filtrasyon performansları (Filtration performance of pure and nanocomposite membranes)

Membran matrisine ilave edilen o-MWCNT’lerin membran filtrasyon performansına etkisini belirlemek için, hazırlanan saf ve o-MWCNT katkılı nanokompozit membranların saf su akıları ve SA giderimleri belirlenmiş olup sonuçlar Şekil 6’da verilmektedir.



Şekil 6. o-MWCNT oranının membran saf su akısı ve SA giderimine etkisi.

Figure 6. Effect o-MWCNT loading on membrane pure water flux and SA rejection.

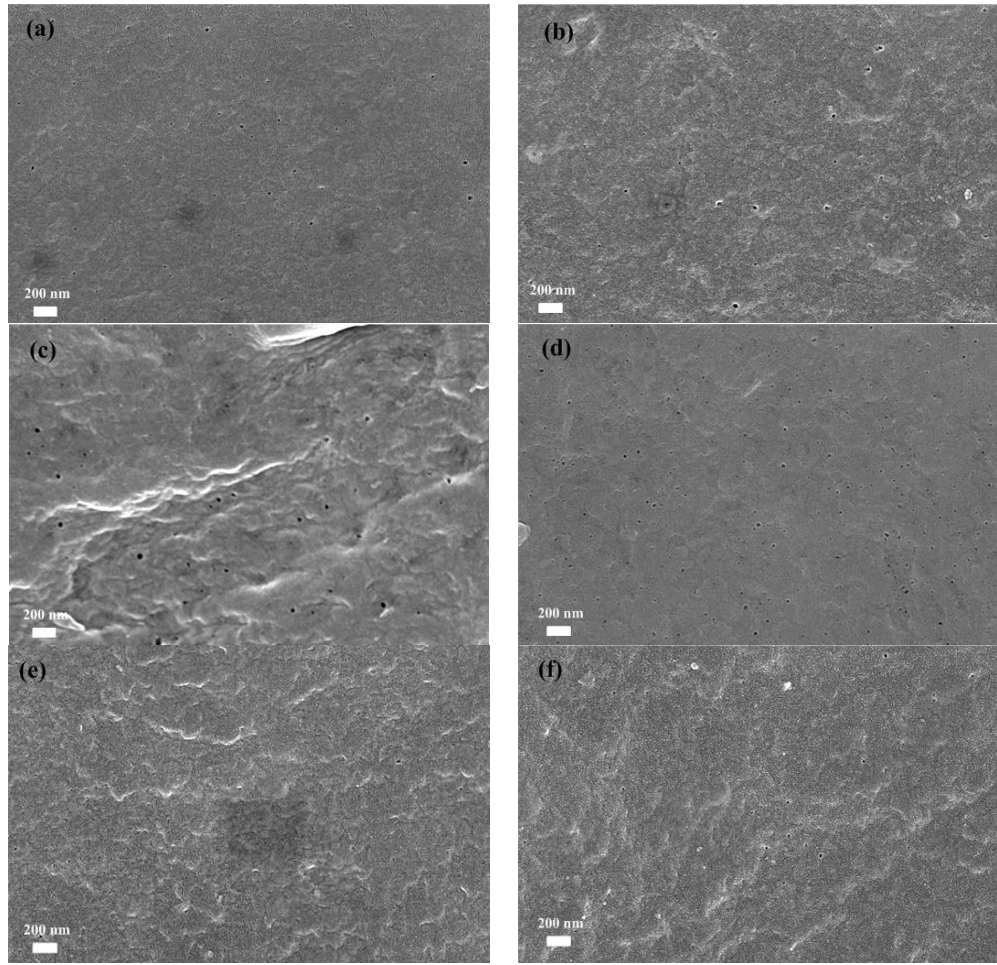
Şekil 6'da görüldüğü gibi, saf PVC membranın saf su akısı, membran matrisine %0,1 o-MWCNT eklenmesiyle 228,5 L/m²·sa'den 268,2 L/m²·sa'e yükselmiştir. En yüksek saf su akısı değeri (356,1 L/m²·sa), %0,5 o-MWCNT'lerin eklenmesiyle gözlenmiş olup artan akı genellikle yüzey gözenek boyutlarının artışına ve hidrofilik dolgu nanotaneceklerin varlığına bağlı olarak polimer matrisinin hidrofilikliğinin iyileşmeden kaynaklanmaktadır (Qiu ve diğ., 2009). Bununla birlikte, döküm çözeltisinin viskozitesindeki artışa bağlı olarak %0,5 o-MWCNT oranından sonraki oranlarda saf su akısında azalma gözlenmektedir. Bu durumun nedeni, topaklaşma eğilimi gösteren karbon nanotüplerin gözenekleri tıkayarak gözenekliliği azaltmasına bağlıdır (Choi ve diğ., 2006). Ayrıca, nanokompozit membranların SA gideriminin saf PVC membranına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise yüzeyde ve modifiye membranların enine kesiti içinde yer alan o-MWCNT ilavesiyle ortaya çıkan hidrofilik etki ile açıklanmaktadır (Demirel ve diğ., 2017). Benzer sonuçlar PVDF ve PVC polimer karışımı esaslı polimerik membranlara MWCNT taneciklerinin ilave edildiği bir çalışmada rapor edilmiştir. Membran döküm çözeltisine %0,5 (a/a) nanotüp ilavesiyle akının yaklaşık %50 oranında arttığı, yükeme miktarı %0,5'i aştığında (%0,7 ve %1) ise akıda önemli ölçüde bir azalma meydana geldiği belirtilmiştir. Bu durum belirli bir yükleme oranına kadar hidrofiliklik ve gözenek boyutunun artması daha sonra azalması ile açıklanmıştır (Norouzi ve diğ. 2016). Saf PVC membranın kirlilik giderimi %90 iken, %0,1 o-MWCNT'lerin eklenmesiyle bu değer %92,9'a çıkmış ve %1,0 o-MWCNT'lerin ilavesi durumunda ise en yüksek değerine (%96,8) ulaşmıştır. %0,5 o-MWCNT'lerin SA giderimi ise %95,6 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, polimer matrisine o-MWCNT'lerin %2'nin üzerinde eklenmesi sonucunda nanotüplerin etkisiz dağılımına bağlı olarak kirlilik giderimi değerlerinde azalma eğilimi gözlenmektedir.

Membranların Karakterizasyonu (Characterization of Membranes)

Hazırlanan saf PVC ve PVC/o-MWCNT membranların yüzey ve kesit morfolojileri SEM analizi, hidrofilikliği temas açısı ganyometresi, içerdiği fonksiyonel gruplar FTIR analizi, ısıl kararlılığı termogravimetrik analiz, mekanik dayanımı nanoindentasyon ile, gözenekliliği ve ortalama gözenek boyutu ise çeşitli deneysel yöntemlerle belirlenmiştir.

SEM analizi (SEM analysis)

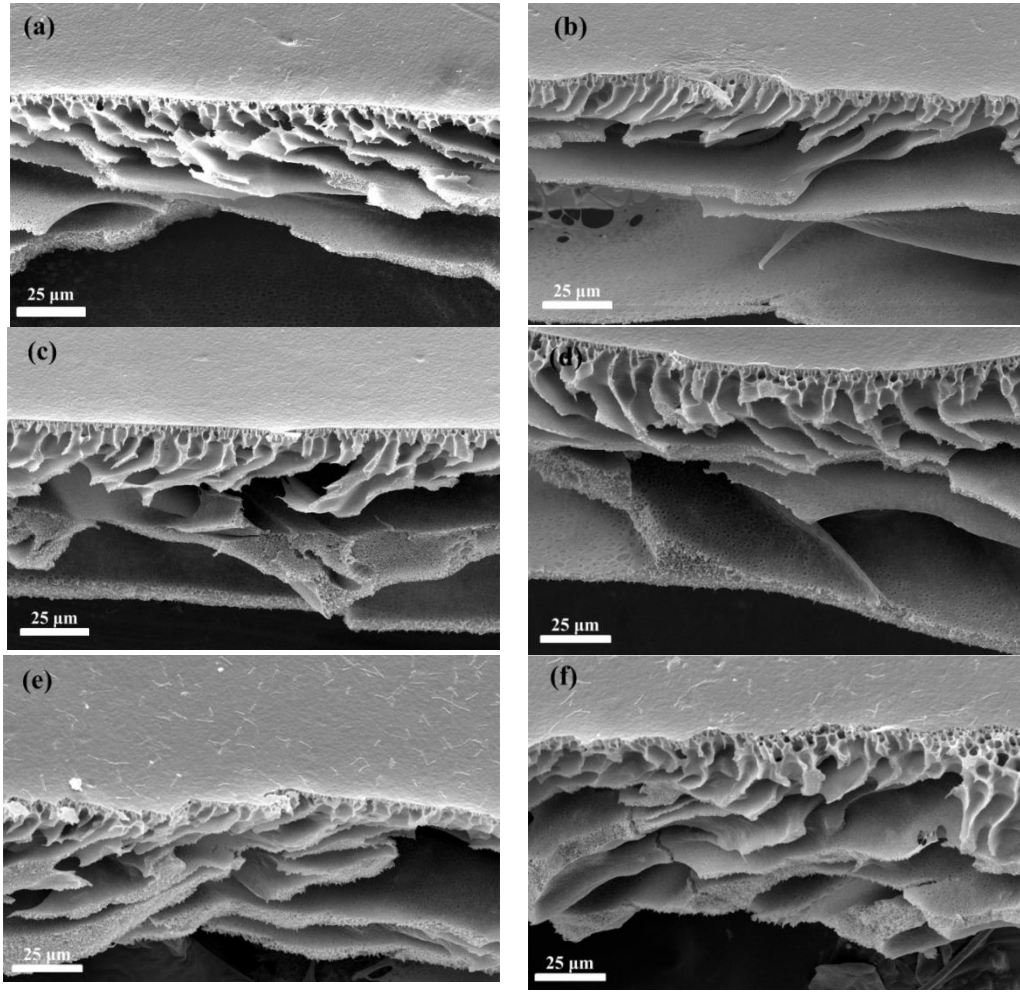
Membran matrisine o-MWCNT nanotaneceklerinin membranın morfolojik yapısına etkisini belirlemek için saf ve nanokompozit membranların yüzey görüntüleri ve yanal kesit görüntüleri SEM analizi ile tespit edilmiş olup görüntüler sırasıyla Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.



Şekil 7. Hazırlanan saf ve nanokompozit membranların SEM yüzey görüntüleri (a) saf PVC, (b) PVC/0,1o-MWCNT, (c) PVC/0,5o-MWCNT, (d) PVC/1,0o-MWCNT, (e) PVC/2,0o-MWCNT, (f) PVC/3,0o-MWCNT.

Figure 7. SEM surface images of (a) pristine PVC, (b) PVC/0.1o-MWCNT, (c) PVC/0.5o-MWCNT, (d) PVC/1.0o-MWCNT, (e) PVC/2.0o-MWCNT, (f) PVC/3.0o-MWCNT nanocomposite membranes.

Şekil 7’de görüldüğü gibi, membran yüzey gözenek boyutu membran döküm çözeltisine %0,5 o-MWCNT nanotaneceği ilavesine kadar (Şekil 7c) artmış olup, bu orandan sonra azalma eğilimi göstermiştir. Özellikle %2 ve %3 oranında o-MWCNT nanotaneceğine sahip membranlarda gözenek boyutu kayda değer bir şekilde azalmakta, bu durum nanotaneceklerin aralarındaki güçlü Van der Waals çekiminden dolayı topaklanma eğilimi göstermesinden kaynaklanmaktadır (Vatanpour ve diğ., 2011). Elde edilen görüntüler membranların saf su akışı (Şekil 6) ve ortalama gözenek çapı değerleriyle (Çizelge 3) uyumludur.



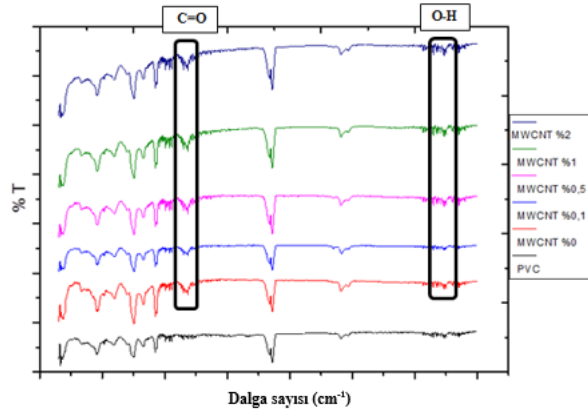
Şekil 8. Hazırlanan saf ve nanokompozit membranların SEM kesit görüntüleri (a) saf PVC, (b) PVC/0,1o-MWCNT, (c) PVC/0,5o-MWCNT, (d) PVC/1,0o-MWCNT, (e) PVC/2,0o-MWCNT, (f) PVC/3,0o-MWCNT.

Figure 8. SEM cross-section images of (a) pristine PVC, (b) PVC/0.1o-MWCNT, (c) PVC/0.5o-MWCNT, (d) PVC/1.0o-MWCNT, (e) PVC/2.0o-MWCNT, (f) PVC/3.0o-MWCNT nanocomposite membranes.

Asimetrik yapıya sahip olan saf PVC membranın kalın ve yoğun bir aktif üst yüzeye ve makro boşluklu bir destek tabakasına sahip olduğu görülmektedir (Şekil 8a). Membran matrisine o-MWCNT nanotaniciklerinin ilavesiyle hem ince aktif yüzeyde hem de alt tabakada kayda değer bir değişim olduğu gözlenmektedir. Aktif yüzey ve destek tabakasının gözenekliliği artmakla birlikte, alt tabakada büyük makro yapıların oluştuğu, parmaklı yapıların aralarındaki bağlantının da iyileşmesi ile birlikte kesit boyunca daha düzgün yerleştiği gözlenmektedir (Şekil 8b, c, d). Bu durum hidrofilik yapıdaki o-MWCNT nanotaniciklerinin varlığından kaynaklanan faz dönüşümü sırasındaki çözücü ve suyun hızlı difüzyonu ve yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır (Han ve Nam, 2002; Vatanpour ve diğ., 2011). Ancak membran matrisine %0,5' den fazla o-MWCNT nanotaniciklerinin eklenmesiyle parmaklı ve makro boşluklu yapının şekil değiştirdiği, gözenekliliğin azalarak (özellikle %2 ve 3 oranında o-MWCNT ilavesi ile) aktif tabaka ve destek tabakası arasındaki bağlantının bozulduğu görülmektedir (Şekil 8e, f). Bu durum çözeltilerin viskozitesindeki kritik artıştan dolayı faz dönüşümü sırasında çözücü ve suyun yer değiştirme sürecini geciktirmesinden kaynaklanmaktadır (Wu ve diğ., 2010).

FTIR analizi (FTIR analysis)

Saf ve nanokompozit membranların FTIR spektrumları Şekil 9'da, pik frekansları ve adlandırmaları ise Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 9. Saf PVC ve PVC/o-MWCNT nanokompozit membranların FTIR spektrumu.

Figure 9. FTIR spectrum of pristine PVC and PVC/o-MWCNT nanocomposite membranes.

Çizelge 2. FTIR spektrumundaki pik frekansları ve adlandırmaları.

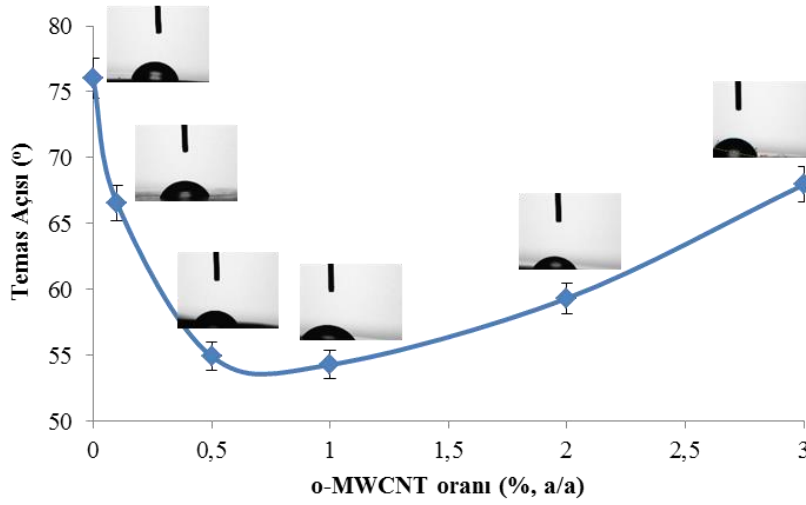
Table 2. Peak frequencies and nomenclature of FTIR spectrum.

Pik (cm ⁻¹)	Adlandırma
3422,2	-OH gerilme titreşimi
2910,7-2947,4	CH gerilme titreşimi
1717,3	Karboksilik asit gruplarındaki C=O gerilme titreşimi
1635,7-1684,1	C=O bağlarının C=C bağlarıyla konjugasyonu veya C=C bağları ve karboksilik asitler arasındaki etkileşim
1253,3-1254,2	C-O-C simetrik gerilme titreşimi

Şekil 9'daki FTIR spektrumunda saf PVC polimeri için 2911 cm⁻¹'deki pik CHCl'den gelen C-H, 1425 cm⁻¹'deki pik CH₂, 1092 cm⁻¹'deki pik C-C, 956 cm⁻¹'deki pik CH₂, 681 cm⁻¹'deki pik ise C-Cl titreşim bantlarını göstermektedir (Han ve Nam, 2002). Spektrumda saf ve nanokompozit membranların karakteristik pik zirvelerinin hafifçe yer değiştirdiği görülmektedir. Nanokompozit membranlara ait 3420 cm⁻¹'deki absorpsiyon piki oksitlenmiş karbon nanotüplerin yapısında bulunan hidroksil grubundan (O-H) kaynaklanan gerilme bandında olduğu bilinmektedir. 2910 cm⁻¹'deki titreşim bandı ise, CH₂'nin C-H asimetric gerilmesine karşılık gelmektedir (Dong ve diğ., 1997). Oksitlenen MWCNT'ler ile saf PVC polimerinin harmanlanması sonucunda elde edilen nanokompozit membranların molekül içi ve moleküller arası etkileşimleri ile saf membrana kıyasla (C=O) karbonil grubunu ifade eden pikin (1710 cm⁻¹) daha yüksek değerlere kaydığı gözlenmiştir (Zheng ve diğ., 1999).

Temas açısı analizi (Contact angle analysis)

Hazırlanan membranların hidrofilikliğini tespit etmek amacıyla statik su temas açıları belirlenmiş olup sonuçlar Şekil 10'da verilmektedir.



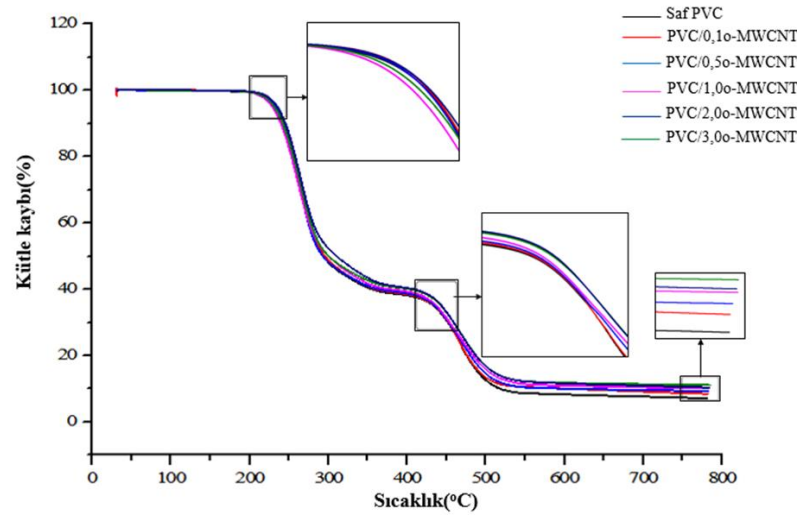
Şekil 10. Saf PVC ve PVC/o-MWCNT nanokompozit membranların temas açıları.

Figure 10. Contact angle of pristine PVC and PVC/o-MWCNT nanocomposite membranes.

Yüzey hidrofiliği, membranın akı ve kirlenme eğilimini doğrudan etkilediğinden oldukça önemli bir parametredir. Hidrofobik bir polimer olan PVC bazlı membran matrisine hidrofilik o-MWCNT'lerin ilave edilmesiyle membranın hidrofilik bir yapıya sahip olması, dolayısıyla temas açısının azalması beklenmektedir (Hasan ve Lee, 2014; Bhran ve diğ., 2018). Şekil 10'da, saf PVC membranının en yüksek temas açısı değerine (76°) sahip olduğu, o-MWCNT'lerin membran matrisine ilavesi ile temas açısının azaldığı görülmektedir. o-MWCNT'lerin %1 oranına kadar ilave edilmesiyle hazırlanan membranların temas açılarında %28'lik bir düşüş meydana gelmiştir. Karboksilik asit grubuyla fonksiyonelleştirilmiş o-MWCNT'lerin eklenmesiyle görülen hidrofiliklikteki artış, nanokompozit membranların su geçirgenliğinde önemli bir rol oynamaktadır (Bhavsar ve Tripathi, 2017). PVC/0,5o-MWCNT ve PVC/1,0o-MWCNT membranların, en düşük temas açılarına (sırasıyla 54,9° ve 54,3°) sahip olduğu ve bu değerlerin saf su akı verileriyle uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 8). Bunun yanı sıra, membran matrisine %1'den fazla o-MWCNT ilavesi ile (%2 ve %3) döküm çözeltisinin viskozitesindeki artış ve nanotüplerin topaklanması sonucunda aktif yüzey alanının azalması nedeniyle temas açısı değerleri (PVC/2,0o-MWCNT membranının temas açısı 59,3°) artma eğilimi göstermektedir (Demirel ve diğ., 2017).

TG analizi (TG analysis)

Saf ve nanokompozit membranların ısı kararlılığı termogravimetrik analiz ile belirlenmiş olup saf ve nanokompozit membranların sıcaklığa bağlı olarak kütledeki değişim (%) Şekil 11'de verilmektedir.



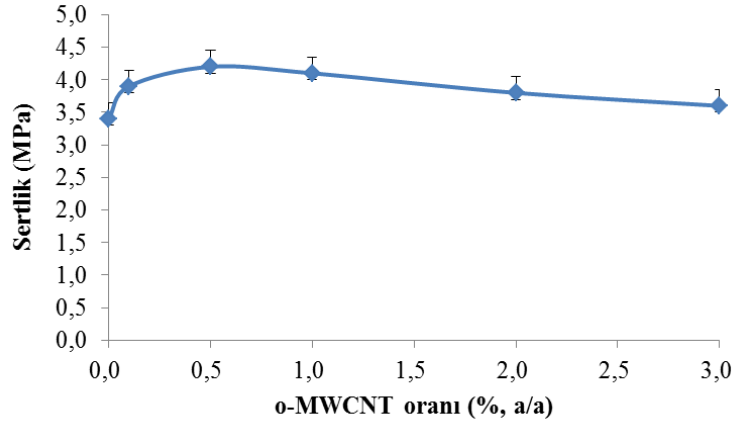
Şekil 11. Saf PVC ve PVC/o-MWCNT nanokompozit membranların termogramları.

Figure 11. Termograms of pristine and PVC/o-MWCNT nanocomposite membranes.

Şekil 11’de görüldüğü gibi, hazırlanan bütün membranlar için iki ısıl ayrışma bölgesi bulunmaktadır. Saf PVC membranın ilk bozunma sıcaklığı 200°C’de civarında meydana gelmiş olup HCl molekülünün zincirden ayrılmasından (dehidroklorinasyon) kaynaklanmaktadır (Roy ve diğ., 2017). İkinci ısıl ayrışma bölgesi ise 400°C civarında olup polimer zincirinin tamamen bozunup kömürleşmesinden kaynaklanmaktadır (Singh ve diğ., 2015, Roy ve diğ., 2017). Nanokompozit membranlarda bu sıcaklık değerleri o-MWCNT’lerin miktarına bağlı olarak artış göstermiş olup %3 oranında o-MWCNT içeren nanokompozit membranda ilk ayrışma sıcaklığı 250°C’de en yüksek değere ulaşmıştır. Bu sonuçlar, çok duvarlı karbon nanotüplerin PVC polimeri ile uyum içinde olduğunu ve nanotüplerin işlevselleştirilmesi ile polimer matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağılmasıyla PVC polimer zincirinin sertliğini artırarak zincirin kırılması için gerekli olan enerji miktarını yükselttiğini göstermektedir (Li ve diğ., 2009). Yüksek mekanik ve ısıl dirençleri sayesinde o-MWCNT’ler ultrafiltrasyon membranların ısı toleransını arttırmaktadır. Bu nedenle, o-MWCNT’lerin konsantrasyonu arttıkça daha yüksek sıcaklıklarda ısıl bozunma meydana geldiğinden o-MWCNT’lerin membran matrisine ilavesi saf PVC membranın ısıl kararlılığını arttırdığı sonucuna varılmaktadır (Shah ve Murthy, 2013).

Nanoindentasyon analizi (Nanoindentation analysis)

Hazırlanan membranların gerilmeye maruz bırakıldıklarındaki davranışları hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla nanoindentasyon analizi ile sertlik değerleri belirlenmiş olup sonuçlar Şekil 12’de verilmektedir.



Şekil 12. Saf PVC ve PVC/o-MWCNT nanokompozit membranların sertlik değerleri.

Figure 12. Hardness values of pristine PVC and PVC/o-MWCNT nanocomposite membranes.

Membranların sertlik değerleri uygulanan basınç altında deformasyona karşı gösterdikleri direncin ölçüsü hakkında bilgi vermekte olup en yüksek sertlik değerine sahip membranın direncinin yüksek olduğu ve yüksek transmembran basıncında daha uzun ömürlü olacağı sonucuna varılabilmektedir. Saf PVC membranın sertlik değeri 3,4 MPa olarak ölçülmüş olup membran çözeltisine o-MWCNT ilavesiyle bu değer 3,9 MPa (PVC/0,1o-MWCNT membran için) olduğu, en yüksek değere ise %23,5 artışla membran matrisine %0,5 o-MWCNT ilave edilmesiyle (4,2 MPa) ulaşıldığı görülmektedir (Şekil 12). Bu sonuç, PVC matrisinde homojen dağılan o-MWCNT nanotaneçiklerinin polimere sıkı bir şekilde bağlandığını ve yüzey sertliğini arttırdığını göstermektedir. Ancak, membran matrisine %0,5'in üzerinde o-MWCNT ilavesinin membranın sertliğini azalttığı görülmektedir. Bu durum membran döküm çözeltisinin viskozitesindeki keskin artıştan dolayı PVC ve o-MWCNT nanotaneçikleri arasındaki etkileşimi zayıflatarak membran matrisinde zayıf noktalar oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Misra ve diğ., 2007; Lee ve diğ., 2014; Mahdi ve diğ., 2016). Literatürde yapılmış olan bir çalışmada PVDF esaslı membran matrisine farklı yükleme oranlarında (%0,2-2, a/a) MWCNT ilavesiyle hazırlanan membranların gerilme dayanımı %0,2 nanotüp ilavesine kadar artış göstermiş olup nanotüp oranı arttıkça azalmıştır. Bu durum düşük nanotüp yükleme oranlarında polimer-nanotüp etkileşiminin güçlü olması, nanotüp oranı arttıkça meydana gelen topaklaşma nedeniyle bu etkileşimin zayıflayıp polimer-nanotüp ara yüzünde zayıf noktalar oluşması ile açıklanmıştır (Ma ve diğ., 2013).

Gözeneklilik ve ortalama gözenek çapı (Porosity and mean pore diameter)

Membran matrisine ilave edilen o-MWCNT oranına bağlı olarak ölçülen membran gözenekliliği ve ortalama gözenek çapı Çizelge 3'de verilmektedir.

Çizelge 3. o-MWCNT oranına bağlı olarak membran gözenekliliği ve ortalama gözenek çapı.

Table 3. Porosity and mean pore diameter values of the fabricated membranes as a function of o-MWCNT loading.

o-MWCNT yükleme oranı (%)	Gözeneklilik (%)	Ortalama gözenek çapı (nm)
0	74,7±1,3	34,8±1,8
0,1	80,1±1,5	35,5±1,3
0,5	82,4±0,8	41,9±2,2
1,0	75,3±1,1	41,0±2,1
2,0	75,9±0,9	37,3±1,3
3,0	70,0±2,1	37,7±1,9

Çizelge 3’de görüldüğü gibi, saf PVC membranın gözenekliliği %74,7, ortalama gözenek çapı ise 34,8 nm olarak belirlenmiştir. Membran matrisine o-MWCNT ilavesi ile bu değerlerin arttığı, %0,5 o-MWCNT ilave edilmesi durumunda gözeneklilik ve ortalama gözenek çapının sırasıyla %82,4 ve 41,9 nm’ye ulaştığı görülmektedir. Döküm çözeltisine daha yüksek yükleme oranlarında ilave edilen o-MWCNT’lerle modifiye edilmiş membranların gözeneklilik ve ortalama gözenek çapı değerlerinde bir azalma olduğu görülmüştür (Demirel ve diğ., 2017). Bunun nedeninin, yüksek miktarlarda döküm çözeltine eklenen MWCNT’lerin aralarındaki güçlü Van der Waals etkileşiminden dolayı bir araya gelip topaklanma eğilimi göstererek membran yüzey ve kesitinde yer yer gözenekleri tıkamasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Zhu ve Wang, 2018). Benzer durum literatürde belirtilen polisülfon esaslı çok duvarlı karbon nanotüp katkı membranlarda da görülmüştür. Polisülfon membran matrisine %1,5 (a/a) MWCNT ilavesine kadar membran gözenekliliğinin ve gözenek çapının arttığı, bu miktarın üzerinde nanotüp ilavesi (%2 ve %4) ile ise artan viskozite ve azalan termodinamik kararlılık nedeniyle gözeneklilik ve gözenek çapında keskin bir düşüşün meydana geldiği belirtilmiştir (Choi ve diğ., 2006). Saf su akısı membranın gözeneklilik ve ortalama gözenek çapı ile doğru orantılı olup elde edilen sonuçların membranların saf su akısı ile uyumlu olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, PVC bazlı ultrafiltrasyon membranların saf su akısı ve madde giderimi gibi filtrasyon özelliklerinin yanı sıra ısı kararlılık ve mekanik dayanımlarının iyileştirilmesi amacıyla membrane matrisine çok duvarlı karbon nanotüp tanecikleri ilave edilmiş, membran döküm çözeltisine eklenen karbon nanotüp miktarı %0,1 ile %3 arasında değiştirilerek en uygun membran reçetesi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, membran döküm çözeltisine %0,5 (a/a) çok duvarlı karbon nanotüp eklenmesiyle saf membranların hidrofiliğinin arttığı görülmüştür. Membranların yüzey gözenek boyutu ve yapısal özelliklerinin değişmesi ile birlikte su geçirgenlik performansının %56 oranında arttığı, SA madde gideriminin kayda değer (SA giderimi %90’dan %96,8’e yükselmiş) bir ölçüde iyileştirildiği belirlenmiştir. Ayrıca, karbon nanotüplerin PVC matrisi içerisindeki iyi dağılımı ve güçlü etkileşimlerinden dolayı nanokompozit membranların mekanik dayanımlarının önemli ölçüde iyileştirildiği, uzun süre ve yüksek basınca maruz kalan membranların kullanım ömrünün arttırılarak membranların sık aralıklarla değiştirilmesinden kaynaklanan maliyetlerin azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyonu (Proje No: 1706F384) kapsamında gerçekleştirilmiş olup finansal desteklerinden dolayı BAP Komisyonuna teşekkür ederim. Ayrıca SEM analizlerinde yardımcı olan Dumlupınar Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç.Dr. M. Uğur Toprak’a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aani, S. A., Gomez, V., Wright, C. J., Hilal, N., 2017. “Fabrication of Antibacterial Mixed Matrix Nanocomposite Membranes Using Hybrid Nanostructure of Silver Coated Multi-Walled Carbon Nanotubes”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 326, pp. 721-736.
- Appenzeller, J., Martel, R., Derycke, V., Radosavljevic, M., Wind, S., Neumayer, D., 2002. “Carbon Nanotubes as Potential Building Blocks for Future Nanoelectronics”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 64, No. 1-4, pp. 391-397.
- Arthanareeswaran, G., Thanikaivelan, P., 2010. “Fabrication of Cellulose Acetate-Zirconia Hybrid Membrane for Ultrafiltration Applications: Performance, structure and fouling analysis”, *Separation and Purification Technology*, Vol. 74, No. 2, pp. 230-215.

- Bhavsar, V., Tripathi, D., 2017. "Structural, Optical and Aging Studies of Biocompatible PVC-PVP Blend Films", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 38, No. 5, pp. 467-475.
- Bhran, A., Shoaib, A., Elsade, D., El-Gendi, A., Abdallah, H., 2018. "Preparation of PVC/PVP Composite Polymer Membranes Via Phase Inversion Process for Water Treatment Purposes", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 715-722.
- Bottino, A., Capannelli, G., Comite, A., 2002. "Preparation and Characterization of Novel Porous PVDF-ZrO₂ Composite Membranes", *Desalination*, Vol. 146, No. 1-3, pp. 35-40.
- Celik, E., Park, H., Choi H., Choi, H., 2011. "Carbon Nanotube Blended Polyethersulfone Membranes for Fouling Control in Water Treatment", *Water Research*, Vol. 45, No. 1, pp. 274-82.
- Choi, J. H., Jegal, J., Kim, W. N., 2006. "Fabrication and Characterization of Multiwalled Carbon Nanotubes/Polymer Blend Membranes", *Journal of Membrane Science*, Vol. 284 No. 1-2, pp. 406-415.
- Demirel, E., Zhang, B., Papakyriakou, M., Xia, S., Chen, Y., 2017. "Fe₂O₃ Nanocomposite PVC Membrane with Enhanced Properties and Separation Performance", *Journal of Membrane Science*, Vol. 529, pp. 170-184.
- Dong, J., Fredericks, P. M., George, G. A., 1997. "Studies of the Structure and Thermal Degradation of Poly(vinyl chloride)-Poly(N-vinyl-2-pyrrolidone) Blends by using Raman and FTIR Emission Spectroscopy", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 58 No. 1-2, pp. 159-169.
- Dünya Su Konseyi Raporu (World Water Council (WWC) Report), Urban Urgency, Water Caucus Summary, Marseille, France, 2007.
- Dünya Su İyileştirme Raporu (World Water Development Report (WWDR)), Managing water under uncertainty and risk, <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002156/215644e.pdf> 2012, 2 Mayıs 2013.
- Eitan, A., Jiang, K., Dukes, D., Andrews, R., Schadler, L. S., 2003. "Surface Modification of Multiwalled Carbon Nanotubes: Toward the Tailoring of the Interface in Polymer Composites", *Chemistry of Materials*, Vol. 15, pp. 3198-3201.
- Feller, J. F., Lu, J., Zhang, K., Kumar, B., Castro, M., Gattaand N., Choi, H. J., 2011. "Novel Architecture of Carbon Nanotube Decorated Poly (Eethyl Methacrylate) Microbead Vapour Sensors Assembled by Spray Layer by Layer", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 21, No. 12, pp. 4142-4149.
- Gao, W., Liang, H., Ma, J., Han, M., Chen, Z., Han, Z-S., Li, G.B., 2011. "Membrane Fouling Control in Ultrafiltration Technology for Drinking Water Production: A Review", *Desalination*, Vol. 272, No. 1-3, pp. 1-8.
- Goh, P. S., Ismail, A., Ng, B., 2013. "Carbon Nanotubes For Desalination: Performance Evaluation and Current Hurdles", *Desalination*, Vol. 308, pp. 2-14.
- Goh P. S., Ng B. C., Lau W. J., Ismail, A. F., 2015. "Inorganic Nanomaterials in Polymeric Ultrafiltration Membranes for Water Treatment, *Separation and Purification Reviews*, Vo. 44, pp. 216-249.
- Han, M. J., Nam, S.T., 2002. "Thermodynamic and Rheological Variation in Polysulfone Solution by PVP and Its Effect in the Preparation of Phase Inversion Membrane, *Journal of Membrane Science*, Vol. 202, No. 1-2, pp. 55-61.
- Hasan, M., Lee, M., 2014. "Enhancement of the Thermo-mechanical Properties and Efficacy of Mixing Technique in the Preparation of Graphene/PVC Nanocomposites Compared to Carbon Nanotubes/PVC", *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 24, No. 6, pp. 579-587.
- Huang, Y., Jiao, W., Niu, Yue., Ding, G., Wang, R., 2018, "Improving the Mechanical Properties of Fe₃O₄/Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposites by a Low-Magnetic-Field Induced Alignment", *Journal of Polymer Engineerig*, Vol. 38, No. 8, pp. 731-738.
- Kang, S., Asatekin, A., Mayes A., Elimelech, M., 2007, "Protein Antifouling Mechanisms of PAN UF Membranes Incorporating PAN-g-PEO Additive", *Journal of Membrane Science*, Vol. 296, pp. 42-50.

- Kim, S. H., Kwak, S. Y., Sohn, B. H., Park, T. H., 2003. "Design of TiO₂ Nanoparticle Self Assembled Aromatic Polyamide Thin-Film Composite (TFC) Membrane as an Approach to Solve Biofouling Problem", *Journal of Membrane Science*, Vol. 211, No. 1, pp. 157-165.
- Kong, J., Franklin, N. R., Zhou, C. W., Chapline, M. G., Peng, S., Dai, H. J., 2000. "Nanotube Molecular Wires as Chemical Sensors", *Science*, Vol. 287, No. 5453, pp. 622-625.
- Lee, S., Choi, B. G., Choi, D., Park, H. S., 2014. "Nanoindentation of Annealed Naf Ion/Sulfonated Graphene Oxide Nanocomposite Membranes for the Measurement of Mechanical Properties", *Journal of Membrane Science*, Vol. 451, pp. 40-45.
- Li, J. F., Xu, Z. L., Yang, H., Yu, L. Y., Liu, M., 2009. "Effect of TiO₂ Nanoparticles on the Surface Morphology and Performance of Microporous PES Membrane", *Applied Surface Science*, Vol. 255, No. 9, 4725-4732.
- Liu, J., Rinzler, A. G., Dai, H., Hafner, J. H., Bradley, R. K., Boul, P. J., Lu, A., Iverson, T., Shelimov, K., Huffman, C. B., Macias, F. R., Shon, Y. S., Lee, T. R., Colbert, D. T., Smalley, R. E., 1998. "Fullerene Pipes", *Science*, Vol. 280, No. 5367, pp. 1253-1256.
- Liu, B., Chen, C., Li, T., Crittenden, J., Chen, Y., 2013, "High Performance Ultrafiltration Membrane Composed of PVDF Blended with Its Derivative Copolymer PVDF-g-PEGMA", *Journal of Membrane Science*, Vol. 445, pp. 66-75.
- Low, Z. X., Wang, Z., Leong, S., Razmjou, A., Dumeé, L. F., 2015. "Enhancement of the Antifouling Properties and Filtration Performance of Poly(ethersulfone) Ultrafiltration Membranes by Incorporation of Nanoporous Titania Nanoparticles", *Industrial Engineering Chemistry Research*, Vol. 54, No. 44, pp. 11188-11198.
- Lu, L. Y., Sun, H. L., Peng, F. B., Jiang, Z. Y., 2006. "Novel Graphite-Filled PVA/CS Hybrid Membrane for Pervaporation of Benzene/Cyclohexane Mixtures", *Journal of Membrane Science*, Vol. 281, No. 1-2, pp. 245-252.
- Ma, J., Zhao, Y., Xu, Z., Min, C., Zhou, B., Li, Y., Li, B., Niu, J., 2013, "Role of Oxygen-Containing Groups on MWCNTs in Enhanced Separation and Permeability Performance for PVDF Hybrid Ultrafiltration Membranes", *Desalination*, Vol. 320, pp. 1-9.
- Mahdi, E., Chaudhuri, A. K., Tan, J. C., 2016. "Capture and Immobilisation of Iodine (I₂) Utilising Polymer-Based ZIF-8 Nanocomposite Membranes", *Molecular Systems Design & Engineering*, No. 1, pp. 122-131.
- Mahendran, R., Malaisamy, R., Mohan, D., 2004. "Cellulose Acetate and Polyethersulfone Blend Ultrafiltration Membranes. Part I. Preparation and Characterizations", *Polymer for Advanced Technologies*, Vol. 15, No. 3, pp. 149-157.
- Majumder, M., Corry, B., 2011. "Anomalous Decline of Water Transport in Covalently Modified Carbon Nanotube Membranes", *Chemical Communications*, Vol. 47, No. 27, pp. 7683-7685.
- Merkel, T. C., Freeman, B. D., Spontak, R. J., He, Z., Pinnau, I., Meakin, P., Hill, A. J., 2002. "Ultrapervable, Reverse-Selective Nanocomposite Membranes", *Science*, Vol. 296, No. 5567, pp. 519-522.
- Misra, R., Fu, B. X., Morgan, S. E., 2007. "Surface Energetics, Dispersion, and Nanotribomechanical Behavior of POSS/PP Hybrid Nanocomposites", *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 45, No. 17, pp. 2441-2455.
- Mulder M., 1991, *Basic Principles of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Norouzi, M., Pakizeh, M., Namvar-Mahboub, M., 2016, "The Effect of Highly Dispersed Oxidized Multi-walled Carbon Nanotubes on the Performance of PVDF/PVC Ultrafiltration Membranes", *Desalination and Water Treatment*, Vol. 57, pp. 24778-24787.
- Qiu, S., Wu, L., Pan, X., Zhang, L., Chen, H., Gao, C., 2009. "Preparation and Properties of Functionalized Carbon Nanotube/PSF Blend Ultrafiltration Membranes", *Journal of Membrane Science*, Vol. 342, No. 1-2, pp. 165-172.

- Qu, L., Lin, Y., Hill, D. E., Zhou, B., Wang, W., Sun, X., Kitaygorodskiy, A., Suarez, M., Connell, J. W., Allard, L. F., Sun, Y. P., 2004. "Polyimide-Functionalized Carbon Nanotubes: Synthesis and Dispersion in Nanocomposite Films", *Macromolecules*, Vol. 37, No. 16, pp. 6055-6060.
- Rahimpour, A., Madaeni, S. S., Taheri, A. H., Mansourpanah, Y., 2008. "Coupling TiO₂ Nanoparticles with UV Irradiation for Modification of Polyethersulfone Ultrafiltration Membranes", *Journal of Membrane Science*, Vol. 313, No. 1-2, pp. 158-169.
- Rahimpour, A., Jahanshahi, M., Khalili, S., Mollahosseini, A., Zirepour, A., Rajaeian, B., 2011. "Novel Functionalized Carbon Nanotubes for Improving the Surface Properties and Performance of Polyethersulfone (PES) Membrane", *Desalination*, Vol. 286, pp. 99-107.
- Roy, K. J., Anjali, T. V., Sujith, A., 2017, "Asymmetric Membranes Based on Poly(vinylchloride): Effect of Molecular Weight of Additive and Solvent Power on the Morphology and Performance", *Journal of Materials Science*, Vol. 52, No. 10, pp. 5708-5725.
- Sakintuna, B. Yurum, Y., 2005. "Templated Porous Carbons: A Review Article", *Industrial Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, No. 9, pp. 2893-2902.
- Shah, P., Murthy, C. N., 2013. "Studies on the Porosity Control of MWCNT/Polysulfone Composite Membrane and Its Effect on Metal Removal", *Journal of Membrane Science*, Vol. 437, pp. 90-98.
- Singh, M., Mahto, S.K., Snehashish, D., Ranjan, A., Singh Kumar, S., Roy, P. Misra, N., 2015, "Chemical Modification of Poly(vinylchloride) for Blood and Cellular Biocompatibility", *RCS Advances*, Vol. 5, pp. 45231.
- Stone, V., Nowack, B., Baun, A., Van den Brink, N., Von der Kammer, F., Dusinska, M., Handy, R., Hankin, S., Hasselov, M., Joner, E., Fernandes. T. F., 2010. "Nanomaterials for Environmental Studies: Classification, Reference Material Issues, and Strategies for Physicochemical Characterisation", *Science of the Total Environment*, Vol. 408, No. 7, pp. 1745-1754.
- Taurozzi, J. S, Arul, H., Bosak, V. Z. Burban, A. F, Voice, T. C., Bruening, M.L., Tarabara, V. V., 2008. "Effect of Filler Incorporation Route on the Properties of Polysulfone-Silver Nanocomposite Membranes of Different Porosities", *Journal of Membrane Science*, Vol. 325, No. 1, pp. 58-68.
- Uragami, T., Okazaki, K., Matsugi, H., Miyata, T., 2002. "Structure and Permeation Characteristics of an Aqueous Ethanol Solution of Organic-Inorganic Hybrid Membranes Composed of Poly(vinyl alcohol) and Tetraethoxysilane", *Macromolecules*, Vol. 35, No. 24, pp. 9156-9163.
- Vatanpour, V., Madaeni, S., Moradian, R., Zinadini, S., Astinchap, B., 2011. "Fabrication and Characterization of Novel Antifouling Nanofiltration Membrane Prepared from Oxidized Multiwalled Carbon Nanotube/Polyethersulfone Nanocomposite", *Journal of Membrane Science*, Vol. 375, No. 1-2, pp. 284-294.
- Wu, H., Tang, B., Wu, P., 2010. "Novel Ultrafiltration Membranes Prepared from a Multi-Walled Carbon Nanotubes/Polymer Composite", *Journal of Membrane Science*, Vol. 362, No. 1-2, pp. 374-383.
- Wu, H., Mansouri, J., Chen, V., 2013. "Silica Nanoparticles as Carriers of Antifouling Ligands for PVDF Ultrafiltration Membrane", *Journal of Membrane Science*, Vol. 433, pp. 135-151.
- Yin, Z. H., Liu, X., Su, Z. X., 2010, "Novel Fabrication of Silica Nanotubes Using Multi-walled Carbon Nanotubes as Template", *Bulletin of Material Science*, Vol. 33, No. 4, pp. 351-355.
- Zheng, S., Guo, Q., Mi, Y., 1999. "Characterization of Blends of Poly(vinylchloride) and Poly(N-vinyl pyrrolidone) by FTIR and ¹³C CP/MAS NMR Spectroscopy", *Polymer Physics*, Vol. 37, No. 17, pp. 2412-2419.
- Zhu, K., Wang, G., 2018., "Fabrication of High-Performance Ultrafiltration Membranes using Zwitterionic Carbon Nanotubes and Polyethersulfone", *High Performance Polymers*, Vol. 30, No. 5, pp. 602-611.

MOODETECTR: MOOD DETECTION FOR TURKISH LYRICS THROUGH WORD VECTORS

¹Barış ÇİMEN , ²Ahmet Onur DURAHİM 

^{1,2} Bogazici University, Department of Management Information Systems, Istanbul, TURKEY

¹baris.cimen@boun.edu.tr, ²onur.durahim@boun.edu.tr

(Geliş/Received: 15.02.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.02.2020)

ABSTRACT: Along with the increasing use of online music platforms, catalogue-based searches have turned into mood-based seeking. In this study, we propose MooDetecTR, a semi-supervised learning framework that employs word vectors for Turkish song mood detection. In this framework, first word vectors are created through a large collection of textual data, which include more than 2.5 million Turkish documents, by using Word2Vec and GloVe algorithms. Subsequently, lyrics vectors are generated through combining already trained word vectors of the words in the lyrics selected for mood detection. Lastly, lyrics vectors are fed into various machine-learning algorithms as features to create models for music mood detection. For comparison, Turkish music mood detection is performed both via traditional bag-of-words model, with TF-IDF weights, and Doc2Vec algorithm. The effects of stemming of the words and stop-words removal on the results are investigated, as well. The best micro-f1 score (54.36%) obtained by the proposed framework is 3.81%, and 2.92% higher (7.54%, and 5.68% relative improvements) than the best score obtained from Doc2Vec and bag-of-words methods, respectively. Consequently, the results obtained show the effectiveness of incorporating word vectors generated using big textual data into Turkish text classification process, which is clearly illustrated by the improved classification performance.

Keywords: Text classification, Feature Generation, Music mood classification, Natural language processing, Word embeddings

MooDetecTR: Kelime Vektörleri Vasıtasıyla Türkçe Şarkı Sözleri için Ruh Hali Tespiti

ÖZ: Çevrimiçi müzik platformlarının kullanımının artmasıyla birlikte, katalog tabanlı aramalar, duygu bazlı aramalara dönüşmüştür. Bu çalışmada, Türkçe şarkıların duygu durum tespiti için kelime vektörlerini kullanan yarı denetimli bir öğrenme çerçevesi olan MooDetecTR önerilmiştir. Bu çerçevede, önce kelime vektörleri Word2Vec ve GloVe algoritmaları ile 2,5 milyondan fazla Türkçe belge içeren geniş bir metinsel veri koleksiyonu kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra, duygu durum tespiti için seçilen şarkı sözlerindeki kelimelerin, daha önceden eğitilmiş kelime vektörlerinin birleştirilmesiyle şarkı sözleri vektörleri üretilmiştir. Son olarak, oluşturulan bu şarkı sözleri vektörleri, müzik duygu durum tespitinde kullanılmak üzere çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak oluşturulan modelleri eğitmek için kullanılmıştır. Türkçe müziklerde duygu durumu tespiti karşılaştırma yapılmak üzere ayrıca, hem TF-IDF ağırlıkları kullanılarak geleneksel kelime çantası modeli ile hem de Doc2Vec algoritması kullanılarak oluşturulan modeller ile gerçekleştirilmiştir. Kelimelerin köklerine ayrıştırılması ve gereksiz kelimelerin kaldırılmasının sonuçlara etkileri de incelenmiştir. Önerilen çerçeve ile elde edilen en iyi mikro-f1 skoru (%54,36), Doc2Vec ve kelime çantası yöntemlerinden elde edilen en iyi skorlardan sırasıyla %3,81 ve %2,92 (%7,54 ve %5,68 nispi iyileştirmeler) daha başarılıdır. Sonuç olarak, elde edilen skorlar, Türkçe metin sınıflandırma uygulamasında büyük metinsel verilerin kullanılması ile oluşturulan kelime vektörlerinin olumlu etkisini artan sınıflandırma başarı performansı ile açıkça göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Metin sınıflandırması, Özellik üretimi, Müzik ruh hali sınıflandırma, Doğal dil işleme, Kelime vektörleri

1. INTRODUCTION

For ages, music has been an indispensable part of our lives. With the development of technology and the rise of Internet, digital music libraries have become easily-accessible. Now, we can enjoy music throughout our daily routine activities such as doing exercise, eating, working, and so on (Yang and Chen, 2012). On the other hand, traditional music management that uses catalogue-based information such as title, artist and genre, has become insufficient while the musical databases have grown at a fast pace. As a result, these expansive databases have revealed the necessity to adapt music information organization and retrieval in such a way to meet the demand for easy and effective information access (Casey *et al.*, 2008; Yang and Chen, 2012).

Music classification is a common task for music information retrieval (MIR) systems of digital music platforms such as Spotify and Last.fm, which have plenty of music catalogues. As an interdisciplinary field of study, MIR aims to expand the understanding and usage of musical data by doing research, and developing applications and tools based on the knowledge acquired from music, computer science, signal processing and cognition (Casey *et al.*, 2008). In order to perform music classification for MIR, the data extracted from songs are processed by using machine-learning techniques to categorize songs automatically. Then, the results obtained through this process may serve as an important tool to help music listeners find the information on any musical content and even find the music they may like but have not been exposed to yet. In this respect, various lyric and audio-based approaches are proposed and implemented in building music recommendation systems to music listeners (Song *et al.*, 2012). These recommendation systems usually rely upon music information retrievals algorithms, especially music classification methods. Music information behavior studies consider emotion as an important criterion in music research and organization (Casey *et al.*, 2008; Yang and Chen, 2012). As indicated by a study of social tagging on Last.fm, emotion or mood tags are the third most common tags after type and local tags annotated to music pieces by online users (Lamere, 2008).

With a wealth of semantic information, lyrics can affect and even alter people's perception of music (Ali and Peynircioğlu, 2006). There has been a substantial amount of research carried out where mood classification of songs is accomplished by considering only the lyrics. Hu *et al.* (2009) applied the bag-of-words (BoW) model in combination with stemming and TF-IDF weighting to generate lyrics features. Then, the features were linked together with a set of spectral features for mood classification with Support Vector Machines (SVM). BoW approach was also utilized in Fell and Sporleder (2014), where n-gram features are used for building mood classification models. Su and Xue (2017), on the other hand, extracted lyric-based features through a method named "bag of sentence".

Thanks to the latest developments in representational learning for natural language processing, new ways for feature learning of discrete objects such as words have begun to gain more importance. Lately, Mikolov *et al.* (2013) have introduced Word2Vec model for learning word representations with greater training efficiency than the previously proposed models.

In a subsequent study, Pennington *et al.* (2014) proposed the GloVe model to obtain word vectors, also named as word embeddings, where it was stated that the Word2vec model suffers from ignoring the global word co-occurrence statistics of a given corpus, and it only investigated the context windows of the words across the entire corpus (Mikolov, Sutskever, *et al.*, 2013; Pennington *et al.*, 2014). GloVe model addresses this problem by considering the global statistics of word co-occurrences in a given corpus in addition to the statistics of local context windows.

The main focus of this study is to utilize word vectors in order to improve the mood classification performance based on lyrics only. Here, our purpose is to incorporate huge amounts of textual data gathered over the internet into a lyrics-based mood classification task. To do so, we first crawled Turkish Wikipedia and news articles together with song lyrics, and used these data to build word vectors. These word vectors are then used to generate document features (vectors for each song lyric) that would be

employed to classify song lyrics to their respective moods. In that respect, we utilized two widely used Word2Vec and GloVe models to create word vectors in a fully unsupervised manner.

Main contributions of this study and our major findings can be summarized as follows;

- Enhancing automatic mood detection of Turkish songs via incorporating word vectors through the collection of huge amounts of textual data.
- Comparison of the performances of Word2Vec, GloVe and Doc2Vec algorithms in music mood classification.
- Analyzing the effects of stemming and stop-words removal for generating word vectors to music mood classification performance.

To our knowledge, this study is the most extensive analysis of the Turkish text classification, in particular for music mood detection, which utilizes more than 2.5 million Turkish documents.

2. RELATED WORK

As the amount of musical content continues to explode, the development of novel algorithms and tools for easy and effective music retrieval becomes inevitable. In this section, related works accomplished in this respect are summarized.

2.1. Music Mood Categorization

Yang and Chen (2012) state that emotion-based music organization and retrieval is a logical way to access music data, for almost every piece of music expresses emotion. One of the earliest studies on the categorization of music moods was performed by Russell (1980), who proposed the circumplex model of affect based on the two-dimensional model where the dimensions were “positive/negative valence” and “high/low arousal”. Song *et al.* (2012) have adopted a subset of Russell’s taxonomy and used happy, sad, angry, and relaxed as mood taxonomy.

Hu and Downie (2010) presented a study that compared selected lyrics features and audio features to find out the most effective features in classifying music moods. The best accuracy results were achieved by using context word (CW) lyrics features where the average accuracy of 61.7% is obtained. In their study, lyrics features were found to be the most effective ones in classifying most of the moods.

2.2. Text Classification in Turkish Language

In the field of Turkish text classification, one of the studies was conducted by Güran *et al.* (2009). Their study basically focused on the n-gram approach, while they performed their experimental studies on documents that were either pre-processed or not. According to the experimental evaluation, using unigram representations and Multinomial Naïve Bayes (MNB) in combination gave the best classification results, which is 95.83%.

In another study, Özgür *et al.* (2004) proposed an anti-spam filtering method developed for Turkish in particular and specific to agglutinative languages, consisting of two separate modules – the Learning Module and the Morphology Module. The study was based on both Artificial Neural Network and Bayesian Network algorithms. They claim that they achieved 90% success in finding spam emails in Turkish on the dataset.

Another study was carried out by Torunoğlu *et al.* (2011) to observe the importance of pre-processing steps in Turkish text classification. In their study, they evaluated a variety of pre-processing methods from stop-words filtering to word weighting on several Turkish datasets. According to the experimental results, the pre-processing step did not create the expected impact on Turkish text classification.

In their study, Uysal and Gunal (2014) suggested that pre-processing has an important role in text classification. Their dataset was based on emails and news written both in English and Turkish, through which they determine how pre-processing methods affect classification of the text documents. They also

researched the ways in which tokenization, stop-word removal, lower-case conversion and stemming processes and their various combinations affect the accuracy of SVM classification algorithm. The study found that some pre-processing methods decrease the accuracy score in classification of text documents, while lower-case conversion and stop-word removal processes improve it.

Gunal (2012) studied the effects of various feature selection approaches on text classification. His studies were based on a hybrid selection method created through the combination of filter and wrapper feature selection methods. Accordingly, features obtained through this method gave more successful results in Turkish text classification, as opposed to the single selection method.

A study conducted by Alparslan *et al.* (2011) aimed to extract information from documents that were classified within the Turkish language. First, word stems were extracted using stemming algorithms which were particularly employed for Turkish text documents. Then, they formed document term matrices through the TF-IDF weighting method with stems obtained after preprocessing. Their method achieved 96.67% accuracy score.

2.3. Word Vectors

In regards to text classification, new approaches have been elaborated in conjunction with the recent developments in deep learning methods for natural language processing. Unsupervised representation learning approaches for creating word vectors, also referred to as word embeddings, have gained much importance and utilized in several text classification tasks. Word vectors constructed via representation learning approaches such as Word2vec (Mikolov, Corrado, *et al.*, 2013; Mikolov, Sutskever, *et al.*, 2013) and GloVe (Pennington *et al.*, 2014) were used in several studies including sentiment analysis (Ouyang *et al.*, 2015), and text mining analysis in Turkish language (Cakir and Guldamlasioglu, 2016).

Word2Vec model suffers from ignoring the global word co-occurrence statistics of a given corpus, and it only considers the context windows of the words across the entire corpus (Pennington *et al.*, 2014). In order to address this problem, Pennington *et al.* (Pennington *et al.*, 2014), proposed GloVe approach, which was also an unsupervised method for learning continuous word vectors similar to word2vec model. GloVe differs from Word2Vec method by taking into account the global statistics of word co-occurrences in a given corpus in addition to the statistics of local context windows.

Some studies compared Word2Vec and GloVe on the performance of the text classification tasks. Zhang and Wallance (2015) conducted a sensitivity analysis of one-layer Convolutional Neural Networks to explore the effect of architecture components on sentence classification. According to their findings, both GloVe and Word2Vec performed relatively same. Similarly, A study by Kenter and Rijke (2015) was proposed to investigate whether determining short text similarity is possible using only semantic features. They generated word embeddings by using of both Word2Vec and GloVe separately to compare results and they found that Word2Vec and GloVe gave relatively same results.

2.4. Paragraph/Document Vectors

Following Mikolov *et al.*'s (2013) approach for learning word embeddings, Le and Mikolov (2014) proposed another algorithm called Paragraph Vector, also known as Doc2vec. This is an unsupervised method for learning distributed representations for documents and sentences. It is very similar to the Word2Vec method. The difference was rooted from the fact that there is a vector for each sentence or paragraph in the Doc2vec method. Le and Mikolov (2014) applied this method for sentiment analysis and achieved 1.3% (or 15% relative) improvement over the best previous result.

3. MUSIC MOOD CLASSIFICATION FRAMEWORK

In this section, we introduce the methodology followed in our study in generating models for music mood classification. In this respect, first, an overview of the steps of acquiring the dataset will be given. And then, mood labeling of selected lyrics, and details of feature extraction and weighting process in generating lyric vectors will be explained. Finally, we concentrate on the model building and evaluation steps where we assess our proposed framework and compare it with traditional BoW approach and Doc2Vec algorithm. Figure 1 summarizes the steps of the mood classification process carried out in this research, where each step is elucidated in the following subsections.

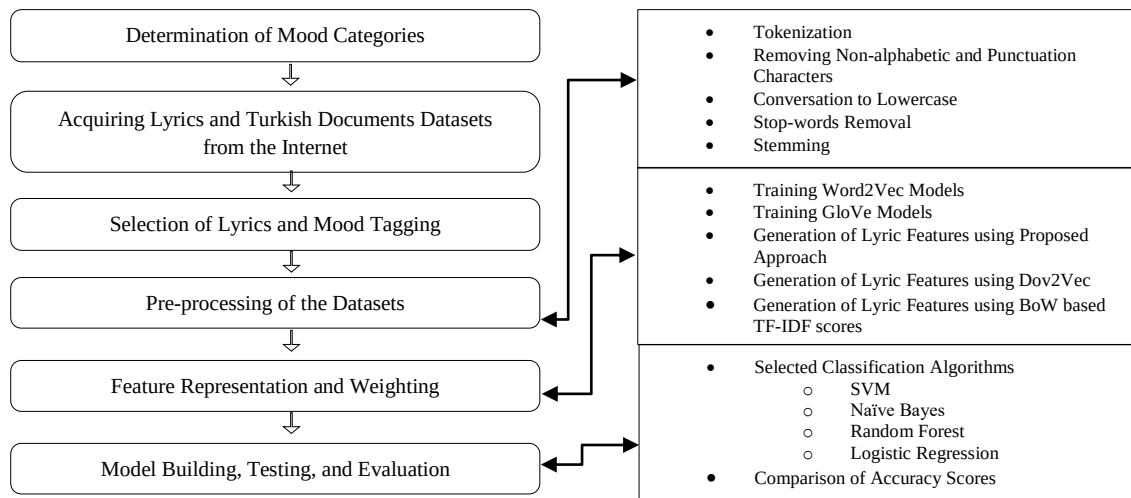


Figure 1. Music mood classification process steps

3.1. Data Collection and Cleaning

Construction of reliable word vectors through neural network models requires huge amounts of textual data. In that respect, we gathered datasets of articles together with the lyrics. Collected lyrics are utilized both in generating the word vectors and in music emotion tagging process. First, more than 300 thousand multi-language lyrics are crawled over the Internet. Then, a language detection tool written in python language called langdetect (Danilák, n.d.) is used to detect the Turkish song lyrics among them, where the number of them reaches over 100 thousand.

After determining and extracting the Turkish song lyrics, we chose a set of popular artists and randomly selected their songs for the manual annotation process and eliminated ones that belong to a remix, acoustic or another adapted version. At the end, we end up with 710 songs in total to be annotated.

Along with the lyrics, a variety of Turkish documents is collected from Turkish Wikipedia and Turkish news websites to be used in the training of word embeddings. Consequently, more than 254 thousand Turkish Wikipedia documents and 2.3 million Turkish news documents are collected. At the end, without any further pre-processing like stemming or stop-words removal, this dataset consists of 570,842,387 tokens, and out of which 2,902,265 of them are unique tokens.

3.2. Mood Tagging

In consideration of the previous literature, in this study, four different mood categories, as happy, calm, sad and angry, are determined and adapted. So, the aim of this study is to automatically classify song lyrics into one of these four mood categories. In this respect, selected song lyrics given to the human annotators, where each one comes from the same socio-economic background, and they are students whose ages ranged from 20 to 35. At least three human annotators label each one of the songs. If the

majority of the annotators agree on a mood category, then corresponding label was set as the mood category for that song. In total, 710 lyrics were annotated and out of which at least two of the three annotators label only 515 of them with the same mood category. Here, 195 of the selected song lyrics were found emotionally confusing where it is hard to decide in which mood category they belong to by the human annotators. These song lyrics were identified as noisy data, and excluded from the dataset. The mood class distribution of the remaining 515 annotated lyrics are given in Table 1.

Table 1. Summary of ground truth class labels

Mood Category	Number of Songs
Happy	76
Calm	78
Sad	253
Angry	108

3.3. Reliability Analysis

Based on the annotator agreement results, we can see that at least two of the three human annotators can only agree upon the single mood category for 73% of the songs assigned to them just based on their lyrics. Besides, among these 515 songs for which a single mood is agreed upon, only 52% of them (which corresponds to 38% over all the annotated songs) are labeled as belonging to the same mood category by all three human annotators. These low percentages in label agreements shows us the difficulty of classifying a given song into a single mood category.

We additionally analyzed the inter-annotator agreement for mood annotation task to evaluate the interrater reliability. Based on the Cohen's kappa (Cohen, 1960), we obtained the highest pairwise inter-annotator agreement as 0.59. In addition to this, inter-annotator agreement computed using Fleiss' kappa is moderate at 0.54 level (Fleiss *et al.*, 1979).

3.4. Data Pre-processing

Pre-processing of the datasets is one of the most important steps in text classification. Tokenization, elimination of stop-words, and stemming are the most commonly-utilized pre-processing methods that are also used in this study.

In this work, we created and used a Turkish stop-word list which consisted of 342 Turkish words. For stemming, we employed a freely-available morphological analyzer for Turkish named TRMorph (Coltekin, 2010). TRmorph is a two-level Turkish morphological analyzer developed for the purpose of high availability and distributed with a license that allows anyone to use and modify it freely for different applications (Coltekin, 2010).

3.5. Learning Word and Lyric Vector Representation

After data preprocessing step, we trained word embeddings with the dataset which consisted of more than 2.5 million Turkish documents. In order to do so, we employed two methods proposed for learning vector space representations of words, namely Word2Vec (Mikolov, Corrado, *et al.*, 2013; Mikolov, Sutskever, *et al.*, 2013) and GloVe (Pennington *et al.*, 2014).

In our study, we considered using Word2Vec's skip-gram model. We trained the Word2Vec model through negative sampling with the parameter value 5 for negative, which specifies how many "noise words" should be drawn. Besides, we set parameter min_count to 1 and then 10, in order to analyze its impact on the performance. This parameter is used to ignore all words with total frequency lower than the parameter's value in the entire corpus. In this experiment, size of the sliding window was set to 10,

and word vectors are created with sizes of 100, 200, 300 and 400, which represent the dimensionalities of the feature vectors of the words. Other parameters were kept at their default values.

In the training process of GloVe word embeddings models, we created word vectors of sizes 100, 200, 300 and 400 as well. Rest of the parameters were kept at their default values, whereas the number of epochs was set to 20.

Following the process of training word embeddings, we applied three different approaches in order to generate lyrics vectors for the annotated lyrics. First, we took the average of all words' word vectors that appeared in the song lyrics before filtering stop-words. In the second approach, we carried out the same process after filtering out the stop-words. Finally, we calculated the average of the word vectors by multiplying them by their corresponding TF-IDF scores which were computed over 515 annotated song lyrics with three different threshold values—0.01, 0.001, and 0.00001 respectively. As a result, we obtained feature vectors for song lyrics to be fed into training of the selected machine learning classifiers, which were later used in automatic classification of songs into four mood categories.

For comparison, we also applied Doc2Vec algorithm and traditional BoW approach based on TF-IDF scores to the Turkish music mood detection task. In the BoW approach, to extract n-gram word features, we considered unigram, bigram and trigrams of words.

3.6. Selected Classifiers and Classification

From the viewpoint of machine learning, the objective of text classification is to train classifiers over labelled documents and achieve classification on documents with unknown labels. Considering the problem of high dimensionality, imbalanced class distribution, over-fitting characteristics and previous researches on text classification, this study was focused on four well-known text classification classifiers, namely SVM, NB, Random Forest (RF) consisted of 100 decision trees, and Logistic Regression (LR) and utilized scikit-learn package (Pedregosa *et al.*, 2012).

3.7. Testing and Evaluations

In order to obtain reliable and accurate performances, all the computational results reported in this study used stratified ten-fold cross-validation procedure. Since dataset has imbalanced distribution, hit rate would be a misleading performance criterion. Therefore, we decided on using micro-averaged f1 score as the accuracy performance metric for model comparisons.

3.8. Performance of Proposed Approach

At first, the proposed approach was applied on Turkish music mood detection by using lyric vectors generated by using the word vectors created via Word2Vec and GloVe algorithms separately. Then, the same process was conducted with considering the Doc2Vec algorithm and BoW approach based on TF-IDF scores.

In the first step, the consequential effects of using different word vector dimensions and word counts for word embeddings were investigated. The best result from the experiments is obtained with word vectors with dimension of 100 and setting minimum word count to 10.

In the next step, we perform experiments, and compare performance results for the methods considered in this study, where minimum word count is set to 10 for Word2Vec and GloVe methods. Besides, in further analyses we fixed the lyrics vector size to 100, and therefore make comparisons of the methods examined in this study with lyrics vectors created via running Word2Vec, GloVe and Doc2Vec methods of the same size. The results obtained using different parameter settings for the different methods are given in the Table 2. Although, unigram, bigram, and trigram, were used for the BoW method, only the best-performed n-gram parameter, unigram, is included in the results.

As seen in Table 2, Word2Vec performs better than GloVe for the dataset used in this study. The best score achieved is 52.18%, which was obtained using the RF classifier through the proposed approach

with the lyric vectors computed by averaging the word vectors generated via Word2Vec algorithm. Removal of the stop-words has a minor negative effect on the score obtained from the RF classifier, but it is evident that there is an improvement in the scores of other classifiers. In addition, incorporation of TF-IDF scores into the lyrics vector computation process seems to reduce the score slightly.

The best score obtained from the approaches used in this study is 1.63% higher (or 3.22% relatively) than the best score obtained from the Doc2Vec and 2.44% higher (or 4.90% relatively) than the best score obtained from the BoW approach. This result shows that the proposed method is effective and inclusion of word embeddings in the Turkish text classification process improves the performance.

Table 2. Performance comparisons of the methods considered in the study

Method	Classifier			
	SVM	NB	RF	LR
Proposed Approach using Word2Vec Averages	46.95%	46.71%	52.18%	46.31%
Proposed Approach using Word2Vec Averages + Stop-words Removed	49.12%	49.03%	51.97%	46.54%
Proposed Approach using Word2Vec Averages + TF-IDF (Unigram, Threshold: 0.001)	48.96%	45.10%	52.02%	43.46%
Proposed Approach using GloVe Averages	40.18%	40.65%	51.59%	49.28%
Proposed Approach using GloVe Averages + Stop-words Removed	41.72%	39.20%	50.23%	49.85%
Proposed Approach using GloVe Averages + TF-IDF (Unigram, Threshold: 0.001)	45.41%	38.43%	50.84%	46.21%
Doc2Vec	50.55%	39.02%	50.07%	39.61%
BoW (unigram)	48.93%	47.18%	49.52%	49.74%

In the last step, we investigated the effects of stemming on the classification performance. Due to the fact that Turkish is an agglutinative language, in which word structures are formed by productive affixations of derivational and inflectional suffixes to word roots, stemming is expected to have considerable effect on classification performance. Table 3 shows the comparison of performance results obtained by using stemmed and non-stemmed lyrics in mood classification task:

Table 3 shows that stemming improves the performances of the proposed method and BoW approach. However, stemming does not have a significant effect on the results obtained by Doc2Vec method.

Table 3. Evaluation of stemming on proposed approach using Word2Vec vs. Doc2vec method

		Classifier			
Method	Stemming	SVM	NB	RF	LR
Proposed Approach Using Word2Vec Averages	Stemmed	48.18%	46.37%	54.36%	46.43%
	Original	46.95%	46.71%	52.18%	46.31%
Doc2Vec	Stemmed	48.85%	48.47%	49.88%	47.64%
	Original	50.55%	39.02%	50.07%	39.61%
BoW (unigram)	Stemmed	48.10%	44.96%	51.44%	49.86%
	Original	48.93%	47.18%	49.52%	49.74%

As a result, the proposed method using lyrics vectors calculated via averaging the respective word vectors generated by Word2Vec method achieves 54.36% accuracy score that is 3.81% higher (or 7.54% relatively) than the best score obtained from the Doc2Vec method and 2.92% higher (or 5.68% relatively) than the best score obtained from BoW approach based on TF-IDF scores.

4. CONCLUSION

In this research, a framework that incorporates word embeddings into Turkish text classification process was investigated. To that end, various parameters and settings in generating word embeddings were assessed in Turkish music mood detection task. In order to train the word embeddings, two very popular word embeddings algorithms are employed and their performances are compared in our study; namely Word2Vec (Mikolov, Corrado, *et al.*, 2013; Mikolov, Sutskever, *et al.*, 2013) and GloVe (Pennington *et al.*, 2014). Then, labeled lyrics vectors were created by using these word embeddings. For comparison, Turkish music mood detection is also performed through the Doc2Vec algorithm and popular BoW approach which uses TF-IDF scores. Finally, Turkish lyrics mood detection was conducted by applying the selected machine learning classifier algorithms that use lyrics vectors as features. Micro-averaged F1 scores were used as the performance measures for comparisons due to the imbalanced class distribution experienced in the labeled lyrics dataset. The consequential effects of stemming of words into their roots, and filtering of the stop-words were also investigated. The results of the study show that the score of the proposed approach is 3.81%, and 2.92% higher (7.54%, and 5.68% relative improvement) than the best score obtained from Doc2Vec and BoW methods, respectively.

These results support the fact that word embeddings are effective and efficient representations of the words that may be utilized for text classification purposes, which is consistent with the findings of the previous studies. Besides, training word vectors with a large collection of data, compared to even more powerful approaches like training and utilizing paragraph vectors, one can obtain better results. So, incorporating word embeddings trained with large amounts of textual data into the Turkish text classification process improves its performance.

Music companies and individuals can benefit from the methodology proposed in this study. For example, managing rapidly-growing collections of digital music and building more reliable music recommendation systems have always been a challenge for companies which provide music services, such as Spotify and Apple Music. Using the proposed approach, these companies and individuals may find the kind of music they are looking for and better manage their music collections.

5. LIMITATIONS AND FUTURE WORK

Mood perceptions of songs may vary from one listener to another, depending on their emotional state. Whereas a song can be classified as sad by a listener, another listener may classify the same song as aggressive. This situation may create an obstacle to this research and further researches on related topics. To eliminate this problem in this research, the lyrics were classified by at least three different people separately. On the other hand, it should be noted that reliability of such a research can be increased with the number of annotators. The annotators consisted of young students whose ages ranged from 20 to 35. Although the group of annotators in this research could not represent the whole community, resulting classes can be considered consistent within themselves.

Besides, the success of machine learning applications often increases when the size of the dataset expands. Although annotation is a costly process, the number of annotated lyrics dataset should be kept as large as possible. Utilizing crowdsourcing for emotion classification with more annotators would result in achieving a more reliable classification of the songs. Another way of addressing this problem may be to reformulate the mood classification process as a multi-label classification problem. This way all the labels provided by human annotators might have been included in the classification process. In addition, because a piece of music consists of lyrics and sounds, including lyric features and audio features of songs together in further researches should give better and more reliable results.

To address the problem of imbalance class distribution of the song lyrics and to improve accuracy performances, classifiers may also be generated using preprocessed lyrics dataset where the imbalance is alleviated via utilizing sampling algorithms (He and Garcia, 2009).

Finally, this study is one of the very first studies which incorporate word and document embeddings for the classification of Turkish music. By using of larger labelled and unlabeled datasets, it is possible to obtain more comprehensive and more accurate comparison.

6. FUNDING STATEMENT

This research was supported by Bogazici University Research Fund (BAP), Project Number: 15N03SUP2.

REFERENCES

- Ali, S. O., & Peynircioğlu, Z. F. (2006). Songs and emotions: Are lyrics and melodies equal partners? *Psychology of Music*, 34(4), 511–534. <https://doi.org/10.1177/0305735606067168>
- Alparslan, E., Karahoca, A., & Bahşi, H. (2011). Classification of confidential documents by using adaptive neuro-fuzzy inference systems. In *Procedia Computer Science* (pp. 1412–1417). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.01.023>
- Cakir, M. U., & Guldamlasioglu, S. (2016). Text Mining Analysis in Turkish Language Using Big Data Tools. In *2016 IEEE 40th Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)* (pp. 614–618). <https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2016.203>
- Casey, M. A., Veltkamp, R., Goto, M., Leman, M., Rhodes, C., & Slaney, M. (2008). Content-Based Music Information Retrieval: Current Directions and Future Challenges. In *Proceedings of the IEEE* (Vol. 96, pp. 668–696). <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.916370>
- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Coltekin, C. (2010). A Freely Available Morphological Analyzer for Turkish. In *Proceedings of the 7th International Conference on Language Resources and Evaluation* (pp. 19–28).
- Danilák, M. (n.d.). *Langdetect 1.0.7*. Python Package Index.
- Fell, M., & Sporleder, C. (2014). Lyrics-based Analysis and Classification of Music. In *International Conference on Computational Linguistics* (pp. 620–631).
- Fleiss, J. L., Nee, J. C., & Landis, J. R. (1979). Large sample variance of kappa in the case of different sets of raters. *Psychological Bulletin*, 86(5), 974–977. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.86.5.974>
- Günel, S. (2012). Hybrid feature selection for text classification. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 20(Sup. 2), 1296–1311. <https://doi.org/10.3906/elk-1101-1064>

- Güran, A., Akyokuş, S., Güler, N., & Gürbüz, Z. (2009). Turkish Text Categorization Using N-Gram Words. In Proceedings of the international symposium on innovations in intelligent systems and applications (INISTA) (pp. 369–373).
- He, H., & Garcia, E. A. (2009). Learning from imbalanced data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 21(9), 1263–1284. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2008.239>
- Hu, X., & Downie, J. S. (2010). When Lyrics Outperform Audio for Music Mood Classification: A Feature Analysis. In Proceedings of the 10th International Society for Music Information Retrieval Conference (pp. 619–624).
- Hu, X., Downie, J. S., & Ehmann, A. F. (2009). Lyric text mining in music mood classification. *American Music*, 619–624.
- Kenter, T., & Rijke, M. de. (2015). Short Text Similarity with Word Embeddings Categories and Subject Descriptors. In Proceedings of the 24th ACM International on Conference on Information and Knowledge Management (CIKM 2015). <https://doi.org/10.1145/2806416.2806475>
- Le, Q. V., & Mikolov, T. (2014). Distributed Representations of Sentences and Documents. In Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning (ICML-14) (pp. 1188–1196). <https://doi.org/10.1145/2740908.2742760>
- Lamere, P. (2008). Social Tagging and Music Information Retrieval. *Journal of New Music Research*, 37(2), 101–114. <https://doi.org/10.1080/09298210802479284rPii 906001732>
- Mikolov, T., Corrado, G., Chen, K., & Dean, J. (2013). Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. In Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR 2013). <https://doi.org/10.1162/153244303322533223>
- Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/1310.4546.pdf>
- Ouyang, X., Zhou, P., Li, C. H., & Liu, L. (2015). Sentiment Analysis Using Convolutional Neural Network. In 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology (pp. 2359–2364). <https://doi.org/10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.349>
- Özgür, L., Güngör, T., & Gürgen, F. (2004). Adaptive anti-spam filtering for agglutinative languages: A special case for Turkish. *Pattern Recognition Letters*, 25(16), 1819–1831. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2004.07.004>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... Duchesnay, É. (2012). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(Oct), 2825–2830. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Pennington, J., Socher, R., & Manning, C. (2014). Glove: Global Vectors for Word Representation. In Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP) (pp. 1532–1543). <https://doi.org/10.3115/v1/D14-1162>
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6), 1161–1178. <https://doi.org/10.1037/h0077714>
- Song, Y., Dixon, S., & Pearce, M. (2012). Evaluation of Musical Features for Emotion Classification. In International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR) (pp. 523–528).
- Su, F., & Xue, H. (2017). Graph-based multimodal music mood classification in discriminative latent space. In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) (pp. 152–163). https://doi.org/10.1007/978-3-319-51811-4_13
- Torunoğlu, D., Çakirman, E., Ganiz, M. C., Akyokuş, S., & Gürbüz, M. Z. (2011). Analysis of preprocessing methods on classification of Turkish texts. In INISTA 2011 - 2011 International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications. <https://doi.org/10.1109/INISTA.2011.5946084>
- Uysal, A. K., & Gunal, S. (2014). The impact of preprocessing on text classification. *Information Processing and Management*, 50(1), 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2013.08.006>
- Yang, Y.-H., & Chen, H. H. (2012). Machine Recognition of Music Emotion. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 3(3), 40. <https://doi.org/10.1145/2168752.2168754>
- Zhang, Y., & Wallace, B. (2015). A Sensitivity Analysis of (and Practitioners' Guide to) Convolutional Neural Networks for Sentence Classification. ArXiv Preprint ArXiv:1510.03820. <https://doi.org/10.3115/v1/D14-1181>



GEÇ MESİNİYEN-ERKEN ZANKLEYAN DÖNEMİNDE ENEZ (EDİRNE) YÖRESİNİN BİTKİ ÖRTÜSÜNDEKİ DEĞİŞİMLER

¹Demet BİLTEKİN , ²Namık ÇAĞATAY

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, 34469, Maslak, İstanbul, TÜRKİYE*

²*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Doğu Akdeniz Oşinografi ve Limnoloji Merkezi (EMCOL), 34469, Maslak, İstanbul, TÜRKİYE*

¹biltekin@itu.edu.tr, ²cagatay@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 30.04.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.02.2020)

ÖZ: Polen taneleri eksin olarak adlandırılan dış duvarının dayanıklı olması nedeniyle tortullar içerisinde çok iyi muhafaza edilmektedir. Bu nedenle polenler jeolojik zaman boyunca meydana gelen vejetasyon ve iklim değişimlerini tayin etmede önemli bir araçtır. Bu çalışma geç Miyosen-erken Pliyosen yaşlı tortullarda yapılan polen analizlerinin verilerini içermektedir. Çalışma alanı başlıca Edirne ili'nde yer alan Enez Lagünü'nü kapsamaktadır. Geç Mesiniyen-erken Zankleyan'da (Mesiniyen Tuzluluk Krizinden sonra), Enez polen verileri başlıca otsul bitki ekosistemleri (örneğin; Poaceae, Amaranthaceae-Chenopodiaceae, Asteraceae Asteroideae, Asteraceae Cichorioideae) ile temsil edildiğini göstermektedir. Gölü çevreleyen yakın mesafede ise mezotermik ağaçlar yaprağını döken *Quercus*, *Carya*, *Pterocarya*, *Zelkova*, *Fagus*, *Alnus*, *Betula*, *Liquidambar orientalis* gibi bitkilerden oluşmaktadır. Geç Miyosen-erken Pliyosen'de Enez lagününde görülen otsu bitkilerdeki artış, bölgede soğuk ve kurak bir iklimin varlığına işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Polen analizleri, paleo-iklim, bitki örtüsü, Enez Lagünü, Miyosen

Vegetation Changes of Enez (Edirne) During the Late Messinian-Early Zanclean

ABSTRACT: Due to strong wall (exine) of the pollen grains, they can be well-preserved for a longtime in the sediments. Therefore, palynology is especially a special tool for assessing paleovegetation and paleoclimate throughout geological history. This study includes the late Miocene-early Pliocene sediments for pollen analysis. The study area corresponds to Enez Lagoon, located in the Edirne area. According to Enez pollen data, during the late Messinian (after Messinian Salinity Crisis)-early Zanclean, the vegetation was mainly dominated by herbs (i.e., Poaceae, Amaranthaceae-Chenopodiaceae, Asteraceae Asteroideae, Asteraceae Cichorioideae). Mesothermic trees are represented by deciduous *Quercus*, *Carya*, *Pterocarya*, *Zelkova*, *Fagus*, *Alnus*, *Betula*, and *Liquidambar orientalis*. The abundance of herbaceous plants during the late Miocene-early Pliocene indicates cold and dry climate in the area.

Keywords: Pollen analysis, paleoclimate, vegetation, Enez Lagoon, Miocene

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, Anadolu *Liquidambar orientalis* (Anadolu Sığla Ağacı), *Parrotia persica* (İran Demir Ağacı), *Pterocarya fraxinifolia* (Kafkas Cevizi), *Zelkova crenata* (Kafkas Karaağacı) ve *Cedrus* (Sedir Ağacı) gibi relikt (kalıntı) bitki türlerini içermektedir. Relikt bitkiler jeolojik zaman süresince çok geniş alanlarda yayılım gösteren ancak günümüzde çok dar bir alan sahip olan bitkilerdir (Anşin, 1982;

Yahyaoğlu ve diğ., 1991). Bu nedenle Anadolu relikt bitkiler için önemli bir yaşam alanıdır. Ayrıca Anadolu paleobotanik ve paleoiklim çalışmaları açısından büyük ilgi çekmektedir. Geç Miyosen'de, megatermik (tropikal) ve mega-mezotermik (yarı tropikal) ağaçların sayısı çoğu iklimsel değişimden dolayı azalmıştır (Biltekin ve diğ., 2015). Ancak *Glyptostrobus* gibi bataklık ormanları ve diğer yarı tropikal ağaçlardan *Engelhardia*, *Sapotaceae*, *Nyssa* ve bazı mezotermik ağaçlar geç Pliyosen'de de varlıklarını sürdürmüşlerdir (Biltekin ve diğ., 2015). Anadolu'daki erken-orta Miyosen polen kayıtları, Avrupa'daki polen florası ile önemli farklılıklar göstermektedir. Erken Pliyosen'de Anadolu'da kuzey ve güney kıyılarındaki olmak üzere iki relikt bitki alanı bulunmaktaydı. Bitki örtüsü sayısal modellemeleri, nemli alanların varlığının termofil/higrofil bitkilerin hem kuzey hem de güney kıyılarındaki korunabildiğini göstermektedir (François ve diğ., 2011; Arpe ve diğ., 2011). Geç Pliyosen'de ise aynı zamanda step türü bitkiler (*Artemisia*, *Ephedra*, *Hippophae rhamnoides*) çok fazla gelişmeyip, otsu bitki toplulukları arasında *Amaranthaceae*–*Chenopodiaceae*, *Poaceae*, *Asteraceae* *Asterioideae*, *Asteraceae* *Cichorioideae* ailelerine ait bitkiler yaygın hale gelmiştir. Bu durum geç Pliyosen'de soğuk ve kurak iklim koşullarının varlığını desteklemektedir. Erken Pliyosen'de (2.6 milyon yıl), Kuzey Kutbunda buzullaşmaların başlamasıyla, bazı türler (*Taxodiaceae*, *Glyptostrobus*, *Engelhardia*, *Sapotaceae* ve *Nyssa*) varlıklarını devam ettirmelerine rağmen mega-mezotermik (yarı tropikal) ağaçlar azalmıştır. Aynı zamanda, step ortamları güçlü bir şekilde genişlerken, mezotermik ağaçlarda da (yaprğını döken *Quercus*, *Betula*, *Alnus*, *Liquidambar*, *Fagus*, *Carpinus orientalis*, *Carpinus betulus*, *Tilia*, *Acer*, *Ulmus*, *Zelkova*, *Carya*, *Pterocarya*, vb.) azalma meydana gelmiştir (Biltekin ve diğ., 2015). Sonrasında *Artemisia* step bitkileri mezotermik (sıcak-ılıman) ağaçlardan daha uzun süre ve geçici aralıklarla buzul-buzularası döngüler boyunca gelişmiştir (Biltekin ve diğ., 2015). *Artemisia* step bitkilerinin geçici aralıklarla gelişimi buzularası (sıcak ve nemli iklim) dönemlerin buzul (soğuk-kurak iklim) dönemlerinden daha kısa süreli olduğunu göstermektedir. İonian evresinin başlangıcından itibaren (1.8 milyon yıl), otsu ekosistemler (*Amaranthaceae*–*Chenopodiaceae*, *Poaceae*, *Asteraceae* *Asterioideae*, *Asteraceae* *Cichorioideae*, vb.) ve *Artemisia* stepleri günümüze kadar genişlemeye devam etmişlerdir. Bu gibi bir yayılım Ponto-Euxinian alanında erken Pliyosen'de gözlenmektedir (Biltekin ve diğ., 2015). Ancak *Artemisia* steplerinin Anadolu'daki en erken yerleşiminin Erken Miyosen'e (Akitaniyen) kadar uzandığı görülmektedir (Biltekin, 2010). *Artemisia* steplerinin Anadolu'daki gelişimi Tibet Platosunun yükselmesi nedeniyle meydana gelmiş olabilir. Ayrıca, *Carya*, *Carpinus orientalis*, *Pterocarya*, *Liquidambar orientalis*, *Zelkova* gibi relikt bitkiler günümüze kadar varlığını devam ettirmiştir. Bu bitkilerin geçmişte nasıl bir dağılım gösterdikleri ve hangi iklimsel değişimlere maruz kaldıkları halen palinolojik çalışmaların araştırma konusudur. Doğu Akdeniz'de geç Miyosen devrinde önemli paleoöğrafik değişimler meydana gelmiştir (Rögl ve Steininger, 1983; Clauzon ve diğ., 2005; Popov ve diğ., 2006; Melinte-Dobrinescu ve diğ., 2009). Mesiniyen Tuzluluk Krizi ise hem karasal hemde denizel ekosistemi etkilemiştir (Melinte-Dobrinescu ve diğ., 2009). Mesiniyen erozyon yüzeyleri Akdeniz bölgesinde ve Karadeniz'in doğu kısmında da gözlenmiştir (Clauzon ve diğ., 1996). Mesiniyen Tuzluluk Krizi'nden sonra, Kuzey Ege'deki vejetasyon başlıca otsu bitki ekosistemleri ve mezotermik ağaçlardan (yaprğını döken *Quercus*, *Carya*, *Zelkova*, vb.) oluşmaktadır (Biltekin, 2010). Ayrıca yüksek enlem kozalaklı ağaçlardaki (*Cedrus*, *Tsuga*, *Abies* ve *Picea*) artış bölgesel masiflerin yükselmesini işaret etmektedir. Enez'de (Saros Körfezi'nin KB'si) Alçıtepe Formasyonu (*Macra* sp. fosilleri içeren kireçtaşı kesiti) 23 m kalınlığındadır ve üst bölümünde zengin kumtaşı ara katkıları içermektedir (Melinte-Dobrinescu ve diğ., 2009). Formasyon, Gelibolu Yarımadası'ndaki Conkbayırı Formasyonu'nun alüvyal yelpaze tortulları tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir (Melinte-Dobrinescu ve diğ., 2009). Alçıtepe Formasyonu, alt bölümünde çamurtaşı ve marn, Gelibolu ve Biga yarımadaı içinde marnlı biyoklastik ve oolitik kireçtaşları içermektedir ve Kirazlı Formasyonu üzerinde uyumsuz olarak yer almaktadır (Melinte-Dobrinescu ve diğ., 2009; Armijo ve diğ., 1999). Nannofosil verileri, Alçıtepe Formasyonu'nun yaşının Mesiniyen Tuzluluk Krizinden daha genç olduğunu göstermektedir (Melinte-Dobrinescu ve diğ., 2009). Polen taneleri, eksin olarak adlandırılan dış duvarının dayanıklı olması nedeniyle sedimentlerde çok iyi muhafaza edilmektedir. Polen analizleri aynı zamanda yüksek çözünürlüklü iklim verileri de sağlamaktadır. Bu nedenle polenler jeolojik zaman boyunca meydana gelen vejetasyon ve iklim değişimlerini tayin etmede önemli bir

araştırır. Son yıllarda Akdeniz'in doğusunda palinolojik amaçlı birçok çalışma yapılmıştır (Biltekin ve diğ., 2015; Yavuz Işık, 2007; Yavuz Işık, 2008; Akgün ve diğ., 2007; Yavuz-Işık ve Toprak, 2010; Akkiraz ve diğ., 2011; Kayseri-Özer, 2014; Jiménez-Moreno ve diğ., 2015; Üçbaş Durak ve Akkiraz, 2016; Yavuz ve diğ., 2017; Biltekin, 2018; Akkiraz ve diğ., 2018). Bu çalışmalar Doğu Akdeniz vejetasyonunda önemli değişimler meydana geldiğini göstermektedir. Bu nedenle bölge palinolojik araştırmalar açısından büyük ilgi çekmektedir. Bu çalışma geç Miyosen-erken Pliosen yaşlı tortullarda yapılan polen analizlerini içermektedir. Bu çalışmanın amacı çalışılan zaman aralığında, çalışma alanlarındaki paleovejetasyon ve paleoiklim koşullarını araştırmaktır.

ÇALIŞMA ALANI (STUDY AREA)

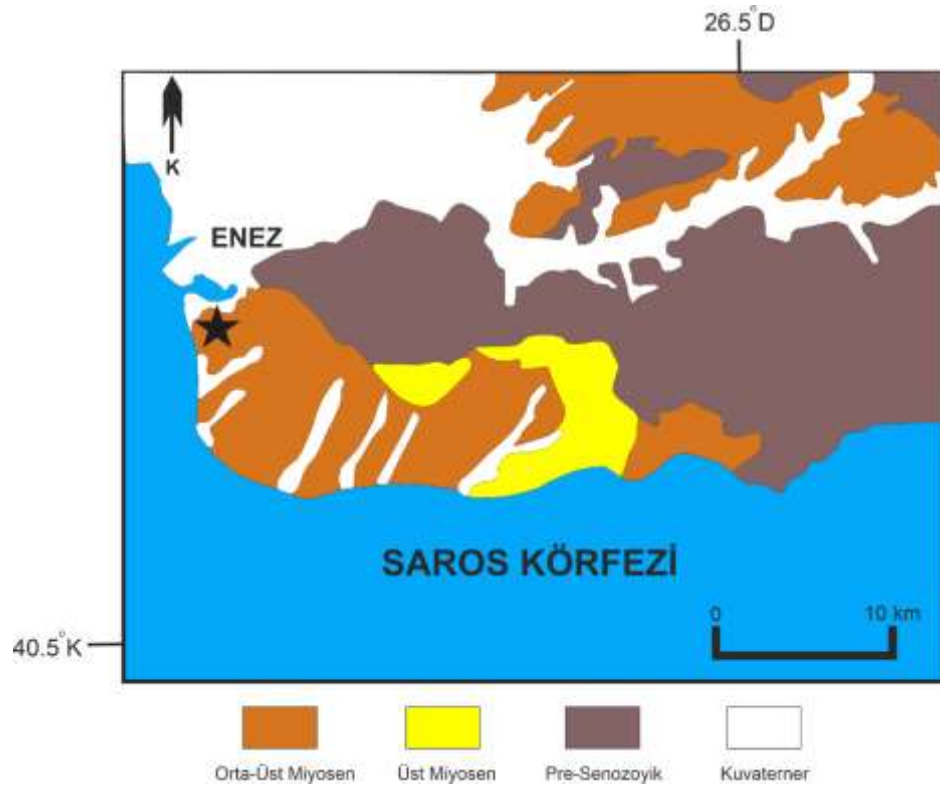
Çalışma alanı Edirne ili'nde yer alan Enez Lagünü'nün doğu kıyılarında bulunmaktadır (40°46'24" K, 26°04' D; Şekil 1). Enez lagününün bulunduğu Meriç Deltası bölgesindeki iklim koşulları Akdeniz iklimi ve orta Avrupa kara iklimi arasında geçiş göstermektedir. Enez'in, ılıman bir iklimie sahip olmasının yanında kış mevsimleri oldukça soğuk geçmektedir (Ceylan, 2009). Yazları daha kısa sürmekte ve 2 ay ile sınırlı kalmaktadır (Ceylan, 2009). Seçmen ve Leblebici (1991), Meriç Deltasında yer alan Enez Lagünü, Büyük ve Küçük Gala Gölleri, Pamuklu Gölü, ve Sığırcı Gölü'nde toplam 90 bitki taksası tespit etmişlerdir. Göllerin kenarlarında *Salvinia natans* (Su Eğreltisi), *Trapa natans* (Su Kestanesi), *Nymphoides peltata* (Küçük Nilüfer), *Vallisneria spiralis* (Saz bitkisi) gibi türler kaydedilmiştir (Seçmen ve Leblebici, 1991).



Şekil 1. Enez Lagünü lokasyon haritası. Kırmızı yıldız örnekleme alanını göstermektedir. Şekildeki haritalar, Türkiye haritası üzerinde çalışma alanını ve Enez Lagünü'nün fotoğrafını göstermektedir.

Figure 1. Location map of Enez Lagoon. Red star indicates sampling area. Maps in the figure indicate map of Turkey and photography of Enez Lagoon.

Çalışma alanı Alçıtepe Formasyonu'nu üstleyen Meriç Nehrin'in delta çökelleri ile örtülmüştür (Sakıncı ve diğ., 1999). Üst Neojen çökelleri bölgede iyi bir şekilde yüzeylenmektedir (Şekil 2). Enez lagünü civarından alınan örneklerdeki *Triquetrorhabdulus rugosus* ve *Ceratolithus acutus* gibi nannofosillerinin NN12b nanofosil zonuna ait olduğu ve Mesiniyen sonu-erken Zankleyan olduğu önceki çalışmalardan bilinmektedir (Melinte-Dobrinescu ve diğ., 2009).

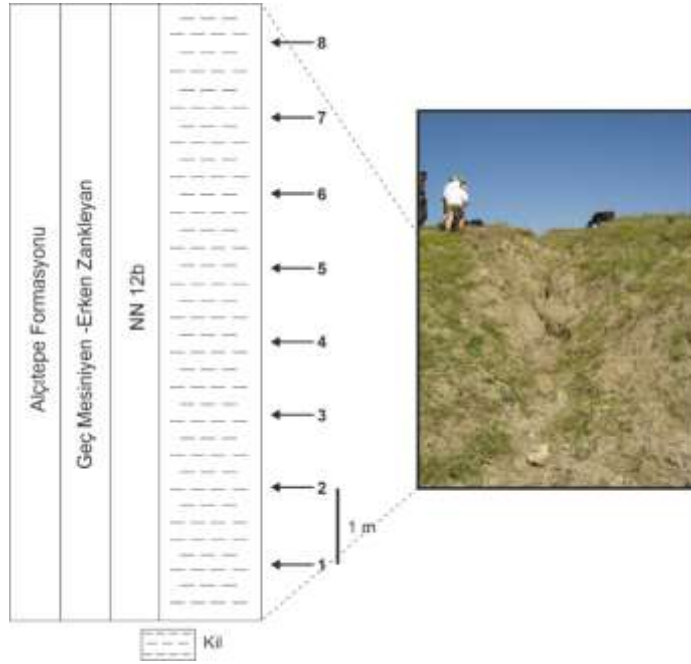


Şekil 2. Çalışma alanı jeoloji haritası (Melinte-Dobrinescu ve diğ. (2009)'den sadeleştirilerek alınmıştır). Siyah yıldız çalışma alanını göstermektedir.

Figure 2. Geological map of the study area (modified from Melinte-Dobrinescu et al.,(2009)). Black star indicates the study area.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Mesiniyen sonu-erken Zankleyan yaşlı, toplam 8 örnek polen analizleri için hazırlanmıştır. Örneklerin çoğu polen açısından zengindir. Sadece 1 tane örnekte (2 nolu örnek) çok az sayıda polen tanımlanabilmiştir. Bu yüzden bitki örtüsündeki değişimlerin sağlıklı değerlendirilebilmesi için bu örnek diyagramlara eklenmemiştir. Uygun stratigrafik kesitten alınan kil örnekleri Alçıtepe Formasyonundan 1 m aralıklarla alınmıştır (Şekil 3). Polen analizi için örnekler standart polen hazırlama yöntemine uygulanmıştır (Cour, 1974). Her bir örnek için yaklaşık 20 gram civarında sediman kullanılmıştır. Örneklerdeki karbonat ve silis içeriğini ortadan kaldırmak için ilk olarak HCl (35%) ve HF (70%) asitleri eklenmiştir. Palinomorfları ayırmak için $ZnCl_2$ (yoğunluk >2.0) kullanılmıştır. Kalan sediman örneği 200 μm ve 10 μm 'luk eleklerden geçirildikten sonra, cam lamellerin üzerine bir miktar gliserin konularak mikroskop slaytları hazırlanmıştır. Slaytlar ışık geçirgenli mikroskopta (Zeiss), Claude Bernard Lyon1 Üniversitesi laboratuvarlarında, farklı objektiflerde (x400 ve x1000) imersiyon yağı kullanılarak analiz edilmiştir. Polen tanımlamada, polen taneleri minimum 150-300 oluncaya kadar *Pinus* hariç tutularak sayılmıştır. Çünkü *Pinus* genellikle fazla miktarda polen ürettiğinden, suda ve havada kolay taşınıp yayılabildiğinden, örneklerde fazla miktarda bulunmaktadır. Bu nedenle, *Pinus* tüm polen toplamından ayrı olarak sayılmaktadır.



Şekil 3. Örneklenen Alçitepe Formasyonu profili ve litolojisi. Numaralar polen analizi için örneklenen seviyeleri göstermektedir.

Figure 3. Lithological log of the Alçitepe Formation. Numbers show sampling levels for pollen analysis.

Botanik sınıflandırmada ise polen tanelerinin morfolojik karakterlerine ve günümüzde yaşayan aynı aileye ait olan polenlerle karşılaştırılarak yapılmaktadır. Polen tanelerinin tanımlanmasında birçok polen atlaslarından yararlanılmıştır (Huang, 1972; Reille, 1992). Çalışılan örneklerde 52 polen taksası tanımlanmıştır. Genellikle, polen verileri iki diyagramda (detaylı ve sentetik) gösterilmektedir. Ayrıntılı polen diyagramları tüm polen spektrumlarını ve polen analizinde tespit edilen hemen hemen tüm taksaları içermektedir (Ermolli, 2000). Sentetik (synthetic) polen diyagramlarında ise bitkiler, modern temsilcilerinin ekolojik önemine ve/veya polen diyagramlarındaki davranışlarına göre gruplandırılmaktadır (Suc, 1984). Bu çalışmada ayrıntılı polen diyagramı (Grimm, 1994) tarafından geliştirilen TILIA programı kullanılarak oluşturulmuştur. Diyagramda sucul bitkiler (*Potamogeton*, *Sparganium* ve Cyperaceae) hariç tutulmuştur. Polen zonları Poaceae ve *Pinus*'taki değişimlere bakılarak belirlenmiştir (Şekil 4). Sentetik polen diyagramı ise MATLAB programı kullanılarak çizilmiştir (Şekil 5). Bu tür sentetik polen diyagramlarında farklı polen türleri, ekolojik önemlerine göre 12 farklı gruba (Nix, 1982) ayrılarak sınıflandırılmıştır. Buna göre Enez polen kayıtlarında tespit edilen başlıca bitki grupları şunlardır:

- Mega-mezotermik (yarı-tropikal) ağaçlar: çoğunlukla Taxodiaceae, *Engelhardia*, Ginkgoaceae, *Loropetalum*, *Distylium*, Arecaceae, and Sapotaceae
- *Cathaya* (günümüzde Çin'in güney bölgelerinde yaşayan, Pinaceae ailesine ait olan kozalaklı ağaç)
- Mezotermik (sıcak-ılıman) ağaçlar: yaprağını döken *Quercus*, *Populus*, *Buxus sempervirens*, Aceraceae, Oleaceae, *Alnus*, *Pterocarya*, *Carpinus orientalis*, *Zelkova*, *Juglans*, *Corylus*, *Fagus*, *Betula*, *Ulmus*, *Tilia*, *Carya*, *Fraxinus*, *Carpinus betulus*, *Liquidambar orientalis*, *Ilex*
- *Pinus* (Çam)
- Mezo-mikrotermik (orta enlem) ağaçlar: *Cedrus* ve *Tsuga*
- Mikrotermik (yüksek enlem) ağaçlar: *Abies* ve *Picea*
- önemli olmayan ağaç grupları (non-significant): Rosaceae gibi kozmopolitan ve yaygın olarak bulunan bitkiler
- Cupressaceae (Servigiller)

- Akdeniz kurakçılıkları (xerophytes): *Olea*
- otsu bitkiler: Poaceae, Asteraceae Asteroideae, *Potamogeton*, *Sparganium*, *Centaurea*, Ericaceae, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Asteraceae Cichorioideae, Plumbaginaceae, Amaranthaceae–Chenopodiaceae, Solanaceae, *Scabiosa*, Papavareceae, Cyperaceae
- stepler: *Artemisia*

BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

Polen Analizleri (Pollen Analysis)

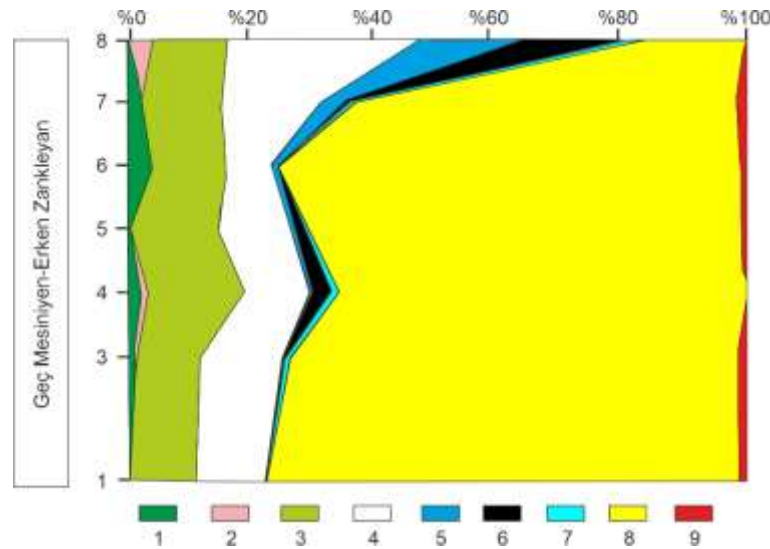
E-1 polen zonu (1–4 m):

Bu zon başlıca Poaceae ve *Pinus* ile karakterize edilmektedir. Poaceae değerleri zonda artış gösterirken *Pinus* değerleri zonun üst seviyelerine doğru azalmaktadır. Otsu bitki topluluğu içerisinde görülen diğer belirgin bitkiler Amaranthaceae–Chenopodiaceae, Asteraceae Asteroideae, Asteraceae Cichorioideae ailelerine ait polenlerdir. Odunsu bitkiler ise *Cathaya*, *Carpinus orientalis*, yaprağını döken *Quercus*, *Tsuga* ve *Abies* formlarından oluşmaktadır (Şekil 4).

E-2 polen zonu (4–8 m):

Bu zon, iki alt zona ayrılabilir (E-2a ve E-2b). E-2a zon 4–6 m’ler arasında, E-2b ise üstteki 6–8 m’ler arasına karşılık gelmektedir (Şekil 4). E-2a polen zonunda otsu bitkilerden Poaceae ve Amaranthaceae–Chenopodiaceae yaygındır. Amaranthaceae–Chenopodiaceae bu zonda artış göstermektedir. Diğer otsul bitkiler Asteraceae Asteroideae, Asteraceae Cichorioideae familyalarıdır. Ağaç formasyonları içerisinde ise belirgin olarak kaydedilen ağaçlar *Carpinus orientalis*, *Fraxinus* ve yaprağını döken *Quercus* görülmektedir. Taxodioideae (Taxodiaceae) ve *Loropetalum* polen taksaları sadece bu zonda bulunmuştur. E-2b polen zonunda ise otsu bitkiler ve yüksek-orta enlem kozalaklı ağaçlar azalırken *Cathaya* artmaktadır. Ginkgoaceae sadece bu zonda kaydedilmiştir. Diğer ağaç formasyonları içerisinde *Populus* artarken, yağrağını döken *Quercus* sıklıkla kaydedilmiştir.

olduğuna işaret etmektedir. Ormanlar genellikle mezotermik ağaçlar (sıcak-ılıman) ve *Pinus* ile karakterize edilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Enez polen kaydının sintetik (synthetic) polen diyagramı. 1) Mega-mesotermik ağaçlar (yarı tropikal), 2) *Cathaya*, 3) Mezotermik ağaçlar (sıcak-ılıman), 4) *Pinus*, 5) Mezo-mikrotermik ağaçlar (orta enlem), 6) Mikrotermik ağaçlar (yüksek enlem), 7) Cupressaceae, 8) Otsul bitkiler, 9) Stepler

Figure 5. Synthetic pollen diagram of Enez. 1) Mega-mesothermic trees (sub-tropical), 2) *Cathaya*, 3) Mesothermic trees (warm-temperate), 4) *Pinus*, 5) Meso-microthermic trees (mid-altitude), 6) Microthermic trees (high altitude), 7) Cupressaceae, 8) Herbs, 9) Steppes

Yaprağını döken *Quercus* bu orman içerisinde belirgindir (maksimum %8, örnek 4). Diğer mezotermik bitkiler *Alnus*, *Carya*, *Pterocarya*, *Liquidambar orientalis*, *Corylus*, *Zelkova*, *Ulmus*, *Carpinus orientalis*, *Juglans*, *Buxus sempervirens* ile temsil edilmektedir. Ayrıca *Tsuga*, *Abies*, *Cedrus*, ve *Picea* gibi orta-yüksek enlem ağaçlarda belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Enez polen kaydında, mega-mezotermik ağaçlar (yarı tropikal) fazla miktarda değildir ve Taxodiaceae, *Engelhardia*, *Ginkgo*, *Loropetalum* ve *Distylium* formları ile temsil edilirler. *Ginkgo* (gymnosperm) sadece polen zonu E-2b'de bulunmaktadır. Bu ağaç Avrupa'dan 1.7-2.7 milyon yıl önce yok olmuştur. Günümüzde Çin'in güneyinde yaşamaktadır (Gong ve diğ., 2008). Ginkgoaceae familyasının Anadolu florasındaki en erken kaydı Seyitömer Havzası'nda erken-orta Miyosen zamanında bulunmuştur (Yavuz-Işık, 2007). Ayrıca, Ginkgoaceae familyasına ait yaprak fosilleri erken-geç Pliyosen'de Macaristan'ın batısında kaydedilmiştir (Hably ve Kvaček, 1998). *Cathaya* ağacı ise, E-2b zonundaki 1 nolu örnekte %4'e ulaşmaktadır. *Pinus* E-1 zonunun alt seviyelerinde yaygınken, zonun üst bölümlerine doğru azalmaktadır. Ancak bu bitki çok miktarda polen ürettiğinden ve uzak mesafelere taşınma kapasitesi olduğunda genellikle çok miktarda bulunmaktadır (Traverse, 1988; Suc ve Drivaliari, 1991). Cupressaceae ise E-1 ve E-2a polen zonlarında belirgindir. Cupressaceae ailesine ait polen tanelerinin morfolojik tür tayini yapılması zor olduğu için iklim yorumlamalarında formun diyagramdaki eğrinin değişimine bakılır. Eğer eğri otsu bitkiler ve yüksek enlem ağaçlarla beraber artış gösteriyorsa iklimin soğuk ve kurak olduğu, eğer yarı-tropikal ve sıcak-ılıman ağaçlar ile birlikte artış göstermekteyse Cupressaceae familyasında sıcak ve nemli iklimi gösteren polen taksonlarının varlığını göstermektedir. Enez polen kaydında Cupressaceae eğrisi otsu bitkiler, stepler, ve orta-yüksek enlem ağaçlarla artış göstermektedir. Bu durum sıcaklıkta düşüş olduğunu göstermektedir. Günümüz ve fosil Cupressaceae (*Thuja*) ailesine ait bitkiler üzerine yapılan araştırmalar, bu taksanın soğuk ve donma şartlarında yaşayabileceğini göstermektedir (Le Page, 2003). Çanakkale bölgesindeki İntepe, Eceabat ve Burhanlı polen kayıtlarına baktığımızda (Biltekin, 2010), özellikle İntepe kesitinde Mesiniyen Tuzluluk Krizinden sonra Enez'de ki gibi otsu bitkiler ve yüksek-orta enlem kozalaklı ağaçlarda artış meydana geldiği

görülmektedir. Sakıncı (2007), geç Miyosen-Pliyosen yaşlı Trakya'da bulunan silisli ağaçları incelemiştir. Bu ağaç topluluğu içerisinde Podocarpaceae, Anacardiaceae, Fagaceae, Juglandaceae, *Engelhardia*, Lauraceae, Fabaceae Caesalpinoideae, Fabaceae Mimosoideae, Rosaceae, Prunoideae (*Prunus*), Asteraceae formları gözlenmiştir. Bu çalışma sonuçları aynı zamanda Enez polen verileriyle uyumludur. Enez sentetik (synthetic) polen diyagramının üst bölümlerinde (örnek 6'dan sonra) otsu bitkilerde ve orta-yüksek enlem kozalaklı ağaçlarda azalma görülmektedir. Bu dönemde aynı zamanda *Cathaya* artarken, sıcak-ılıman ağaçlarda (mezo-mezotermik) belirgin bir şekilde kaydedilmiştir. *Cathaya*, Pinaceae ailesine ait olan kozalaklı bir ağaç olup, günümüzde Çin'in güney bölgelerinde varlığını devam ettirmektedir (Wang, 1961). Çin'deki *Cathaya argyrophylla* popülasyonları yüksek sıcaklık aralıklarında (yıllık ortalama sıcaklık: 13.4-18 °C) yayılım göstermektedir (Fang ve diğ., 2011). *Cathaya*'nın sıcak-ılıman ağaçlarla (örneğin, yaprağını döken *Quercus* ve *Carpinus orientalis*) birlikte Enez polen kaydının üst bölümlerindeki artışı bu dönemde iklim koşullarının değiştiğini, sıcak ve yağışlı iklim koşullarına geçtiğini göstermektedir. *Cathaya* ağacının Pleyistosen dönemine kadar Anadolu'daki varlığı devam ederken, bu dönemden sonra Anadolu'nun kuzeyinden insan etkisi nedeniyle yok olmuşlardır (Biltekin ve diğ., 2015).

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Mesiniyen Tuzluluk Krizi'nden sonra Enez polen kaydında otsu bitkiler yaygın olarak gözlenmiştir. Otsular başlıca Poaceae, Amaranthaceae–Chenopodiaceae, Asteraceae Asteroideae, Asteraceae Cichorioideae bitkilerinden oluşmaktadır.
- Orman topluluğu ise başlıca mezotermik (sıcak-ılıman) ve az miktarda bulunan mega-mezotermik (yarı tropikal) ağaçlar ile temsil edilmektedir. Sıcak-ılıman orman topluluğu içerisinde *Alnus*, *Carya*, *Carpinus*, *Liquidambar* gibi ırmak kenarı (riparian) topluluğunda bulunmaktadır.
- Enez polen kaydındaki otsu bitkilerin fazla miktarda kaydedilmiş olması geç Mesiniyen-erken Zankleyan süresince bölgede soğuk ve kurak bir iklimin olduğunu ve bitki örtüsünün açık alan bitki örtüsü ile karakterize edildiğini göstermektedir.
- Enez polen kaydının üst bölümlerinde *Cathaya* polen taksasındaki artış ve yine sıcak-ılıman ağaçların varlığı bu dönemde iklimin sıcak ve yağışlı olduğunu göstermektedir.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma İTÜ-EMCOL ve ANR EGEO Projesi (ANR-06-BLAN-0156 CSD 6, Fransa) katkısı ile gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akgün, F., Kayseri, M.S., and Akkiraz, M.S. 2007. Palaeoclimatic evolution and vegetational changes during the Late Oligocene–Miocene period in Western and Central Anatolia (Turkey). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 253, 56–90.
- Akkiraz, M.S., Akgün, F., Utescher, T., Bruch, A.A., ve Mosbrugger, V. 2011. Precipitation gradients during the Miocene in Western and Central Turkey as quantified from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 304, 276–290.
- Akkiraz, M.S., Kangal, Ö., Özgen Erdem, N., BüyükmERIC, Y., Doğruöz, C., 2018. Palaeontological evidence and sedimentary facies in a lower Miocene (Aquitania) succession from the Bingöl minibasin (Sivas Basin), Central Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 27, 329–348.
- Anşin, R., 1982. Endemizm ve Dolu Karadeniz BiiJ-gesinde Yetigen Endemik Bitki Taksonları (Endemism and Endemic Plants of The East Black Sea Region). KÜ. Orman Fakültesi Dergisi 5 (2) Trabzon, Türkiye, 311-326.

- Armijo, R., Meyer, B., Hubert, A., Barka, A., 1999. Westward propagation of the North Anatolian fault into the northern Aegean: timing and kinematics. *Geology*, 27, 267–270.
- Arpe, K., Leroy, S.A.G., Mikolajewicz, U., 2011. A comparison of climate simulations for the last glacial maximum with three different versions of the ECHAM model and implications for summer-green tree refugia. *Climate of the Past*, 7, 91–114.
- Axelrod, D.I., Al-Shehbaz, I., Raven, P., 1996. History of the modern flora of China. In: Zhang, Aoluo, Wu, Sugong (Eds.), *Floristic Characteristics and Diversity of East Asian Plants*. In Springer-Verlag, Berlin, pp. 43–55.
- Biltekin, D., 2010. Vegetation and climate of North Anatolian and North Aegean region since 7 Ma according to pollen analysis. PhD Thesis, Istanbul Technical University and University Claude Bernard–Lyon 1, 136 pp.
- Biltekin, D., Popescu, S.M., Suc, J.P., Quétel, P., Jiménez-Moreno, G., Yavuz, N., ve Çağatay, M.N., 2015. Anatolia: a long-time plant refuge area documented by pollen records over the last 23 million years. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 215: 1–22.
- Biltekin, D., 2018. Palynomorphs from a lacustrine sequence provide evidence for palaeoenvironmental changes during the early Miocene in Central Anatolia, Turkey. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55, 505–513.
- Ceylan, S., 2009. Enez (Edirne) İlçesi'nin Turistik Çekicilikleri ve Sürdürülebilir Turizm Açısından Değerlendirilmesi. Ankara Üniversitesi, Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi (TÜCAUM), V. Ulusal Coğrafya Sempozyumu (16–17 Ekim 2008), Bildiriler Kitabı, Ankara. s. 403–419.
- Clauzon, G., Suc, J.-P., Gautier, F., Berger, A., Loutre, M.-F., 1996. Alternate interpretation of the Messinian salinity crisis: Controversy resolved? *Geology*, 24 (4), 363–366.
- Clauzon, G., Suc, J.-P., Popescu, S.-M., Marunteanu, M., Rubino, J.-L., Marinescu, F. ve Melinte, M. C., 2005. Influence of the Mediterranean sea-level changes over the Dacic Basin (Eastern Paratethys) in the Late Neogene. The Mediterranean Lago Mare facies deciphered. *Basin Research*, 17, 437–562.
- Cour, P., 1974. Nouvelles techniques de détection des flux et de retombées polliniques: étude de la sédimentation des pollens et des spores à la surface du sol. *Pollen et Spores* 16 (1), 103–141.
- Ermolli, E.R., 2000. Pollen analysis of the Acerno palaeo-lacustrine succession (Middle Pleistocene, southern Italy). *Geological Society, London, Special Publications*, 181, 151–159.
- Fang, J., Wang, Z., Tang, Z. (Eds.), 2011. *Atlas of Woody Plants in China. Distribution and Climate vol. 2*. Springer (1902 pp.).
- François, L., Utescher, T., Favre, E., Henrot, A.-J., Warnant, P., Micheels, A., Erdei, B., Suc, J.-P., Cheddadi, R., Mosbrugger, V., 2011. Modelling Late Miocene vegetation in Europe: results of the CARAIB model and comparison with palaeovegetation data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 304, 359–378.
- Gong, W., Chen, C., Dobeš, C., Fu, C.X., Koch, M., 2008. Phylogeography of a living fossil: Pleistocene glaciations forced *Ginkgo biloba* L. (Ginkgoaceae) into two refuge areas in China with limited subsequent postglacial expansion. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 48, 1094–1105.
- Grimm, E., 1994. TILIA and TILIAGRAPH pollen diagramming program. Illinois State Museum, Springfield, IL
- Hably, L. ve Kvaček, Z., 1998. Pliocene mesophytic forests surrounding crater lakes in western Hungary. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 101, 257–269.
- Huang, T.C., 1972. Pollen flora of Taiwan. (Taipei) National Taiwan University, Botany Dept. Press, Taipei, Taiwan.
- Jiménez-Moreno, G., 2005. Utilización del análisis polínico para la reconstrucción de la vegetación, clima y estimación de paleoaltitudes a lo largo de arco alpino europeo durante el Mioceno (21–8 Ma). Thesis, Univ. Granada and C. Bernard – Lyon 1, 311 p.

- Jiménez-Moreno, G., Rodríguez-Tovar, F.J., Pardo-Igúzquiza, E., Fauquette, S., Suc, J.P., Müller, P., 2005. High-resolution palynological analysis in late early-middle Miocene core from the Pannonian Basin, Hungary: Climatic changes, astronomical forcing and eustatic fluctuations in the Central Paratethys. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 216 (1-2), 73-97.
- Jiménez-Moreno, G., Fauquette, S., Suc, J.P., 2010. Miocene to Pliocene vegetation reconstruction and climate estimates in the Iberian Peninsula from pollen data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 162, 403-415.
- Jiménez-Moreno, G., Alçiçek, H., Alçiçek, C.M., van den Hoek Ostende, L., ve Wesselingh, F.P. 2015. Vegetation and climate changes during the late Pliocene and early Pleistocene in SW Anatolia, Turkey. *Quaternary Research*, 84, 448-456.
- Kayseri-Özer, M.S. 2014. Spatial distribution of climatic conditions from the Middle Eocene to Late Miocene based on palynoflora in Central, Eastern and Western Anatolia. *Geodynamica Acta*, 26, 122-157.
- Le Page, B. A., 2003. A new species of Thuja (Cupressaceae) from the Late Cretaceous of Alaska: implications of being evergreen in a polar environment. *American Journal of Botany*, 90, 167-174.
- Melinte-Dobrinescu, M. C., Suc, J.-P., Clauzon, G., Popescu, S.-M., Armijo, R., Meyer, B., Biltekin, D., Çağatay, M. N., Uçarku, G., Jouannic, G., Fauquette, S., Çakır, Z., 2009: The Messinian Salinity Crisis in the Dardanelles region: Chronostratigraphic constraints. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 278, 24-39.
- Nix, H., 1982. Environmental determinants of biogeography and evolution in Terra Australis. In: Barker, W.R., Greenslade, P.J.M. (Eds.), *Evolution of the Flora and fauna of Arid Australia*. Peacock Publishing, Frewville, 47-66.
- Popov, S. V., Shcherb, I. G., Ilyina, L. B., Nevesskaya, L. A., Paramonova, N. P., Khondkarian, S. O., Magyar, I., 2006. Late Miocene to Pliocene palaeogeography of the Paratethys and its relation to the Mediterranean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 238, 91-106.
- Reille, M., 1992. Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord. Laboratoire de botanique historique et de palynologie, 543 pp., Marseille, France.
- Rögl, F., ve Steininger, F. F., 1983. Vom Zerfall der Tethys zu Mediterran und paratethys. Die neogene Paläogeographie und Palinspastik des zirkum-mediterranean Raumes. *Ann. Naturhist. Mus. Wien*, 85, A : 135-163.
- Sakıncı, M., Yaltırak, C., Oktay, F. Y., 1999. Palaeogeographical evolution of the Thrace Neogene Basin and the Tethys-Paratethys relations at northwestern Turkey (Thrace). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 153, 17-40.
- Sakıncı, M., 2007. Trakya Tersiyer'inin silisleşmiş ağaçları. Proje no: 103Y137. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Seçmen, Ö., Leblebici, E., 1991. Aquatic flora of Thrace (Turkey). *Willdenowia*, 20, 53-66.
- Suc J.P., 1984. Origin and evolution of the Mediterranean vegetation and climate in Europe. *Nature*, 307, 5950, 429-432.
- Suc, J.P., ve Drivaliari, A., 1991. Transport of bisaccate coniferous fossil pollen grains to coastal sediments: an example from the earliest Pliocene Orb Ria (Languedoc, Southern France). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 70, 247-253.
- Traverse, A., 1988. *Paleopalynology*. Allen and Unwin, Boston, MA
- Üçbaş Durak, S.D., ve Akkiraz, M.S. 2016. Late Oligocene-Early Miocene palaeoecology based on pollen data from the Kalkın-Gönen Basin (Northwest Turkey). *Geodynamica Acta*, 28, 295-310.
- Wang, C.W., 1961. The forests of China with a survey of grassland and desert vegetation. Maria Moors Cabot Foundation, vol. 5. Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- Yahyaoglu, Z., Demirci, A., Genç, M., 1991. Relikt (Paleo-endemik) Bir Tür: Doğu Ladini (*Picea orientalis* (L.) Link.). Bildiri, 1. Uluslararası Çevre Koruma Sempozyumu, 8 Haziran 1991, 2. Cilt, Ed. Ayvaz, Z., Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 769-779.

- Yavuz Işık, N., 2007. Pollen analysis of coal-bearing Miocene sedimentary rocks from the Seyitömer Basin (Kütahya), Western Anatolia, *Geobios*, Volume 40, Issue 5, 701–708.
- Yavuz Işık, N., 2008. Vegetational and climatic investigations in the Early Miocene lacustrine deposits of the Güvem Basin (Galatean Volcanic Province), NW Central Anatolia, Turkey. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 150, 130–139.
- Yavuz-Işık, N., ve Toprak, V. 2010. Palynostratigraphy and vegetation characteristics of Neogene continental deposits interbedded with the Cappadocia ignimbrites (Central Anatolia, Turkey). *International Journal of Earth Sciences*, 99, 1887–1897.
- Yavuz, N., Culha, G., Demirer, S.S., Utescher, T., ve Aydın, A. 2017. Pollen, ostracod and stable isotope records of palaeoenvironment and climate: Upper Miocene and Pliocene of the Çankırı Basin (Central Anatolia, Turkey). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 467, 149–165.



DBD PLAZMA AKTÜATÖR SÜRÜM FREKANSININ UÇAK KANADI ETRAFINDAKİ AKIŞIN KONTROLÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

¹Hürrem AKBIYIK , ²Hakan YAVUZ

^{1,2}Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Adana, TÜRKİYE
¹hakbiyik@cu.edu.tr, ²hyavuz@cu.edu.tr

(Geliş/Received: 31.12.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 12.02.2020)

ÖZ: Yapılan çalışma ile NACA0015 uçak kanadı etrafındaki akışın kontrolünde plazma aktuatörlerin $Re=48\ 000$ değerinde sürüm frekansı ve voltajındaki değişimin kaldırma kuvvetine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar ile plazmanın oluşturulmasında etkili olan parametrelerin direkt olarak aerodinamik performansa etkisi değerlendirilmiştir. Yapılan incelemede plazma aktuatörler uçak kanadının ön kısmına ($x/C=0.1$) yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında ise frekans değişimi ile yüksek hücum açılarındaki ayrılan akışın incelemesi yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında çalışmaların büyük çoğunluğunun stol açısı ve post stol açıları için yapıldığı görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda, belirli bir hücum açısı aralığı için frekansın ve voltajın etkileri incelenmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgulardan özellikle plazma aktuatörlerin uygulama voltajının kaldırma katsayısına doğrudan oransal etkisi tespit edilmiştir. Diğer taraftan, sürüm frekansının ise belirgin bir ilişkisi tespit edilememiştir. Bu ilişki daha çok doğrusal olmayan bir yapı şeklinde görünmektedir. Bu durum, özellikle çalışmanın bulgular kısmında detaylı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plazma aktuatör, Aktif akış kontrolü, Aerodinamik performans, Kaldırma kuvveti katsayısı, Plazma sürüm frekansı

Investigation of the Effect of DBD Plasma Actuator Excitation Frequency on Flow Control Around an Aircraft Wing

ABSTRACT: In this study, the effect of variation of plasma excitation frequency and applied voltage variation on lift coefficient of NACA0015 airfoil is investigated at $Re=48\ 000$. In this context, the effects of the parameters direct effecting the plasma generation on the aerodynamic performance of the airfoil are assessed. In this study, plasma actuators are located at near leading edge ($x/C=0.1$) position. Within the scope of the experimental studies, the separated flow is studied for the excitation frequency at high attack angles. When the studies in the literature are taken into consideration, it is seen that the majority of the studies are performed for stall angle and post stall angles. In experimental studies, the effects of frequency and voltage are examined for a certain angle of attack angle. As a result of the experimental studies, the direct proportional effect of the application voltage of the plasma actuators on the lift coefficient was determined. On the other hand, no significant correlation was found between excitation frequency. This relationship appears to be more of a non-linear structure. This has been examined in detail in the findings section of the study.

Key Words: Plasma actuator, Active flow control, Aerodynamic performance, Lift coefficient, Plasma excitation frequency

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, DBD plazma aktüatörler akışın kontrolünde önemli bir aktif akış kontrol elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Plazma aktüatörlerin tamamen elektronik yapıda olmaları, istenildiğinde devreye kolay bir şekilde alınmaları ya da devre dışı bırakılabilmeleri, hareketli parçalara sahip olmamaları dolayısı ile geometriyi değiştirmemeleri ve hızlı cevap süreleri sayesinde sisteme hızlı müdahale imkânı vermelerinden dolayı bu konu üzerine yapılan çalışmalar giderek artmaktadır.

Bir DBD plazma aktüatörün yapısı birisi hava ile temas eden diğeri gömülü iki elektrottan ve bunların arasına yerleştirilmiş bir dielektrik malzemeden oluşmaktadır. Bu elektrotlara AC voltaj uygulanması neticesinde aktüatörler üzerinde iyonize gaz oluşmaktadır. Bu alanda AC voltaj ile birlikte DC voltaj esaslı plazma aktüatörlerde kullanılmaktadır. Ancak, AC uygulamaların DC uygulamalara kıyasla elektrot korozyonuna daha az maruz bırakması ve iyonize gaz oluşumunda daha güç gerektirmesi avantajlarından dolayı aerodinamik akış kontrolünde daha çok tercih edilmektedir (Corke ve diğ., 2010). Aktif akış kontrolünde kullanılan bu aktüatörler sayesinde üretilen iyonize gazın (plazma) hızı akışın kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır. Yani, akış kontrolünün etkinliği aktüatör performansı ile doğrudan ilişkilidir. Bu noktada, aktüatörün geometrisi, sürüm voltajı tipi, dielektrik malzemenin katman kalınlığı ve çeşidi, aktüatör elektrotları arası boşluk ve sürüm frekansı önemli rol oynamaktadır. Debien ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada bir plazma aktüatör yardımıyla üretilen itki kuvvetini yani plazmanın etkisini yaptıkları deneysel çalışmada göstermişlerdir. Deneysel çalışmalarında, birinci durumda frekansı sabit tutup uygulama voltajını 12 ile 22 kV aralığında diğer durumda ise uygulama voltajını sabit tutup sürüm frekansını 0.5 ile 2 kHz aralığında değiştirip üretilen itki kuvvetini incelemişlerdir. Voltaj ve frekansın değişiminin itki kuvvetine doğrudan etki ettiğini ve bu değerlerdeki artışın plazmanın etkinliğini de arttırdığını belirtmişlerdir (Debien ve diğ., 2012). Orlov (2006) yaptığı çalışmada, plazma yayılımının ve plazma hızının AC frekansına göre değişimini incelemiştir. Düşük sürüm frekanslarında plazma yayılımındaki değişimi ortaya koymuştur ancak yüksek değerlerde bu yayılımın sürüm frekansına bağlı olmadığını belirtmiştir. Bunun aksine, frekans artırıldığında plazmanın hızında da artış olduğu çalışmasında görülmektedir (Orlov, 2006). Kotsonis ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada plazma aktüatörleri kanadın arka kısmına yerleştirip kanat etrafındaki akışın kontrolü üzerine çalışmışlardır. Plazma aktüatörün kanadın arka kısmına yakın iz bölgesindeki yapıyı değiştirdiğini buna bağlı olarak dominant girdap kopma frekansının azaltıldığını ortaya koymuşlardır. Farklı Reynolds sayılarında yapılan bu çalışmada, hücum açısının 0 ve 5 derece olduğu değerlerde kaldırma katsayısının incelemesini de uygulama voltajı ve sürüm frekansı açısından incelemişlerdir.

Uygulama voltajı artışının kaldırma katsayısı üzerine yaptığı iyileştirmede sürüm frekansına kıyasla daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır (Kotsonis ve diğ., 2014). Güler ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada NACA 0015 uçak kanadı etrafındaki akışın kontrolünde kullandıkları plazma aktüatörlerini farklı tip sinyalle sürmüşlerdir. Hücum açısının 10 derece olduğu değerde, sinyal modülasyonu ve sürüm frekansının uygun seçilmesi ile kaldırma katsayısı üzerinde iyileştirme sağlamakla birlikte enerji tasarrufunun da mümkün olduğunu deneysel çalışmalarında ortaya koymuşlardır (Güler ve diğ., 2018).

Taleghani ve diğ. (2012) NFL 0414 tipi kanat profiline uyguladıkları plazma aktüatörleri üç farklı konumda kullanmışlardır. Uygulama voltajının 14 kV ve sürüm frekansının 28kHz olduğu değerler için yapılan çalışmada post stol açılarında incelemede bulunmuşlardır. Yaptıkları çalışmanın sonuçlarında sürüm frekansının artışının plazmanın hızını arttırdığını göstermişlerdir. Ayrıca, düşük sürüm frekanslardaki düşük duty cycle'lar ile daha iyi kaldırma katsayısı elde edildiğini ortaya koymuşlardır (Taleghani ve diğ., 2012). Sürüm frekansının duty cycle'ı üzerine inceleme yapılan diğer bir çalışma ise Sun ve diğ. (2015) tarafından 10kHz değerinde farklı voltajlar için yapılmıştır. Bu çalışmada, 0.1 ile 1 aralığındaki belirli değerlerde duty cycle uygulaması hücum açısı 17 ve 20,5 derece için NACA0015 kanat profilinde için sonuçlar ortaya konulmuştur. Kanadın kaldırma katsayısının iyileştirmesinin en iyi 0,25 duty cycle değerinde olduğunu 12 m/s ile 75 m/s akış hızı için olduğunu göstermişlerdir (Sun ve diğ., 2016). Han ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada nanosecond pulsed DBD plazma aktüatörlerinin 0.2 kHz ile 1.8 kHz aralığında sürüm frekansı uygulanması ile kaldırma kuvvetinin arttırılabileceğini ve

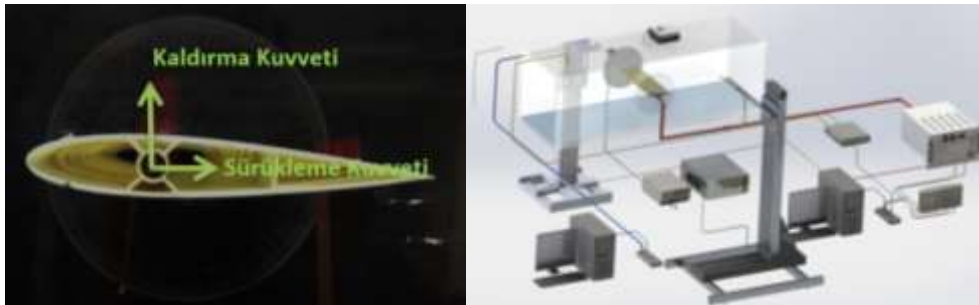
sürüklenme kuvvetinin azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Sürüm frekansının azaltılması ile kaldırma kuvvetinde daha iyi etki elde etmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında buldukları sonuçlar ile düşük hücum açılarında kalkış sağlayan hava araçlarının kalkış anında ilave iyileştirme elde edeceğini ve tırmanma performansının arttırılacağını belirtmişlerdir (Han ve diğ., 2015). Farklı elektrot geometrileri ve farklı sürüm frekansı üzerine nanosecond pulsed DBD plazma aktüatörlerin kullanıldığı başka bir çalışmada ise akış kontrol etkilerinin sürüm frekansına bağlı olduğu bulunmuştur (Zhao ve diğ., 2015). Yine aynı çalışmada, düşük frekansta swept tipi kanat profilinin aerodinamik performansındaki iyileşmenin daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında çalışmaların büyük çoğunluğu stol açısı ve post stol açıları için incelenmiştir. Ayrıca, uygulama ve sürüm frekansı etkilerinin kaldırma katsayısı üzerine etkileri belirli hücum açılarında ortaya konulmuştur. Bu deneysel çalışmada, hücum açısı aralığı açısından frekansın ve voltajın etkileri daha sık aralıkta incelenmektedir. İlave olarak, sürüm frekansı ve uygulama voltajı için ise her hücum açısında değerlendirmeler yapılmıştır.

MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Rüzgâr Tüneli ve NACA0015 Uçak Kanadı (Wind Tunnel and NACA0015 Airfoil)

NACA0015 uçak kanadının etrafındaki akış kontrolü üzerine yapılan deneyler emmeli tip-açık çevrim rüzgâr tünelinde Reynolds sayısı 48000 değerinde yapılmıştır. Rüzgâr tünelinin daralma oranı 6.3:1'dir. Deneylerin yapıldığı bu tünel 57cmx57cm kare kesitli ve 100cm uzunluğu olan test bölgesine sahiptir. Kanat modeli test bölgesine kuvvet ölçümleri için dikey akış görselleştirmesi için Şekil 1'deki gibi yatay yönde yerleştirilmiştir. Türbülans şiddeti %1'in altındadır. Kanat modeli PLA malzemesinden 3D yazıcı teknolojisi ile üretilmiştir. Kanat modelinin veter uzunluğu 150mm olup kanat açıklığı ise 540mm'dir. Uç etkileri ortadan kaldırmak için iki adet 280mm çapa sahip uç plaka kanat kenarlarına yerleştirilmiştir.



Şekil 1. D NACA0015 kanat modeli ve deneysel kurulum

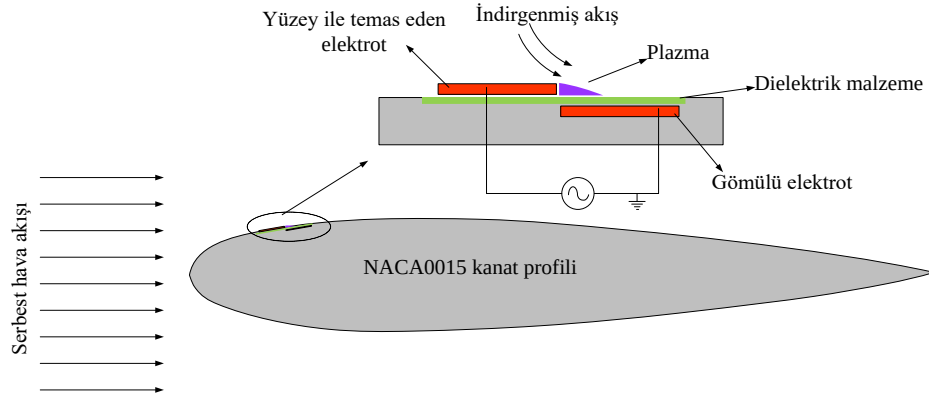
Figure 1. NACA0015 airfoil model and experimental setup of the study

Plazma Üretimi ve Plazma Aktüatör Yapısı (Plasma Generation and the Structure of Plasma Actuator)

Deneylerde kullanılan plazma aktüatör yapısı Şekil 2'de görüldüğü gibi iki bakır elektrottan ve bir di-elektrik malzemeden oluşmaktadır. Hava ile temas eden elektrota yüksek voltaj uygulanırken gömülü elektrot topraklanmaktadır. Bu elektrotlar arasına di-elektrik malzeme yerleştirilmiştir. Di-elektrik malzeme olarak Kapton seçilmiştir. Bu elektrotların genişliği 5 mm olup kalınlığı 0.05 mm'dir. Elektrot kalınlığı çok düşük olması nedeniyle model yüzey geometrisini değiştirmediği literatürdeki kaynaklardan bilinmektedir. Plazma aktüatörler kanat modelinin "leading edge" yani $x/C=0.1$ konumuna yerleştirilmiştir.

Elektrotların köşelerinde yüksek elektrik konsantrasyonu oluşmaktadır ve buna bağlı olarak bu durumun elektrotların yanmalarına sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Bu problemin önüne geçebilmek adına elektrotların köşeleri 1mm çapında yuvarlatılmıştır. Plazma aktüatörler yüksek voltaj amfisi ile

çalıştırılmıştır. Bu çalışmada, uygulama voltajı 5 ile 7 kV aralığında 1 kV arttırılarak, sürüm frekansı ise 2.5 ile 5.5 kHz aralığında 1 kHz arttırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Tektronix marka P6015 model yüksek voltaj probu yardımıyla elektriksel özellikler tespit edilmiştir. Sinyal özellikleri ise Fluke marka 80i-110s model akım probu yardımıyla gözlemlenmiştir. Yüksek voltaj probu ve akım probu TT-technic marka TDS2012B model osiloskoba bağlanmıştır.

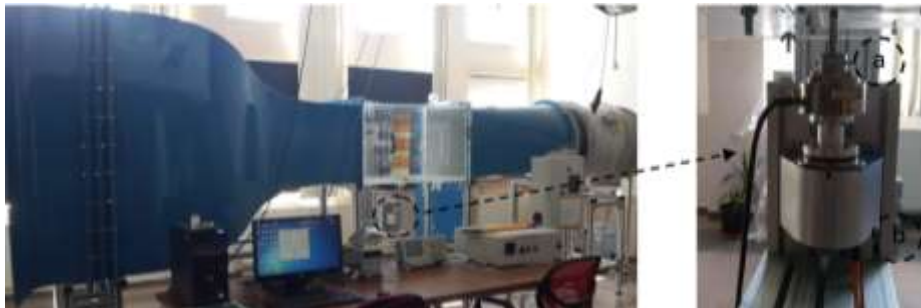


Şekil 2. Plazma aktüatör yapısı ve kanat üzerindeki konumu

Figure 2. The structure of a plasma actuator and position on the airfoil

Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Sistemi (Aerodynamic Force Measurement System)

Model üzerine etki eden kaldırma kuvvetini ölçebilmek için Şekil 3’de görülen ATI model 6 eksenli yük hücresi kullanılmıştır. Bu yük hücresi bilgisayar kontrollü döndürme aparatı ile entegre hale getirilip farklı hücum açılarında kuvvet değerlerinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Ölçümler 1 kHz örnekleme frekansında 10 sn boyunca her bir değer için gerçekleştirilmiştir. Toplamda 5000 veri, veri toplama kartı yardımıyla alınmıştır. Her bir deney 3 kez tekrar edilmiştir ve ortalaması hesaplanmıştır. Bunun nedeni, deneylerin tekrarlarına bilirliliğini ortaya koymak ve hata oranını en aza indirebilmektedir. Belirsizlik analizi neticesinde kuvvet ölçüm sisteminin hata payının %5’den az olduğu bulunmuştur. Belirsizlik analizinin hesaplanmasında yük hücresi değerleri, hücum açısının ayarlanmasında yapılabilecek ölçüm hatası ve model geometrisi üretiminde model uzunluklarında meydana gelebilecek hatalar göz önüne alınmıştır.



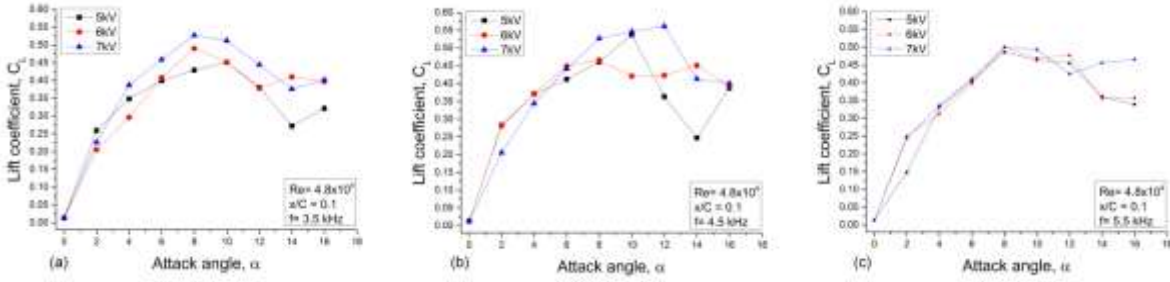
Şekil 3. Rüzgâr tüneli test bölgesine bağlı kuvvet ölçüm sistemi (a) ve döndürme aparatı (b)

Figure 3. Load cell system placed in wind tunnel test section (a) and rotary unit (b).

BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Aşağıda Şekil 4’te NACA0015’e ait kaldırma katsayısının hücum açısı ile değişimi verilmiştir. Yapılan deneyde, 3.5 kHz’de 7 kV’da maksimum kaldırma elde edilmiştir. Aynı zamanda stol’a girme

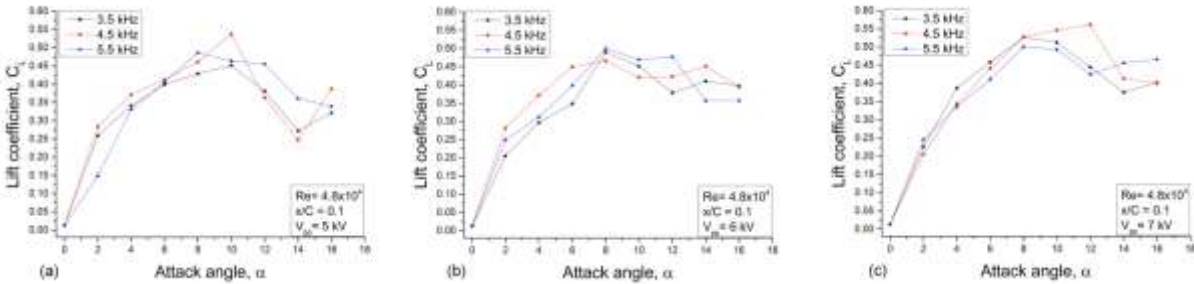
durumu da geciktirilmiştir. Bu durum özellikle 5 kV'da daha belirgin haldedir. Ancak sürüm frekansı 3.5 kHz değerinden 4.5 kHz değerine arttırıldığında 7 kV'da 4 derece stol açısı daha da ötelenmiştir. Aynı durumda 5 kV'da bu kez 2 derece öteleme elde edilmiştir. Bunların yanı sıra, 6 kV'da maksimum kaldırma kuvveti azalmış olsa da stol sonrası açıda uçak kanadı stola girmeyerek kaldırma kuvveti katsayısı 0.45 seviyelerinde seyretmiştir. Uçak kanadının emme yüzeyinde düşük Re sayılarında oluşan "laminer seperation bubble" oluşumunun plazmanın etkisi ile bir miktar bozulmasından kaynaklı 6 kV'daki kaldırma kuvveti katsayısı eğrisi daha yatay seyretmiş görünmektedir.



Şekil 4. NACA0015 kanat profiline uygulanan sürüm frekansı değişimi ve bu durumun kaldırma katsayısına etkisi, a) 3.5 kHz, b) 4.5 kHz, c) 5.5 kHz

Figure 4. Variation excitation frequency applied to NACA0015 airfoil and its effect on lift coefficient, a) 3.5 kHz, b) 4.5 kHz, c) 5.5 kHz

Aşağıda Şekil 5'te bu kez NACA0015 kanat profiline uygulanan sürüm voltaj değişimi ve bu durumun kaldırma katsayısına etkisi verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere, 4.5 kHz plazma sürüm frekansında tüm stol öncesi açılarda sürüm voltajları için en iyi performansı göstermiştir. Diğer taraftan, 7 kV'da ise 4.5 kHz hem stol açısının ötelenmesinde etkili olmuştur. Aynı zamanda bu şartlarda yapılan deneylerde elde edilen en yüksek kaldırma kuvveti katsayısı değerine ulaşılmıştır.



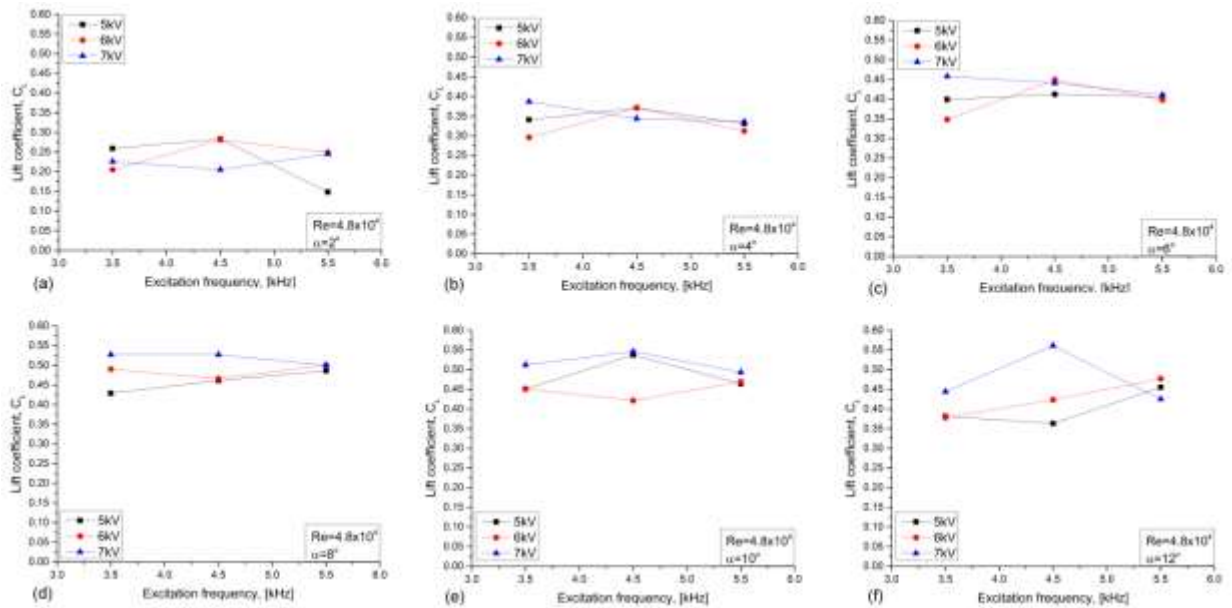
Şekil 5. NACA0015 kanat profiline uygulanan voltaj değişimi ve bu durumun kaldırma katsayısına etkisi, a) 5 kV, b) 6 kV, c) 7 kV

Figure 5. Variation excitation frequency applied to NACA0015 airfoil and its effect on lift coefficient, a) 5 kV, b) 6 kV, c) 7 kV

Yapılan uygulamalarda görülen diğer bir durum ise plazma aktüatörlerinin sürülmesinde kullanılan voltajın artması ile kanadın etrafındaki akış üzerindeki etkinliği de lineer olmayan bir yapıda olsa da artmaktadır. Ancak aynı durum incelendiğinde, plazma sürüm frekansı değişiminin kaldırma kuvveti üzerinde iyileştirici etkisi doğrudan bir ilişki şeklinde olmayıp daha çok spesifik değerlerde belirginleşen bir iyileştirme şeklinde görünmektedir.

Aşağıda Şekil 5'te kaldırma kuvveti katsayısının plazma sürüm frekansına göre değişimi verilmiştir. Grafiklerden de görüleceği üzere yapılan inceleme her bir hücum açısı değeri için farklı voltaj ve frekanslar için incelenmiştir ve sonuçları grafikler halinde aşağıda sunulmuştur. Şekil 6-a'da plazma sürüm frekansı 2.5 kHz ile 5.5 kHz arasında değiştirilmiştir. Bu aralıkta, plazma sürüm voltajı da 5 kV, 6 kV ve 7 kV değerlerinde olmak üzere deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde belirli bir plazma sürüm voltaj değeri için arttırılan plazma sürüm frekansının kaldırma kuvveti

katsayısı üzerinde birebir oransal bir artış sağlamadığı görülmektedir. Bu nedenle de plazma sürüm frekansının artırılması kaldırma kuvveti katsayısında artış sağlamamaktadır. Diğer bir önemli bulgu ise farklı voltaj değerlerinin farklı frekanslarda daha etkin hale geldiğinin görülmesidir. Bu kapsamda yapılan değerlendirme maksimum kaldırma kuvveti katsayısı durumu 4.5 kHz frekans değerinde 5 kV ve 6 kV voltaj değerlerinde elde edilmiş görülmektedir. Aynı şekilde durum B'de (Şekil 6-b) ise 4 derece hücum açısı için aynı inceleme tekrarlanmıştır. Bu durumda ise maksimum kaldırma kuvveti katsayısı 3.5 kHz frekans değerinde 7 kV voltaj değerinde elde edilmiş görülmektedir. Aynı şekilde durum C'de (Şekil 6-c) ise 6 derece hücum açısı için aynı inceleme tekrarlanmıştır. Bu durumda ise maksimum kaldırma kuvveti katsayısı 4.5 kHz frekans değerinde 6 kV ve 7 kV voltaj değerlerinde elde edilmiş görülmektedir. Aynı şekilde durum D'de (Şekil 6-d) ise 8 derece hücum açısı için aynı inceleme tekrarlanmıştır. Bu durumda ise maksimum kaldırma kuvveti katsayısı 3.5 kHz ve 4.5 kHz frekans değerlerinde 7 kV voltaj değerinde elde edilmiş görülmektedir. Aynı şekilde durum E'de (Şekil 6-e) ise 10 derece hücum açısı için aynı inceleme tekrarlanmıştır. Bu durumda ise maksimum kaldırma kuvveti katsayısı 4.5 kHz frekans değerinde 7 kV voltaj değerinde elde edilmiş görülmektedir. Ayrıca, 7 kV plazma sürüm voltajının genel olarak diğer tüm frekanslarda da baskın olduğu ve en iyi kaldırma kuvveti katsayısının elde edildiği görülmektedir. Aynı şekilde durum F'de (Şekil 6-f) ise 12 derece hücum açısı için aynı inceleme tekrarlanmıştır. Bu durumda ise maksimum kaldırma kuvveti katsayısı 4.5 kHz frekans değerinde 7 kV voltaj değerinde elde edilmiş görülmektedir. Ayrıca, 7 kV plazma sürüm voltajının genel olarak diğer tüm frekanslarda da baskın olduğu ve en iyi kaldırma kuvveti katsayısının elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6. NACA0015 kanat profiline uygulanan sürüm voltaj-frekans değişimi ve bu durumun kaldırma katsayısına etkisi

Figure 6. Variation of excitation frequency-applied voltage for NACA0015 airfoil and its effect on lift coefficient

SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan deneysel çalışmalar ile NACA0015 kanat modeli için elde edilen deney sonuçları da dikkate alınarak plazma sürüm voltajı ve frekansının kanadın kaldırma kuvveti katsayısı üzerine etkisi Reynolds sayısı 48000 değerinde olmak üzere incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere plazma sürüm voltajının kanadın kaldırma kuvveti katsayısı üzerine etkisi yaklaşık olarak doğrusal olarak değerlendirilebilecek iken plazma sürüm frekansının kanadın kaldırma kuvveti katsayısı üzerine etkisi doğrusal görünmemektedir. Bu nedenle de kanadın kaldırma kuvveti katsayısının artırılması için plazma sürüm voltajının artırılması bir çözüm iken plazma sürüm frekansının artırılması ya da

azaltılması her bir kanat açısı ve uygulama voltajı için ayrıca değerlendirme gerektirmektedir. Bunun nedeni ise söz konusu ilişkinin doğrusal olmayan yapıda olması ve yukarıda değerlendirmelerden de görüldüğü üzere geliştirilebilecek net bir sonuç vermemesidir. Bu kapsamda yapılacak çalışmalar için deneylerin daha sık aralıklarla incelenecek hücum açısı için tekrarlanması ve durumun daha net hale getirilmesi önerilmektedir. Ancak, bu deneyler çok uzun süren yoğun bir çalışmayı gerektirecektir. Bu durumda da sonucun, yapılan çalışma ile benzer nitelikte doğrusal olmayan bir bağıntıyı ortaya koyması beklenmektedir. Ancak bu durumda farklılık olarak, oluşturulacak daha temel bir yapı kullanılarak bu doğrusal olmayan yapının değişimi daha anlaşılır hale getirilip bu kapsamda yapılacak kontrol uygulamalarında kullanılabilir. Ortaya çıkan sonuçlar itibarı ile kanadın kaldırma kuvveti katsayısının artırılması için en uygun yöntem uygulanan plazma sürüm voltajının artırılması olarak görülmektedir. Ancak, bu durumda sistemi sürmek için ihtiyaç duyulacak enerji miktarında da artış olacağı dikkate alınmalıdır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

- α : Hücum açısı
- C : Veter uzunluğu
- C_L : Kaldırma kuvveti katsayısı
- f : Plazma sürüm frekansı
- Re : Reynolds sayısı
- x : Eksen

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Corke, T. C., Enloe, C. L., Wilkinson, S. P., 2010, "Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42, pp.505-529.
- Debien, A., Benard, N., Moreau, E., 2012, "Streamer inhibition for improving force and electric wind produced by DBD actuators", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 45, No. 215201, pp. 1-13.
- Güler, A. A., Seyhan, M., Akansu, Y. E., 2018, "Effect of signal modulation of DBD plasma actuator on flow control around NACA 0015", Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 38, pp.85-105.
- Han, M., Li, J., Niu, Z., Liang, H., Zhao, G., Hua, W., 2015, "Aerodynamic performance enhancement of a flying wing using nanosecond pulsed DBD plasma actuator", Chinese Journal of Aeronautics, Vol.28, pp.377-384.
- Kotsonis, M., Pul, R., Veldhuis, L., 2014, "Influence of circulation on a rounded-trailing-edge airfoil using plasma actuators", Experiments in Fluids, Vol. 55, No. 1772, pp. 1-14.
- Orlov, D. M., 2006, "Modelling and simulation of single dielectric barrier discharge plasma actuators", PhD Thesis, University of Notre Dame.
- Sun, M., Yang, B., Peng, T., Lei, M., 2016, "Optimum duty cycle of unsteady plasma aerodynamic actuation for NACA0015 airfoil stall separation control", Plasma Science and Technology, Vol. 18, pp.680-685.
- Taleghani, A. S., Shadaram, A., Mirzaei, M., 2012, "Effects of duty cycles of the plasma actuators on improvement of pressure distribution above a NACA0014 airfoil", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. 40, pp.1434-1440.
- Zhao, G., Li, Y., Liang, H., Han, M., Wu, Y., 2015, "Flow separation control on swept wing with nanosecond pulse driven DBD plasma actuators", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 28, pp.368-376.



TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN TROMBE DUVARLARDA KULLANIMI ÜZERİNE BİR İNCELEME

¹Necla Seval BAYRAM , ²Ahmet Vefa ORHON 

^{1,2}Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

¹Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli, TÜRKİYE

¹nsevalerdem@gmail.com, ²vefa.orhon@deu.edu.tr

(Geliş/Received: 25.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 12.02.2020)

ÖZ: Bu çalışmada faz değiştiren malzemelerin (FDM) ısı depolama sistemlerinden biri olan trombe duvarlarıyla (TD) kullanımının enerji verimliliğine getirdiği katkıların belirlenmesi ve faz değiştiren malzemeli trombe duvar tasarımında göz önüne alınması gereken kriterlerin ortaya konması amaçlanmıştır. Çalışmada, FDM ve TD ile ilgili genel tanımlar verildikten sonra yerli ve yabancı literatür taraması yapılarak günümüze kadar yapılan örnekler incelenip karşılaştırmaları yapılmıştır. İncelenen örneklerde FDTD'nin özellikleri, detayları ve uygulama yöntemleri belirtilerek yapı endüstrisine ve enerji verimliliğine getirdiği katkılar irdelenmiştir. FDTD uygulamasının geleneksel yöntemlerden farklı olarak duvarın masif kütlesini hafiflettiği ve FDM'nin duvara gizli ısı depolama özelliği kazandırarak ısıtma ve soğutma uygulamalarında verimliliği artırdığı görülmüştür. TD'nin basit uygulama şemaları olmasına karşın tam anlamıyla verim almak konusunda bazı güçlükler söz konusudur. Detaylarına karar verilen bir FDTD'nin yıl boyunca çevresel koşullara karşı ne şekilde cevap vereceğini tahmin etmek zor olabilmektedir. Buna göre FDTD'yi tasarlamadan önce sisteme etki edecek kriterleri göz önüne alarak duvarın karşılaşılabileceği olası sorunları görmek verimliliği artıracaktır. Belirli bir iklim bölgesinde tasarlanması planlanan FDTD sisteminde en verimli sonuca ulaşmak bu kriterlerin optimizasyonu ile mümkündür.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren malzemeler, trombe duvarlar, gizli ısı depolama

Investigation of Phase Change Materials on the Use of Trombe Walls for Thermal Energy Storage Systems

ABSTRACT: This study is conducted to determine the contribution of phase change materials (PCM) and trombe walls (TW) for energy efficiency and it is aimed to identify the criterias that is required during design process. In this study, after giving general definitions about PCM and TW, domestic and foreign literature is searched and application examples are analyzed and compared. It is observed that phase changing trombe wall (PCTW) application alleviated the heavy mass of the wall unlike the traditional methods and PCM increased the efficiency of heating and cooling applications by providing latent heat storage to the massive wall. Although TW has simple application schemes, there are some difficulties in achieving full efficiency. It can be confusing to predict how a PCTW, whose details are decided, will respond to environmental conditions throughout the whole year. Accordingly, considering the criteria that will affect the system before designing the PCTW, it will increase efficiency to see possible problems that the wall may face. In the PCTW system, which is planned to be designed in a specific climate zone, the most efficient result can be achieved by optimization of these criterias.

Key Words: Phase change materials, trombe walls, latent heat storage

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda dünyada yaşanan enerji krizi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Dünyadaki enerji tüketiminin %30-40'nın binalarda yapıldığı ve bu oranın % 80-85'inin iklimlendirme uygulamalarında kullanıldığı düşünülmektedir (Yılmazoğlu, 2010, Konuklu ve Paksoy, 2011). Bu büyük miktardaki enerji ihtiyacı, binalarda pasif sistemler adı verilen iklimlendirme ve enerji depolama yöntemleri kullanılarak karşılanabilmekte ve masraflar en aza indirgenebilmektedir (Doğan ve Pırasacı, 2009). Enerji depolama sistemlerinin gelişimi, yeni enerji kaynaklarının gelişimi kadar önemlidir. Enerji depolaması, enerjiyi uygun şekilde geri kazanıp istenen enerji formuna dönüştüren sistemdir. Bu sistem, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kullanımını artırmanın en iyi yoludur. Termal enerji depolama (TED) teknikleri ısıtma ve soğutma sistemlerinde, enerjinin daha etkin ve verimli kullanımını sağlayarak önemli ölçüde tasarrufu sağlamaktadır. Bu durum fosil yakıtların daha az kullanımı neden olmakta ve çevre ile dost iklimlendirme teknikleri geliştirme olanağını sunmaktadır. Yerel yenilenebilir enerji kaynaklarının, termal enerji depolaması ile birlikte kullanımı sonucunda çok verimli sistemler tasarlanabilir (Dincer ve Rosen, 2002). Binalarda ısıtma amaçlı kullanılan ve 'güneş duvarları' olarak da adlandırılan TD, yenilenebilir enerji kaynağını depolayan pasif sistemlerden biri olarak uzun yıllardır uygulanmaktadır.

Bu bağlamda yapıların iklimlendirme ihtiyaçlarının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu arayışlar sonucunda çevresel değişkenlere cevap veren ve akıllı malzemeler olarak adlandırılan yeni nesil malzemeler ortaya çıkmıştır. Akıllı malzemeler fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkiler gibi dış uyaranlara karşı çevreye akıllı tepkiler vererek değişime uğrayan, nitelik değiştiren veya enerji dönüşümü yapan malzemeler olarak yapı uygulamalarında yerini almıştır (Mohamed, 2017). Akıllı malzemelerin mimarlıkta kullanmaya başlanmasıyla, ahşap ve taş gibi konvansiyonel malzemelerin standart özelliklerini kabul etmek ve getirdiği sınırlamalar çerçevesinde tasarım yapmak yerine, gereksinim duyulan ihtiyaca göre malzeme seçimi gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Böylece malzeme tasarımı değil, tasarım malzemeyi yönetmeye başlamıştır. Bu sayede geleneksel malzemelerin getirdiği masif kütlenin yerini hafif yapı sistemli akıllı binalar almış ve mimarlara spesifik sorunlara spesifik cevaplar veren yeni yapı elemanları tasarlama imkânı sunulmuştur. Standart yapı malzemeleri bina yüklerine dayanacak şekilde statik konumda iken, akıllı malzemeler enerji tüketimine tepki üretmeleri bakımından dinamik yapıdadır. Faz değiştiren malzemeler de (FDM) pasif yapı sistemlerinde tercih edilen akıllı malzemelerden biridir. Genel olarak FDM'lerin gizli ısı depolama özelliği sayesinde, yapıların ısıtma ve soğutma uygulamalarında verimliliğinin artırılması mümkündür. FDM'nin TD ile birlikte kullanımı sayesinde konvansiyonel ağır ısı kütlesi hafifletilebilmektedir. Çoğunlukla duvar, döşeme, tavan, çatı uygulamalarında yer alan FDM çalışmalarında, genel olarak FDM'lerin kapsüllenmesi ve termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde odaklanılmıştır. Ancak FDTD sistemleri ve çözümlenmeleri konusundaki çalışmalar zayıf kalmış ve deneysel boyuttan öteye gidememiştir. FDM'lerin TD'ler ile kullanımıyla duvara gizli ısı depolama özelliği kazandırılarak iklimlendirme uygulamalarında verimlilik artırılabilen ve masif duvar kütlesi hafifletilebilmektedir. Ancak bu, TD+FDM detaylarına doğru karar vermekle ve FDTD'nin çevresel koşullara ne şekilde tepki vereceğini öngörmekle mümkündür.

Simgeler ve Kısaltmalar		
FDM	Faz Değiştiren Malzeme	
TD	Trombe duvar	
FDTD	Faz değiştiren malzemeli trombe duvar	
Qd	Duyulur ısı	(kj)
md	Kütle	(kg)
c	Özgül ısı	(kj/kgK)
ΔT	Sıcaklık değişimi	(K)
Qg	Gizli ısı	(kj)
mFDM	FDM kütlesi	(kg)
H	Gizli ısı	(kj/kg)
k	Termal iletkenlik	(W/mk)
ρ	Yoğunluk	(kg/m ³)
Cp	Özgül ısı kapasitesi	(J/kg K)
θ	Sıcaklık	(°C)
Δx	Termal simülasyonlar için düğüm aralığı	(m)
Δt	Termal simülasyonların zaman adımı	(s)
i, i+1	Simülasyon ve bitişik düğüm	
j, j+1	Simüle edilmiş ve ardışık zaman adımı	

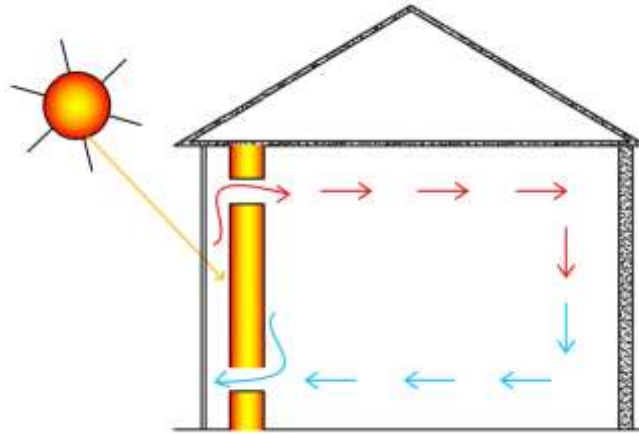
AMAÇ VE YÖNTEM (AIM AND METHOD)

Bu çalışmanın amacı son 20 yılda FDTD alanında yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarının sonuçlarını inceleyerek sürdürülebilir mimarlığa katkısını irdelemek ve FDTD tasarımında göz önüne alınması gereken kriterleri belirlemektir. Buna göre bu çalışma kapsamında ele alınan örnekler, bulundukları çevre faktörlerine ve FDM seçimine göre incelenmiş ve tasarımdan önce göz önüne alınması gereken kriterler belirlenmiştir. Buna göre tasarlanacak olan FDM sisteminde en verimli sonuç bu kriterlerin optimizasyonu ile elde edilebilecek ve bu yolla FDTD tasarımının iyileştirilmesi mümkün olabilecektir. FDTD sistemini uygun şekilde karakterize edebilmek için FDM kullanımı sayısal olarak analiz edilmelidir. Tüm bina enerji simülasyon araçları, mühendislerin ve tasarımcıların FDTD'lerin termal davranışlarını analiz etme yeteneğini artırabilir. Bina enerji simülasyonunun kullanımı, FDM'li sistemlerin performansını değerlendirmek ve analiz etmek için önemli bir adımdır. Bu araçlar, FDM'lerle pasif olarak geliştirilmiş binanın dinamik termal davranışını sayısal olarak analiz edebilir. Bugün, farklı uygulamalar için dinamik enerji simülasyonu gerçekleştirebilen birçok onaylanmış bina enerji simülasyon programı vardır ancak FDM'li yapıların enerji performansını ve iç mekan konforunu analiz edebilen onaylanmış az sayıda bina enerji simülasyon programı vardır. TRNSYS, Energy Plus, ESP-r, RADCOOL bu programlardan bazılarıdır (Saffari ve diğ. 2017).

TROMBE DUVARLARI (TROMBE WALLS)

Güneş radyasyonu ile açığa çıkan ısı enerjisinin doğal konveksiyon yoluyla yapı içerisine alınması prensibine dayanarak çalışan TD için en önemli parametre ısı depolama kapasitesidir. Pasif güneş sistemlerinden biri olan TD bir kolektör sistemi olup, koyu renge boyanmış bir duvar ve duvardan belli bir mesafeye yerleştirilmiş cam yüzeyden oluşmaktadır (Karaman, ve diğ. 2016). Duvar güney cepheye

konumlandırılmakta ve kısa dalgalarla camdan geçen ışınlar, absorbe edici olarak çalışan duvar tarafından emilerek depolanmaktadır. Cam ile duvar arasındaki boşlukta ısınan hava genişterek yoğunluğu azalmakta ve yükselerek üst menfezden iç mekâna geçmektedir. İç mekândaki soğuk hava ise alt menfezden kanala çekilmekte, kanalda tekrar ısınarak yükseldikten sonra üst menfezden iç mekâna aktarılmaktadır. Bu şekilde tekrar eden bir hava dolaşımı ile iç mekânda ısı konfor sağlanmış olmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. TD çalışma şeması

Figure 1. TW working scheme

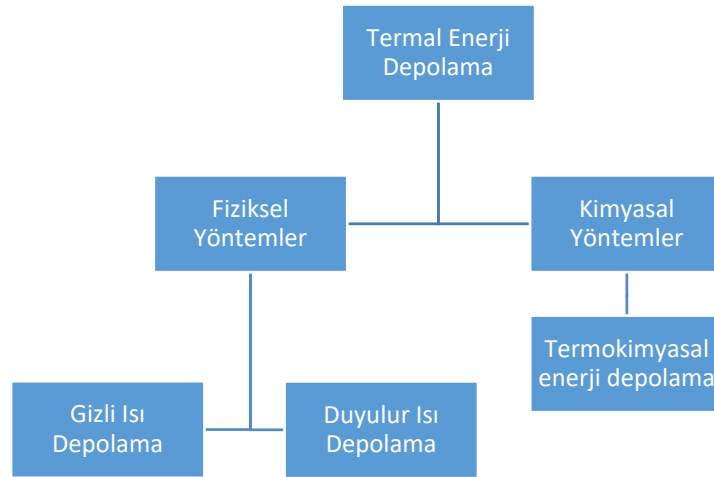
Kış aylarında, gelen ısı gece boyunca duvarda emilmekte ve depolanmaktadır. Menfezlerin doğru kullanımı baca ve iç mekân arasındaki hava değişimlerini daha da artırabilmektedir (Ji, ve diğ., Omrany, ve diğ., 2016). Yaz aylarında, menfezler damperlerle kapatılarak, ısınma etkileri önemli ölçüde etkisizleştirilmektedir. (Krüger ve Matoski, 2013). Duvar ve cam arasındaki boşluk, camdan ısı kaybını önlemek açısından önemli bir işleve sahiptir. Buna ek olarak, baca genişliği konveksiyon sürecini etkileyebileceği için önemli bir ölçüttür. Baca için uygun genişliğin 3 ila 6 cm arasında değiştiği öne sürülmüştür (Anderson, 1985).

Klasik TD sisteminin en belirgin avantajları uygulama kolaylığı, iç mekânın olağandışı koşullardan korunması, dış ortam sıcaklığından etkilenmemesi ve güneşin zararlı ışınlarından korunmasıdır (Karaman ve diğ. 2016:175). Sistemin başlıca olumsuzlukları ise gece ve uzun süre bulutlu dönemlerde ısı kütlenin geç ısınmasıdır. Duvarın iç mekândan daha soğuk olduğu böyle bir durumda, üst havalandırma kanalından alt havalandırma kanalına ters hava dolaşımı olmakta ve oda sıcaklığında aşırı düşüş gözlemlenmektedir. Bu duruma 'ters ısı akısı' denmektedir (Saadatian ve diğ., 2012). Buna ek olarak yeterli bir depolama kapasitesi için ağır bir kütle ve büyük duvar hacmi gerekmekte, bu durum da yapım uygulamaları ve iç mekân kullanımı açısından çeşitli sınırlama ve zorlukları beraberinde getirmektedir (Zalewski ve diğ., 2012, Chaichan ve Abaas, 2015) Yaz dönemlerinde ise ısının denetlenememesi ve güneş yoğunluğunda periyodik değişimler olması sıcaklık dalgalanmalarına sebep olmaktadır. Bu da iç mekân sıcaklığını konfor aralığında tutmayı zorlaştırmaktadır (Saadatian ve diğ., 2012).

TD gibi pasif sistemlerde güneş enerjisi duyulur veya gizli ısı olarak depolanabilmektedir. Ancak birim kütle başına enerji depolama kapasitesinin yüksek olması sebebiyle ısı enerjisinin gizli ısı olarak depolandığı sistemler çok daha makul bir seçenektir. TD'nin depolama etkinliğini artırmak, gizli ısı depolama özelliğine sahip bir malzemenin kullanılmasına bağlıdır. Bu da mikrokapsülleme veya makrokapsülleme yoluyla birçok yapı elemanına eklenerek ısı enerjisini depolayan faz değiştiren malzemeler ile mümkündür.

ISI DEPOLAMA YÖNTEMLERİ (HEAT STORAGE METHODS)

Termal enerjinin depolanması, enerji tüketimini azaltarak verimliliği sağlayan ve enerji sistemlerinin etkinliğini artıran yöntemlerden biridir. Bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamı ısı enerjisini ortaya çıkarmaktadır. Isı enerjisi bu moleküllerin ve atomların titreşimi sonucu oluşmaktadır. Maddenin iç enerjisindeki bu değişim duyulur ısı, gizli ısı, tepkime ısısı veya bu enerjilerin birleşimi şeklinde (Şekil 2) depolanabilmektedir (Yılmazoğlu, 2010).



Şekil 2. Isı Depolama Yöntemleri

Figure 2. Heat Storage Methods

Duyulur Isı Depolama (Sensible Heat Storage)

Ergime veya buharlaşmanın olmadığı zamanlarda, maddenin sıcaklığını değiştirmek için gereken ısı miktarıdır. Maddenin sıcaklığında farklılık yaratmasına karşın, halini değiştirmemektedir (Benli ve Durmuş, 2007). Günümüzde en çok tercih edilen bu depolama yönteminde; beton, seramik, su, hava, kayaç, kum, tuğla ve toprak gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bunun nedenleri; bu malzemelerin kolay elde edilebilirliği ve düşük maliyetleri olarak sıralanabilmektedir (Ceylan ve diğ., 2017). Duyulur ısı depolama yönteminin en büyük avantajı çok sayıda depolama imkânı sağlanabilmesi ve geri kazanma çevriminin gerçekleşmesi, en büyük dezavantajı ise ihtiyaç duyulan depo hacminin çok büyük olmasıdır (Konuklu ve diğ., 2015). Denklemde de görülebileceği gibi malzemenin yeterli bir duyulur ısı depolama kapasitesine ulaşması için büyük bir sıcaklık değişimine veya daha fazla kütleye sahip olması gerekmektedir (Zalba ve diğ., 2003).

$$Q_d = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

Duyulur ısı depolama yönteminde malzemede aranan en büyük özellikler; düşük maliyet, kolay elde edilebilirlik, yüksek ısı kapasitesi, alev almazlık ve uzun ömürlülük olması ve korozyon ve zehirli olmamasıdır. Sıvı sistemlerde su, erimiş tuzlar ve hava, akışkan sistemlerde ise en çok çakıl taşı tercih edilmektedir (Günerhan, 2004).

Termokimyasal Enerji Depolama (TKED) (Thermochemical Energy Storage)

Tersinir bir endotermik kimyasal reaksiyonda kimyasal bileşiklerin ayrışması ve sentezlenmesi sırasında açığa çıkan ısı enerjisinin kimyasal bağlarda depolanması prensibine dayanmaktadır. TKED

sistemleri sabit sıcaklıkta, uzun süreli ve stabil depolamada ve geniş sıcaklık aralıklarında yüksek enerji yoğunluğu avantajına sahiptir (Zeinelabdein ve diğ., 2018).

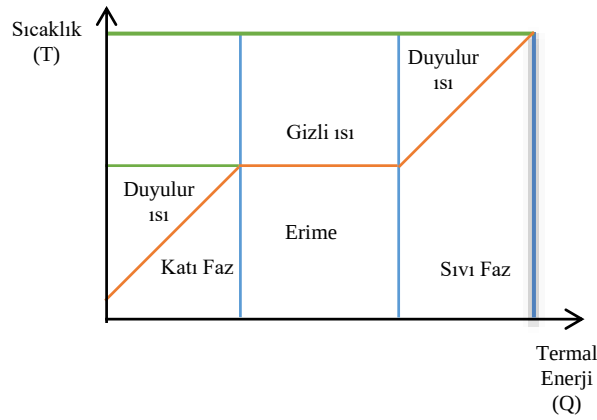
Gizli Isı Depolama (Latent Heat Storage)

Gizli ısı, sabit sıcaklıkta termodinamik bir sistem tarafından serbest bırakılan veya emilen ısıdır. Uygun sıcaklık aralığında maddenin durumunun değişmesiyle sistemin sıcaklığının sabit kaldığı faz geçiş sürecidir. Bu faz değişimi sırasında ortaya çıkan bu ısı depolanabilmektedir. Bir katıyı eritmekle veya bir sıvının dondurulmasıyla ilişkili olan gizli ısı, füzyon ısısı olarak adlandırılır. Bir sıvının veya bir katı veya yoğunlaşan buharın buharlaşmasıyla ilişkili olan gizli ısı, buharlaşma ısısı olarak adlandırılır (Mishra ve diğ., 2015).

Gizli ısı depolama yöntemleri için gerekli depo hacmi, duyulur ısıya göre çok daha küçük, depolama kapasitesi ise çok daha büyüktür. FDM'ler ile daha düşük sıcaklık ve hacim değişimi ile daha fazla ısı depolanabilmekte böylece duyulur ısıya göre daha fazla verim alınabilmektedir (Günerhan, 2004). FDM 'lerin birim kütlelerinin ısı depolama kapasiteleri daha yüksektir ve faz değiştirme sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanma için uygundur (Zalba ve diğ., 2003).

$$Q_g = m \cdot FDM \cdot H \quad (2)$$

Şekil 3'te duyulur ve gizli ısı karşılaştırılması yapılmıştır. Duyulur ısı depolama ile enerji kaynağı doğrusal sıcaklık artışı göstermektedir. Bununla birlikte, gizli ısı depolama ile enerji kaynağı, FDM'nin erime sıcaklığına ulaşılan kadar bir sıcaklık artışına neden olur. Malzeme tamamen eriyene kadar sıcaklık sabit kalarak faz değişimi gerçekleşir ve bu noktadan sonra sıcaklık tekrar artar (Kunkel ve diğ., 2018).



Şekil 3. Gizli Isı- Duyulur Isı Karşılaştırma

Figure 3. Latent Heat - Sensible Heat Comparison

Gizli ısı depolaması katı-sıvı, sıvı-gaz, katı-gaz ve katı-katı faz dönüşümleri ile gerçekleştirilebilir, ancak pratikte sadece katı-sıvı ve katı- katı faz dönüşümü kullanılmaktadır. Katı-gaz ve sıvı-gaz geçişi daha yüksek bir gizli füzyon ısısına sahiptir, ancak faz geçişindeki büyük hacim değişiklikleri, kapsülleme problemlerine yol açmakta ve termal depolama sistemlerinde uygulama zorluğu çıkmaktadır (Sharma ve Sagara, 2005).

Katı-sıvı faz geçişinde uygun bir malzeme seçilirse büyük miktarda enerji depolanabilmektedir. Ayrıca katı-gaz ve sıvı-gaz faz dönüşümüne oranla hacim değişimi daha küçüktür. Organik FDM'lerden parafin ve parafin olmayan (yağ asitleri, glikoller ve alkoller) daha geniş sıcaklık çalışma aralığı, daha az süper soğutma ve ayrıştırma etkileri sebebiyle yapı uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir (Sharma ve Sagara, 2005).

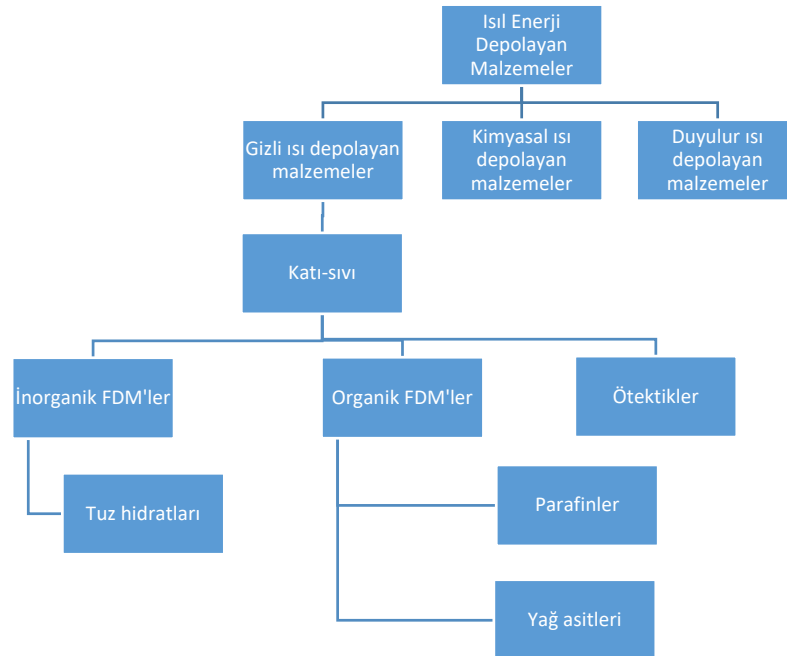
Katı-katı faz geçişinde ise bazı özellikler katı-sıvı faz geçişleriyle aynıdır ancak faz değişim entalpileri daha düşüktür. Bununla birlikte katı-katı geçişlerde malzeme bir kristalden diğerine dönüşürken daha küçük hacim değişikliğine uğramaktadır (Sharma ve Sagara, 2005).

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (PHASE CHANGE MATERIALS)

Faz Değiştiren Malzemeler (FDM) faz değişimleri esnasında ısı enerjisiyi gizli ısı şeklinde depolayarak enerji korunumu sağlayan akıllı malzemelerden biridir. Gizli ısı depolama yöntemleri için gerekli depo hacmi, duyulur ısıya göre çok daha küçüktür (Konuklu ve Paksoy, 2011).

FDM'ler kendi iç sıcaklıklarını artırmadan ısıyı absorbe etmek ve salmak için faz geçişi olgusunu kullanan malzemelerdir. Bir mekânda sıcaklık FDM'nin erime noktasını aştığında, bu sıcaklık FDM tarafından kullanılır ve malzeme faz değiştirmeye başlar ve erir. Sıcaklık düşmeye başladığında ise FDM faz değiştirerek katı formuna dönüşmeye başlar ve bu esnada depoladığı ısıyı açığa çıkarır. Bu sayede iç mekân sıcaklığı konfor aralığında sabitlenmiş olur (Casini, 2014). FDM'nin fonksiyonel olabilmesi için ortalama sıcaklığın FDM'nin erime noktasının üzerinde olması ve faz değişimini başlatması gerekmektedir. Bu yüzden FDM seçiminde erime noktası ve iklim koşulları göz önüne alınması gereken kriterlerden biridir. Türkiye ölçeğinde konuyu ele alırsak, Antalya gibi yaz aylarının çok sıcak geçtiği iklim bölgelerinde erime noktası çok düşük FDM seçimiyle gece boyunca iç mekân sıcaklığını konfor aralığında tutmak çok zor olacak ve yaz aylarında yetersiz kalacaktır. Veya Erzurum gibi kış aylarının sert geçtiği bölgelerde erime noktası çok yüksek FDM seçimiyle, depolanan sıcaklık miktarı gün boyunca düşecektir. Yapılan çalışmalar çerçevesinde, daha sıcak iklim bölgelerinde yüksek erime sıcaklığına sahip FDM'lerin, daha soğuk iklim bölgelerinde ise düşük erime sıcaklığına sahip FDM'lerin verimli olduğunu görülmektedir.

Organik, inorganik ve ötektik karışımlar olmak üzere 3'e ayrılan FDM'ler arasında yalnızca insan konfor sıcaklığı arasında erime noktasına sahip olanlar yapı uygulamalarında kullanılabilir (Şekil 4). İnsan konfor sıcaklığı, yapılan etkinliğin düzeyine göre değişiklik göstermekle birlikte, normal giysiler içerisinde oturarak çalışan ya da yaşayan insan grubu için hedef alınan sıcaklık aralığıdır. Genel olarak bu değer 20-26°C'dir.



Şekil 4. FDM Çeşitleri

Figure 4. PCM Types

Organik FDM'ler: Parafin ve yağ asitleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Düz zincir formunda olan parafinlerin karbon uzunluğu arttıkça erime sıcaklıkları ve faz değişim entalpileri de artmaktadır. Her bir çeşidi birbirine yakın özellikler gösteren parafinlerin erime noktaları ise -5 ile 60°C arasında

değişmektedir. Yağ asitleri ise her biri farklı özellikler gösteren zengin bir malzeme çeşidine sahiptir (Sharma ve diğ., 2009).

Yapı uygulamalarında yaygın olarak kullanılan organik FDM'lerin en büyük avantajları geniş sıcaklık aralığı, faz değişimi esnasında düşük hacimsel değişiklik, yapı elemanlarıyla uyum, geri dönüşüm, aşırı soğuma göstermeme ve yüksek dayanım gibi özellikleridir (Baetens ve diğ., 2010). Katı halde düşük ısı iletkenliği, düşük ısı depolama hacmi, yanıcılık, yüksek maliyet ise bu malzemelerin en önemli dezavantajları arasındadır (Pasupathy ve diğ., 2008)

İnorganik FDM'ler: Tuz hidratları ve klatrat hidratlarını içeren inorganik maddeler, yüksek gizli ısı depolama kabiliyeti ve yüksek ısı iletkenliğe sahip, düşük maliyetli malzemeler olmasına karşın; korozif olması, bozunmaya uğraması ve hidrat kaybı yaşaması gibi dezavantajlara sahiptir (Yılmazoğlu, 2010). En yaygın inorganik FDM'ler $K_2HO_4.6H_2O$, $KF.4H_2O$, $K_2HO_4.4H_2O$, $LiBO_2.8H_2O$, $FeBr_3.6H_2O$, ve $CaCl_2.6H_2O$ 'dır (Abuelnuor ve diğ., 2018).

Ötektik FDM'ler: Homojen bir şekilde eriyen ve donan, 2 veya daha fazla bileşenin bir kombinasyonudur. Ötektik FDM'ler, mümkün olan en düşük erime sıcaklığını sağlayan malzeme bileşenlerinden oluşmaktadır. En yaygın ötektik FDM'ler, Trietiloletan + su + üre, Trietiloletan + üre, Mg (NO_3) $3.6H_2O$ + NH_4NO_3 , Mg (NO_3) $3.6H_2O$ + $MgCl_2$ 'dir (Abuelnuor ve diğ., 2018). Ötektik FDM'lerin, tek bir erime ve donma sıcaklığına ve yüksek hacimsel enerji depolama yoğunluğuna sahip olması gibi avantajları vardır. Bu özelliğine rağmen kullanılabilirliği sınırlıdır. (Memon, 2014).

FDM'lerin Kapsüllemesi (PCM Encapsulation)

FDM'ler kendi başına kullanıldıkları gibi mikrokapsülleme, makrokapsülleme, malzemeye doğrudan birleştirme ve daldırma yöntemleriyle de uygulanabilmektedir.

Malzemeye doğrudan birleştirme: Üretim aşamasında, FDM'nin, yapı malzemesinin içerisine direk karıştırıldığı yöntemdir. Uygulama aşamasında fazla donanım ihtiyacı olmaması yöntemin maliyetini düşürmektedir ancak, FDM'nin malzeme içerisinde homojen dağılmaması ve faz değişimi esnasında FDM'nin akma yaparak dışarı sızması gibi dezavantajları vardır.

Daldırma: Yapı malzemesinin ergimiş FDM'nin içerisine daldırıldığı, FDM'nin kapiler hareketle malzemenin gözeneklerine nüfuz etmesinin sağlandığı yöntemdir. (Khudhair ve Farid, 2004)

Mikrokapsülleme: Bu işlem ile makrokapsülleme arasındaki en temel fark, kabuk boyutları ve şekilleridir (Liu ve diğ., 2018, Akeiber ve diğ., 2016, Alam ve diğ., 2015). Büyüklük bazında değerlendirirsek, kabuk çapı 1 mm veya 1 cm'den büyük olanlar makrokapsülleme, küçük olanlar ise mikrokapsülleme olarak nitelendirilmektedir. (Pons ve diğ., 2014, Hawlader ve diğ., 2003). FDM'ler nispeten düşük bir termal iletkenliğe sahiptir ve prensipte bu sorunu çözmenin yolu FDM'nin iletim yoluyla ısı aktarma mesafesinin kısaltılmasıdır. Bu işlem, malzemenin nispeten küçük kapsüller içine sarılmasıyla yapılmaktadır. Bu yöntemde FDM parçacıkları, uygulanacağı malzemeyle uyumlu olması şartıyla, ince ve yüksek moleküler ağırlıklı polimerik filmle kaplanmaktadır (Heinz ve Streicher, 2005). Mikrokapsülleme, FDM'lerin katı veya sıvı olmasından bağımsız olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Mikrokapsüller, parafinik FDM çekirdeğini ayrı ayrı sert bir polimerik kabuk ile saran, çapı 1 mm'den küçük ve çapı 1 μm 'den büyük olan (genel olarak 5-10 μm), katı veya sıvı parçacıklardır (Socaciu, 2012, Chen ve diğ., 2017, Milian ve diğ., 2017). Mikrokapsülleme işleminin en önemli avantajı, FDM'lerin yapı malzemesiyle doğrudan kullanımında, uygulama aşamasında sızıntı yapmasını önlemesidir. Bu işlem, sıvıyı katı formda tutmakta ve faz geçişleri sırasında hacim değişimi sağlamaktadır (Beyhan ve diğ., 2016). Mikrokapsüllemenin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Şekil ve boyut esnekliği sayesinde uygulamada kolaylık sağlar (Sharma ve diğ., 2015).
- Düşük maliyette daha kolay üretim sürecine sahiptir. (Khudhair ve Farid, 2004, Shi ve diğ., 2014, Regin ve diğ., 2008)
- Mikrokapsül kabukları FDM sistemlerinin mekanik dayanımını artırır (Parameshwaran ve diğ., 2012, Regin ve diğ., 2008, Vicent ve Silva, 2014)
- Makrokapsülleme: FDM'nin tüp, panel, küre, poşet gibi bir malzemeye doldurulduktan sonra yapı malzemesine entegre edildiği yöntemdir. Bu kaplar doğrudan ısı değiştiricileri olarak

kullanılmakta veya yapı elemanlarına eklenebilmektedir. Makrokapsülleme işlemi güvenilir bir uygulamadır ve yapı elemanının ve malzemesinin çalışmasını engellememektedir (Cabeza ve diğ., 2007). Makrokapsüllemenin uygulama aşamasında getirdiği sınırlamalar şu şekilde sıralanabilir:

- Düşük yüzey / hacim oranı nedeniyle ısı transfer verimliliğini düşürür (Chandel ve Agarwal, 2017)
- Kabuk içerisinde FDM dağılımı, katılaşması ve erimesi homojenlik göstermez. (Alam ve diğ., 2015, Pasupathy ve diğ., 2008);
- Uygulama ve kullanım aşamasında hasar görme eğilimi gösterir. (Memon, 2014, Kalnæs ve Jelle, 2015, Lee ve diğ., 2015).

FDM Seçim Kriterleri (PCM Selection Criterias)

FDM'ler kullanıldıkları sistemlerde, yapıların ısıtma ve soğutma yüklerini azaltıp, sıcaklık dalgalanmalarını en aza indirmeleriyle bilinir. Ancak FDM'lerin bu etkinliklerini sürdürmeleri bazı kriterlerin göz önünde bulundurulmasıyla mümkündür.

FDM seçiminde malzeme konsantrasyonu ve iklime uyum en önemli kriterler arasındadır. Yapı uygulamalarında kullanılacak FDM yüksek bir gizli ısı, yüksek ısıl iletkenlik, yüksek özgül ısı kapasitesi ve küçük hacim değişimine sahip olmalıdır. Bunun yanında aşındırıcı (korozif) ve toksik olmamalı, bozunmaya uğramadan eski haline dönebilmeli ve aşırı soğuma özelliği göstermemelidir (Konuklu ve Paksoy, 2011, Ghoneim ve diğ., 1991).

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELİ TROMBE DUVARI (FDTD) (TROMBE WALL WITH PHASE CHANGE MATERIALS)

Son on yıllar boyunca, TD'nin verimliliğini artırmak ve yaz mevsiminde aşırı ısınma gibi olası sorunları ortadan kaldırmak adına sistemin temel tasarımında çeşitli değişiklikler ve eklemeler yapılmıştır. TD'nin makul ısı depolama kapasitesini sağlamak için sunulan çözümler arasında duvar hacmini artırmak, su bidonları kullanmak (Tyagi ve Buddhi, 2007, Yang ve diğ., 2011), yalıtımlı kompozit duvar inşa etmek (Ji ve diğ., 2010, Marinosci ve diğ., 2011, Zhai ve diğ., 2011), cam katmanında düşük yoğunluklu akışkan kullanmak (Sadineni ve diğ., 2011, Tunç ve Uysal, 1991) ve güneş ışınlarını denetlemek amacıyla duvarları zigzag tasarlamak yer almaktadır. Bu yöntemler Saadatian ve diğ.'nin. (2012) yaptıkları çalışmada detaylı olarak verilmiştir. Ancak bu duvarları oluşturmak, geniş kullanım alanları ve uygulama zorluklarını beraberinde getirmektedir. Bu zorlukları ortadan kaldırmak üzere TD'nin gelişim sürecindeki son adım bu duvarlarda FDM kullanımı olmuştur.

FDTD, birim kütle başına depolanan ısı miktarının etkin biçimde artışının sağlanması, mevcut sistemlerle kolayca bütünleştirilebilmesi, duvar kalınlıklarının azaltılabilmesi ve uygulama alanını diğer kullanımlar için optimize edebilmesi gibi nedenlerle klasik TD'ye karşı ideal bir seçenek olarak görülmektedir. Bu faktörler hem yeni binaların inşasında hem de tadilat uygulamalarında düşük yapı maliyeti ve uygulama kolaylığı sunmaktadır. Gün boyu gelen güneş ışınımı FDM'nin ergimesine neden olmakta ve böylece güneş enerjisi gizli ısı şeklinde FDM içerisinde depolanmaktadır. FDTD'nin çalışması, gece boyunca duvardan ısının çekilerek binaya verilmesi ve FDM'nin yeniden katılaşması prensibine dayanmaktadır. Sonuç olarak FDTD, klasik TD alternatiflerine göre daha hafiftir, daha az hacim işgal eder ve ısıl sığası daha yüksektir. Genel olarak TD'de FDM olarak tuz hidratları ve hidrokarbonlar kullanılmaktadır (Tyagi ve Buddhi, 2007).

FAZ DEĞİŞTİREN TROMBE DUVARLARINA YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALAR (STUDIES FOR PHASE CHANGING TROMBE WALLS)

Manz ve diğ.'nin (1997) İsviçre Zürih Havaalanı'nda yaptıkları çalışmada içten dışa doğru cam bölme, şeffaf yalıtım malzemesi, cam bölme, hava boşluğu ve FDM içeren yarı saydam cam kaptan oluşan bir TD sisteminin analizini yapmayı hedeflemiştir. (Şekil 5). Yaz aylarında gündüzleri aşırı

ısınmayı önlemek için, dış yüzeyinde yüksek güneş yansıtıcılığı bir stor perde kullanılmıştır. Kış aylarında ise geceleri, stor perde, ısıtma mevsimindeki ısı kayıpları azaltılacak şekilde kapatılmaktadır. Deneylerde FDM olarak 26.5°C erime noktasına ve 192 kJ/kg-1 gizli ısı depolama kapasitesine sahip tuz hidrati kullanılmıştır. FDM'lerin doldurulduğu cam blokların, ısı depolamasının yanında, güneş ışığını geçirerek iç mekânda aydınlatma yapması da amaçlanmıştır. Düşük sıcaklıklarda FDM katı haldeyken, güneş ışığı iç mekânda dağılmakta, sıvı haldeyken ise direk geçiş yapmaktadır. FDM tarafından depolanan güneş enerjisi daha sonra iç mekânı ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Çalışma 4 adımdan oluşmaktadır:

i. Malzemelerin termal ve optik modellemesi: Malzemelerin optik özellikleri dalga boyuna bağlıdır. Bu sebeple çalışmada güneş ışınımı 20 dalga boyuna bölünmüştür. Bu aşamada FDM'nin ve şeffaf yalıtım malzemesinin termal ve optik özelliklerinin kapsamlı analizi yapılmış ve Monte Carlo ile simüle edilmiştir.

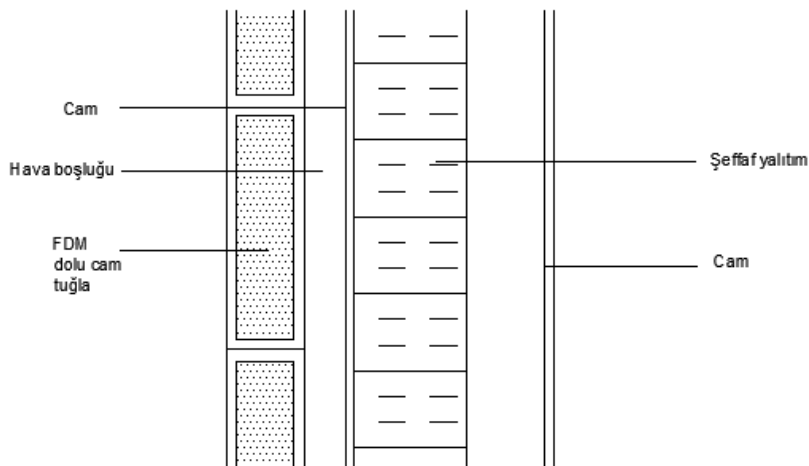
ii. Optik malzeme özelliklerinin deneysel incelenmesi: Spektrometre kullanarak FDM'siz cam kap, FDM'li cam kap ve FDM'nin optik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir.

iii. Prototipin deneysel incelenmesi: Dış mekâna kurulan prototipin gerçek koşullarda deneysel ölçümleri yapılmıştır.

iv. Sayısal modelleme: Prototipin davranış analizini yapmak için modüler sistem simülasyonu kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen ölçümler simülasyon verileriyle karşılaştırılmıştır.

Elde edilen verilere göre;

- Katı FDM'nin geçirgenliğinin düşük olması güneş radyasyonunu geri saçmakta, bu durum da oda sıcaklığını düşürmektedir.
- Erime sıcaklığı 26.5°C FDM yerine, erime sıcaklığı 21°C olan FDM kullanımıyla duvarın performansı artacaktır.
- Seçilen FDM'nin bir diğer dezavantajı, güneş ısımasının katı halde FDM'den geri saçılması ve iç mekân aydınlatmasında azalmaya neden olmasıdır.
- Yazarlar genel itibarıyla FDM'nin enerji depolama sistemindeki etkisinin olumlu olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 5. FDTD Sistem Detayı (Manz ve diğ. 1997)

Figure 5. PCTW System Detail

Onishi ve diğ.'nin (2001) Japonya'nın Sapporo kentinde sürdürülen çalışmada 7 farklı TD konfigürasyonunun ısı davranışı analiz etmiştir. FDM olarak 30–31°C, 35–36°C ve 20–21°C erime noktalarına sahip 3 farklı inorganik FDM kullanılmıştır. Çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak (CFD) TD'li bir odanın ısı davranışı incelenmiştir. Güneş enerjisine ek olarak, duvara elektrikli ısıtıcı takılmıştır. Beton duvar, elektrikli ısıtıcı ve ısıtıcısız üç farklı FDM katmanı içeren 7 konfigürasyon incelenmiştir:

Durum 1: 50 mm beton duvar (TD)

Durum 2: İnorganik FDM (erime noktası: 30-31°C) + 50 mm duvar

Durum 3: İnorganik FDM (erime noktası: 35-36°C) + 50 mm duvar

Durum 4: İnorganik FDM (erime noktası: 20-21°C) + 50 mm duvar

Durum 5: 50 mm beton duvar (TD) + ısıtıcı

Durum 6: İnorganik FDM (erime noktası: 30-31°C) + 50 mm duvar + ısıtıcı

Durum 7: İnorganik FDM (erime noktası: 35-36°C) + 50 mm duvar + ısıtıcı

Yazarlar tarafından geliştirilen simülasyon 'SCIENCE' CFD koduyla gerçekleştirilmiştir. Örgü boyutu 24x37x16 hesaplanmıştır. Zaman entegrasyonu için tamamen örtülü bir yöntem benimsenmiştir ve hesaplama zaman adımı Δt 15 saniye olarak ayarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre,

- Durum 4'teki FDM'nin etkisi, Durum 2 ve 3'e göre daha iyidir ve gece oda sıcaklığı 28° C'nin üzerinde muhafaza edilmiştir.
- 4 durumun hepsinde de, ısıtıcı kullanılmamasına karşın, iç mekân sıcaklığı, dış ortam sıcaklığından belirgin seviyede yüksek muhafaza edilmiştir.
- Durum 5,6, ve 7'de ortalama oda sıcaklığı tüm gün boyunca 18°C'nin üzerinde seyretmiştir, ancak, sıcak günlerde (25 ve 27 Ocak) oda havası aşırı ısınma gözlenmiştir. Bu artı enerjiyi etkili olarak kullanabilmek için FDM miktarı (ısı depolama duvarının kalınlığı) veya ısı özellikleri (erime / donma noktası) ayrıntılı olarak incelenmelidir.
- Durum 5 ve 7 karşılaştırıldığında, FDM'li duvar sisteminin daha düşük elektrik maliyetine sahip olduğu ve gün içinde daha az enerji harcadığı görülmüştür.
- Bu yaklaşım düşük enerji ev uygulamaları için faydalıdır.
- Bulutlu günlerde FDM etkin çalışmadığı için her iki sistemde de enerji tüketiminin aynı olduğu gözlemlenmiştir.

Zalewski ve diğ.'nin (2012) Kuzey Fransa'da yaptıkları çalışmada klasik TD'nin ağır kütlesini hafifletmeyi amaçlamıştır. FDM olarak 27°C erime sıcaklığına sahip hidratlı tuz kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 22 Nisan-5 Mayıs tarihleri arasında küçük ölçekli kompozit duvarın gerçek koşullarda deneysel ölçümleri yapılmıştır. Deney hücrelerini çevreleyen duvarlar 5 cm yalıtım malzemesi ve ahşapla kaplanmıştır. TD ise cam panel, 3 cm havalandırmasız boşluk, FDM duvarı ve yalıtım katmanından oluşmaktadır. FDM buz kasetlerine doldurularak tuğla şeklinde kullanılmıştır. (Şekil 6). FDM ve yalıtım katmanı arasındaki 5 cm'lik boşluk ise alt ve üst 5x50 cm'lik menfezlerle havalandırılmakta ve iç mekân dış mekân arasındaki enerji transferini sağlamaktadır. Deney ölçümlerinde piranometre, ısı çift, akı ölçer ve anemometre kullanılmıştır.

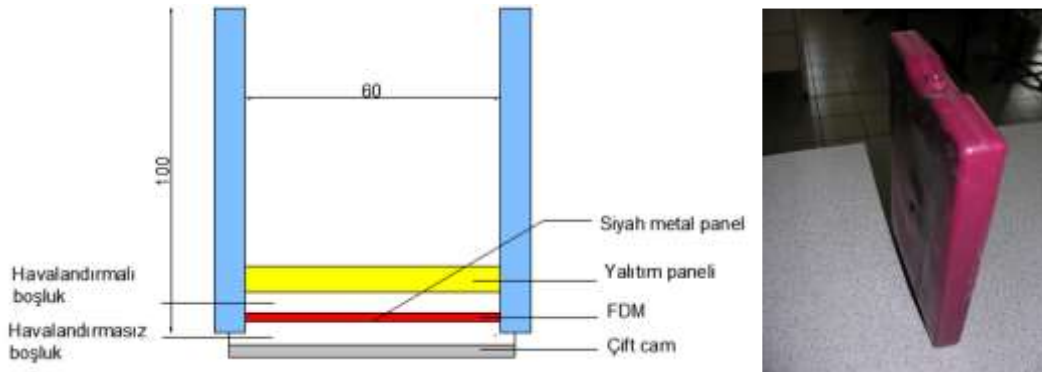
Deney sonuçlarına göre;

- Alt ve üst menfezlerdeki sıcaklık farkları, özellikle güneş ısı akısı arttığında kayda değerdir. Bu nedenle hava hızları 25 cm/s'den düşük olduğunda serbest konveksiyon baskındır.
- FDM aynı hacimdeki betondan daha fazla ısı depolamış ve geceleri bu ısıyı açığa çıkarmıştır.
- Dış hava sıcaklığı gece boyunca sabitken, iç mekân sıcaklığı FDM'nin katılma esnasında açığa çıkardığı ısı sebebiyle düşmüştür.
- FDM duvarı maksimum 50-60°C'ye ve üst menfezdeki maksimum hava sıcaklığı 40°C'ye ulaşmıştır.

Yazarlar çapraz korelasyon yöntemiyle emilen ve iletilen akının gecikme süresini tahmin etmişlerdir. Tuz hidratı 40 dakikalık gecikmeyle depoladığı ısıyı ortama bırakmıştır. Bu zaman gecikmesi, kış ayında FDM'li duvarın bir konut yapısı için tasarlanması durumunda negatif bir etki olarak kabul edilmektedir. Ancak toplu kullanımların olduğu alışveriş merkezi, okul, klinikler vs gibi gün içerisinde kullanılan yapılarda böyle bir gecikmenin avantaja dönüşmesi söz konusudur.

- Gece 2'den sonra depolanan ısının 25W/m²'lik bir ısı akısı hızında salınması FDM'nin etkin olduğunu göstermektedir.
- 24 günlük deneyler sonucunda, camdaki toplam güneş ışınlamı 78kWh/m²'dir. FDM duvarı bu güneş enerjisinin %49'unu emmiştir.

- FDM duvarındaki enerji salımı 23.5 kWh/m^2 'dir. Bu da emilen enerjinin %68'nin geri kazanıldığı anlamına gelmektedir.



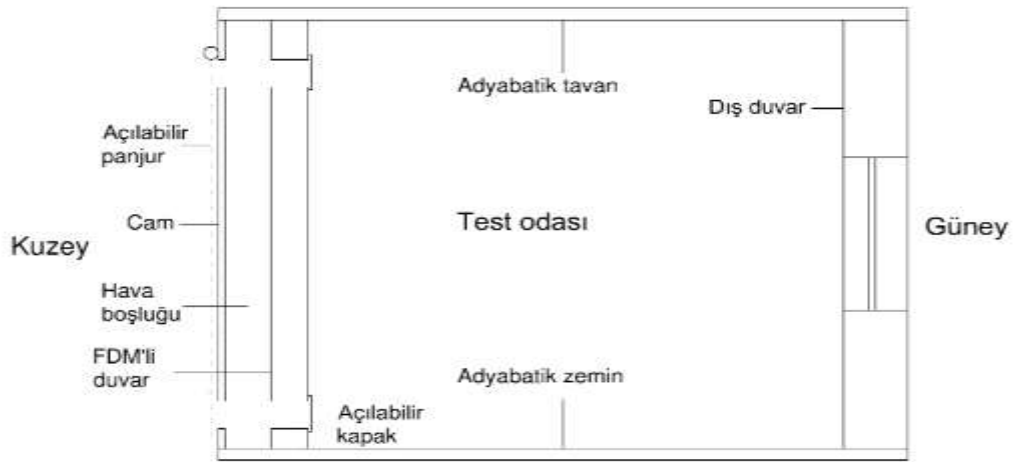
Şekil 6. FDTD Sistem Detayı ve FDM Dolu Buz Kasedi (Zalevski ve diğ., 2012)

Figure 6. PCTW System Detail and PCM Filled Ice Tray

Kara ve Kurnuç'un (2012) Erzurum koşullarında yaptığı çalışmada üçlü camlı, FDTD sistemini test etmiştir. FDM olarak 45°C erime noktasına sahip GR41 ve 35°C erime sıcaklığına sahip GR35 mikrokapsüllenmiş parafin kullanılmıştır. Çalışmada FDM duvar sıvasının içine dahil edilmiştir. 3'lü cam ünitesi kışın güneş ışığının çoğunu geçiren ve yaz aylarında yansıtan Primasolar camdan oluşmaktadır. Yazarlar bu çalışmada TD sistemini iyileştirmeyi ve iki önemli dezavantajını ortadan kaldırmayı amaçlamıştır. Bunlar: (i) Duyulur ısı depolamak için gereken kalın duvar hacmi ve (ii) normal cam ile kullanıldığında yaz ayında aşırı ısınma. Deney odası birbirinden bağımsız iki bölme halinde tasarlanmış ve farklı ergime sıcaklığına sahip iki ayrı FDM denenmiştir. Kullanılan TD sisteminin alt ve üst bölümlerinde menfezler vardır. Üst menfezde yer alan havalandırma fanı FDM tarafından depolanan ısıyı iç mekâna aktarmaktadır. Deney aşamasında iç mekân sıcaklığı dijital termostatlı bir ısıtıcıyla $20\text{-}23^\circ\text{C}$ arasında sabitlenmiştir. Her iki test odasında ölçümler sıcaklık sensörleri, piranometre, yüzey sıcaklık problemleri, güneş sıcaklık sensörü, anemometre ve ısı akı ölçer ile gerçekleştirilmiştir. Dijital kontrol cihazı, ortam sıcaklığı FDM'lerin maksimum erime sıcaklığına ulaştığında fanları harekete geçirir. Açık hava şartlarında bir yıl boyunca süren testler sonucunda;

- GR35'li duvar, GR41'li duvara göre daha verimli sonuç vermiştir. Ekim başından Şubat'ın sonuna kadar, GR35'li duvarın günlük toplam veriminin % 22-% 37 arasında, GR41'li duvarın ise % 20 ila % 33 arasında değiştiği görülmüştür.
- İç mekân sıcaklığı kış sezonu boyunca konfor aralığının dışına çıkmıştır.
- Odada iç mekânın havasını kontrol edecek bir sistemin kullanılması gerekmektedir. Böylece, FDM'li duvarın sıcaklığına göre ayarlanabilir fan ile depolanan enerji kademe kademe içeri sokulur ve oda sıcaklığı artırılabilir.
- Kış mevsiminde aşırı ısınmayı önlemek için bir diğer çözüm, tavanda veya hücre duvarlarında uygulanan $22\text{-}24^\circ\text{C}$ aralığında FDM'li alçı levhaların kullanılmasıdır. Fanların da kontrolü ile bu olası çözüm, FDM'nin gün boyunca aşan enerjiyi toplamasına ve gece boyunca depolanan enerjiyi serbest bırakmasını sağlar.
- FDM duvarı, test odasının yıllık ısı yükünün % 14'ünü sağlamıştır.
- FDM duvarlarının genel toplam verimliliği % 20 ila % 36 arasında değişmiştir.
- Üçlü cam, FDM duvarındaki enerji depolamasını azaltmıştır. Güneş enerjisi kazancı Nisan ve Mayıs aylarında sıfıra düşmüştür. Şekilde FDM duvarının katkısını göstermektedir.
- Ekim ve Kasım aylarında FDM duvarı tarafından sağlanan ısı yükü %70 ve %41'dir.
- Güneş geçirgenliği: kışın 0,45'den 0,55'e, yaz boyunca ise 0,2'den 0,25'e kadar değişmiştir.

Fiorito'nun (2012) Avustralya'da yaptığı çalışmada, hafif yapılarda TD'nin ısı performansını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Avustralya'da 5 farklı iklim bölgesi seçilmiştir. Her iklim bölgesine uygun teknolojiyi tanımlamak için FDM'nin duvar detayındaki yeri ve erime noktası gibi faktörler dikkate alınmıştır. Farklı erime noktalarına sahip 4 farklı FDM olarak (18-23 °C RT21, 25-28 °C RT27, 27-31 °C RT 31 ve 38-43°C RT42) Parafin wax kullanılmıştır. FDM'ler alüminyum modüllerde depolanarak sistem detayının 2. Ve 4. katmanlarında kullanılmıştır. Test hücresinin güney duvarı çift camlı bir pencere ile yalıtılmış hafif bir duvar olarak modellenmiştir. (Şekil 7). Kuzey cephesinde ise 6 mm'lik tek cam ünitesi ve 100 mm havalandırma kanalından oluşan bir TD modellenmiştir. Havalandırma kanalında kontrol edilebilir alt ve üst menfezler yer almaktadır. Yaz aylarında aşırı ısınmayı önlemek için ise harici bir stor perde kullanılmıştır.



Şekil 7. FDTD Detayı (Fiorito, 2012)

Figure 7. PCWT Detail

5X5 m boyutlarında inşa edilen 2 adet test odası Energy Plus TM ile simüle edilmiştir. EnergyPlus TM'ye dahil edilmiş sonlu fark (CondFD) algoritması kullanılmış ve Adams-Moulton çözüm yaklaşımına dayanan bir şema kullanılmıştır. Ana denklem aşağıdaki gibidir.

$$C_p \rho \Delta X \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = k_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_w \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x'} \quad (3)$$

Çalışmada termal iletkenlik değerleri (k_w ve k_E) değerleri şu şekilde hesaplanır:

$$k_w \frac{k_{i+1}^{j+1} - k_i^{j+1}}{2} \quad (4)$$

$$k_E \frac{k_{i-1}^{j+1} - k_i^{j+1}}{2} \quad (5)$$

Simulasyon sonuçlarına göre ;

- Hafif soğuk ve ılık iklimlerde; TD'nin dış yüzeyine yerleştirilen FDM, iç sıcaklık dalgalanmasını optimum düzeyde azaltmıştır. Bu durumda en verimli sonuç için, dış yüzey sıcaklığının ortalama değerinde erime noktasına sahip bir FDM seçimi yapmak gerekmektedir.
- Hafif sıcak ve subtropikal iklimlerde; TD'nin orta bölümünün iç yüzeyine yerleştirilen FDM, yüzey sıcaklığının değişkenliğini azaltmıştır. Bu durumda, erime aralığı ile yüzey sıcaklıklarının ortalama değerleri arasında bir malzeme seçimi en verimli sonucu verecektir.
- Sıcak ve kuru iklimlerde; Yüksek günlük sıcaklık aralığında, orta bölmenin dış yüzeyinde veya iç yüzeyinde FDM'lerin entegrasyonu, yüzey sıcaklık değişkenliğini büyük ölçüde azaltmıştır.

Ayrıca FDM'lerin iç yüzeye yerleştirilmesi, yüksek güneş kazanımlarının neden olduğu aşırı ısınmayı önlemiştir.

- En verimli sonuç FDM'nin konum ve erime sıcaklığının iklim koşullarına göre optimizasyonu ile mümkündür.

Berthou ve diğ.'nin (2015) Fransa'da yapılan çalışmada eş zamanlı olarak süper izolasyon, ısı depolama ve doğal aydınlatma sağlayan TD sistemi önermiştir. Yapılan deneyde FDM olarak 21.3°C'de erime noktasına sahip yağ asiti ötektik karışımı kullanılmıştır. Duvar katmanı FDM dolu 19x19x5 cm cam tuğla, 4 cm silika aerogel ve 0,8 cm saydam camdan oluşmaktadır. Sistemin davranışını analiz etmek için farklı ölçeklerde deneyler yapılmıştır. Bunun için ilk olarak silis aerogel ve FDM'nin termal ve optik özelliklerine ayrı ayrı bakılmıştır. Buna göre;

- Diferansiyel Taramalı Kalorimetre ile yapılan ölçümlerde FDM'nin faz değişim entalpisi 152 kJ kg⁻¹ bulunmuştur.

Çalışmanın 2. aşamasında küçük ölçekte (1m²) FDTD prototipi inşa edilerek laboratuvar ortamında sistemin termal ve optik özellikleri incelenmiştir. Prototip, iki dikey ve paralel izotermal yassı plakadan oluşan bir ısı eşanjörü test ekipmanına yerleştirilmiş ve her iki yüzeye de sıcaklık yükleri uygulanmıştır. Buna göre;

- Prototipin ısı direnç değeri, FDM katı halde iken, 1.57 ila 1.68 m²KW⁻¹, sıvı halde iken 1.39 m²KW⁻¹ olmuştur.
- Prototipin U değeri, FDM sıvı ve katı halde iken, sırasıyla 0.59 ve 0.72 W m⁻¹ K⁻¹'dir.
- FDM sıvı haldeyken prototipin emiliminin yüksek olduğu anlaşılmıştır. Bu durum yaz aylarında fazla ısı depolanacağı için duvarın sıcaklığını artırarak olumsuz bir etkiye neden olacaktır.
- FDM katı haldeyken ışık emilimi daha düşüktür, yani güneş ışınlarının bir kısmı depolanmaktadır. Bu durum, Güney Fransa gibi sıcak Akdeniz iklimlerinde uygulandığında, duvarın verimliliğini azaltmamaktadır.

Çalışmanın son aşamasında, Güney Fransa'daki Sophia Antipolis'te çift bölmeli bir test hücresi üzerinde birebir ölçekte, gerçek koşullarda deneyler yapılmıştır. Duvarların iç ve dış yüzey sıcaklık ölçümleri için PT100 sıcaklık sensörleri kullanılmıştır. Yatay plandaki toplam radyasyon, ±% 4'lük hassasiyette bir piranometre (Pulsonik, 400–1100 nm) ile dikey plandaki toplam radyasyon ise değerin% ± 7'lik hassasiyette ikinci bir piranometre (Littoclimate 13S374, 320-1060 nm) ile ölçülmüştür. Rüzgâr yönü ve hızı ölçümü için ise rüzgârgülü ve anemometre kullanılmıştır. Çalışmada FDM'li duvar ve standart duvar karşılaştırılması yapılmış ve kullanılan malzemelerin ısı ve optik özellikleri karakterize edilmiştir. Çalışmanın sonucunda;

- FDM'nin faz değişim entalpisi 152 kJ kg⁻¹ 'dir.
- Isı kayıplarının çok düşük olduğu, ısı ve ışık kazanımlarının yüksek olduğu ölçülmüştür.
- Duvarın U değeri (ısı geçirgenlik katsayısı) FDM'nin katı-sıvı durumuna göre 0.59 W m⁻¹ K⁻¹ ve 0.72 W m⁻¹ K⁻¹ ölçülmüştür. Bu da FDM'nin katı haldeyken sıvı durumuna göre, ısı kayıplarını nispeten azalttığını göstermektedir.
- Kış ayında iç-dış mekân sıcaklık farkı 9°C'dir.

Chaichan ve Abaas (2015) Irak'ın Bağdat kentinde yaptığı çalışmada yerel ve uygun maliyetli malzemeler kullanarak FDTM üretmeyi amaçlamıştır. Kasım 2014-Ocak 2015 döneminde yapılan deneylerde sistemin kış ayında Bağdat evleri için uygunluğu test edilmiştir. FDM olarak 45°C erime noktasına sahip parafin mumu kullanılmıştır. Bu malzeme, Irak piyasalarında uygun maliyeti nedeniyle seçilmiştir. FDTM kışın kurulup yazın sökülebilen, içi parafin mumu dolu alüminyum borulardan oluşmaktadır. Her bir boru 400 gram parafin mumu ile doldurulmuştur. Kullanılan toplam parafin wax 7.2 kg'dır. 1 m²'lik ahşap kutu şeklinde kurulan FDTM 1 cm kalınlığında cam yünü ile yalıtılmıştır. Soğuk hava girişi için sol alta, sıcak hava çıkışı için ise sağ üste 1 cm çapında 10'ar adet menfez açılmıştır. Duvarın iç yüzeyine 3 mm kalınlığında siyah bir bakır plaka yerleştirilmiştir. Alüminyum folyo ile kaplı plaka, yüzeye çarpan güneş ışınlarını borulara yansıtmaktadır. TD 3 mm kalınlığında şeffaf camla kaplıdır ve gün batımından sonra ahşap bir kapakla kapatılmaktadır. Üstteki menfezlerin yanında sıcak havayı dışarı atmak için bir fan yerleştirilmiştir. Çalışmada 11 adet ısı çifti kullanılmıştır.

Bunlardan 3'ü parafin mumunun sıcaklık değişimini gözlemlemek için farklı borulara yerleştirilmiştir. 3 ısı çift duvara, 3 ısı çift yere sabitlenmiş, 1 ısı çift soğuk havayı, 1 ısı çift ise sıcak havayı ölçmektedir. Duvarın çalışma prensibi sera etkisinin kullanılmasına bağlıdır. Duvara yansıyan güneş ışınımı camdan borulara geçmektedir. Radyasyonun bir kısmı alüminyum yansıtıcıdan yansiyarak borulara vurmakta, diğer dağınık ışınlar ise camdan yansımaktadır. Böylece duvarın içindeki ısı artmaktadır.

Çalışmanın sonucunda;

- Bu malzemenin Irak kış koşulları için uygun olduğu tespit edilmiştir.
- Parafin mumunun kolay bulunabilirliği ve düşük fiyatı uygun kullanım olanağı sağlamaktadır.

Sun ve Wang (2016) muson ikliminin etkin olduğu Jilin-Çin'de yaptıkları çalışmada kışın ısıtma ve yaz aylarında havalandırma / soğutma problemini çözmek amaçlanmıştır. Çalışmada 5000x1600x2200 mm ölçülerindeki deney odası 240 mm levha ile bölünerek FDM'li oda ve referans oda karşılaştırması yapılmıştır. Yazarların önceki çalışmalarında (Sun ve diğ., 2013) hazırlanan 19,45°C erime noktasına sahip parafin / genişletilmiş perlit / grafit FDM, enerji depolamak için toplayıcı harç katmanına ve iç harç katmanına eklenmiştir. Güney tarafa konumlandırılan FDTM, dıştan içe doğru 6 mm güneş ışığı panosu, 15 mm toplayıcı harç tabakası, 40 mm ekstrüzyon levha, 390 mm x 190 mm x 190 mm beton blok ve 15 mm FDM harcı tabakasından oluşmaktadır. Güneş ışığı panosu ile toplayıcı harç tabakası arasındaki hava boşluğu 100 mm'dir. Duvarın alt ve üstünde 200 mmx200 mm 4 adet menfez bulunmaktadır. Menfezlerin açılma zamanı 10:00-16:00'dır. Deneyde, 4°C'den daha büyük ve FDM'lerin faz değişim sıcaklığından daha düşük iç mekân sıcaklığını uygun koşullarda tutmak için yardımcı bir ısı kaynağı kullanılmıştır. Sistemde güneş enerjisinin bir bölümü hava kanallarından iç mekâna aktarılır, bir bölümü FDM içerisinde depolanır, kalanı ise konveksiyon ve radyasyon yoluyla iç mekâna iletilir. FDTD'nin en önemli avantajı gün boyunca güneşten gelen fazla ısıyı depolaması ve gece boyunca açığa çıkarmasıdır.

FDTM'nin transfer süreci çok karmaşıktır. Süreci teorik olarak incelemek için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Uzun dalga radyasyonu ihmal edilebilir düzeydedir.
- Güneş ışığı panelinin kalınlığı ve ısı kapasitesi ihmal edilebilir.
- Güneş ışığı panosu ve harç tabakasının yansımaları ihmal edilebilir.
- FDTM'nin (güneş ışığı panosu, kanaldaki hava, toplayıcı harç tabakası ve duvarın iç yüzeyi de dahil) ısı transfer işlemi, enerji dengesi denklemleriyle ifade edilir. Duvarın ısı performansını daha iyi analiz etmek için deneyler kış ayında gerçekleştirilmiştir. Deney odasının yapılan teorik ve deneysel ölçümlerine göre;
- Duvarın tabana yakın bölgesinde sıcaklık daha düşükken, üst bölgelerde daha yüksek ölçülmüştür. Bu durum "baca etkisi" ile açıklanabilir.
- FDM'li duvarın iç mekânda ısı sirkülasyonu sağladığı ve ısı dalgalanmalarını azalttığı görülmüştür.
- Depolama duvarı, kanallardaki havayı ısıtmak için güneş radyasyonunu emmektedir. Isınan hava yükselerek üst menfezlerden iç mekâna geçmektedir. İç mekândaki soğuk hava ise alt menfezlerden tekrar kanala geçmektedir. Bu durum FDTD'nin iç mekân sıcaklığını iyileştirmek için odanın termal hava dolaşımını teşvik edebileceğini göstermektedir.
- FDTD'nin iç mekân sıcaklığı, referans odadan daha yüksektir. 16:00-9:00 saatleri arasında, güneş etkisi azaldığında, her iki odada da iç mekan sıcaklıkları kademe kademe düşmektedir. FDTD'nin iç mekân sıcaklığı erime noktasından düşük olduğunda FDM'de faz değişimi gözlenmemiştir.
- Sabah 6.00'da iki oda arasındaki sıcaklık farkı 1,13°C'dir.
- 9:00-14:00 arasında FDM'li odanın sıcaklığında referans odaya göre daha hızlı yükseliş görülmektedir. Sıcaklık farkı 5,38°C'dir.
- 14:00-16:00 arasında güneş ışınımı düşüşüyle sıcaklıkta azalma görülür. FDTD'de bu düşüş 30 dk'lık gecikmeyle olmuştur.

- Veriler FDM'nin iç mekân termal konforunu iyileştirmeye katkı sağladığı sonucunu göstermektedir.

Liu ve diğ.'nin (2018) yaptıkları çalışmada FDTD ve referans odayı simüle ederek termal performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Çift FDM'li duvar panelleri bina cephesine yerleştirilmiştir. Dıştaki panel gece boyunca soğutma enerjisini depolamakta, içteki panel ise radyant soğuma sağlamaktadır. Gündüz aşırı ısınmayı önlemek için dış panele yüksek yansıtıcı perde yapılmıştır. FDTD sistemi, cam kapak, hava kanalı, dış FDM duvar paneli, EPS yalıtım katmanı, tuğla ve soğutma suyu borularıyla donatılmış iç duvar panelinden oluşur. FDM olarak erime sıcaklığı 22°C ve 24°C olan tuz hidratları tercih edilmiş ve paslanmaz çelik kap içerisine makrokapsüllenmiştir. Changsha'daki tipik yaz hava koşullarında sistemin ısıl tepkisini analiz etmek için, için 1 Ağustos - 7 Ağustos tarihleri arası tercih edilmiştir. FDTD sisteminde dış ortam koşullarına göre 3 çalışma modu uygulanmıştır:

- Soğutma enerjisi depolama: gece 2 ve 3 nolu kapaklar açılarak, dışardaki soğuk hava kanala girer, dıştaki FDM'yi katılaştırır ve fanlarla iç mekâna aktarılır.
- Soğutma enerjisi salınımı: gece 2 ve 4 nolu kapaklar açılarak, içerdeki hava kanala girer. FDM tarafından soğutulan hava tekrar fanlarla iç mekâna aktarılır.
- Gündüz doğal havalandırma: Aşırı ısınmayı önlemek için 1 ve 3 nolu kapaklar açılır ve yüksek yansıtıcı perde güneş ışığını yansıtmak için indirilir.

Çalışmada önerilen FDTD sisteminin farklı iklim bölgelerinde uzun süre boyunca ısıl performansını tahmin etmek amacıyla sayısal bir model geliştirilmiştir. Modelde iç mekân hava ısı transferi, ısı transfer denklemleri, uzun dalga radyasyonu, kanal ve dış duvar ısı transferi, duvar ısı iletimi ve güneş radyasyonu dikkate alınmıştır. Kabul edilen varsayımlar ise şu şekildedir:

- FDM homojen ve izotropiktir. FDM'deki konvektif ısı transferi ihmal edilmiştir.
- Erime ve donma sürecinde FDM'nin özgül ısı kapasitesi hariç, malzemelerin termofiziksel özellikleri sabittir.
- Farklı katmanlar arasında sadece tek boyutlu ısı transferi söz konusudur.
- Çalışmayı doğrulamak için Meng ve diğ. (2013) çalışması referans alınarak benzer konfigürasyon kurgulanmıştır.

Deney odasının yapılan simülasyon ölçümlerine göre;

- Farklı erime noktasına sahip FDM'ler denendiğinde Changsha iklim koşulları için 22 °C erime noktası ve 176 kJ/kg gizli ısıya sahip FDM'nin uygun olduğu ve soğutma enerjisi salınımı için önemli bir katkı sağladığı görülmüştür. Böylece soğutma enerjisi salınımındaki maksimum ortalama değer, FDM'nin erime sıcaklığı 22 ° C iken % 39,4 artarken 43.5 W / m²'ye ulaşmıştır.
- Klasik TD sistemi ile karşılaştırıldığında, FDTD sisteminde iç mekân 22°C iken, yıllık soğutma enerjisi tüketimi % 20,8 oranında azalarak 438 kWh'e düşmüştür. İç mekan 24 ° C iken ise, % 18,6 azalarak 425 kWh' düşmüştür.
- Geleneksel TD sistemiyle karşılaştırıldığında, iç mekân sıcaklığı 22-24°C arasında sabit iken, yıllık soğutma enerjisi tüketimi %20,8 ve %18,6 oranında azalmıştır.
- Çalışma FDTD'nin bina enerji tüketimini azaltma ve iç mekân ısı konforunu iyileştirmede, doğal soğutma enerjisinden yararlanarak, yaz koşullarında aşırı ısınmayı engelleyerek ve yüksek sıcaklıkta soğuk kaynakları kullanarak, potansiyelleri için bilimsel kanıtlar sağlamıştır.

TARTIŞMA (DISCUSSION)

Bu makalede, TD'de FDM uygulamalarının ve FDM'nin verimliliğini etkileyen faktörlerin gözden geçirilmesi amaçlanmıştır. Araştırmada FDTM'nin binaların ısıl performansı üzerindeki etkisini gösteren birçok deneysel ve simülasyon çalışması sunulmuştur. Çalışmaların sonuçlarına bakıldığında FDM, enerji ve elektrik tüketimini, soğutma yükünü ve sıcaklık dalgalanmalarını azaltmaktadır. FDM, geleneksel iklimlendirme sistemleri içerisinde etkili bir alternatiftir. Gizli ısı depolama konseptinin pratik bir uygulaması olan FDM, iç mekân sıcaklığını kontrol etmek için akıllı bir malzeme olarak işlev görmektedir. FDM TD'ye entegre edildiğinde etkinliğini daha iyi şekilde göstermekte; bununla birlikte,

önemli miktarda enerji depolama yoğunluğu ile gün içinde yüksek sıcaklık değişimlerini önceden tahmin etmekte ve uygun konfor aralığındaki sıcaklıkları dengeleyebilmektedir.

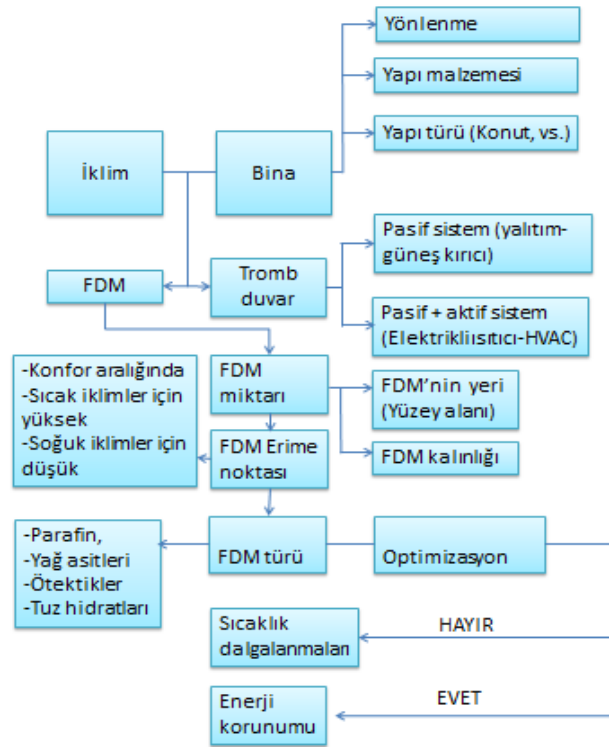
Literatürde yapılmış çalışmalardan elde edilen sonuçlara dönük değerlendirme aşağıda çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 1. FDTD Kullanımına Yönelik Çalışmaların Temel Nitelikleri ve Sonuç Değerlendirmesi

Table 1. Basic Characteristics and Results Evaluation of the Studies Towards PCTW Use

Referans	Bölge	FDM özellikleri	Sistem	Sonuç
Manz ve diğ., 1997	İsviçre Zürih	Tuz hidratı - 26.5 ° C	Şeffaf yalıtım malzemesi ve FDM içeren yarı saydam camdan	Katı FDM'nin geçirgenliğinin düşük olması nedeniyle güneş radyasyonu geri saçılımı ve oda sıcaklığında düşüş. Öneri: Erime sıcaklığının 26.5 °C'den 21 ° C'ye düşürülmesiyle duvarın performansında artış.
Onishi ve diğ.,(2001)	Sapporo-Japonya	3 farklı İnorganik FDM 1:(30–31°C), 2:(35–36°C), 3:(20–21°C)	7 konfigürasyon: beton duvar, elektrikli ısıtıcı ve elektriksiz +3 farklı FDM katmanı	Düşük enerji ev uygulamaları için faydalı. İyi hava koşullarında daha az enerji tüketimi. Bulutlu günlerde FDM etkin çalışmadığı için her iki sistemde eşit enerji tüketimi.
Zalewski ve diğ., (2012)	K. Fransa	Hidratlı tuz / 27oC	FDM'li buz kasetleri	FDM ısı depolama kapasitesi >beton. Dış hava sıcaklığı: gece sabit, iç mekân sıcaklığı:FDM katılaşırken açığa çıkan ısı sebebiyle beklenenden düşük.
Kara ve Kurnuç, (2012)	Erzurum	Kapsüllenmiş parafin 13 -41 ° C ve 13–51 ° C	3'lü cam+ FDM'li duvar sıvası	Yıllık ısı yükü: %14. FDM duvar toplam verimlilik: % 20 ila % 36. 3'lü cam etkisi: yaz aylarında FDM duvarında daha az enerji depolanması. Güneş geçirgenliği: kışın 0,45'den 0,55'e, yaz boyunca ise 0,2'den 0,25'e kadar değişim.
Fiorito, (2012)	Avustralya – 5 farklı iklim bölgesi	Parafin wax-18-23 ° C RT 21, 25-28 ° C RT 27-31°CRT 31 ve 38-43°C RT 42)	Alçıpanel, FDM, Ahşap panel	Isı dalgalanmalarında azalma. Hafif yapıların termal ataletinde artış. En verimli sonuç için öneri: Optimizasyon
Berthou ve diğ., (2015)	G. Fransa	Yağ asiti ötektik karışımı - 21.3oC	Aerojel + FDM dolu cam tuğla	Isı ve ışık kazanımı yüksek, U Duvar: 0.59 W ⁻¹ K-1 ve 0.72 W m ⁻¹ K ⁻¹ , Kış ayı iç-dış sıcaklık farkı 9°C
Chaichan ve Abaas, (2015)	Irak, Bağdat	Parafin wax - 45°C	FDM dolu alüminyum boru + cam yünü ısı yalıtım	Irak kış koşulları için uygun. Parafin wax'ın kolay bulunabilirliği ve düşük fiyatı ile uygun kullanım olanağı
Sun ve Wang, (2016)	Jilin- Çin-	Parafin- 19.45°C	Polikarbonat levha ve FDM'li sıva	İç mekânda ısı sirkülasyonu ve ısı dalgalanmalarında azalma.
Liu ve diğ., (2018)	Changsha	Tuz hidratı- 22°C	FDM dolu paslanmaz çelik kap	Soğutma enerjisi salınımında 44.2 W/m ² 'lik katkı. Yıllık soğutma enerjisi tüketiminde %20,8 ve %18,6 oranında azalma.

FDTD'nin enerji verimliliği açısından getirilerini, yapılan çalışmaların karşılaştırıldığı Çizelge 1'den görmek mümkündür. FDM sayesinde sıcaklık dalgalanmaları azalmakta, iç mekân konforu sağlanmakta ve enerji tüketimi azalmaktadır. Binaların TD uygulamalarında FDM kullanımını özetleyen genel bir tipoloji diyagramı Şekil 8'de verilmiştir. İlgili diyagram Souayfane ve diğ. (2016)'nın çalışmasından FDTD sistemine uyarlanmıştır.



Şekil 8. Bina Trombe Duvarı Uygulamalarında FDM'nin Tipoloji Diyagramı

Figure 8. Typology Diagram of PCM in Building Trombe Wall Applications

Yapı tasarımının etkin olabilmesi için, özellikle enerji performansını etkileyen en önemli kararlar (oryantasyon, bina cephesi, pencere / duvar oranı, form ve malzeme özellikleri gibi) ön tasarım ve tasarım aşamalarında alınmalıdır. Bu bağlamda FDTD'nin verimli olabilmesi için tasarım öncesi ve tasarım sırasında ele alınması gereken aşağıdaki kriterler oldukça önemlidir (Şekil 8): (1) İklim koşulları, (2) FDM erime noktası, (3) FDM kalınlığı ve duvar detayındaki yeri, (4) Pasif sistem (5) Pasif+aktif sistem. Bu kriterlerin yanı sıra FDM'nin türü, mikrokapsülleme- makrokapsülleme yöntemi ve miktarı gibi verimliliğe etki eden diğer kriterler de diyagramda ayrıca verilmiştir.

(1) İklim Koşulları: FDM'lerin kullanım prensipleri çok basittir; bununla birlikte, gizli ısıtının tüm binanın enerji performansının artırılması için etkin katkısının değerlendirilmesi zordur. FDM'lerin TD sistemlerine entegre edilmesinin optimizasyonu ve bu elemanların binaya optimum entegrasyonu da karmaşıktır. Bu, ana tasarım parametrelerini, yani FDM'nin faz değişim sıcaklığını, termal kütle miktarını ve TD sistemi içindeki konumunu içerir. Ayrıca, bu tür parametrelerin belirli iç ortam yüklerine ve özellikle belirli iklim koşullarına göre belirlenmesi gerekir. Kurgulanan sistemin amacı yaz aylarında soğutma enerjisi talebini veya kış aylarında ısıtma enerjisi talebini azaltmak için optimize edilecekse FDM seçim yaklaşımı da farklı olmalıdır. Bu nedenle, FDTD tasarımında sistemin maksimum verimliliğini sağlamak için farklı iklim koşullarına ve uygulama amacına uygun erime noktası aralığına sahip FDM seçimi yapılmalıdır. Böylece FDM iç ortam sıcaklıklarını stabilize edecek ve termal konfor etkisi sağlanacaktır.

(2) Erime Noktası: FDM seçiminde en önemli parametredir. Belirli bir iklim bölgesine göre uygun erime noktasına sahip FDM seçimi çok önemlidir. Örneğin erime noktası çok düşük FDM seçimiyle gece boyunca iç mekân sıcaklığını konfor aralığında tutmak çok zor olacak ve yaz aylarında yetersiz kalacaktır. Erime noktası çok yüksek FDM seçiminde ise, depolanan sıcaklık miktarı gün boyunca düşecektir. Yapılan çalışmalar çerçevesinde, bazı yazarlar, daha sıcak iklim bölgelerinde yüksek erime sıcaklığına sahip FDM'lerin, daha soğuk iklim bölgelerinde ise düşük erime sıcaklığına sahip FDM'lerin verimli olduğunu savunmaktadır. Diğerleri ise konfor aralığında erime noktasına sahip FDM seçiminin önemini vurgulamaktadır. Genel olarak binalarda seçilen FDM erime aralığı 18-28°C olmakla birlikte, yine en verimli sonuca deney ve optimizasyonla ulaşılabilecektir (Souayfane ve diğ., 2016).

(3) FDM Paketleme, FDM Kalınlığı ve Detaydaki Yeri: FDTD sistemlerinde kullanılan FDM'ler faz geçişleri sırasında ısı depolayarak verimliliği artırır. Bu sebeple FDM'deki potansiyel hacim kaybının bütün sistemin performansını ekileyebileceği gerçeği göz önüne alınması gereken önemli bir kriterdir. Doğrudan yapı malzemesine entegre edilen FDM'ler, faz değişim esnasında akma yapabilir, veya yapı malzemesine zarar verebilir. Bu sebeple FDM eğer doğrudan kullanılacaksa mikrokapsüllemesi, aksi takdirde küre, boru, cam, buz kaseti vs gibi elemanlara doldurma yöntemleri kullanılarak makrokapsüllemesi gerekmektedir. Böylece FDM'nin sızarak hacim kaybetmesi, yapı malzemesinin yüzeyini bozarak korozyonuna neden olması engellenecektir. Ayrıca FDM'nin yapı sistemiyle entegrasyon yöntemi gibi, FDM miktarı ve sistem hacmi içindeki yeri de kritik kararlardan biridir. Örneğin kış ayında FDM tabakasının kalın olması FDM'nin tam olarak faz değiştirmesini engelleyecektir (Souayfane ve diğ., 2016). Bu sebeple verimliliği artırmak açısından FDM miktarı ve sistem detayındaki yerinin iklim koşulları baz alınarak tespit edilmesi de önem arz etmektedir.

(4) Pasif Sistem: Genel olarak klasik TD kış sıcaklığı 15°C 'nin altında olan iklimler için uygundur ve yaz ayları için en temel sorun sistemin aşırı ısınmasıdır. Sıcaklık kontrolünü sağlamak, iç mekân sıcaklığının konfor aralığında kalması için önemlidir. Bu da sisteme güneş kırıcı veya ısı yalıtımı eklenmiş kompozit bir duvar gibi pasif sistemler ile mümkündür (Hu ve diğ., 2017). Pasif sistemler ek enerji gerektirmeyen ve kurulumu kolay olan yapı elemanlarıdır. Tamamen dış ortam sıcaklığına ve değişken hava koşullarına bağlı olarak sisteme entegre edilen bu yapı elemanları, iklimlendirme kontrolü sağlayarak FDM'nin düzgün bir şekilde çalışmasına katkı sağlayacaktır. Örneğin, gece sıcaklıkları FDM faz değişim sıcaklığının önemli ölçüde altına düşmezse, FDM tamamen katılaşmayacak ve bu da çalışmasını takip etmeyi engelleyecektir.

(5) Aktif sistem: Sisteme eklenecek olan elektrikli ısıtıcı ve HVAC gibi elemanlar da sistemin verimliliğini artırmaktadır. FDTD sistemlerinde doğal havalandırma menfezleri, dışarıdan hava dolaşımı sağlasa da bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle aktif bir sistem olarak kabul edilen mekanik havalandırma daha iyi bir ısı transfer katsayısı sağlayarak FDTD sisteminin verimini artırabilir. Ayrıca bulutlu günlerde hem FDM hem de TD etkin çalışamayacağından, FDM'yi faz değişim sıcaklık aralığında tutabilmek için elektrikli ısıtıcılar ile sisteme termal enerji depolama kazandırılabilir.

SONUÇ (CONCLUSION)

Makale son 20 yılda uygulanan FDTD sistemleri alanında yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarının derlendiği mevcut durum inceleme çalışmasıdır. Çalışmanın amacı, FDM ile bütünleştirilmiş TD'lerin çalışma sonuçlarını inceleyerek sürdürülebilir mimarlığa katkı sunmaktır. FDM'ler ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde FDM'lerin duvar, tavan, döşeme, çatı uygulamaları, FDM'lerin kapsüllemesi ve termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine odaklandığı görülmektedir. Ancak pasif sistemlerden FDTD uygulamaları henüz deneysel boyuttan öteye gidememiştir. FDM'lerin gizli ısı depolama özelliği sayesinde, TD'nin ısıtma ve soğutma uygulamalarında verimliliğinin artırılması ve duvarın konvansiyonel ağır ısıl kütesinin hafifletilmesi mümkündür. Ancak TD'nin basit uygulama şemaları olmasına karşın tam bir verimlilik sağlamak konusunda bazı güçlükleri vardır. Detaylarına karar verilen bir FDTD'nin yıl içerisinde dış ortam koşullarına karşı ne şekilde cevap vereceğini öngörmek zordur. Buna göre FDTD'yi tasarlamadan önce sisteme etki edecek kriterleri göz önüne alarak duvarın karşılaşılabileceği olası sorunları görmek verimliliği artıracaktır. Belirli bir bölgede yapılacak olan FDTD sisteminde en verimli sonucu almak tüm bu kriterlerin optimizasyonu ile mümkün olacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2019.KB.FEN.020 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abuelnuor, A., Omara, A., Saqr, Km., Elhag, H., 2018, "Improving Indoor Thermal Comfort By Using Phase Change Materials: A Review", *Int J Energy Res.*, Vol. 42, No.6, pp. 2084- 2103.
- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M.Z.D., Wahid, M.A., Jomehzadeh, F., Famileh, I.Z., Calautit, J.K., Hughes, B.R. A., 2016, "Review On Phase Change Material (PCM) For Sustainable Passive Cooling in Building Envelopes", *Renew Sustain Energy Rev*, Vol.60, pp. 1470-1497.
- Alam, T.E., Dhau, J.S., Goswami, D.Y., Stefanakos, E., 2015, "Macroencapsulation and Characterization of Phase Change Materials for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems", *Appl. Energy* Vol.154, pp. 92-101.
- Anderson, Rkf., 1985, "Natural Convection in Active and Passive Solar Thermal Systems", *Advn Heat Transfer*, vol.8, pp. 1-86.
- Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A., 2010, "Phase Change Materials For Building Applications: A State-Of-The Art Review", *Energy Build*, vol.42, pp.1361-1368
- Benli, H., Durmuş, A., 2007, "Havalı Güneş Kolektörleri ve Gizli Isı Depolama Yöntemi Kullanılarak Sera Isıtılması". *Mühendis Ve Makine*, cilt.48 no.569, ss.16-25
- Berthou, Y., Biwole, P., Achard, P., Sallée, H., Tantot-Neirac, M., Jay, F., 2015, "Full Scale Experimentation on a New Translucent Passive Solar Wall Combining Silica Aerogels and Phase Change Materials", *Solar Energy*, vol.115, pp. 733-742.
- Beyhan, B., Cellat, K., Konuklu, Y., Gungor, C., Karahan, O., Dundar, C., Paksoy, H., 2016, "Robust Microencapsulated Phase Change Materials in Concrete Mixes for Sustainable Buildings", *Int. J. Energy Res.*, vol.41, no.1, pp.113-126
- Cabeza, L. F., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., Ve Zubillaga, O., 2007, "Use of Microencapsulated PCM in Concrete Walls for Energy Savings", *Energy and Buildings*, vol.39, pp. 113-119.
- Casini, M., 2014, "Smart Materials and Nanotechnology for Energy Retrofit of Historic Buildings", *Journal Of Advances In Civil, Structural And Construction Engineering*, Csce, vol.1, no.3, pp. 88-97
- Ceylan, İ., Zuhur, S., Gürel A. E., 2017, "Isı Depolama Yöntemleri ve Uygulamaları", *TTMD Dergisi*, ss.38-47
- Chaichan, M.T., Abaas, K.I., 2015, "Performance Amelioration of a Trombe Wall by Using Phase Change Material (PCM)", *International Advanced Research Journal ,n Science, Engineering and Technology*, vol. 2, no.4, pp.1-6
- Chandel, S.S., Agarwal, T., 2017, "Review of Current State of Research on Energy Storage, Toxicity, Health Hazards and Commercialization of Phase Changing Materials", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.67, pp.581-596.
- Chen, Y., Zhao, L., Shi, Y., 2017, "Preparation of Polyvinyl Chloride Capsules for Encapsulation of Paraffin by Coating Multiple Organic/Inorganic Layers", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* vol.77, pp.177-186.
- Doğan, A., Pirasaci, T., 2009, "Bina Cephelerinde Yalıtım Yerine Trombe Duvar Kullanımının İncelenmesi", *Tesisat Mühendisliği*, cilt.112, ss.41-51.
- Fiorito, F., 2012, "Trombe Walls For Lightweight Buildings in Temperate and Hot Climates. Exploring The Use Of Phase-Change Materials For Performances Improvement", *Energy Procedia*, vol.30, pp.1110-1119.
- Ghoneim, A.A., Klein, S.A., Duffie, J.A., 1991, "Analysis Of Collector-Storage Building Walls Using Phase-Change Materials", *Solar Energy*, vol.47, pp.237-242.
- Günerhan, H., 2004, "Duyulur Isı Depolama Ve Bazalt Taşı", *Mühendis ve Makina - Cilt: 45 Sayı: 530*.
- Hawladar, M.N.A., Uddin, M.S., Khin, M.M., 2003, "Microencapsulated PCM Thermal-Energy Storage System", *Appl. Energy*, vol.74 no. pp.195-202.

- Heinz, A., Streicher, W., "Experimental Testing of a Storage Tank Filled with Microencapsulated PCM Slurries, Phase Change Material and Slurry", Scientific Conference and Business Forum, Yverdon Les Bains, Schweiz, Pp. 67-76, 15-17 June 2005.
- Hu, Z., He, W., Jia, J., & Zhang, S., 2017, "A Review on the Application of Trombe Wall System in Buildings", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.70, pp.976-987.
- Ji, J., Luo, C., Chow, T.T., Sun, W., He, W., 2010, "Thermal Characteristics of a Building- Integrated Dual-Function Solar Collector in Water Heating Mode with Natural Circulation", Energy, vol.36, pp.566-574
- Kalnæs, S.E., Jelle, B.P., 2015, "Phase Change Materials and Products for Building Applications: A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities", Energy Build. Vol.94, pp.150-176.
- Kara, Y., & Kurnuç, A., 2012, "Performance of Coupled Novel Triple Glass Unit and PCM Wall", Applied Thermal Engineering, vol.35, pp.243-246.
- Karaman, S., Örüng, İ., Şirin, Ü., 2016, "Trombe Duvar ile Ek Isı Kazanımı Sonucu Hayvan Barınaklarında Havalandırma Etkinliğinin Artırılması". U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi, cilt.30, ss.169-178
- Khudhair, A. M., Farid, M. M., 2004, "A Review on Energy Conservation in Building Applications with Thermal Storage by Latent Heat Using Phase Change Materials", Energy Conversion and Management, vol. 45, no.2, pp.263-275.
- Konuklu, Y., Ostry, M., Paksoy, H.O., Charvat, P., 2015, "Review on Using Microencapsulated Phase Change Materials (PCM) in Building Applications", Energy Build. Vol.106, pp.134-155.
- Konuklu, Y., Paksoy, H., "Faz Değiştiren Maddeler ile Binalarda Enerji Verimliliği", 10. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 919-930, 13-16 Nisan 2011, İzmir.
- Krüger E., Matoski A., 2013, "Evaluation of a Trombe Wall System in a Subtropical Location", Energy Build; vol.66, pp.364-372.
- Kunkel, S., Teumer, T., Dornhofer, P., Schlachter, K., Weldeleslasie, Y., Kuhr, M., Radle, M., Repk, J., 2018, "Determination of Heat Transfer Coefficients in Direct Contact Latent Heat Storage Systems", Appl Therm Eng, vol.145, pp. 71-79.
- Lee, K.O., Medina, M.A., Raith, E., Sun, X., 2015, "Assessing The Integration of a Thin Phase Change Material (PCM) Layer in a Residential Building Wall for Heat Transfer Reduction and Management", Appl. Energy, vol.137, pp.699-706.
- Liu, Z., Yu, Z., Yang, T., Qin, D., Li, S., Zhang, G., Haghighat, F., Joybari M.M., 2018, "A Review on Macro-Encapsulated Phase Change Material for Building Envelope Applications", Building and Environment, vol.144, pp. 281-294
- Manz, H., Egolf, P., Suter, P., Goetzberger, A., 1997, "TIM-PCM Externalwall System for Solar Space Heating and Daylighting", Solar Energy, vol. 61, no.6, pp.369-379.
- Marinosci C., Strachan, P. A., Semprini, G., Morini, G.L., 2011, "Empirical Validation And Modelling of a Naturally Ventilated Rainscreen Facade Building", Energy and Buildings, vol.43, pp.853-863.
- Memon, S. A., 2014, "Phase Change Materials Integrated in Building Walls: A State Of The Art Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.31, pp. 870-906.
- Meng, E., Yu, H., Zhan, G., He, Y., 2013, "Experimental and Numerical Study of the Thermal Performance of a New Type of Phase Change Material Room", Energy Conversion And Management, vol.74, pp. 386-394.
- Milián, Y.E., Gutiérrez, A., Grágeda, M., Ushak, S., 2017, "A Review on Encapsulation Techniques for Inorganic Phase Change Materials and the Influence on Their Thermophysical Properties", Renew. Sustain. Energy Rev. vol.73, pp.983-999.
- Mishra, A., Shukla, A., Sharma, A., 2015, "Latent Heat Storage Through Phase Change Materials", Resonance, pp:532-541
- Mohamed, A.S.Y., 2017. "Smart Materials Innovative Technologies in Architecture; Towards Innovative design paradigm", Energy Procedia vol. 115, pp.139-154

- Omrany, H., Ghaffarianhoseini, A., Raahemifar, K., Tookey J., 2016, "Application of Passive Wall Systems for Improving the Energy Efficiency in Buildings: A Comprehensive Review", *Renew Sust Energy Rev*, vol.62, pp.1252-1269
- Onishi, J., Soed, H., Mizuno, M., 2001, "Numerical Study on a Low Energy Architecture Based Upon Distributed Heat Storage System", *Renewable Energy*, vol.22. no.1-3, pp.61-66.
- Parameshwaran, R., Kalaiselvam, S., Harikrishnan, S., Elayaperumal, A., 2012, "Sustainable Thermal Energy Storage Technologies for Buildings: A Review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no.5, pp. 2394-2433.
- Pasupathy, A., Velraj, R., Seeniraj, R., 2008, "Phase Change Material-Based Building Architecture for Thermal Management in Residential and Commercial Establishments", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.12, pp.39-64.
- Pons, O., Aguado, A., Fernández, A.I., Cabeza, L.F., Chimenos, J.M., 2014, "Review of The Use of Phase Change Materials (PCM's) in Buildings with Reinforced Concrete Structures", *Mater. Construcción*, vol.64 no.315, pp.1-11
- Regin, A.F., Solanki, S.C., Saini, J.S., 2008, "Heat Transfer Characteristics of Thermal Energy Storage System Using PCM Capsules: A Review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.12, no.9, pp.2438-2458.
- Saadatian, O., Sopian, K., K., S., Lim, C. Asim, N., 2012, "Trombe Walls:A Review of Opportunities and Challenges in Research", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 6340-6351.
- Sadineni, S.B., Madala, S., Boehm, R.F., 2011, "Passive Building Energy Savings: A Review of Building Envelope Components", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.15, pp.3617-3631.
- Saffari, M., Gracia, A., Ushak, S., , Cabeza, F.L., 2017, "Passive Cooling of Buildings with Phase Change Materials Using Whole Building Energy Simulation Tools: A Review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. pp. 1239-1255
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen C. R., And Buddhi, D., 2009, "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.13, pp.318-345
- Sharma, R.K., Ganesan, P., Tyagi, V.V., Metselaar, H.S.C., Sandaran, S.C., 2015, "Developments in Organic Solid-Liquid Phase Change Materials and Their Applications in Thermal Energy Storage", *Energy Convers. Manag.* Vol.95, pp.193-228.
- Sharma, S.D., Sagara, K., 2005, "Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review", *Int. J. Green Energy*, vol. 2, pp.1-56.
- Shi, X. Memon, S.A. Tang, W. Cui, H. Xing, F., 2014, "Experimental Assessment of Position of Macro Encapsulated Phase Change Material in Concrete Walls on Indoor Temperatures and Humidity Levels", *Energy Build.*, vol.71, pp.80-87.
- Socaciu, L.G., 2012, "Thermal Energy Storage with Phase Change Material", *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, vol. 20, pp.75-98
- Souayfane, F., Fardoun, F., Biwole, P., 2016, "Phase Change Materials (PCM) for Cooling Applications in Buildings: A Review", *Energy And Buildings*, vol.129, pp.396-431.
- Sun, D., Wang, L. J., Li, C.M., 2013, "Preparation and Thermal Properties of Paraffin/Expanded Perlite Composite as Form-Stable Phase Change Material, *Mater. Lett.*, vol.108, pp.247-249.
- Sun, D., Wang, L. 2016, "Research on Heat Transfer Performance of Passive Solar Collector-Storage Wall System with Phase Change Materials", *Energy and Buildings*, vol.119, pp.183-188.
- Tunc, M., Uysal, M., 1991, " Passive Solar Heating of Buildings Using a Fluidized Bed Plus Tromb Wall System", *Applied Energy*, vol.38, pp.199-213.
- Tyagi, V., Buddhi, D., 2007, "PCM thermal storage in buildings: A state of art", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.11, no.6, pp.1146-1166.
- Yang, Q., Zhu, L.H., He, J.J., Yan, Z.F., Ren. R., 2011, "Integrating Passive Cooling and Solar Techniques into the Existing Building in South China", *Advanced Materials Research*, vol.37, pp.368-373.

- Yilmazoğlu, M. Z., 2010, "Isı Enerjisi Depolama Yöntemleri ve Binalarda Uygulanması", Politeknik Dergisi, cilt,13, sayı.1, ss.33-42.
- Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., Ve Mehling, H. 2003, "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials, Heat Transfer Analysis and Applications", Applied Thermal Engineering, vol.23, pp.251-283.
- Zalewski, L., Joulin, A., Lassue, S., Dutil, Y., Rouse, D., 2012, "Experimental Study of Small-Scale Solar Wall", Solar Energy, vol.86. no.1, pp.208-219.
- Zeinelabdein, R., Omer, S., Gan, G., 2018, "Critical Review of Latent Heat Storage Systems for Free Cooling in Buildings", Renew. Sustain. Energy Rev., vol.82, pp. 2843-2868
- Zhai, X.Q., Song, Z.P., Wang. R.Z., 2011, "A Review for the Applications of Solar Chimneys in Buildings", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.15, pp.3757-3767.



ALTI ROTORLU VE SEKİZ ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ FARKLI BOZUCU ETKİ ALTINDA UÇUŞ PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

¹Şahin YILDIRIM , ²Nihat ÇABUK , ³Veli BAKIRCIOĞLU

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE

^{2,3}Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Aksaray, TÜRKİYE

¹sahiny@erciyes.edu.tr, ²nihatcabuk@aksaray.edu.tr, ³vbakircioglu@aksaray.edu.tr

(Geliş/Received: 21.07.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 18.02.2020)

ÖZ: Bu çalışmada, altı rotorlu ve sekiz rotorlu iki tip insansız hava aracın (İHA) bozucu etki altında performanslarının karşılaştırılması için benzetim gerçekleştirilmiştir. Rotor sayısının farklılığının uçuş performansına etkisinin belirlenmesi esasına dayanan bu çalışmada her iki tip araç için aynı kontrolcü kullanılmıştır. Geleneksel kontrol yöntemlerinden olan Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrol yöntemi kullanılan bu çalışmada kontrol parametreleri gözleme dayalı çalışmayla belirlenmiştir. Takip edilmesi beklenen bir yörünge için oluşan hatalar dikkate alınarak bu iki hava aracının performanslarının karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma sonuçları sayısal olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, sekiz rotorlu hava aracının altı rotorlu olana göre bozucu etki arttıkça daha kararlı bir uçuş sergilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok rotorlu insansız hava aracı, Matematiksel model, Benzetim, Yörünge takibi

Comparison of Flight Performances of Unmanned Air Vehicle with Six Rotors and Eight Rotors Under Different Disturbance Effects

ABSTRACT: In this study, six-rotors and eight-rotors unmanned aerial vehicles have been compared under disruptive effect. To determine the effect of the difference of rotor number on the flight performance, the same controller was used in both types of vehicles. Proportional-Integral-Derivative control method, which is one of the traditional control methods, was used and control parameters were determined by observational study. A comparison of these two air vehicles was made by taking into account the errors trajectory tracking for three axes. The comparison results are presented numerically. According to the results, it was observed that the UAV with eight rotors allowed a more stable flight as the disturbance effect increased compared to the UAV with six rotors.

Key Words: Multi-rotors unmanned air vehicle, Mathematical model, Simulation, Trajectory tracking

GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsansız hava araçları (İHA) sabit kanatlı, döner kanatlı olmak üzere kanat iki çeşitte üretilmektedirler. Döner kanatlılardan olan, çok rotorlu (multikopter) olanlar gün geçtikçe kullanım alanı artan dikey olarak kalkış ve iniş yapabilen hava araçlarıdır. Sıradan hava araçları olma yönünde hızla ilerleyen bu araçlar çeşitli özelliklerde tasarlanıp üretilebilmektedirler. Rotor sayısı ve rotorların konumları bu araçların sınıflandırılmasının temelini oluşturmaktadır. Kullanım amacına göre rotor sayıları ve kaldırma kapasiteleri değişiklik gösteren bu araçlar tarımsal ilaçlama ve gözlemlleme, askeri bilgi toplama ve güvenlik, kişisel görüntüleme, endüstriyel tesislerin izlenmesi ve eğlence sektörü olarak

birçok alanda kullanılmaktadır (Akgül ve diğ., 2016; Aykut, 2019; Değirmen ve diğ., 2018; Yılmaz ve diğ., 2018).

Multikopterlerin hareketleri motorlara bağlı olan pervanelerin oluşturduğu kaldırma kuvvetleri ile elde edilir. Dönel ve çizgisel olan araç hareketleri motorların dönüş yönleri ve dönme hızları ile ilişkilidir. Karşılıklı yerleştirilen motorların açisal hızları farkı ile oluşan kuvvet farkı aracın hareket yönünü belirlerken farklı yönde dönen motorların dönme hızları farkı da aracın kendi etrafında dönme yönünü belirlemektedir. Motorlar saat yönünde ve saat yönünün tersinde dönmektedir. Her iki dönme yönünde aynı yönde kaldırma kuvveti oluşurken dönme yönünün farklılığı sadece aracın kendi ekseninde dönme hareketini sağlamaktadır. Motorların zıt yönlü bu dönme hareketlerinden olan saat yönünde dönme (CW) ile ifade edilirken saat yönü tersi yönünde dönme (CCW) ile ifade edilmektedir. Multikopterler genellikle dört rotorlu, altı ve sekiz rotorludur. Rotor sayıları arttıkça kontrol algoritmalarının karmaşıklığı artsa da özellikle bozucu etkiler altında daha kararlı bir uçuş sergileyebilmektedirler.

Yapılan birçok bilimsel amaçlı deneysel ve benzetim çalışmalarında hem sabit kanatlı hem de döner kanatlı İHA'larla ilgili farklı kullanım alanları ilgilidir. Dikey olarak kalkış ve iniş yapabilen İHA'lar özelinde bakıldığında genellikle dört rotorlu, kısmen de altı ve sekiz rotorlu araçlarla ilgili çalışmalar yaygındır (Chamseddine ve diğ., 2014; Eliker ve diğ., 2018; Moussid ve diğ., 2015; Niemiec ve Gandhi, 2017). Moussid ve diğ., bir heksakopter için birkaç kontrol yönteminin karşılaştırmasını yapmışlardır. Farklı uçuş şartlarında farklı kontrol yöntemlerinin birbirlerine göre üstünlüklerini göstermişlerdir. Niemiec, artı (+) ve çarpı (x) konfigürasyona sahip iki kuadkopter in otonom uçuşta karşılaştırmasını yapmışlardır. Artı konfigürasyonlu aracın kontrolünde ileri-geri ve sağ-sol hareketlerinde çarpı konfigürasyonlu araca göre motorların daha fazla kuvvet üretmek zorunda olduğunu ifade etmişlerdir.

Standart konfigürasyonlardan farklı tasarımlar yapılmıştır (Badr ve diğ., 2019; Lin, 2017; Zabunov ve Mardirossian, 2018). Zabunov, tasarladıkları on iki rotorlu dodekakopter modelinde rotorları düşey eksen de ters yerleştirerek rotorlara uygulanan elektriksel güç başına elde edilen kaldırma kuvvetinin incelenmesi esasına dayanan bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre rotorların ters yerleştirildiği modelde daha yüksek kütle/güç oranı elde etmişlerdir. Badr, yaptıkları tasarım çalışmasında gövdeye atanan koordinat sistemine göre rotorların dönme eksenlerinin değiştirebildiği bir tasarım gerçekleştirmişlerdir. Daha kararlı askıda kalma performansı elde edebilmek için gerçekleştirilen bu tasarımla daha fazla serbestlik derecesi elde edilerek daha kararlı bir uçuş elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

Dikey olarak kalkış ve iniş yapan İHA'ların kontrolü üzerine yapılan çalışmalarda (Bangura ve Mahony 2017; Brito ve diğ., 2018; Criado ve Rubio, 2015; Muliadi ve Kusumoputro, 2018) Muliadi, dört rotorlu insansız hava aracının yükseklik kontrolünü yapay sinir ağları ve PID ile gerçekleştirerek bunların karşılaştırmasını içeren bir çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre yapay sinir ağları temelli kontrolcü PID kontrolcünden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Rotor/motor arızası durumunda çok rotorlu insansız hava araçlarının kontrolü ile ilgili yapılan çalışmalarda (Hu ve diğ., 2016; Mueller ve D'Andrea, 2014; Nguyen ve Hong, 2018) Mueller, rotor/motor arızası durumunda aracın konumunu koruyabilmesi için gerçekleştirdikleri strateji ile aracın konumunu koruyabildiğini göstermişlerdir. Çok rotorlu insansız hava araçlarının olumsuz hava şartlardaki performanslarının incelenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda (Antonelli ve diğ., 2018; López-Estrada ve diğ., 2016; Russell ve diğ., 2016; Solovyev Viktor ve diğ., 2006) Antonelli, aracın ağırlık merkezinin değişmesi ile oluşan olumsuz duruma uygun uyarlamalı bir kontrol yöntemi geliştirip uygulamışlardır.

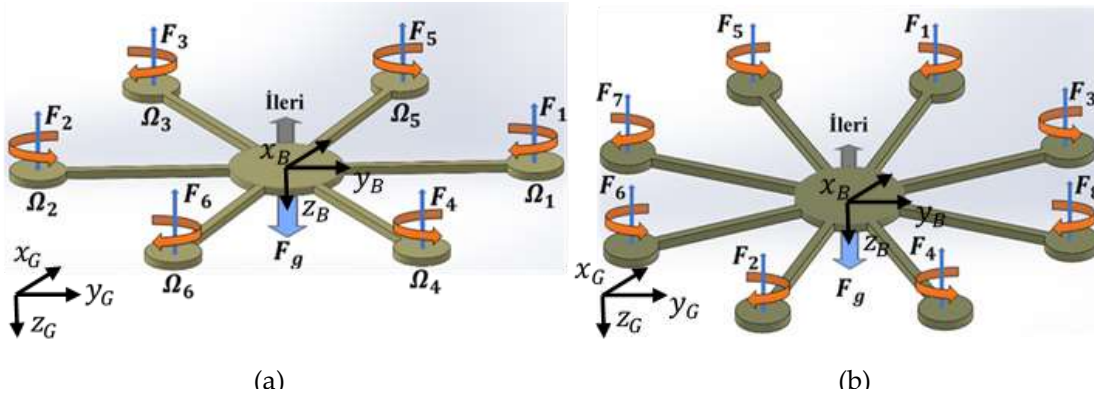
Bu çalışmada, İHA'larda rotor sayısının bozucu etki altındaki uçuş performansına etkisi araştırılmıştır. Bu bağlamda, altı ve sekiz rotora sahip iki İHA'nın, farklı bozucu etkiler altında uçuş benzetimleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Uçuş performansına sadece rotor sayısının etkisinin değerlendirilebilmesi için kontrolcü parametreleri ve rotor başına düşen kütle miktarı sabit tutulmuştur. Kontrolcü olarak literatürde sıklıkla başvurulmuş ve İHA'ların uçuş kontrolünde etkinliği kanıtlanmış PID kontrolcüler kullanılmıştır. Bu iki aracın uçuş performansının karşılaştırılması, uçuş süresince gerçekleşen konum hatalarının karelerinin ortalamalarının karekökü (RMS) değerleri dikkate alınarak yapılmıştır. Bu çalışma, herhangi bir amaç için kullanılacak bir İHA'nın uçuş performansına etkisi açısından rotor sayısının belirlenmesine katkı sunacağı düşünülmektedir.

Çalışmanın sunumu, benzetim çalışmaları için gerekli sistemin matematiksel modeli elde edilmesi, farklı bozucu girişler için her iki sistem için uçuş benzetimlerinin gerçekleştirilmesi ile sonuçların karşılaştırılması ve son olarak elde edilen bulguların tartışılması şeklindedir.

SİSTEM TANIMI ve MODELLENMESİ (SYSTEM DESCRIPTION and MODELLING)

Mekanik sistemlerin matematiksel olarak modellenmesinde karmaşıklığı ya da çözümsüzlüğü ortadan kaldırmak için bazı kabuller yapılmaktadır. Bu çalışma için de yapılan kabuller aşağıda verilmiştir.

- Araçların mekanik bileşenleri esnek değildir.
- Araçlar geometrik olarak simetriktir.
- Coğrafi koşullar dikkate alınmamıştır.
- Araçların ağırlık merkezi geometrik merkezlerindedir.



Şekil 1. Araçlara ait katı model ve serbest cisim diyagramları a) Altı rotorlu, b) Sekiz rotorlu

Figure 1. Solid model and free body diagrams of vehicles a) Six rotors, b) Eight rotors

Bu kabuller çerçevesinde araçların modellenmesinde araca etki eden yerçekimi ivmesi, araçların kütlesi, pervanelerin geometrisine ve açısal hızına bağlı oluşan kaldırma kuvveti, bu kuvvetle oluşan aracın açısal ve çizgisel hızları, rotorların ve pervanelerin ataletleri ve açısal hızlarından kaynaklanan ters moment ve jiroskobik etkiler dikkate alınmıştır.

Çizelge 1. İHALara ait fiziksel özellikler

Table 1. The physical specifications of the UAVs

Değişkenler	l [mm]	F_{rotor} [N]	$R_{pervane}$ [inch]	Kütle [kg]	
				6 rotorlu	8 rotorlu
Değerler	600	50	15	12	16

Sisteme ait fiziksel özellikler Çizelge 1’de verilmiştir. Motor sayısı n olmak üzere ($i=1...n$) her bir motorun Ω_i açısal hızı ile dönmesiyle oluşan kaldırma kuvvetleri F_i , yerçekimi ve aracın toplam kütlesi ile oluşan yere doğru olan kuvvet F_g , Şekil 1’de araçların katı modelleri üzerinde vektörel olarak gösterilmiştir.

Bir motora bağlı pervanenin oluşturacağı kaldırma kuvveti motorun açısal hızının karesi ile doğru orantılıdır. Pervanenin mekanik özelliklerine bağlı olarak deneysel bir şekilde elde edilen kuvvet sabiti olan k_f ve bu kuvvet arasındaki ilişki Eşitlik 1’de verilmiştir.

$$F_i = k_f * \Omega_i^2 \quad (1)$$

Pervaneler tarafından üretilen toplam kaldırma kuvveti F_t Eşitlik 2’deki gibi hesaplanır.

$$F_t = \sum_{i=1}^n F_i \quad (2)$$

Şekil 1’de araç gövdesine sabitlenen gövde koordinat sistemi ve yerde bulunan koordinat sistemleri görülmektedir. Bu iki koordinat sistemi arasındaki ilişki bir matris ile ifade edilebilir. Eşitlik 3’te verilen üç eksene ait dönme matrislerinde ψ , θ ve φ iki koordinat sisteminin eksenleri arasında sırasıyla x, y, z eksenlerinde dönme açıları olup bu matrisler ileri yönlü çarpıldığında Eşitlik 4’te görüldüğü gibi iki koordinat sistemi arasındaki dönme matrisi elde edilir.

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c(\psi) & s(\psi) \\ 0 & -s(\psi) & c(\psi) \end{bmatrix}, R_y = \begin{bmatrix} c(\theta) & 0 & -s(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ s(\theta) & 0 & c(\theta) \end{bmatrix}, R_z = \begin{bmatrix} c(\varphi) & s(\varphi) & 0 \\ -s(\varphi) & c(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^B R_G = R_x * R_y * R_z \quad (4)$$

Elde edilen dönme matrisi de dikkate alınarak aracın gövdesine etki eden net kuvvet Eşitlik 5’te görüldüğü gibi elde edilir. Bu eşitlikte F_d ise aracın gövdesinde hava sürtünmesinden dolayı oluşan sürüklenme kuvveti olup kontrolcünün karmaşıklığının azaltılması amacıyla bu çalışmada sıfır olarak kabul edilmiştir.

$$F_b = F_t - ({}^B R_G * F_g + F_d) \quad (5)$$

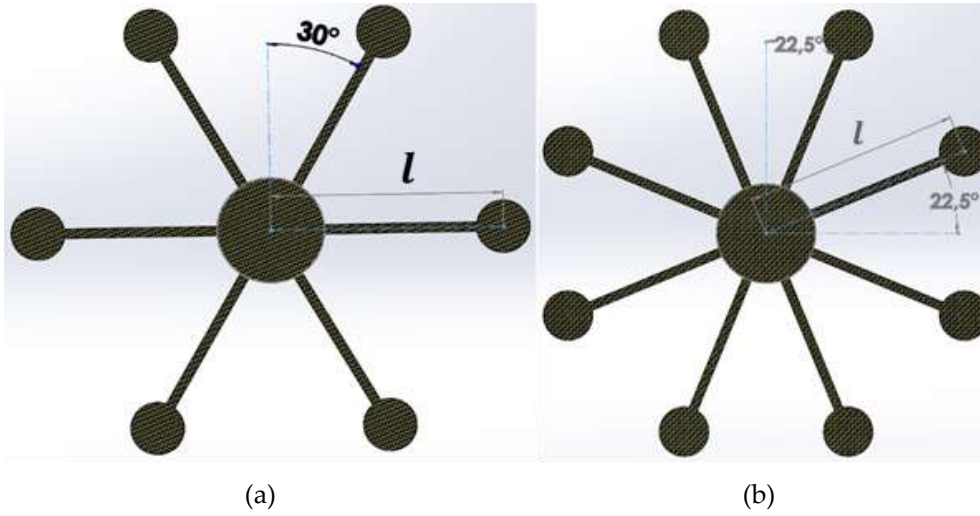
Araca etki eden bu kuvvetler araçta bir moment etkisi oluşturabilmektedirler. Bu momentler pervanelerin ürettiği kuvvet farkından dolayı oluşan, roll-pitch olarak ifade edilen, sırasıyla x ve y eksenlerindeki momentler olup z ekseninde dönmeye neden olan moment ise yaw olarak ifade edilen, rotorlar ile pervanelerin mekanik özelliklerine bağlı olan ve rotorların dönme yönünü tersinde oluşan tepki momentidir. Bu momentte yine rotorların açısal hızının karesi ile orantılı olup bu oran bir moment sabiti olan k_m ile ifade edilir. Bu sabit de kuvvet sabiti gibi deneysel olarak hesaplanır. Moment, rotorun açısal hızı ve moment sabiti arasındaki ilişki aşağıda verilen eşitlikle gösterilir.

$$M_i = k_m * \Omega_i^2 \quad (6)$$

Tüm bu momentlerin hesaplanmasında pervanelerin ürettikleri kaldırma kuvvetlerinin moment etkisinin aracın geometrisi ile ilgili olduğu için pervanelerin araç gövdesindeki koordinat eksenine göre yerleşimine göre hesaplanabilir. Bu momentler, momentlere sebep olan kuvvetler ve kuvvetlere sebep olan motorların açısal hızları arasındaki ilişki Eşitlik 7’deki matris eşitliği ile kurulur.

$$U = \begin{bmatrix} F_t \\ M_r \\ M_p \\ M_y \end{bmatrix} = K_{4 \times n} * \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \vdots \\ \Omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Burada n , motor sayısı olmak üzere Eşitlik 8 ve 9’da verilen $4 \times n$ boyutlu K matrisi araçların geometrisine göre oluşturulur. Bu matrisler elde edilirken hesaba katılması gereken diğer bir husus da aracın hareket yönünün kabulüdür. Literatürde hareket yönünün kabulü çarpı ($\times$) konfigürasyon ve artı ($+$) konfigürasyon olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Çarpı ($\times$) konfigürasyonda aracın ileri yönü herhangi iki kol ortasından geçen eksene çakışık iken, artı ($+$) konfigürasyonda aracın ileri yönü herhangi bir kol eksenini ile çakışık olmaktadır. Bu çalışmada her iki araç içinde x konfigürasyon kullanılmış olup bahsi geçen matris bu durum dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bunun yanında her iki araçta da düzgün çokgen geometrisine göre motorlar yerleştirilmiş olduğundan Şekil 2’de görüldüğü üzere altı rotorlu araçta iki komşu kol arasındaki açı 60 derece iken sekiz rotorlu olan araçta bu açı 45 derecedir.



Şekil 2. Araçlara ait rotorların yerleşim şekilleri a) Altı rotorlu b) Sekiz rotorlu

Figure 2. Placement of vehicles rotors a) Six rotors b) Eight rotors

$$K_{4 \times 6} = \begin{bmatrix} k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f \\ B & -B & -B * s(\alpha) & B * s(\alpha) & B * s(\alpha) & -B * s(\alpha) \\ 0 & 0 & B * c(\alpha) & -B * c(\alpha) & B * c(\alpha) & -B * c(\alpha) \\ k_m & -k_m & k_m & -k_m & -k_m & k_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sekiz rotorlu araç için de benzer şekilde K matrisi oluşturulur. Burada da matrisin daha sade yazılabilmesi için $A = k_f * l$, $s(\beta) = \sin(\beta)$ ve $c(\beta) = \cos(\beta)$ kısaltmaları yapılmıştır.

$$K_{4 \times 8} = \begin{bmatrix} k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f \\ A * s(\beta) & -A * s(\beta) & A * c(\beta) & A * s(\beta) & -A * s(\beta) & -A * c(\beta) & -A * c(\beta) & A * c(\beta) \\ A * c(\beta) & -A * c(\beta) & A * s(\beta) & -A * c(\beta) & A * c(\beta) & -A * s(\beta) & A * s(\beta) & -A * s(\beta) \\ k_m & k_m & -k_m & -k_m & -k_m & -k_m & k_m & k_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

Hem altı hem de sekiz rotorlu araç için K matrisi oluşturulurken aracın gövdesine atanan koordinat sisteminin x ekseninin doğrultusu araçların ileri yönü olarak kabul edilir. Bu eksen iki kolun ortasından geçtiğinden kolların eksenlere yaptığı açılar altı rotorlu için 30 derece ($\alpha = 30^\circ$), sekiz rotorlu için 22,5 derece ($\beta = 22.5^\circ$) olarak alınır. Altı rotorlu araçta her bir rotorun açısal hızına göre oluşturulan toplam kuvvet ve momentler arasındaki ilişkiyi kuran matrisin daha sade yazılabilmesi için $B = k_f * l$, $s(\alpha) = \sin(\alpha)$ ve $c(\alpha) = \cos(\alpha)$ kısaltmaları yapılmıştır. Burada l ise bir rotorun dönme eksenini ile aracın geometrik merkezinden geçen eksene olan dik uzaklığı yani kol uzunluğudur.

Eşitlik 7'de verilen genel eşitlik göz önüne alındığında istenilen kuvvet ve moment değerleri için gerekli rotor hızlarının bulunabilmesi için K matrisinin tersi alınması gerekmektedir. Dört rotordan fazla rotorlu araçlarda bu matris kare matris olamayacağından bu matrisin tersinin alınması da standart dışı bir yöntem olan, literatürde pseudo-invers yöntemi olarak bilinen yöntemle alınabilmektedir. Bu yöntemle elde edilen matris ideal bir ters matris olmasa da çok yaklaşık bir sonuç vermektedir [23]. K matrisinin tersi $*K = K^T * (K * K^T)^{-1}$ ve U kuvvet ve moment vektörü olmak üzere rotor açısal hızları Eşitlik 10'da verilmiştir.

$$\Omega^2 = *K * U \quad (10)$$

Diğer bir moment ise jiroskobik moment olup bu da yine pervane ile rotorların mekanik özeliğine bağlı olarak rotorların dönme eksenlerindeki bir değişimin neden olduğu momenttir. Jiroskobik momentlerin z ekseninde moment etkisi yok denecek kadar az olduğundan dikkate alınmamıştır. Eşitlik 11 ve 12'de jiroskobik etkinin x ve y eksenlerine yani roll ve pitch momentlerine etkisi verilmiştir. Bu

eşitliklerde I_{zz} , rotorun dönme eksenindeki ataleti, p ve q ise gövde koordinat sistemine göre sırasıyla pitch ve roll açılal hızlarıdır.

$$M_x = -\sum_{i=1}^n (-1)^i * (I_{zz} * p * \Omega_i) \quad (11)$$

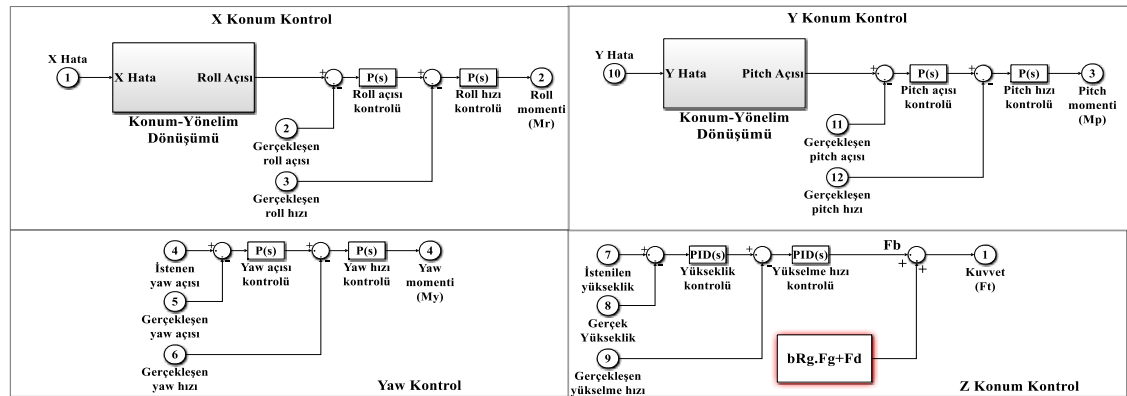
$$M_y = \sum_{i=1}^n (-1)^i * (I_{zz} * q * \Omega_i) \quad (12)$$

Araca etki eden toplam moment Eşitlik 13'te verildiği üzere pervanelerin ürettiği kaldırma kuvvetinden dolayı oluşan roll-pitch-yaw (M_{rpy}) momentleri ve jiroskobik etkiden dolayı oluşan momentlerin (M_{jr}) toplamı ile elde edilir.

$$M_T = M_{rpy} + M_{jr} = \begin{bmatrix} M_r \\ M_p \\ M_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Yörünge takibi ve sistem yöneliminin kontrolü için hiyerarşik PID kontrolcüler kullanılmıştır. Kontrolcü mimarisinin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir. Sistemin X ve Y yönündeki konumları sırasıyla aracın Roll ve Pitch açıları ile kontrol edilmektedir. Z yönündeki konum ise motorların ürettiği toplam kaldırma kuvveti ile kontrol edilmektedir. X ve Y yönündeki hatalar Eşitlik 14'teki dönüşüm formülü kullanılarak istenen konumların sağlanması için gerekli Roll ve Pitch açıları elde edilmektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi iç kontrol çevriminde hızın, dış kontrol çevriminde konumun kontrol edildiği kaskat kontrolcü yapısı kullanılmıştır.

Bu bölümde elde edilen sisteme ait matematiksel model kullanılarak benzetim çalışmaları Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Kontrolcü sistemi yine Matlab/Simulink ortamında modellenmiş ve kazançlar deneme-yanılma yoluyla belirlenmiştir.

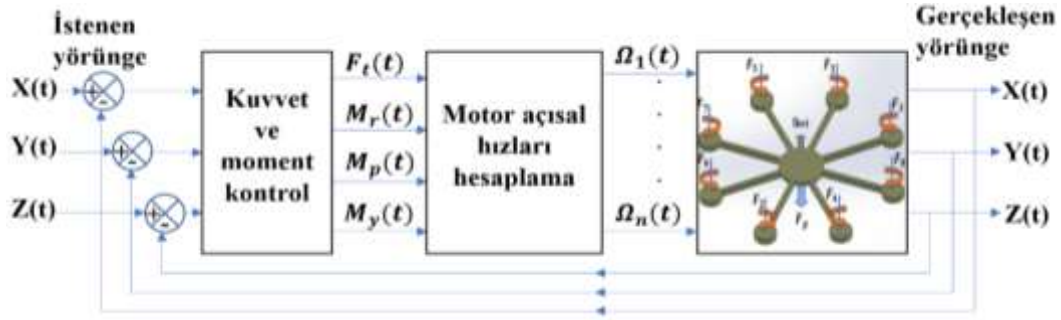


Şekil 3. Benzetim çalışmasında kullanılan kontrolcü mimarisi

Figure 3. Controller architecture used in the simulations

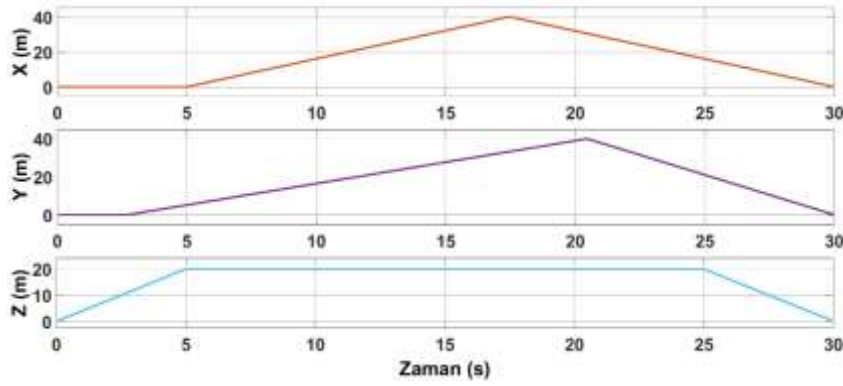
BENZETİM VE SONUÇLAR (SIMULATIONS and RESULTS)

Modellemesi yapılan sistemlerin benzetiminde PID kontrol yöntemi kullanılmıştır. Hem altı rotorlu hem de sekiz rotorlu araç modelinde aynı kontrolcü kullanılarak aynı bozucu etki altında benzetimler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te benzetim çalışmasında kullanılan model görülmektedir. Periyodik bir sinyal araçların kütle merkezine üç eksen de bozucu etki olarak uygulanmıştır. Benzetim çalışmaları hem 20 m'de askıda kalma hem de Şekil 5'te gösterilen yörüngenin takibi olmak üzere iki farklı şekilde 30 saniye uçuş süresi için gerçekleştirilmiştir.



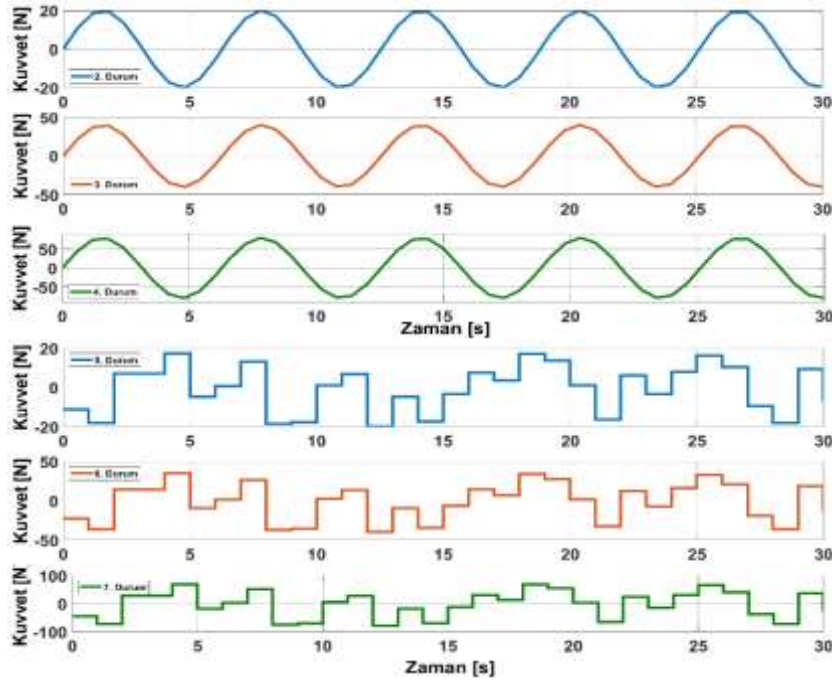
Şekil 4. Benzetim çalışmasında kullanılan sistemin modeli

Figure 4. Model of the system used in the simulation



Şekil 5. Benzetim çalışmasında kullanılan yörünge

Figure 5. The trajectory used in the simulations



Şekil 6. Benzetimlerde İHA'lara uygulanan bozucu etkiler.

Figure 6. Disturbance effects applied to UAVs in simulations

Benzetim çalışmaları, 3 adedi periyodik ve 3 adedi rastgele olmak üzere 6 farklı tipte bozucu etkinin olduğu durum ve bozucu etkinin olmadığı durum olmak üzere toplamda 7 farklı durum için

gerçekleştirilmiştir. Bozucu etkiler araç kütle merkezine, her üç ekseninde de aynı olacak şekilde uygulanmıştır. Çizelge 2’de benzetim çalışmasında kullanılan 7 farklı durum özetlenmiştir. Uygulanan bozucu girişlere ait grafikler Şekil 6’da verilmiştir.

Çizelge 2. Benzetimlerde araçlara uygulanan bozucu etkiler.

Table 2. Disturbance effects applied to vehicles in simulations

Bozucu etki [N]						
Yok	Periyodik Giriş Genliği			Rastgele Giriş Genlik Aralığı		
1. Durum	2. Durum	3. Durum	4. Durum	5. Durum	6. Durum	7. Durum
0	20	40	80	±20	±40	±80

Her iki İHA’nın uçuş benzetiminde, uygulanan bozucu etkiler sonucunda oluşan konum hatalarının RMS değerleri ve bu değerlerin üç eksenindeki aritmetik ortalama değerleri Çizelge 3 ve Çizelge 4’te verilmiştir. Yörünge takibi sırasında oluşan konum hatalarının RMS değerleri uçuş süresince 0.01sn örnekleme zamanı ile hesaplanmıştır.

Çizelge 3. 20 m’de 30 s boyunca askıda kalma durumunda oluşan konum hatalarının RMS değerleri

Table 3. RMS values of position errors that occur in the case of hovering at 20 m during 30 s

		RMSE [m]						
Eksen		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
		Durum	Durum	Durum	Durum	Durum	Durum	Durum
Altı rotorlu	X	0,003	0,28	0,61	2,26	0,20	0,45	1,55
	Y	0,05	0,27	0,56	1,45	0,20	0,45	1,49
	Z	0,28	0,27	0,29	0,42	0,29	0,33	1,53
	Ortalama	0,11	0,27	0,49	1,38	0,23	0,40	1,52
Sekiz rotorlu	X	0	0,20	0,44	1,1	0,15	0,32	0,83
	Y	0	0,20	0,42	0,90	0,15	0,32	0,85
	Z	0,28	0,28	0,30	0,36	0,30	0,33	0,45
	Ortalama	0,09	0,23	0,38	0,78	0,20	0,32	0,71

Çizelge 4. Yörünge takibinde oluşan konum hatalarının RMS değerleri*Table 4. RMS values of position errors in trajectory tracking*

	Eksen	RMSE [m]						
		1. Durum	2. Durum	3. Durum	4. Durum	5. Durum	6. Durum	7. Durum
Altı rotorlu	X	1,48	1,53	1,65	3,39	1,58	1,70	2,11
	Y	1,43	1,46	1,48	2,41	1,47	1,48	1,98
	Z	0,36	0,38	0,41	1,1	0,39	0,43	0,80
	Ortalama	1,09	1,12	1,18	2,3	1,14	1,20	1,63
Sekiz rotorlu	X	1,48	1,51	1,59	2,03	1,55	1,64	1,82
	Y	1,43	1,46	1,49	1,70	1,46	1,48	1,55
	Z	0,38	0,40	0,42	0,60	0,40	0,43	0,54
	Ortalama	1,1	1,12	1,17	1,44	1,14	1,18	1,30

TARTIŞMA (DISCUSSION)

Altı rotorlu ve sekiz rotorlu dikey olarak iniş-kalkış yapabilen çok rotorlu insansız hava araçlarının modellemesi ve benzetimi yapılan bu çalışmada bu iki tip aracın farklı bozucu etkiler altında performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. PID kontrolcü kullanılan benzetim çalışmasında hem görsel hem de sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Askıda kalma ve yörünge takibi olarak iki farklı uçuş tipinde benzetim yapılmış olup her iki benzetim için araçların konum hataları dikkate alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Hata kıyaslamada sıklıkla kullanılan, hataların karelerinin ortalamasının karekökü (RMSE) yöntemi kullanılmış olup elde edilen RMSE değerleri Çizelge 3 ve Çizelge 4'te verilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, beklendiği gibi yörünge takibinde oluşan konum hataları ile askıda kalma durumundaki konum hataları aynı bozucu etki seviyesinde karşılaştırıldığında askıda kalma durumunda oluşan hata diğerine göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, bozucu etkinin genliği arttıkça sekiz rotorlu aracın altı rotorlu araca göre daha az hata ile yörüngeyi takip ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, genliklerin artırılması ile yörünge izleme hatalarındaki artışlar incelendiğinde daha net görülmektedir. Bu bağlamda, yörünge izlemede oluşan ortalama RMSE değerinin artış oranı 2. ve 3. Durumlar için kıyaslandığında 6 rotorlu İHA'da %5,3 bir artış gerçekleşirken 8 rotorlu İHA'da %4,4 olarak gerçekleşmiştir. Aynı şekilde 3. ve 4. Durumda ortalama RMSE değerinin artış oranı kıyaslandığında 6 rotorlu İHA'da %95 bir artış gerçekleşirken 8 rotorlu İHA'da %23 olarak gerçekleşmiştir. Benzer kıyaslama, 5., 6. ve 7. Durumlar içinde yapıldığında 6 rotorlu İHA'da sırasıyla %5,2 ve %36 olarak gerçekleşirken, 8 rotorlu İHA'da sırasıyla %3,5 ve %10 olarak gerçekleşmiştir. 4. ve 7. Durumlar için ortalama RMSE değerindeki ani artışların nedeni, periyodik ve rastgele bozucu etki tipinden ve rotor sayısından bağımsız, bozucu etki genliğinin motorların ürettiği toplam kuvvete oranı arttıkça yörünge izleme hatasındaki artış oranı da artmaktadır şeklinde yorumlanabilir. Sonuç olarak, herhangi bir amaç için tasarlanacak olan bir İHA'da rotor sayısının artırılması ile daha iyi bir uçuş performansı elde edilebileceği söylenebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma FBA-2017-7393 kodlu proje kapsamında Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akgül, M., Yurtseven, H., Demir, M., Akay, A. E., Gülci, S., & Öztürk, T., 2016, "İnsansız Hava Araçları ile Yüksek Hassasiyette Sayısal Yükseklik Modeli Üretimi Ve Ormancılıkta Kullanım Olanakları", İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 66(1), ss.104–118.
- Antonelli, G., Cataldi, E., Arrichiello, F., Robuffo Giordano, P., Chiaverini, S., & Franchi, A., 2018, "Adaptive Trajectory Tracking for Quadrotor MAVs in Presence of Parameter Uncertainties and External Disturbances", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 26(1), ss. 248–254.
- Aykut, N. O., 2019, "İnsansız Hava Araçlarının Kırı Çizgisinin Belirlenmesinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Geomatik, 4(2), ss. 141–146.
- Badr, S., Mehrez, O., & Kabeel, A. E., 2019, "A design modification for a quadrotor UAV: modeling, control and implementation". Advanced Robotics, 33(1), ss. 13–32.
- Bangura, M., & Mahony, R., 2017, "Thrust Control for Multirotor Aerial Vehicles", IEEE Transactions on Robotics, 33(2), ss. 390–405.
- Brito, V., Brito, A., Palma, L. B., & Gil, P., 2018, "Quadcopter Control Approaches and Performance Analysis", In Proceedings of the 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (Vol. 1, pp. 86–93). SCITEPRESS - Science and Technology Publications.
- Chamseddine, A., Theilliol, D., Sadeghzadeh, I., Zhang, Y., & Weber, P., 2014, "Optimal reliability design for over-actuated systems based on the MIT rule: Application to an octocopter helicopter testbed", Reliability Engineering and System Safety, 132, ss. 196–206.
- Criado, R. M., & Rubio, F. R., 2015, "Autonomous path tracking control design for a comercial quadcopter", IFAC-PapersOnLine, 28(9), ss. 73–78.
- Değirmen, S., Çavdur, F., & Sebatlı, A., 2018, "Afet OperasyonlarıYönetimindeİnsansız Hava Araçlarının Kullanımı: Gözetleme OperasyonlarıÇin Rota Planlama", Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 23(4), ss. 11–26.
- Eliker, K., Zhang, G., Grouni, S., & Zhang, W., 2018, "An Optimization Problem for Quadcopter Reference Flight Trajectory Generation", Journal of Advanced Transportation, 2018, ss. 1–15.
- Hu, D., Wang, H., & Zhu, Q., 2016, "Emergency Control of AR Drone Quadrotor UAV Suffering a Total Loss of One Rotor", IEEE Photonics Journal, 8(2), ss. 1–8.
- Lin, C. E., & Supsukbaworn, T., 2017, "Development of Dual Power Multirotor System", International Journal of Aerospace Engineering, 2017, ss. 1–19.
- López-Estrada, F. R., Ponsart, J.-C., Theilliol, D., Zhang, Y., & Astorga-Zaragoza, C.-M., 2016, "LPV Model-Based Tracking Control and Robust Sensor Fault Diagnosis for a Quadrotor UAV", Journal of Intelligent & Robotic Systems, 84(1–4), ss. 163–177.
- Moussid, M., Idalene, A., Sayouti, A., & Medromi, H., 2015, "Autonomous HexaRotor Arial Dynamic Modeling and a Review of Control Algorithms", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), ss. 1197–1204.
- Mueller, M. W., & D'Andrea, R., 2014, "Stability and control of a quadcopter despite the complete loss of one, two, or three propellers", Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, ss. 45–52.
- Muliadi, J., & Kusumoputro, B., 2018, "Neural Network Control System of UAV Altitude Dynamics and Its Comparison with the PID Control System", Journal of Advanced Transportation, 2018(D), ss. 1–18.
- Nguyen, N. P., & Hong, S. K., 2018, "Fault-tolerant Control of Quadcopter UAVs Using Robust Adaptive Sliding Mode Approach", Energies, 12(1), ss. 1-15.
- Niemiec, R., & Gandhi, F., 2017, "Multirotor Controls, Trim, and Autonomous Flight Dynamics of Plus- and Cross-Quadcopters", Journal of Aircraft, 54(5), ss. 1910–1920.
- Russell, C., Jung, J., Willink, G., & Glasner, B., 2016, "Wind Tunnel and Hover Performance Test Results for Multicopter UAS Vehicles", In Proceedings of the AHS International 72nd Annual Forum, ss. 3448–3467.

- Solovyev Viktor, V., Finaev Valery, I., Zargaryan Yuri, A., Shapovalov Igor, O., & Beloglazov Denis, A., 2006, "Simuation of wind effect on quadrotor flight", *ARPAN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(4), ss. 1535-1538.
- Yılmaz, H. M., Mutluoğlu, Ö., Ulvi, A., Yaman, A., & Bilgilioğlu, S. S., 2018, "İnsansız Hava Aracı ile Ortofoto Üretimi ve Aksaray Üniversitesi Kampüsü Örneği", *Geomatik*, 3(2), ss. 129-136.
- Zabunov, S., & Mardirossian, G., 2018, "Innovative Dodecacopter Design – Bulgarian Knight", *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 5(4), ss. 1-16



ENDÜKTİF KUPLAJLI RFID'NİN TASARIM ESASLARI VE ARDUİNO'LU BİR UYGULAMASI

Yalçın EZGİNCİ

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Konya, TÜRKİYE

¹yezginci@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 05.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.02.2020)

ÖZ: RFID, radyo frekanslı haberleşme sinyalleri kullanılarak canlı veya nesneleri tanıyabilen temassız bir teknolojidir. Bu çalışmada, RFID'lı endüktif kuplaj tekniğinin dayandığı temel esaslar özetlenmektedir. endüktif kuplaj tekniği, RFID okuyucu ve etiketini birbirine manyetik yol üzerinden bağlanan bobinlerin, bir frekansta rezonansa gelerek belirli sinyalleri karşılıklı olarak birbirine aktarmasına dayanır. RFID etiket ve okuyucusunda bu sinyalleri oluşturan, çeşitli bilgileri tutan ve kodlayan elektronik düzenler basitçe tanıtılmıştır. Son bölümde ise 125 kHz'de çalışan RFID etiketinin ID-3LA okuyucusu ile gerçekleştirilen bir uyarı ve bir anahtar kullanımı gösterilmiştir. Ayrıca RFID okuyucu ile Arduino Uno kullanarak bir RFID etiketinin tanım kodlarının bilgisayara aktarıldığı bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: RFID teknoloji, endüktif kuplaj, RFID okuyucu, etiket, Arduino

Working Principles of Inductive Coupled RFID and a RFID Design Application with Arduino

ABSTRACT: RFID is a contactless technology that can recognize living organisms or objects by using radio frequency communication signals. In this study, the basic principles on which RFID inductive coupling technique is based, are summarized. Inductive coupling technique is based on the coils that are attached to the RFID reader and tag via magnetic path to resonance at a frequency and transfer certain signals to each other. Electronic devices that generate these signals, hold and encode various information are simply introduced in the RFID tag and reader. In the last section, a warning and a key usage are shown with the ID-3LA reader of the RFID tag operating at 125 kHz. In addition, an application was carried out by using Arduino Uno with RFID reader, where the identification codes of an RFID tag are transferred to the computer.

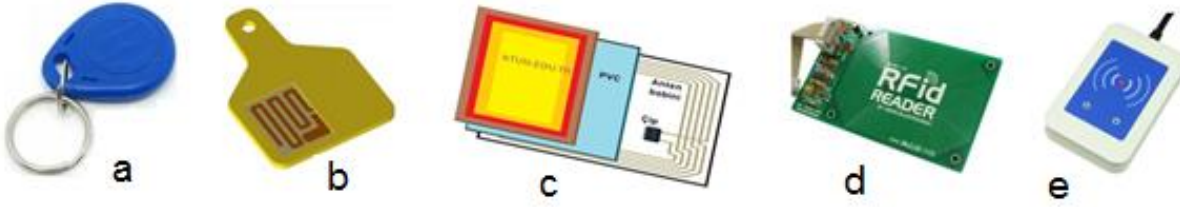
Key Words: RFID technology, inductive coupling, RFID reader, tag, Arduino

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Radyo frekanslı tanıma, RFID etiket taşıyan varlıklar hakkında bilgiler alınmasını sağlayan otomatik tanıma sistemidir. İlk olarak 1973'de aktif RFID etiketi için Mario Cardullo ve anahtarsız geçiş sağlayan pasif RFID etiketi için Charles Walton patent almışlardır. Pasif etiketli RFID sistemleri bu tarihten itibaren kısa sürede büyükbaş hayvan, taşıt ve ürün takibi ile güvenlik uygulamalarında kullanılarak yaygınlaşmıştır. Toplu taşıma biletleri ve üniversite kimlik kartları, pasif RFID kartının gündelik kullanımının en tipik örnekleridir. RFID sistemleri amaca, kullanılacak frekansa ve etiket yapısına göre geniş bir bölgede yayılım göstermektedir. Yakın mesafeler için 125 kHz. ve 13.56 MHz.'de birkaç cm. den 1 metreye kadar, uzak mesafeler için 900 MHz. ve 2.45 GHz.'de onlarca metreye kadar etki alanı olan bir teknolojidir. RFID etiketleri, içinde pil bulundurma durumlarına göre pasif, aktif ve yarı pasif olarak

okunabilir ve okunup yazılabilir şekilde hazırlanmış olabilir. Pasif RFID etiketleri pil içermez, bunun yerine okuyucudan aldığı enerji ile beslenirler. Pasif etiketler kısa mesafeli, küçük bellek kapasiteli olup maliyetleri bir kaç TL seviyesindedir. RFID okuyucular sabit veya elde taşınabilir. RFID okuyucunun okuma kapasitesi; mikroçipin frekansına, gücüne, RFID etiketin aktif veya pasif olmasına, antenin kalitesine, ortamda sıvı veya metal olup olmamasına gibi etkenlere bağlıdır (Ulaby ve diğ., 2013).

RFID sistemi esas itibarıyla verileri içeren etiket (Şekil 1.a-b-c) ve etiketteki bilgileri okuyabilen bir okuyucudan (Şekil 1.d-e) meydana gelir. Bobin üzerine parazitleri önlemek ve sağlamlık için PVC vb. katmanla kaplanmıştır (Şekil 1.c). Etiket ve okuyucu bobinleri arasında veri ve enerji transferi, belirli bir mesafeden, temas olmadan sağlanmaktadır. Bir okuyucunun bir etiket ile kuplaj yapabildiği mesafeye *Okuma Aralığı* denir (Paxar, 2015). RFID sinyalleri doğrudan görüş alanında olmadan, karton ve plastikten geçebilirken, metaller ve bazı sıvılardan geçebilmesi hemen hemen mümkün değildir. Kullanılan frekans, etiketin yapısı, okuyucunun gücü ve antenin tasarımı gibi çeşitli faktörler okuma aralığını belirler (Yüksel ve Zaim, 2009).



Şekil 1. RFID Etiket ve Okuyucular a.Anahtar Etiket, b.Küpe Etiket, c.Kredi kart Etiket, d.RFID Okuyucu, e.RFID Okuyucu

Figure 1. RFID Tags and Readers a.Key Tag, b.Earring Tag, c.Card Card Tag, d.RFID Reader, e.RFID Reader

RFID etiketi, benzersiz bir tanım kodu yerleştirilmiş olan elektronik bir mikroçip ve radyo frekanslı haberleşmeyi sağlayan bir bobin içerir. RFID etiketindeki veriler, EPC (Elektronik Ürün Kodu) adı verilen ve her bir nesneyi tek tek tanımlayabilen uluslararası bir nesne tanımlama standardına göre yapılandırılmıştır. RFID verileri temelde nesneye ait kimlik, yer ve zaman bilgilerini tutarken ilave olarak ürün, imalatçı, konum, güzergah gibi detay bilgileri içerebilir (Maraşlı ve Çıbuk, 2015).

RFID sistemlerin güvenliğini etkileyen en önemli faktörler etiket ile okuyucu ara yüz bölümünde gerçekleştirilen hatun dinlenmesi, hattaki bilginin değiştirilmesi, bilgilerin yetkisiz okunması, etiketin kopyalanması, bilgilerin yetkisiz tekrar edilmesi gibi etkenlerdir (Çiftçi, 2009). Güvenlik açısından bu faktörlerin oluşturabileceği açıkların kapatılabilmesi, yok edilmesi veya en aza indirilmesi amacıyla teknolojik çalışmalar devam etmelidir.

RFID'nin Avantajları ve Kullanım Alanları (Advantages and Uses of RFID)

RFID'li sistemler, lojistik ve endüstriyel ortamlarda sabit ve hareketli unsurlardan verileri temassız, yakın etkileşim ile toplayıp bilgisayar veya ağdaki veri tabanlarına aktarabilirler. RFID sistemleri güvenlik, erişim kontrolü, navigasyon, stok takibi, ödeme sistemleri, araç immobilizasyonu, nakliye ve tedarik zinciri takibi gibi birçok uygulamanın değişik aşamalarında insan müdahalesi olmadan başarıyla kullanılmaktadır (Maraşlı ve Çıbuk, 2015). RFID teknolojisi, diğer otomatik tanıma teknolojilerine göre değişken okuma mesafesi, etiket dayanıklılığı, etiket çeşitliliği, bilgi depolama kapasitesi, veri/bilgi esnekliği, veri güvenliği, maliyet gibi yönleriyle üstün özelliklere sahiptir. Bu sayede süreçler daha kolay, hızlı, kullanışlı, hata oranı daha az ve daha düşük maliyetle işletilebilmektedir. Ürünlerin sınıflandırılması ve iş akışının basitleştirilmesi ile verimlilik, güvenilirlik ve maliyete katkı sağlamaktadır (Üstündağ ve Tanyaş, 2009). RFID teknolojisi, kamu binaları ve AVM gibi iç mekânlarda konum belirleme ve yine AVM'ler de raflarda azalan ürünlerin takibi gibi uygulamalar da kullanılmaktadır (Demiral ve diğ. 2013).

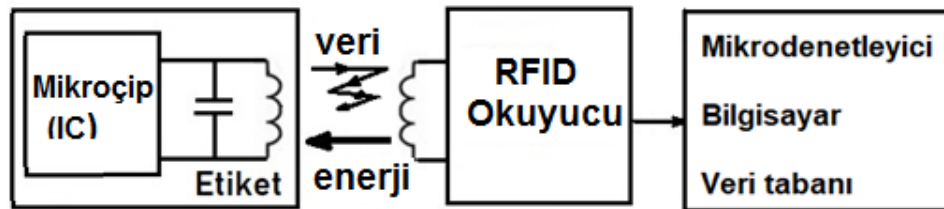
Tengilimoğlu ve Yiğit (2016) sağlık harcamalarının etkili, verimli bir şekilde yönetmek, maliyet etkili sağlık hizmeti sunmak, hasta güvenliği ve hizmet kalitesinde artış sağlamak için RFID teknolojisi

kullanımının gerekliliğini ortaya koymuştur. Emç (2016), yaptığı Yüksek lisans çalışmasında, Dokuz Eylül Üniversitesi genelinde kullanılan akıllı kart sistemine, RFID teknolojisini ekleyerek kantin ve kafeteryalarda kullanımını sağlamışlardır. Tan ve diğ. (2009), RFID etiketli bileklikle hasta takibini yapan bir sistem gerçekleştirmişlerdir. Adak ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada 125kHz'de çalışan, Arduino ve RFID içeren bir güvenlik sisteminin prototipini gerçekleştirmişlerdir.

Endüktif (manyetik) kuplajlı RFID, okuyucu ile etiket birbirinin okuma menzili içinde olduğunda okuyucunun oluşturduğu manyetik alan üzerinden etikete elektriksel güç ve karşılıklı verilerin aktarılması anlamına gelir (Miller 2019).

ENDÜKTİF KUPLAJLI RFID SİSTEMİNİN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ (WORKING PRINCIPLES OF THE INDUCTIVE COUPLED RFID SYSTEM)

Endüktif kuplajlı RFID teknolojisi, manyetik alan teorisi, analog ve dijital elektronik devreler ve yazılım içeren bileşenlere dayanır. Genel olarak RFID sistemi okuyucu, kimlik verilerini barındıran etiketler ve okuyucuya bağlı bilgisayarlı bir donanımdan oluşur (Şekil 2). Okuyucu ve etiket arasındaki sinyal alış verişi, bu iki bileşenin uç kısımlarındaki bobinlerin manyetik bağlaşımı ile yapılır (Paxar, 2015). Etiket, okuyucunun oluşturduğu manyetik alanına yaklaştığında, elektromanyetik dönüşümle etikete bir elektriksel bir enerji aktarılır. Bu işlem etiketin mikroçipini uyarır ve kendisinde bulunan verileri yine elektromanyetik dönüşümle okuyucuya gönderir. Kullanılan haberleşme protokollerine bağlı olarak karşılıklı enerji ve veri aktarımı birkaç kez devam edebilir. Protokollerde yetki ve onay karşılıklı doğrulama yapıldıktan sonra kimlik (ID) verileri etiketten okuyucuya aktarılır. Okuyucuda sinyaller çözümlenerek anlamlı veriler haline gelir. Bu veri bir kimlik kodu, kişisel tıbbi bilgi, görev tahsis kodu, müşteri bilgisi, kurum ve personel bilgisi, sıra numarası veya nesnenin üretim sevk tarihi, sipariş numarası vb. olabilir. Okuyucu, elde ettiği veriyi ara katman yazılımına (middleware), oradan veri tabanına veya uygulama programına gönderir (Yüksel ve Zaim, 2009, Maraşlı ve Çıbuk, 2015).



Şekil 2. Genel RFID Sistemi blok diyagramı

Figure 2. Block diagram of General RFID System

RFID etiket ile okuyucu arasındaki ilişkide yüksek güç gerektiren bölüm kablosuz alış verişi gerçekleştiren bobinlerdir. Aktarılan elektriksel gücü maksimum yaparken harcanan gücü en az yapacak şekilde devreler optimize edilmelidir. Endüktif kulajlı RFID sistemlerinde sinyal alış-verişi etiket ve okuyucu bobinlerinin transformatördeki gibi manyetik bağlaşımı ile ortak bir rezonans frekansında gerçekleştirilir. Şekil 3 bu alıcı-verici işleminin analog uçlarını (front end) göstermektedir (EM microelektronik, 2002) RFID'nin rezonans özelliğine bağlı kullanımına, yakın alan kuplajı ve kullanılan devreye döngü (loop) anten denilir. RFID okuyucu için döngü anteni Şekil 4'te trafo'nun primer kısmında gösterildiği gibi seri bir RLC devresi bileşenidir (ID-Innovations, 2013 ve Priority1design, 2007). Her iki devrede, 125 kHz'lik rezonans frekansına ayarlanmalıdır. Okuyucunun rezonans frekansı (f_0), antenin endüktansı (L) ve eklenen bir konsansatör (C) ile değeri belirlenir (denklem 1).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

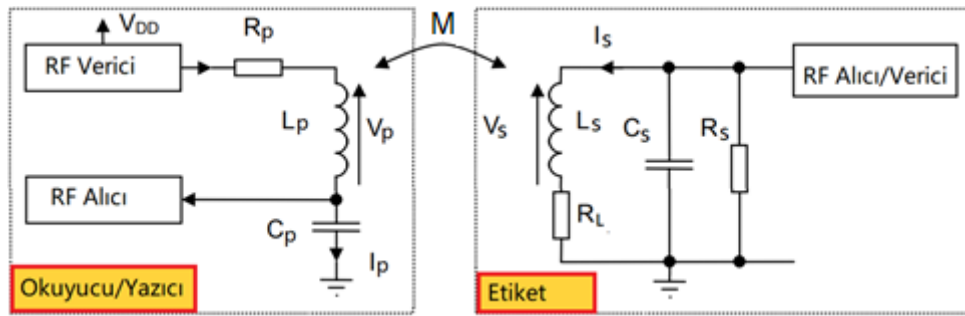
Denklem 2 ile verilen Q, bobinin kalite faktörü olup, yüksek değerde olması enerji aktarımı açısından önemlidir. Burada rezonans devresinin eşdeğer R direncinin küçük tutulması gerekir. Çünkü kuplaj etkinliğinin sağlanabilmesi için, Q değeri 15'den olabildiğince yukarıda olmalıdır.

$$Q = \frac{2\pi f L}{R} \quad (2)$$

Şekil 4'te gösterilen transformatörde bağlaşım, ortak endüktans katsayısı (M) ile belirlenir (denklem 3). Burada k, transformatörü oluşturan yapının bağlantı katsayısı ve L_p ve L_s , primer ve sekonderin endüktanslarıdır.

$$M = k \sqrt{L_p L_s} \quad (3)$$

Seri rezonans devresi, rezonans frekansında minimum bir empedansa sahip olduğundan devrede maksimum akım akıtmak mümkün olur. Trafonun primerindeki akımın maksimum yapılması, yüksek manyetik alan oluşturacağı aşağıdaki bölümde gösterilecektir. Yüksek manyetik alan ise sekonderde yani etiket bobininde olabildiğince yüksek voltaj elde etme amacına yardımcıdır. Okuyucunun ürettiği manyetik alan, etiket bobini içinden geçerken bobinin uçlarında, ortak endüktans değeriyle orantılı bir voltaj indükler. Etiket bobininde voltajının maksimum olması için etiket rezonans devresinin paralel rezonans devresi olması gerekir. Çünkü paralel rezonans devresinde, rezonans frekansında maksimum empedans ile birlikte minimum akım ve maksimum voltaj mümkün olur.

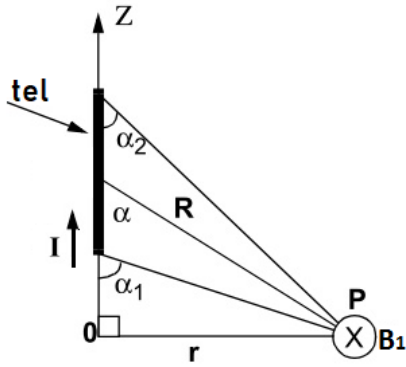


Şekil 3. RFID sisteminin Okuyucu ile etiket bölümlerinin elektromanyetik bağlaşımını

Figure 3. Electromagnetic coupling of RFID system with reader and tag sections

Elektromanyetik dönüşümler (Electromagnetic transformations)

RFID'nin elektromanyetik dönüşümünde bobin üzerinden elektrik akımı geçirilmesi ile manyetik alanın oluşumu Amper Yasası ile açıklanır. Amper Yasası, Şekil 4'te gösterilen sonsuz uzun bir telden r kadar uzaklıkta oluşan manyetik akı yoğunluğunun (B), manyetik geçirgenlik ve telden geçen akımla doğru orantılı, aradaki mesafe ile ters orantılı olduğunu ifade eder (denklem 4 ve denklem 5). Eğer tel, Şekil 5'te gösterildiği gibi, dairesel bir çevre oluştursa, bu durumda merkez düzlemi üzerindeki manyetik akı yoğunluğu miktarı, bobin yarı çapı karesel olarak etkili olurken, dairesel yapı çok turlu (bobin) olursa sarım sayısı oranında doğrusal olarak artış gösterecektir. Buna karşın bobinin merkezinden uzaklaşma nispetinde manyetik alan yoğunluğu, denklem 6 ve denklem 7'da ifade edildiği gibi, $1/r^3$ oranında zayıflayacaktır (Ulaby ve diğ., 2013). Bu orantı, RFID cihazının okuma aralığını sınırlayan başlıca faktördür (Lehpamer, 2012 ve Önal, 2015).



Şekil 4. Sonsuz uzun bir tel etrafında oluşan manyetik alan

Figure 4. Magnetic field formed around an infinitely long

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1) \quad (\text{wb}/\text{m}^2) \quad (4)$$

Sonsuz uzun tel için:

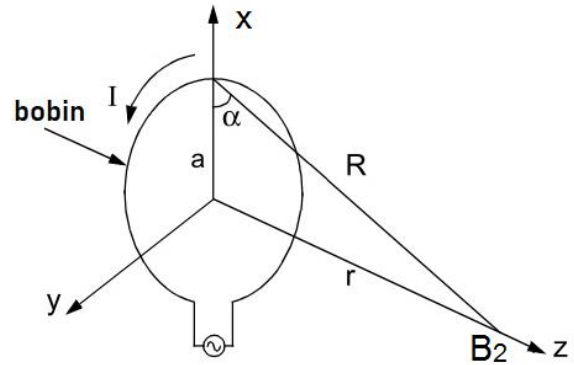
$\alpha_1 = -180^\circ$ ve $\alpha_2 = 0^\circ$ için

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (\text{wb}/\text{m}^2) \quad (5)$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I N a^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \quad (\text{wb}/\text{m}^2) \quad (6)$$

$r^2 \gg a^2$ için;

$$B_2 = \frac{\mu_0 I N a^2}{2} \frac{1}{r^3} \quad (\text{wb}/\text{m}^2) \quad (7)$$



Şekil 5. N sarımlı bir bobinin merkezinden r kadar uzaklıkta oluşan manyetik akı yoğunluğu

Figure 5. Magnetic flux density at a distance r from the center of a coil

Burada,

$B_{1,2}$ manyetik akı yoğunluğu (wb/m^2)

μ_0 , manyetik geçirgenlik (H/m)

a, r, R mesafe (m)

I, akım (A)

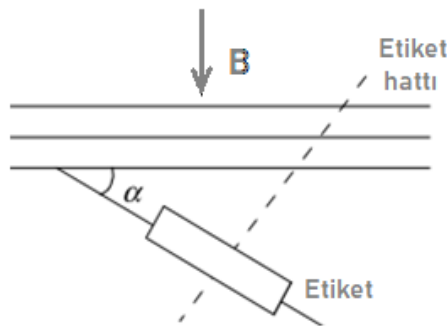
N, sarım sayısı

V, etikette indüklenen gerilim

f_0 , rezonans frekansı

S, bobinin yüzey alanı

Q, kalite faktörü



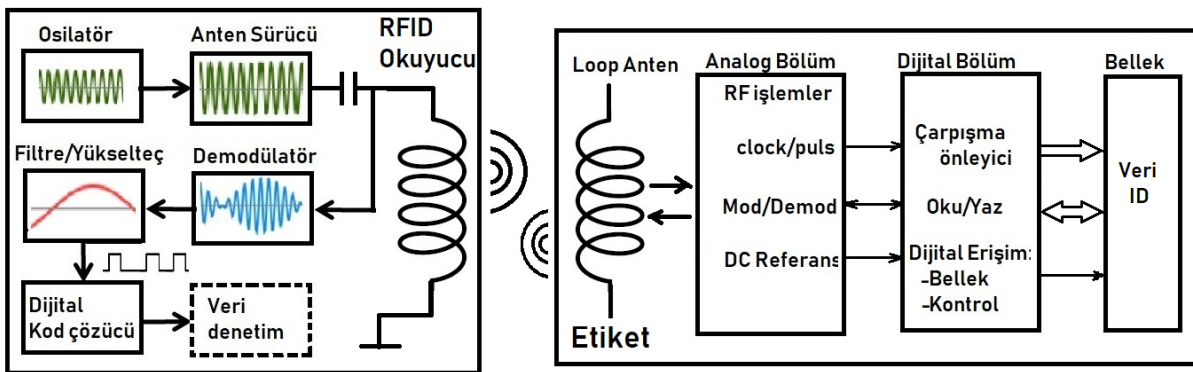
Şekil 6. Değişken bir manyetik alan içindeki etikette (bobinde) gerilim indüklenmesi

Figure 6. Voltage induction in the tag (coil) within a variable magnetic field

Şekil 6'da gösterildiği gibi kapalı bir yol ile sınırlanan yüzey boyunca zamanla değişen bir manyetik alanın, bobin telleri üzerinde voltaj oluşturmaları, Faraday Yasası olarak ifade edilir. RFID uygulamasında okuyucunun bobini tarafından üretilen manyetik alan nedeniyle etiket bobininde bir voltaj oluşturacaktır (Denklem 8). Bu voltaj okuyucu bobin ile etiket bobininin birbirlerine paralel olarak yerleştirildiğinde maksimum olarak eldilir ve etiket üzerindeki devrelere aktarılır (Lehpamer, 2012 ve Önal, 2015).

$$V = 2\pi f_0 N Q S B \cos\alpha \quad (8)$$

Şekil 7’de pasif etiketli bir RFID sistemini ifade etmek için literatürden uyarlanmış elektronik yapılarının blok diyagramı gösterilmiştir (Kartha, 2015 ve NXP Semiconductors, 2014). Okuyucu bölümü analog ve dijital sinyal üretme ve işleme bileşenlerinden oluşmaktadır. Etiket bölümünün elektronik donanımı ise RF analog sinyal işleme devreleri, lojik devreler ve EEPROM bellekten meydana gelir. RFID okuyucu, gönderici modunda taşıyıcı ve modülasyon sinyallerini üreterek anten sürücüsü ve bir kondansatör üzerinden bobine uygular. Bobinlerin rezonansa gelmesiyle okuyucu bobinde 100-200 v. ve karşısındaki etiket bobininde ise 5-10 v. mertebesinde anlık voltaj değerleri oluşacaktır. Okuyucu bobinde tepe anten akımı anlık 100 mA mertebelerine kadar çıkabilir (Kartha, 2015). Etikete gelen sinyal önce analog bölümde RF devreleri ile gelen enerjinin bir kısmı ile referans gerilimi üretir ve etiketin diğer bölümlerini besler, bir bölümü analog demodülasyona uğratarak yetkilendirme protokolleri ve dijital bölümlerin aktive edilerek saat darbeleri vb. işlemler için kullanılır. Dijital bölümde anti-çarpışma ile geçerli işaretlerin seçimi yapılır, doğrulanır daha sonra kodların çözümü ve verilerin okunması işlemleri yapılır. İşlemler başarılı ise ilgili veriler bellekten okunarak veri hattı üzerinden dijital bölümde kodlanır. Bunlara ilaveten etiket çipinde geri saçılma, sıfırlama sinyali, bellek ve hata denetimi, şifreleme, kodlama ve çarpışma önleyici algoritma işlemleri yürütülür. Bazı özel RFID çipleri, güvenlik ve hat karıştırmaya dayanıklı daha karmaşık donanımları içerebilir (Lehpamer, 2012). Sonrasında etiketin dijital bölümden gelen veriler, etiketin analog bölümde analog ve dijital modülasyon yöntemleri ile 125 kHz frekanslı RF sinyalleri etiket bobini üzerinden elektromanyetik dönüşümle okuyucu bobinine gönderilir.

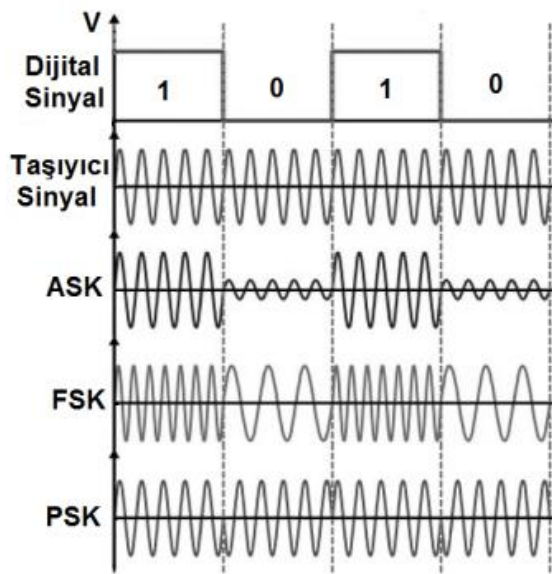


Şekil 7. RFID sisteminde etiket ve okuyucu bölümlerine ait ayrıntılı blok şema

Figure 7. Detailed block diagram of tag and reader sections in RFID system

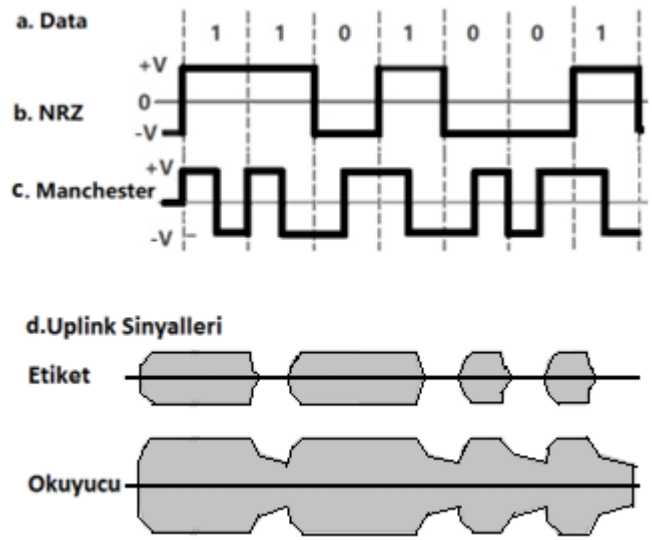
Okuyucuda RF sinyalleri alınır ve demodülasyon, genlik yükseltme, filtreleme işlemlerini takiben elektronik bir komparatör kullanılarak sinyaller dijitale dönüştürülür. Ardından dijital kod çözümü yapılarak, okuma ile amaçlanan işlem reddedilir veya onaylanır. Onaylanması halinde etiket bilgileri elde edilmiş olur ve kaydedilir veya bağlı olan bilgisayar sistemlerine aktarılır.

RFID sisteminde RF’li analog haberleşme sinyali olarak genlik kaydırmalı anahtarlama (ASK), frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK) veya faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) yöntemlerinden biri kullanılabilir (Şekil 8). Bunların yanında sayısal verinin analog modülasyonu ile NRZ ve manchester kodlama gibi dijital modülasyon sinyalleri (Şekil 9 a-c) de kullanılmaktadır. Şekil 9.d’de ise söz konusu modülasyon ve kodlamalar sonucu üretilen ve bobinlerde oluşan Uplink ve Downlink sinyallerinin (zarfının) bir örneği görülmektedir. Kart etiket ve anahtar etiket tipleri için yalnızca okunabilen ile okunup yazılabilen etiketler söz konusudur. Örnek olarak etiket çip tipi EM4100 standardı, 64 bit yalnızca okunabilir bellek ve Manchester kodlama kullanmaktadır. Diğer bir çip tipi, T5567 ise okunup yazılabilen özellikte ve Manchester, Biphase, NRZ kodlamalar kullanmaktadır (Priority1design, 2007).



Şekil 8. Analog Sinyal ve modülasyonlar

Figure 8. Analog Signals and Modulations



Şekil 9. Dijital Sinyal ve modülasyonlar, a-c RFID Dijital kodlamalar, d. Bobinlerde oluşan modülasyonlu sinyallerin zarfı

Figure 9. Digital Signals and Modulations, a-c. RFID Digital Coding, d. The envelope of the modulated signals formed in the coils

BOBİN TASARIMI (COIL DESIGN)

125 kHz. için hazır olarak kullanılabilecek bobinler ve onlara ait parametreler Çizelge 1'de listelenmiştir. Okuyucudan aktarılan voltaj için denklem 8 kullanılarak örnek bir hesaplama yapılırsa; $B=1,5 \mu\text{Wb/m}^2$, Bobin boyutu $S=38,71 \text{ cm}^2$ (kredi kat büyüklüğü), frekans $f_0=125 \text{ kHz}$, $Q=15$, $N=100$, $\cos\alpha=1$ ($\alpha=0$) olduğunda sonuç yaklaşık olarak $V=7 \text{ V}$. bulunur. Okuma mesafesinin daha uzun olmasının için kullanabileceğimiz tek değişken bobinin yarıçapının, dolayısıyla bobinin yüzey alanının artırılmasıdır. RFID etiketi ile okuyucu arasındaki bağlaşım her iki bileşenin birbirine bakan kısımlarındaki bobinler anahtar rolü oynamaktadır. RFID uygulamalarında, anten bobini rezonans devresinin bir elemanıdır ve cihazın okuma aralığı rezonans devresinin performansından büyük ölçüde etkilenir. Etiket RFID okuyucuya tam karşısına ve paralel tutulmalıdır, diğer durumlarda etkileşim zayıflayacak veya erişim olmayacaktır.

Çizelge 1. 125 kHz.de seçilen bobin endüktansı ve boyutları

Table 1. Bilateral Selected coil inductance and dimensions at 125 kHz

	125 kHz'teki endüktansı (mH)	2.8	2.8	2.7
	Bobin direnci (Ω)	53.8	63	19
	Tel Çapı (mm)	0.09	0.09	0.2
	Bobin iç çapı (mm)	19	46	160
	Bobin dış çapı (mm)	21.8	49.0	163.3
	Bobin genişliği (mm)	2.5	1.5	2.3

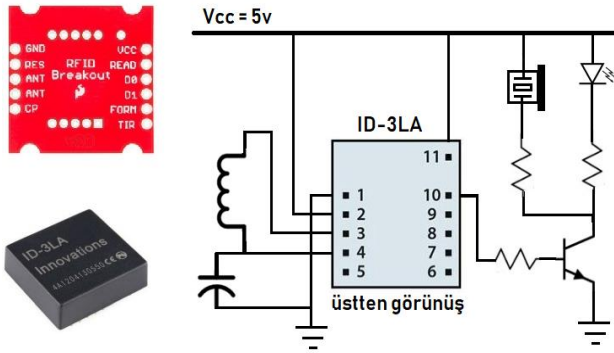
Tasarım için düşük güçlü ve düşük maliyetli ID-3 LA, RFID okuyucu ve 125 kHz. RFID etiketleri kullanılmıştır. ID-3 LA RFID okuyucunda üretici firma bobin endüktansı için 1.337 mH kullanılmasını tavsiye etmektedir. Pratik olarak 12 milimetre çap ile 75 veya 71 tur yaklaşık 1.33 mH endüktans değerini verebilmektedir (ID Innovations, 2013). Antenin yeterli alan şiddeti üretmesi, onun etiket anteni ile uyumlandırılması, kullanılacak mesafe ve açı gibi parametreler uzmanlık gerektirir ve ancak deneme yanılma yoluyla tekrarlı ölçmelerden sonra açıklığa kavuşturulabilir. Parazitlerin varlığı antenlerin bobin

boyutu bu seçimde etkilidir. Parazit etkilerden kurtulmak için bobin çapı daha küçük seçilir. Buna karşın alan şiddeti ve kuplaj artırılmalıdır. İstenen değerden daha küçük bir bobin kullanılıyorsa, harici bir kondansatörü bobin ve toprak arasına bağlayarak dengeleme yapılabilir. Örnek olarak 1,5 ila 3 pF arası polipropilen bir kondansatör kullanmak uygun olacaktır.

Örnek bir hesaplama: Elimizdeki endüktans $L=2.8 \text{ mH}$ ise 125 kHz'de endüktif reaktans $X_L=2\pi fL=2199 \Omega$ dur. Tavsiye edilen endüktans değeri $L=1.337 \text{ mH}$ olduğuna göre, bunun 125 kHz'deki direnci ($2\pi fL$ 'den) 1050Ω dur. Bu nedenle endüktif reaktans $(2199-1050) = 1149 \Omega$ kadar azaltılmalıdır. 125kHz'de, 1.1nF'lik bir kondansatörün reaktansı, $1/2\pi fC$ 'den, 1157Ω dur. Bu ek kondansatörü devreye seri olarak bağlamakla çözüm sağlanır.

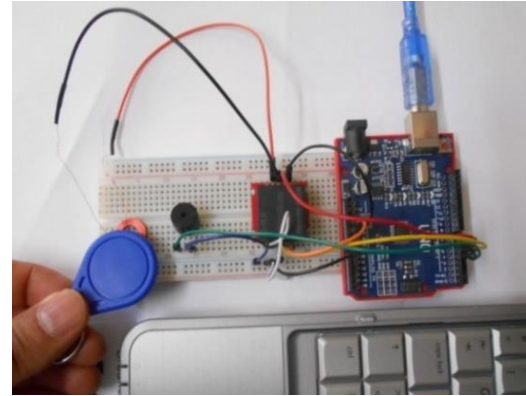
RFID DEVRE TASARIMI (RFID CIRCUIT DESIGN)

Tasarımda 125 kHz'lik RFID okuyucu ve etiketleri kullanılmıştır. Etiket kod okuma ve uyarı işlemleri için Arduino Uno temelli devreler kullanılmış, bilgisayara bağlı olarak Arduino IDE arayüzü ile programlanmış ve sonuçlar elde edilmiştir. RFID okuyucu olarak seçilen ID-3LA entegresinin kullanımı ve 0.1 inch SparkFun mini dönüştürücü Şekil 10.a'da gösterilmiştir. Şekil 10.a'da yapılan bağlantı ile mikrodenetleyici olmadan doğrudan RFID etiketinin geçerli olup olmadığını ses uyarısı ile doğrulanmaktadır. Bu haliyle bir geçiş sisteminde geçme ve durdurma amaçlı olarak kullanılabilir.



Şekil 10.a RFID uyarı devresi

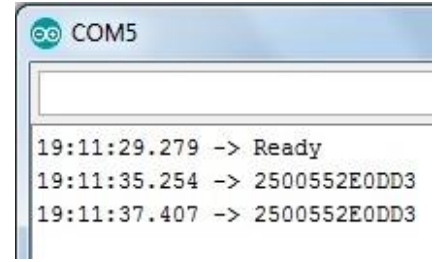
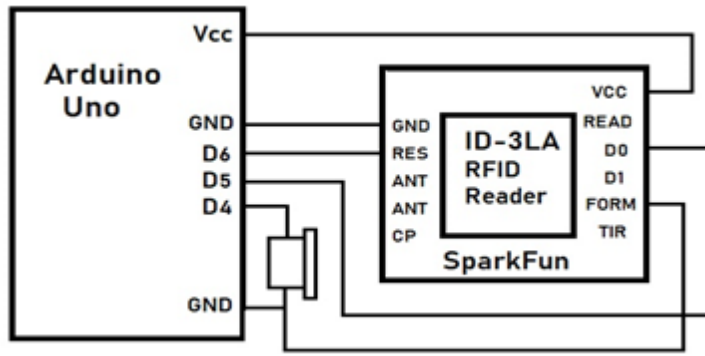
Figure 10 a. RFID warning circuit



Şekil 10.b RFID Devre Fotoğrafı

Figure 10 a. RFID Circuit Photo

Şekil 10.b'de RFID verilerini okumak ve bilgisayara aktarmak için kullanılan Arduino Uno mikrodenetleyicisi ve devreleri gösterilmektedir. Arduino Uno, 16 MHz de çalışan bir ATmega328 mikrodenetleyicisi, 6 analog ve 14 dijital giriş / çıkış, programlama ve 5 volt besleme için USB bağlantısı kullanan bir karttır. Şekil 11.a'da RFID okuyucu entegresinin (ID-3LA) Arduino mikrodenetleyicisine bağlantısı gösterilmiştir. RFID okuyucunun 3 ve 4 nolu ANT pinlerine okuyucu bobin Şekil 10.b'de gösterildiği gibi bağlanır. Arduino kartı, Arduino geliştirme ortamı (IDE) üzerinden bilgisayar arayüzünde programlanmıştır. Arduino Uno mikrodenetleyici devresi (Şekil 11.a) ile 125 kHz. RFID etiketlerinin ASCII formatında bilgisayar arayüzünde okutularak Arduino IDE Seri monitöründe elde edilen sonuçlar Şekil 11.b'de gösterilmiştir.



Şekil 11.a. RFID anahtar etiket okuma devresi
Figure 11a. RFID key tag reading circuit

Şekil 11.b. Arduino IDE ile okunan etiket numaraları
Figure 11b. Tag numbers read with Arduino IDE

SONUÇ ve ÖNERİLER (RESULTS and RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada RFID sistemlerinin daha çok kullanımı ve güvenilirliği araştırmak amacıyla, literatüre dağılmış bilginin özetlenmesi ve yakın alan kullanımın dayandığı manyetik kuplaj tekniğine ve onlara ait bileşenlere kapı aralamaya çalışılmıştır. Bu amaçla pasif etiketli düşük frekanslı RFID teknolojisinin dayandığı temel esaslar ve elektronik devre yapıları özet olarak açıklandı. Bunun yanında 125 kHz.'de çalışan pasif etiketli RFID sisteminin tasarımı için bobin seçimi ve örnek bir hesaplama yapılmıştır. Yapılan yeniliklerle RFID uygulamalarının yaygınlaştığını ve kullanımının kolaylaştığını göstermek amacıyla son bölümde, yeni bir RFID okuyucu olan ID-3LA entegresini kullanarak, Arduino Uno kontrollü bir RFID uyarı ve okuma sistemi gerçekleştirilmiştir.

RFID teknolojilerinin, çeşitli alanlardaki çözümleri, prosedürleri ve standartları gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. RFID'in dinamik ve güvenilir bir sistem olarak teknolojik gelişimini sürdürebilmesi için olası saldırı, manipülasyon ve güvenlik açıklarını giderecek çalışmaların devam etmesi gereklidir. Ayrıca gelişen elektronik teknolojilerine bağlı olarak performans ve güvenlik için optimum çözümlere ihtiyaç duyulacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Adak D., Pain M.K., Dey U.K., 2017, RFID Based Security System Using Arduino Module, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 8, Issue 3, pp.143-145.
- Çiftçi E., 2009, RFID Sistemlerde Güvenlik Açıkları ve Çözüm Yolları, *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 437. sayı, 91-92, http://www.emo.org.tr/ekler/148ec96d4e6054d_ek.pdf?dergi=593, ziyaret tarihi: 24.05.2017.
- Demiral E., Karas İ.R., Turan M.K., RFID Sistemleri ile Konum Belirleme Uygulamaları, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 14. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, 14-17 Mayıs 2013.
- EM microelektronik, 2002, *RFID Made Easy*, <https://www.emmicroelectronic.com/sites/default/files/products/datasheets/an411.pdf>, ziyaret tarihi: 24.05.2016.
- Emç M., 2016, *RFID Teknolojisi Kullanarak Kampüs Harcama Sistemlerinin Tasarlanması ve Uygulanması: Üniversite Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri Ana Bilim Dalı, İzmir.
- ID Innovations, 2013, *ID-3LA Reader Module Data Sheets*, <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ID/ID-3LA.pdf>, ziyaret tarihi: 01.08.2019..

- Kartha V., 2015, *Interfacing EM-18 RFID reader*, <https://electrosome.com/em-18-rfid-reader-arduino-uno/>, ziyaret tarihi: 28.05.2019.
- Lehpamer H., 2012, *RFID Design Principles*, Artech House, Boston.
- Maraşlı F., Çıbuk M., RFID Teknolojisi ve Kullanım Alanları, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 249-275, 2015.
- Miller J., 2019, RFID Glossary: 40 Terms to Know About RFID, <https://www.computype.com/blog/rfid-glossary>, ziyaret tarihi: 25.04.2019.
- NXP Semiconductors, 2014, *HITAG S transponder IC*, https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/HTSICH56_48_SDS.pdf, ziyaret tarihi: 24.05.2018.
- Önal M., 2015, *Gömülü Sistemler ile RFID Mimarisi ve programlama*, Kodlab Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Paxar, RFID Basics, *RFID_Basics.pdf*, www.paxar.com, ziyaret tarihi: 21.10.2015.
- Priority1design, 2007, *RFID Transponders*, <http://www.priority1design.com.au/rfid-transponders.html>, ziyaret tarihi: 01.08.2019.
- Tan O., Korkmaz İ., Gidiş O., Uygun S., Hasta Takip Sistemlerinde RFID Uygulaması, *Akademik Bilişim'09 - XI. Akademik Bilişim Konferansı*, Şanlıurfa, 11-13 Şubat 2009.
- Tengilimoğlu D. ve Yiğit V., 2016, Tıbbi Malzeme Yönetiminde Verimliliği Artırıcı Bir Teknoloji : Radyo Frekanslı Tanıma Sistemi (RFID), *Verimlilik Dergisi*, Sayı 4, Sayfa: 51-73.
- Ulaby F.T., E. Michielssen, U. Ravaioli, 2013, *Fundamentals of Applied Electromagnetics*, Çeviri Editörü: Yazgan E. ve Turgut G., Nobel Kitap, 2013.
- Üstündağ A., Tanyaş M., 2009, Radyo Frekanslı Tanıma (RFID) teknolojisinin tedarik zinciri üzerindeki etkileri, *itüdergisi/d mühendislik*, Cilt:8, Sayı:4, 83-94.
- Yüksel ME ve Zaim AH, Otomatik Nesne Tanımlama, Takibi ve Yönetiminde RFID'nin Yeni Nesil Kablosuz İletişim Teknolojileri İle Birlikte Kullanımı, *XI. Akademik Bilişim Konferansı*, sayfa 111-120, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 2009.



INNOVATIVE TREND ANALYSIS METHODOLOGY IN LOGARITHMIC AXIS

Sadık ALASHAN

sadikalashan@bingol.edu.tr

Bingöl University, Department of Civil Engineering, Campus, Bingöl, TURKEY

(Geliş/Received: 31.12.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.03.2020)

ABSTRACT: Future uncertainties of climate change cause people to worry, and therefore, in order to reduce the associated risks, scientific research methodologies are improved continuously. For instance, temperature raises as a result of carbon content increase cause variations in hydro-meteorological data including evaporation, drought, precipitation, runoff, and flood. Along these lines, the most commonly used trend analysis methods are linear regression analysis, Mann-Kendall, sequential Mann-Kendall, Spearman's Rho, and recently a new method referred to as innovative trend analysis (ITA), which does not require initial assumptions, normality, and independence in a data structure. The ITA method presents a great visual ability for trend identification in graphical forms in addition to qualitative and quantitative interpretations. In the original form of the ITA approach, scatter points are presented in the arithmetic scale, where changes of scatter points in small values may not be clearly distinguishable like big values for wide data ranges. In this study, the ITA method is used on arithmetic and logarithmic scales to calculate such differences in two sub-series. The suggested logarithmic scale methodology is referred to as proportional Şen innovative trend analysis (ITA_P). This method is used to determine percent trends for the annual, autumn, winter, spring and summer season rains in England. ITA_P is successful in determining trends in minimum values compared to the classical ITA.

Key Words: Innovative trend analysis, hydro-meteorological data, proportional innovative trend analysis, climate change.

Logaritmik Ölçekte Yenilikçi Yönelim Çözümleme Yöntemi

ÖZ: Gelecekle ilgili belirsizlikler insanoğlunu endişelendirmekte ve olası riskleri azaltmak için bilimsel araştırma yöntemleri sürekli geliştirilmektedir. Örneğin karbon salınımının artışıyla birlikte artan sıcaklıklar buharlaşma, yağış gibi iklim olaylarının değişimini artırarak akışlar üzerinde kuraklık ve taşkınlarla neden olabilmektedir. Bu olaylar üzerindeki eğilimi belirlemek üzere Mann-Kendall, sıralı Mann-Kendall, Spearman rho ve son zamanlarda ortaya atılan Şen'in yenilikçi yönelim çözümleme (Şen_ITA) yöntemleri literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden Şen_ITA yöntemi normallik ve bağımsız seri gibi başlangıç kabulleri gerektirmemektedir. Ayrıca niteliksel ve nicel yorumlamaları yanında grafiksel olarak görsel kabiliyeti yüksek bir yöntemdir. Şen_ITA yöntemi esasen aritmetik ölçekte kullanılır ve bu durum değişim katsayısı yüksek bir seri üzerinde minimum değerler üzerindeki eğilimin maksimum değerlerin yanında gözden kaçabilmesine neden olabilmektedir. Bu çalışmada, Şen_ITA yöntemi aritmetik ve logaritmik ölçekte kıyaslanmıştır. Önerilen yaklaşım, oransal Şen yenilikçi yönelim çözümleme yöntemi olarak adlandırılmıştır (ITA_P). Bu yaklaşım İngiltere'nin mevsimsel ve yıllık yağışları üzerindeki oransal eğilimleri belirlemek için kullanılmıştır. ITA_P yaklaşımının klasik Şen_ITA yöntemine göre bir seri üzerinde minimum değerlerdeki eğilimleri belirlemede daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yenilikçi yönelim çözümlemesi, hidro-meteorolojik veri, oransal yenilikçi yönelim çözümlemesi, iklim değişikliği.

1. INTRODUCTION

Climate change impacts hydro-meteorological events by incorporating an increasing trend component in temperature records and increasing or decreasing trends in precipitation, evaporation, flood and drought occurrences. The carbon level in the atmosphere affects the temperature, which impacts precipitation and evaporation, and they trigger floods and droughts according to the circumstances.

Mann-Kendall (MK), the sequential MK and Sen's slope estimator are well-known trend calculation methods and they are widely used in the literature (Büyükyıldız and Berktaş, 2004; Kendall, 1975; Lin *et al.*, 2008; Mann, 1945; Shahid, 2011; Vinet and Zhedanov, 2010). Recently, Şen innovative trend analysis (ITA) method is launched to determine the trend in a given time series (Şen 2012, 2014, 2017) and it has been used by many researchers. For instance, Elouissi *et al.* (2016) used ITA to investigate trends in monthly precipitation records from 28 meteorology stations in Algerian Macta watershed. Öztopal and Şen (2017) classified precipitation values as low, medium and high in the ITA graph and then determined trends in the precipitation values in different climate regions of Turkey. Some researchers compared the ITA and MK methods. For instance, Nourani *et al.* (2018) investigated trends in rainfall, streamflow, humidity and temperature records in Urmia lake basin, Iran and they stated that ITA indicated a good agreement with the MK method. Dabanlı *et al.* (2016) used MK and ITA methods to determine trends in hydro-meteorological variables such as relative humidity, temperature, runoff and precipitation at 8 stations in Ergene drainage basin, Turkey. They stated that MK does not give significant monotonic trends for the drainage basin while ITA provides verbal partial trend information (low, medium and high) in most of the stations.

Although the ITA method is based on a comparison of two half series, it is possible to work with more than two parts to detect even sudden shifts in a given time series. Deng *et al.* (2017) studied precipitation variability on Weizhou Island, the northern part of the South China Sea by using MK and ITA methods, where they divided the main record into three parts and found a non-homogenous temporal trend distribution. Sonali and Nagesh Kumar (2013) examined trends in Indian maximum and minimum temperatures with different data lengths using ITA and other well-known trend methods. Mohorji *et al.* (2017) applied the ITA to global monthly temperature values, first as two half series and then for various periods (10-year, 20-year, 30-year, 40-year, and 50-year). It was found that the increasing temperature at the global scale is about 0.75 °C. Güçlü (2018b, a) used ITA in half time series for possible determination of trend shifts by considering "increasing-increasing", "decreasing-increasing", "increasing-decreasing" and "decreasing-decreasing" cases.

ITA has a strong graphical visual ability to identify and interpret the trend possibility in a given time series. In the classical trend calculations, serial independence, homoscedasticity, and normal probability distribution assumptions must be satisfied. Şen_ITA method does not require these assumptions, and it is based on the comparison of the two ascendingly ordered halves from the original time series (Şen, 2017). In this method, the trend changes are documented quantitatively, where larger deviations may occur in the maximum values compared to the minimum values with respect to 1:1 (45°) no trend line. It is possible for the same trend in quantity to provide different percent changes in cases of daily or monthly records. The percent approach helps to expose trends on the minimum values.

The aim of this study is to adapt trends similar to the ITA method based on the logarithmic scale, which is referred to as proportional Şen innovative trend analysis (ITA_P). It is observed that similar trends in percent are at equal distance to 1: 1 (45°) no trend line for all series in logarithmic scale. In this way, small quantities and big proportions in the minimum values are easily observed by the ITA_P approach, which leads to better interpretations regardless of the data size.

2. MATERIAL AND METHOD

The Şen innovative trend analysis (ITA) is based on two sub-series comparison from a given parent hydro-meteorological time series. Each sub-series is sorted in ascending order and the first sub-

series values are plotted on horizontal (X) against the second sub-series on vertical (Y) axis leading to the scatter diagram graph as in Figure 1, where 1:1 (45°) line represents no trend straight-line. If the scatter points are above (under) the 1:1 line with approximately parallel positions then there is an increasing (decreasing) trend in the records, and this is referred to as a monotonic trend (Figure 1a). If the entire scatter points are not completely above, under or parallel to the 1:1 line then this is referred to as a non-monotonic trend and then the horizontal axis in the graph is divided into ranges such as low, medium, high, etc. (Figure 1b).

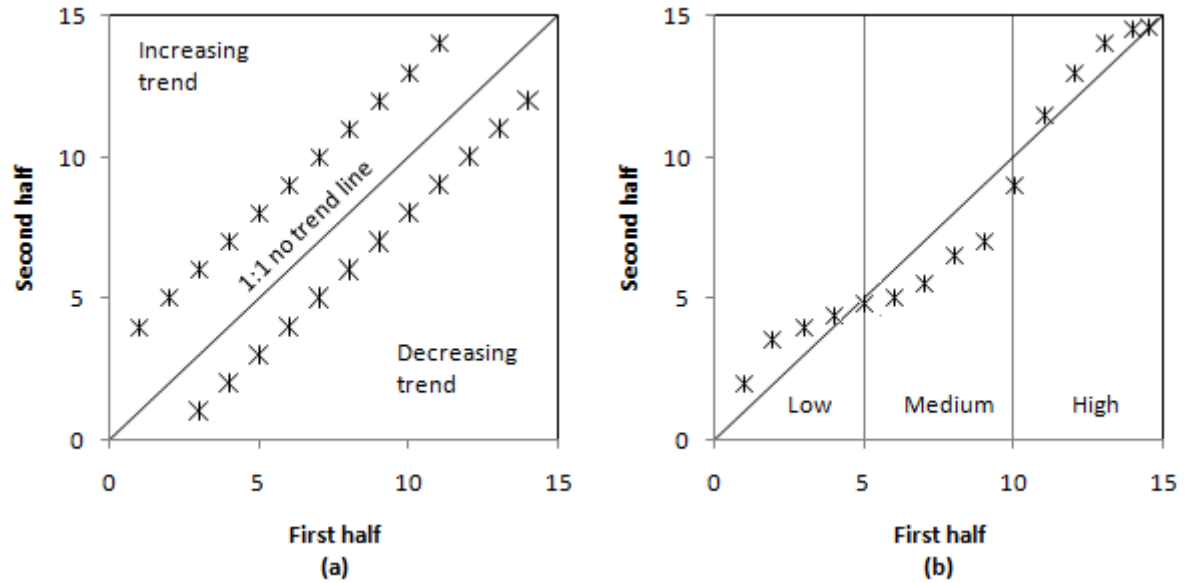


Figure 1. A graphical representation of the ITA method a) monotonic trend b) non-monotonic trend (Alashan, 2018).

The basic equation for a trend in quantity related to the ITA method is given by Şen (2017) in the following expression.

$$s = \frac{2(\bar{y} - \bar{x})}{n} \quad (1)$$

Here, s , $\bar{y}$, $\bar{x}$ and n are trend slope, arithmetic averages of the second and first sub-series and number of data, respectively. Positive (negative) slope values represent increasing (decreasing) trends, while there is no trend for zero slope value. Sometimes, although slope values are marginally bigger (smaller) than zero and in which case there is not any significant positive (negative) trend. For testing the trend significance, a 5% trend line is selected as the critical trend line. By selecting the critical trend value in percent, the critical trend line is determined without the need for assumptions such as normality and independence. Many critical trend lines such as 2%, 5%, 10%, and 20% are used in the ITA method in the literature (Ahmad *et al.*, 2018; Cui *et al.*, 2017; Kambezidis, 2018; Nisansala *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2017).

The difference at the i -th scatter point (a trend indicator) is defined as $y_i - x_i$, where $1 < i < n/2$ (Wu and Qian, 2017). In the literature, the average trend indicator is divided into the mean of the first half series and the trend in percent ($\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - x_i}{\bar{x}}$) is obtained. Figure 2 indicates the result of the ITA after the logarithmic transformation application on both axes (arithmetic and logarithmic) leading to the proportional Şen innovative trend analysis (ITA_P).

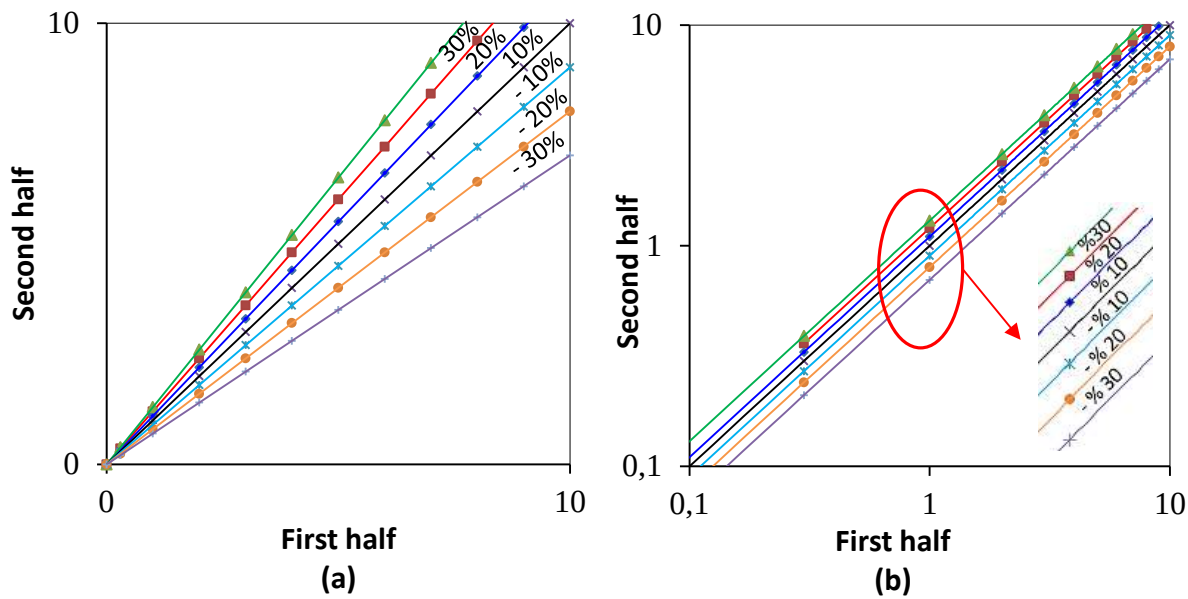


Figure 2. Graphical representations of proportional innovative trend analysis a) arithmetic axis b) logarithmic axis.

To avoid dependence on the mean of the first half series in trend calculations, the ratios of y_i/x_i lead to dimensionless changes (p_i), according to the following expression.

$$p_i = \frac{y_i}{x_i} \quad \Rightarrow \quad p = \left(\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \left(\frac{y_i}{x_i} \right)} \right) \quad (2)$$

The geometric mean change (p) is calculated for dimensionless values and α parameter is calculated by Eq. (3), which helps to determine a possible trend.

$$\alpha = p - 1 \quad (3)$$

If $\bar{x} = \bar{y}$ then $p=1$ (scatter points fall over the 1:1 line) and $\alpha = 0$ implies that there is no trend in the data. However, increasing (decreasing) trend exists in the case of $p>1$ and $\bar{x} < \bar{y}$ ($p < 1$ and $\bar{x} > \bar{y}$). This last sentence implies also that if $\alpha > 0$ ($\alpha < 0$) an increasing (decreasing) trend appears. Application of the logarithmic transformation to Eq.2 yields Eq.4, which implies a set of parallel straight-lines to the 1:1 no trend line according to different trend slopes (α) (Fig. 2b).

$$\log(p) = \frac{1}{n} \left(\log \left(\frac{y_1}{x_1} \right) + \log \left(\frac{y_2}{x_2} \right) + \dots + \log \left(\frac{y_n}{x_n} \right) \right)$$

$$\log(p) = \frac{1}{n} (\log(y_1) - \log(x_1) + \log(y_2) - \log(x_2) + \dots + \log(y_n) - \log(x_n)) \quad (4)$$

3. APPLICATION AND STUDY AREA

The application of the ITA_P method is presented for monthly rain values from England. The country is approximately between 49.93° N to 55.8° N latitudes and 5.72° W to 1.77° E longitudes. Some of the important cities are selected as the study areas to observe the climate change impact on the country (Figure 3). The country has a maritime climate with frequent rain events. Annual mean rain values range from 600 mm to 3,000 mm. The eastern and western parts of the country are drier and warmer than the southern and northern parts. The western part has higher elevations that prevent the

humid air entrance from the Atlantic Ocean to the east. In addition, the high topography allows for cooling in the western parts and gives rise to intensive rain occurrences. Summer and spring seasons have relatively higher rain values than the autumn and winter seasons in the eastern parts, but in the western part, autumn and summer seasons have higher rain values compared to winter and spring seasons.



Figure 3. Map of locations of the selected rain stations in the study area, England.

Statistical information about the rain stations is given in Table 1 with the minimum, average, maximum, and standard deviation. The rain database is provided by the Met Office which is the national meteorological service of the UK (<https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/maps-and-data/historic-station-data>). The homogeneity of the database is checked by the Run homogeneity test proposed by Swed and Eisenhart (1943). The data of all stations used in the study provides a homogeneity condition of at least a 90% significance level. Newton Rigg station has the maximum altitude and the highest monthly rain values, while Lowestoft and Eastbourne stations are with the minimum rain. Shawbury and Camborne stations have minimum and maximum standard deviations, respectively.

Table 1. Statistical and geographic characteristics of the rain observation stations in the study area.

Station name	Coordinates		Altitude (m)	Observed Years	Data Numbers	Monthly Rain (mm)			
	Latitude	Longitude				Minimum	Mean	Maximum	Standard Deviation
Camborne	50.22	-5.33	87	1981-2018	456	4.40	89.23	242.20	51.73
Chivenor	51.09	-4.15	6	1981-2018	456	1.10	76.80	233.00	40.90
Eastbourne	50.76	0.29	7	1981-2018	456	0.2	65.92	261.10	44.06
Heathrow	51.48	-0.45	25	1981-2018	456	0.3	50.42	174.80	29.91
Lowestoft	52.48	1.73	18	1981-2018	456	0.2	51.47	157.40	29.30
Newton Rigg	54.67	-2.79	169	1981-2018	456	5.3	79.88	329.40	46.81
Shawbury	52.79	-2.66	72	1981-2018	456	2.30	55.54	146.40	27.76
Sheffield	53.38	-1.49	131	1981-2018	456	4.60	68.86	285.60	40.09
Sutton Bonington	52.83	-1.25	48	1981-2018	456	2.40	51.40	161.60	27.91
Whitby	54.48	-0.62	41	1981-2018	456	2.70	51.87	189.00	30.28

The ITA and ITA_P methods are applied to the monthly rain records leading to graphs in Figure 4. It is obvious from these graphs that there are visual discrepancies between ITA and ITA_P methods. Although they have the same trends in quantity, the maximum (minimum) values have smaller (bigger) trends than the minimum (maximum) values. This leads to different visual trend evaluations between ITA and ITA_P scales. Camborne monthly rain records have no visually important trends according to the ITA (Figure 4), but there is an increasing trend in the minimum values according to the ITA_P method. According to ITA, there are increasing trends in Chivenor, Newton Rigg, Shawbury and Sheffield monthly maximum rain values, but the increasing trends in the ITA_P approach are seen at minimum values. Eastbourne, Lowestoft and Sutton Bonington monthly rain records have increasing trends in the ITA concerning the maximum values, but according to the ITA_P approach, there are decreasing trends in the minimum values. At Heathrow, no visual significant trend is seen according to ITA_P but there are increasing trends in the maximum values according to the ITA. There exists a continuously increasing trend on the ITA_P graph in maximum Whitby monthly rain values, and there is a monotonic increasing trend in the ITA graph in the maximum rain values.

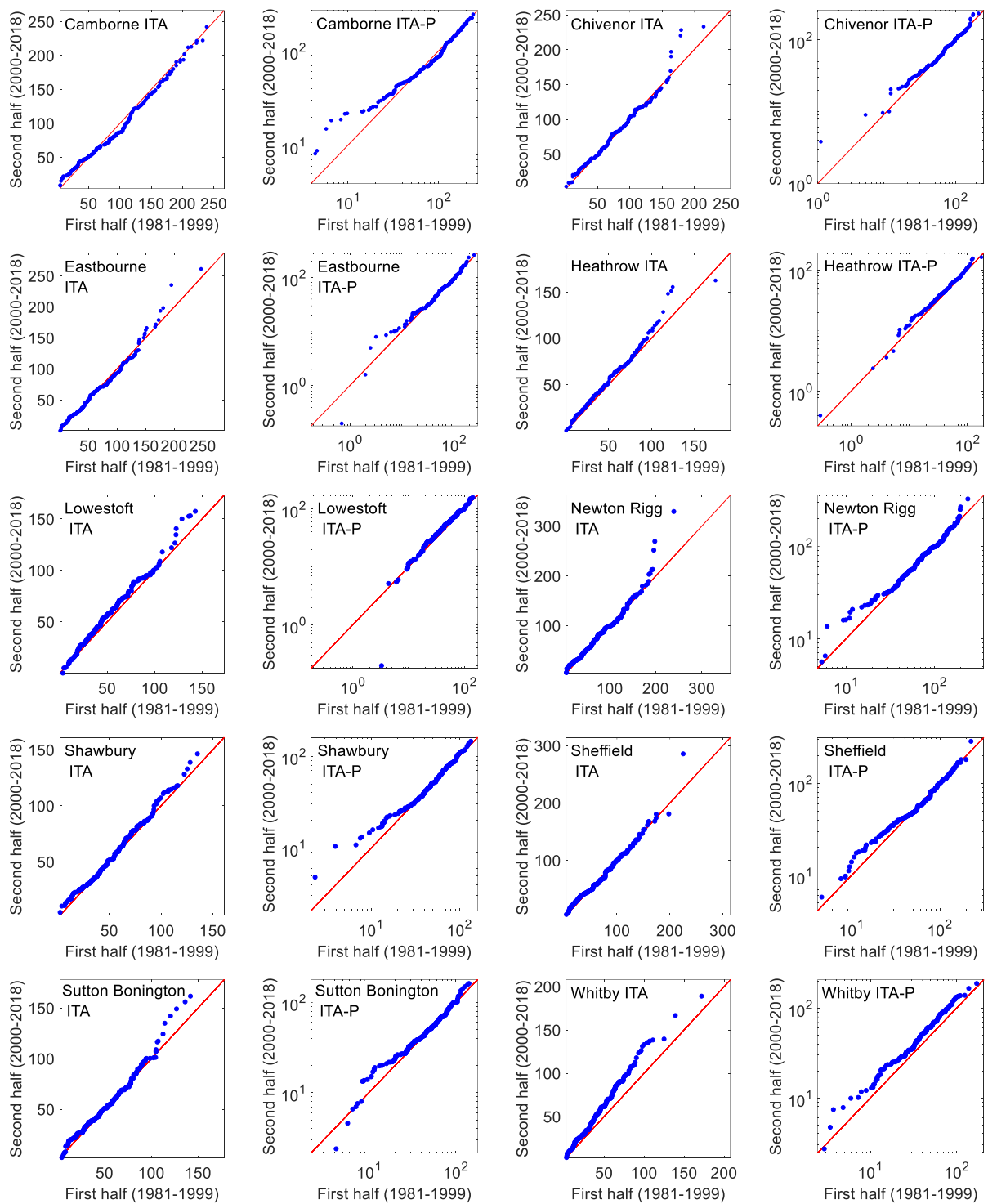


Figure4. Trend graphics for the monthly rain records in ITA and ITA_P scales

Monthly, annual and autumn, winter, spring and summer rain records are treated for trend identifications by means of ITA_P and ITA templates using Eqs. (1) - (4). The parameters in Table 2 are given only for the annual rain records. Trends in the ITA_P template are plotted only for the annual rain records in Figure 5. The green (dashed) lines represent the maximum and minimum changes in the ITA_P template for annual rain records and the black (straight) line is for no trend (1:1) line, the red (bold) line is for a trend in percent according to ITA_P method. Whitby has the largest increasing trend both in ITA and ITA_P methods. The annual rain records in Camborne have a slightly decreasing trend in ITA and the trend slope does not exceed the 5% risk level (Table 2). There is almost no trend in the ITA_P approach on Chivenor, Eastbourne, and Sheffield annual rain records (Figure 5). Newton Rigg, Shawbury and Sutton Bonington have small increasing trends in ITA_P. Heathrow, Lowestoft and Whitby station records have important increasing trends in the ITA_P template for annual rain records and the trend slope values exceed the 5%, 10% and 20% risk level.

Table 2. Trend results and statistical parameters for ITA and ITA_P methods in annual rain values.

Station Name	Data length (n)	Mean		Trend slope	Trend in percent (ITA)	Trend in percent (ITA_P)	Critical Level	Type of trend
		First half	Second half ()					
Camborne	38	90.84	87.61	-0.170	-3.5%	-3.8%	5%	No trend
Chivenor	38	75.88	77.72	0.097	2.4%	1.5%	5%	No trend
Eastbourne	38	66.22	65.61	-0.032	-0.9%	-1.8%	5%	No trend
Heathrow	38	48.31	52.54	0.223	8.8%	8.3%	5%	Increasing
Lowestoft	38	49.00	53.95	0.261	10.1%	10.4%	10%	Increasing
Newton Rigg	38	78.29	81.47	0.168	4.1%	3.5%	5%	No trend
Shawbury	38	54.37	56.71	0.123	4.3%	3.6%	5%	No trend
Sheffield	38	68.75	68.96	0.011	0.3%	-0.8%	5%	No trend
Sutton Bonington	38	50.39	52.40	0.106	4.0%	3.5%	5%	No trend
Whitby	38	45.81	57.92	0.638	26.4%	26.5%	20%	Increasing

Table 3 presents trend both in ITA and ITA_P templates for annual, autumn, winter, spring and summer seasons. Trends slope in quantity changes from -0.170 mm/year (Camborne) to 0.638 mm/year (Whitby) for annual; from -0.376 mm/year (Eastbourne) to 0.875 mm/year (Whitby) for autumn; from -0.468 mm/year (Camborne) to 0.687 mm/year (Newton Rigg) for winter; from -0.495 mm/year (Newton Rigg) to 0.245 mm/year (Whitby) for spring and from 0.079 mm/year (Eastbourne) to 0.807 (Newton Rigg) mm/year for summer rain values.

Trends in ITA_P change from -3.85% per duration (Camborne) to 26.50% (Whitby) for annual rain values; from -12.49% (Eastbourne) to 33.21% (Whitby) for autumn; from -8.19% (Camborne) to 28.90% (Newton Rigg) for winter; from -12.08% (Newton Rigg) to 12.41% (Whitby) for spring and from 10.42% (Eastbourne) to 30.95% (Whitby) for summer rain values.

After the comparison between ITA and ITA_P methods according to trends in percent, Sheffield (Whitby) seems to have the highest decreasing (increasing) trend in percent for winter rain values in the ITA, while Camborne (Whitby) has the highest decreasing (increasing) trend according to ITA_P.

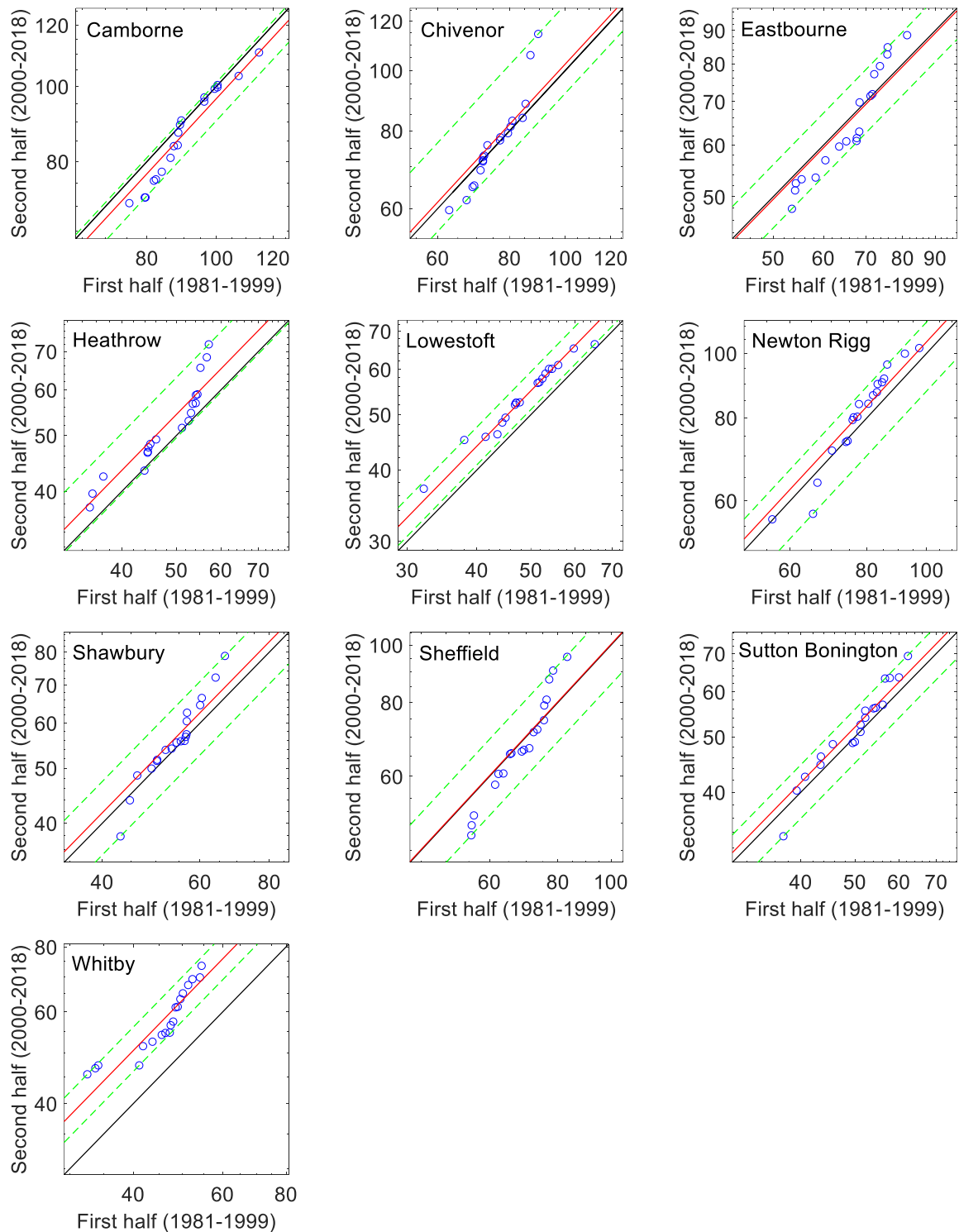


Figure5. Graphical representations of the trends in the ITA_P template for annual rain records in selected stations in England.

Table3. Trend results in quantity and percent in rain values by ITA and ITA_P methods.

	Station name	Camborne	Chivenor	Eastbourne	Heathrow	Lowestoft	Newton Rigg	Shawbury	Sheffield	Sutton Bonington	Whitby
Monthly	s (mm/year)	-0.0141	0.0080	-0.0027	0.0186	0.0217	0.0140	0.0103	0.0009	0.0089	0.0531
	CL (±)	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	10.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	20.0%
	ITA (%)	-3.55%	2.42%	-0.92%	8.77%	10.11%	4.07%	4.31%	0.32%	4.01%	26.44%
	Decision ITA	No trend	No trend	No trend	Increasing	Increasing	No trend	No trend	No trend	No trend	Increasing
	ITA_P (%)	1.97%	5.10%	1.29%	11.69%	9.34%	6.17%	6.97%	3.73%	6.11%	27.49%
	Decision ITA_P	No trend	Increasing	No trend	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing	No trend	Increasing	Increasing
Annual	s (mm/year)	-0.170	0.097	-0.032	0.223	0.261	0.168	0.123	0.011	0.106	0.638
	CL (±)	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	10.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	20.0%
	ITA (%)	-3.55%	2.42%	-0.92%	8.77%	10.11%	4.07%	4.31%	0.32%	4.01%	26.44%
	Decision ITA	No trend	No trend	No trend	Increasing	Increasing	No trend	No trend	No trend	No trend	Increasing
	ITA_P (%)	-3.85%	1.48%	-1.81%	8.34%	10.38%	3.49%	3.57%	-0.79%	3.51%	26.50%
	Decision ITA_P	No trend	No trend	No trend	Increasing	Increasing	No trend	No trend	No trend	No trend	Increasing
Autumn	s (mm/year)	-0.193	-0.153	-0.376	0.206	0.331	0.227	0.067	0.033	-0.096	0.875
	CL (±)	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	10.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	20.0%
	ITA (%)	-3.44%	-3.07%	-8.05%	7.06%	11.42%	4.68%	2.10%	0.86%	-3.35%	33.86%
	Decision ITA	No trend	No trend	Decreasing	Increasing	Increasing	No trend	No trend	No trend	No trend	Increasing
	ITA_P (%)	-4.91%	-5.60%	-12.94%	10.10%	13.73%	5.30%	0.82%	-1.07%	-3.48%	33.21%
	Decision ITA_P	No trend	Decreasing	Decreasing	Increasing	Increasing	Increasing	No trend	No trend	No trend	Increasing
Winter	s (mm/year)	-0.468	0.047	0.383	0.363	0.291	0.132	-0.053	-0.388	-0.126	0.687
	CL (±)	5.0%	5.0%	5.0%	10.0%	10.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	20.0%
	ITA (%)	-7.48%	1.02%	9.69%	14.18%	11.69%	2.65%	-1.83%	-9.08%	-4.77%	27.65%
	Decision ITA	Decreasing	No trend	Increasing	Increasing	Increasing	No trend	No trend	Decreasing	No trend	Increasing
	ITA_P (%)	-8.19%	2.87%	12.58%	16.96%	15.02%	2.10%	-0.38%	-8.02%	-3.36%	28.90%
	Decision ITA_P	Decreasing	No trend	Increasing	Increasing	Increasing	No trend	No trend	Decreasing	No trend	Increasing
Spring	s (mm/year)	-0.411	-0.027	-0.214	0.041	0.079	-0.495	-0.015	-0.157	0.071	0.245
	CL (±)	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	10.0%	5.0%	5.0%	5.0%	10.0%
	ITA (%)	-10.42%	-0.88%	-7.82%	1.77%	3.44%	-14.51%	-0.57%	-4.76%	2.99%	11.54%
	Decision ITA	Decreasing	No trend	Decreasing	No trend	No trend	Decreasing	No trend	No trend	No trend	Increasing
	ITA_P (%)	-8.29%	0.75%	-7.94%	2.34%	-0.93%	-12.08%	-1.13%	-4.06%	5.15%	12.41%
	Decision ITA_P	Decreasing	No trend	Decreasing	No trend	No trend	Decreasing	No trend	No trend	Increasing	Increasing
Summer	s (mm/year)	0.393	0.519	0.079	0.282	0.342	0.807	0.494	0.558	0.576	0.743
	CL (±)	10.0%	10.0%	5.0%	10.0%	10.0%	20.0%	10.0%	10.0%	20.0%	20.0%
	ITA (%)	11.89%	15.42%	3.04%	11.89%	12.99%	24.99%	18.21%	18.00%	21.23%	30.33%
	Decision ITA	Increasing	Increasing	No trend	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing
	ITA_P (%)	15.80%	16.21%	10.42%	16.54%	14.43%	25.94%	23.04%	19.13%	28.16%	30.95%
	Decision ITA_P	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing	Increasing

Figure 6 shows the regional distribution of trends in the study area. Camborne city has decreasing trends for winter and spring rain values and has an increasing trend for the summer season. Chivenor has a decreasing trend for winter rain values and an increasing trend for summer rain values.

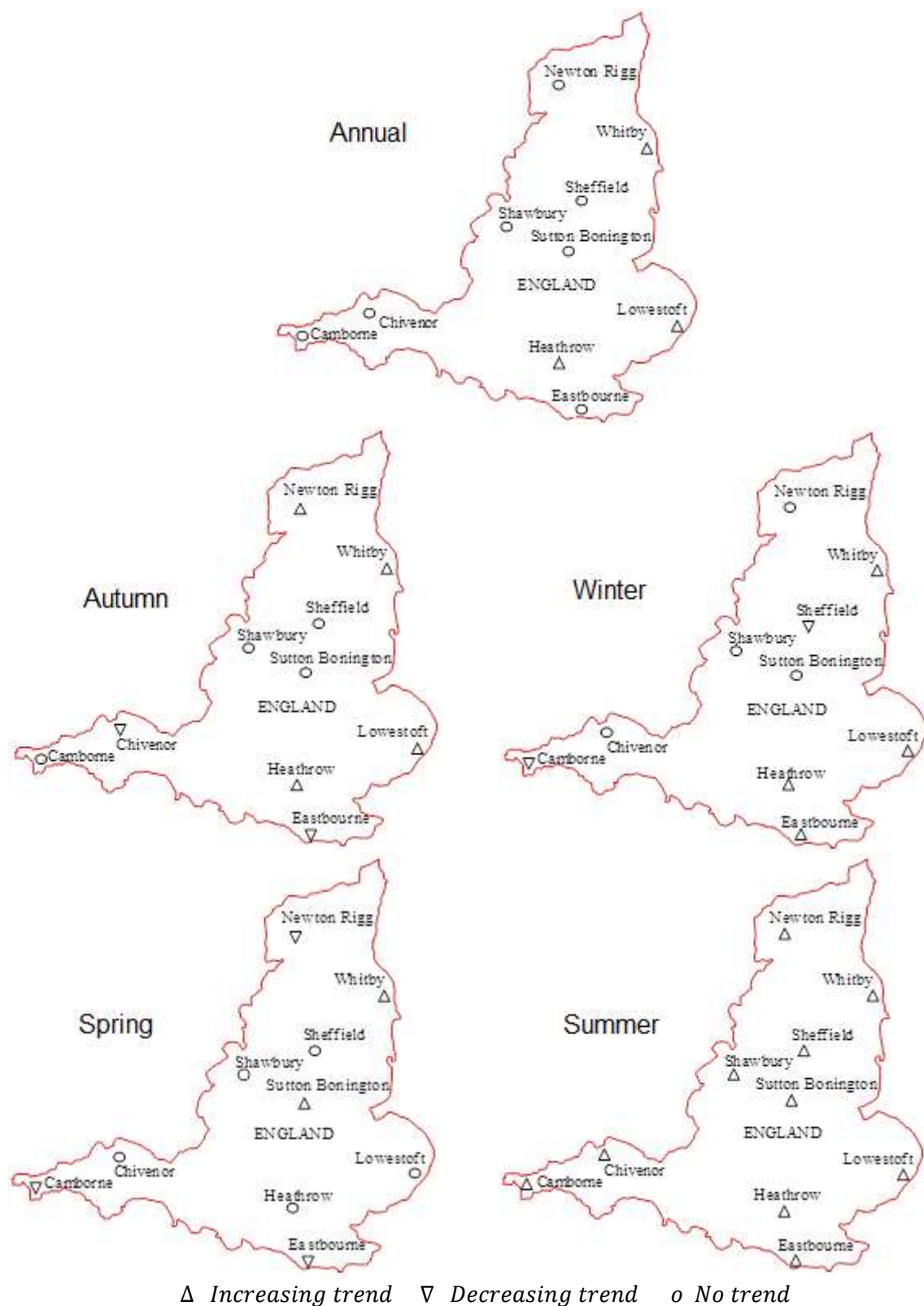


Figure6. ITA and ITA_P trend test results for all season's rain records in the England map

Eastbourne has increasing trends for the winter and summer seasons and has decreasing trends for autumn and spring seasons. There are increasing trends for annual, autumn, winter and summer rain values in Heathrow. Lowestoft has increasing trends for all seasons excluding spring season and there is

no trend for the spring season. Sutton Bonington has increasing trends for all seasons excluding spring and there is no trend for the spring season. There is an increasing trend for the summer season in Shawbury. Sheffield has a decreasing trend for winter rain values and an increasing trend for the summer season. Whitby has increasing trends for all seasons. Newton Rigg has increasing trends for autumn and winter seasons but a decreasing trend for the spring season.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

The ITA method has great visual ability. Although it determines trends in quality and quantity but may give rise to overlook the trends in minimum values in wide-range axes graphs. Alternatively, the proportional Şen Innovative Trend Method (ITA_P) is suggested in this paper for more refined trend identifications in logarithmic scales. Zero and negative values cannot be represented by a logarithmic scale. Hydro-meteorological records (wind, rain, flow, flood, and drought, etc.) excluding temperature values as Celsius are not measured by negative values. If temperatures values are converted from Celsius (°) to Fahrenheit (F), they can be used on a logarithmic scale by the ITA_P method. In engineering studies, very small values can be accepted approximately zero with certain error (5% or 10%) and these values can be plotted on a logarithmic scale. Also, changes are determined as a rate (second-half value/first half value) in ITA_P and these proportions are positive even though measurement values are negative. The applications of the ITA and ITA_P methodologies are performed for monthly, annual, autumn, winter, spring and summer seasons rains records in England. While many researchers (Fowler and Kilsby, 2003; Osborn and Hulme, 2002) have reported decreasing trends in summer rains in the UK, there is an upward trend for summer rains in all regions of England. In relation to this situation, de Leeuw *et al.* (2016) states that the trend reversed in summer rainfall after 2007. Also, Whitby has a serious upward trend in all seasons. Annual rains give increasing trends for only 3 stations, and no trends are seen at other stations. In other seasons except for summer, the increasing and decreasing trends are seen together over England.

REFERENCES

- Ahmad, I., Zhang, F., Tayyab, M., Anjum, M. N., Zaman, M., Liu, J., Farid, H. U., and Saddique, Q. (2018). "Spatiotemporal analysis of precipitation variability in annual, seasonal and extreme values over upper Indus River basin." *Atmospheric Research*, 213, 346–360.
- Alashan, S. (2018). "An improved version of innovative trend analyses." *Arabian Journal of Geosciences*, 11(3), 50.
- Büyükyıldız, M., and Berktaş, A. (2004). "Parametrik Olmayan Testler Kullanılarak Sakarya Havzası Yağışlarının Trend Analizi." *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 19(2), 23–38.
- Cui, L., Wang, L., Lai, Z., Tian, Q., Liu, W., and Li, J. (2017). "Innovative trend analysis of annual and seasonal air temperature and rainfall in the Yangtze River Basin, China during 1960–2015." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.
- Dabanlı, İ., Şen, Z., Yeleğen, M. Ö., Şişman, E., Selek, B., and Güçlü, Y. S. (2016). "Trend Assessment by the Innovative-Şen Method." *Water Resources Management*.
- Deng, S., Li, M., Sun, H., Chen, Y., Qu, L., and Zhang, X. (2017). "Exploring temporal and spatial variability of precipitation of Weizhou Island, South China Sea." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 9, 183–198.
- Elouissi, A., Şen, Z., and Habi, M. (2016). "Algerian rainfall innovative trend analysis and its implications to Macta watershed." *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4).
- Fowler, H. J., and Kilsby, C. G. (2003). "Implications of changes in seasonal and annual extreme rainfall." *Geophysical Research Letters*.
- Güçlü, Y. S. (2018a). "Alternative Trend Analysis: Half Time Series Methodology." *Water Resources Management*.

- Güçlü, Y. S. (2018b). "Multiple Şen-innovative trend analyses and partial Mann-Kendall test." *Journal of Hydrology*, Elsevier, 566, 685–704.
- Kambezidis, H. D. (2018). "The solar radiation climate of Athens: Variations and tendencies in the period 1992–2017, the brightening era." *Solar Energy*.
- Kendall, M. G. (1975). "Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London (1975)." *Google Scholar.de*
- Leeuw, J., Methven, J., and Blackburn, M. (2016). "Variability and trends in England and Wales precipitation." *International Journal of Climatology*.
- Lin, X., Zhang, Y., Yao, Z., Gong, T., Wang, H., Chu, D., Liu, L., and Zhang, F. (2008). "The trend on runoff variations in the Lhasa River Basin." *Journal of Geographical Sciences*, 18(1), 95–106.
- Mann, H. B. (1945). "Nonparametric Tests Against Trend." *Econometrica*, 13(3), 245.
- Mohorji, A. M., Şen, Z., and Almazroui, M. (2017). "Trend Analyses Revision and Global Monthly Temperature Innovative Multi-Duration Analysis." *Earth Systems and Environment*, 1(1), 9.
- Nisansala, W. D. S., Abeysingha, N. S., Islam, A., and Bandara, A. M. K. R. (2019). "Recent rainfall trend over Sri Lanka (1987–2017)." *International Journal of Climatology*.
- Nourani, V., Danandeh Mehr, A., and Azad, N. (2018). "Trend analysis of hydroclimatological variables in Urmia lake basin using hybrid wavelet Mann–Kendall and Şen tests." *Environmental Earth Sciences*, 77(5), 207.
- Osborn, T. J., and Hulme, M. (2002). "Evidence for trends in heavy rainfall events over the UK." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.
- Öztopal, A., and Şen, Z. (2017). "Innovative Trend Methodology Applications to Precipitation Records in Turkey." *Water Resources Management*, 31(3), 727–737.
- Shahid, S. (2011). "Trends in extreme rainfall events of Bangladesh." *Theoretical and Applied Climatology*, 104(3–4), 489–499.
- Sonali, P., and Nagesh Kumar, D. (2013). "Review of trend detection methods and their application to detect temperature changes in India." *Journal of Hydrology*, 476, 212–227.
- Swed, F. S., and Eisenhart, C. (1943). "Tables for Testing Randomness of Grouping in a Sequence of Alternatives." *The Annals of Mathematical Statistics*.
- Şen, Z. (2012). "Innovative Trend Analysis Methodology." *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9), 1042–1046.
- Şen, Z. (2014). "Trend Identification Simulation and Application." *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 19(3), 635–642.
- Şen, Z. (2017). "Innovative trend significance test and applications." *Theoretical and Applied Climatology*, 127(3–4), 939–947.
- Vinet, L., and Zhedanov, A. (2010). "A 'missing' family of classical orthogonal polynomials." *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
- Wu, H., Li, X., and Qian, H. (2017). "Detection of anomalies and changes of rainfall in the Yellow River Basin, China, through two graphical methods." *Water (Switzerland)*.
- Wu, H., and Qian, H. (2017). "Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s." *International Journal of Climatology*, 37(5), 2582–2592.



EĞİK ÇATLAK İÇEREN ÇELİK PLAKANIN YORULMA DAVRANIŞININ FARKLI HASAR MODELLERİYLE TAHMİNİ

Oğuzhan DEMİR 

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik, TÜRKİYE
oguzhan.demir@bilecik.edu.tr

(Geliş/Received: 03.02.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.03.2020)

ÖZ: Çoğu mühendislik yapı ve uygulamalarında malzeme, imalat yöntemi, çevresel faktörler veya yapıya etkiyen yükleme türleri gibi birçok parametreden kaynaklı çatlak veya kırılma problemleri ile karşılaşmaktadır. Özellikle yüksek teknoloji gerektiren ve Ar-Ge harcamalarının yüksek olduğu bazı kritik yapılarda ise, bu problemler çok büyük bir sorun haline gelebilmektedir. Yapıda bulunan bu çatlaklar bazen emniyetli bir boyuta kadar yapının içerisinde kalabilmekte veya bazen ani bir kırılma ile büyük maddi hasarlara, hatta bazı durumlarda ciddi can kayıplarına da neden olabilmektedirler. Bu tür olumsuz durumların önüne geçmek için, yapıda var olan çatlaklar ile yapının fonksiyonunu ne kadar süre ile güvenli bir şekilde devam ettirebileceğinin, bir başka deyişle hasarlı yapının emniyetli kalan ömrünün tespiti için kırılma parametrelerinin hassas ve doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Ayrıca farklı yükleme koşulları altında hasarlı yapının nasıl davranacağını bilmesi ve tasarım aşamasında bu durumlar göz önünde bulundurularak tasarımda iyileştirmeye gidilmesi, oluşması muhtemel hasarları minimize etme imkanı sunmaktadır. Bu çalışmada, karışık modlu yüklere maruz çatlaklı yapıların kırılma ve çatlak ilerleme davranışının tahminine yönelik olarak yakın zamanda geliştirilmiş olan Demir ve Ayhan hasar modelinin uygulanabilirliği literatürdeki mevcut hasar modelleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Alüminyum malzeme kullanılarak farklı geometri ve boyutlara sahip test numuneleri ile geliştirilen Demir ve Ayhan hasar modelinin çelik numuneler için de kullanılabilir ve uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yorulma, Çatlak ilerleme modeli, Yorulma ömrü tahmini

Prediction of Fatigue Behavior of Steel Plate with Inclined Crack Using Different Damage Models

ABSTRACT: Cracks or fracture problems are encountered in many engineering structures and applications, due to many parameters such as material, manufacturing method, environmental factors or loading types affecting the structure. Especially in some critical structures where high technology is needed and research and development expenditures are high, these problems may become extremely vital. These cracks can remain in the structure until a certain safe size or sometimes with a sudden fracture may cause serious financial losses, leading to serious accidents and even in some cases may cause loss of lives. To prevent such negative situations and to ensure that cracked structures function safely i.e., to determine fail-safe/remaining life assessment of a damaged structure, fracture parameters must be calculated accurately and precisely. In addition, knowing how the cracked structure will behave under different loading conditions and accordingly improving the design during the design stage enable minimization of possible damages. In this study, the applicability of the recently developed Demir and Ayhan damage model for estimating the fracture and crack propagation behavior of cracked structures subjected to mixed mode loads was evaluated together with the existing damage models in the literature. It is shown that the Demir and Ayhan damage model, which was developed using aluminum test specimens having different geometries and dimensions, can also be used and applied for steel specimens.

Key Words: *Fatigue, Crack growth criterion, Prediction of fatigue life.*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstride karşılaşılan yapısal hasarların ana nedenlerinden biri olan yorulma çatlakları, modern yapısal malzemelerin tasarımı ve performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde yer alan kırılma ve çatlak ilerleme problemleri ile ilgili birçok çalışma, yükleme yönüne dik doğrultuda bulunan başlangıç çatlağının yükleme sonrası yine aynı doğrultuda ilerlediği tekil mod-I yüklerine maruz kalan yapılara odaklanmıştır. Ancak, uygulamada görülen birçok kırılma mekaniği problemi, sadece tekil mod-I yükleme koşulları dikkate alınarak yeterli şekilde analiz edilebilse de, hala mod-I analiz yaklaşımlarının yeterli olmadığı karışık mod yüklerine maruz kalan birçok problem vardır. Ayrıca, tekil mod-I yükleme durumu pratikte her zaman ortaya çıkmamakta ve birçok durumda çatlaklar, yük yönünün çatlak düzlemine açılmal etkidiği karışık mod yüklerine maruz kalmaktadırlar.

Günümüzde karşılaşılan birçok mühendislik probleminde, çok eksenli yükler, çatlak yüzeylerinin yükleme doğrultusuna göre açılmal yönelimleri, farklı sınır koşulları türleri ve kombinasyonları gibi farklı nedenlerden dolayı karışık modlu kırılma ve çatlak ilerleme problemleri ile karşılaşılmaktadır. En temel karışık mod kırılma tipi, hem mod-I (açma) hem de mod-II (kayma) yüklerinin çatlak ucuna etki ettiği düzlem içi karışık mod-I/II yükleme durumudur. Bir düzlemde karışık mod çatlağının yönlenmesi üzerine ilk çalışmalar 1960' lı yılların başlarında Erdoğan ve Sih'in çalışmasıyla başlamış olsa da (Erdoğan ve Sih, 1963), iki boyutlu karışık modlu kırılma ile ilgili problemlere özellikle son yıllarda çok daha fazla önem verilmiştir. Karışık mod yük altındaki çatlak ilerlemesi sırasında, çatlak ilerleme ömrü kırılma modlarının baskınlığına göre değişmektedir. Bu nedenle, ömür tahminlerinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için, karışık mod yükleme koşulları altında kırılma modlarının eşdeğer karşılığı olan eşdeğer gerilme şiddet faktörünün (ΔK_{es}) hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde karışık mod-I/II problemleri için önerilen ΔK_{es} değerinin tespitine yönelik farklı hasar modelleri bulunmaktadır. Maksimum teğetsel gerilme (maximum tangential stress-MTS) modeli (Erdoğan ve Sih, 1963), minimum gerinim enerji yoğunluğu (minimum strain energy density-SED) modeli (Sih ve Macdonald, 1974), maksimum enerji salınım oranı (maximum energy release rate-MERR) modeli (Nuismer, 1975; Hussain ve diğ., 1974), maksimum teğetsel gerinim (maximum tangential strain-MTSN) modeli (Chang, 1981) karışık mod-I / II yükleme koşullarında malzemelerin kırılma davranışını anlamak için kullanılan en yaygın modellerden bazılarıdır. Ayrıca, Tanaka (1974), Pook (1989), Koo ve Choy (1991) ve Richard (Richard, 1985; Sander ve Richard, 2005; 2006) düzlem içi karışık mod-I/II problemleri için eşdeğer gerilme şiddet faktörünü tanımlayan farklı modeller önermişlerdir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde farklı malzemelerden yapılmış değişik tip numuneler kullanılarak özellikle son yıllarda çok çeşitli deneysel ve nümerik analizlerin gerçekleştirildiği görülmektedir. Bunlar arasında; disk tipi numuneler (Al-Shayea, 2005; Aliha ve diğ., 2014; Akbardoost ve Rastin, 2015), üç veya dört noktalı eğme numuneleri (Aliha ve diğ., 2009; Marsavina ve diğ., 2013), açılı köşe veya merkezi çatlak içeren dikdörtgensel numuneler (Seed ve Nowell, 1994; Ayatollahi ve Aliha, 2009) ve özel tutucuları ile birlikte tasarlanarak tek eksenli bir yükleme cihazında iki eksenli yükleme oluşturmak için tasarlanan kelebek tipi numuneler (Katanchi ve diğ., 2018), Arcan numunesi (Arcan ve diğ., 1978) ve Richard ve ekibinin geliştirmiş olduğu kompakt çekme kayma (compact tension shear-CTS) numunesi (Richard ve Benitz, 1983; Sander ve Richard, 2006; Jiang ve diğ., 2009; Kim ve Chung, 2012; Patle ve diğ., 2012; Zhao ve Guo, 2012; Gouda ve diğ., 2013) en yaygın kullanılan numune tipleridir. Malzeme olarak ise genellikle, soda kireç camı (soda lime glass) (Ayatollahi ve Aliha, 2009; Mirsayar ve diğ., 2017), seramik (Aliha ve Ayatollahi, 2012; Zabihi ve diğ., 2018), çok kristalli grafit (Ayatollahi ve Aliha, 2008), polimetil metakrilat (Polymethylmethacrylate-PMMA) (Ayatollahi ve diğ., 2006; Hernandez-Gomez ve diğ., 2004; Mirsayar, 2015; Hou ve diğ., 2019; Mousavi ve diğ., 2020), beton (Seitl ve diğ., 2018) ve mermer (Saghafi ve diğ., 2010; Aliha ve diğ., 2012; 2013) gibi gevrek yapıdaki malzemelerin karışık mod-I/II yüklemesi altında kırılma davranışları incelenmiştir. Bu çalışmalarda gerçekleştirilen test ve analizlerin sonuçları literatürde bulunan mevcut hasar modelleri ile karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar

değerlendirilmiştir. Bu çalışmaların çoğunda hasar modellerinin test sonuçlarını karşılamadığı görülerek mevcut modeller revize edilmiş ve test sonuçlarını karşılayan güncellenmiş yeni modeller önerilmiştir. Örneğin; Saghafi ve diğ. (2010) mermer taşından hazırlanan asimetrik yarı dairesel eğme numunesine üç nokta eğme yükü altında kırılma tokluğu testi gerçekleştirilerek MTS modeli ile karşılaştırmış ve modifiye edilmiş bir MTS hasar modeli önermişlerdir. Mirsayar (2015) açılı çatlağa sahip polimetil metakrilat malzemesinden yapılmış karesel plakanın karışık mod kırılma tokluğu test sonuçlarını MTSN hasar modeli ile karşılaştırmış ve yeni bir modifiye edilmiş MTSN modeli geliştirmiştir. Hou ve diğ. (2019) mermer taşı ve PMMA gibi farklı malzeme ve numune tiplerini kullanarak gerçekleştirdikleri kırılma tokluğu test sonuçlarını SED ve MTS hasar modelleri ile karşılaştırmış ve yeni bir modifiye MTSN modeli önermişlerdir. Mirsayar ve diğ. (2017) soda kireç camından yapılmış dairesel disk tipi numune kullanarak test sonuçlarını MTS, SED ve MTSN modelleri ile karşılaştırmış ve MTSN modelini genişleterek yeni bir hasar modeli geliştirmişlerdir.

Yukarıda verilen literatür özetinden görüldüğü üzere, geniş bir yelpazede bulunan karışık mod-I/II kırılma ve çatlak ilerleme problemleri ile ilgili literatürde halen genel kabul görmüş bir hasar modeli bulunmamaktadır. Ayrıca mevcut hasar modellerinin incelendiği literatürde yer alan çoğu çalışmada yapıların sadece kırılma davranışının analiz edildiği görülmektedir. Yorulma yükü altında yapıların çatlak ilerleme davranışının incelenerek mevcut hasar modellerinin değerlendirildiği sınırlı sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir. Yazar ve ark. tarafından (Demir ve diğ., 2016; 2017; 2018; Ayhan ve Demir, 2016) farklı tipte numuneler kullanılarak Al 7075-T651 alüminyum alaşımlı malzeme üzerinde yakın zamanda geniş spektrumlu karışık mod-I/II yükleme şartları içeren birçok nümerik ve deneysel çalışma gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar mevcut hasar modelleri ile karşılaştırılmış ve literatüre yeni numune, tutucu modelleri ve hasar modelleri önerilmiştir. Deney ve analizlerde numune üzerinde eşzamanlı olarak farklı oranlarda mod-I ve mod-II yüklerinin oluşmasını sağlamak için numunelere uygun özel tutucular kullanılmıştır. Tutucular üzerinde 15'er derecelik değişen açılarda yükleme delikleri oluşturularak farklı yükleme açılarında kırılma testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen kopma yükleri, analizlerden elde edilen K_I , K_{II} ve K_{III} gerilme şiddet faktörleri ve kırılma esnasında çatlağın izlediği ilerleme doğrultuları kullanılarak hem karışık mod-I/II yükleme durumları hem de karışık mod-I/II/III yükleme durumları için yeni hasar modelleri önerilmiştir. Önerilen hasar modellerinin literatürde kabul görebilmesi için farklı numune, malzeme, yükleme ve sınır koşullarına maruz çeşitli yapılar üzerinde de test edilmesi gerekmektedir. Nitekim Sajith ve diğ. (2019a; 2019b; 2020) Al 2024-T3, Al 6061-T6 ve AISI 316 paslanmaz çeliği gibi farklı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen karışık mod-I/II çatlak ilerleme deneylerindeki yorulma ömürlerini literatürdeki mevcut hasar modelleri ve Demir ve diğ. (2017; 2018) tarafından önerilen hasar modeli ile tahmin ederek sonuçları karşılaştırmış ve Demir ve diğ. tarafından geliştirilen hasar modelinin deney sonuçları ile örtüşen tahminlerde bulunduğunu belirtmişlerdir. Önerilen çalışmada, Demir ve diğ. tarafından karışık mod-I/II kırılma tokluğu test sonuçları kullanılarak geliştirilen hasar modelinin farklı malzeme ve yükleme koşullarına sahip yapılara uygulanabilirliğinin gösterilmesi için, Chen ve diğ. (2018) tarafından gerçekleştirilen nümerik çalışmadaki veriler referans alınarak farklı hasar modellerine göre çatlak ilerleme davranışı analiz edilmiştir.

ÇATLAK İLERLEME MODELİ (CRACK GROWTH MODEL)

Başlangıç çatlağına sahip bir yapının bir sonraki çatlak ilerleme doğrultusu ve profilinin tahmini için, çatlak ucu boyunca sıralanan her bir düğüm noktasına ait gerilme şiddet faktörleri hesaplandıktan sonra, belirlenen bir çatlak ilerleme modeli kullanılarak bir sonraki çatlak ucunun ilerleme doğrultusu ve profili tahmin edilmektedir. Bu çalışmada çatlak ilerleme ömrünün tahmini için çatlak ilerleme modeli olarak Denklem (1)'de verilen Paris-Erdoğan (Paris ve diğ., 1961; Paris ve Erdoğan, 1963) denklemi kullanılmıştır.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{es})^n \quad (1)$$

Denklem (1)'de yer alan, a çatlak uzunluğu, N çevrim sayısı, $\Delta K_{eş}$ karışık mod yorulma yüklemesi altında eşdeğer gerilme şiddet faktörü değer aralığı, C ve n ise çatlak ilerlemesi ile ilişkili malzeme özellikleridir. Eğer yükleme durumu basit mod-I yüklemesi ise, $\Delta K_{eş}$ herhangi bir düğüm noktası için mod-I gerilme şiddet faktörü değer aralığını temsil etmektedir. Fakat yükleme durumu karışık modlu yükleme ise $\Delta K_{eş}$ herhangi bir düğüm noktasında karışık modlu yükün neticesinde ortaya çıkan kırılma modlarının eşdeğerine karşılık gelen bir değer aralığını ifade etmektedir. Bu çalışmada karışık mod-I/II yükleme durumu incelendiği için, denklemdeki $\Delta K_{eş}$ herhangi bir düğüm noktasında oluşan mod-I ve mod-II değerlerine karşılık gelen bir eşdeğer gerilme şiddet faktörü değer aralığını ifade etmektedir. Eşdeğer gerilme şiddet faktörünün tahmini için Demir ve ark. (2017; 2018) tarafından yakın zaman önce geliştirilen ve Denklem (2) ile verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$K_{eş} = (a \cdot K_I^4 + b \cdot K_{II}^4 + c \cdot K_I^2 \cdot K_{II}^2)^{1/4} \quad (2)$$

Denklem (2)'de yer alan K_I , açılma modu (mod-I) ile ilgili gerilme şiddet faktörünü, K_{II} ise düzlem içi kayma modu (mod-II) ile ilgili gerilme şiddet faktörünü temsil etmektedir. a , b ve c katsayıları, nümerik analiz ve deney verileri kullanılarak gerçekleştirilen regresyon analizleri sonrası elde edilen katsayılardır. Denklem (2)'de kullanılan katsayılar aşağıda Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Denklem (2)'de kullanılan katsayılar

Table 1. Coefficients used in equation (2)

a	b	c
1.0519	-0.0350	2.3056

Çatlak ucunun ilerleme doğrultusunun tahmini için ise Demir ve diğ. (2017; 2018) tarafından çatlak ucu sapma açısının (θ_0) tahminine yönelik geliştirilen ve aşağıda Denklem (3) ile verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$\theta_0 = -\arccos \left(\frac{e \cdot K_{II}^2 + K_I \cdot \sqrt{K_I^2 + f \cdot K_{II} \cdot K_I} + g \cdot K_{II} \cdot K_I}{K_I^2 + h \cdot K_{II}^2} \right) \quad (3)$$

Denklem (3)'te kullanılan katsayılar Çizelge 2'de verilmiştir. Kullanılan denklemler ile ilgili daha detaylı bilgilere ilgili kaynaklardan (Demir ve ark. 2017; 2018) ulaşılabilir.

Çizelge 2. Denklem (3)'te kullanılan katsayılar

Table 2. Coefficients used in equation (3)

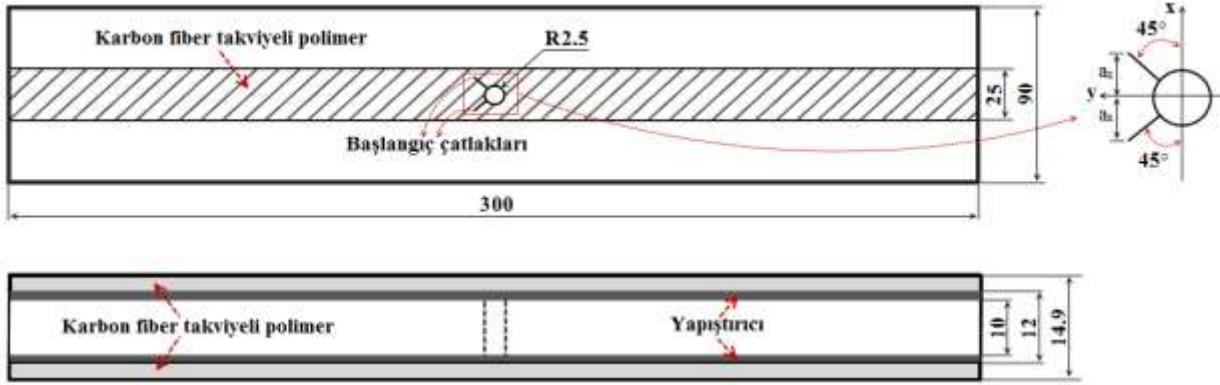
e	f	g	h
0.1723	5.1062	-2.7483	-1.1636

Yukarıda denklemleri verilen Demir ve Ayhan hasar modeline göre, herhangi bir çatlak ilerleme adımında çatlak ucunun herhangi bir düğüm noktası için elde edilen maksimum $K_{eş}$ değeri, malzemenin kırılma tokluğu (K_{IC}) değerine ulaştığı anda kararsız çatlak ilerlemesi başlamakta ve kırılma meydana gelmektedir.

PROBLEM TANIMI (PROBLEM DEFINITION)

Başlangıç çatlağının yükleme doğrultusuna göre açılı olduğu farklı ön-gerilme oranlarında karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiş çatlaklı çelik plaka problemi (Chen ve diğ., 2018) literatürden referans olarak seçilmiştir. Referans çalışmada, ayrıntılı boyutları Şekil 1'de verilen delikli plakaya tek eksenli yükleme altında çevrimsel çeki yükü uygulanarak nümerik olarak çatlak ilerleme analizi

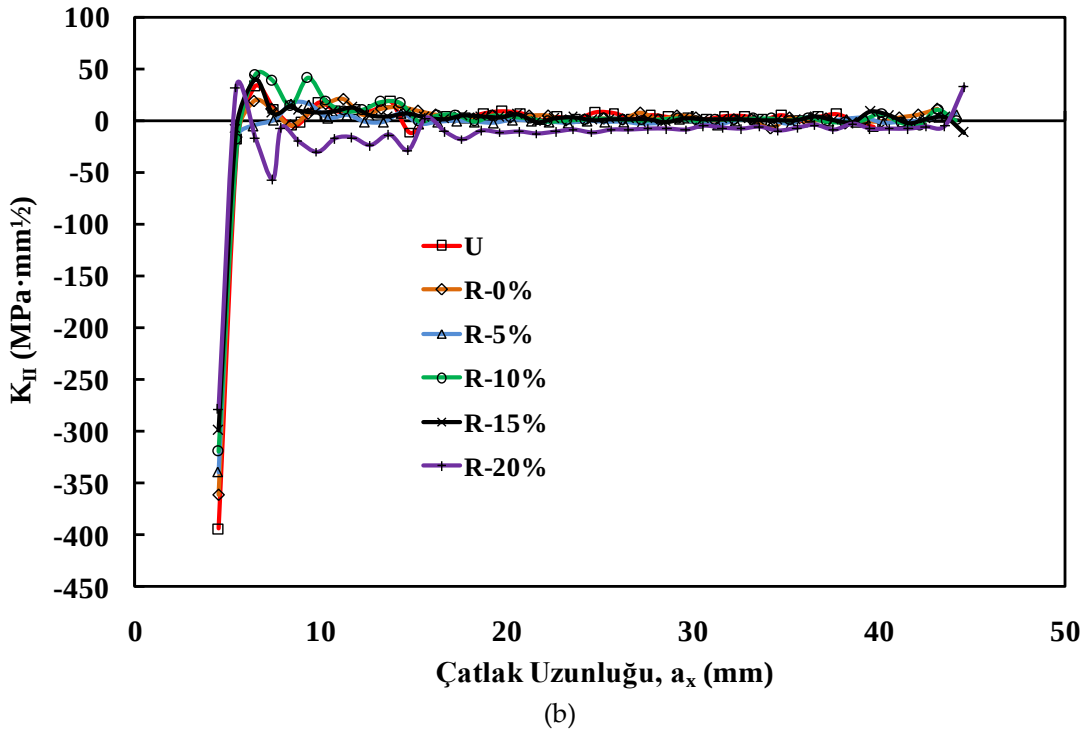
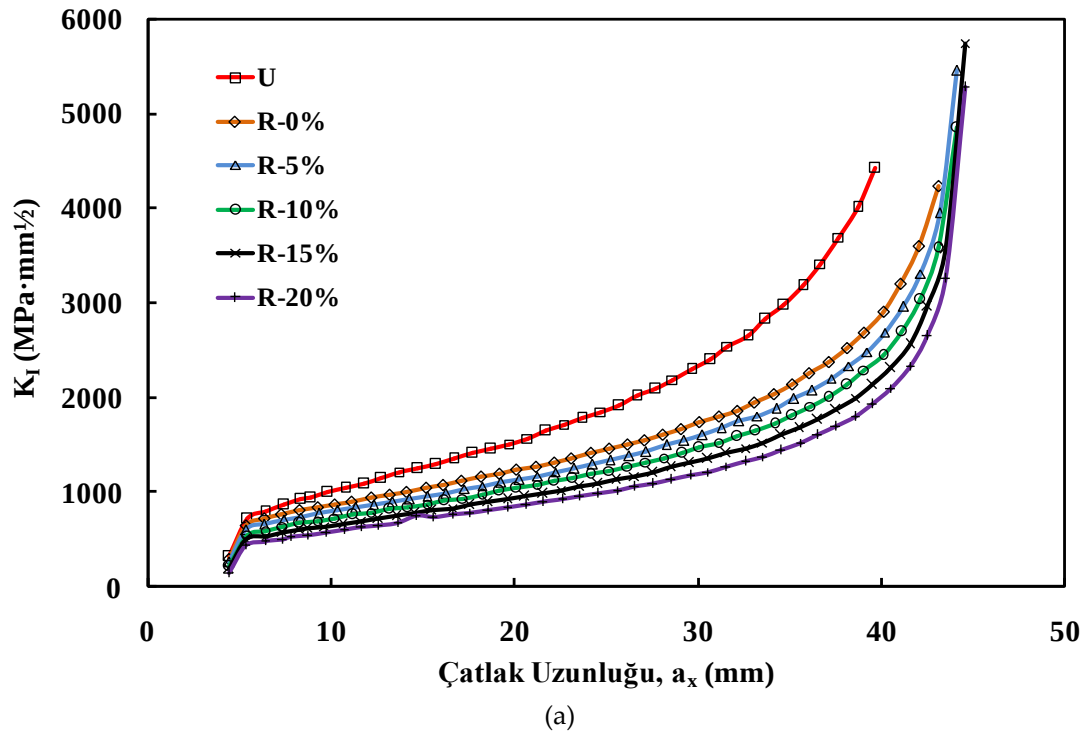
gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise, başlangıç çatlaklarının yükleme doğrultusuna göre 45° açılı olduğu problem ele alınarak yakın zamanda geliştirilmiş olan Demir ve Ayhan hasar modelinin çatlak ilerleme profili ve çatlak ilerleme ömrünün tahminini açısından hasar modelinin uygulanabilirliği literatürdeki mevcut hasar modelleri ile birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Çatlak ucunun yakın görünümü ve numunenin ön ve üst görünüşü (Chen ve diğ., 2018)

Figure 1. Front and top view of the specimen and close-up view of the crack front (Chen ve diğ., 2018)

Başlangıç çatlakları yükleme doğrultusuna göre açılı olduğu için karışık mod-I/II yükleme durumu oluşmaktadır. Plakanın 160 MPa ile 16 MPa arasında değişen yorulma yüküne maruz kaldığı varsayılmıştır. Şekil 2'de karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmemiş, ön gerilmesiz ve ön gerilme oranı %0, %5, %10, %15, %20 oranında karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiş plakada başlangıç çatlaklarının yükleme doğrultusuna göre 45° açılı olduğu durumlar için gerçekleştirilen çatlak ilerleme analizleri sonrası her bir ilerleme adımının çatlak ucu için elde edilen K_I ve K_{II} gerilme şiddet faktörlerinin dağılımı verilmiştir.



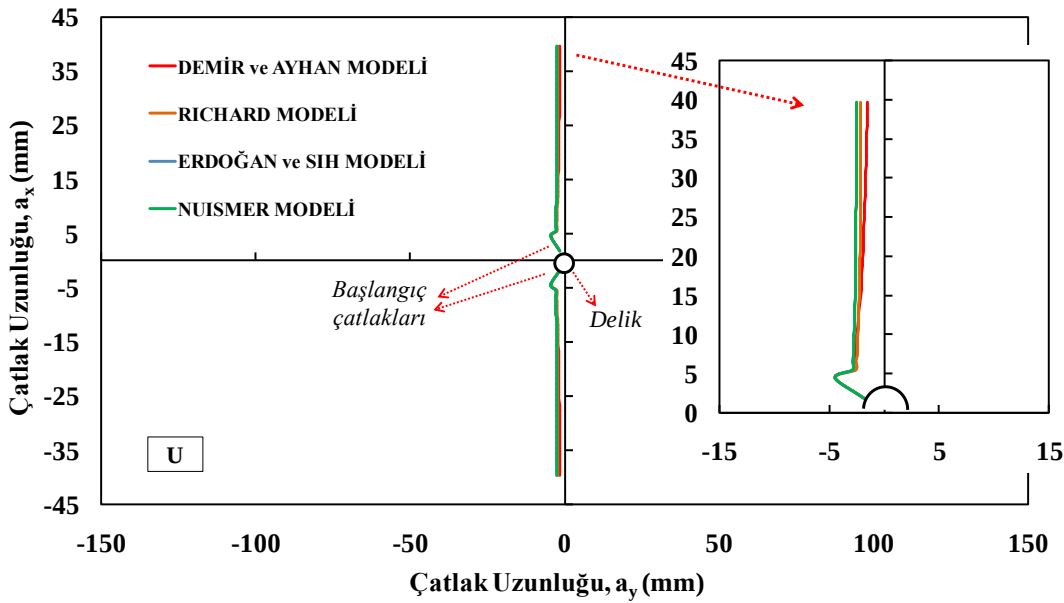
Şekil 2. Her bir çatlak ilerleme adımı için çatlak uzunluğuna karşılık (a) K_I , (b) K_{II} değişimi (Chen ve diğ., 2018)

Figure 2. Distribution of (a) K_I , (b) K_{II} with respect to the crack length for each crack propagation steps (Chen ve diğ., 2018)

Şekil 2'de yer alan U: Karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmemiş durumu, R: Karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiş durumu ve sonrasında gelen yüzdelik ifade ise maksimum çekme gerilmesi değerinin ön gerilme değerine oranını ifade eden ön gerilme oranını temsil etmektedir. Ele alınan tüm durumlar için çatlak uzunluğu arttıkça K_I gerilme şiddet faktörü değerinin beklendiği gibi artan bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Çatlak ilerledikçe doğrultusu yükleme yönüne dik konuma geldiği için K_I gerilme şiddet faktörü değeri artmaktadır. Yine ele alınan tüm durumlar için, 1. ilerleme adımı ile birlikte K_{II} gerilme şiddet faktörü değerinin ise ani bir değişimle sıfıra yakın değerler aldığı ve eğilimin çatlak ilerledikçe bu şekilde devam ettiği görülmektedir. Bu durum, başlangıçta yükleme doğrultusuna açılı olan başlangıç çatlağının 1. ilerleme adımı ile birlikte ani bir yön değişimi gösterdiğine işaret etmektedir. Yani başlangıçta karışık modlu olarak başlayan problem çatlak ilerledikçe basit mod-I problemine dönüşmektedir.

ÇATLAK İLERLEME PROFİL TAHMİNLERİ(PREDICTIONS OF CRACK GROWTH TRAJECTORIES)

Bu bölümde, her bir çatlak ilerleme adımı için elde edilen gerilme şiddet faktörü değerleri kullanılarak farklı hasar modellerinin çatlak ilerleme profil tahminleri değerlendirilmiştir. Şekil 3'te karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmemiş (U) durum için farklı hasar modellerine göre tahmin edilen çatlak profillerinin 90x300 boyutundaki plakadaki değişimi gösterilmiştir.

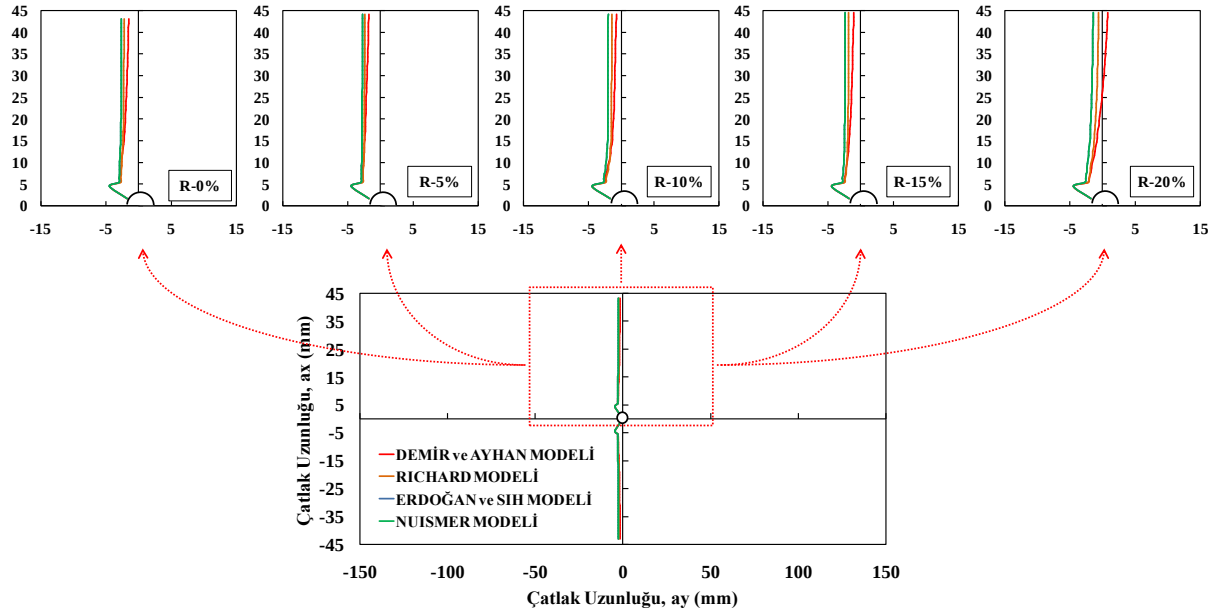


Şekil 3. Takviyesiz (U) plakada farklı hasar modellerine göre tahmini yorulma çatlak ilerleme profillerinin değişimi

Figure 3. Variation of predicted fatigue crack propagation profiles according to the different damage models for unreinforced (U) plate

Karbon fiber takviyeli ve takviyesiz tüm durumlar için gerçekleştirilen çatlak ilerleme profil tahminlerinde, Erdoğan ve Sih modeli (Erdoğan ve Sih, 1963) ile Nuismer hasar modeli (Nuismer, 1975) kullanılarak elde edilen çatlak sapma açıları aynı çıkmıştır. Bu yüzden iki modeli temsil eden profil grafikte üst üste çakışmıştır. Çok az farklılıkların dışında hasar modellerinin tahmin ettiği yorulma çatlak ilerleme profillerinin karbon fiber takviye edilmemiş (U) durum için benzer bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Ön gerilmesiz (R-0%) ve ön gerilme oranı %0, %5, %10, %15, %20 oranında karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiş (R-5, R-10, R-15, R-20%) plaka için gerçekleştirilen çatlak ilerleme profil tahminleri, temsili bir plaka üzerinden alınan detay görüntüleri ile Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi karbon fiber takviyeli durumlar için farklı hasar modellerine göre elde edilen tahmini yorulma çatlak ilerleme profillerinin çok az farklılıkların dışında bir önceki karbon fiber takviyesiz durum için elde edilen sonuçlarda olduğu gibi benzer bir eğilim gözlemlenmektedir. Takviyeli ve takviyesiz

incelenen tüm durumlarda, 1. ilerleme adımı ile birlikte çatlak anı bir yön değişimi göstererek yükleme doğrultusuna dikey doğrultuda ilerlediği çatlak ilerleme profillerinden görülmektedir.

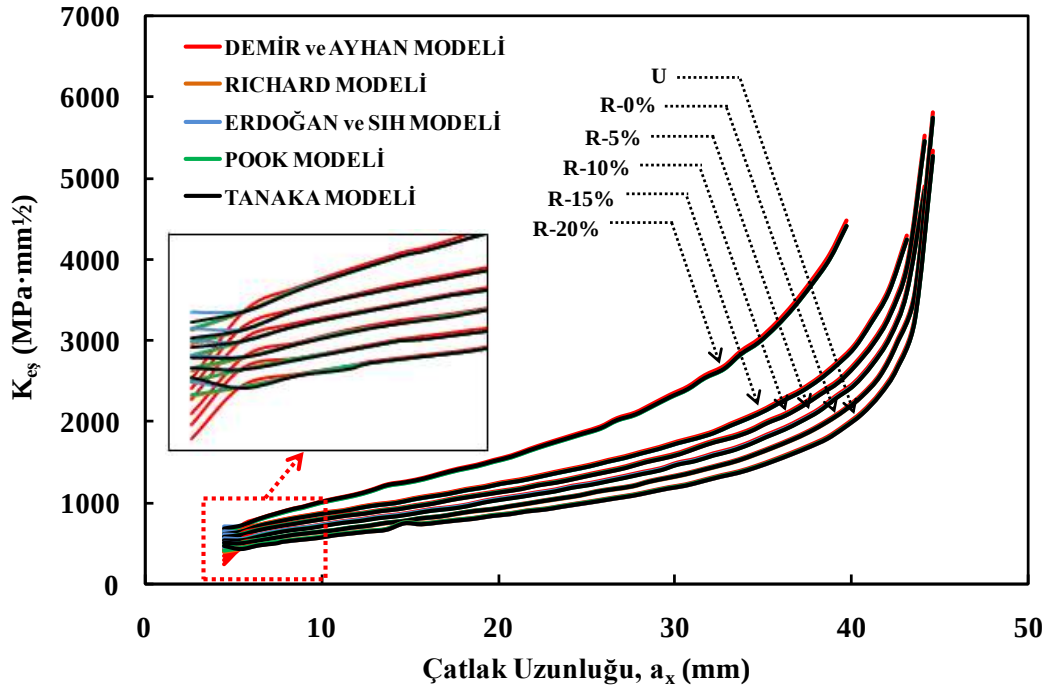


Şekil 4. Takviyeli (R-5, R-10, R-15, R-20% ön gerilmeli) plakaların farklı hasar modellerine göre tahmini yorulma çatlak ilerleme profillerinin değişimi

Figure 4. Variation of predicted fatigue crack propagation profiles according to the different damage models for reinforced (R-5, R-10, R-15, R-20% pre-stressed) plates

ÇATLAK İLERLEME ÖMÜR TAHMİNLERİ (PREDICTIONS OF CRACK GROWTH LIVES)

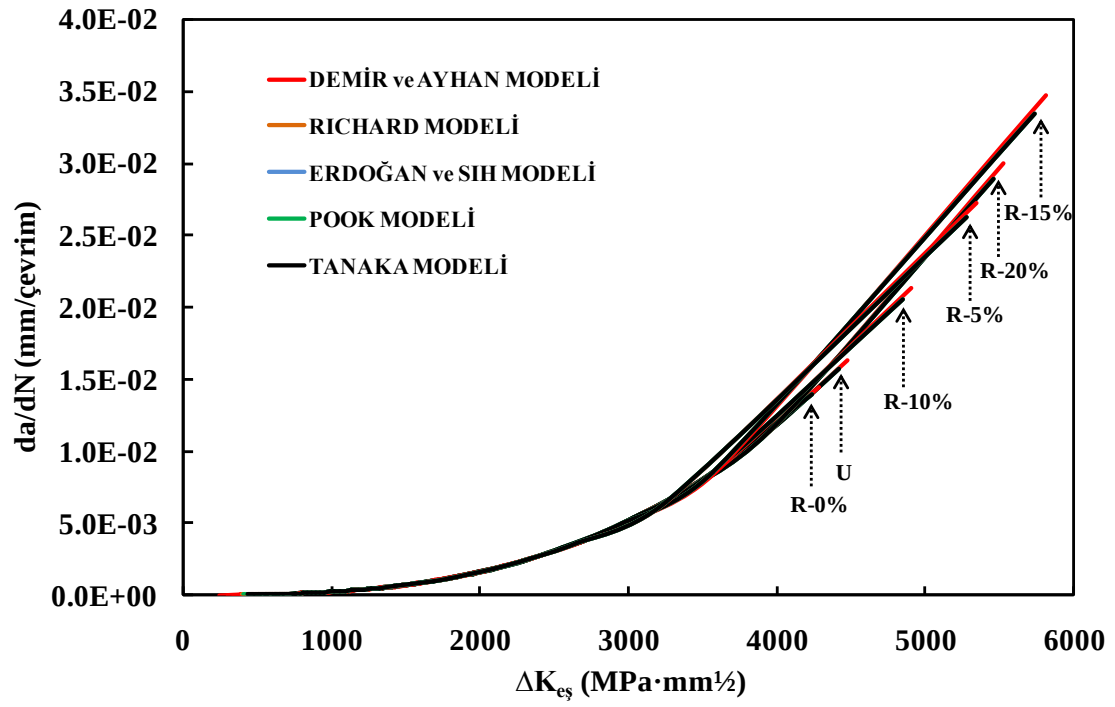
Bu bölümde ise, her bir ilerleme adımının çatlak ucu için elde edilen K_I ve K_{II} gerilme şiddet faktörleri kullanılarak farklı hasar modellerine göre eşdeğer gerilme şiddet faktörleri elde edilmiş ve çatlak ilerleme malzeme özellikleri ile birlikte bu değerler kullanılarak çatlak ilerleme ömür tahminleri yapılmıştır. Çatlak ilerleme malzeme sabitleri için $C=6.77 \times 10^{-3} (da/dN:mm/çevrim, K:MPamm^{1/2})$ ve $n=2.88$ değerleri kullanılmıştır. Şekil 5'te, farklı hasar modellerine göre elde edilen eşdeğer gerilme şiddet faktörlerinin ($K_{eş}$) çatlak uzunluğuna bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 5. Takviyeli (R-5, R-10, R-15, R-20% ön gerilmeli) ve takviyesiz (U) plakalar için farklı hasar modellerine göre elde edilen eşdeğer gerilme şiddet faktörlerinin (K_{es}) çatlak uzunluğuna bağlı olarak değişimi

Figure 5. Variation of the equivalent stress intensity factors (K_{eq}) obtained from different damage models with respect to the crack length for reinforced (R-5, R-10, R-15, R-20% pre-stressed) and unreinforced (U) plates

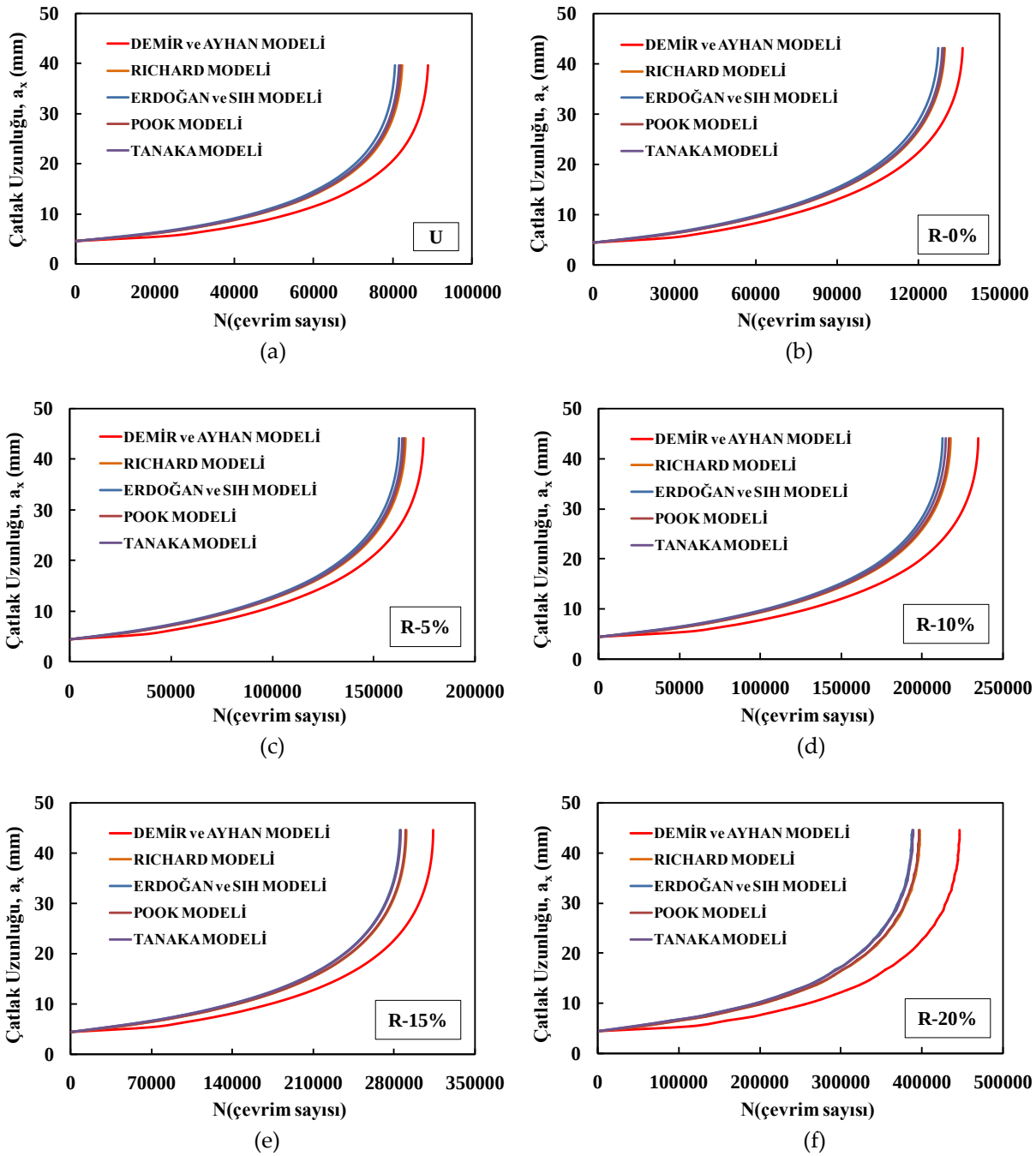
Beklendiği gibi takviyeli plakada ön gerilme oranı arttıkça eşdeğer gerilme şiddet faktörü değerleri çatlak ilerlemesi ile birlikte artış göstermiştir. Baskın kırılma modu mod-I olduğu için K_I dağılımına benzer bir K_{es} dağılımı gözlenmiştir. Başlangıç çatlak dışında diğer tüm ilerleme adımları için hasar modellerine göre elde edilen K_{es} dağılımı birbirine yakın eğilimdedir. Başlangıç çatlak için K_I gerilme şiddet faktörüne oranla daha yüksek K_{II} değerleri var olduğu için, hasar modellerine göre elde edilen K_{es} gerilme şiddet faktörü değerleri de farklılık göstermektedir. C ve n malzeme sabitleri kullanılarak çatlak ilerleme oranını gösteren $da/dN-\Delta K_{es}$ değişimine (Şekil 6) bakıldığında hasar modellerinin birbiri ile uyumlu bir profil gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6. Takviyeli (R-5, R-10, R-15, R-20% ön gerilmeli) ve takviyesiz (U) plakalar için farklı hasar modellerine göre elde edilen da/dN - ΔK_{eq} değişim eğrileri

Figure 6. da/dN - ΔK_{eq} variation curves obtained from different damage models for reinforced (R-5, R-10, R-15, R-20% pre-stressed) and unreinforced (U) plates

Son olarak, mevcut hasar modelleri ve Demir ve Ayhan modeline göre ömür tahminleri yapılarak Demir ve Ayhan modelinin ömür tahminleri açısından değerlendirmesi yapılmıştır. Şekil 7'de ele alınan karbon fiber takviyeli ve takviyesiz tüm durumlar için hasar modellerine göre yapılan ömür tahminleri verilmiştir.



Şekil 7. Farklı hasar modellerine göre çevrim sayısının çatlak uzunluğuna bağlı değişimi, a) Takviyesiz (U), b) Takviyeli (R-5%), c) R-10%, d) R-15%, e) R-20% ön gerilmeli plaka

Figure 7. Variation of the number of cycles with respect to the crack length according to different damage models, a) for unreinforced (U), b) for reinforced (R-5%), c) R-10%, d) R-15%, e) R-20% pre-stressed plates

Demir ve Ayhan modeli dışındaki diğer hasar modellerinin birbirleri ile daha yakın ömür tahminlerinde bulundukları görülmektedir. Demir ve Ayhan hasar modeli ile diğer modeller arasında yaklaşık %5 ile %12 arasında değişen farklılıklar bulunmaktadır. Bunun sebebi ise Şekil 5'te başlangıç çatlakları için Demir ve Ayhan modeline göre elde edilen K_{es} değerinin diğer modellerden küçük farklılıklar göstermesinden kaynaklanmaktadır. Referans alınan kaynakta herhangi bir deney verisi olmadığı için hangi modelin daha doğru bir tahmin yaptığına yönelik bir yorum yapılamamaktadır. Ancak sonuçlar göstermektedir ki, her ne kadar başlangıç çatlaklarının ilk ilerlemesinden sonra problem basit mod-I problemine dönüşse de, hasar modellerine ait K_{es} denklemlerinin farklılığından kaynaklı olarak ömür

tahminleri de değişkenlik göstermektedir. Bu yüzden hasar modelleri tarafından önerilen K_{es} denklemleri malzemelerin ömürlerinin tahminin de büyük önem arz etmektedir. Özellikle mod-II'nin çok daha baskın olduğu daha karmaşık modlu yüklemelerde, problemin basit mod-I problemine dönüşmesi çatlakların daha sonraki ilerleme adımlarında gerçekleşeceği için bu ilerleme adımlarında oluşan K_{es} farklılıkları hasar modellerine göre yapılan ömür tahminlerinde daha çok farklılıkların oluşmasına neden olacaktır. Çatlak ilerleme profili ve ömür tahmini için doğru hasar modelinin seçimi için farklı malzeme, yükleme ve sınır şartları içeren daha fazla doğrulama çalışmalarının yapılmasına literatürde ihtiyaç vardır.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Önerilen çalışmada, karışık modlu yüklere maruz çatlaklı yapıların kırılma ve çatlak ilerleme davranışının tahminine yönelik olarak yakın zaman önce geliştirilmiş olan Demir ve Ayhan hasar modelinin çatlak ilerleme profili tahmini ve ömür tahminine yönelik uygulanabilirliği literatürdeki mevcut hasar modelleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Chen ve ark. (2018) tarafından karbon fiber takviyesiz ve farklı ön gerilme oranlarında karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiş, açılı çatlak içeren çelik plaka üzerinde gerçekleştirilen nümerik çalışmadaki datalar referans alınarak farklı hasar modellerine göre çatlak ilerleme profili tahminleri ve çatlak ilerleme ömür tahminleri yapılmıştır. Çatlak ilerleme profil tahminlerinde, analiz edilen tüm durumlar için, çok az farklılıkların dışında hasar modellerinin tahmin ettiği yorulma çatlak ilerleme profillerinin benzer bir eğilim gösterdiği görülmüştür. Çatlak ilerleme ömür tahminlerinde ise, Demir ve Ayhan modeline göre tahmin edilen ömür değerlerinin diğer hasar modellerine kıyasla yaklaşık %5 ila %12 daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise, başlangıç çatlakları için Demir ve Ayhan modeline göre elde edilen K_{es} değerlerinin diğer hasar modellerine göre daha düşük olmasıdır. Verilerin alındığı referans çalışmada deneysel bir veri olmadığı ve sadece nümerik analiz gerçekleştirildiği için hangi hasar modelinin ömrü daha doğru tahmin ettiği ile ilgili bir yorum yapılamamıştır. Ancak bu çalışma için, hasar modellerinin yaklaşık %5 ile %12 farkla birbirleri ile benzer ömür tahminlerinde bulunduğu söylenebilir. Ayrıca önerilen çalışma göstermiştir ki, sadece başlangıç çatlakları için elde edilen minimal düzeydeki K_{es} farklılıkları, çatlak ilerleme ömür tahminlerini etkileyerek daha yüksek farklılıkların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Özellikle daha karmaşık modlu yüklemelerde diğer ilerleme adımlarında da oluşabilecek K_{es} farklılıkları, hasar modellerine göre yapılan ömür tahminlerinde daha çok farklılıkların oluşmasına neden olacaktır. Bu yüzden ömür tahminlerinde kullanılan K_{es} denklemi seçimi sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir.

Sonuç olarak, farklı geometri ve boyutlara sahip alüminyum malzemeden imal edilmiş test numuneleri ile gerçekleştirilen karışık mod-I/II kırılma tokluğu test sonuçları kullanılarak geliştirilen Demir ve Ayhan hasar modelinin, farklı geometri ve sınır şartları içeren karışık mod-I/II yorulma yüküne maruz çelik malzemelerin yorulma çatlak ilerleme davranışının analiz edilmesi için kullanılabilir ve uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

- Akbardoost, J., Rastin, A. 2015, "Comprehensive data for calculating the higher order terms of crack tip stress field in disk-type specimens under mixed mode loading", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 76, 75-90.
- Aliha, M. R. M., Ayatollahi, M. R., Kharazi, B. 2009, "Numerical and experimental investigations of mixed mode fracture in granite using four-point-bend specimen", In *Damage and fracture mechanics* (pp. 275-283). Springer, Dordrecht.
- Aliha, M. R. M., Ayatollahi, M. R. 2012, "Analysis of fracture initiation angle in some cracked ceramics using the generalized maximum tangential stress criterion", *International Journal of Solids and Structures*, 49(13), 1877-1883.
- Aliha, M. R. M., Ayatollahi, M. R., Akbardoost, J. 2012, "Typical upper bound-lower bound mixed mode fracture resistance envelopes for rock material", *Rock mechanics and rock engineering*, 45(1), 65-74.

- Aliha, M. R. M., Hosseinpour, G. R., Ayatollahi, M. R. 2013, "Application of cracked triangular specimen subjected to three-point bending for investigating fracture behavior of rock materials", *Rock mechanics and rock engineering*, 46(5), 1023-1034.
- Aliha, M. M., Behbahani, H., Fazaeli, H., Rezaifar, M. H. 2014, "Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 54, 623-635.
- Al-Shayea, N. A. 2005, "Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I-II fracture", *Engineering Geology*, 81(1), 84-97.
- Arcan, M., Hashin, Z. A., Voloshin, A. 1978, "A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials", *Experimental mechanics*, 18(4), 141-146.
- Ayatollahi, M. R., Aliha, M. R. M., Hassani, M. M. 2006, "Mixed mode brittle fracture in PMMA—an experimental study using SCB specimens", *Materials Science and Engineering: A*, 417(1-2), 348-356.
- Ayatollahi, M. R., Aliha, M. R. M. 2008, "Mixed mode fracture analysis of polycrystalline graphite—a modified MTS criterion", *Carbon*, 46(10), 1302-1308.
- Ayatollahi, M. R., Aliha, M. R. M. 2009, "Analysis of a new specimen for mixed mode fracture tests on brittle materials", *Engineering Fracture Mechanics*, 76(11), 1563-1573.
- Ayatollahi, M. R., Moghaddam, M. R., Berto, F. 2015, "A generalized strain energy density criterion for mixed mode fracture analysis in brittle and quasi-brittle materials", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 79, 70-76.
- Ayhan, A. O., Demir, O. 2016, "Investigation of mixed mode-I/II fracture problems-Part 2: evaluation and development of mixed mode-I/II fracture criteria", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 10(35), 340-349.
- Chang, K. J. 1981, "On the maximum strain criterion—a new approach to the angled crack problem", *Engineering Fracture Mechanics*, 14(1), 107-124.
- Chen, T., Hu, L., Zhang, N., Yu, Q. Q. 2018, "Boundary element analysis of fatigue behavior for CFRP-strengthened steel plates with center inclined cracks", *Thin-Walled Structures*, 125, 164-171.
- Demir, O., Siriç, S., Ayhan, A. O., Lekesiz, H. 2016, "Investigation of mixed mode-I/II fracture problems-Part 1: computational and experimental analyses", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 10(35), 330-339.
- Demir, O., Ayhan, A. O., İriç, S. 2017, "A new specimen for mixed mode-I/II fracture tests: Modeling, experiments and criteria development", *Engineering Fracture Mechanics*, 178, 457-476.
- Demir, O., Ayhan, A. O., İriç, S., Lekesiz, H. 2018, "Evaluation of mixed mode-I/II criteria for fatigue crack propagation using experiments and modeling", *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(7), 1525-1534.
- Erdoğan, F., Sih, G. C. 1963, "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear", *Journal of basic engineering*, 85(4), 519-525.
- Gouda, P. S., Kodancha, K. G., Siddaramaiah, D. J. 2013, "Experimental and numerical investigations on fracture behavior of high silica glass/satin textile fiber reinforced hybrid polymer composites", *Adv. Mater. Lett.*, 4(11), 827-835.
- Hernandez-Gomez, L. H., Saucedo-Meza, I., Urriolagoitia-Calderón, G., Balankin, A. S., Susarrey, O. 2004, "Evaluation of crack initiation angle under mixed mode loading at diverse strain rates", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 42(1), 53-61.
- Hou, C., Jin, X., Fan, X., Xu, R., Wang, Z. 2019, "A generalized maximum energy release rate criterion for mixed mode fracture analysis of brittle and quasi-brittle materials", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 100, 78-85.
- Hussain, M. A., Pu, S. L., Underwood, J. 1974, "Strain energy release rate for a crack under combined mode I and mode II", In *Fracture analysis: Proceedings of the 1973 national symposium on fracture mechanics, part II*. ASTM International.
- Jiang, H., Gao, X., & Srivatsan, T. S. (2009). Predicting the influence of overload and loading mode on fatigue crack growth: a numerical approach using irreversible cohesive elements. *Finite Elements in Analysis and Design*, 45(10), 675-685.

- Katanchi, B., Choupani, N., Khalil-Allafi, J., Tavangar, R., Baghani, M. 2018, "Mixed-mode fracture of a superelastic NiTi alloy: Experimental and numerical investigations", *Engineering Fracture Mechanics*, 190, 273-287.
- Kim, C. S., Chung, K. W. 2012, "A study on fatigue crack propagation of rail steel under constant and mixed mode variable amplitude loadings", *International Journal of Railway*, 5(2), 71-76.
- Koo, J. M., Choy, Y. S. 1991, "A new mixed mode fracture criterion: maximum tangential strain energy density criterion", *Engineering fracture mechanics*, 39(3), 443-449.
- Marsavina, L., Sadowski, T., Knec, M. 2013, "Crack propagation paths in four point bend Aluminium-PMMA specimens", *Engineering Fracture Mechanics*, 108, 139-151.
- Mirsayar, M. M. 2015, "Mixed mode fracture analysis using extended maximum tangential strain criterion", *Materials & Design*, 86, 941-947.
- Mirsayar, M. M., Joneidi, V. A., Petrescu, R. V. V., Petrescu, F. I. T., Berto, F. 2017, "Extended MTSN criterion for fracture analysis of soda lime glass", *Engineering Fracture Mechanics*, 178, 50-59.
- Mousavi, S. S., Aliha, M. R. M., Imani, D. M. 2020, "On the use of edge cracked short bend beam specimen for PMMA fracture toughness testing under mixed-mode I/II", *Polymer Testing*, 81, 106199.
- Nuismer, R. J. 1975, "An energy release rate criterion for mixed mode fracture", *International journal of fracture*, 11(2), 245-250.
- Paris, P. C., Erdogan F. 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", *J. Basic Eng.* Dec 1963, 85(4): 528-533.
- Paris, P. C., Gomez, M. P., Anderson, W. E. 1961, "A rational analytic theory of fatigue", *The trend in engineering*, 13, 9.
- Patle, V., Bhadauria, S. S., Jain, A. 2012, "Analysis of Crack Tip Opening Displacement under Mixed Mode Fracture Using FEM Technique", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 3, 27-34.
- Pook, L. P. 1989, "The significance of mode I branch cracks for mixed mode fatigue crack growth threshold behaviour", In *ICBMFF2*.
- Richard, H. A., Benitz, K. 1983, "A loading device for the creation of mixed mode in fracture mechanics", *International Journal of Fracture*, 22(2), R55-R58.
- Richard, H. A. 1985, "Fracture mechanical predictions for cracks with superimposed normal and shear loading", *Dusseldorf: VDI-Verlag*.
- Saghafi, H., Ayatollahi, M. R., Sistaninia, M. 2010, "A modified MTS criterion (MMTS) for mixed-mode fracture toughness assessment of brittle materials", *Materials Science and Engineering: A*, 527(21-22), 5624-5630.
- Sajith, S., Shukla, S. S., Murthy, K. S. R. K., Robi, P. S. 2019a, "Mixed mode fatigue crack growth studies in AISI 316 stainless steel", *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 103898.
- Sajith, S., Murthy, K. S. R. K., Robi, P. S. 2019b, "Mixed mode fatigue crack growth studies of crack emanating from circular hole", In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2200, No. 1, p. 020041). AIP Publishing.
- Sajith, S., Murthy, K. S. R. K., Robi, P. S. 2020, "Experimental and numerical investigation of mixed mode fatigue crack growth models in aluminum 6061-T6", *International Journal of Fatigue*, 130, 105285.
- Sander, M., Richard, H. A. 2005, "Finite element analysis of fatigue crack growth with interspersed mode I and mixed mode overloads", *International Journal of Fatigue*, 27(8), 905-913.
- Sander, M., & Richard, H. A. (2006). Experimental and numerical investigations on the influence of the loading direction on the fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue*, 28(5-6), 583-591.
- Seed, G. M., & Nowell, D. (1994). Use of the distributed dislocations method to determine the T-stress. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 17(5), 605-618.
- Seitl, S., Miarka, P., Bílek, V. 2018, "The mixed-mode fracture resistance of C 50/60 and its suitability for use in precast elements as determined by the Brazilian disc test and three-point bending specimens", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 97, 108-119.

- Sih, G. C., Macdonald, B. 1974, "Fracture mechanics applied to engineering problems-strain energy density fracture criterion", *Engineering Fracture Mechanics*, 6(2), 361-386.
- Tanaka, K. 1974, "Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis", *Engineering Fracture Mechanics*, 6(3), 493-507.
- Zabihi, M., Ayatollahi, M. R., Rezaie, H. R. 2018, "Mixed-mode fracture of synthesized nanocrystalline forsterite for biomedical applications", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 94, 173-180.
- Zhao, J., Guo, W. 2012, "Three-parameter K-T-T_z characterization of the crack-tip fields in compact-tension-shear specimens", *Engineering Fracture Mechanics*, 92, 72-88.



A PARAMETRIC STUDY OF THE OPTIMUM SHEAR WALL AREA FOR MID-TO HIGH-RISE RC BUILDINGS

¹Gökhan TUNÇ, ²Mustafa Khalid AL-AGEEDI

¹gokhan.tunc@atilim.edu.tr , ²mustafa.alageedi@gmail.com 

^{1,2}Atilim University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Ankara, TURKEY

(Geliş/Received: 30.12.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 30.03.2020)

ABSTRACT: In this article, a structural analysis was conducted on a total of 40 building models with varying building height and wall dimensions in order to determine the optimum ratio of shear wall area to floor area in a reinforced concrete building. For this purpose, 20, 30 and 40 story buildings were selected to investigate the effect of varying building heights on their structural behaviors. A parametric study on shear wall areas was conducted base on varying shear wall area to floor area ratios. Building models, therefore, included no wall and walls with 0.5%, 1%, 1.5% and 2.0% area ratios applied in combined x and y directions. Each of these models was subjected to response spectrum analysis using the forces generated according to the 2018 dated Turkish Earthquake Code (TEC 18) and 2016 dated American Building Code (ASCE 7-16). The buildings were assumed to be all office buildings located in a severe seismic zone region, Avcılar, Istanbul. The 30 and 40 story buildings due to their total heights had to be considered tall in line with the requirements in TEC 18. The additional requirements were also included in the analysis to understand the impact of tall buildings on the optimum shear wall determination. Therefore, the following parameters were investigated for the optimum shear wall area to floor area ratio: (a) building periods, (b) base shear and shear forces resisted by all shear walls, and (c) maximum lateral displacements and story drifts. The impact of effective wall layout configuration on structural behavior was also investigated by studying the 2.0% wall area ratio. The results indicated that the most effective ratios of shear wall area to floor area for the 20 and 30 story buildings were equal to 1.5% and 2.0%, respectively. However, the need for the wall area of the 40 story building was slightly more than 2.0%. However, as the wall layout was revised for the building with the 2.0% wall area ratio, the requirement for the wall area was nearly met indicating that the 2.0% wall area ratio could also be recommended for the 40 story building.

Key Words: Shear Wall Ratio, Reinforced Concrete Buildings, Earthquake Engineering, Seismic Codes

Orta Yüksek ve Yüksek Betonarme Binalarda Optimum Perde Duvar Alanının Belirlenmesi Üzerine Parametrik Çalışma

ÖZ: Bu makalede, betonarme binalarda en uygun perde duvar alanının kat planı alanına olan oranını belirlemek için farklı bina ve duvar ölçülerine sahip toplam 40 bina üzerinde yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı bina yüksekliklerinin yapısal davranışlarına etkisini anlamak için sırası ile 20, 30 ve 40 katlı üç tür bina seçilmiştir. Farklı perde duvar alanlarının kat planı alanına olan oranları değiştirilerek perde duvarlar üzerinde parametrik bir çalışma yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, bina modelleri perde duvar içeren ve içermeyen binalar olmak üzere hazırlanmıştır. Perde duvar içeren modellerde x ve y yönlerinin toplamında sırası ile % 0.5, % 1, % 1.5 ve % 2.0 oranlarına sahip perde duvar kullanımı sağlanmıştır. Bu modellerin her biri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 18) ve Amerikan Bina Yönetmeliği 2016 (ASCE 7-16) yönetmeliklerine göre belirlenen deprem kuvvetleri kullanılarak mod birleştirme yöntemine uygun olarak deprem analizlerine tabi tutulmuştur. Toplam yapı yüksekliği nedeniyle 30 ve 40 katlı olan binalar, TBDY 18'deki koşullara göre yüksek bina olarak

tasarlanmış ve analizleri yapılmıştır. Böylelikle, yüksek binaların optimum perde duvar alanı oranına olan etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu kapsam dahilinde optimum perde duvar alanının toplam kat alanına oranı belirlenirken şu parametreler detaylı olarak incelenmiştir: (a) bina periyotları, (b) taban kesme kuvveti ve perde duvarların karşı koyduğu kesme kuvveti miktarı ve (c) maksimum yatay deplasmanlar ile göreceli kat öteleme miktarları. Ayrıca, etkili perde duvar kullanımının yapısal analizler üzerindeki etkisini araştırmak amacı ile % 2.0 perde oranına sahip bina örnek olarak ele alınmıştır. Sonuçlara göre en uygun perde duvar alanı, 20 ve 30 katlı binalarda sırası ile yaklaşık olarak % 1.5 ve % 2.0 olarak değerlendirilmiştir. Fakat 40 katlı binada ihtiyaç duyulan perde duvar alanı % 2.0'den biraz fazla olarak ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, % 2.0 oranına sahip farklı bir perde duvar yerleşimi ile hedeflenen yük taşıma oranına ulaşılabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Perde Duvar Alan Oranı, Betonarme Binalar, Deprem Mühendisliği, Deprem Yönetmelikleri

1. INTRODUCTION

Shear walls are structural elements that resist gravity and lateral loads acting on buildings. Their main goal is to provide lateral stiffness to buildings. Therefore, they resist most of the seismic forces resulting from an earthquake. Due to their benefits to structural design, shear walls have been increasingly used in buildings. However, their locations are important and need careful evaluation. In a floor layout, if possible, they should be located as close as possible to the center of mass in order to prevent any additional moments that might result otherwise. Therefore, it is important to use the adequate number of shear walls with the adequate cross-sectional area. This article, which is mainly extracted from an MS thesis conducted at Atilim University, Ankara, will investigate the optimum shear wall area for mid to high rise RC buildings (Al-Ageedi, 2019).

The aim of this article is (a) to investigate the effect of varying shear wall area to floor area ratio in a reinforced concrete building, and (b) to determine the optimum ratio of shear wall area. This study was conducted on 40 different reinforced concrete (RC) building models. A commercial software package, ETABS, was used to analyze the buildings based on the response spectrum method. In the previous building codes, shear walls were used in large proportions, since the codes did not have any requirements regarding the minimum area of shear wall usage except for the tunnel formwork type buildings that have been commonly used in Turkey. There have been numerous researches conducted in this area to find the optimum wall area so that earthquake damages would be at a tolerable level and non-life threatening.

2. LITERATURE REVIEW

In the past, many types of research have carried out studies based on the shear wall ratio and its impact on buildings earthquake performance. In 1993, the optimum height of a shear wall that would perform effectively during an earthquake was studied by ignoring the shear walls for the upper floors that were used to reduce the deflection at the top. Based on the analyses results, it was concluded that if the wall was shortened at the level of contra-flexure, the change in the building's top deflection was negligible (Nollet and Smith, 1993). In 1995, the performance of different types of shear walls were studied based on the following earthquakes from 1960 to 1988; Chile (May 1960), Macedonia (July 1963), Venezuela (July 1967), California (February 1971), Nicaragua (December 1972), Romania (March 1977), Mexico City (September 1985), Chile (1985) and Armenia (December 1988). The objective of this study was to examine the structural behaviors of shear walls with respect to the descriptions stated in the earthquake codes, which were in action at the time. It was concluded that using the appropriate wall to floor area ratios would improve the structural performance of shear walls (Fintel, 1995). In 2008, the design of a 56 story tower with shear walls containing irregular openings that resisted both gravity and lateral loads was conducted. The building had three primary walls and multiple secondary walls that were perpendicular to the primary ones. The primary walls had overlapped openings while the

secondary ones were linked to the primary ones through coupling beams. Some of the secondary walls contained continuous columns while the others did not. In this study, the trial and error approach was used to design the tower since there was no straight forward design procedure. It was concluded that the use of shear walls would increase the ductility level and the overall stability of a building (Esmaili, *et al.*, 2008). In 2009, the impact of shear wall ratio on a building's seismic response was examined and the results were compared to those from the approximate methods. For this purpose, a total of 45 building models with 2, 5 and 8 floors were constructed. The building models were analyzed with various ratios of shear walls, where the ratio of shear wall area to floor area varied from 0.52% to 3.60%. The elastic and inelastic change in story drifts based on these varying shear wall ratios were also studied. According to this study, it was found out that the change in the story drift was almost negligible when the shear wall ratio was larger than two. Therefore, it was concluded that the total height of the building had a significant impact on the roof drift while the building type had an impact on the story drift (Soydas, 2009).

The optimum shear wall area was continued to be studied further in the past 10 years as well. In 2011, the effect of shear walls with various heights on a building's seismic response during an earthquake was investigated. For this purpose, three types of buildings with varying heights: low, medium, and high-rise were analyzed. The study concluded that the story shear was higher in a building with shear wall and exterior frames. In addition to that, the story shear was greater for the mid-rise height building while it reduced in a high-rise building. It was concluded that the shear walls up to 65% of the building height were adequate to resist the lateral forces effectively (Malik *et al.*, 2011). In 2013, the performance of the impact ratio between the shear wall area to the floor area was examined. For this purpose, 29 buildings with different number of floors, heights, and material properties were used. The shear wall ratio in this study varied from 0% to 2.5%. It was concluded that as the ratio of shear wall increased, plastic deformations and roof drifts decreased. The building with a 1% wall area ratio resulted in the lower drift when compared to the ones with 0% or 0.5%. After the 1.5% wall ratio, the effect of the ratio diminished since any ratio beyond 1.5% did not have any major impact on the drifts under lateral loads (Gunel, 2013). Again in 2013, the impact of varying shear wall ratios on the seismic response of buildings was studied using a nonlinear time history method. For this purpose, a total of 24 mid-rise reinforced concrete building models with two different number of floors, 5 and 8 floors, having shear wall ratios varying from 0.51% to 2.71% in both directions were constructed. The study concluded that a minimum shear wall ratio of 1.0% was recommended for mid-rise RC buildings to control the drift, and that the seismic response of RC buildings with more than 1.5% of wall ratio would not significantly improve (Burak and Comlekoglu, 2013).

Three more studies that were completed in 2016 were used as references to this article. In 2016, the most effective shear wall location was studied based on their linear structural behavior in a 10 story reinforced concrete building. In this analysis, two different shear wall locations were used; one located in the corner and one in the center with regular and irregular geometry. A frame structure with no shear walls was used as a reference building. Based on the analyses results it was concluded that the buildings with corner shear walls reduced the steel reinforcement and generated less shear forces compared to those without shear walls (Gupta *et al.*, 2016). In 2016, 7 story buildings were studied with three different types of framing systems; wall equivalent dual system, coupled shear wall system and a system with no shear wall. Based on the analyses results it was found out that the coupled shear wall system compared to the wall equivalent dual system generated more story displacements, story shear and moment forces due to the rigidity of the shear walls (Foroughi and Yüksel, 2016). In the last article of 2016, an analytical study was performed on a total of 24 midrise RC buildings with five and eight stories to evaluate the effect of shear wall area to floor area ratio. For this purpose, the shear wall ratios in these buildings varied from 0.51% and 2.17% in both directions. The structural behavior of these building models (roof, interstory drifts, and base shear forces) were examined under earthquake loads by conducting nonlinear time history analyses. According to the analytical results, a minimum of 1.0% shear wall ratio was recommended for midrise buildings to control their drifts. Furthermore, it was also

concluded that if the shear wall ratio increased to a value more than 1.5%, the seismic performance of the buildings did not show any significant improvements (Mohammad and Bharathi, 2016).

In 2017, a tubular lateral resisting system containing shear walls was examined for multistory RC buildings to determine the influence of shear wall area to floor area ratio on their seismic behaviors. A total of three 30-story buildings with different wall configurations (8%, 41%, and 65% shear wall areas) were analyzed under earthquake loads generated according to the Indian Seismic Code of IS 1893:2002 by conducting Static and Response Spectrum Analyses. Based on their analyses, they examined the base shear forces, total seismic weights, and story drifts. The study concluded that as the shear wall area to floor area increased, base shear forces increased while the displacements and story drifts decreased (Sreevalli and Priya, 2017). Finally, in 2018, the effect of shear wall area to floor area ratio of a 15 story RC building was investigated by conducting nonlinear time history analysis. The building was assumed to have the following wall ratios: 0.0% (no shear wall), 4.8%, 9.6%, 14.4%, and 19.2%. Also in this study, three different wall thicknesses were examined: 180 mm, 230 mm, and 280 mm. According to the results, the building model with the 9.6% shear wall ratio exhibited lower story drifts and displacements than the models with the 0.0% and 4.8% shear wall ratios. The drifts and displacements were minimized when the shear wall to floor area ratio increased to 14.4%. It was concluded that the wall ratio beyond 14.4% had shown a slight improvement on the seismic performance of the building (Kumar and Kumar, 2018).

3. BUILDING MODELS

A total of 40 building models with 20, 30 and 40 stories were constructed in a commercially available software package, ETABS (ETABS, 2018). Out of 40 models, eight of them did not have any shear walls while the remaining 32 models had shear walls with varying locations and quantities. All buildings were assumed to be office type buildings located in Avcilar, Istanbul. The purpose of this study was to determine the optimum ratio of shear wall area to floor area. This ratio was calculated by dividing the wall areas located at each floor to the associated floor areas. For this purpose, a total of five shear wall area ratios were considered: (a) no wall (the ratio was zero, 0%), (b) 0.5%, (c) 1%, (d) 1.5%, and (e) 2.0%. In this study, 1%, 1.5%, and 2.0% ratios were not exactly achieved due to the dimensions of the proposed layouts. The exact values of these three ratios were calculated as 1.04%, 1.44%, and 1.9%. The total heights of the 20, 30 and 40 story buildings were 64 meters, 96 meters, and 128 meters, respectively, each with the 3.2-meter floor-to-floor height dimension. The floor plans of all buildings were assumed to be square with a 40-meter dimension in both x and y directions. The earthquake forces were calculated according to Turkish Earthquake Code (TEC 18, 2018) and its counterpart in the US, the American Building Code, ASCE 7-16 (ASCE 7-16, 2016). The response spectrum method was used for all the buildings.

4. FLOOR TYPES

Two types of building layouts were selected. Type I was used to define buildings without shear wall and Type II was used to define buildings with shear walls. In determining the wall, column, beam and slab sizes, a conservative approach was used to prevent member failures during the response spectrum analysis stage (Figure 1).

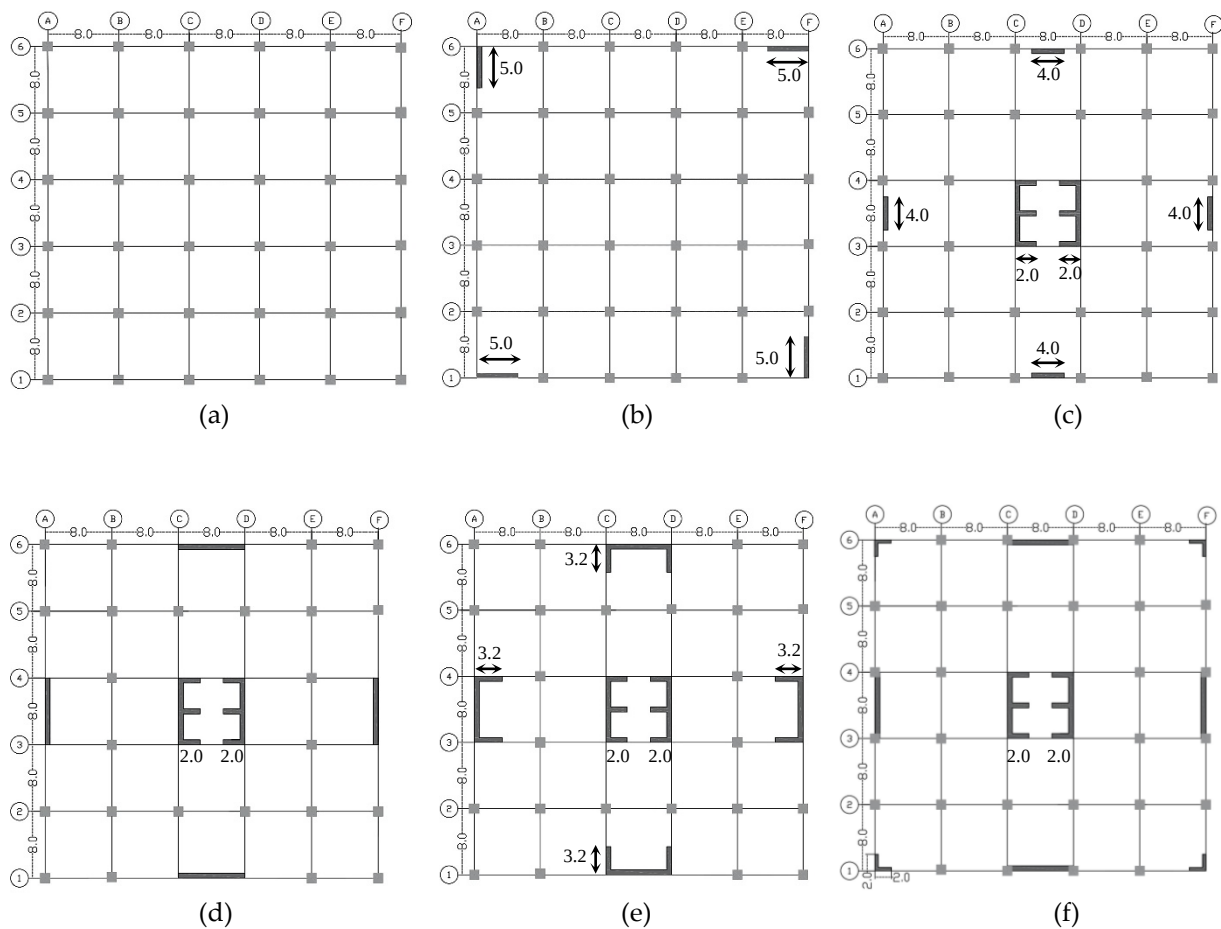


Figure 1. Floor layouts with shear wall areas of (a) 0%, (b) 0.5%, (c) 1.0%, (d) 1.5%, (e) 2.0% (Option 1), (f) 2.0% (Option 2) – all dimensions are in meters

Type I – 20, 30 and 40 story buildings

This type of building model contains only columns, beams and slab (no shear walls). As shown in Figure 1a, each span in the x and y direction was 8 meters long, and all the columns were connected through beams. The column sizes were changed every five floors while the slab and beam dimensions were kept unchanged. Table 1 lists the dimensions of all structural elements.

Type II – 20, 30 and 40 story buildings

Building in this type contains shear walls, columns, beams and slabs. Similar to the buildings in Type I, 20, 30 and 40 story buildings were modeled with the same floor to floor height of 3.2 meters. The total height of the 20, 30 and 40 story buildings were 64, 96 and 128 meters, respectively. As described before, four types of shear wall area ratios were used, 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0% (see Figures 1b through f). All shear walls were assumed to have a constant thickness of 0.4 meter. The shear walls in the 0.5% model were located at the four corners of the building to effectively resist against the torsional forces. The length of each wall was constant at 5 meters. The shear walls in the 1.0% ratio (the exact number is 1.04%) were located both in the center and in the mid-spans around the perimeter of the building with varying lengths. The shear walls in the 1.5% model (the exact ratio is 1.44%) were again assumed to be located in the center and in the mid-spans around the perimeter of the buildings with longer lengths. Two options were decided to be studied for the shear walls in the 2.0% model (the exact figure is 1.9%). The walls of the 1.5% model were kept the same for option 1 except that the ones in the mid-spans

around the perimeter were converted to U shaped walls. In option 2, the walls were the same as those in the 1.5% except that the L shaped walls were used at the four corners instead of the U shaped walls.

Table 1. Dimensions of structural elements for all building types

Floor number	Column Dimensions (cm)			Slab Thickness (cm)	Shear Wall Thickness (cm)	Beams (cm)
	20 Floors	30 Floors	40 Floors			
1-5	95 x 95	115 x 115	135 x 135	22	40	40 x 75
6-10	80 x 80	105 x 105	125 x 125	22	40	40 x 75
11-15	70 x 70	95 x 95	115 x 115	22	40	40 x 75
16-20	50 x 50	80 x 80	105 x 105	22	40	40 x 75
21-25	—	70 x 70	95 x 95	22	40	40 x 75
26-30	—	50 x 50	80 x 80	22	40	40 x 75
31-35	—	—	70 x 70	22	40	40 x 75
36-40	—	—	50 x 50	22	40	40 x 75

4.1. Material Properties

Concrete class C40 was used for all structural members with a poisson's ratio of 0.2. As specified in the Turkish Standards, TS 500, the modulus of elasticity for C40 concrete is assumed to be 34,000 MPa (TS 500, 2000). In the self-weight calculation of structural members, the unit weight of reinforced concrete with rebars was selected to be 2,500 kg/m³.

4.2. Earthquake Loads

TEC 18 and ASCE 7-16 were used to calculate the gravity and lateral loads while the tall building guideline, Tall Buildings Initiative Guidelines for Performance Based Seismic Design of Tall Buildings, TBI 2017, was used for the tall buildings (TBI, 2017). TEC 18 classifies the buildings as tall and others. Depending on the seismic design category, a building is called tall if its total height exceeds 70, 91 or 105 meters. The buildings with 30 and 40 stories fall into tall building category, and therefore their analyses were conducted according to the rules of tall buildings. In order to compare the results of the tall buildings to those that were analyzed according to ASCE 7-16, the existing tall building guideline, TBI 2017 was used.

4.2.1. TEC 18

In this study, the local site class was assumed to be slightly weathered rocks. Therefore, a site class ZB with a shear velocity, V_s , equal to 760 to 1500 m/s was selected for all buildings. Thus, a possible need for piles specifically for the 30 and 40 story buildings was eliminated. The importance factor for all buildings was equal to one since they were office types of buildings. The buildings' occupancy class (BKS) was equal to three. A live load participation factor of 0.3 was used in the total seismic weight calculation.

In TEC 18, there are 3 design stages. The first one accounts for an earthquake with a return period of 475 years (DD2 type earthquake), the second one for an earthquake with a return period of 43 years (DD3), and the last one for tall buildings only (DD4). The short and 1 second periods for mapped spectral acceleration coefficients, S_s and S_1 , were extracted from the following website: <http://tdth.afad.gov.tr>. The S_s and S_1 values for Avclar, Istanbul are 1.21 and 0.33, respectively.

As stated in TEC 18, in design stage I (DD2 design stage), the concrete was assumed to be cracked. The cracked properties of the concrete for structural members are listed in Table 2. In this design stage, the values of the ductility ratio, R , and the overstrength coefficient, D , which both correspond to a high ductile lateral resisting system were obtained from TEC 18 as 7 and 2.5, respectively. For the buildings with no walls, the corresponding high ductile system values of $R=8$ and $D=3$ were used. The DD2 design stage was used for all buildings, i.e., the 20, 30 and 40 story buildings. The damping ratios of all buildings in this stage were 5% (TEC 18, 2018).

Table 2. Effective stiffness values in TEC 18 and TBI 2017 [14]

	TEC 18				TBI 2017 ⁽¹⁾	
Structural Members	DD2		DD4		DD1 (service)	
Shear wall – slab (in plan)	Axial	Shear	Axial	Shear	Axial	Shear
Shear wall	0.50	0.50	0.75	1.00	1.00	0.40
Basement walls	0.80	0.50	1.00	1.00	1.00	0.40
Slabs	0.25	0.25	0.50	0.80	0.50	0.40
Shear wall- slab (out of plan)	Flexural	Shear	Flexural	Shear	Flexural	Shear
Shear wall	0.25	1.00	1.00	1.00	0.25	--
Basement walls	0.50	1.00	1.00	1.00	0.25	--
Slabs	0.25	1.00	0.50	1.00	0.50	--
Structural members	Flexural	Shear	Flexural	Shear	Flexural	Shear
Coupling beams	0.15	1.00	0.30	1.00	see note ⁽²⁾	0.40
Beams	0.35	1.00	0.70	1.00	0.50	0.40
Columns	0.70	1.00	0.90	1.00	0.70	0.40

⁽¹⁾ cracked properties of concrete were used only for the 30 and 40 story buildings. For the 20 story building, concrete was assumed uncracked.

⁽²⁾ $0.07 (l/h) E_c I_g \leq 0.3 E_c I_g$

In design stage II, an earthquake with a return period of 43 years was applied to the buildings (DD4 type earthquake). Based on the earthquake map, the S_s and S_1 for DD4 were obtained as 0.278 and 0.072, respectively. In this design stage, as described in TEC 18, the values of both the R and the D were equal to one. Similar to the first design stage, the concrete, in this stage, was again assumed to be cracked but with different stiffness values (see Table 2). The DD4 stage was used only for tall buildings, i.e., the 30 and 40 story buildings. The damping ratios for the 30 and 40 story buildings were 2.5%.

The design stage III is required only for tall buildings. In this study, the response spectrum method was decided to be used for all buildings in order to compare the results of TEC 18 to ASCE 7-16. Therefore, the design stage III was not included in this study.

4.2.2. ASCE 7-16

The short and 1 second periods of mapped spectral acceleration coefficients, S_s and S_1 , are extracted from the Turkish website based on an earthquake with a return period of 2475 years (DD1 type earthquake). The corresponding S_s and S_1 values for Avclar, Istanbul are 2.118 and 0.589, respectively. ASCE 7-16 divides the risk category of a building into four groups. According to ASCE 7-16, the risk category for an office building falls into the second group (Group II). After determining the risk category, the seismic design category was calculated “D” based on the short and 1 second period response acceleration parameters. The site class B was selected for all buildings, which would exhibit similar soil properties to those in TEC 18. The values of the Response Modification Coefficient (or ductility, R), Overstrength Factor (Ω_0 , same as D in TEC 18) and the Deflection Amplification Factor (C_d) were determined as 7, 2.5 and 5.5, respectively. Similar to the definition in TEC 18, the values of R , D ,

and C_d for the buildings with no shear walls were different than the preceding ones. Therefore, for these buildings, 8, 3 and 5.5 were selected, respectively. The live load participation factor of zero was used in the seismic weight calculation according to the ASCE 7-16 since the building loads did not meet the requirements stated in the code. The concrete for the 20 story building was assumed uncracked while the concrete for the 30 and 40 story ones was assumed cracked (see Table 2, ASCE 7-16, 2016 and TBI, 2017). The damping ratios of the 20 story building were 5% while the ratios of the 30 and 40 story buildings were 2% (ASCE 7-16, 2016 and TBI, 2017).

4.2.3. TBI 2017

The American tall building seismic design guideline, TBI 2017, was used for only tall buildings, 30 and 40 story ones, to determine the effective stiffness values of the reinforced concrete members (see Table 2).

4.3. Finite Element Modeling in ETABS

A total of 40 building models were analyzed using the response spectrum method according to both Turkish and US building codes. The concrete was assumed cracked for the earthquakes in DD2 and DD4 design categories as described in TEC 18. For the buildings analyzed according to ASCE 7-16, the concrete in the 20 story building was assumed uncracked while the concrete for the tall buildings with 30 and 40 story ones was assumed cracked.

In addition to self-weight, 0.75 kN/m^2 of snow load, 3.5 kN/m^2 of uniformly distributed live loads and 1.5 kN/m^2 of superimposed dead loads were used. The live and snow loads were determined according to TS 498, the Turkish standard entitled Design Loads for Structures (TS 498, 1997). A four-digit label was used for the building models analyzed according to ASCE 7-16 code. In these labels, the first digit referred to the code, ASCE 7-16, the second and third ones referred to the number of floors, and finally, the fourth and the final digits referred to the ratio of shear wall area to floor area. A similar type of label was also used for the building models analyzed according to TEC 18. In these model names, unlike the 4 digit ones that were used for ASCE code, a six-digit label was used. The first digit in the model name referred to the code, TEC 18, the second and third ones referred to the earthquake design category, the fourth and fifth ones referred to the number of floors, and finally, the last digit was used to define the percentage of shear wall area to floor area ratio. In these labels, the last two digits were composed of integer numbers from 1 to 5 to define the shear wall area ratio to the floor area ratios. Therefore, the integer numbers 1 through 5 were used for buildings with 0% (no wall), 0.5%, 1.0%, 1.5%, and 2.0% shear wall area ratios. For example, a model name TD2202 was used for a 20 story building with a shear wall to floor area ratio of 0.5%, which was subjected to an earthquake in DD2 design category according to TEC 18. Table 3 lists the model names of all 40 buildings.

Table 3. Model names and model information

Number of floors	Model Name								Wall to Floor Area Ratio (%)
	TEC 18						ASCE 7-16		
	DD2			DD4			DD1		
	Model Name	Damping Ratio (%)	Concrete Status ⁽¹⁾	Model Name	Damping Ratio (%)	Concrete Status ⁽¹⁾	Model Name	Concrete Status ⁽¹⁾	
20 story	TD2201	5	Cracked	——	——	Cracked	A201	Uncracked	No Wall
	TD2202	5	Cracked	——	——	Cracked	A202	Uncracked	0.5
	TD2203	5	Cracked	——	——	Cracked	A203	Uncracked	1.0
	TD2204	5	Cracked	——	——	Cracked	A204	Uncracked	1.5
	TD2205	5	Cracked	——	——	Cracked	A205	Uncracked	2.0
30 story	TD2301	5	Cracked	TD4301	2.5	Cracked	A301	Cracked	No Wall
	TD2302	5	Cracked	TD4302	2.5	Cracked	A302	Cracked	0.5
	TD2303	5	Cracked	TD4303	2.5	Cracked	A303	Cracked	1.0
	TD2204	5	Cracked	TD4304	2.5	Cracked	A304	Cracked	1.5
	TD2205	5	Cracked	TD4305	2.5	Cracked	A305	Cracked	2.0
40 story	TD2401	5	Cracked	TD4401	2.5	Cracked	A401	Cracked	No Wall
	TD2402	5	Cracked	TD4402	2.5	Cracked	A402	Cracked	0.5
	TD2403	5	Cracked	TD4403	2.5	Cracked	A303	Cracked	1.0
	TD2404	5	Cracked	TD4404	2.5	Cracked	A404	Cracked	1.5
	TD2405	5	Cracked	TD4405	2.5	Cracked	A405	Cracked	2.0

⁽¹⁾ cracked properties of concrete are different for the DD2 and DD4 design categories, see Table 2.

5. RESULTS

A total of forty building models were analyzed. The results are examined and discussed in the following order: (a) fundamental periods, (b) base shear and total wall shear forces, and (c) maximum lateral displacements and story drifts.

(a) fundamental periods

Table 4 lists the first three periods of all building models resulted in the x , y and rotational directions, z . The first periods were always in the “ x ” direction. However, for the second period, the mode shapes were almost always in the “ y ” direction except for the model TD2204, where the mode shape was in the “ z ” direction. For the third periods, the mode shapes were almost always in the “ z ” direction except for the model TD2204.

When the periods of 20 story building from TEC 18 were compared to those from ASCE 7-16, the periods from TEC 18 were as high as 20% to 40% more due to the heavier total seismic weight in TEC 18 and the varying cracked properties of structural members. As expected, for both the 30 and 40 story buildings, the building periods from DD2 were slightly larger than those from DD4 due to larger damping ratios and varying cracked properties (see Table 2). In the 30 story building, the periods from DD2 to DD4 were 10% more on the average while this increase was around 40% for the 40 story one since the tall building behavior became more prominent. The fundamental periods of DD2 from TEC 18 were compared to those from ASCE 7-16. Since the total seismic weights of buildings in TEC 18 were more than those in ASCE 7-16, the building periods in TEC 18 were always larger than their counterparts in ASCE 7-16. The fundamental periods of TEC 18 with 2.0% wall ratio for the 20, 30 and 40 story buildings were 30%, 60% and 90% more, respectively. The fundamental periods of the 20, 30 and 40 story buildings with 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0% wall ratios, which were analyzed according to TEC 18

with a 5% damping ratio were also compared to each other. Based on this comparison, the increase in the fundamental period with respect to the one with the 0.5% wall ratio was 50% in the 30 story and 270% in the 40 story one. Similar comparisons were made for the 1.0%, 1.5% and 2.0% wall ratios. In the 1.0% one, 30% and 260%; in the 1.5% one, 60% and 260%; and finally in the 2.0% one, 75% and 145% increases were obtained. Based on the results, it is clear to say that the 40 story building exhibited a lot more pronounced period change as opposed to the 30 story one.

Table 4. Fundamental periods

Building Information	Model Names ⁽¹⁾	Building periods (sec)		
		T ₁	T ₂	T ₃
20 Story TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2201	3.554	3.530	3.518
	TD2202	3.284	3.260	2.950
	TD2203	2.783	2.530	2.389
	TD2204	2.894	2.650	2.485
	TD2205	3.223	2.919	2.317
30 Story TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2301	5.825	5.780	5.751
	TD2302	4.978	4.950	4.605
	TD2303	4.289	4.032	3.667
	TD2304	4.573	4.299	3.960
	TD2305	5.647	5.273	4.162
30 Story TEC 18 (DD4) 2.5% damping	TD4301	4.754	4.742	4.285
	TD4302	4.493	4.484	3.781
	TD4303	3.849	3.606	3.114
	TD4304	4.767	4.464	3.872
	TD4305	4.076	3.768	3.022
40 Story TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2401	9.107	8.935	7.599
	TD2402	8.873	8.504	6.875
	TD2403	7.223	6.768	5.457
	TD2404	7.546	7.011	5.870
	TD2405	8.118	7.603	5.978
40 Story TEC 18 (DD4) 2.5% damping	TD4401	6.807	6.770	5.795
	TD4402	6.397	6.191	5.072
	TD4403	5.523	5.179	4.288
	TD4404	5.534	5.176	4.338
	TD4405	5.963	5.604	4.454
20 Story ASCE 7-16 (DD1) 5% damping	A201	2.964	2.964	2.602
	A202	2.671	2.671	2.155
	A203	2.403	2.017	1.850
	A204	2.240	2.031	1.776
	A205	2.358	2.126	1.738
30 Story ASCE 7-16 (DD1) 2% damping	A301	4.628	4.606	4.427
	A302	4.374	4.335	3.898
	A303	3.801	3.502	3.253
	A304	2.861	2.655	2.416
	A305	4.097	3.808	3.090
40 Story ASCE 7-16 (DD1) 2% damping	A401	6.135	6.109	5.796
	A402	5.903	5.861	5.280
	A403	5.184	4.880	4.391
	A404	3.963	3.741	3.345
	A405	6.005	5.674	4.586

⁽¹⁾ for the shear wall areas, see Figure 1 and Table 3.

(b) base shear and total wall shear forces

Table 5 lists the base shear and the shear forces resisted by the walls located in the x and y directions along with the ratios of shear forces in percentage resisted by these walls. The base shear forces of the 20 story building in TEC 18 were compared to those in ASCE 7-16. Based on the results, the forces in the x and y directions from TEC 18 were about 80% of their counterparts from ASCE 7-16 due to the less periods generated by ASCE 7-16 as a result of uncracked concrete properties. Similar to the base shear forces, total wall shear forces at the base were also compared in both directions. Based on the results, TEC 18, for almost all wall ratios, generated less shear forces than those from ASCE 7-16. As the ratios of wall area to the floor area increased from 1.0% to 2.0%, the total shear wall forces in TEC 18 compared to those in ASCE 7-16 decreased from 80% to 70%. The percentage of the base shear force resisted by the shear walls of the 20 story building in TEC 18 was around 65% in both x and y directions when the ratio of the shear wall area to floor area was 0.5%. This ratio increased to an average of 94% as the wall area ratio increased to 2.0%. In the ASCE 7-16, the same ratios were calculated 53% for the 0.5% wall ratio and 94% for the 2.0% ratio.

As expected, DD2 generated much larger base shear forces than DD4, which was used only in the 30 and 40 story buildings since they were considered tall. According to the results, the ratios for both

base shear and shear walls varied from a minimum of 3.1 to a maximum of 4.9. As the shear wall area to floor area ratio increased from 0.5% to 2.0%, the shear forces resisted by the walls of the 30 and 40 story buildings resulting from both DD2 and DD4 increased from an average of 42% to 93%.

The base shear and total wall shear forces of the 30 and 40 story buildings calculated from the DD2 in TEC 18 were compared to their counterparts in ASCE 7-16 where DD1 was used. The base shear forces of the buildings with no walls extracted from TEC 18 were 80% of those from ASCE 7-16 in the 30 story building case, and 60% in the 40 story one. As the wall area ratios increased to 1.5%, the results from the two codes became almost equal to each other. However, when the wall area ratio was increased to 2.0%, the results of TEC 18 again decreased by an average of 30% in the 30 story building case, and 10% in the 40 story one due to less periods generated by ASCE, which led to higher base shear forces.

In order to determine the adequate ratio of shear wall area, the base shear component was used. For this purpose, as accepted in common practice, 90% ratio, which defines the percentage of the total shear force resisted by the walls, was set as a goal in each orthogonal direction that is under consideration [Burak and Comlekoglu, 2013]. Therefore, the critical value of 90%, which is used to describe the total shear wall to base shear force ratio was investigated both in the x and y directions. Based on the results of DD2 in TEC 18 with 5% damping, the 90% ratio in the x direction was achieved when the shear wall to floor area ratio was between 1.0% to 1.5% in the 20 story building case, 1.5% to 2.0% in the 30 story one, and around 1.5% in the 40 story one. However, these ratios varied in the y direction due to the less wall areas compared to the x direction. The critical ratios associated in the y direction were achieved when the shear wall to floor area ratio was between 1.5% to 2.0% in the 20 and 30 story buildings. However, in the 40 story building case, even the 2.0% wall ratio was not adequate to reach the 90% target ratio indicating that more walls had to be used in that direction. The results of ASCE 7-16 were also studied both in the x and y directions. The results of ASCE 7-16 showed a slight variation as they were compared to those of TEC 18. The target ratio of 90% was achieved in the x direction when the shear wall to floor area ratio was between 1.0% to 1.5% in the 20 story building case, 1.5% in the 30 story one, and was 2.0% in the 40 story one. In the y direction, the required shear wall area to floor area ratio was between 1.5% to 2.0% in the 20 story case, 2.0% in the 30 story one, and was more than 2.0% in the 40 story one.

(c) maximum lateral displacements and story drifts

Table 6 shows the maximum lateral displacements and story drifts of each building model. The maximum displacements occurred at the top floor of each building while the story drifts (it is the lateral displacement of one floor relative to the floor above or below) occurred at floor number 11 in the x and floor number 16 in the y direction in both ASCE 7-16 and TEC 18.

Based on the results, the displacements and drifts of the 20 story building resulting from TEC 18 were approximately 10% more than those resulting from ASCE 7-16. This result was attributed to the cracked properties that were used only in TEC 18, which led to much larger lateral deflections. The presence of shear wall, as expected, reduced the roof deflection by as much as 20% when the shear wall area to floor area ratio was 1.0% as compared to the building with no wall. However, beyond the 1.0% shear wall area ratio, the roof deflections did not indicate any further reduction, and in fact, showed a slight increase due to the less columns that were used in the buildings both with 1.5% and 2.0% wall ratios.

The displacement and drift results of the DD2 to DD4 of TEC 18 that were used only in the 30 and 40 story buildings were compared to each other. As expected, the DD2 generated an average of 5 times more displacements and drifts than those from the DD4. However, the variation of the displacement and drifts from the DD2 to DD4 was more prominent, which was as little as 3.9 and as high as 7.2.

The maximum lateral displacements and story drifts of the 30 and 40 story buildings resulting from the DD2 in TEC 18 were compared to their counterparts resulting from the DD1 in ASCE 7-16. The displacements and drifts of both TEC 18 and ASCE 7-16 were almost equal to each other except for the

building model with a 1.5% shear wall area ratio. In the 1.5% ratio, the displacement and drift values of TEC 18 were 30% more in the 30 story building and 40% more in the 40 story building case due to heavier seismic weight.

Table 5. Base shear and total wall shear forces

Building Information	Model Names ⁽¹⁾	Base Shear (kN)		Total Wall Shear (kN)		Wall Shear/Base Shear Percentage (%)	
		F _x	F _y	F _x	F _y	F _x	F _y
20 Story TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2201	37902.5	38302.4	—	—	—	—
	TD2202	44540.5	44896.0	29749.0	29178.9	66.8	65.0
	TD2203	52992.6	64586.8	41239.9	49066.2	77.8	76.0
	TD2204	55353.5	66473.4	53326.3	58821.3	96.4	88.5
	TD2205	62232.5	73173.1	60134.2	67924.7	96.6	92.8
30 Story TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2301	36568.8	36838.2	—	—	—	—
	TD2302	46196.4	46459.3	16897.8	16290.1	36.6	35.1
	TD2303	54879.1	64276.1	36503.8	42505.0	66.5	66.2
	TD2304	55552.1	64530.5	49101.6	52617.5	88.4	81.5
	TD2305	57739.3	67078.2	56294.8	63627.2	97.5	94.9
30 Story TEC 18 (DD4) 2.5% damping	TD4301	9322.6	9318.5	—	—	—	—
	TD4302	10617.8	12777.0	4495.4	5307.1	42.4	41.5
	TD4303	12931.2	15740.0	9523.9	11947.9	73.7	75.9
	TD4304	11422.8	13685.2	10839.6	12180.9	94.9	89.0
	TD4305	14987.3	17262.3	14458.1	15647.6	96.5	90.7
40 Story TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2401	30256.3	31776.6	—	—	—	—
	TD2402	34648.1	37299.7	17152.7	13778.6	49.5	37.0
	TD2403	47319.5	59540.5	34010.2	36395.6	71.9	61.1
	TD2404	45540.5	56203.9	44586.4	44652.3	97.9	79.4
	TD2405	53899.6	63304.5	52489.2	52107.0	97.4	82.3
40 Story TEC 18 (DD4) 2.5% damping	TD4401	8482.2	8510.8	—	—	—	—
	TD4402	10668.5	10291.0	4084.8	3925.1	38.3	38.1
	TD4403	12700.1	15729.7	8464.4	10933.6	66.7	69.5
	TD4404	12535.2	15139.9	11172.2	10210.1	89.1	67.4
	TD4405	14018.5	16156.0	13751.3	14805.6	98.1	91.7
20 Story ASCE 7-16 (DD1) 5% damping	A201	43458.8	43337.0	—	—	—	—
	A202	53135.2	53135.2	28285.3	28285.3	53.2	53.2
	A203	60540.1	81558.1	51377.7	68006.4	84.9	83.4
	A204	77590.4	95422.0	76325.2	89205.4	98.4	93.5
	A205	81157.0	96033.1	80283.4	83868.1	98.9	87.3
30 Story ASCE 7-16 (DD1) 2% damping	A301	47653.7	47954.7	—	—	—	—
	A302	54215.9	54746.5	21723.8	20938.3	40.0	38.3
	A303	64774.5	77411.0	46913.7	49098.9	72.4	63.4
	A304	47770.8	55370.9	43014.7	42858.8	90.0	77.4
	A305	86353.7	99725.5	81333.3	89211.1	94.2	89.5
40 Story ASCE 7-16 (DD1) 2% damping	A401	50537.4	50764.8	—	—	—	—
	A402	56058.2	56398.2	19552.0	18884.4	34.9	33.5
	A403	66327.1	76907.0	42747.4	42287.8	64.5	55.0
	A404	47307.6	54210.2	39528.9	37976.2	83.5	70.1
	A405	61934.9	68680.4	57494.7	58711.3	92.8	85.5

⁽¹⁾ for the shear wall areas, see Figure 1 and Table 3.

Table 6. Maximum lateral displacements and story drifts

Building Info.	Model Names ⁽¹⁾	Max. Lateral Displ. (mm)		Max. Drift (mm)	
		x	y	x	y
20 Story TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2201	264.5	261.0	19.0	18.8
	TD2202	255.7	253.3	16.7	16.7
	TD2203	215.1	202.3	14.0	13.2
	TD2204	225.1	213.3	14.5	13.9
	TD2205	265.0	242.0	17.0	16.0
30 Story TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2301	434.9	431.0	21.0	20.8
	TD2302	381.5	379.0	17.3	17.3
	TD2303	331.0	318.2	14.4	13.6
	TD2304	350.2	338.7	15.7	14.6
	TD2305	462.6	436.3	19.6	18.7
30 Story TEC 18 (DD4) 2.5% damping	TD4301	80.7	80.4	3.8	3.8
	TD4302	83.0	98.3	3.7	4.3
	TD4303	67.5	65.1	2.9	2.8
	TD4304	82.8	79.9	3.7	3.4
	TD4305	66.6	62.8	2.8	2.6
40 Story TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2401	419.1	418.8	19.6	19.4
	TD2402	423.0	423.4	18.6	18.7
	TD2403	412.3	405.9	17.1	17.1
	TD2404	411.1	404.4	17.8	17.3
	TD2405	483.1	490.6	15.7	14.9
40 Story TEC 18 (DD4) 2.5% damping	TD4401	86.7	86.7	3.8	3.8
	TD4402	86.4	86.3	3.7	3.7
	TD4403	78.3	72.1	3.2	3.0
	TD4404	78.1	71.9	3.3	3.0
	TD4405	96.9	92.8	3.1	3.0
20 Story ASCE 7-16 (DD1) 5% damping	A201	239.6	239.6	17.6	17.6
	A202	230.8	230.8	15.4	15.4
	A203	200.9	175.6	12.9	11.9
	A204	218.8	203.7	13.9	13.6
	A205	233.1	213.1	14.7	13.9
30 Story ASCE 7-16 (DD1) 2% damping	A301	420.7	417.6	19.5	19.4
	A302	416.0	411.3	17.9	17.8
	A303	353.8	336.4	15.3	14.2
	A304	267.6	256.4	11.7	10.8
	A305	469.9	444.2	19.7	19.0
40 Story ASCE 7-16 (DD1) 2% damping	A401	467.9	465.7	19.7	19.6
	A402	447.4	444.5	18.4	18.4
	A403	391.8	363.1	15.7	14.9
	A404	296.6	276.7	12.2	11.5
	A405	486.6	464.7	18.5	17.5

⁽¹⁾ for the shear wall areas, see Figure 1 and Table 3.

Further Study of Shear Walls with 2.0% Ratio

Further study of shear walls with a 2.0% shear wall area ratio was conducted using DD2 in TEC 18. The effective layout of wall configuration is important when determining the wall resistance against lateral loads. The results of varying wall layouts might be different even if the same wall area to floor area ratio is maintained. In order to emphasize the significance of wall layouts, a simple change in the layout was proposed as shown in Figure 1.f. The perimeter walls located in the mid-span were kept as rectangular ones similar to the other 2.0% wall ratio case, while the extra wall area needed to achieve the 2.0% wall ratio was placed to the four corners as L-shaped ones. The seismic analyses of 40 story buildings were conducted using the forces resulting from DD2 in TEC 18. Thus, a total of two separate wall layouts with the same wall ratios was investigated. The original 2.0% wall ratio was labeled as option 1 while this newly proposed one is labeled as option 2. The results of layout options 1 and 2 were compared to each other in the same order as discussed in the previous sections. Based on the results of building periods, the fundamental period was decreased by 18% (see Table 7).

Table 7. Building periods of Options 1 and 2

Building Information	Model Names	Building periods (sec)		
		T ₁	T ₂	T ₃
40 Story, TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2405 – Option 1	8.118	7.603	5.978
	TD2405 – Option 2	6.630	6.377	4.707

The total base shear and wall shear forces of the two options were compared to each other. As shown in Table 8, the second option generated an average of 15% more base shear forces and an average of 25% more wall shear forces due to less period values. However, the percentage of wall shear force to base shear ratio increased more prominently in the y direction from the 82% ratio calculated for option 1 to a 90% ratio calculated for option 2. Thus, the wall layout in option 2 satisfied the 90% critical ratio in both x and y directions.

Table 8. Base shear and total wall shear forces of Options 1 and 2

Building Information	Model Names	Base Shear (kN)		Total Wall Shear (kN)		Wall Shear/Base Shear Percentage (%)	
		F _x	F _y	F _x	F _y	F _x	F _y
40 Story, TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2405 – Option 1	53899.6	63304.5	52489.2	52107.0	97.4	82.3
	TD2405 – Option 2	66473.5	74960.6	65189.4	65536.5	98.1	87.4

Table 9 shows the results of the maximum lateral displacements and story drifts of the two options. The maximum displacements occurred at the roof level while the story drifts were again at floor number 11 in the x and floor number 16 in the y direction. Based on the results, the maximum displacements from the second option were 25% less on average than their counterparts from the first option.

Table 9. Maximum lateral displacements and story drifts of Options 1 and 2

Building Information	Model Names	Max. Lateral Displ. (mm)		Max. Drift (mm)	
		x	y	x	y
40 Story, TEC 18 (DD2) 5% damping	TD2405 – Option 1	483.1	490.6	15.7	14.9
	TD2405 – Option 2	367.0	363.6	16.0	15.9

6. CONCLUSIONS

The results of the parametric studies of 40 buildings are presented under four groups. These groups are: (a) building periods, (b) base shear and total wall shear forces, (c) maximum lateral displacements and story drifts, and (d) wall configuration.

(a) building periods

- The fundamental periods of all building models in TEC 18 were always larger than those in ASCE 7-16 due to the heavier seismic weights in TEC 18 resulting from a live load participation factor of 0.3 as opposed to a factor of zero used in ASCE 7-16. For the 30 and 40 story buildings, the building periods from the DD2 were slightly larger than those from the DD4 due to different damping ratios and cracked properties associated with these two design stages. The periods from the DD2 to DD4 increased by an average of 20% for the 30 story building, and an average of 35% for the 40 story one. As expected, as the shear wall ratios increased the fundamental period decreased. An increase from a no wall to 1.5% shear wall case resulted in an increase in the periods by an average of 20%.

(b) base shear and total wall shear forces

- The base shear forces of the 20 story building generated from the DD2 in TEC 18 were 20% less in average than those obtained from the DD1 in ASCE 7-16 due to the smaller periods in ASCE 7-16. Similar to the trend in base shear, the wall shear forces from TEC 18 were again 20% less on average than those from ASCE 7-16. As the wall area ratio increased, both the base shear and the total shear forces in the walls decreased from a minimum of 10% in the 0.5% wall case to a maximum of 30% in the 2.0% wall case. Therefore, it was concluded that the diversion between the TEC 18 and ASCE 7-16 was a lot more prominent as the shear wall area increased.
- As expected, both for the 30 and 40 story buildings, the DD2 in TEC 18 compared to the DD4 in TEC 18 generated much larger base shear and wall shear forces. The ratios of forces from the DD2 to DD4 varied from a minimum of 3.1 to a maximum of 4.9. The results indicated that the increase in the quantity of shear wall area made a prominent change in the base shear and wall shear forces for both the DD2 and the DD4. As the ratio of wall area increased from 0.5% to 2.0%, the shear forces resisted by the walls of the 30 and 40 story buildings resulting from both the DD2 and DD4 increased from an average of 42% to 93%. This result concluded that the 90% critical ratio of total wall shear to base shear was achieved both for the DD2 and DD4 when the 2.0% wall ratio was provided.
- The base shear forces of the 30 and 40 story buildings with no walls resulting from the DD2 in TEC 18 were approximately 80% and 60% of those from the DD1 in ASCE 7-16. As the wall area ratios increased to 1.5%, the results from the two earthquake codes became almost identical to each other. However, at the 2.0% of wall area ratio, the results of TEC 18 were less by an average of 30% in the 30 story and 10% in the 40 story buildings. The results indicated that the forces from the two earthquake codes converge to each other at a wall ratio of 1.5%.
- According to the results of DD2 in TEC 18, the 90% critical ratio of shear wall force to base shear was achieved in the x direction when the shear wall to floor area ratios were somewhere between 1.0% to 1.5% for the 20 story, 1.5% to 2.0% for the 30 story, and around 1.5% for the 40 story buildings. However, in the y direction, these ratios varied due to the less wall areas defined in the y direction. The critical ratios were achieved in the y direction when the shear wall to floor area ratios was somewhere between 1.5% to 2.0% for the 20 and 30 story buildings. However, in the 30 story building, even the 2.0% ratio was not adequate to achieve the 90% target ratio. Therefore, it was concluded that more wall area was needed as the building became taller. Based on the results, as a rule of thumb, for 20 story buildings, a shear wall area to floor area ratio of 1.5%, and for 30 story buildings, 2.0% can be recommended. For 40 story buildings, a wall ratio somewhere between 2.0% to 2.5% is believed to be adequate. However, it is important to emphasize the significance of effective wall layout. Therefore, more consideration should be given to the wall layout.

(c) maximum lateral displacements and story drifts

- According to the results of the 20 story buildings, the maximum roof displacements generated from the DD2 in TEC 18 were approximately 10% more on the average to those from the DD1 in ASCE 7-16. The presence of shear wall, as expected, reduced the roof deflection by as much as 20% compared to a no wall case when the shear wall area to floor area ratio was 1.0%. However, as the shear wall area ratio was increased from 1.0% to 1.5% and 2.0%, the roof deflections did not show any further reduction, and in fact, increased slightly due to the less columns that were used both in the 1.5% and 2.0% wall ratio cases. Therefore, strengthening the wall ends with columns might be more effective than simply increasing the wall ratio.

- The roof displacements and story drifts of the 30 and 40 story buildings resulting from the DD2 in TEC 18 were compared to those from the DD1 in ASCE 7-16. Based on the results, the displacements and drifts of both TEC 18 and ASCE 7-16 were approximately equal to each other except for the buildings with a 1.5% shear wall area ratio. In the 1.5% ratio, the displacements and drifts of the 30 and 40 story buildings resulting from TEC 18 were respectively, 30% and 40% more when they were compared to those of ASCE 7-16. The results indicated that the DD2 in TEC 18 and the DD1 in ASCE 7-16 generated somewhat similar displacements to each other due to varying damping ratios and cracked concrete properties.
- In the 30 story building, as the ratio of shear wall area increased from no wall to 1.5% ratio, the associated roof displacements and story drifts decreased by as much as 20%. In the 40 story building, the same increase caused only a 5% decrease in the roof displacements and drifts. However, as the wall ratio was increased to 2.0%, the deflections became slightly larger than those from the no wall case due to the columns eliminated to provide additional walls in the 2.0% wall case. Therefore, it was concluded that a balance between the number of columns and walls should be maintained to provide effective lateral strength to the structural system. It is, therefore, might not be effective just to increase the number of columns for the buildings with 30 or more floors.

(d) wall configuration

- As discussed before, the effective wall layout was also studied for the 2.0% shear wall area ratio. The walls in option 2 were oriented around the corners of the building, which would resist more effectively to the lateral forces. As expected, the fundamental period of the building in option 2 reduced by 18%, which in turn resulted in about 25% smaller roof deflections as compared to the building in option 1. The base shear and wall shear forces of the building in option 2 generated 25% more base shear and 15% more wall shear forces compared to the one in option 1. Changing the wall layout as it was performed in option 2 increased the ratio of shear forces resisted by the walls specifically in the y direction by an average of 6%. Thus, this increase in the shear force ratio improved the building's lateral resisting system. Therefore, it is important to arrange the wall layout more effectively. Based on the results of the 40 story building, the further away the walls from the geometric center the better becomes their structural performance as long as the overall wall symmetry is maintained.

REFERENCES

- Al-Ageedi, M., 2019, *Determination of the Optimum Shear Wall Area to Floor Area Ratio for Reinforced Concrete Buildings*, Master's Thesis in Civil Engineering, Atılım University, Ankara.
- ASCE 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 2016, American Society of Civil Engineers, Virginia.
- Burak, B., Comlekoglu, H.G., 2013, "Effect of Shear Wall Area to Floor Area Ratio on the Seismic Behavior of Reinforced Concrete Buildings", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 139, No. 11, pp. 1928-1937.
- Esmaili, O., Epackachi, S., Samadzad M., Mirghaderi, S.R., 2008, "Study of Structural RC Shear Wall System in A 56-Story RC Tall Building", *The 14 World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-27, 2008.
- ETABS Version 17.0.1, 2018, Computers and Structures Inc.
- Fintel, M. 1995, "Performance of Buildings with Shear Walls in Earthquakes of the Last Thirty Years", *PCI Journal*, Vol. 40, pp. 62-80.

- Foroughi, S., Yüksel, S. B., 2016, "Effect of Shear Walls on the Seismic Behavior of the Cast-in-Site Reinforced Concrete Buildings," The 2nd International Conference on Modern Research in Civil Engineering, Architectural & Urban Development, March 14, 2016, Istanbul, Turkey.
- Gunel, A., 2013, *Influence of the Shear Wall Area to Floor Area Ratio on the Seismic Performance of Existing Reinforced Concrete Buildings*, Master's Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara.
- Gupta, S., Akhtar S., Hussain, A., 2016, "Effect of Shear Wall Location on Bending Moment and Shear Force of Multistory Building Subjected to Earthquake Loading," International Journal of Computer and Advanced Engineering Research, Vol. 3, Issue 2, pp. 4-21.
- Kumar Y.R., Kumar, P.B., 2018, "Effect of Shear Wall Area to Floor Area Ratio on Seismic Performance of R.C. Structures," International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol. 9, Issue 4, pp. 844-852.
- Malik, R., Madan S.K., Sehgal, V.K., 2011, "Effect of Height on Seismic Response of Reinforced Cement Concrete Framed Buildings with Curtailed Shear Wall", Journal of Engineering and Technology, Vol. 1, Issue 1, pp. 43-46.
- Mohammad, A.U.R., Bharathi, D., 2016, "Effect of Shear Wall Area to Floor Area Ratio on the Seismic Behavior of Reinforced Concrete Buildings," International Journal & Magazine of Engineering, Technology, Management and Research, Vol. 3, Issue 10, pp. 1424-1433.
- Nollet, M.J., Smith, B.S., 1993, "Behavior of Curtailed Wall-Frame Structures," Journal of Structural Engineering, Vol. 119, Issue 10, pp. 2835-2854.
- Soydas, O., 2009, *Evaluation of Shear Wall Indexes for Reinforced Concrete Buildings*, Master's Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara.
- Sreevalli, T., Priya, N.H., 2017, "Effect of Shear Wall Area on Seismic Behavior of Multistoried Building Tube in Tube Structure," International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol. 44, Issue 4, pp. 202-210.
- TBI 17: Tall Buildings Initiative Guidelines for Performance Based Seismic Design of Tall Buildings, 2017, Pacific Earthquake Engineering Center, Report No. 2017/06.
- TEC 18: Turkish Building Earthquake Code, 2018, Turkish Disaster and Emergency Management Authority, AFAD, Ankara.
- TS 498: Design loads for Buildings, 1997, Turkish Standards Institution, TSE, Ankara.
- TS 500: Requirement for Design and Construction of Reinforced Concrete Structures, 2000, Turkish Standards Institution, TSE, Ankara.



IMPROVED SOCIAL SPIDER ALGORITHM FOR MINIMIZING MOLECULAR POTENTIAL ENERGY FUNCTION

¹Emine BAŞ , ²Erkan ÜLKER 

¹Selcuk University, Kulu Vocational School, Computer Technologies Department, Konya, TURKEY

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

¹emineozcan@selcuk.edu.tr, ²eulker@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 07.04.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.04.2020)

ABSTRACT: The social spider algorithm (SSA) is a new heuristic algorithm created on spider behaviors to solve continuous optimization problems. In this study, SSA is used in order to minimize a simplified model of the energy function of the molecule. The Molecular potential energy function problem is one of the most important real-life problems. The Molecular potential energy function problem attempts to predict the 3D structure of a protein. SSA is developed by various techniques (Crossover-mutation and G_{best} convergence-silent spider techniques) and SSA is called Improved SSA (ISSA). By these techniques, the exploration and exploitation capabilities of SSA in the continuous search space are improved. The general performances of SSA and ISSA are tested on low-scaled and large-scaled thirteen benchmark functions and obtained results are compared with each other. Wilcoxon signed-rank test is applied to SSA and ISSA results. Then, the general performance of the SSA and ISSA is tested on a simplified model of the molecule for different dimensions. Also, the performance of the ISSA is compared to various state-of-art algorithms in the literature. The results showed the superiority of the performance of ISSA.

Key Words: Constrained Optimization, Social spider algorithm, Molecular energy function

Moleküler Potansiyel Enerji Fonksiyonu İçin Geliştirilmiş Sosyal Örümcek Algoritması

ÖZ: Sosyal örümcek algoritması (SÖA), sürekli optimizasyon problemlerini çözmek için örümcek davranışları üzerine oluşturulan yeni bir sezgisel algoritmadır. Bu çalışmada, SÖA molekülün enerji fonksiyonunun basitleştirilmiş bir modelini en aza indirmek için kullanılmıştır. Moleküler potansiyel enerji fonksiyonu problemi, en önemli gerçek hayat problemlerinden biridir. Moleküler potansiyel enerji fonksiyonu problemi, bir proteinin 3D yapısını tahmin etmeye çalışır. Sosyal örümcek algoritması çeşitli teknikler (Çaprazlama-mutasyon ve G_{best} yakınsaması-sessiz örümcek teknikleri) eklenerek geliştirilmiştir ve çeşitli tekniklerle geliştirilen SÖA 'ya Geliştirilmiş SSA (GSÖA) denilmiştir. Bu teknikler sayesinde, SÖA 'nın sürekli arama uzayında keşif ve sömürü yetenekleri geliştirilmiştir. SÖA ve GSÖA 'nın genel performansları, düşük ölçekli ve yüksek ölçekli on üç kıyaslama fonksiyonunda test edilmiştir ve elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Wilcoxon işaretli testi, elde edilen SÖA ve GSÖA sonuçlarına uygulanmıştır. Daha sonra, SÖA ve GSÖA'nın genel performansı, farklı boyutlarda tanımlanan molekülün basitleştirilmiş bir modeli üzerinde test edilmiştir. Ayrıca, GSÖA'nın performansı, literatürdeki çeşitli sanatsal algoritmalarla da karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, GSÖA 'nın performansının üstünlüğünü göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sınırlı Optimizasyon, Sosyal örümcek algoritması, Moleküler enerji fonksiyonu

1. INTRODUCTION

Determining the global minimum potential energy conformation of proteins and peptides is known as the problem of energy minimization (Tawhid and Ali, 2017b). The minimization of the molecular potential energy function problem (MPEF) can be formulated as a global optimization problem. Finding the steady-state of the molecules in the protein can help to predict the 3D structure of the protein. The difficulty of the problem arises from the number of local minimizers of the energy function that grows exponentially with the size of the molecule (Wales and Scheraga, 1999). Many methods have been applied in the literature to solve this problem. Tawhid and Ali (2017a) proposed hybrid social spider optimization and genetic algorithm (HSSOGA) for MPEF. The social spider optimization (SSO) algorithm is a population-based algorithm proposed by Cuevas *et al.* (2013). SSO is another heuristic algorithm that is very similar to the SSA algorithm but different from it. Tawhid and Ali (2017b) proposed a hybrid Grey Wolf Optimizer and Genetic Algorithm (HGWOGA) for MPEF. The proposed HGWOGA algorithm is based on three procedures. In the first procedure, they apply the grey wolf optimizer algorithm with its powerful performance with the exploration and the exploitation processes and the second procedure is based on dimensionality reduction. The last procedure is to avoid premature convergence by applying the genetic algorithm mutation operator in the whole population. Tawhid and Ali (2017c) proposed hybrid flower pollination and genetic algorithm (HFPGA) and Tawhid and Ali (2016) improved a hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm with population partitioning for large scale optimization problems for MPEF. Barbosa *et al.* (2005) proposed a steady-state real-coded genetic-simplex hybrid algorithm for MPEF. Pardalos *et al.* (1994) introduced some of the most commonly used potential energy functions and discuss different optimization methods used in the MPEF.

Yu and Li have offered Social Spider Algorithm (SSA) which is configured according to social spider behaviors (Yu and Li, 2015). Some spider species, which generally live solitary, can live as colonies. Spiders live in colonies can communicate with each other by web structure. The vibration they produce on the web enables this communication. They can make random walks to each other by the vibration information they share (Yu and Li, 2015). In this paper, we firstly propose an improved social spider algorithm (ISSA) and then ISSA is applied in order to solve the molecular potential energy function minimizations. Genetic algorithm operators are generally used in the literature to improve the exploration and exploratory ability of the algorithms. In this paper, we have added G_{best} convergence and silent spider techniques in addition to genetic algorithm operators. While crossover and G_{best} convergence techniques increase local search capacity of ISSA in continuous search space, mutation and silent spider techniques increase the global search capacity of ISSA in continuous search space. Crossover and G_{best} convergence techniques have been used to escape the local minima trap. Mutation and silent spider techniques ensure that global optimum points are found in the search space instead of local optimum points. The combination of these techniques accelerates the search and helps the algorithm to reach the optimal or near-optimal solution in a reasonable time. In this paper, the ISSA has been tested on various thirteen low-scaled and large-scaled benchmark functions. The molecular potential energy problem is solved by ISSA in various dimensions and the performances of ISSA are compared with well-known algorithms in the literature.

The general structure of the paper as follows. The related works and the definition of the molecular energy problem are details presented in section 1 and 2, respectively. In section 3, the original SSA and in section 4, ISSA is examined. In section 5, original SSA and ISSA are tested in various unimodal and multimodal benchmark functions in low-scale and large-scale dimensions. The performance of the SSA and ISSA is tested on a simplified model of the molecule with different dimensions. Obtained results are compared with each other and well-known heuristic and new methods in the literature. Finally, the results are interpreted and discussed. The paper is ended up with a conclusion and future works.

2. RELATED WORKS

Evolutionary computation has become an attractively efficient device of optimization for rapidly increasing complex modern optimization problems. For the last twenty years, swarm intelligence based algorithms, which are based on new evolutionary computation methods, attract attention. The term of a swarm expresses a community that consists of individuals who are in communication with each other. Swarm intelligence-based algorithms, study main social animal and insect behaviors for solving problems. These algorithms, imitate the behaviors of ant, fish, bird, bee, bacteria, butterfly, etc. Thus, the problems which seem hard are able to be solved (Talbi, 2009; Mallipeddi *et al.*, 2011; Parpinelli and Lopes, 2011; Kennedy and Eberhart, 1995).

One of the most popular heuristic algorithms in the literature is GA. GA has crossover and mutation operators (Holland, 1975). These operators have been used effectively in a variety of heuristic algorithms. Particle swarm optimization (PSO) is one of the most hybrid algorithms with GA. For example, GA-PSO and PSOGA (Robinson *et al.*, 2002) which are solved the particular electromagnetic application of profiled corrugated horned antenna, GSO (Grimaldi *et al.*, 2004) which is solved combinatorial optimization problems, GSO with several strategies (Grimaccia *et al.*, 2007) which is solved some multi-modal benchmark problems, and BS (Settles and Soule, 2005) which is resolved unconstrained optimization problems. In addition, there are many studies in the literature that have been hybridized with GA operators (Krink and Løvbjerg, 2002; Juang, 2004; Jian and Chen, 2006).

In this paper, one of the heuristic methods, the social spider algorithm has been selected. With the vibrations in SSA are shared some information in continuous spaces and the spiders are socialized at the evolutionary process. In the literature, SSA has been used in various papers. El-bages and Elsayed (2017) have solved a static transmission expansion planning problem by using SSA. In the proposed method; DC power flow sub-problem is solved by developing an original SSA based web and adding potential solutions to the result. Yu and Li (2016) have solved the Economic Load Dispatch (ELD) formulation by developing an original SSA based new approach. ELD is one of the essential components in power system control and operation. Mousa and Bentahar (2016) have adapted QoS-aware web service selection process to OSSA approach. Elsayed *et al.* (2016) have solved the non-convex economic load dispatch problem with an OSSA based approach.

3. MOLECULAR POTENTIAL ENERGY PROBLEM

We test on a scalable simplified molecular potential energy function (MPEF) to examine the performance of ISSA. MPEF is first proposed in (Lavor and Maculan, 2004). The potential energy of a molecule is derived from molecular mechanics, which describes molecular interactions based on the principles of Newtonian physics (Tawhid and Ali, 2017).

The molecular model has formed consists of a chain of k atoms ($a_1, a_2, \dots, a_k$) in a three-dimensional space. Similar models have been figured in the literature (Hedar *et al.*, 2011; Bansal *et al.*, 2010). In this paper, we define the potential energy as a function of the torsion angles as Equation 1.

$$E = \sum_i \left(1 + \cos(3\omega_{i,i+3}) + \frac{(-1)^i}{\sqrt{10.60099896 - 4.141720682(\cos(\omega_{i,i+3}))}} \right) \quad (1)$$

where $i = 1, \dots, k-3$ and k is the number of atoms in the given model and $\omega_{i,i+3}$ is the torsion angle by the atoms a_i, a_{i+1}, a_{i+2} and $a_{i+1}, a_{i+2}, a_{i+3}$. Figure 1 is shown in the torsion angle.

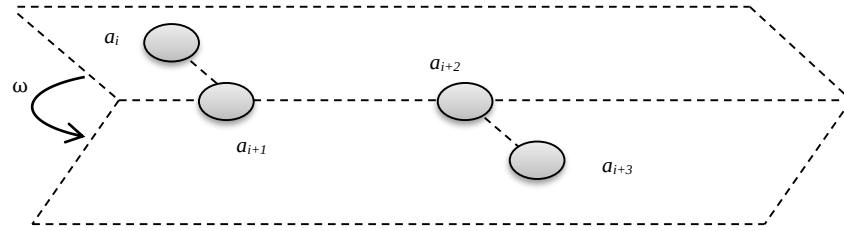


Figure 1. The torsion angle between the normal through the planes determined by the atoms a_i, a_{i+1}, a_{i+2} , and $a_{i+1}, a_{i+2}, a_{i+3}$.

Our goal is to find $\omega_{1,4}, \omega_{2,5}, \dots, \omega_{k-3,k}$ where $\omega_{i,j} \in [0, 5]$. Although the problem seems simple, it is a very difficult problem. A molecule with as few as 20 atoms has $2^{17} = 131.072$ local minimizers.

In this paper, E is rewritten as $f(x)$ for the large-scale unconstrained global optimization problem. Equations 2-4 show fitness function.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \left(1 + \cos(3x_i) + \frac{(-1)^i}{\sqrt{10.60099896 - 4.141720682(\cos(x_i))}} \right) \quad (2)$$

$$\text{And } 0 \leq x_i \leq 5, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\min f(x), \quad x \in \mathbb{R}^n \quad l_b \leq x_i \leq u_b \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

where $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ is an objective function and x represents a decision variable vector. l_b and u_b are the lower and upper bounds of the decision variables x_i , respectively.

4. ORIGINAL SOCIAL SPIDER ALGORITHM (SSA)

Social spider algorithm (SSA) is a heuristic algorithm that is created by imitating spiders' behaviors in nature. SSA is created for organizing searching space of optimization problems as a high dimensional spider web. Each position on the web represents a convenient solution for the optimization problem and all convenient solutions to the problem correspond to positions on this web. This web also serves as a transmission medium of vibrations created by spiders. Each spider on the web is held in a position and the conformity value of the solution is calculated with the objective function. Spiders can move randomly on the web. But they can not move out of positions which represent convenient solutions for optimization problems. When a spider moves towards a new position, a vibration is produced and this vibration spreads on the web. Other spiders execute social information sharing via this vibration. Flowchart for the original SSA is shown in Figure 2.

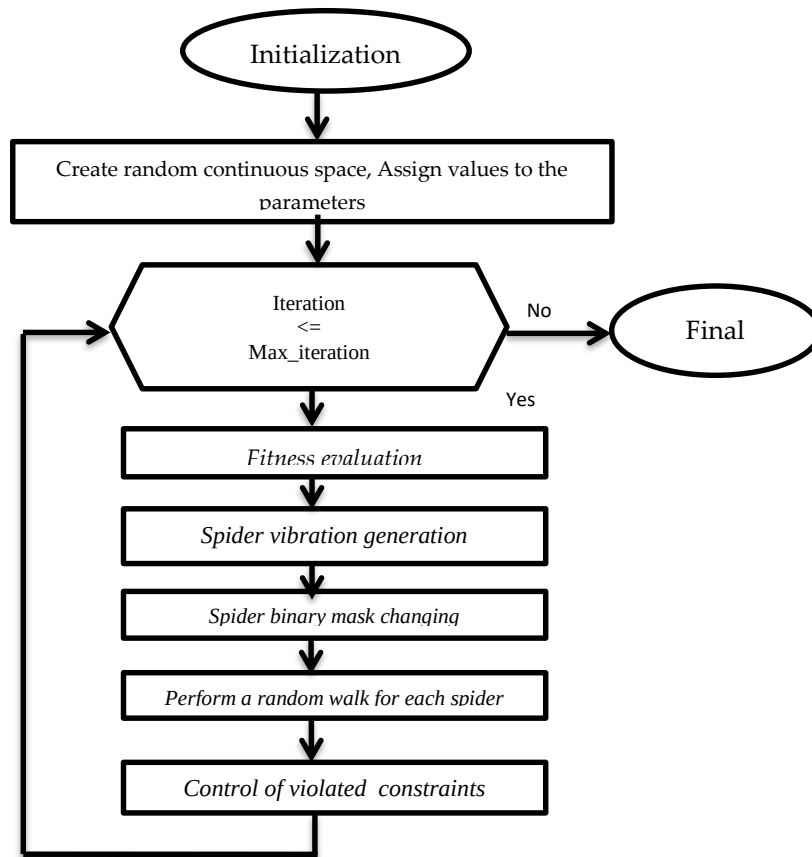


Figure 2. Flowchart For SSA

There are two important terms in SSA: spider and vibration. Spider structure: Spiders are SSA agents that perform optimization. At the beginning of the algorithm, a predetermined number of spiders are placed on the web. The number of spiders cannot be changed afterward. “a” represents a spider and a memory is allocated for each spider a. Spider information is stored here. This information: the position of spider a on the web, the fitness value at the current position of spider a, the target vibration of spider a in the previous iteration, the iteration number where the target vibration last changed, the movement of spider a in the previous iteration and the dimension mask of spider a that guided the movement in the previous iteration. Spider locations are initially set at random. Each spider produces a vibration when it moves from a position to a different location. The severity of the vibration is related to the fitness value that the spider produces in that position. Vibration can spread over the web and other spiders on the web can feel it. Thus, other spiders on the web can obtain the personal information of the spider that produces the vibration, and information sharing takes place. Vibration structure: The vibration in the SSA is a very important term. It is one of the most important characteristics distinguishing SSA from other meta-heuristic algorithms. Two properties are used to define a vibration. a-) The source position b-) The source of vibration severity $[0, +\infty)$ Equation 5 (Yu and Li, 2015) is used to calculate the vibration intensity.

$$I(P_a, P_a, t) = \log\left(\frac{1}{f(p_a) - C}\right) + 1 \quad (5)$$

Where a represents a spider and spider a generates vibration at its current position. It defines the position of spider a at time t as $P_a(t)$, or simply as P_a if the time argument is t. Where $I(P_a, P_a, t)$ is the

vibration value produced by the spider in the source position at time t . $f(P_a)$ represents the spider of fitness value in its current position. Where C is a confidently small constant such that all possible fitness values are larger than C for minimization problems. $Dis(P_a, P_b)$ is showing the distance between spider a and spider b . This distance is calculated by Equation 6 (Yu and Li, 2015). Manhattan distance structure is used when calculating this distance. The vibration attenuation over distance is calculated by Equation 7 (Yu and Li, 2015).

$$Dis(P_a, P_b) = \|P_a - P_b\| \quad (6)$$

$$I(P_a, P_b, t) = I(P_a, P_a, t) \times \exp\left(-\frac{Dis(P_a, P_b)}{\bar{\sigma} \times r_a}\right) \quad (7)$$

Where $\bar{\sigma}$ represents mean of the standard deviation of the positions of all spiders in each dimension. r_a is represented as a user-controlled parameter $r_a \in (0, \infty)$. This parameter controls the attenuation rate of the vibration intensity over the distance. Whenever a spider moves to a new position, it generates vibration at its current position. $I(P_a, P_b, t)$ is the felt value of the spider's vibration in "a" point, by the spider in "b" point. The value of r_a is selected from the set $\{1/10, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 4, 5, 10\}$ and the values of p_c and p_m are both selected from the set $\{0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.99\}$ (Yu and Li, 2015). After setting the values, the algorithm creates an initial population of spiders for optimization. Each spider is assigned a fixed size memory for storing spider information. The positions of spiders are randomly generated in the search space. Fitness values of the spiders calculated and stored. The initial target vibration of each spider in the population is set at its current position, and the vibration intensity is zero. All spiders produce vibration using their position. The algorithm uses vibrations to activate the propagation process. V represents spiders' vibrations. Each spider receives the vibrations generated by other spiders. A spider selects the strongest of these vibration values. This value shows as V_a^{best} , a represents a spider. Spider a which is stored in the memory of the target vibration shows as V_a^{tar} . V_a^{best} compares vibration values and if the intensity of the V_a^{best} is not greater than the target vibration, the spider's memory is changed to V_a^{best} . cs , the number of iterations since spider a has last changed its target vibration, is reset to zero; otherwise, the original V_a^{tar} is retained and cs is incremented by one. The dimension mask m is determined so that a random walk can be performed towards the V_a^{tar} . The dimension mask is a $\{0, 1\}$ binary vector of length n and n is the dimension of the optimization problem. Initially, all the values of this mask are zero. In each iteration, spiders have a probability of $1 - p_c^{cs}$ to change its mask where $p_c \in (0, 1)$ is a user-defined attribute that describes the probability of changing mask. If the mask is decided to be changed, each bit of the vector has a probability of p_m to be assigned with a one, and $1 - p_m$ to be a zero. p_m is also a user-controlled parameter defined in $(0, 1)$ (Yu and Li, 2015). Each bit of the mask is changed independently. The new mask does not have any correlation with the previous mask. In case all bits are zeros or ones, one random value of the mask is changed to one or zero. After the dimension mask is determined, a new following position P_a^{fo} is generated based on the mask for a spider. P_a^{fo} value is calculated by Equation 8 (Yu and Li, 2015).

$$P_{a,i}^{fo} = \begin{cases} P_{a,i}^{tar}, & m_{a,i} = 0 \\ P_{a,i}^r, & m_{a,i} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

Where r is a random integer value generated in $[1, \text{population_size}]$ and $m_{a,i}$ stands for the i th dimension of the dimension mask m of spiders. The random walk of each spider is calculated by Equation 9 (Yu and Li, 2015).

$$P_a(t+1) = P_a + (P_a - P_a(t-1)) \times r + (P_a^{fo} - P_a) \odot R \quad (9)$$

Where $\odot$ denotes element-wise multiplication. R is a vector of random float-point numbers generated from zero to one uniformly. Before following $P_{a^{fo}}$, spider a first moves along its previous direction, which is the direction of movement in the previous iteration. The distance along this direction is a random portion of the previous movement. Then spider a approaches $P_{a^{fo}}$ along each dimension with random factors generated in $(0, 1)$. After each spider performs a random walk, the spiders may move out of the web. It blocks the constraints of the optimization problem to be violated. The work steps of the original SSA is shown in Figure 3.

-
- Step 1. Parameter setting:** Required constant parameter sets are adjusted. For example, lower and upper limits of variables, number of maximum iteration, etc.
- Step 2. Initialization:** Random starting position locations are determined for each spider in the swarm. Assign memory for them. The target vibration for each spider is started.
- Step 3. Evaluation:** Fitness value is calculated for each spider. The best in the swarm are detected and recorded.
- Step 4.** Vibration value for each spider calculated by using vibration Equations (5, 6, and 7). The best in the swarm are detected and recorded.
- Step 5. Vibration comparison:** The received the best vibration is compared to the target vibration values.
- Step 6.** Update the dimension mask.
- Step 7.** $P_{a^{fo}}$ value is calculated by Equation 8
- Step 8. Movement:** Each spider moves to a new position by Equation 9 and a new population is obtained.
- Step 9. Repeat:** All criteria beginning from Step 3 are repeated until reaching stopping criteria.
- Step 10. Output:** Optimum outputs are obtained.
-

Figure 3. The work steps of the original SSA

5. IMPROVED SOCIAL SPIDER ALGORITHM (ISSA)

The original SSA is an optimization algorithm that is developed for solving constant problems. In this paper, SSA is studied and it is improved by adding new four techniques enhancing its performance (ISSA). These techniques are crossover, mutation, G_{best} convergence, and silent spider techniques. In both techniques, ISSA develops the ability to search locally and globally in continuous search space. While crossover and G_{best} convergence techniques increase local search capacity of ISSA in continuous search space, mutation and silent spider techniques increase the global search capacity of ISSA in continuous search space. The working steps of ISSA are shown in Table 1 with general headings and details. In this Table, newly added to original SSA steps are indicated by bold letters. Fitness evaluation, vibration generation, mask changing, and spider random walk steps are taken from SSA and used similarly in ISSA.

Table1. General headings of the working steps of ISSA

Initialization
Iteration
<i>Fitness evaluation</i>
<i>Vibration generation</i>
<i>Mask changing</i>
<i>Spider random walk</i>
Crossover-mutation techniques
G_{best} convergence- silent spider techniques
<i>Constraint handling</i>
Final

Crossover-mutation Schema: ISSA is avoided trapped around the local point with crossover and mutation operators. The value of crossover rate (cr) and the mutation rate (mr) is selected from the set {10%, %20, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%}. The most appropriate cr value was found to be 90%. The most appropriate mr value was found to be 10%. Let N be the number of the population size, n show the dimension of the population; Figure 4 is shown in the crossover process. Figure 5 is shown in the mutation process.

Lets $n=10$, $cr=90$, $\text{Round}(n*90)/100=9$

$N=1$.spider

0	1	1	1	1	0	1	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

$\text{rand}(N)=5$.spider

1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---



N_{new} spider in crossover process

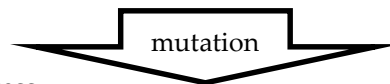
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figure 4. Crossover process

Lets $n=10$, $mr=10$, $\text{Round}(n*10)/100=1$

N_{new} spider in crossover process

1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---



N_{new} spider in mutation process

1	0	0	1	1	0	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figure 5. Mutation process

G_{best} convergence Schema: The G_{best} convergence rate (gr) is selected from the set {10%, %20, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%}. The most appropriate gr value was found to be 40%. The G_{best} convergence improves the ability of ISSA to search locally in continuous space. Let N be the number of the population size, n show the dimension of the population; Figure 6 is shown G_{best} convergence process.

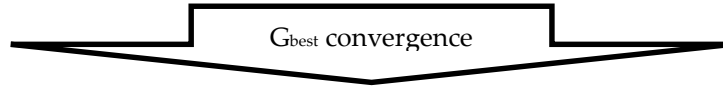
Lets $n=10$, $gr=40$, $\text{Round}(n*40)/100=4$

$N=\text{Global best spider in population}$

1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

$N=1.\text{spider}$

0	1	1	1	1	0	1	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---



N_{new} spider in G_{best} convergence process

0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figure 6. G_{best} convergence process

Silent spider Schema: The worst spider (silent spider) in the original SSA is hidden throughout each iteration. This spider has a small effect on the optimum result. ISSA has determined and omitted the worst spider (silent spider) and has added a new random spider ($\text{spider}_{\text{new}}$) which can possibly have more effect on the optimum result. The fitness value of the new spider is controlled while adding it. If the fitness value of the new spider is worse than the fitness value of the worst spider (silent spider) of the population, it is never added to the population. The system preserves existing population members. If the fitness value of the new spider is better than the fitness value of the worst spider (silent spider) of the population, the silent spider is omitted from the population and a new spider is replaced ($\text{spider}_{\text{new}}$). So, a predetermined fixed population amount is preserved. This process is repeated throughout each iteration. Figure 7 is shown a silent spider process.

Lets $N=5$, $n=10$

Current Spider population($N \times n$)(5×10)

1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
1	0	1	1	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	0	1	0

$N=3$ (the worst spider in population) (silent spider)

0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---



Spider_{new} (It is randomly generated)

1	0	1	0	0	1	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---



New Spider population($N \times n$)(5×10)

1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
1	0	1	1	0	1	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1	0	1	1	1
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	0	1	0

Figure 7. Silent spider process

Figure 8 shows a flowchart of ISSA and Figure 9 shows pseudocode of the ISSA.

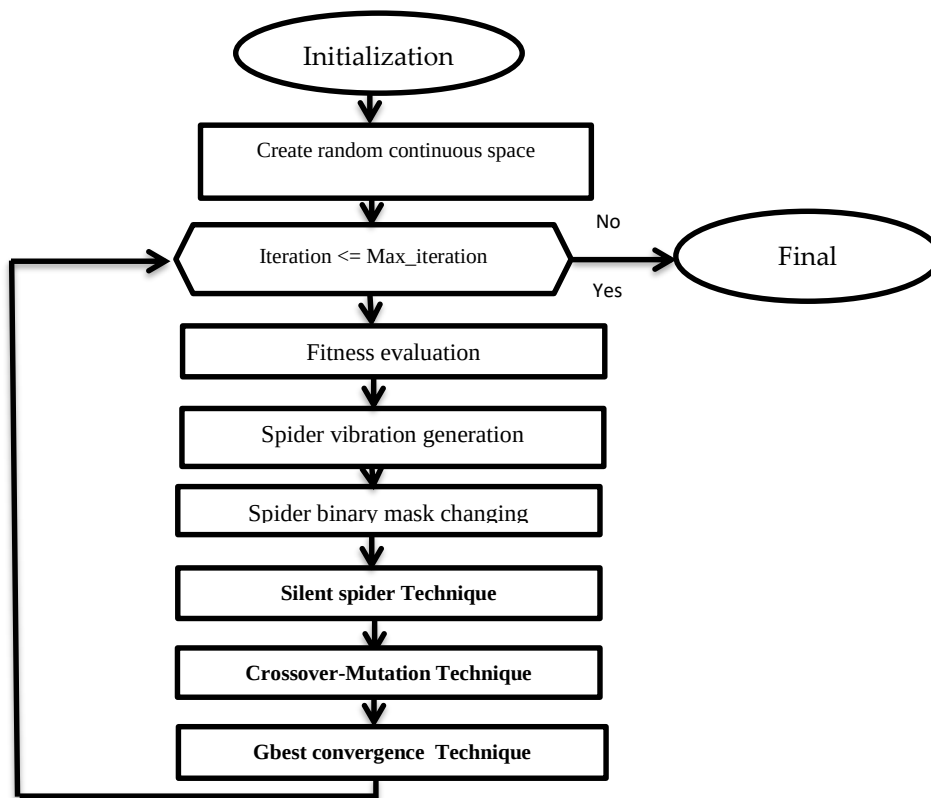


Figure 8. Flowchart For ISSA

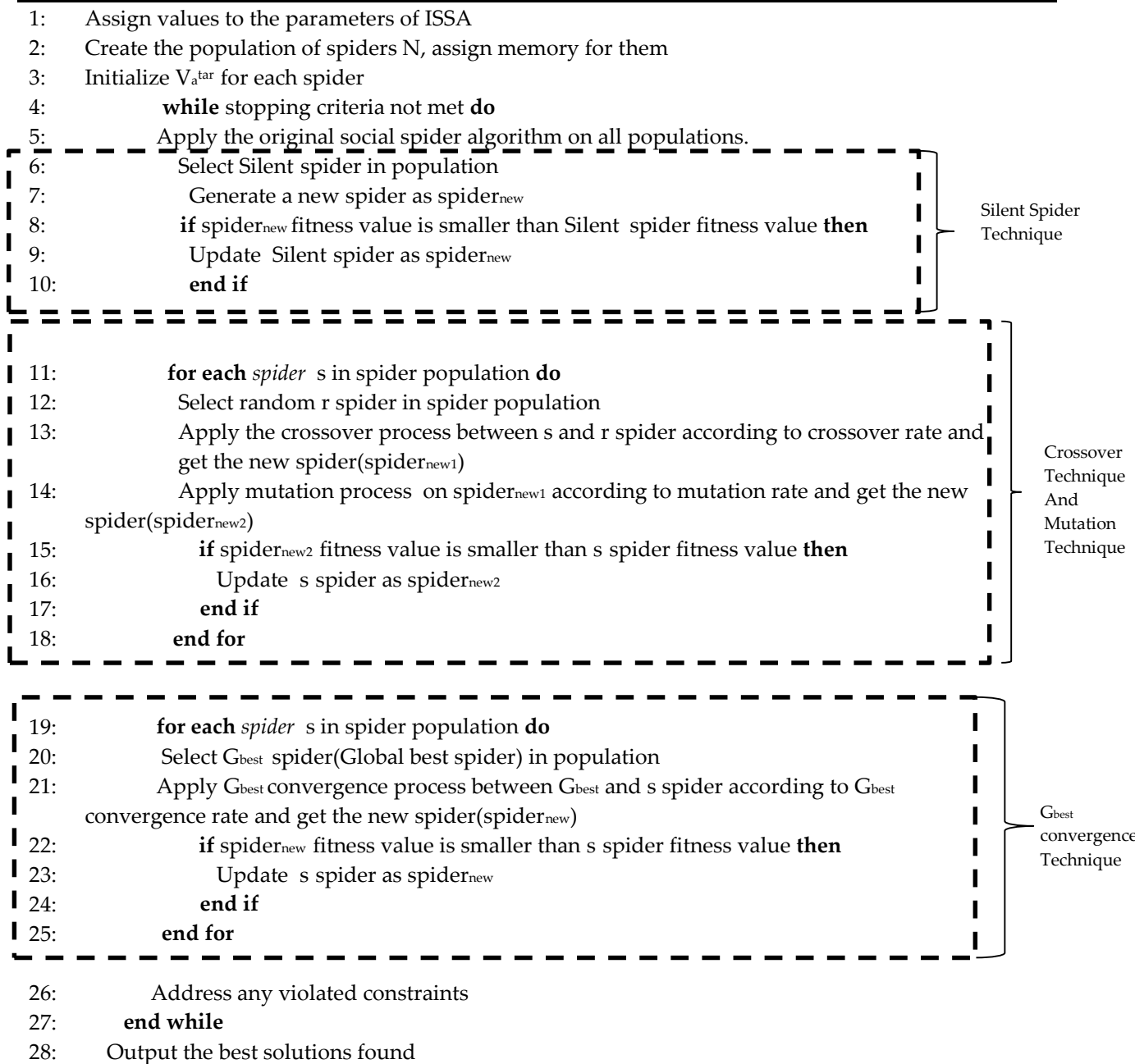


Figure 9. Pseudocode of the ISSA

6. EXPERIMENTAL RESULTS AND ANALYSIS

ISSA and SSA are tested on Matlab R2014a that installed over windows 7, 64 bit, the system of 2.30 GHz processor with 4GB RAM. Common parameters used in ISSA and SSA comparison, which are population size (N), dimension (n), maximum iteration values, r_a value, p_c value, p_m value, crossover rate (cr), mutation rate (mr), and G_{best} convergence rate (gr) are shown in Table 2. The values of r_a , p_c , p_m are taken directly from SSA. The values of cr , mr , and gr are selected from the set {10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%}. In experimental studies, thirteen different unimodal and multimodal benchmark functions, which are shown in Table 3 with ISSA and SSA, are solved separately. The performance of ISSA is solved on both the global optimization problems and molecular potential energy problems, respectively.

Table 2. Parameters setup for ISSA and SSA

Parameters	Values
Population size (N)	25
Dimension (n)	{30, 100, 400, 1000}
Maximum iteration	1000
Crossover rate (cr)	90%
Mutation rate (mr)	10%
G _{best} Convergence rate (gr)	40%
N _{run}	20
Other parameters	r _a =1; p _c =0.7; p _m =0.1 (Yu and Li, 2015)

Table 3. Classical Benchmark functions used in the experimental study.

Type	Name	Function	Range	f_{minimum}
Unimodal	F1	$\sum_{i=1}^n x_i^2$	$[-100,100]^n$	$f(x^*)=0$
	F2	$\sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	$[-10,10]^n$	$f(x^*)=0$
	F3	$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	$[-100,100]^n$	$f(x^*)=0$
	F4	$\max_i x_i , 1 \leq i \leq n$	$[-100,100]^n$	$f(x^*)=0$
	F5	$\sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	$[-30,30]^n$	$f(x^*)=0$
	F6	$\sum_{i=1}^n ([x_i + 0.5])^2$	$[-100,100]^n$	$f(x^*)=0$
	F7	$\sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{random}[0,1)$	$[-1.28,1.28]^n$	$f(x^*)=0$
Multimodal	F8	$\sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	$[-500,500]^n$	$f(x^*)=-418.9829 \times n$
	F9	$\sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	$[-5.12,5.12]^n$	$f(x^*)=0$
	F10	$-20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + \exp(1)$	$[-32,32]^n$	$f(x^*)=0$
	F11	$\frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos \left(\frac{x_i}{\sqrt{i}} \right) + 1$	$[-600,600]^n$	$f(x^*)=0$
	F12	$1 - \cos \left(2\pi \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \right) + 0.1 \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$	$[-100,100]^n$	$f(x^*)=0$
	F13	$-\sum_{i=1}^n \sin(x_i) \sin^{2m} \left(\frac{ix_i^2}{\pi} \right)$	$[0,\pi]^n$	n=30: $f(x^*)=-29,6309$; n=100: $f(x^*)=-99.6201940166$; n=400: $f(x^*)=-399,616795138572$; n=1000: $f(x^*)=-999.6161052093$

Benchmark functions divide into two groups according to their type as unimodal and multimodal benchmark functions. Functions F1-F7 (unimodal), which have only one global optimum

and can evaluate the exploitation capability of the investigated algorithms. Functions F8–F13 (multimodal), which include many local optima whose number increases exponentially with the problem size, become highly useful when the purpose is to evaluate the exploration capability of the investigated algorithms. These functions are obtained from various sources (Tawhid and Ali, 2017a; Yu and Li, 2015; Surjanovic and Bingham, 2017).

For each benchmark function, two measures are used to evaluate the performance of each algorithm to solve this function. These measures include (1) Average (Mean) and (2) Standard deviation (S.D.). They defined as in Table 4. Where N_{run} represents the total number of runs.

Table 4. Performance measure

Mean	$\text{Mean} = \frac{1}{N_{run}} \times \sum_{i=1}^{N_{run}} \text{Fitness_func}_i$
Standard Deviation	$\text{S. D.} = \sqrt{\frac{1}{N_{run}} \sum_{i=1}^{N_{run}} (\text{Gbest}_i - \text{Mean})^2}$

6.1. Determine of crossover, mutation, and G_{best} convergence rates

To determine the crossover rate (cr), population size = 25, dimension=30 and maximum iteration = 1000 parameter values are selected for ISSA. The crossover rate (cr) is tested in randomly selected five different unimodal benchmark functions (F1, F2, F4, F5, and F7) and randomly selected five different multimodal benchmark functions (F8, F9, F10, F11, and F13). Each benchmark function is run 20 times. Mean are done for obtained benchmark function results. Table 5 shows the results obtained. According to the results, the crossover rate (cr) is selected at 90%.

Table 5. Determine the crossover rate (cr) in 10 different unimodal and multimodal benchmark functions.

F	Crossover rate (cr)								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
F1	27004,4900	26156,1900	17520,1100	18324,9400	10140,2200	8790,2180	7135,4120	3347,9670	1175,5600
F2	66,20135	69,99781	55,3307	53,31256	35,07983	37,10695	20,20037	22,91025	11,5507
F4	49,85766	45,78515	35,00857	28,66598	22,04498	21,00766	19,00288	20,91694	19,2189
F5	47536115	30431267	20364778	9716929	5907726	2776247	970753,500	1060099	38362,99
F7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
F8	-3112,3900	-2690,1100	-2947,0400	-2547,1600	-3073,5100	-	-3227,9500	-	-
F9	244.9703	257,9103	188,5917	152.5475	112,2209	2572,2100	92,60459	64,57314	2949,1200
F10	18,92449	17,49768	17,00651	17,20581	15,78174	92,60459	64,57314	42,30282	36,73263
F11	283,2028	232,6389	188,1118	146,7355	84,3342	14,79526	13,53442	11,89024	10,78819
F13	-8,78887	-9,00019	-8,67862	-9,16455	-8,73005	78,03849	54,26156	23,68114	9,374057
						-9,33821	-8,90599	-9,10591	-9,18917

To determine the mutation rate (mr), population size = 25, dimension=30 and maximum iteration = 1000 parameter values are selected for ISSA. The mutation rate (mr) is tested in randomly selected five different unimodal benchmark functions (F1, F2, F4, F5, and F7) and randomly selected five different multimodal benchmark functions (F8, F9, F10, F11, and F13). Each benchmark function is run 20 times. Mean are done for obtained benchmark function results. Table 6 shows the results obtained. According to the results, the mutation rate (mr) is selected at 10%.

Table 6. Determine the mutation rate (mr) in 10 different unimodal and multimodal benchmark functions.

F	Mutation rate (mr)								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
F1	0,394634	0,702821	0,758151	0,617514	0,702059	0,671051	0,751396	0,905282	0,814592
F2	0,141074	0,134244	0,168751	0,210592	0,1827	0,199393	0,208086	0,208631	0,187357
F4	18,04599	21,89031	23,99734	24,45129	26,38615	25,51669	25,80048	24,79854	25,72667
F5	282,6736	313,285	327,3802	383,4963	331,8956	429,427	360,3212	383,9664	424,8467
F7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
F8	-3325,990	-4201,030	-4000,200	-4730,400	-4522,850	-5123,600	-4961,060	-4514,820	-4711,540
F9	56,78534	53,34603	49,45195	46,10922	45,66494	47,71347	50,04745	45,39075	46,79847
F10	0,267519	0,316517	0,354352	0,340763	0,364685	0,317098	0,30045	0,390763	0,412149
F11	0,679518	0,745935	0,752064	0,819712	0,825792	0,84922	0,777499	0,923743	0,826685
F13	-8,9389	-9,15235	-9,13946	-8,75084	-9,03193	-9,09553	-9,04802	-9,04717	-8,79987

To determine the G_{best} convergence rate (gr), population size = 25 and maximum iteration = 1000 parameter values are selected for ISSA. The G_{best} convergence rate (gr) is tested in randomly selected five different unimodal benchmark functions (F1, F2, F4, F5, and F7) and randomly selected five different multimodal benchmark functions (F8, F9, F10, F11, and F13). Each benchmark function is run 20 times. Mean are done for obtained benchmark function results. Table 7 shows the results obtained. According to the results, the convergence rate (gr) is selected at 40%.

Table 7. Determine the G_{best} convergence rate (gr) in 10 different unimodal and multimodal benchmark functions.

F	G_{best} convergence rate (gr)								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
F1	0,2992	0,2075	0,1135	0,1014	0,3617	2,5722	1,4404	4,1672	6,6827
F2	0,0869	0,0541	0,0385	0,0363	0,0250	0,0482	0,1329	0,2004	0,3742
F4	15,3631	12,6156	10,9124	9,0924	8,6100	7,9092	8,8164	9,8505	8,7613
F5	252,0041	287,4710	230,5190	141,4368	317,3710	360,8188	708,5943	481,9163	643,2990
F7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
F8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F9	6,3339e+03 50,7249	5,0872e+03 49,6798	7,6181e+03 38,4998	8,2660e+03 32,6286	1,0197e+04 25,8040	1,2587e+04 16,9285	1,0404e+04 9,2235	1,3402e+04 7,4238	1,4866e+04 5,7207
F10	0,1855	0,1092	0,1908	0,3017	0,6169	0,8428	1,3251	1,3012	1,7077
F11	0,5491	0,4383	0,3003	0,1847	0,3639	0,5313	0,8443	1,0359	1,0551
F13	-9,4599	-8,8794	-9,1509	-8,6585	-9,2841	-8,9549	-8,5483	-8,9557	-8,5900

6.2. The contribution of crossover (cr), mutation (mr), G_{best} convergence (gr), and silent spider techniques to the proposed algorithm

Each developed technique is applied individually with ISSA and its contribution to ISSA has been demonstrated. Each benchmark function is run 20 times. Mean and standard deviation (S.D.) are done for obtained benchmark function results. The results are shown in Tables 8 and 9. According to obtain results, all techniques have improved ISSA's local and global search capabilities. G_{best} convergence

and silent spider techniques are had good performance except for F5 and F6. G_{best} convergence and silent spider techniques have improved ISSA's local and global search capabilities. Crossover and mutation techniques are had sufficiently good performance except for F8, F12, and F13.

Table 8. The comparison of ISSA with cr, mr, gr, and silent spider techniques on dimension = {30}, the maximum number of iterations = 1000 in unimodal and multimodal benchmark functions.

F	ISSA							
	cr		mr		gr		silent spider	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
<i>F1</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F2</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F3</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F4</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F5</i>	178,9085	60,0856	177,8799	60,6647	183,7258	96,9333	231,9934	79,9607
<i>F6</i>	15,7213	6,7661	14,1819	4,1252	14,2264	4,1434	14,1882	4,1691
<i>F7</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F8</i>	-4,37e+03	8359,600	-3,29e+03	7960,018	-6,47e+03	4730,590	-6,60e+03	2650,303
<i>F9</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F10</i>	6,18e-10	0,00E+00	6,18e-10	0,00E+00	8,88e-16	0,00E+00	8,88e-16	0,00E+00
<i>F11</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F12</i>	0,6215	0,2514	11,7313	1,4812	0,1203	0,2302	0,3289	0,6639
<i>F13</i>	-8,4004	0,7053	-8,4930	0,7034	-8,7114	0,6902	-9,0613	0,6941

Table 9. The comparison of ISSA with cr-mr, and gr-silent spider techniques on dimension = {30}, the maximum number of iterations = 1000 in unimodal and multimodal benchmark functions.

F	ISSA			
	cr-mr		gr-silent spider	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
<i>F1</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F2</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F3</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F4</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F5</i>	177,8799	60,0856	180,71421	66,4571
<i>F6</i>	13,1852	3,8091	14,1852	4,7590
<i>F7</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F8</i>	-5,10e+03	3730,5997	-6,60e+03	2650,303
<i>F9</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F10</i>	8,18e-15	0,00E+00	8,88e-16	0,00E+00
<i>F11</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F12</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F13</i>	-8,5613	0,6802	-8,7613	0,6602

6.3. The general performance of the ISSA and SSA on low-scaled and large-scale optimization problems

ISSA is tested in seven unimodal benchmark functions. Each benchmark function is run 20 times. Mean and standard deviation (S.D.) are done for obtained benchmark function results. Mean and standard deviation (S.D.) comparison results, which are obtained for unimodal benchmark functions (F1-F7) by selecting population size (N) =25 and maximum iteration=1000 values for ISSA, are shown in Table 10. According to obtain results, ISSA is had super performance except for F5 and F6.

Table 10. The performance of ISSA with dimension = {30, 100, 400, 1000}, maximum number of iterations = 1000, population size = 25 in unimodal benchmark functions. S.D. is the standard deviation; Mean is the average of the unimodal benchmark function results.

		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
30	Mean	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,78E+02	1,29E+01	0,00E+00
	S.D.	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,16E+01	3,59E+00	0,00E+00
100	Mean	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,15E+04	9,04E+01	0,00E+00
	S.D.	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,13E+04	1,29E+01	0,00E+00
400	Mean	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,57E+07	9,04E+01	0,00E+00
	S.D.	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,72E+06	1,29E+01	0,00E+00
1000	Mean	3,04E+05	inf	0,00E+00	0,00E+00	9,99E+02	6,97E+02	0,00E+00
	S.D.	2,60E+04	NaN	0,00E+00	0,00E+00	1,45E-02	1,39E+01	0,00E+00

ISSA is tested on six multimodal benchmark functions. Each benchmark function is run 20 times. Mean and standard deviation (S.D.) are done for obtained benchmark function results. Mean and standard deviation (S.D.) comparison results, which are obtained for multimodal benchmark functions (F8-F13) by selecting population size (N) =25 and maximum iteration=1000 values for ISSA, are shown in Table 11. According to obtain results, ISSA is had super performance except for F8, F10, and F13.

Table 11. The performance of ISSA with dimension = {30, 100, 400, 1000}, maximum number of iterations = 1000, population size = 25 in multimodal benchmark functions.

		F8	F9	F10	F11	F12	F13
30	Mean	-8,73E+03	0,00E+00	8,88E-16	0,00E+00	0,00E+00	-8,74E+00
	S.D.	2,67E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,64E-01
100	Mean	-2,02E+04	0,00E+00	8,88E-16	0,00E+00	0,00E+00	-2,12E+01
	S.D.	4,82E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,99E-01
400	Mean	-5,08E+04	0,00E+00	8,88E-16	0,00E+00	0,00E+00	-6,97E+01
	S.D.	2,57E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,95E+00
1000	Mean	-9,41E+04	0,00E+00	8,88E-16	0,00E+00	0,00E+00	-1,61E+02
	S.D.	3,42E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,97E+00

Original SSA and proposed ISSA are tested in low-scaled and large-scaled three different dimensions (dimension={30, 100, 1000}), thirteen different unimodal and multimodal benchmark functions. Each benchmark function is run 20 times. Mean and standard deviation are done for obtained benchmark function results. Mean and standard deviation comparison results, which are obtained for unimodal and multimodal benchmark functions by choosing dimension={30, 100}), and population size=25, maximum iteration=1000 values equally for original SSA and ISSA, are shown in Table 12. Mean and standard deviation comparison results, which are obtained for unimodal and multimodal benchmark functions by choosing dimension={1000}), and population size=25, maximum iteration=1000 values equally for original SSA and ISSA, are shown in Table 13. The results of the high performance of the ISSA are bold. According to the results, ISSA has shown better performance than SSA in unimodal

benchmark functions. According to the results, ISSA has shown better performance than SSA in multimodal benchmark functions.

Figure 10 is shown ISSA and SSA convergence graphs for unimodal $F1$ and $F4$, and multimodal $F9$ and $F10$ benchmark functions. According to the convergence graphs results, the optimal solutions are obtained with ISSA.

Table 12. The comparison of SSA and ISSA with dimension = {30, 100}, maximum number of iterations = 1000 in unimodal and multimodal benchmark functions.

F	Dimension=30				Dimension=100			
	SSA		ISSA		SSA		ISSA	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
$F1$	1,49E+00	7,48E-01	0,00E+00	0,00E+00	5,67E+02	1,18E+02	0,00E+00	0,00E+00
$F2$	5,23E-01	3,53E-01	0,00E+00	0,00E+00	8,51E+40	1,76E+41	0,00E+00	0,00E+00
$F3$	2,51E+02	7,02E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,38E+03	6,38E+02	0,00E+00	0,00E+00
$F4$	3,42E+01	3,18E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,35E+01	3,35E+00	0,00E+00	0,00E+00
$F5$	4,79E+02	1,04E+02	1,78E+02	6,16E+01	5,99E+04	1,85E+04	3,15E+04	1,13E+04
$F6$	4,27E+00	9,43E-01	1,23E+00	4,58E-01	6,79E+01	5,66E+00	6,56E+01	2,70E+00
$F7$	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
$F8$	-2,80E+03	9,54E+02	-8,73E+03	2,67E+03	-4,82E+03	9,31E+02	-2,02E+04	4,82E+03
$F9$	4,45E+01	7,80E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,36E+02	3,00E+01	0,00E+00	0,00E+00
$F10$	6,75E-01	2,14E-01	8,88E-16	0,00E+00	4,77E+00	2,45E-01	8,88E-16	0,00E+00
$F11$	9,96E-01	3,36E-02	0,00E+00	0,00E+00	6,42E+00	8,80E-01	0,00E+00	0,00E+00
$F12$	8,52E+01	5,76E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,32E+02	1,51E+01	0,00E+00	0,00E+00
$F13$	-8,87E+00	7,17E-01	-9,03E+00	7,27E-01	-2,07E+01	9,87E-01	-2,22E+01	1,48E+00

Table 13. The comparison of SSA and ISSA with dimension = {1000}, population size=25, maximum number of iterations = 1000 in the unimodal and multimodal benchmark functions.

F	Dimension=1000			
	SSA		ISSA	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
$F1$	3,18E+05	1,20E+04	3,04E+05	2,60E+04
$F2$	Inf	NaN	Inf	NaN
$F3$	1,41E+03	1,93E+04	0,00E+00	0,00E+00
$F4$	9,94E+01	1,33E-01	0,00E+00	0,00E+00
$F5$	2,61E+08	2,09E+07	9,99E+02	1,45E-02
$F6$	2,52E+03	6,26E+01	6,97E+02	1,39E+01
$F7$	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
$F8$	-1,48E+04	3,79E+03	-9,41E+04	3,42E+04
$F9$	1,02E+04	1,46E+02	0,00E+00	0,00E+00
$F10$	1,54E+01	1,67E-01	8,88E-16	0,00E+00
$F11$	2,83E+03	1,35E+02	0,00E+00	0,00E+00
$F12$	8,73E+02	1,65E+01	0,00E+00	0,00E+00
$F13$	-1,41E+02	2,36E+00	-1,57E+02	2,18E+00

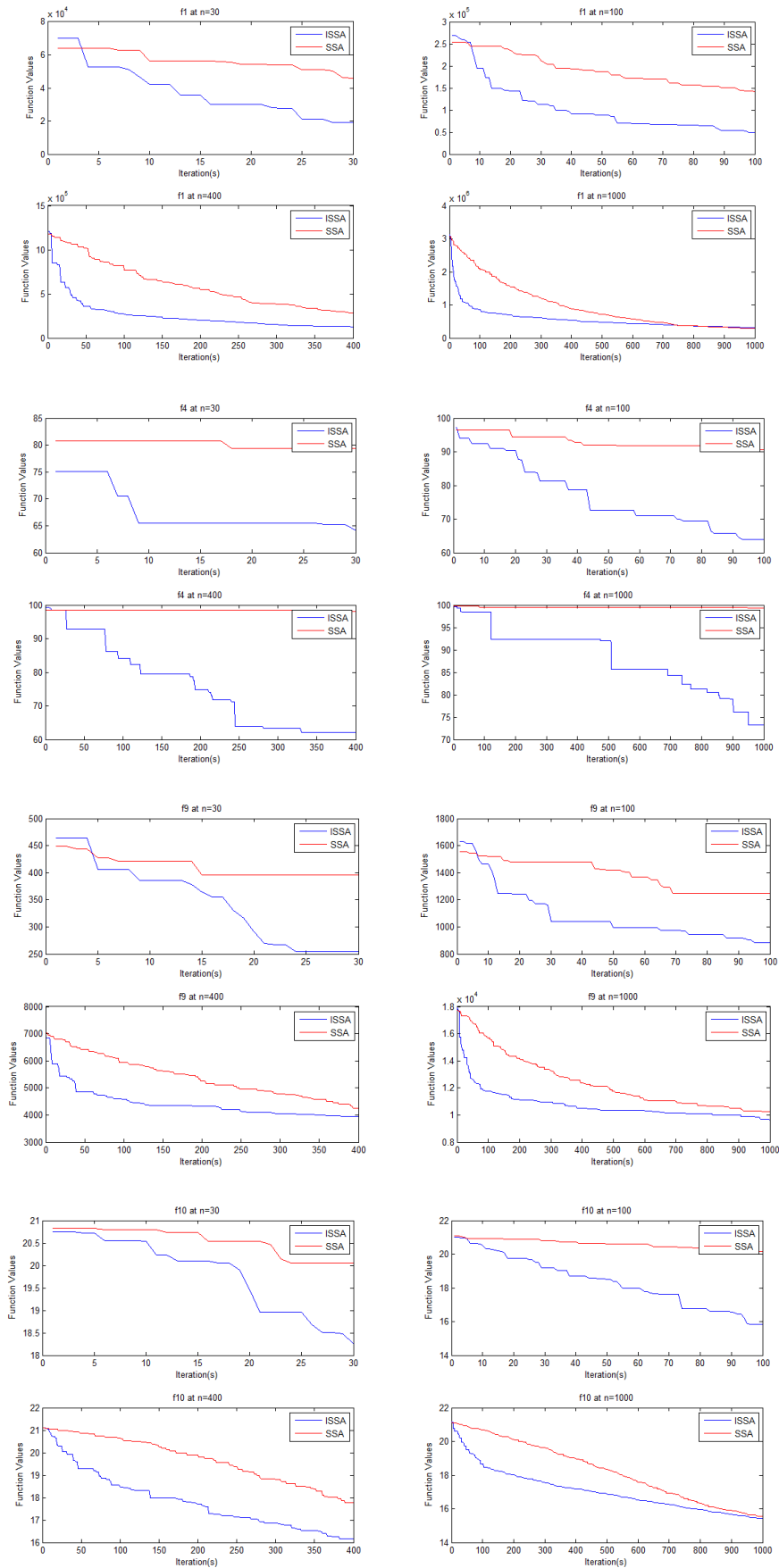


Figure 10. Convergence graphs for ISSA and Original SSA for benchmark functions (F1, F4, F9, and F10)

Wilcoxon signed-rank test is a pairwise test that aims to detect significant differences between the behavior of two algorithms (Acilar, 2013). In this paper, SSA-ISSA algorithms are operated with 20 times various unimodal and multimodal benchmark functions with the dimension $(n)=\{30, 100, 1000\}$, population size=25 and maximum iteration=1000 equal parameter and 20 trials are done in each dimension for each benchmark function and thirteen data sets are obtained. The results are shown in Table 14 for unimodal benchmark functions, Table 15 shows the multimodal benchmark In Wilcoxon signed-rank test, alpha is selected as 0.05 (Acilar, 2013). p is the probability of the null hypothesis is true. p values of the hypothesis are calculated by using Matlab R2014a software. According to the obtained results, there is a semantic difference between the results obtained from SSA and ISSA heuristic algorithms. The results showed that the ISSA has superior performance on thirteen unimodal and multimodal benchmark functions.

Table 14. Wilcoxon signed-rank test on SSA and ISSA in dimension= $\{30, 100, 1000\}$, maximum number of iterations = 1000, population size=25 in unimodal benchmark functions.

F	$n=30$		$n=100$		$n=1000$	
	ISSA(p)	h	ISSA(p)	h	ISSA(p)	h
$F1$	0,0419	1	0,9698	0	0,9097	0
$F2$	0,0211	1	0,0472	1	-	-
$F3$	1	0	0,0444	1	-	-
$F4$	0,5708	0	0,0757	0	0,2730	0
$F5$	0,0123	1	0,6756	0	0,9097	0
$F6$	0,9475	0	1	0	0,8172	0
$F7$	NaN	0	NaN	0	NaN	0

Table 15. Wilcoxon signed-rank test on SSA and ISSA in dimension= $\{30, 100, 1000\}$, maximum number of iterations = 1000, population size=25 in multimodal benchmark functions.

F	$n=30$		$n=100$		$n=1000$	
	ISSA(p)	h	ISSA(p)	h	ISSA(p)	h
$F8$	0,0247	1	0,0474	1	0,0408	1
$F9$	0,9698	0	0,7337	0	0,0103	1
$F10$	0,0452	1	0,7337	0	0,0474	1
$F11$	0,0123	1	0,0274	1	0,7337	0
$F12$	0,0447	1	0,0257	1	0,0001	1
$F13$	0,0347	1	0,0457	1	1	0

6.4. The General Performance Of The ISSA For Minimizing The Potential Energy Function

We compare ISSA with SSA on dimension= $\{20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200\}$. According to the results, the performance of ISSA is better than the performance of SSA on the MPEF problem. The results are shown in Table 16.

Table 16. The comparison results of ISSA and SSA on dimension = {20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200}.

n	SSA	ISSA
20	15,9100	13,5926
40	33,1715	32,5559
60	57,0631	48,4384
80	76,7605	66,3655
100	98,2967	78,4906
120	110,91	105,76
140	130,45	124,16
160	160,79	148,94
180	170,53	156,09
200	187,36	186,60

ISSA is compared in two different method series. In the first series, WX-PM, WX-LLM, LX-LLM and LX-PM which are variants of the GA, and ISSA are compared in molecular potential energy function in equal comparison parameters (Deep *et al.*, 2012; Deep and Thakur, 2007a; Deep and Thakur, 2007b). In the second series, VNS-123 which consists of a variable neighborhood search-based method, and ISSA are compared in molecular potential energy function in equal comparison parameters (Dražić *et al.*, 2008). rHYB method expresses a hybrid genetic algorithm (Barbosa *et al.*, 2005). The parameters settings used in all comparison algorithms are shown in Table 17.

Table17. The parameters settings of all algorithms

Key	Method Name
VNS-123	The combination of the VNS-1, VNS-2, and VNS-3 is made to diversify the search.
WX-PM	Crossover operator=WX and mutation operator=PM
WX-LLM	Crossover operator=WX and mutation operator=LLM
LX-LLM	Crossover operator=LX and mutation operator=LLM
LX-PM	Crossover operator=LX and mutation operator=PM
rHYB	
Common settings	Population size: N = 25; number of runs = 20; maximum iterations = [400-4000]; n=[20-200]

The function E in (1) is minimized in the specified search space $[0, 5]^n$. The function E grows linearly with n as $E^*(n) = -0.0411183n$ (Lavor and Maculan, 2004) as shown in Table 18.

Table 18. Global minimum value E^* for different sizes

n	E^*
20	-0,822366
40	-1,644732
60	-2,467098
80	-3,289464
100	-4,111830
120	-4,934196
140	-5,756562
160	-6,578928
180	-7,401294
200	-8,22366

The performance of ISSA is compared to SSA, VNS-123, WX-PM, WX-LLM, LX-LLM, LX-PM, and rHYB in dimension={20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200} on MPEF problem. We take the results of comparison algorithms directly from (Barbosa *et al.*, 2005; Dražić *et al.*, 2008; Deep *et al.*, 2012; Deep and Thakur, 2007a; Deep and Thakur, 2007b). The results are shown in Tables 19 and 20. Results of successful SSA are made in bold text.

Table 19. The comparison results of ISSA on dimension = {20, 40, 60, 80, 100}.

n	WX-PM	LX-PM	WX-LLM	LX-LLM	ISSA
20	15,574	23,257	28,969	14,586	13,5926
40	59,999	71,336	89,478	39,366	32,5559
60	175,865	280,131	225,008	105,892	48,4384
80	302,011	326,287	372,836	237,621	66,3655
100	369,376	379,998	443,786	320,146	78,4906

Table 20. The comparison results of ISSA on dimension = {20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200}.

n	VNS-123	GA	rHYB	ISSA
20	23,381	36,626	35,836	13,5926
40	57,681	133,581	129,611	32,5559
60	142,882	263,266	249,963	48,4384
80	180,999	413,948	387,787	66,3655
100	254,899	-	-	78,4906
120	375,970	-	-	105,76
140	460,519	-	-	124,16
160	652,916	-	-	148,94
180	663,722	-	-	156,09
200	792,537	-	-	186,60

6.5. Discussion about ISSA

In this paper, the original SSA is improved by adding four techniques. Exploration and exploration ability of SSA is increased with these techniques. Crossover (cr) and G_{best} convergence (gr) techniques allow ISSA to escape from the local traps in the search space and ISSA's local search capability is improved. Mutation (mr) and silent spider techniques allow ISSA to discover new points in search space. Thus, local optimum and global optimum points are guaranteed for ISSA. According to results, ISSA with G_{best} convergence and silent spider techniques shows performance at roughly 84,62% of benchmark functions for 11 out of 13 benchmark functions except for F5 and F6. ISSA with crossover (cr) and mutation (mr) techniques show performance at roughly 76,92% of benchmark functions for 10 out of 13 benchmark functions except for F8, F10, and F13. The results showed that none of the methods alone proved superior to all benchmark functions. All techniques develop a different ability of ISSA. G_{best} convergence and silent spider techniques developed ISSA's exploration and exploitation ability in multimodal functions, but not all unimodal functions. This is due to the low success of the silent spider technique in discovering new points, and the fact that the worst spiders are not thrown out of the system during each iteration. Furthermore, with the G_{best} convergence technique, some of the population members resemble the best spider of iteration. However, if the best spider of iteration is not the optimum point in the search space, it reduces the success of the algorithm. Therefore, while G_{best} convergence and silent spider techniques achieve 100% success in multimodal functions, they have not achieved in unimodal functions. Crossover and mutation techniques developed ISSA's exploration and exploitation ability in unimodal functions, but not all multimodal functions. This is because multimodal functions are more than one point of optimum and techniques can not discover these optimum points.

7. CONCLUSION

Social spider algorithm (SSA) is a heuristic algorithm that is created by imitating spider behaviors in nature. SSA regulates search space of optimization problems as a high dimensional spider web. SSA can be easily adapted to real-world problems and an easy to apply heuristic algorithm. In this paper, the original social spider optimization algorithm is studied details, an improved SSA (ISSA) based on SSA has been developed and applied on MPEF problem. MPEF problem is difficult to solve. Because the number of local minima increases exponentially with the molecular size. Four different techniques (Crossover, mutation, G_{best} convergence, and silent spider) are developed during the candidate solutions production schema in ISSA. With these four techniques, the ability of ISSA to search locally and globally in continuous space has been developed. The value of crossover rate (cr), mutation rate (mr), and G_{best} convergence rate (gr) are tested from the set {10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%} on ten different unimodal and multimodal benchmark functions. The most suitable values for these parameters are determined. The performances of SSA and ISSA are tested on thirteen unimodal and multimodal benchmark functions and the results obtained from SSA and ISSA are compared. Wilcoxon test was performed on the obtained results. The results showed that the ISSA has superior performance. The performance of the SSA and ISSA is evaluated on MPEF problem with different dimension={20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200}. The results showed that the performance of ISSA is better than the performance of SSA. The performance of the ISSA is compared to various well-known seven algorithms in the literature. The results showed that the ISSA has superior performance and ISSA can be used as an alternative preference.

In future research, hybrid SSA will be created by using different heuristic methods. The random walk scene of SSA will be developed by inspiring from different heuristic methods. Weight value will be added to SSA's search space agents and the balance between the blasting and exploration will be provided.

REFERENCES

- Acılar A.M., (2013), Yapay Bağışıklık Algoritmaları Kullanılarak Bulanık Sistem Tasarımı, Konya,Turkey, (Ph.D. thesis).
- Bansal J.C., Deep Shashi K., Katiyar V.K., (2010), Minimization of molecular potential energy function using particle swarm optimization. *Int J Appl Math Mech* 6(9):1–9.
- Barbosa H.J.C., Lavor C., Raupp F.M., (2005), A GA-simplex hybrid algorithm for global minimization of a molecular potential energy function. *Ann Oper Res* 138:189–202.
- Cuevas E., Cienfuegos M., Zaldívar D., Pérez-Cisneros M., (2013), A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider, *Expert Systems with Applications* 40, 6374–6384.
- Deep K., Barak S., Katiyar V.K., Nagar A.K., (2012), Minimization of molecular potential energy function using newly developed real coded genetic algorithms. *Int J Optim Control Theor Appl (IJOCTA)* 2(1):51–58.
- Deep K., Thakur M., (2007a), A new mutation operator for real coded genetic algorithms. *Appl Math Comput* 193(1):211–230.
- Deep K., Thakur M., (2007b), A new crossover operator for real coded genetic algorithms. *Appl Math Comput* 188(1):895–912.
- Dražić M., Lavor C., Maculan N., Mladenović N., (2008), A continuous variable neighborhood search heuristic for finding the three-dimensional structure of a molecule. *Eur J Oper Res* 185:1265–1273.
- El-bages M.S., Elsayed W.T., (2017), Social spider algorithm for solving the transmission expansion planning problem, *Electric Power Systems Research* 143, 235–243.

- Elsayed W.T., Hegazy Y.G., Bendary F.M., El-bages M.S., (2016), Modified social spider algorithm for solving the economic dispatch Problem, *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19, 1672–1681.
- Grimaccia Gandelli F., Mussetta M., Pirinoli P., Zich R.E., (2007), Development and validation of different hybridization strategies between GA and PSO. In: *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp 2782–2787.
- Grimaldi E.A., Grimacia F., Mussetta M., Pirinoli P., Zich R.E., (2004), A new hybrid genetical swarm algorithm for electromagnetic optimization, In *Proceedings of the international conference on computational electromagnetics and its applications*, Beijing, China, pp 157–160.
- Hedar A., Ali A.F., Hassan T., (2011), Genetic algorithm and tabu search-based methods for molecular 3D-structure prediction. *Numer Algebra Control Optim* 1(1):191–209.
- Holland J.H., (1975), *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Jian M., Chen Y., (2006), Introducing recombination with dynamic linkage discovery to particle swarm optimization. In: *Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference*, pp 85–86.
- Juang C.F., (2004), A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization for recurrent network design. *IEEE Trans Syst Man Cybern Part B Cybern* 34:997–1006.
- Kennedy J., Eberhart R., (1995), Particle swarm optimization, in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks*, Perth, WA, pp. 1942–1948.
- Krink T., Lvbjerg M., (2002), The lifecycle model: combining particle swarm optimization, genetic algorithms, and hill climbers. In: *Proceedings of the parallel problem solving from nature*, pp 621–630.
- Lavor C., Maculan N., (2004), A function to test methods applied to global minimization of the potential energy of molecules. *Numer Algorithms* 35:287–300.
- Mallipeddi R., Mallipeddi S., Suganthan P.N., Tasgetiren M.F., (2011), Differential evolution algorithm with an ensemble of parameters and mutation strategies, *Appl. Soft Comput.* 11 1679–1696.
- Mousa A., Bentahar J., (2016), An Efficient QoS-aware Web Services Selection using Social Spider Algorithm, *The 13th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC 2016)*, *Procedia Computer Science* 94, 176 – 182.
- Pardalos P.M., Shalloway D., Xue G.L., (1994), Optimization methods for computing global minima of the nonconvex potential energy function. *J Glob Optim* 4:117–133.
- Parpinelli R.S., Lopes H.S., (2011), New inspirations in swarm intelligence: a survey, *Int.J. Bio-Inspired Comput.* 3 (1) 1–16.
- Robinson J., Sinton S., Samii Y.R., (2002), Particle swarm, genetic algorithm, and their hybrids: optimization of a profiled corrugated horn antenna. In: *Proceedings of the IEEE international symposium in Antennas and Propagation Society*, pp 314–317.
- Settles M., Soule T., (2005), Breeding swarms: a GA/PSO hybrid. In: *Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp 161–168.
- Surjanovic S., Bingham D., (2017), Virtual library of simulation experiments: test functions and datasets, <http://www.sfu.ca/~ssurjano>.
- Talbi E.G., (2009), *Metaheuristics: From Design to Implementation*, Wiley.
- Tawhid M.A., Ali A.F., (2016), A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm with population partitioning for large scale optimization problems, *Ain Shams Engineering Journal*, xx, xxx-xxx.
- Tawhid M.A., Ali A.F., (2017a), A hybrid social spider optimization and genetic algorithm for minimizing molecular potential energy function, *Soft Computing*, 21:6499–6514 DOI 10.1007/s00500-016-2208-9.
- Tawhid M.A., Ali A.F., (2017b), A Hybrid grey wolf optimizer and genetic algorithm for minimizing potential energy function, *Memetic Comp.*, 9:347–359.

- Tawhid M.A., Ali A.F., (2017c), A Hybrid Flower Pollination and Genetic Algorithm for Minimizing the Non-Convex Potential Energy of Molecular Structure, *Trends Artif. Intell.*, 1(1):12-21.
- Wales D.J., Scheraga H.A., (1999), Global optimization of clusters, crystals, and biomolecules. *Science* 285:1368–1372.
- Yu J.Q.J., Li O.K.V., (2015), A social spider algorithm for global optimization, *Applied Soft Computing* 30 614–627.
- Yu J. J. Q., Li V. O. K., (2016), A social spider algorithm for solving the non-convex economic load dispatch problem, *Neurocomputing*, 171(C), 955–965.



AKSARAY HAMİDİYE BÖLGESİ ZEMİN DİNAMİK DAVRANIŞININ EŞDEĞER DOĞRUSAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

¹Raziye BOZKURT , ²Atıla DEMİRÖZ

^{1,2}Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Konya, TÜRKİYE

¹raziye_6nsay@hotmail.com, ²ademiroz@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 31.03.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 21.04.2020)

ÖZ: Dünyanın oluşumundan bugüne kadar, sismik açıdan aktif olan bölgelerde, depremlerin sıklıkla olduğu bilinmektedir. Yerkabuğu içindeki kırılmalara bağlı olarak ani bir şekilde ortaya çıkan titreşim dalgaları ile depremler meydana gelmektedir. Bu depremler sonucunda üzücü can ve mal kayıpları yaşanmaktadır. Ülkemizde dünyanın en etkin deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunmaktadır. Meydana gelen depremlerin de bize gösterdiği üzere; etki eden sismik yüklere karşı, yapı tasarımı kriterleri güvenilir tarafta kalmalıdır. Ayrıca yapılan analizlerle zeminin dinamik davranışı irdelenmelidir. Zeminin tabakalı yapısı da dikkate alınmalıdır. Zemin tabakaları bazı frekanslardaki deprem yüklerini karşılayabilirken, bazı deprem yüklerini de büyötmektedir. Bu nedenle depreme karşı zemin tabakalarının nasıl bir davranış sergileyeceği belirlenmelidir. Bu çalışmada Aksaray ili Hamidiye bölgesi için eşdeğer doğrusal analiz yöntemi kullanılarak bölge zeminin dinamik davranışı irdelenmiştir. Bölgede yapılan sondajlar ve sismik çalışmalar kullanılarak eşdeğer doğrusal analizler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aksaray, Eşdeğer Doğrusal Analiz, Zemin Dinamik Davranış Analizi

The Investigation of The Soil Dynamic Behavior of Aksaray Hamidiye Region by The Equivalent Analysis Method

ABSTRACT: It is known that earthquakes have been frequent in seismically active regions since the formation of the World. Due to the breaks in the earth's crust, sudden vibration waves and earthquakes occur. As a result of these earthquakes, sad life and property losses are experienced. It is located on one of the most active earthquake belts in the World in our country. As the earthquakes that occurred have shown us; structural design criteria should remain on the reliable side against the seismic loads affecting. In addition, the dynamic behavior of the ground should be examined with the analysis. The layered structure of the ground should also be taken into account. While ground layers can meet earthquake loads at some frequencies, they also increase some earthquake loads. For this reason, it should be determined how the soil layers will behave against earthquakes. In this study, dynamic behavior of the region's ground was investigated by using the equivalent analysis method for the Aksaray province Hamidiye region. Equivalent linear analyzes were carried out using soundings and seismic studies in the region.

Key Words: Aksaray, Equivalent Analysis, Soil Dynamic Behavior Analysis

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapı tasarımında zeminin genel özelliklerinin ve üzerine etki eden yüklere karşılık, zeminin sergileyeceği davranış büyük önem arz etmektedir. Zeminin maruz kaldığı sismik yükler sonucu yapı güvenliğini temel alan parametreler doğru tespit edilmelidir. Ülkemizin deprem kuşağında yer aldığı gerçeği düşünüldüğü takdirde, durumun ehemmiyeti artmaktadır. Bu doğrultuda bir deprem olması durumunda, zemin hâkim periyodunun ne olacağı yapı tasarımı açısından önemlidir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) dikkate alınarak zeminin büyütme değerlerinin analizler yardımıyla belirlenmesi gerekir. Bu nedenle, bu çalışmada, Aksaray ili Hamidiye bölgesinde daha önceden yapılan sondaj verileri ve sismik yöntemler kullanılarak elde edilen zemin kayma dalgası hızı (Vs) değerleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) dikkate alınarak, eşdeğer doğrusal analiz yöntemi ile analizleri yapılmış ve tabakaların büyütme değerlerine bağlı olarak, zeminin dinamik davranışı yorumlanmıştır.

BÖLGENİN GENEL ÖZELLİKLERİ (GENERAL FEATURES OF THE REGION)

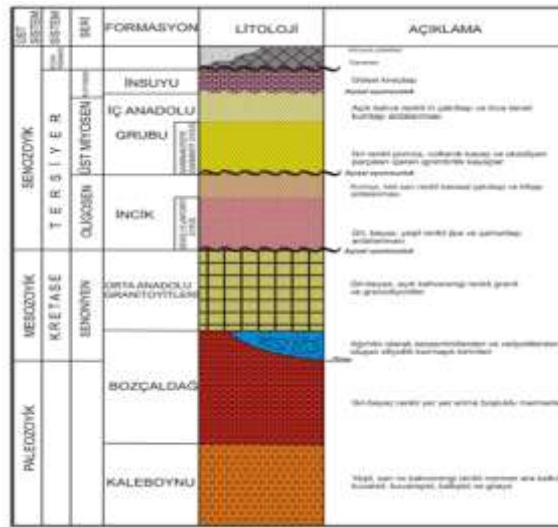
Bölgenin Coğrafi Konumu (Geographical Location of the Region)

Hamidiye mahallesi, Aksaray'ın 12 km kuzeydoğusunda yer almakta olup merkez ilçesine bağlıdır. Bölgenin içinden geçmekte olan E-90 karayolu bölgeyi ikiye bölmektedir. Bölgenin batısı Armutlu ve Kutlu kasabaları sınırlarına kadar ekilebilen oldukça geniş bir araziye sahiptir. Çalışma alanının en batı kesiminde ise Aksaray ilinin merkez ilçesine bağlı, Aksaray-Konya karayolu ulaşım ağı üzerinde bulunan Ataköy köyü vardır. Bu alan ulaşım ağı açısından oldukça gelişmiştir. Genel olarak çalışma alanı düz bir topoğrafyaya sahiptir.

Bölgenin Jeolojik Özellikleri (Geological Features of the Region)

Aksaray ilinin, imar planına yönelik, jeolojik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen veriler birleştirilip yorumlanarak, zemin profili haritaları hazırlanmıştır. Özdemir (2001), Hamidiye bölgesinde sondaj ve araştırma çukurlarından yararlanarak, jeolojik araştırmalar yapmıştır. Çalışma alanı, morfolojik ve jeolojik olarak önemli ve yerleşime uygun bulunmuştur. Er (2002), Aksaray merkezine ait jeolojik veriler derlenerek, örnek bir jeoteknik veri tabanı hazırlanmıştır. Ejderoğlu ve diğ., (2008), tarafından Aksaray ili içerisinde yer alan bazı bölgelerin imar planına esas jeolojik ve jeoteknik etüt araştırmaları yapılarak, yerleşime uygunluğu incelenmiştir. Çalışma alanından elde edilen sonuçlara göre, araştırma bölgesinin alüvyon çökellerden oluştuğu görülmüştür. Bazı bölgelerde de yeraltı suyu seviyesinin yüksek olduğu ve sıvılaşma riskinden dolayı yerleşim açısından riskli olduğu vurgulanmıştır. Akıl ve diğ., (2010), yerleşime uygunluğu araştırmak amacı ile jeolojik araştırmalar yapmışlardır. Araştırma yapılan bölgede, İç Anadolu' da gözlenen gevşek tutturulmuş kumtaşları, çakıltaşları ve İnsuyu Formasyonu'na ait kumtaşı, çakıltaşı ve kireçtaşı birimleri ile Traverten, alüvyon yelpaze ve alüvyon çökellerinin bulunduğu belirtilmiştir. Çalışma alanı yakınında, Paleozoyik yaşlı metamorfik kayalar, plutonik kayalar, İncik formasyonu, ignimbritler ve volkanik kayalar gözlenmiştir.

Aksaray il sınırlarında görülen formasyonlar; İnsuyu, İç Anadolu Grubu, İncik, Orta Anadolu Granitoyitleri, Bozçaldağ ve Kaleboynu' dur. Çalışma alanında ise; Senoniyen yaşlı Orta Anadolu granodiyoritleri, Üst Miyosen-Alt Pliyosen yaşlı İnsuyu Formasyonu'na ait birimler ile Kuvaterner yaşlı alüvyon ve alüvyon yelpaze çökelleri gözlenmektedir.



Şekil 1. Aksaray ili stratigrafi istifi (Dönmez ve diğ., 2005)

Figure 1. Aksaray stratigraphic succession (Dönmez et al., 2005)

Özetlemek gerekirse; Hamiye mahallesinde gözlenen İnsuyu formasyonuna ait birim, tabanda karnonat çimentolu çamurtaşı, çakıltaşı, kumtaşı ve kilaşı ardalanmasından ibaretken, üst seviyelerde ise görsel kireçtaşlarından oluşmaktadır. Çakıltaşları kırmızı, kirli beyaz, gri, sarı renkli olup genelde tabakasız orta kalın yapıdadır. Çakıllar kuvarsit, kireçtaşı ve metamorfik kayaç parçalarından oluşmaktadır.

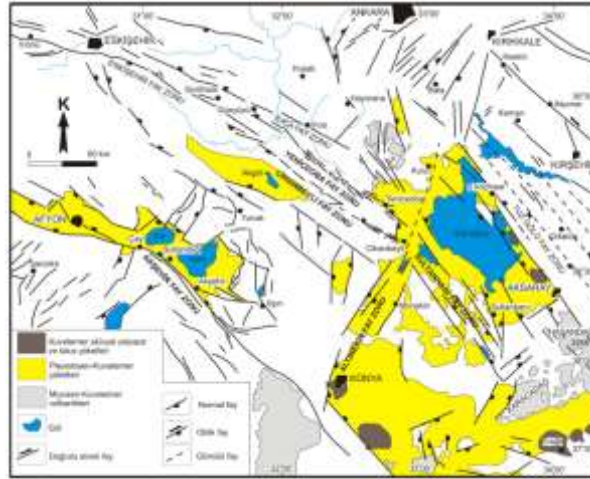
BÖLGENİN DEPREMSELLİĞİ (SEISMICITY OF THE REGION)

Depremselliğin saptanması bir olasılıksal istatistik hesabına dayanmaktadır. Aksaray ve çevresi Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasına göre beşinci derece deprem bölgesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Çalışma alanı; batı sınırı Orta Anadolu'da kısmen düşey bileşenli sağ yönlü doğrultu atımlı Tuz Gölü Fayı ile Sındırgı-Sincanlı Fay Zonu (SSFZ) arasında kalan bölgedir (Doğan ve Emre, 2006). Bu bölgeye "Orta Anadolu Bölgesi" denir. Çalışma alanına en çok etki eden fay Tuz Gölü Fayı'dır. Bunların dışında çok sayıda küçük boyutlu faylar da vardır. Tuz Gölü'nün doğusunda yer alan ve 180 km uzunluğunda olan fayın genel doğrultusu KB-GD' dur. Tuz Gölü Fayı'nın Hasandağı'nın doğusundan geçerek Bor yakınlarına kadar ulaştığı bilinmektedir. Tuz Gölü Fayı'nın Aksaray-Bor arasında kalan güney bölümü K42°B doğrultuludur.



Şekil 2. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasına (1996) göre Aksaray ili gösterimi

Figure 2. Turkey Earthquake Zones Map (1996) Aksaray representation



Şekil 3. Orta Anadolu ve çevresinin tektonik haritası (Dirik ve Erol, 2003)

Figure 3. Tectonic map of Central Anatolia and its surroundings (Dirik and Erol, 2003)

ÇALIŞMA ALANININ ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ (GROUND BEHAVIORAL ANALYSIS OF THE WORKING AREA)

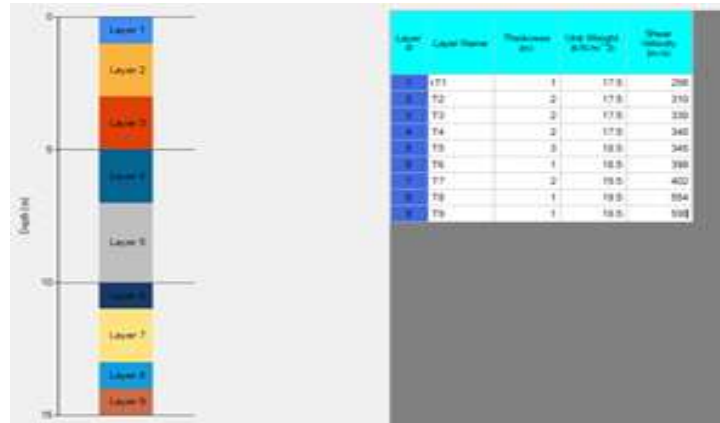
Yerkabuğunun jeomorfolojik evrimi içinde gerçekleşen depremler, yaşamın var oluşundan bugüne kadar, insanları ve insan faaliyetlerini etkileyen en etkin doğal olaylardan biri olmuştur. Depremlerin büyük can ve mal kayıplarının yaşanması, istatistiksel olarak zamanın bilinmemesi gibi nedenlerden dolayı, zeminlerin deprem olması durumunda sergileyeceği davranış incelenmelidir. Değerlendirme yapılabilmesi için, zeminin genel ve jeolojik özelliklerinin yanı sıra, sismik ölçümlerle elde edilen verilerin analiz edilerek zeminin depremselliği irdelenmelidir. Deprem anında zeminin üzerine etki eden sismik yüke karşılık, zeminin nasıl bir davranış sergileyeceği, gelen yükü zeminin sönmüleyip sönmüleyemeyeceği büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde de (TDBY, 2018) belirtildiği üzere sahaya özel deprem spektrumunun belirlenmesi amacıyla, yerel zemin sınıfı göz önüne alınarak spektral ivmeleri belirlenmelidir. Ayrıca depreme dayanıklı yapı tasarlanması hususunda yapıların maruz kalacakları deprem düzeyinin hesaplanması gerekir. Bir bölgedeki deprem tehlikesini ve riskini gösteren en önemli unsurlardan biri de yer hareketi ivmesi olarak tanımlanan deprem etkisidir. Bu değerlerin saptanabilmesi için, farklı bilgisayar yazılımları geliştirilmiştir. Yapılan

birçok çalışmada ise eşdeğer doğrusal analiz yöntemi tavsiye edilmektedir (Civelekler ve diğ., 2017). Dolayısı ile bu çalışmada, Hamidiye bölgesi zemininin, olası bir deprem anında ki dinamik davranışını tespit etmek amacı ile DeepSoil programı kullanılmıştır.

DEEPSOİL PROGRAMI VE EŞDEĞER DOĞRUSAL ANALİZLER (DEEPSOIL PROGRAM AND EQUIVALENT LINEAR ANALYSIS)

DeepSoil programı, arazide yapılan çalışmalar sonucu elde edilen verilerin kullanılması sureti ile zemininin, frekans ve zaman alanında çözümünü yapabilen bir programdır. Frekans tanım alanında bir boyutlu doğrusal ve eşdeğer doğrusal analiz ile birlikte, zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranış analizleri yapılabilmektedir (Hashash ve diğ., 2017). Bunun yanında; programında içerisinde yer alan modeller sayesinde, deprem esnasında ki boşluk suyu basıncı artışları modellenilebilmekte ve sıvılaşma analizi gerçekleştirilebilmektedir. DeepSoil programı, birden çok aşamadan oluşan bir boyutlu yer tepki analizi programıdır. Analiz sürecinin ilk aşamasında kullanılacak analiz yönteminin tanımlanması gerekir. Analiz kısmında ise sistemde kayıtlı olan geçmiş yıllara ait deprem kayıtları seçilerek analiz işlemi gerçekleştirilir.

Bu çalışmada, Hamidiye bölgesine ait sondaj verileri kullanılarak, tabakaların kalınlıkları, zemin sınıfı, zeminin birim hacim ağırlığı, zeminin kayma dalgası hızı programa kaydedilmiştir. Daha sonra zeminin malzeme özelliği dikkate alınarak sistemde kayıtlı ampirik formüllerden seçim yapılmıştır. Ayrıca frekans alanında tepki spektrumunun hesaplanabilmesi için sönüm oranının girilmesi gerekir. Sönüm oranı değeri %5 olarak seçilmiştir. Çalışmada anakaya seviyesinde 1999 Kocaeli deprem kayıt verisi kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 4. Zemin özelliklerinin DeepSoil programına kaydedilmesi

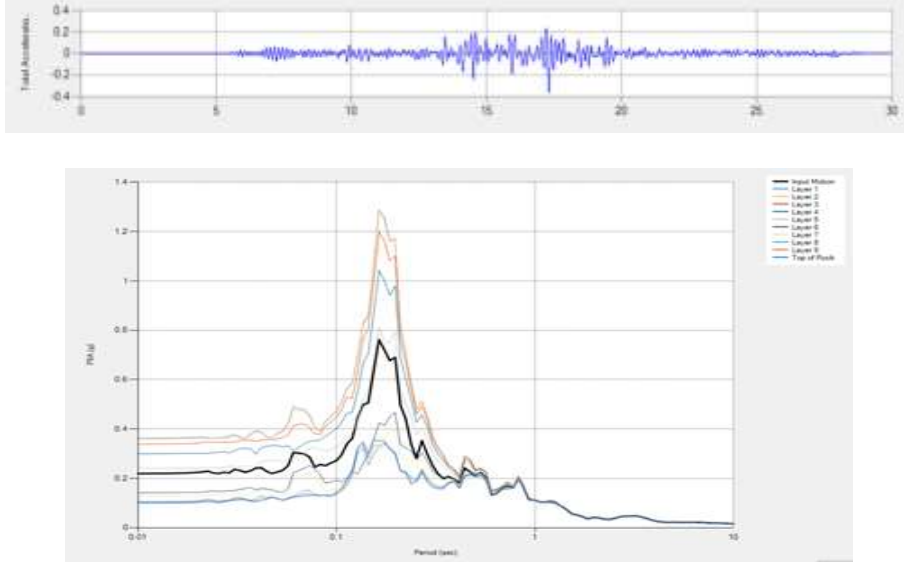
Figure 4. Recording of ground properties in DeepSoil program

DEEPSOİL PROGRAMI ANALİZ SONUÇLARI (DEEPSOIL PROGRAM ANALYSIS RESULTS)

Tasarlanan yapının her şartta güvenli tarafta kalması, beklenen en temel özelliklerden biridir. Dolayısıyla etki edebilecek olan deprem etkisini yapının deforme olmaksızın geçiştirmesi gerekmektedir. Bu durum yapının tasarım kalitesi ile alakalı olduğu kadar, zeminin bu etki karşısında nasıl bir davranış sergileyeceği ile de son derece ilgilidir. Deprem büyüklüğüne bağlı olarak, zemin dayanımı farklılık göstermektedir. Zemin etki eden depremi büyüklüğüne bağlı olarak karışlayıp sönümleyebildiği gibi, karşılayamayıp etkiyi büyütürerek farklı tabakalara da iletebilmektedir. Bu durum depremin şiddetini arttırır bir etkiye neden olmaktadır. Bu noktada, sismik analizler ve bu çalışmalar sonucu elde edilen kayma dalgası hızları önem kazanmaktadır. Kayma dalgası hızları (V_s), tabakaların derinlikleri, birim hacim ağırlıkları gibi bazı veriler kullanılarak DeepSoil vb. programlarla analizleri yapılarak, zeminin deprem anında nasıl bir duruma sebebiyet vereceği tahmin edilebilmektedir.

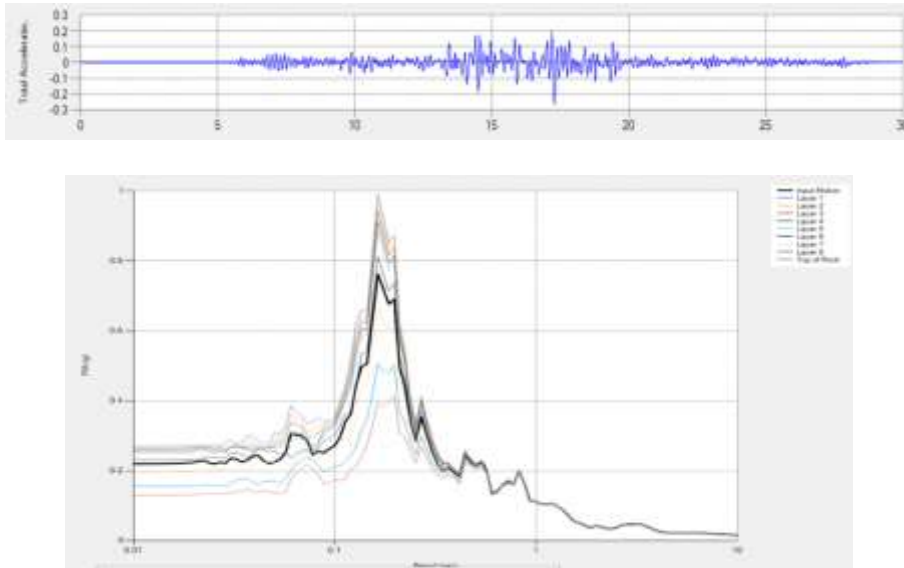
Analizler sonucu grafiksel olarak elde edilen zemin büyütme katsayıları sayesinde zemin dinamik davranışı hakkında fikir edinebilmekteyiz. Bu çalışmada da dinamik zemin özellikleri eşdeğer doğrusal

zemin büyütme analiz yöntemi ile analiz edilmiştir. Hamidiye bölgesine ait toplam 6 adet sondaj verisi kullanılmıştır. Analizler sonucunda sondajlara ait ivme zaman grafikleri, Amplifikasyon-T (periyot), Spektrum-T (periyot) grafikleri elde edilmiştir. Grafikler zeminin dinamik davranışını yansıtmaktadır.



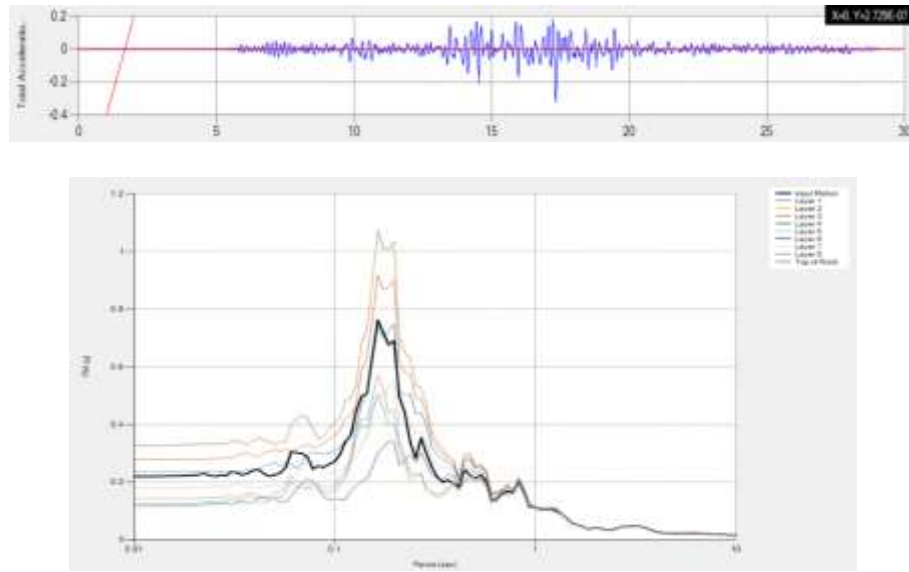
Şekil 5. Hamidiye bölgesi için SK1'e ait Kocaeli Deprem kayıtları kullanılarak elde edilen ivme ve tepki spektrumu grafikleri

Figure 5. Acceleration and response spectrum graphs obtained by using Kocaeli Earthquake records of SK1 for Hamidiye region



Şekil 6. Hamidiye bölgesi için SK3'e ait Kocaeli Deprem kayıtları kullanılarak elde edilen ivme ve tepki spektrumu grafikleri

Figure 6. Acceleration and response spectrum graphs obtained by using Kocaeli Earthquake records belonging to SK3 for Hamidiye region



Şekil 7. Hamidiye bölgesi için SK6'ya ait Kocaeli Deprem kayıtları kullanılarak elde edilen ivme ve tepki spektrumu grafikleri

Figure 7. Acceleration and response spectrum graphs obtained by using Kocaeli Earthquake records belonging to SK6 for Hamidiye region

Hamidiye bölgesi sondaj verileri değerlendirilerek analizler yapılmıştır. PSA değeri, depreme dayanıklı yapı tasarımında zemin dinamik özelliklerini gösteren esas parametrelerden biridir. Depremin tabandan etkidiği düşünülürse, PSA'nın en üst tabakadan beliren tepki olduğu söylenebilir. Gelen ivmeye karşılık en yüksek tepkidir. Zemin büyütme değerleri değerlendirildiği takdirde, SK-1' de PSA'nın 0.2 saniye içerisinde maksimum pike ulaştığı ve analiz sonuçlarının 0.1-1.3 arasında değiştiği görülmektedir. SK-3' de PSA'nın maksimum genliği 0.2 saniyede, pik değerleri ise 0.1-1.0 arasında değişmektedir. SK-6' ya göre PSA'nın maksimum genliği 0.3 saniyede, değerler ise 0.1-1.1 arasında değişmektedir. SK-1, SK-3 ve SK-6 verilerinin analiz sonuçlarına göre zemin büyütme oranları sırası ile 0.6, 0.7 ve 0.8 olarak tespit edilmiştir. Analizler incelendiğinde sondajlar aynı bölgeye ait olsalar da zemin dinamik davranış özellikleri farklılık göstermektedir.

EN BÜYÜK YATAY YER İVMESİ (PGA) HESABI (LARGEST HORIZONTAL GROUND ACCELERATION (PGA) ACCOUNT)

Magnitüd, bir depremin büyüklüğünü tanımlamak için geçerli bir ölçüdür. Bir bölgede deprem tehlikesinin belirlenmesinde ve depreme dayanıklı yapı tasarlanmasında tek başına yeterli değildir. Bu nedenle "M" büyüklüğünde bir depremin "r" uzaklığında herhangi bir noktada meydana getireceği azami ivme değerini veren ivme-azalım ilişkilerine gerek vardır (Tunç ve diğ., 2003). Yerel zemin koşulları, faylanma şekli, yayılma hattı, kuvvetli yer hareketi parametresinin büyüklüğü gibi parametrelerin tahminini azalım ilişkileri sağlar (Erdik ve diğ., 2003). Etki edene deprem yükünün bilinmesinde, inceleme alanının jeolojik ve jeoteknik özelliklerinin yanı sıra, ivme-uzaklık azalım ilişkisi bağıntısının kullanılması önemlidir. Erdik ve diğ. (2003) Türkiye' de kaydedilen yüksek deprem kayıtlarının California verileri kullanılarak elde edilen azalım ilişkileri ile uyum sağladığını göstermiştir. Bu nedenle Boore ve diğ.'nin (1997) geliştirdiği en büyük yer ivmesi azalım ilişkilerinin kullanılmasını önermiştir.

Ampirik formüllerle V_s kayma dalgası hızları kullanılarak, zemin grubu yorumlanmıştır. Ayrıca çalışma alanı ve çevresinde geçmiş zaman aralıklarında oluşmuş en büyük depremler noktasal kaynak olarak seçilmiştir. En büyük pik yatay yer ivme değerleri ampirik formüllerle ivme azalım ilişkisi bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır. Belirlenen noktasal kaynakların çalışma alanına en yakın mesafeleri, aktif sismik kaynağa dik çizilerek hesaplanabilir. Bölgenin Deprem Haritası' na göre 5. Derece deprem bölgesinde olduğu için beklenen efektif ivme değeri 0.1 g ve üzerinde olmalıdır. Olacak depremin büyüklüğüne, gerçekleştiği derinliğe bağlı olarak, beklenen efektif ivme değerlerinin altında veya üstünde hesaplanabilir. Çalışma alanında noktasal kaynaklara göre hesaplanan pik ivmeler irdelendiğinde, depremlerin tehlike arz etmemeleri ve Aksaray iline olan mesafelerinin uzak olmaları nedeni ile pik ivme değerlerinin ortalama 0.05 g hesaplandığı görülmektedir. Fakat, inceleme alanında yapı tasarımlarının 0.1 g ve üzerinde yatay pik ivme değerlerine göre yapılması uygun olacaktır. Normal bir yapının kullanım ömrü içerisinde, yüksek ihtimalle bu ivme değerlerinden fazla bir yüklemeye maruz kalmayacağı düşünülmektedir.

SONUÇLAR (RESULTS)

Çalışma alanı Hamidiye Bölgesi' nde gözlenen Üst Miyosen-Alt Pliyosen yaşlı İnsuyu formasyonuna ait çakıltı, kumtaşı ve kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. İnsuyu formasyonuna ait birim, tabanda karbonat çimentolu çamurtaşı, çakıltı, kumtaşı ve kiltası ardalanması, üst kısımlarda ise gölsel çakıltılarından oluşmaktadır. Kayaçların kalite değerlendirmesinde çok düşük dayanım sınıflanmasında olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bölgede güvenli yapı tasarımı için, emniyetli taşıma gücü değeri, uygun temel tip ve derinliği tespiti ve jeolojik hesaplamaları ayrıntılı olarak yapılmalıdır. Ayrıca kaya ve zemin parametrelerinden dolayı oluşabilecek problemlere yönelik önlemler alınmalı, YASS gerekiyorsa düşürülmeli ve drenajı yapılmalıdır. Bunun yanı sıra temel sağlam bir zemine oturtulmalıdır. Bölge zemin hâkim periyotları Ansal ve diğ., (2004) tarafından verilen mikrobölgeleme ölçütü kullanılarak değerlendirilmiştir. Hamidiye bölgesinde yapılan sismik ölçüm verilerine göre zemin, "B orta tehlike düzeyi" sınıfına girmektedir.

Bu genel bilgiler ışığında elde edilen V_s kayma dalgası hızları kullanılarak deprensellik araştırması yapılmıştır. Bilindiği üzere zemine etkileyen deprem yükü, zemin tarafından karşılanarak sönmülenebildiği gibi, genlik büyütülerek zemin deprem etkisini artırabilir. Bu durumun doğru tespiti için zemin büyütme değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bu çalışma da ise Hamidiye bölgesine ait sondaj ve sismik çalışma verileri kullanılarak analizleri yapılmıştır. Kocaeli' de, 1999 yılında meydana gelen deprem kayıtları ile "Eşdeğer doğrusal analiz" yöntemi kullanılarak analiz yapılmıştır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (2018) yer alan maddeler dikkate alınmıştır. Analizler sonucu zemin büyütme katsayıları bulunarak, zemin dinamik davranışı yorumlanmıştır.

Deprem etkisine karşı, zeminin davranışını belirlemek açısından, kayma dalgası hızının önemli bir parametre olduğu gözlenmiştir. Ayrıca DeepSoil programında yapılan analizlerin gerçeğe yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Deepsoil programında analiz yöntemi olarak kullanılan eşdeğer doğrusal analiz yönteminin kullanımı, sahaya uygun gerçekçi çözümler sunmasından dolayı, tavsiye edilmektedir. Fakat zeminin karmaşık yapısı düşünüldüğünde, saha çalışmalarının önemi ve yapılmasının gerekliliği vurgulanabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akıl, B., Bozüyük, İ., Karadut, E., Öztürk, F., Saygı, M. Ve Yılmaz, M. 2010. Aksaray Belediyesi İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüd Raporu, İller Bankası Genel Müdürlüğü, Yeraltı Etütleri Dairesi Başkanlığı, Jeoteknik Şube Müdürlüğü, Rapor No: İLB-İ/68-001-002.
- Ansal, A., Laue, J., Bucheister, J., Erdik, M., Springman, S.M., Studer, J. and Köksal, D., 2004. Site Characterization and Site Amplification for A Seismic Microzonation Study in Turkey, 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd Earthquake Geotechnical Engineering, San Francisco, 7-9 Jan. 2004.

- Boore, D.M., Joyner, W.B. and Fumal, T.E., 1997. Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work. *Seismological Research Letters*, 68(1), 128-153.
- Civelekler, E., Okur, D.V. ve Afacan, K.B. 2017. Eşdeğer Analiz Yöntemi ile Zemin Dinamik Davranışının Değerlendirilmesi: Eskişehir Odunpazarı Örneği, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim, Eskişehir.
- Dirik, K. and Erol, O., 2003. Tectonomorphologic Evolution of Salt Lake and Surrounding Area, Central Anatolia-Turkey. *Turkish Association of Petroleum Geologists Special Publication*, 5, 27-46.
- Doğan, A. ve Emre, Ö., 2006. Ege graben Sisteminin Kuzey Sınırı: Sındırgı-Sincanlı Fay Zonu. 59. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özetleri Kitabı, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Dönmez, M., Akçay, A.E., Kara, H., Türkecan A., Yergök, A.F. ve Esentürk, K. 2005. M.T.A. Genel Müdürlüğü, 1/100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, No:52, Aksaray L-32 Paftası, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Ejderoğlu, G., Üçkardeşler, C., Bozüyük, İ., Karaçam, A., Saygı, M., Yılmaz, M., Araz H., Akpınar, K., 2008. Aksaray Belediyesi İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu, İller Bankası Genel Müdürlüğü, Yeraltı Etütleri Dairesi Başkanlığı, Jeoteknik Şube Müdürlüğü, Rapor No: İLB-İ/68-001-001.
- Er, B., 2002. Aksaray İli Merkezinin Zemin ve Mühendislik Jeolojisi Özelliklerini Değerlendirerek Örnek Bir Jeoteknik Veri Tabanının Hazırlanması. Yüksek Lisans Tezi. Niğde Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
- Erdik, M., Durukal, E., Siyahi, B., Fahjan, Y., Şeşetyan, K., Demircioğlu, M., ve Akman, H., 2003. Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Deprem Yer Hareketinin Belirlenmesi, 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs, İstanbul.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., İlhan, O., Groholski, D.R., Philips, C.A. and Park, D., 2017. DeepSoil 6.0, User Manual.
- Özdemir, N., 2001. Aksaray İli Hamidiye Kasabası Yerleşim Alanının İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu. Özdemir Jeoloji Mühendislik Bürosu, Aksaray.
- T.C Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 1996. Deprem Bölgeleri Haritası, Harita Genel Komutanlığı Basımı.
- Tunç, B., Güven, T., Ulutaş, E., Irmak, T.S., Sertçelik, F., Çetinol, T., Çaka, D., Özer, M.F. ve Kenar, Ö., 2003. Doğu Marmara Bölgesi için DeneySEL En Büyük Yatay İvme Uzaklık Azalım İlişkisi ve Kocaeli' nin Probalistik Deprem Tehlikesi, Kocaeli Deprem Sempozyumu, S:14-26, Kocaeli.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY), 2018



YALIN ÜRETİME GEÇİŞTE DEĞER AKIŞI ANALİZİ VE HARİTALANDIRMA İLE İSRAF KAYNAKLARININ BELİRLENMESİ: GÜNEŞ ENERJİSİ KOLLEKTÖRLERİ ÜRETEBİR İŞLETMEDE UYGULAMA

¹Halil İbrahim DAĞ^{ID}, ²Yakup KARA^{ID}

¹Solimpeks Enerji Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, Konya, TÜRKİYE

²Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

¹halil.dag@solimpeks.com, ²ykara@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 10.01.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.04.2020)

ÖZ: Değer akışı analizi, bir işletmenin yalın üretime geçişinin ilk aşamasıdır. Değer akışlarının analiz edilmesinde kullanılan en önemli yöntemlerden biri Değer Akışı Haritalandırma'dır (DAH – Value Stream Mapping). DAH, bir tedarik zincirini oluşturan malzeme ve bilgi akışının ve ürüne değer katan ve katmayan faaliyetlerin modellenmesinde kullanılan bir tekniktir. Bu çalışmada, düzlemsel güneş enerjisi kolektörlerinin üretimini yapan ve yalın üretim uygulamalarına yeni başlamış olan bir işletmede değer akışı haritalandırma yöntemi kullanılarak, ilgili yöntemin uygulanma aşamaları ve işletmeye sağladığı faydalar açıklanmıştır. Bu yöntem ile işletmenin tedarik zinciri boyunca oluşan değer akışı haritalandırılarak, israflar belirlenmiş ve ilgili israfların elimine edilmesi amacıyla eylem planları oluşturulmuştur. DAH yöntemi sayesinde, işletmenin değer akışında kullanılması gereken yalın üretim teknikleri ve araçları belirlenmiştir. Uygulama kapsamında, işletmenin gelecek durumu planlanıp haritalandırılmıştır. Planlanan gelecek duruma ulaşmak amacıyla, malzemelerin ve ürünlerin sevkiyat sıklıkları artırılmış, tesis yerleşiminde değişiklikler yapılarak montaj hattı kurulmuştur. Bu sayede, malzemelerin akışları düzgünleştirilerek, malzeme taşımaları ve ara stok miktarları azaltılarak gelecek durum haritasında planlanan hedeflere ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yalın Üretim, Değer Akışı Haritalandırma, Değer Akışı Analizi

Value Stream Analysis, Mapping and Identification on Wastes in the Transition to Lean Manufacturing: An Application in a Solar Thermal Collector Manufacturer

ABSTRACT: Value stream analysis is the first phase of transitioning to lean manufacturing system in a business. One of the most important methods used in analyzing value stream is Value Stream Mapping (VSM). VSM is a technique used to model the flow of materials and information in a supply chain and activities that do or do not add value to the product. In this study, by using the VSM method in a company which is at the beginning phases of applying lean manufacturing and manufactures flat type solar energy collectors, action plans are developed in order to map the value stream in supply chain, determine the wastes and eliminate these wastes. With the help of VSM application, lean manufacturing techniques and tools to be used were determined as well as their required instances on the value stream. Within the scope of the application, in order to achieve the future value stream state, the frequency of material deliveries and product shipments were increased, and facility interior positioning is switched to an assembly line. Hence, by reducing material transport, organizing material flow and decreasing buffer stock amounts, goals on the future status map have been achieved.

Key Words: Lean Manufacturing, Value Stream Mapping, Value Stream Analysis

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, tüketiciler artık daha kaliteli olan ürünlere daha ucuza ulaşabilmenin yanı sıra, tercih ettikleri ürünlerin kendi istek ve zevklerine özgü olmasını da istemektedirler. Bu durum işletmeleri, ürünlerini tüketici tercihlerine uygun olarak verimli ve etkin bir şekilde üretebilecek yeni üretim teknolojilerini ve stratejilerini kullanmaya zorlamaktadır. Bu üretim teknolojilerinden en başarılısının ve en önemlisinin Yalın Üretim (Lean Production) olduğu kabul edilmektedir (Kara, 2004).

Yalın üretim, hizmete veya ürüne değer katmayan her şeyi israf olarak nitelendirmektedir ve bu israfları ortadan kaldırmaya çalışmaktadır. Bu sayede işletmenin rekabet avantajı kazanması ve maliyetlerinin azaltılması hedeflenmektedir (Hay, 2000). Bir işletmede yalın üretim sistemine geçişte ilk olarak “değer akışı”nın analiz edilmesi gerekmektedir. Değer akışı analizi ile ürüne değer katan ve katmayan faaliyetler daha net bir şekilde saptanır ve analiz edilir. Ardından, değer katmayan faaliyetler ortadan kaldırılır (Womack ve diğ., 1990). Değer akışlarının analiz edilmesinde ve modellenmesinde kullanılan yöntemlerin başında Değer Akışı Haritalandırma (DAH – Value Stream Mapping) gelmektedir. DAH, bir tedarik zinciri boyunca meydana gelen malzeme ve bilgi akışının modellenmesinde kullanılan bir haritalandırma tekniğidir (Rother ve Shook, 1999). DAH’ın temel amacı, değer akışındaki tüm israfları saptamak ve bu israfları elimine etmek için gerekli olan adımları belirlemektir. DAH, standart semboller kullanılan bir kâğıt kalem tekniğidir.

Bu çalışmanın amacı; yalın üretim uygulamalarına geçiş yapan ve başlangıç aşamasında bulunan bir işletmede, DAH yöntemi kullanılarak, tedarik zinciri boyunca ortaya çıkan değer akışının haritalandırılması, değer akışındaki israfların belirlenmesi ve ilgili israfların ortadan kaldırılmasına yönelik eylem planlarının oluşturulmasıdır. Uygulama, düzlemsel güneş enerjisi kolektörü üretimi yapan bir işletmede gerçekleştirilmiştir. DAH yöntemi ile, işletmenin değer akışının hangi noktasında hangi yalın üretim tekniklerinin ve araçlarının kullanılacağı belirlenecektir. Bu durum, işletmenin yalın üretime geçiş sürecini hızlandıracağı gibi, uygulama başarısını da önemli ölçüde artıracaktır.

KAYNAK ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Literatürde bulunan çalışmaların büyük bir kısmı, değişik sektörlerde DAH uygulaması şeklinde karşımıza çıkmaktadır. DAH yöntemine ilişkin yayınlanan ilk eser Rother ve Shook (1999)’a aittir. Rother ve Shook (1999), “Görmeyi Öğrenmek: Değer Katmak ve İsrafları Yok Etmek için Değer Akışı Haritalandırma” adlı çalışmaları ile DAH yöntemini yalın üretim literatürüne kazandırmışlardır. Gündoğdu (2002), ofis mobilyası üretimi yapan bir işletmede DAH yöntemini uygulayarak stok maliyetlerini minimize etmeye çalışmıştır. McDonald ve diğ. (2002), robot kontrol üniteleri imal eden bir işletmede 8 günlük ürün temin süresini 3 güne indirilmiştir. Arbulu ve diğ. (2003), Amerika Birleşik Devletleri’ndeki elektrik santrallerinde boru askı ve destek sistemleri tedariklerinde ürün temin süresini %25 oranında azaltmışlardır. Özkan (2005), traktör üretimi yapan bir işletmede ürün temin süresini 203 günden 46 güne düşürmüştür. Seth ve Gupta (2005), bir motosiklet imalathanesinde ürün temin süresini 3,215 günden 0,54 güne düşürmüşlerdir. Birgün ve diğ. (2006), traktör imalatı yapan bir işletmede ürün temin süresi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır ve bu sürenin 21 günden 3,5 güne düşürülebileceğini öngörmüşlerdir. Melvin ve Baglee (2008), gıda endüstrisinde DAH uygulamanın avantajlarını incelemek ve bu endüstrilerdeki potansiyel israf kaynaklarını tespit etmek amacıyla yoğurt üretimi yapan bir işletmede DAH uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Han ve Shen (2006), Çin’de elektrikli aletler üretimi yapan firmada ürün temin süresinin 23,5 günden 4,5 güne düşürülebileceği sonucuna varmışlardır. Abdulmalek ve Rajgopal (2007), bir demir-çelik işletmesinde DAH uygulayarak, ürün temin süresini, 48 günden 15 güne indirmişlerdir. Böylece, ilgili süreyi % 70 oranında azaltmışlardır. Lian ve Van Landeghem (2007), Belçika’da bir tavuk çiftliğinde üç ayrı DAH simülasyon uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Bu uygulama sonucu; ürün temin süresinde, birinci senaryoda %18,30, ikinci senaryoda %38,36 ve üçüncü senaryoda %48,23 oranlarında düşüşler gözlemlenmiştir. Özgürler (2007), traktör üretimi yapan bir işletmenin 19 günlük stok miktarını 5 günlük stok miktarına düşürmüşlerdir.

Serrano ve diğ. (2008), aralarında mobilya takımı, su ısıtıcıları ve ısıl plastik malzemeleri üreten firmaların olduğu altı farklı üretici firmada DAH tekniği uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Grewal (2008), bisiklet imalatı yapan küçük ölçekli bir işletmede çevrim süresinde % 33,18, model değişim süresinde % 81,5 ve ürün temin süresinde % 81,4 oranında azalmalar elde etmişlerdir. Henrique ve diğ. (2016) sağlık sektörüne uygulanabilecek bir DAH yaklaşımı önemişlerdir. İlgili yaklaşımı Brezilya'da bir hastanede uygulayarak literatürde mevcut olan DAH yaklaşımları ile karşılaştırmışlardır. Önerdikleri yaklaşım ile diğer yaklaşımlardan farklı olarak ameliyatlarda yaşanan darboğazların ve israfların tanımlanabildiğini belirtmişlerdir. Seth ve diğ. (2017), DAH uygulaması için güç transformatörü ürününü seçmişler ve uygulama sonucunda çevrim zamanını ve israfları azalttıklarını belirtmişlerdir. Dadashnejad ve Valmohammadi (2017), DAH uygulamasının toplam ekipman etkinliği üzerindeki maliyet ve kalite bakımından olumlu etkilerinin olduğunu ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, DAH ve yapılan çalışmalar ile ilgili detaylı bilgi için Romero ve Arce (2017), Shou ve diğ. (2017), Andreadis ve diğ. (2017), Santos ve Campos (2019) tarafından yapılan çalışmalardan yararlanabilirler.

DEĞER AKIŞI HARİTALANDIRMA YÖNTEMİ (VALUE STREAM MAPPING)

Womack ve diğ. (2002)'a göre DAH, mevcut malzeme ve bilgi akışının görsel olarak haritalandırılarak, daha iyi performans ve metotların ortaya çıkmasını sağlayan gelecek durumun haritalandırılması sürecidir. DAH, bir işletmenin mevcut ve arzu edilen gelecek durumundaki süreçlerini görmesini sağlar.

Gelecek durumun görselleştirilmesi, yalın üretim uygulama sürecinde, değer akışı içerisindeki değer katan adımlar ile değer katmayan adımların (israfların) birbirinden ayrılmasına ve değer katmayan adımların ortadan kaldırılmasına yardımcı olur (Rother ve Shook, 1999). DAH uygulama süreci, hazırlık, mevcut durum analizi, gelecek durumun tasarımı, planlama ve uygulama olmak üzere genel olarak dört temel adımdan meydana gelmektedir (Locher, 2008).

Hazırlık (Preparation)

Uygulama sürecinin ilk adımı olan hazırlık aşamasında üç temel faaliyet gerçekleştirilir. Bunlar: (i) DAH uygulamasını gerçekleştirecek ekibin belirlenmesi, (ii) DAH uygulaması gerçekleştirilecek ürün ailesi veya projenin belirlenmesi ve (iii) seçilen ürün ailesi veya projenin nasıl haritalandırılacağına belirlenmesidir.

Mevcut Durumun Analizi (Analyzing Current State Map)

Bu adımda, değer akışının mevcut durum haritası çizilmektedir. İlgili harita, seçilen ürün ailesine ilişkin üretim sürecindeki bilgi ve malzeme akışının görselleştirilmesi amacıyla, standart DAH sembolleri kullanılarak kâğıt ve kalem ile çizilir. Bu çalışmada standart DAH sembolleri kullanılmıştır (Braglia ve diğ., 2006).

Gelecek Durumun Tasarımı (Creating Future State Map)

Gelecek durum haritasının hazırlanmasının temel amacı, yalın üretime geçiş sürecinde uygulanacak yalın üretim tekniklerinin ve araçlarının değer akışının hangi noktalarında kullanılacağına belirlenmesidir. Bu çalışmada gelecek durum haritasının hazırlanmasında da standart DAH sembolleri kullanılmıştır (Braglia ve diğ., 2006).

Planlama ve Uygulama (Planning and Implementation)

DAH uygulamasının son adımı, gelecek durum haritası ile tasarlanmış olan gelecek durumun uygulanması için bir eylem planı geliştirmek ve bunu uygulamaktır. Uygulamalar sonucunda, ortaya

çıkan iyileştirmeler sayısal olarak ölçülmeli ve bu ölçümlere göre hedeflenen gelecek duruma ne derecede ulaşıldığı izlenmelidir. Gerekli görülen konularda revizyonlar gerçekleştirilmelidir.

GÜNEŞ ENERJİSİ KOLLEKTÖRÜ ÜRETEN BİR İŞLETMEDE DAH UYGULAMASI (DAH IMPLEMENTATION ON SOLAR POWER COLLECTOR)

Bu çalışmada DAH uygulaması, düzlemsel güneş enerjisi kolektörleri imalatı yapan ve Konya’da faaliyetlerini sürdüren SOLİMPEKS A.Ş.’de (bundan sonra işletme olarak anılacaktır) gerçekleştirilmiştir. İşletmenin en fazla üretimini gerçekleştirdiği CLS2510 düzlemsel kolektör Şekil 1’de verilmiştir.

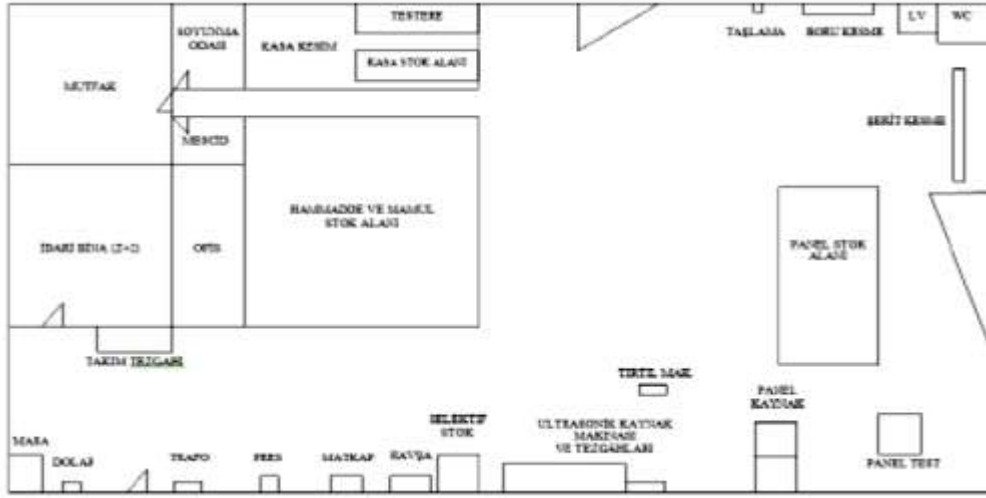


Şekil 1. CLS2510 düzlemsel kolektör

Figure 1. CLS2510 flat-plate collector

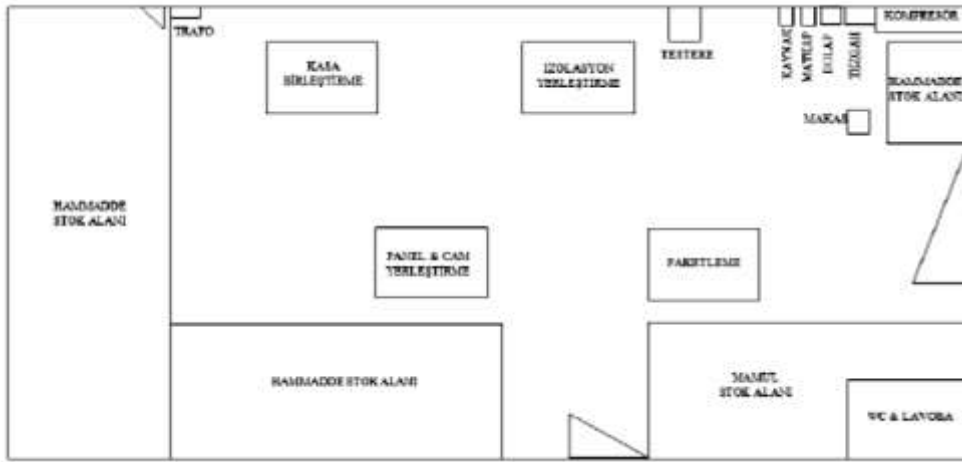
Düzlemsel bir kolektör, panel, kasa, taban sacı, izolasyon malzemesi ve cam olmak üzere beş temel bileşenden meydana gelmektedir. Kolektör üretimi, hazırlıklar, panel imalatı, kasa profili kesme ve montaj ve paketleme olmak üzere 4 temel aşamadan meydana gelir.

İşletme, düzlemsel kolektörlerin üretimini her biri 1.000 m² kapalı alana sahip olan bitişik iki binada gerçekleştirmektedir. Bu binalardan ilkinde panel imalatı ve kasa hazırlık aşamaları, diğerinde ise montaj işlemleri gerçekleştirilmektedir. İşletmenin üretim tesislerinin mevcut yerleşim planı her iki bina için ayrı ayrı olmak üzere sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Birinci bina mevcut yerleşim planı

Figure 2. Current layout plan of the first building



Şekil 3. İkinci bina mevcut yerleşim planı

Figure 3. Current layout plan of the second building

İşletme tesislerinin mevcut yerleşim planı yalın üretim prensipleri doğrultusunda incelendiğinde, mevcut yerleşimin çok sayıda israfın ortaya çıkmasına neden olduğu görülmektedir. Bu israf kaynakları DAH uygulaması ile tespit edilerek, bunları en aza indirecek yeni bir tesis yerleşim planı önerilmiştir.

UYGULAMA SONUÇLARI (RESULTS OF DAH)

Hazırlık (Preparation)

Solimpex A.Ş.'de değer akışı hakkında detaylı bilgiye sahip üyelerinden oluşan DAH ekibi uygulama yapılacak ürün ailesini "düzlemsel güneş enerjisi kolektörü" olarak adlandırmıştır.

Mevcut Durumun Analizi (Analyzing current state map)

DAH ekibi tarafından işletmenin değer akışının mevcut durum haritasının oluşturulması için aşağıda verilen adımlar izlenmiştir.

Adım 1. Üretim, Tedarikçi ve Müşteri Kontrolünü simgeleyen semboller, mevcut durum haritasının belirtilen yerlerine çizilmiştir.

Adım 2. Bu adımda, müşteri sembolünün altına bir veri kutusu çizilerek, müşterinin günlük talebinin bu veri kutusunun içine yazılması gerekmektedir. Bu amaçla, işletmenin çalışma sistemi hakkında detaylı bilgiler toplanmış ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Solimpeks A.Ş.'de ayda 20 işgünü (yılda 240 işgünü) tek vardiya olarak çalışılmaktadır. Bir işgünü saat 07.30'da başlayıp saat 18.00'de sona ermektedir. Dolayısıyla bir işgünü 10,5 saat toplam çalışma süresinden meydana gelmektedir. Toplam 10,5 saatlik çalışma süresinin 1 saati öğle yemeği tatilidir. Bunun dışında, gün içerisinde 15'er dakikalık iki adet çay molası verilmektedir. Buna göre yapılan hesaplamalar sonucunda *Toplam Çalışma Süresi* 37.800 sn/gün, *Net Çalışma Süresi* 32.400 sn/gün olarak elde edilmiştir. İşletmenin net çalışma süresinin hesaplanmasının ardından, müşterinin günlük talebinin hesaplanmasına geçilmiştir. Bu amaçla, işletmenin ortalama aylık satış miktarları aylar bazında incelenmiş ve Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1'e göre işletmenin toplam satış miktarı 26.231 adettir. İşletmede yılda 240 işgünü çalışıldığı düşünülürse; *Günlük Talep* = $26.231/240 = 109,3 \sim 110$ adet/gün'dür. Buna göre; *Takt Süresi* = $32.400 \text{ sn} / 110 \text{ adet} = 295 \text{ sn/adet}$ olarak hesaplanır.

Çizelge 1. İşletmenin ortalama aylık satış miktarları

Table 1. Monthly sales volume of the facility

Ay	Satış Miktarı (adet/ay)	Ay	Satış Miktarı (adet/ay)
Ocak	1.377	Temmuz	2.591
Şubat	2.288	Ağustos	1.185
Mart	2.967	Eylül	2.014
Nisan	2.832	Ekim	1.663
Mayıs	2.821	Kasım	2.090
Haziran	2.374	Aralık	2.029
Toplam		26.231	

Adım 3. Sevkiyat ve satın alma bilgileri mevcut durum haritalarına girilmiştir. İşletmenin temel tedarikçisinden fabrikaya haftada 1 defa sevkiyat gerçekleştirilirken, işletme müşterilerine haftada 2 defa sevkiyat gerçekleştirmektedir.

Adım 4. İmalat süreçleri sayfanın altına, ilk süreç solda, son süreç sağda olacak şekilde çizilmiştir. Her imalat süreci kutusunun altına bir veri kutusu yerleştirilmiştir. Tüm imalat süreci kutularının arasına süreçler arasındaki envanterlere ilişkin miktar ve elde tutma süresi bilgilerinin yazılması için boşluklar bırakılmıştır.

Adım 5. İmalat süreci kutularının altındaki veri kutularının içi süreç verileri ile doldurulmuştur.

Adım 6. Üretim kontrolünün tedarikçi, müşteri ve imalat süreçleri arasındaki bilgi akışları harita üzerinde gösterilmiştir. Üretim kontrolü, tedarikçiye haftada bir defa sipariş vermektedir. İşletmenin çok sayıda müşterisi olması nedeniyle her gün değişik müşterilerden siparişler alınmaktadır. Buna karşılık üretim kontrolü, geçmiş dönemlere ait verilerden yola çıkarak aylık satış tahminleri yapmaktadır. Üretim kontrol ayrıca, işletmenin imalat süreçlerine günlük üretim programları iletmektedir.

Adım 7. Tüm imalat süreçleri arasında envanterler bulunduğu için buralara envanter sembolleri çizilmiştir. Her envanter kutusunun altına, haritanın hazırlandığı dönemde sayılan envanter miktarları yazılmıştır.

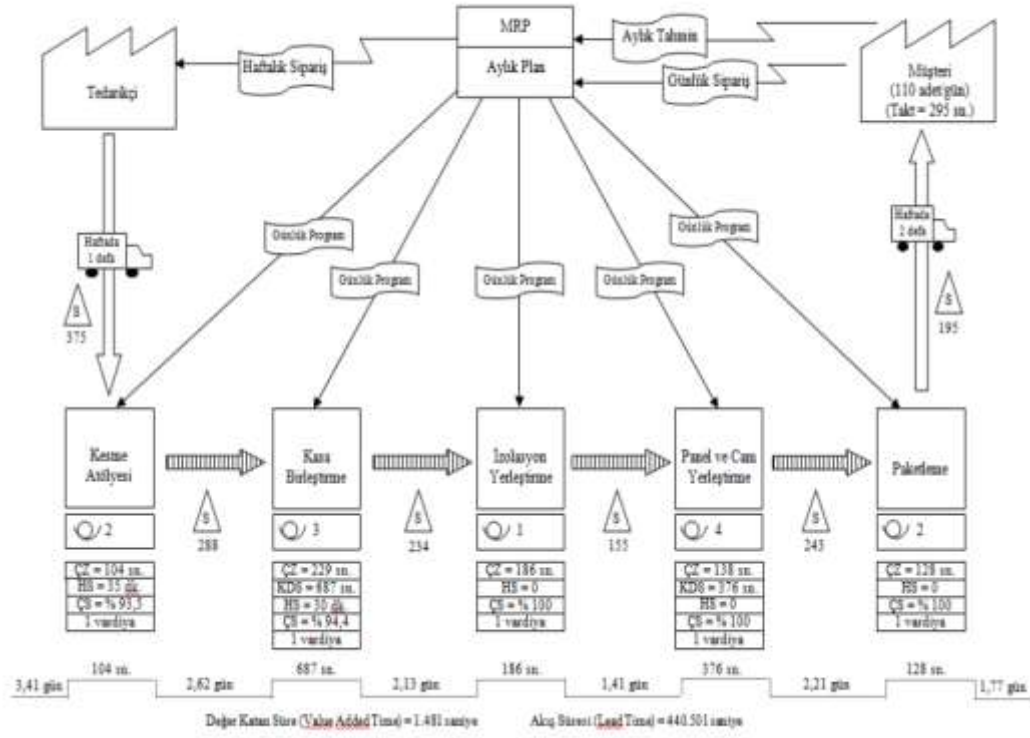
Adım 8. İmalat süreçleri arasında itme sistemi işlemektedir. Dolayısıyla ilgili kısımlar harita üzerinde gösterilmiştir. DAH ekibi tarafından hazırlanan mevcut durum haritası Şekil 4'te verilmiştir.

Gelecek Durumun Tasarımı (Creating Future State Map)

Mevcut durum haritası incelendiğinde, işletmenin değer akışında 1.481 saniyelik ürüne değer katan faaliyetler bulunmaktadır. İşletmenin değer akış süresi toplamı 440.501 saniye (13,6 gün) olarak hesaplanmıştır. Bu verilere göre, değer akışının % 99,6'sı ürüne değer katmayan faaliyetlerden, bir başka deyişle israflardan meydana gelmektedir. Oluşturulacak gelecek durum haritasının amacı, bu faaliyetlerin ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesine yönelik olmalıdır.

DAH ekibi, mevcut durum haritasını ve işletmenin mevcut fiziksel yapısını inceleyerek birkaç genel değerlendirmede bulunmuştur. Bunlar: i) İmalat süreçleri arasındaki ara stok miktarlarının fazla olmasının temel nedeni, süreçler arasında parça aktarma parti büyüklüklerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. ii) İşletmenin mevcut yerleşim planına göre, imalat süreçleri arasındaki taşıma mesafelerinin uzun olması, süreçler arası parça aktarmalarının büyük partiler şeklinde yapılmasına neden olmaktadır. iii) İmalat süreçleri arasındaki akışın sağlanması süreçler arasındaki ara stokların ve beklemlerin ortadan kaldırılmasını sağlayacaktır. Ürünün yapısı, üretimin bir montaj hattı üzerinde yapılmasına olanak sağlayacak niteliktedir. Dolayısıyla, kasa birleştirme, izolasyon yerleştirme, panel ve cam yerleştirme ve paketleme süreçleri bir montaj üzerinde gerçekleştirilerek tek parça akışı (one-piece-flow) sağlanabilir. iv) Mevcut durumda, tedarikçilerden malzeme sevkiyatı haftada 1 defa yapılmaktadır. Fakat malzeme tedarikçileri Konya'da bulunmaktadır ve daha sık sevkiyat yapabilme olanağına sahiptirler. Dolayısıyla, tedarikçilerden malzeme sevkiyat sıklığı artırılmalıdır. DAH ekibi, yukarıdaki tespitler doğrultusunda Şekil 5'te verilen gelecek durum haritasını hazırlamıştır.

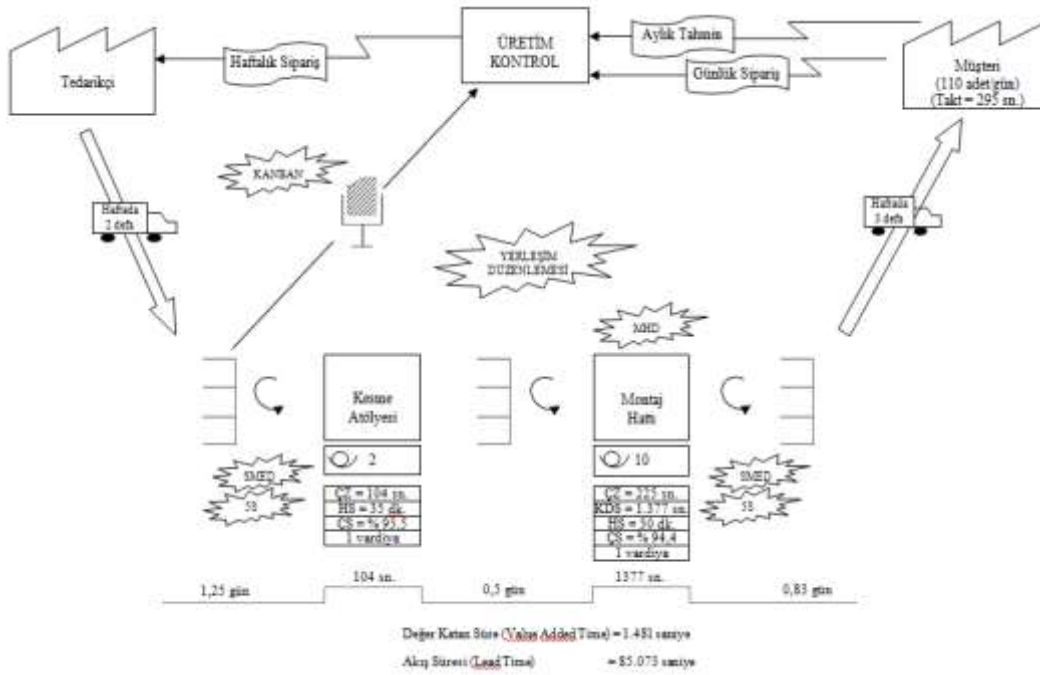
Mevcut durum haritasındaki dört farklı imalat süreci, gelecek durum haritasında "montaj ve paketleme" adı altında tek bir imalat süreci haline dönüştürülmüştür. Montaj ve paketleme süreci içerisindeki malzeme akışının tek parça olması tasarlanmıştır. Bu sürecin bir montaj hattı üzerinde gerçekleştirilmesi sağlanacaktır. Değer akışının gelecek durumunda akış süresinin 85.073 saniye (2,6 gün) olması planlanmaktadır. Bu duruma göre, ürüne değer katmayan faaliyetlerin akış süresinin toplamına oranı % 98,2 olacaktır. Akış süresi içerisindeki katma değer oranında ciddi bir azalma olmadığı görülmeye rağmen, akış süresi 13,6 günden 2,6 güne indirilmektedir. Bu durumda akış süresi % 80,8 oranında kısıllacaktır.



Şekil 4. Mevcut durum haritası

Figure 4. Current state map

Gelecek durumda tedarikçiden malzeme sevkiyat sıklığı haftada 2 güne (Pazartesi ve Çarşamba) çıkarılmıştır. Bununla birlikte, mamullerin müşteriye sevkiyatı haftada 3 güne (Pazartesi, Çarşamba ve Cuma) çıkarılmıştır.



Şekil 5. Gelecek durum haritası

Figure 5. Future state map

Gelecek durum haritası üzerinde bazı Kaizen çalışmaları belirtilmiştir. Bu çalışmaların başında işletmenin tesis yerleşim düzeninin değiştirilmesi gelmektedir. İkinci öncelikli Kaizen çalışması olarak, oluşturulması düşünülen montaj hattının tasarımı ve dengelenmesidir (MHD). Kesme atölyesinde ve montaj hattında parti değişikliklerinde ihtiyaç duyulacak hazırlık sürelerinin düşürülmesi için yapılacak SMED (Single Minute Exchange of Dies) çalışmaları bulunmaktadır. Kesme atölyesi ve montaj hattında yapılması gereken Kaizen çalışmalarından diğeri ise 5S çalışmalarıdır. Bunların dışında, üretim kontrolünün sağlanması amacıyla bir Kanban çalışması da hayata geçirilmelidir.

Planlama ve Uygulama (Planning and Implementation)

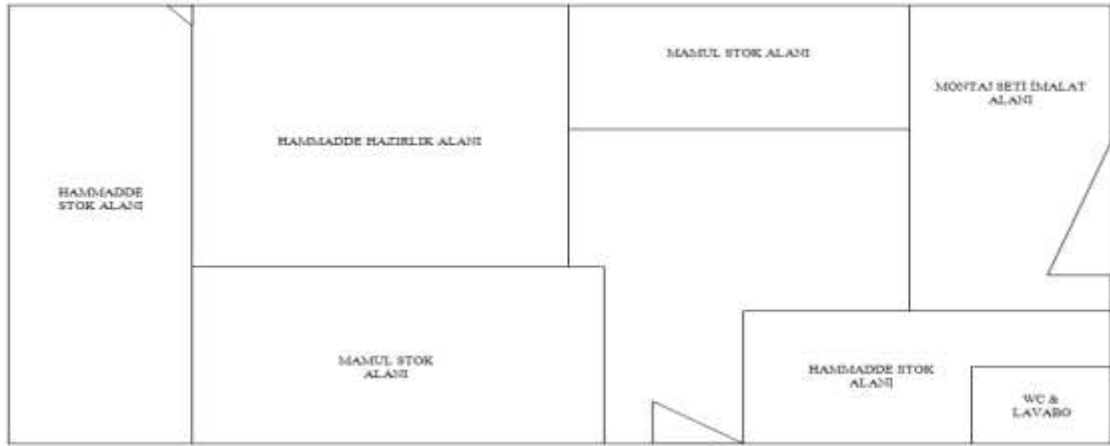
Yalın değer akışının elde edilmesinin ön şartı olarak görülen daha iyi bir tesis yerleşimi oluşturulması çalışmaları hızlı bir şekilde başlatılmış ve yeni bir tesis yerleşim planı tasarlanmıştır. Birinci ve İkinci Bina yeni tesis yerleşim planları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 6. Birinci bina yeni yerleşim planı

Figure 6. New layout plan of the first building

Yeni yerleşim planında birinci bina imalat ve montaj alanı, ikinci bina ise depolama ve destek süreçlerinin bulunduğu alanlar olarak tasarlanmıştır. Panel imalat atölyesi, kesme atölyesi ve montaj hattı birinci binaya yerleştirilerek malzeme akışının düzgünleştirilmesi, taşımaların azaltılması ve yarı mamul ara stoklarının azaltılması sağlanmıştır. Montaj hattı, kesme atölyesinden gelen kasa profilleri ve panel imalat atölyesinden gelen paneller tarafından kolayca beslenebilecek şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 7. İkinci bina yeni yerleşim planı

Figure 7. New layout plan of the second building

Yeni yerleşim planında ikinci bina, öncelikli olarak hammadde ve mamul depolama alanı olarak tasarlanmıştır. Hammadde ve mamullerin düzenli depolanması amacıyla raf tabanlı bir depolama sistemi kurulmuştur. Depolama alanlarının yanına montaj seti imalatı ve hammadde hazırlık gibi destek süreçleri dâhil edilmiştir.

Oluşturulan montaj hattı toplam sekiz adet iş istasyonundan meydana gelmiştir. Bu istasyonlara atanan operasyonlar ve istasyonların iş yükleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Montaj hattındaki istasyonlar ve iş yükleri

Table 2. Workstations and workstation loads in assembly line

İstasyon No	Atanan Operasyonlar	Operasyon (sn.)	İstasyon Yüklü (sn.)
1	* Profilin taşıma ve düzme	16,41	165
	* Profil başlarına silikon çekme	10,53	
	* Köşebent çıkarma	25,10	
	* Köşebent delik delme ve temizleme	47,87	
	* Köşebent perçinleme ve temizleme	41,89	
	* Uzun profil uçlarına silikon çekme	23,38	
2	* Uzun ve kısa profilleri birleştirme	44,35	151
	* Profillere delik delme	38,41	
	* Profilleri perçinleme	33,50	
	* Profil köşelerini düzeltme ve temizlik	34,73	
3	* Kasa köşe boyama	24,14	145
	* Gergi çubuğu deliği yeri işaretleme	19,34	
	* Kasanın içine solventle silme	8,25	
	* Profilin iç kısmına çift taraflı bant çekme	52,32	
	* Taban sacı yapıştırma	41,37	
4	* Cam altı finli döşeme	66,03	225
	* Kasaya silikon çekme	19,18	
	* Kasaya klips döşeme	92,64	
	* Kasaya klips basma	47,44	
5	* Camyünü/tağıyünü yerleştirme	21,49	186
	* Klima levhası yerleştirme	103,48	
	* Gergi çubuğu takma	36,35	
	* Gergi çubuğu boyama ve izolasyon rötuş	24,41	
6	* Paneli kasaya takma	19,10	192
	* Conta takma ve düzeltme	93,64	
	* Panel temizleme ve rötuş	79,12	
7	* Kasaya silikon çekme	19,38	185
	* Cam yerleştirme	31,27	
	* Kasaya sabun çekme	15,03	
	* Kasaya finli çıkarma	120,05	
8	* Genel temizlik & etiketleme	46,41	128
	* Naylonlama	33,40	
	* Kartonlama	48,95	

Oluşturulan montaj hattının yerleşimi Şekil 8. a'da ve montaj hattının bir görünümü Şekil 8.b'de verilmiştir.



Şekil 8. a) Montaj hattı yerleşimi b) Montaj hattının görünümü

Figure 8.a) Assembly line layout b) View of assembly line

Montaj hattında ürünler teker teker hareket ettirilmektedir. Dolayısıyla, gelecek durum haritasında belirtilen değer akışı sağlanmış ve akış süresi kısaltılmıştır. Ancak, montaj hattındaki iş istasyonlarının iş yükleri incelendiğinde, yükler arasında bir dengesizlik olduğu gözlenmektedir. Dolayısıyla, yapılması gereken iyileştirme çalışmalarından birisi de montaj hattının etkin bir biçimde dengelenmesidir. Kolektörlerin montaj hattı üzerindeki hareketi tekerlekli arabalar aracılığıyla sağlanmaktadır.

Yapılması gereken iyileştirme çalışmalarından birisi de, montaj hattında daha etkin bir malzeme taşıma sisteminin hayata geçirilmesidir. İşletmenin tesis yerleşim planının değiştirilmesi ve montaj hattının oluşturulmasının yanı sıra, üretim ve depolama alanlarının tertip ve düzeni de kısmen

sağlanmıştır. Ancak, başlatılacak olan 5S çalışmaları tertip, düzen ve temizliğin sürdürülebilir olmasını sağlayacaktır. Yukarıda bahsedilen çalışmalara ilave olarak, kesme atölyesinde ve montaj hattında SMED çalışmaları da ilerleyen dönemde başlatılacaktır.

Solimpex A.Ş.'de uygulanan DAH yöntemi, işletmenin mevcut değer akış süresinin 13,6 gün olduğunu göstermiştir. Bu süre, gelecek durum tasarımı ile 2,6 güne indirilmiştir. Dolayısıyla, önceki sürenin % 80,8 oranında kısılması sağlanmıştır. Solimpex A.Ş.'de elde edilen bu verilerin literatürde rapor edilen veriler ile karşılaştırılması amacıyla bir karşılaştırma tablosu hazırlanmış ve Çizelge 'te verilmiştir.

Çizelge 3. Solimpex DAH uygulaması sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması

Table 3. Comparison of results of value stream map on Solimpex with the results of the literature

Kaynak	Uygulama Alanı	Mevcut Akış Süresi (gün)	Gelecek Akış Süresi (gün)	İyileştirme Oranı (%)
Gündoğdu (2002)	Mobilya	6,1	3,0	50,8
McDonald vd. (2002)	Elektronik	8,0	3,0	62,5
Arbulu vd. (2003)	Metal	185	140	24,3
Özkan (2005)	Otomotiv	203,0	46	77,3
Seth ve Gupta (2005)	Motosiklet	3,2	0,5	83,2
Birgün vd. (2006)	Otomotiv	21,0	3,5	83,3
Han ve Shen (2006)	Elektrikli Aletler	23,5	4,5	80,9
Abdulmalek ve Rajgopal (2007)	Demir-Çelik	46,0	12,8	72,2
Lian ve Van Landeghem (2007)	Gıda	48,2	16,0	66,8
Özgürler (2007)	Otomotiv	19	5	73,7
Serrano vd. (2007)	Plastik	26	22	15,4
Grewal (2008)	Mobilya	23	20	13,0
	Bisiklet	41,4	7,7	81,4
	Ortalama	50,3	21,8	60,4

Çizelge 3 incelendiğinde bugüne kadar gerçekleştirilen DAH uygulamalarında mevcut durum akış süresinin ortalama 50,3 gün olduğu ve bu sürenin gelecek durumda ortalama 21, 8 güne indirildiği görülmektedir. Solimpex A.Ş. DAH uygulamasında elde edilen mevcut ve gelecek durum akış süreleri literatürde rapor edilen ortalama değerlerin altındadır. Literatürdeki uygulamalar arasında farklılıkların olması doğal bir durumdur. Üretilen ürünlerin üretim süreçlerinin farklı olması, işletmelerin satın alma ve sevkiyat politikalarının farklı olması ve işletmelerin üretim sistemlerinin mevcut fiziksel durumları bu farklılıkların en önemli nedenleridir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, gelecek durum ile akış süresinde elde edilen kısalma oranları bakımından literatür ile karşılaştırıldığında, sağlanan iyileştirmenin literatürdeki ortalama iyileştirme oranından yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç, gerçekleştirilen DAH uygulamasının işletmenin değer akışının yalınlaştırılması bakımından önemli bir başlangıç olarak kabul edilebileceğini göstermektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND DIRECTIONS)

Bu çalışmada, düzlemsel güneş enerjisi kolektörü imal eden küçük ölçekli bir işletmede bir DAH uygulaması gerçekleştirilmiştir. İşletme, Konya'da 2.000 m2 kapalı alanda faaliyet göstermektedir ve yalın üretime geçiş sürecinin başlangıç aşamasındadır. Hazırlanan mevcut durum haritası doğrultusunda işletmenin mevcut değer akış süresi 13,6 gün olarak bulunmuştur. Gelecek durum haritası ile bu süre 2,6 güne düşürülerek, % 80,8 oranında bir iyileşme sağlanmıştır.

Uygulama kapsamında mevcut ve gelecek durum haritalandırmasının yanı sıra, aynı zamanda bazı iyileştirme faaliyetleri de tamamlanmıştır. İlgili iyileştirmeler doğrultusunda, tesis yerleşiminde köklü bir değişiklik yapılarak, montaj hattı kurulmuştur. Yapılan uygulamalar, işletmenin yalın üretim kapsamında gerçekleştirdiği ilk uygulamalardır. Uygulamalar ile işletmenin değer akış süresindeki kısalma kısa sürede hissedilmiştir. Akış süresindeki kısalmanın yanında, malzeme taşıma maliyetlerinde azalma, stok alan ihtiyaçlarında azalma ve malzeme akışlarında düzgünleşmeler gözlenmiştir.

Montaj hattının kurulması, istasyonların yerlerinin belirlenmesi ve operatörlerin montaj hattının belirli bir istasyonunda görev yapmaları nedeniyle uzmanlaşma sağlanmıştır. Montaj hattı sayesinde

ortadan kaldırılan kayıp zamanların (malzeme taşıma vb.) üretken zaman olarak üretimde kullanılması sonucu işletmenin üretim kapasitesinde artış sağlanmıştır. DAH uygulaması ve devamında gerçekleştirilen iyileştirme çalışmaları sayesinde işletmenin ürün teslim süreleri kısalmış ve maliyetleri de azalmıştır.

Bu çalışmaların işletme yöneticileri ve çalışanları üzerindeki en önemli etkisi, yalın üretime olan inancın ve güvenin sağlanmasıdır. İşletme çalışanları tarafından başlangıçta şüphe ile karşılanan bu çalışmalar, uygulama sonucunda büyük bir inanca dönüşmüştür. Yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen önemin ve duyulan talebin Dünya’da ve Türkiye’de gün geçtikçe artıyor olması, Solimpeks A.Ş.’de yapılan bu uygulamanın önemini artırmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdulmalek, F. A., Rajgopal, J., 2007, “Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: a process sector case study”, *Int. J. Production Economics*, 107 (2007), 223-236.
- Andreadis, L., J. A. Garza-Reyes, and V. Kumar. 2017. “Towards a Conceptual Framework for Value Stream Mapping (VSM) Implementation: An Investigation of Managerial Factors.” *International Journal of Production Research* 55 (23): 7073–7095.
- Arbulu, R., Tommelein, I., Walsh, K., and Hershauer, J., 2003, “Value stream analysis of a re-engineered construction supply chain”, *Building Research & Information*, 31(2), 161 – 171.
- Birgün, S., Gülen, K. G., Özkan K., 2006, “Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması: imalat sektöründe bir uygulama”, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Yıl: 5 Sayı: 9 Bahar 2006/1 s.47-59.
- Braglia M., Carmignani G., Zammori F., 2006, “A New Value Stream Mapping Approach For Complex Production Systems”, *International Journal of Production Research*, Vol.: 44, 3929-3952.
- Dadashnejad, A.-A., and Valmohammadi, C., 2017, “Investigating the effect of value stream mapping on overall equipment effectiveness: A case study”, *Total Quality Management & Business Excellence*, doi: 10.1080/14783363.2017.1308821.
- Grewal, C., 2008, “An initiative to implement lean manufacturing using value stream mapping in a small company”, *Int. J. Manufacturing Technology and Management*, Vol. 15, Nos. 3/4, 2008.
- Gündoğdu E., 2002., *Sipariş tipi üretim yapan bir mobilya fabrikasında değer akışı haritalandırma ile stok maliyetinin minimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Han, C. F., Shen, X. S., 2006, “China electrical manufacturing services industry values stream mapping collaboration”, *Int. J. Flex Manuf Syst*, 18:285-303.
- Hay, E., 2000, *Tam Zamanında Yönetim*, Türkmen Kitabevi, İstanbul.
- Henrique, D. B., Rentes, A. F., Godinho Filho, M. and Esposto, K. F., 2016, “A New Value Stream Mapping Approach for Healthcare Environments”, *Production Planning and Control* 27 (1), 24–48.
- Kara, Y., 2004, *U-tipi montaj hattı dengeleme problemleri için yeni modeller ve otomotiv yan sanayiinde bir uygulama*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya.
- Lian, Y. H. and Van Landeghem, H., 2007, “Analysing the effects of lean manufacturing using a values stream mapping-based simulation generator”, *International Journal of Production Research*, 45(13), 3037-3058.
- Locher, D.A., 2008, *Values Stream Mapping for Lean Development*, CRC Press, New York, ISBN-13: 978-1-56327-372-8 (Softcover).
- McDonald, T., Van Aken, E. M., and Rentes, A. F., 2002, “Utilising Simulation to Enhance Value Stream Mapping: A Manufacturing Case Application”, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 5(2), 213 – 232.

- Melvin, A., and Baglee, D., "Value stream mapping: a dairy industry perspective", In: *Managing engineering, technology and innovation for growth: 2008 IEEE International Engineering Management Conference*, conference proceedings, Estoril, Portugal. pp. 1-5, June 28 -30 2008.
- Özgürler, Ş., 2007., *Değer akışı haritalandırma ve CONWIP sistemine yönelik bir tasarım*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özkan, K., 2005., *Müşteriden tedarikçiye değer yaratma: otomotiv endüstrisinde değer akışı haritalandırma uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Romero, L.F. and Arce, A., "Applying Value Stream Mapping in Manufacturing: A Systematic Literature Review", *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50, 1075–1086.
- Rother, M. and Shook, J., 1999, *Learning to See. Value stream mapping to create value and eliminate muda*, The Lean Enterprise Institute Inc, USA.
- Santos, D. L., and Campos., L. M. S., 2019., "Environmental Aspects in Value Stream Mapping: A Literature Review and Future Directions." In *New Global Perspectives on Industrial Engineering and Management, International Joint Conference ICIEOM-ADINGOR-IISE-AIM-ASEM*, edited by J. Mula, R. Barbastefano, M. Díaz-Madroño, and R. Poler, 165–178, Springer.
- Serrano, I., Ochoa, C. and De Castro, R., 2008, "Evaluation of value stream mapping in manufacturing system redesign", *International Journal of Production Research*, 46 (16), 4409-4430.
- Seth, D. and Gupta, V., 2005, "Application of value stream mapping for lean operations and cycle time reduction: an Indian case study", *Production Planning & Control*, 16(1), 44 – 59.
- Seth, D., Seth, N. and Dhariwal, P., 2017, "Application of Value Stream Mapping (VSM) for Lean and Cycle Time Reduction in Complex Production Environments: A Case Study", *Production Planning & Control*, 28 (5), 398–419.
- Shou, W., Wang, J., Wu, P., Wang, X. and Chong, H-Y., 2017, "A Cross-Sector Review on the Use of Value Stream Mapping", *International Journal of Production Research*, 55 (13), 3906–3928.
- Womack P.J., Jones, T.D. ve Roos, D., 1990, *The Machine That Changed The World*, Rawson Associates, New York.
- Womack P.J., Jones, T.D. ve Roos, D., 2002, *Dünyayı Değiştiren Makine*, Otomotiv Sanayicileri Derneği Yayınları, İstanbul.



BATCH ORDERING INVENTORY MANAGEMENT UNDER THE MIXED DEMAND INFORMATION: A CASE STUDY

¹Muzafer ALIM , ²Patrick BEULLENS

¹Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Batman, TÜRKİYE

²Mathematical Sciences and Southampton Business School and CORMSIS, University of Southampton, UK

¹muzaffer.alim@batman.edu.tr, ²p.beullens@soton.ac.uk

(Geliş/Received: 31.07.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.04.2020)

ABSTRACT: This study is concerned with analysing the past demand data and development of an inventory model with demand arising from deterministic which is known in advance and random sources simultaneously. Two different shortages are created for each demand type and in order to prevent model to backlog the deterministic demand, very high shortage cost is given for deterministic demand. The numerical value of the parameters are obtained from a real case which the inventory system of an information and technological organization of a university. The main difference of this study from the previous studies is that the order amount must be in palette quantity for a deterministic and stochastic demand inventory problem. Under this constraint, an inventory model is developed and tested with several datasets. Assuming lead time as constant, the value of deterministic demand present in the system and impact of palette constraint are investigated. These investigations are compared with the status quo in the case study. It has seen that the palette quantity behaves as safety stock for high level random demand. Recommendations based on the impacts of advance demand information, lead time and pallet quantity are presented in terms of changing in ordering costs, holding costs and service level.

Key Words: Inventory model, batch ordering, deterministic and stochastic demand, mix integer programming

Karışık Talep Bilgisi Kapsamında Toplu Sipariş Envanter Yönetimi: Bir Durum Çalışması

ÖZ: Bu çalışma, geçmiş dönem talep bilgisinin ve önceden bilinen deterministik ve rassal talep bilgisinin birlikte bulunduğu stok sistemlerinin analizini konu almaktadır. Herbir talep bilgisi için iki farklı talebi karşılayamama maliyeti belirlenmiş olup deterministik talebe verilen yüksek talep karşılayamama maliyeti bu tip talebin zamanında karşılanmamasını oldukça güç hale getirmektedir. Kullanılan veriler bir üniversitenin bilgi teknolojilerinden sorumlu olan birimden alınmıştır. Bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan farkı aynı anda hem deterministik hem de rassal talep altında sipariş miktarının palet cinsinden olmasıdır. Bu kısıt altında, bir stok modeli geliştirilmiş ve farklı veriler altında sayısal olarak test edilmiştir. Sabit tedarik süresi varsayımı altında, deterministik talebin değeri ve paletle sipariş kısıtının etkileri ölçülmüştür. Bu ölçümler, mevcut durumla kıyaslanmıştır. Paletin içerik miktarının yüksek seviyedeki rassal talep için güvenli stok olarak davrandığı gözlemlenmiştir. Değişen sipariş maliyeti, stok tutma maliyeti ve hizmet seviyeleri altında ön talep bilgisi, tedarik süresi ve palet miktarının etkileri üzerine önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Envanter modelleme, yığın sipariş kısıtı, deterministik ve rassal talep, matematiksel modelleme

1. INTRODUCTION

In many competitive business environments, inventory management plays an important role in managing the trade-off between maximising the service level of customers while minimising the operational costs. In order to meet the customer demands within a reasonable time, most businesses need to keep some amount in stock since the time it takes to order products from suppliers or produce the products from raw materials is too long in comparison. Another factor that leads to keep stock is that ordering or producing products efficiently often involves batches of (identical) products which are much larger than individual customer orders. Inventory management is defined as the control of amounts of products kept in stock over time. The principle purpose of inventory management is to answer the following two questions:

1. When do we need to place an order (or produce) for a given type of product?
2. How much of this product should we order?

Inventory management can lead to better results if the future demand is known. In real life at least some part of the future demand is not known with certainty beforehand, but needs to be estimated. Forecasting methods are required in order to avoid unwelcome surprises. According to Bon and Leng (2009), forecasting product demand is one of the most important issues in inventory management in both short and long term planning activities. The most appropriate forecasting method is to be chosen based on a good insight into what drives future demand. Observing seasonal patterns and trends from past data can be very helpful in certain situations, but may still lead to disastrous results if the assumption that the future is going to be very similar to the past does not hold. It may sometimes be more useful to investigate the processes that customers use to place their orders.

During the decision process in inventory management, costs and lead times are typically important considerations. Lead time is the time needed between placing the order at the supplier (or manufacturing floor) and the time the products requested become fully functionally available in the warehouse to meet customer demand. The relevant costs in an inventory model most often include the following four terms: holding cost, ordering cost, unit product cost and unit shortage cost. The shortage cost occurs when a demand does not meet on time which the demand is called backorder. In this study, we have such a situation of backorders. It is still one of the difficult problems in inventory management theory to arrive at accurate estimates for the shortage cost. One way around this problem is to use an estimated value for this cost, and then to observe the service level achieved in the inventory model. If this service level achieved is too low, one can iterate by increasing this shortage cost until the service level has achieved a desirable level.

How to measure the service level is very dependent on the context. A simple measure is to count the number of orders delivered by the requested due date of the customer per unit of time (say in one month) and divide this number by the total number of orders delivered. A variation to this is to measure to count the total number of units of products that are delivered by the due date divided by the total number of units delivered. More refined measures of service level will also look at the lateness (the length of time between the due date and the actual delivery date) of orders.

Due to significant period-to-period or even day-to-day changes in demand levels, seasonality effects, trends, and constrained storage space, inventory management is a challenging task at the university's IT department, but also critical for delivering a good service to the university. In the current situation, the inventory is controlled by the providence of staff and none of the economical trade-off analysis is being considered in the day-to-day decision making on the inventory. The main concern of the planners at the present is to be able to meet demand. Some automation is already in place to capture customer requests and keep a status of inventory records. The issues of when and how much to order from the suppliers, however, is still a decision unsupported by a computerised decision aiding model.

In this study, past demand data is going to be analysed to observe the demand pattern. This is complemented by an analysis of the potential difference in customer types as to investigation of the potential value of demand classification. It is then complemented by an analysis of the supply side by investigating the conditions under which the company can order from suppliers. Finally, we will

investigate the internal processes undertaken to prepare a product for release to the customer. A set of alternative inventory models is then to be developed and its performance evaluated under different demand profiles as well as compared with the real situation in terms of both service level and costs. Since the IT department delivers many products, this study will have to focus on a specific branch of products only: the high-value and high-volume standard computers/laptops series.

2. LITERATURE REVIEW

This study is mainly related to the fields of inventory management with deterministic and stochastic demand and batch ordering. Thus, we review the literature for demand management and order restrictions in inventory management.

According to Waters (1992), for the inventory control models, future demand is the most important input and has the biggest impact on stocks held. Therefore demand management is considered as the first step of inventory management. The complexity of the inventory model depends on the demand pattern as put by Taha (2007) and mainly the demand can be classified into deterministic demand which can be constant or variable over time and stochastic which can be stationary or non-stationary over time.

Although the inventory model for the first type of demand is the simplest model (classic EOQ model), it has seen in practice not so often. On the other hand, the inventory models are able to deal with the fourth demand type are the most complex although this demand pattern is often likely to occur in real life. In the inventory literature, demand is assumed as deterministic or stochastic (for detailed review see Aloulou *et al.* (2013), Bushuev *et al.* (2015)). There is also a different type which assuming demand as advance demand at which some parts of the demand is known in advance but some part still remains uncertain (Gallego and Özer (2001), Sobel and Zhang (2001)).

Demand is placed in advance of their due dates are called as advance demand information. If customer lead time is less than the supply lead time, this type of demand must be satisfied by using on hand inventory and that's why it can be classified as stochastic demand. Unlike the classical inventory models treated demand as either deterministic or stochastic, Sobel and Zhang (2001) consider the demand which arrives from a deterministic and stochastic source simultaneously. They mentioned that if deterministic and stochastic demands are considered separately, deterministic demands will not be backordered. However, this will bring higher holding and ordering costs due to keep inventory for both demands separately. Thus, they consider this two types of demand simultaneously. In their study, they consider periodic review inventory systems with demand priority. Deterministic demand is assumed to have non shortages whereas stochastic demand can be backlogged. This demand type is closely related to our problem case. However they assume that if there is stock on hand, the backorders must be satisfied even without considering for future period deterministic demand. However in our case, there must be a possibility of having positive inventory level while having some shortages. This is a result of having two different shortages costs for deterministic and stochastic demand separately. They proved that modified (s, S) policy is optimal for their case.

Similar to Sobel and Zhang (2001), Gallego and Özer (2001) studied the inventory management with advance demand information. They stated that customers have different willingness to pay for the speed of fulfilment of their order. They used dynamic programming (Bellman Equation) to find reorder level and order up to level. One of the interesting result in their study is to prove that for the cases with zero ordering/setup cost, the demand information beyond lead time has no operational value. Özer and Wei (2004) takes this study to an inventory problem with limited storage capacity and advance demand information. They measure the impact of advance demand information on capacitated inventory problem with advance demand. Wang and Toktay (2008) extend these studies by considering flexible delivery options without having a storage capacity. In contrast to the literature, they assumed that customers who placed their order for a due data can accept early delivery. They used some heuristics methods to find a way to making decisions. As a result of their study, they indicate that advance demand information is a powerful tool in reducing inventory costs. Numerical studies mention flexible delivery can contribute significant benefits to the solution.

Beside the demand side, there might also be some restrictions and uncertainties on supply side. One of these restrictions is minimum order quantity which the firm needs to order more than a minimum threshold amount (Kesen *et al.*, 2010). This might be soft which can be relaxed with additional cost or be solid which cannot be relaxed. Another order restriction is batch ordering which allows orders only to be an integer number of a base quantity. Veinott (1965) is one of the first study consider batch ordering in inventory problem. Chen and Zheng (1994) considers the (r, nQ) policies for batch ordering inventory problems and Chen (2000) proves the optimality of (r, nQ) policy. Extension of the problem with lost sales has been considered by Van Woensel (2013). The multiechelon cases of batch ordering has been studied by Chao and Zhou (2009) and Shang and Zhou (2010).

3. PROBLEM DEFINITION

The academic staff and postgraduate students are allowed to request a computer from the university and the university kept stock to satisfy these request within a reasonable time. Some of these requests are placed in advance of the required date. Yet still some of the demand can be known at last minute. The university replenishes its stock from an external company and the company only allows the university to place its order in terms of pallets. The university aims to satisfy all demand within a threshold service time but due to having longer lead time than the service time, they need an effective inventory policy and they need to know the impact of batch ordering so that they can negotiate with the company. In this section, we provide the notation and mathematical formulation to be used to formulate the problem.

3.1. Notation

The variables and parameters used in the formulations are presented in this part. The mathematical model is constructed with the following notation.

D_t	Deterministic demand in period t
R_t	Random demand for period t
E_t	Expected demand in period t
I_t	On hand inventory at the end of period t
y_t	Number of pallets ordered in period t
z_t	Expected amount to be delivered in period t
$B(D)_t$	Number of backorders for deterministic demand in period t
$B(R)_t$	Number of backorders for random demand in period t
$X_t = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	<i>if an order placed in period t</i> <i>otherwise</i>
N	Planning Horizon (days)
L	Lead time (days)
h	Holding cost ($\frac{\text{£}}{\text{unit} \cdot \text{day}}$)
c	Ordering cost ($\frac{\text{£}}{\text{order}}$)
β_D	Shortage cost for deterministic demand ($\frac{\text{£}}{\text{unit} \cdot \text{day}}$)
β_R	Shortage cost for random demand ($\frac{\text{£}}{\text{unit} \cdot \text{day}}$)
Q	Number of computers in a pallet

3.2. Mathematical Formulation

The mathematical formulation of the inventory model with deterministic and stochastic demand and batch ordering is presented. The deterministic demand is known in advance of N days, ($N \geq 3$), whereas stochastic demand is known in advance of 3 days only. At the beginning of period t , deterministic demand over $\{t, \dots, t+N-1\}$ and random demand over $\{t, \dots, t+2\}$ are known. The optimal inventory decisions are made by the on hand information and the decisions are applied for only at the current period. Then, at the end of the period with the new demand information, the demand is updated and the model is run for next N period. The rolling planning horizon approach is applied until reaching the expected time horizon.

$$\text{Min} \quad h \sum_{t=1}^N I_t + c \sum_{t=1}^N X_t + \beta_D \sum_{t=1}^N B(D)_t + \beta_R \sum_{t=1}^N B(R)_t \quad (1)$$

$$I_{t-1} + Z_t - D_t - R_t - B(D)_{t-1} + B(D)_t - B(R)_{t-1} + B(R)_t = I_t \quad \forall t = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$I_{t-1} + Z_t - D_t - E_t - B(D)_{t-1} + B(D)_t - B(R)_{t-1} + B(R)_t = I_t \quad \forall t = 4, \dots, N \quad (3)$$

$$B(D)_t \leq B(D)_{t-1} + D_t \quad \forall t = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$B(R)_t \leq B(R)_{t-1} + R_t \quad \forall t = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$Z_t = Qy_f \text{ where } f = t - L \quad \forall f = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$y_t \leq S X_t \quad \forall t = 1, \dots, N \quad (7)$$

The main objective in (1) is to minimize the total expected cost including holding, backorder and setup costs over N period. There are two different backorder costs for deterministic and stochastic demand. The inventory balance equations are presented in (2) for first three periods and (3) for the remaining periods. Constraints (4) and (5) provides that shortage amount for each demand type cannot be greater than that specific demand type. The number of pallets ordered at period f will be supplied after a lead time, L . In this case Q represents the number of computers in a pallet as in (6). If an order does not take place in a period, then the y_f must be zero. In order to have positive y_f , an order must be given at period f and this is guaranteed by (7). All parameters and variables used in the model are nonnegative and integer.

4. NUMERICAL RESULTS

The integer model which is developed in mathematical formulation section, implemented into Visual Basic Application (VBA) in Excel and solved by using Excel solver. Then different scenarios are applied into this model with various parameter settings. Two different cases are presented as Case A which has %80 of deterministic demand and Case B which has 20% of deterministic demand present in the system. The reason for examining these two situations is that more customers can be convinced towards advance demand by offering them some financial incentives. The main purpose here is to reveal the financial effects of increasing the deterministic demand in the system. These demand cases are tested with $L=12;6$ and $Q=42;21$ and the values of remaining parameters are obtained based on the real case. The reason to choose the parameter values as 42 and 21 for batch size is that the supplier is able to offer such an option.

The demand information of the previous periods is analysed and we have observed that the demand best fits to triangle distribution. Another reason why we have to use triangular distribution is the lack of accessible past demand data which we could only obtain for past three years. Although we use this

distribution, the VBA application developed based on the proposed model can also be modified for different demand distributions. The expected demand is made based on the distribution and at the end of each run the new demand is generated based on the demand distribution.

The model with 80% deterministic demand and 20% stochastic demand has been run for 15 datasets and following results are obtained. The economical results are shown in Table 1.

Table 1. Case A costs with L=12, Q=42;21

	Palette=42			Palette=21		
	Ordering Cost	Holding Cost	Total Cost	Ordering Cost	Holding Cost	Total Cost
DATASET 1	650	7687	8337	1225	3763	4988
DATASET 2	625	7905	8530	1200	4042	5242
DATASET 3	600	7364	7964	1150	3794	4944
DATASET 4	650	7057	7707	1275	3708	4983
DATASET 5	625	7372	7997	1225	3905	5130
DATASET 6	600	7623	8223	1075	4060	5135
DATASET 7	600	7788	8388	1175	3887	5062
DATASET 8	650	7754	8404	1225	3684	4909
DATASET 9	625	7569	8194	1175	3928	5103
DATASET 10	600	7755	8355	1150	4135	5285
DATASET 11	650	7233	7883	1200	3414	4614
DATASET 12	650	7112	7762	1200	3556	4756
DATASET 13	600	7815	8415	1150	3968	5118
DATASET 14	600	7690	8290	1175	3656	4831
DATASET 15	600	7721	8321	1075	4040	5115
AVERAGE	£621.7	£7,563	£8,184.1	£1,178.3	£3,836	£5,014.3

As it is seen in Table 1, the average total cost £8,184 with £621.7 of ordering cost and £7,563 for holding cost with 42 palette quantity. When it is compared to the Q=21 case, it is clearly seen that holding cost is decreasing sharply while there is an increase on ordering cost. The reason of this is that the system keeps more stock on hand and order less when the pallet quantity is large. On overall total cost, there is 39% decrease when the palette quantity is changed to 21 instead of 42. Although, the Q=21 case has better results, performance measures are also required to be considered. Performance measures like service level and average delay are shown in Table 2.

Table 2. Case A costs with L=12, Q=42;21 and service levels

	Deterministic Demand	Random Demand	Q=42,Q=21	Q=42		Q=21	
			Service Level for Det.	Service Level For Random	Average Delay (days)	Service Level For Random	Average Delay (days)
DATASET 1	880	221	100%	90.0%	2.73	79.6%	2.8
DATASET 2	831	206	100%	90.3%	2.85	83.5%	2.95
DATASET 3	797	197	100%	93.4%	2	93.4%	2
DATASET 4	870	219	100%	92.2%	4.2	88.1%	4.04
DATASET 5	850	208	100%	88.5%	4.8	76.9%	3.2
DATASET 6	784	188	100%	89.9%	3.9	89.4%	4.05
DATASET 7	797	196	100%	94.4%	4.6	86.7%	2.96
DATASET 8	877	211	100%	97.2%	2	83.9%	2.3
DATASET 9	829	205	100%	96.6%	2	86.3%	3.2
DATASET 10	787	196	100%	89.8%	3.25	83.2%	3
DATASET 11	850	213	100%	93.4%	2.4	84.0%	2.9
DATASET 12	853	210	100%	89.0%	2.7	80.0%	3.3
DATASET 13	806	201	100%	94.5%	2.6	83.1%	2.6
DATASET 14	778	198	100%	96.0%	2.4	92.9%	2.7
DATASET 15	794	193	100%	95.9%	4.1	91.7%	3
AVERAGE	825	204	100%	92.7%	3.1	85.5%	3

As it is seen in Table 2, the service level for deterministic demand is 100% whereas the average service level for stochastic demand is 92.7%. As the uncertainty on demand increases, the service level decreases as expected. On the other hand, the case of Q=21 has 85.5% service level for random demand. The service level is defined as the units that are backordered over total stochastic demand. Since the shortage cost for deterministic demand is very high, the service level is 100% with Q=42 and Q=21. For each unit backordered for stochastic demand is averagely delivered late about 3.1 days for Q=42 whereas it is 3 days for Q=21. When we compare the cases with 42 and 21 pallet quantities, economically the model with pallet 21 performs better. On the other hand, in terms of the service level, the first case has 92.7% while the other one has 85.5% while average delay time is almost same for both.

In case B, demands have inverse percentages for the case A. These results are gained with 20% deterministic demand and 80% stochastic demand with running of 15 datasets. The economical results are illustrated in Table 3.

Table 3. Case B costs with L=12, Q=42;21

	Palette=42			Palette=21		
	Ordering Cost	Holding Cost	Total Cost	Ordering Cost	Holding Cost	Total Cost
DATASET 1	675	7742	8417	1325	4362	5687
DATASET 2	625	7891	8516	1225	4374	5599
DATASET 3	600	8778	9378	1200	4694	5894
DATASET 4	650	7323	7973	1250	4434	5684
DATASET 5	625	7962	8587	1250	4517	5767
DATASET 6	600	8628	9228	1150	4581	5731
DATASET 7	575	8216	8791	1150	4882	6032
DATASET 8	650	7261	7911	1300	3707	5007
DATASET 9	625	8105	8730	1250	4084	5334
DATASET 10	600	8969	9569	1175	4945	6120
DATASET 11	650	8128	8778	1275	4629	5904
DATASET 12	650	8733	9383	1225	5081	6306
DATASET 13	600	8128	8728	1200	4469	5669
DATASET 14	575	8186	8761	1150	4758	5908
DATASET 15	600	7731	8331	1125	4339	5464
AVERAGE	£620	£8,118.7	£8,738.7	£1,216.7	£4523.7	£5,740.4

Similar to results in Case A, lower quantity in pallet brings better results in terms of holding cost. Overall, 34% improvements achieved on total cost by reducing number of computers in a pallet. Comparison of Case A and Case B results for the same parameters, about 8% increase on total costs are faced for both Q=42 and Q=21. Only difference between costs does not give a clear idea unless systems performances are not compared. Table 4 demonstrates performance of Case B with a lead time of 12 days in terms of service level and delay time.

Table 4. Case B costs with L=12, Q=42;21 and service levels

	Deterministic Demand	Random Demand	Q=42,Q=21	Q=42		Q=21	
			Service Level for Det.	Service Level For Random	Average Delay (days)	Service Level For Random	Average Delay (days)
DATASET 1	214	864	100%	85.3%	2.3	77.7%	3.4
DATASET 2	204	808	100%	88.9%	2.5	78.2%	2.7
DATASET 3	196	783	100%	93.4%	2.6	81.1%	4.1
DATASET 4	218	859	100%	81.8%	3.6	71.5%	4.4
DATASET 5	212	843	100%	86.8%	2.3	76.9%	2.7
DATASET 6	192	777	100%	89.2%	3.4	80.1%	2.9
DATASET 7	201	796	100%	86.3%	2.7	80.4%	3.2
DATASET 8	215	875	100%	85.5%	2.5	77.7%	3.1
DATASET 9	202	822	100%	87.5%	3.4	75.5%	2.9
DATASET 10	192	765	100%	83.3%	3.3	77.1%	4.6
DATASET 11	203	841	100%	83.0%	2.94	73.0%	2.6
DATASET 12	212	837	100%	82.1%	3.8	71.8%	3.8
DATASET 13	201	806	100%	92.1%	3.4	83.4%	3.5
DATASET 14	196	762	100%	87.9%	2.13	84.0%	3.6
DATASET 15	191	774	100%	85.8%	3.2	74.9%	3.2
AVERAGE	203	830	100%	86.6%	2.92	77.6%	3.4

In Table 4, it is seen that higher pallet amount gives higher service level for random demand. However, the service measures are worse than the Case A results under same situation.

When we evaluate the results we obtained from the model, we can see that the results are as expected in general. An important result is that the service level is high for random demand when the pallet quantity is large. This indicates that large pallet quantity works like a safety stock. Thus, the inventory policy is changing by the pallet quantity. For large size pallets we expect to have less safety stocks compared to the lower pallet quantities. The effects of other parameters will be detailed in following sections.

4.1. Current Situation Results

Safety stock is used to manage the inventory system against unexpected demand. In the current situation in the university, reorder level is determined as 20 computers. To see the difference between current system and our model results, the current situation is modelled into VBA. Like the model runs previously, demands are used from Case A and Case B situations. Order amount is always chosen as 1 pallet. If inventory level at the day which is today plus lead time is less than 20, then an order placed on today. Current situation is again run over a year with different data and the average results are presented in Table 5.

Table 5. Current situation average results

Situation	Ordering Cost	Holding Cost	Total Cost	Service Level
Case A with L=12, Q=42	£650.0	£14,977.0	£15,627.0	100.0%
Case A with L=12, Q=21	£1,425.0	£10,903.0	£12,328.0	100.0%
Case A with L=6, Q=42	£700.0	£15,137.7	£15,837.7	100.0%
Case A with L=6, Q=21	£1,375.0	£11,322.7	£12,697.7	100.0%
Case B with L=12, Q=42	£718.8	£14,917.8	£15,636.5	98.8%
Case B with L=12, Q=21	£1,381.3	£11,177.0	£12,551.8	98.0%
Case B with L=6, Q=42	£641.7	£15,255.7	£15,897.3	99.7%
Case B with L=6, Q=21	£1,266.7	£11,206.0	£12,470.7	99.6%

As it is seen, the service level for current situation is nearly perfect. However, the costs are almost double than our model costs. Since the random demand percentage is low in Case A, none of shortages are seen. On the other hand, for the case B very little amount of shortages are observed. Managers need to decide whether it is worthy to keep service level with obtained costs or not. For further research, the optimum reorder level could be investigated which minimizes the cost while keeping the service level on a desirable level.

4.2. Impact of the Parameters

All results are summarized in Table 6 and according to these results; the impacts of parameters are discussed

Table 6. Average results for different situations

Situation	Ordering Cost	Holding Cost	Total Cost	Service Level	Average Delay
Deterministic L=12, Q=42	£621.7	£7,208.5	£7,830.2	100%	0
Deterministic L=12, Q=21	£1,106.7	£3,646.9	£4,753.6	100%	0
Case A with L=12, Q=42	£621.7	£7,563	£8,184.1	92.7%	3.1
Case A with L=12, Q=21	£1,178.3	£3,836	£5,014.3	85.5%	3
Case A with L=6, Q=42	£620	£7,590.1	£8,210.1	95.6%	1.9
Case A with L=6, Q=21	£1,181	£3,803.7	£4,985.4	93%	1.7
Case B with L=12, Q=42	£620	£8,118.7	£8,738.7	86.6%	2.92
Case B with L=12, Q=21	£1,216.7	£4,523.7	£5,740.4	77.6%	3.4
Case B with L=6, Q=42	£621.7	£7,907.5	£8,529.2	90.2%	1.8
Case B with L=6, Q=21	£1,216.7	£4,184.7	£5,401.4	82.4%	1.85

Advance Demand Information

The decreasing on percentage of deterministic demand results an increase on total cost while the service level is getting lower. It is clearly showed in Table 6 that with $L=12$ and $Q=42$ parameters, both of optimum total cost and service level can be obtained for fully deterministic (known in advance) demand. Similar to this result, the runs with $L=12$ and $Q=21$ proved advance demand information is the best case. It might be seen that there is no big difference on total costs. However, the changing in service level shows us the importance of advance demand information.

Lead Time

Except fully deterministic case, lower costs and better service level are recorded with lower lead times. Similar to the advance demand information, the main differences can be seen on service levels instead of total costs. It is concluded that lower lead time will bring better service levels for less or equal to costs of the higher lead time.

Pallet Quantity/Batch Ordering

With the higher percentage of deterministic demand, the reduction on pallet quantity causes lower costs with lower service level. In the model, according to the observations, the high amount pallet behaves like safety stock and prevent model to make backorders. Therefore the demand with contains high level of random demand is more likely to give better results with higher amount in pallets.

In summary, choosing parameters are an issue which is related to decision of what level of service level is acceptable with what costs.

5. CONCLUSION

The main purpose of this study is to analyse the past demand and develop an inventory model based on the demand pattern. Due to the lack of data, the past demand analysis could only be made partially. Therefore datasets are generated instead of using real data. For the inventory model, a mathematical formulation is developed which allow the university to manage their stock systems. It is realized that some percentage of demand can be known in advance. Seeing the impact of this advance demand information, different cases are tested with different datasets. Mainly, it concluded that advance demand information is improving the inventory system in terms of both decreasing cost and increasing service level. The reduced lead times has no significant impact on inventory model while all demand is deterministic. While the percentage of random demand is getting higher, the reduced lead time has more impact the deterministic cases. For all cases, pallet obligation increases the cost whereas it increases the service level as well.

Integration of the model with the current stock spreadsheet used by the staff in the university will make the decision process easier. As an application, an appropriate software can be updated with the developed model in this paper for the stock system. In this paper, it is assumed that the lead time is constant. For more realistic case, the varying or stochastic lead times need to be considered and further models can be developed. Also the pallet quantity can be considered as a decision variable and another mathematical model developed to find the optimal pallet size.

REFERENCES

- Aloulou, M., Dolgui, A. and Kovalyov, M. (2013). A bibliography of non-deterministic lot-sizing models. *International Journal of Production Research*, 52(8), pp.2293-2310.
- Bon, A. and Leng, C. (2009). The Fundamental on Demand Forecasting in Inventory Management. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), pp.3937--3943.
- Bushuev, M., Guiffrida, A., Jaber, M. and Khan, M. (2015). A review of inventory lot sizing review papers. *Management Research Review*, 38(3), pp.283-298.

- Chao, X. and Zhou, S. (2009). Optimal Policy for a Multiechelon Inventory System with Batch Ordering and Fixed Replenishment Intervals. *Operations Research*, 57(2), pp.377-390.
- Chen, F. (2000). Optimal Policies for Multi-Echelon Inventory Problems with Batch Ordering. *Operations Research*, 48(3), pp.376-389.
- Chen, F. and Zheng, Y. (1994). Evaluating Echelon Stock (R, nQ) Policies in Serial Production/Inventory Systems with Stochastic Demand. *Management Science*, 40(10), pp.1262-1275.
- Gallego, G. and Ozer, Özalp. (2001). Integrating replenishment decisions with advance demand information. *Management Science*, 47(10), pp.1344--1360.
- Kesen, S. E., Kanchanapiboon, A. and Das, S. (2010). Evaluating supply chain flexibility with order quantity constraints and lost sales. *International Journal of Production Economics*, 126(2), pp.181-188.
- Özer, Ö. and Wei, W. (2004). Inventory Control with Limited Capacity and Advance Demand Information. *Operations Research*, 52(6), pp.988-1000.
- Shang, K. and Zhou, S. (2010). Optimal and Heuristic Echelon (r, nQ, T) Policies in Serial Inventory Systems with Fixed Costs. *Operations Research*, 58(2), pp.414-427.
- Sobel, M. and Zhang, R. (2001). Inventory policies for systems with stochastic and deterministic demand. *Operations research*, 49(1), pp.157--162.
- Taha, H. (2007). *Operation Research: An Introduction*. 8th ed. New Jersey: Pearson, pp.427-449.
- Veinott, A. (1965). The Optimal Inventory Policy for Batch Ordering. *Operations Research*, 13(3), pp.424-432.
- Wang, T. and Toktay, B. (2008). Inventory management with advance demand information and flexible delivery. *Management Science*, 54(4), pp.716--732.
- Waters, C. (1992). *Inventory control and management*. 1st ed. Chichester [England]: Wiley.
- Van Woensel, T., Erkip, N., Curseu, A. and Fransoo, J.C., 2013. Lost sales inventory models with batch ordering and handling costs. In *Beta Working Paper series*. Eindhoven (Vol. 421).

GÖRÜNTÜ İŞLEME VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE İLETİM HATLARINDA ARIZA YERİ BELİRLEME

¹Serkan BUDAK , ²Bahadır AKBAL 

^{1,2} Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Konya, TÜRKİYE

¹sbudak@ktun.edu.tr, ²bakbal@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 22.01.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.05.2020)

ÖZ: Elektrik enerjisinin kesintisiz ve kaliteli bir şekilde iletilmesi için, üretim yapıldığı noktadan tüketim olan noktaya kadar kontrol edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla üretimden tüketime kadar her aşamada iletim ve dağıtım hatlarında koruma yapılması şarttır. Elektrik tesislerinde koruma rölelerinin temel görevi, sistemde meydana gelen kısa devrelerde arızalı olan bölgenin mümkün olan en kısa sürede devre dışı etmektir. Sistemin en önemli parçası olan enerji iletim hatları ve bu hatları koruyan mesafe koruma rölelerine bu konuda çok önemli görevler düşmektedir. Hızlı ve verimli çalışmalar yapmak için doğru bir hata yeri tespit tekniği gereklidir. İletim hatlarında transformatör nötr nokta topraklaması bir güç sisteminin tek faz – toprak kısa devre arızası sırasında oluşan sıfır bileşen akımı mesafe koruma rölesinin çalışmasını etkilemektedir. Topraklama sistemi ve koruma sistemleri arasındaki ilişki göz önüne alındığında, uygun bir topraklama seçimi yapılmalıdır. İletim hatlarında farklı topraklama sistemlerinde kısa devre arızalarının yerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için yapay sinir ağı (YSA) kullanılmıştır. YSA'nın performansını test etmek için destek vektör makineleri (DVM) ile karşılaştırılmıştır. İletim hattı modeli PSCAD™ / EMTDC™ benzetim programında oluşturulup YSA için gerekli veriler elde edilmiştir. Farklı topraklama sistemlerinde oluşturulan kısa devre arızalarındaki mesafe koruma rölesinin R-X empedans diyagramının empedans değişiminin görüntüsü kayıt altına alınarak veri setleri oluşturulmuştur. Görüntülerde ilgili odak noktaları özellik çıkarım ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak farklı YSA modellerine giriş olarak verilmiş ve en iyi arıza yeri tahmini veren YSA modeli seçilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mesafe Koruma Rölesi, Arıza Yeri Tahmini, Görüntü İşleme Teknolojisi, YSA, Kısa Devre Arızaları, Güç Transformatör Topraklaması

Determination of Fault Location in Transmission Lines with Image Processing and Artificial Neural Networks

ABSTRACT: In order to transmit electrical energy in a continuous and quality manner, it is necessary to control it from the point of production to the point of consumption. Therefore, protection of transmission and distribution lines is essential at every stage from production to consumption. The main function of the protection relays in electrical installations should be deactivated as soon as possible in the event of short circuits in the system. The most important part of the system is energy transmission lines and distance protection relays that protect these lines. An accurate error location technique is required to make fast and efficient work. Transformer neutral point grounding in transmission lines affects the operation of the zero component current during the single phase to ground short circuit failure of a power system. Considering the relationship between the grounding system and protection systems, an appropriate grounding choice should be made. Artificial neural network (ANN) has been used in order to accurately locate short circuit faults in different grounding systems in transmission lines. Compared

with support vector machines (SVM) for testing inside ANN The transmission line model is made in the PSCADTM / EMTDCTM simulation program. Data sets were created by recording the image of the impedance change of the R-X impedance diagram of the distance protection relay in short circuit faults created in different grounding systems. The related focal points in the images are given as an introduction to different ANN models using feature extraction and image processing techniques and the ANN model with the highest fault location estimation accuracy was chosen.

Key Words: Distance Protection Relay, Fault Location Forecast, Image Processing Technology, ANN, Short Circuit Faults, Power Transformer Ground

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Modern güç sistemlerinde elektrik enerjisinin üretilmesinden, yerleşim birimlerine iletilmesine kadar olan süreçte sürekliliğin sağlanması çok önemlidir. Elektrik tesislerinde koruma rölelerinin temel fonksiyonu, sistemde meydana gelen kısa devrelerde ya da tesise ve tesis elemanlarına zarar verebilecek herhangi bir anormal durumda, elektrik şebekesinin geri kalan kısmının etkin bir şekilde çalışmasını etkilemeyecek şekilde, arızalı olan bölgenin mümkün olan en kısa sürede devre dışı edilmesini sağlamaktır.

Kısa devrelerin elektrik tesislerindeki etkileri çok farklı olabilmektedir. Darbe şeklinde ani olarak ortaya çıkması ile oluşan büyük kısa devre akımları, tesis elemanları üzerinde hatlara, kablolar, baralara, transformatörlere ve diğer donanımlara mekanik olarak zarar verebilir. Devreden uzun süre geçen sürekli kısa devre akımları ise tesis elemanlarının ısınmasına ve malzemenin termik bakımdan zorlanmasına sebep olabilir. Bundan dolayı hem tesis hem de işletme personeli bundan zarar görebilir. Kısa devre olayının sebep olduğu arızalar sonucunda, işletme kısmen veya tamamen durur ve kademe kademe enerji üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi normal olarak devam edemez. Ayrıca arızanın sebep olduğu hasarlar büyük onarım masraflarına yol açar.

Elektrik sistemindeki arızaların çok önemli bir kısmı dengesiz olup, çok az bir kısmı dengelidir. Arızaların pratikte oluşma sıklığı, tesisatın yapısına, çevreye ve bölgeye göre değişse de sıralama genelde benzerdir.

Bir araştırmaya göre bu sıklık;

- Üç fazlı simetrik kısa devre için %5,
- İki faz-toprak kısa devresi için %10,
- Faz-faz kısa devresi için %15,
- Faz-toprak kısa devresi için %70,

olarak belirlenmiştir (Grainger ve diğ., 2003).

Sistemin en önemli parçası olan enerji iletim hatları ve bu hatları koruyan mesafe koruma rölelerine bu konuda çok önemli görevler düşmektedir. Mesafe koruma röleleri, iletim ve dağıtım hatlarında ana ve yedek koruma olarak geniş bir kullanıma sahiptirler. İletim hatlarını korumak için en çok tercih edilen röledir (Glover ve diğ., 2012). Temel olarak mesafe koruma röleleri gerilim ve akım değerlerini karşılaştırarak hattın empedansına göre arızayı ve arızanın yerini belirlemektedir (Ziegler, 2011).

Modern güç sistemlerinin uygun teknik, ekonomik ve düzenleyici yapıda güvenilir şekilde çalışması gerekmektedir. Bu nedenle koruma özelliği, iletim sistemlerinde daha iyi kontrol edilebilecek ve daha verimli, daha güvenilir hizmet kalitesi sağlayacak şekilde gözden geçirilmelidir.

İletim hattında bir arıza meydana geldiğinde, mesafe röleleri arızalı hattı, arızanın türünü ve arıza yerini algılar (Ram ve diğ., 2013). Mesafe koruma rölesi, farklı arıza durumlarından, dalga formlarındaki DC ofsetinin (simetrik olmayan akım), sıfır bileşen akımı ve ağ yapılandırma değişikliklerinden etkilenebilir. (Jihong ve diğ., 1993), (Liao ve Elangovan, 1998), (Ye ve diğ., 1998) karmaşık hesaplamalar içeren empedansa dayalı yöntemlerde çoğu zaman kısa devre arıza yeri tahmininde hata oluşturur. Yürüyen dalga tabanlı yöntemlerde sinyal işleme metodu da bağlı olarak doğru arıza ve arıza yeri tahmini yapılabilir, fakat akım transformatörleri kısa devre anında doyuma gitmeden ve doğru sonuçlar

vermesi gerekmektedir. Bu makale YSA kullanarak yukarıdaki zorlukların üstesinden gelebilecek yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

Literatürde, yapılan çalışmalarda mesafe koruma rölesi arıza ve arıza yeri tespitinde genel olarak empedansa dayalı yöntemler, yürüyen dalga tabanlı yöntemler ve sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. (Yağan, 2015) Dağıtım hatlarında hat başından alınan üç faza ait gerilim ve akım bilgileri dijital arıza kayıt edicide işlenerek belirli frekans gruplarına ayrılarak YSA'ya verilmiştir. (Liang ve Jeyasurya, 2004), (Maheshwari ve diğ., 2019), (Osman ve Malik, 2004), (Zubić ve diğ., 2017), (Jung ve diğ., 2007) İletim hatlarının mesafe koruması için dalgacık dönüşümü uygulaması kullanılmıştır. Özellikle, dijital röle tarafından ölçülen gerilim ve akım sinyallerinin temel frekans bileşenlerini çıkarmak için kullanılır. (Dos Santos ve Senger, 2011), (Chawla ve diğ., 2006) sezgisel tabanlı algoritma kullanarak, röleden arıza noktasına hat empedansını tahmin eden bir fonksiyon tahmincisi olarak çalıştırmıştır ve geleneksel mesafe koruma rölelerine benzer şekilde, bu algoritma sırasıyla akım ve gerilim transformatörleri tarafından sağlanan akım ve gerilim örneklerine dayalı olarak hat empedansını tahmin eden ölçüm sonuçlarına dayanmaktadır. (Zhong ve diğ., 2013) Faz-toprak arızaları için üç katsayılı doğrusal bir diferansiyel denklem çözülerek ölçüm noktasından arıza noktasına arıza mesafesini hesaplayan yeni bir mesafe koruma algoritması önerilmiştir. (Ray ve Mishra, 2016) uzun bir iletim hattındaki destek vektörü makine tabanlı hata tipi ve mesafe tahmin şemasını önermektedir. Önerilen teknik, arıza sonrası tek çevrim akım dalga formunu kullanır ve örneklerin ön işleme dalgacık dönüşümü ile yapılır. Dalgacık dönüşümü ile çok sayıda özellik toplanması, fazlalık özelliklerin kullanılmaması için ileri özellik seçim yönteminin uygulanması, böylece tahmin doğruluğunun artırılması sağlamaktadır. (Swetapadma ve Yadav, 2018) paralel hatlarda her türlü arızanın arıza yeri tahmini için k-en yakın komşu (k-NN) tabanlı yöntem önerilmektedir. Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT), sinyallerin ön-işlenmesi için kullanılır ve daha sonra bir ön-arıza çevriminin ve bir arıza-sonrası numune döngüsünün standart sapması k-NN algoritmasına giriş olarak kullanılır. (Meddeb ve diğ., 2019) sıfır bileşen akımlarının, mesafe rölesi korumasının çalışmasının etkisini önlemek için yeni bir yaklaşım önermektedir. Önerilen yöntem, tek fazlı bir arıza sırasında güç transformatörünün topraklama sisteminin kontrolüne dayanır. Arıza sırasında güç transformatörünün nötr topraklamasını ayırmaktır. Mesafe rölesinin açılmasındaki hataları önlemek için yeni aşırı akım rölesinin topraklama sistemine eklenmesini önermiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde empedansa dayalı yöntemlerde arıza ve arıza yeri tespiti sıfır bileşen akımı, gerilim dalgalanmaları, yüksek empedanslı arızalar ve simetrik olmayan iletim hatlarından dolayı doğru tahmin edilememektedir. Yürüyen dalga tabanlı yöntemler incelendiğinde gerilim ve akım bilgilerini kullanıldığında akım transformatörlerin doyuma gitmesi, yanlış ölçüm sonuçları, sıfır bileşen akımı ve simetrik olmayan iletim hatlarında arıza ve arıza yeri tespiti doğru tahmin edilememektedir. Sezgisel yöntemler incelendiğinde yapılan çalışmalarda gerilim ve akım bilgilerini kullanarak tahmin çalışmaları yapılmıştır ve akım transformatörlerin doyuma gitmesi, yanlış ölçüm sonuçları, sıfır bileşen akımı ve simetrik olmayan iletim hatlarında gerilim ve akım bilgileri doğru olmadığında arıza ve arıza yeri tespitinde hatalar meydana getirmektedir. Bu makalede yapılan çalışmada arıza anında oluşan empedans diyagramında oluşan görüntüler kayıt altına alınarak görüntü işleme teknikleri kullanılarak arızalar meydana geldiğinde akım transformatörlerin doyuma gitmesi, yanlış ölçüm sonuçları, sıfır bileşen akımı ve simetrik olmayan iletim hatları gibi sorunlarda yüksek doğrulukla arıza ve arıza yeri tahmini yapılmıştır.

Bu çalışmada ikinci bölümde transformatör topraklamasının mesafe koruma rölesi üzerindeki etkisi ve farklı topraklanmış sistemlerde oluşan gerilim ve kısa devre akımlarının incelenmesi yapılmıştır, üçüncü bölümde mesafe koruma rölesinden elde edilen R-X empedans diyagramı görüntüleri ile görüntü işleme teknikleri kullanarak veri seti oluşturulup YSA modeli oluşturularak giriş verisi olarak kullanılmıştır ve arıza yeri tahmini yapılmıştır.

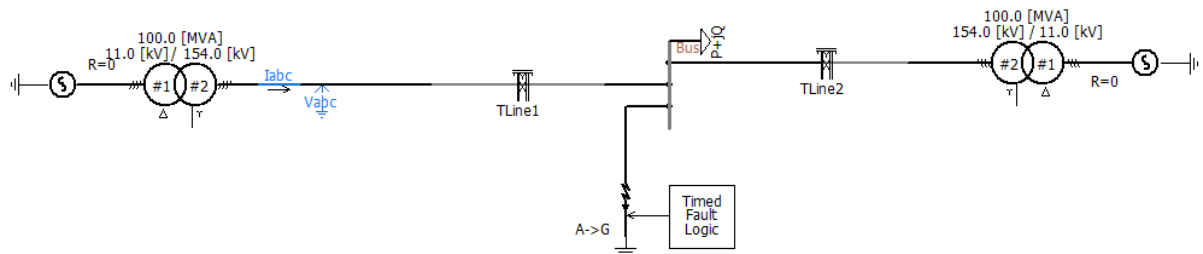
TRANSFORMATÖR TOPRAKLANMASININ MESAFE KORUMA RÖLESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ (TRANSFORMER GROUNDING ON DISTANCE PROTECTION RELAY)

Transformatör nötr noktası topraklaması bir güç sisteminin tek faz – toprak kısa devre arızası sırasında mesafe koruma rölesinin çalışmasını etkilemektedir. Sistemde oluşan sıfır bileşen akımı iletim hattının hata empedansını etkileyebilir (Meddeb ve diğ., 2019). Topraklama sisteminin arıza üzerinde etkisi üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Topraklama sistemi ve koruma sistemleri arasındaki ilişki göz önüne alındığında, uygun bir topraklama yapılmalıdır (Meddeb ve diğ., 2019).

Tek faz - toprak kısa devre arıza olması durumunda, güç transformatörleri nötr noktası toprağa bağlı olduğu için sıfır bileşen akımının iletilmesinde çok önemli bir role sahiptir (Lin ve diğ., 2011) ve (Guangfu ve diğ., 2010) . Sıfır bileşen akımı, iletim hattının mesafe rölesi çalışmasını etkilemektedir. Mesafe rölesinin hatalı çalışması güç sisteminin güvenilirliğini etkiler.

Transformatörün nötr noktası topraklanmış bir sistemde ve tek faz- toprak hatası sırasında mesafe rölesi tarafından ölçülen empedans, iletim hattının hatalı noktasının empedansı ile orantılı değildir (Meddeb ve diğ., 2019). Bunun sebebi, toprak arızası olayları sırasında sistem topraklamasında sıfır bileşen akımlarının varlığıdır. İletim hattında oluşan sıfır bileşen akımı yüksek frekanslı gerilim dalgalanmalarına ve harmonikleri yol açtığı için bu durum mesafe rölesinin hatalı şekilde çalışmasına bunun sonucunda sistemde oluşan arızaların tespitinde hatalar meydana gelmektedir.

Bu çalışmada güç sistemi için PSCADTM / EMTDCTM benzetim programında modellenen 154kV, 50Hz, 200 km havai iletim hattı tek hat şeması Şekil 1’de gösterilmektedir. İletim hattı üç fazlı iki güç transformatörüne bağlı iki jeneratör üretim kaynağından oluşur. İletim hatları için kabul edilen model, 154kV’luk tek devre enerji iletim hattı 1272 MCM iletkenin kesitleri ve direk tipi ‘PB’ kullanılmıştır. Transformatörlerin bağlantılarında düşük gerilim tarafı (11kV) üçgen, yüksek gerilim tarafı (154kV) yıldız olarak seçilmiştir. Sistemde 25MW’lık sabit bir yük kullanılmıştır.



Şekil 1. İletim hattı modeli

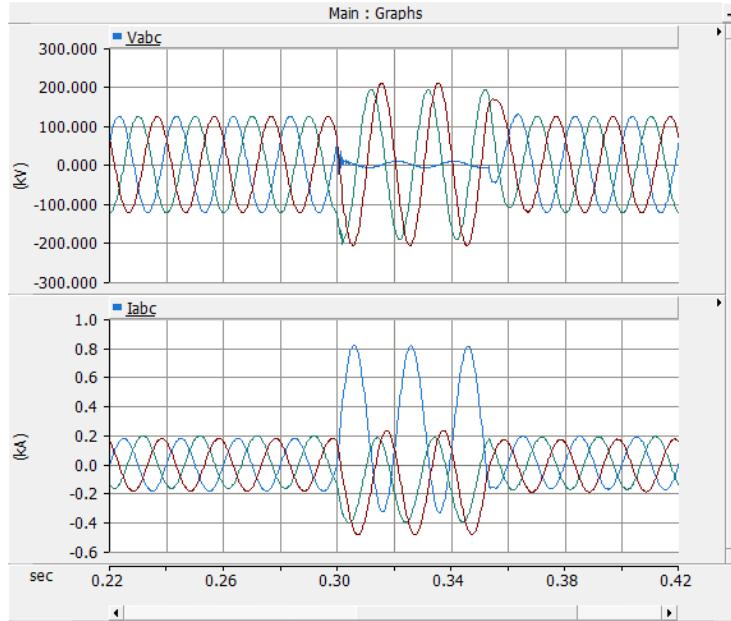
Figure 1. Transmission line model

PSCADTM / EMTDCTM benzetim programında iletim hattı modellenerek tek faz- toprak arızası sırasında transformatör topraklamasının etkisi gösterilmiştir. Yapılan çalışmada üç farklı şekilde topraklanmamış, doğrudan topraklanmış ve empedansla topraklanmış transformatör sistemleri kullanılarak iletim hattında oluşan kısa devre arızalarının durumu gözlenmiştir. Hata empedansı sabit $Z_f = 1\Omega$ olarak alınmıştır. Kısa devre arızası sabit sürelerde sistem çalıştıktan sonra 0.3 saniye sonra ve 0.05 saniye boyunca devam etmektedir. Çalışmalar en sık karşılaştığımız tek faz-toprak kısa devresi ve diğer fazlarla benzer özellik gösteren (a-fazı) oluşturularak yapılmıştır.

Topraklanmamış Sistem (Ungrounded System)

Topraklanmamış sistemlerde güç transformatörleri ile toprak arasında bağlantı yoktur. Bu nedenle, tek fazdan toprağa arıza akımı düşüktür ve sisteme sorun oluşturmazlar. Nötr noktası sıfır bileşen akımının akmasına izin vermez (Meddeb ve diğ., 2019). Kısa devre anında Şekil 2’de gösterilen gerilim-akım grafiğinde kısa devre olmayan fazlarda yani sağlam fazlarda faz-toprak aşırı gerilimler oluşmuştur. Kısa devre anında kısa devre yapılan A-fazında yüksek arıza akımı oluşmuştur ve sağlam

fazlarda akım artışı olmuştur. Bu tip nötr noktası topraklanmamış sistemlerde arıza akımı çok yüksek olmamasına rağmen yüksek gerilimler oluşması iletim hattı için istenmeyen durumdur.

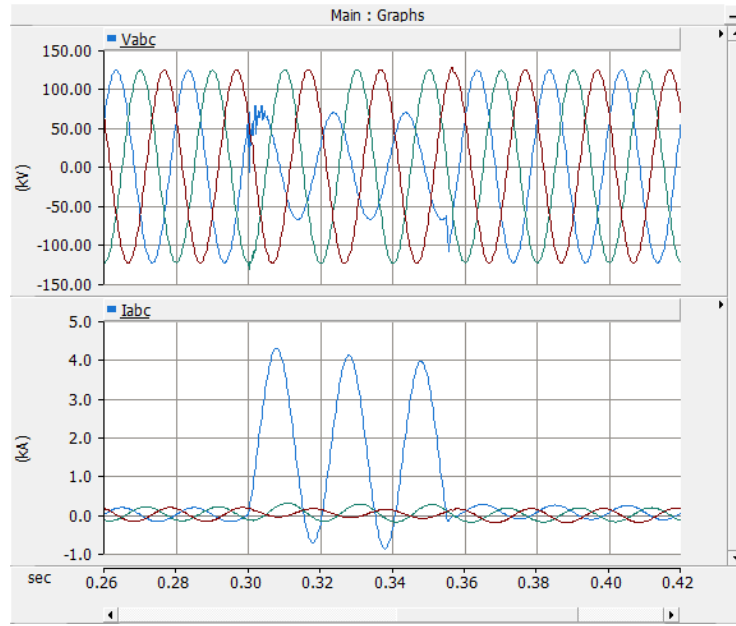


Şekil 2. Topraklanmamış sistemde kısa devre anında oluşan gerilim-akım grafiği

Figure 2. Voltage-current graph appearing during short circuit in ungrounded system

Doğrudan Topraklanmış Sistem (Directly Grounded System)

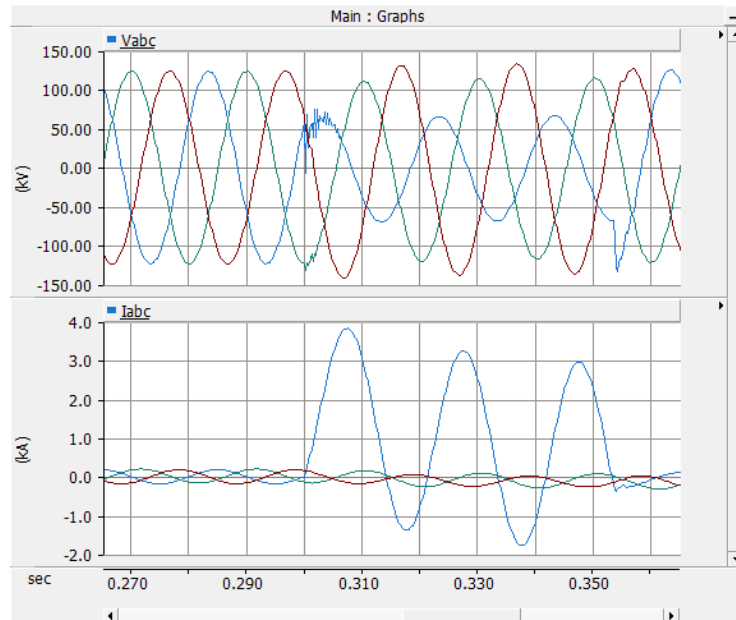
Doğrudan topraklanmış sistemlerde transformatörün nötr noktası doğrudan topraklanır. Şekil 3’de gösterilen gerilim akım grafiğinde doğrudan topraklanmış sistemin çok yüksek seviyelerde arıza akımı ve kısa devre yapılan hatta gerilim düşmesi gözlemlenmektedir. Sağlam fazlarda gerilim değişmemektedir. Bu nedenle, bu tip sistem topraklaması geçici aşırı gerilimlerin kontrolünü sağlar, ancak yüksek seviyede bir arıza akımı oluştururlar.



Şekil 3. Doğrudan topraklanmış sistemde kısa devre anında oluşan gerilim-akım grafiği
Figure 3. Voltage-current graph appearing during short circuit in a directly grounded system

Empedans ile Topraklanmış Sistem (Grounded System with Impedance)

Empedans ile topraklanmış sistemlerde transformatörün nötr noktası bir empedans ile topraklanır. Empedans değeri $R=5$ ohm olarak seçilmiştir. Şekil 4’de gösterilen gerilim-akım grafiğinde empedans ile topraklanmış sistemin arıza akımının, doğrudan topraklanmış sisteme göre empedans nedeniyle daha az olduğunu görülmüştür. Sağlam fazlarda gerilim değişmemektedir ve geçici aşırı gerilimlerin kontrolü sağlar.



Şekil 4. Empedans ile topraklanmış sistemde kısa devre anında oluşan gerilim-akım grafiği
Figure 4. Voltage-current graph appearing during short circuit in impedance grounded system

Yapılan çalışmada transformatör nötr noktası doğrudan toprağa bağlandığında, geçici aşırı gerilimlerin oluşmadığı ve yüksek arıza akımı oluştuğu için hata koruma rölesi tarafından hızlıca tespit edilebilir. Ancak, çok yüksek hata akımına sebep olur. Topraklanmamış sistemlerde, arıza akımı düşüktür, fakat iletim hattında önemli yüksek gerilim dalgalanmaları oluşturur. Oluşan yüksek gerilim,

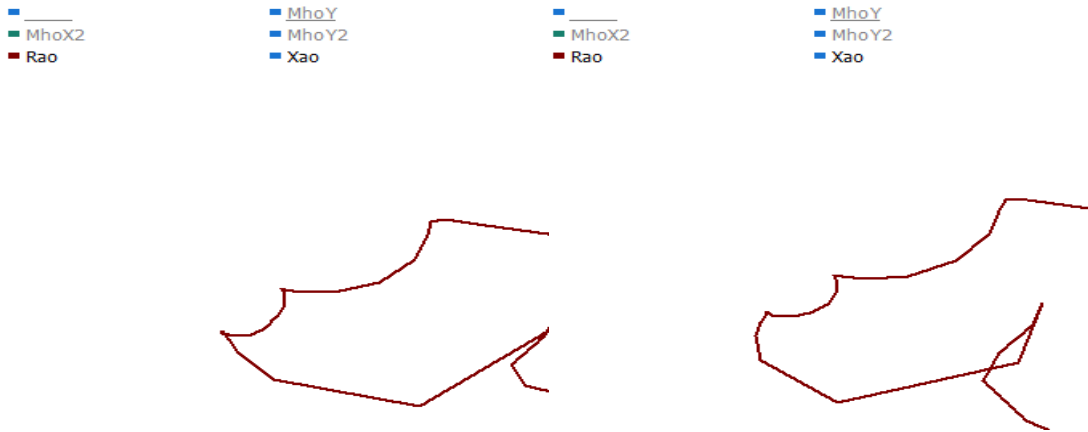
iletim hattı donanımlarında ciddi zararlara yol açabilir. Empedans ile topraklanmış sistemlerinin geçici gerilimin ve arıza akımının büyüklüğünü sınırlandırması ve böylece donanımların hasar görmemesini sağlar. Ancak topraklanmış sistem kuruluysa, yatırım pahalı olacaktır (Meddeb ve diğ., 2019). Bu nedenle, topraklama tipi, tek fazdan toprağa arıza akımının seviyesini etkiler ve gerilim dalgalanmalarına neden olmaktadır.

MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada transformatör topraklamasının mesafe koruma rölesi üzerindeki etkisi incelenerek dengesiz kısa devre arızalarında sıfır bileşen akımı iletim hattında yüksek frekans ve harmonikler oluşturması mesafe koruma rölesinin doğru çalışmasını etkilemektedir. Mesafe koruma rölesinin çalışmasının etkisi azaltmak için yeni bir yöntem üzerinde durulmuştur.

Görüntü İşleme Tekniği Kullanarak Veri Seti Oluşturulması (Creating a Data Set Using Image Processing Technique)

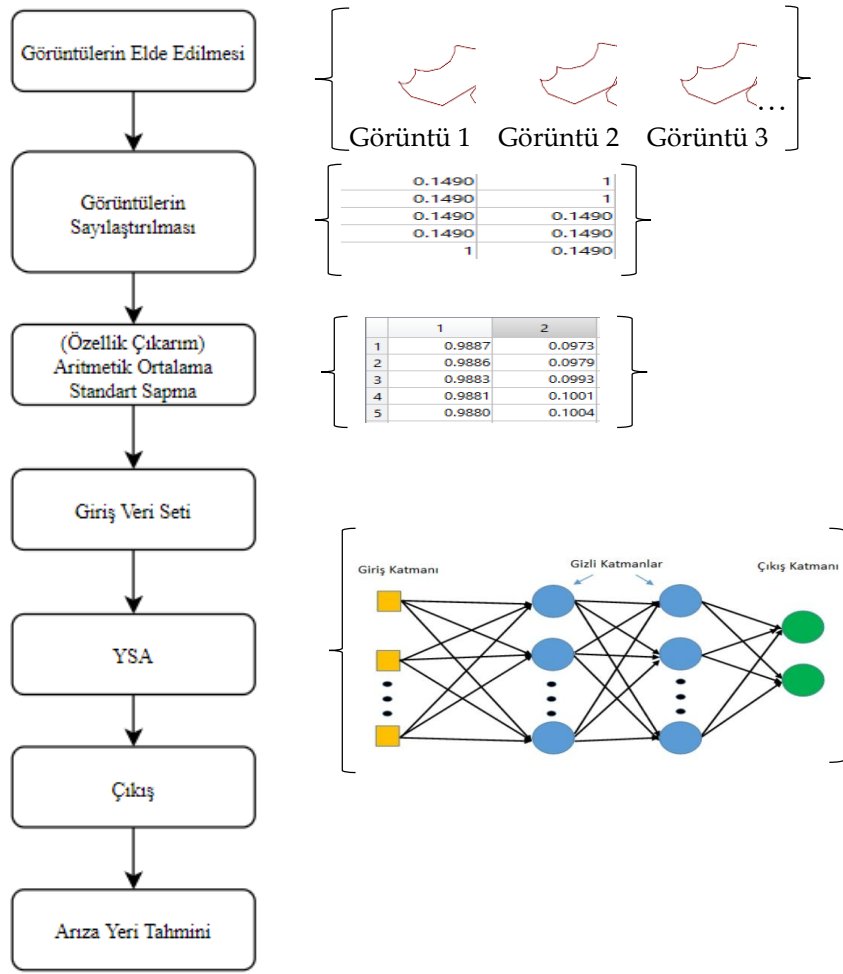
İletim hatlarında güç transformatörün topraklama tipine göre farklı kısa devre arızalarına maruz kalmaktadır. Mesafe koruma rölesi kısa devre arızalarında hem arızayı hem de arızanın yerini tespit edebilmektedir. Fakat topraklama tipine bağlı olarak sıfır bileşen akımların ve gerilim dalgalanmaların oluşması mesafe koruma rölesinin arızayı ve arıza yerini doğru tahmin etmesini zorlaştırmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada YSA ile arıza tespiti üzerine tahmin çalışmaları yapılmıştır. PSCADTM / EMTDCTM benzetim programında iletim hattı modellenerek mesafe koruma rölesinden elde edilen R-X empedans diyagramı görüntüleri oluşturulmuştur. Şekil 5’de örnek olarak mesafe koruma rölesinden elde edilen R-X empedans diyagramı görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 5. Mesafe koruma rölesi kısa devre anında R-X empedans diyagramı görüntüleri

Figure 5. R-X impedance diagram images during distance protection relay short circuit

Bu çalışmada farklı kilometrelerde ve farklı topraklanmış sistemlerde oluşturulan her arızanın R-X empedans diyagramında görüntüleri farklıdır. Elde edilen görüntülerin sayısallaştırılması için Matlab Image Processing Toolbox [MATLAB] programı kullanılmıştır. Her bir görüntü sayısallaştırılarak matris haline getirilmiştir. Sayısal görüntüler renk tonuna göre 0-255 arası değerlerdir, bu değerler normalizasyon yapılarak 0-1 aralığına dönüştürülmüştür. Her bir görüntü, görüntü işleme tekniği kullanılarak sayısallaştırıldığında, 339x292 büyük boyutta bir matris formu elde edilir. Bu boyuttaki bir matris yapay sinir ağlarında eğitilirken işlem süresi uzun ve doğruluk değeri azdır. Bu sebeple istatistiki yöntemler uygulanarak matris boyutu küçültülmüştür. Bu işlem ile YSA uygulanmadan önce kullanılan istatistiki yöntemler ise; aritmetik ortalama ve standart sapmadır. Şekil 6’da görüntülerin elde edilmesi, görüntünün sayısallaştırılması, veri setinin oluşturulması, YSA’ya giriş olarak verilmesi ve YSA’dan çıkış olarak arıza yeri tahminini gösteren akış şeması verilmiştir.



Şekil 6. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak YSA modeli akış şeması

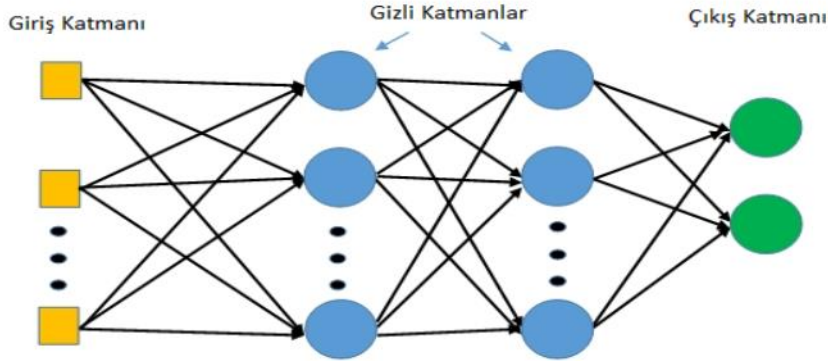
Figure 6. ANN model flow diagram using image processing techniques

Yapay Sinir Ağı Kullanarak Arıza Yeri Tespiti (Fault Location Detection Using Artificial Neural Network)

YSA insan sinir sisteminin işleyiş yapısını modelleme fikrine dayalı olarak ortaya çıkan ve çok sayıda sinir hücresinin birbirine bağlanarak oluşturduğu öğrenme şeklini referans alan yapay zeka yöntemlerinden birisidir. Bunun yanında sınıflandırma, tahmin yapma, kestirim gibi problemlerde geniş olarak kullanılan etkili bir öğrenme metodudur.

Bir yapay sinir ağında, giriş katmanı (input layer), gizli katman (hidden layer) ve çıkış katmanı (output layer) olmak üzere temelde üç katmanda oluşur. İlk katman giriş katmanını oluşturur ve dışarıdan girilen verilerin ağırlık değerleri ile çarpılarak gizli katmana iletilmesiyle görevlidir. Bu verilerin istatistikteki karşılığı bağımsız değişkenlerdir. Giriş katmanı probleme etki eden parametrelerden oluşmaktadır. Son katman çıkış katmanıdır ve bilgilerin çıkış olarak aktarılmasını sağlar. Çıkış değişkenlerinin istatistikteki karşılığı bağımlı değişkenlerdir. Modeldeki diğer katman veya katmanlar ise giriş katmanı ile çıkış katmanı arasında yer alır ve gizli katman olarak adlandırılır. Gizli katmanda bulunan nöronların dış ortamla herhangi bir doğrudan bağlantısı bulunmaz. Yalnızca giriş katmanından gelen sinyalleri alırlar ve çıkış katmanına sinyal gönderirler. Gizli katman sayısı ve gizli katmanlarda yer alacak nöronların sayısının seçimi, nöronlara ait aktivasyon fonksiyonun belirlenmesi gibi parametreler oluşturulan ağın performansı açısından önemlidir. Gizli katma sayısı ve nöron sayısı oluşturulacak ağın performansına göre deneme yanılma yöntemi ile belirlenebilir. Temel olarak insan beyninin çalışma şeklini taklit eden yapay sinir ağları veriden öğrenebilme, genelleme yapabilme, çok

sayıda değişkenle çalışabilme gibi birçok önemli özelliğe sahiptir (Kırbaş, 2018). Şekil 7’de ileri beslemeli çok katmanlı bir yapay sinir ağı yapısı verilmiştir (Şalvarcı, 2017).



Şekil 7. Çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı yapısı

Figure 7. Multilayer feed forward neural network structure

Arıza yeri tahmininin YSA yaklaşımı ile belirlenmesi için ağı sunulacak olan veri kümesi görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilen verilerdir. Modelin giriş parametreleri olarak görüntülerden elde edilen sayısal veriler kullanılıp, çıktı olarak her görüntünün arıza yeri ‘D_Min_Max’ yöntemiyle normalizasyon yapılarak kullanılmıştır. Böylelikle iletim hatlarında arıza yeri tespiti modeli, yapay sinir ağları ile tahmin edilebilmektedir.

YSA çıktıları olarak literatürde yapılan normalizasyon çalışmaları ile ilgili değerlendirmeler incelendiğinde ‘D_Min_Max’ Normalizasyon yönteminin uygun olduğu tespit edilmiştir. ‘D_Min_Max’ normalizasyon yöntemi için Denklem 1 kullanılır (Yavuz ve Deveci, 2012).

$$X' = 0.8 * \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} + 0.1 \quad (1)$$

Bu eşitlikte; X' = Normalize edilmiş veriyi,

X_i = Giriş değeri,

X_{min} = Giriş seti içinde yer alan en küçük sayıyı,

X_{max} = Giriş seti içinde yer alan en büyük sayıyı

İfade etmektedir.

Tahmin etmeye ilişkin iki önemli adım bulunmaktadır; birincisi veriyi tahmin etmek için hazırlamadır. İkincisi ise farklı tahmin edici modellerin karşılaştırılmasıdır. Modelleri karşılaştırma ölçütleri; doğruluk, hız, sağlamlık, ölçeklenebilirlik, yorumlanabilirliktir. Yapay Sinir Ağları ve makine öğrenmesi yöntemlerinin performans değerlendirmelerinde kullanılan temel performans göstergesi MSE (mean square error) ve yüzde hata değeri kullanılmıştır. Denklem 2 ve Denklem 3’de sırasıyla yüzde hata değeri, MSE hesaplamaları yer almaktadır. MSE ve yüzde hata değeri sıfıra yaklaşmasıyla hata oranının azaldığını göstermektedir (Karasu ve diğ, 2018).

$$\% Hata = \frac{Gerçek\ arıza\ yeri - Hesaplanan\ arıza\ yeri}{Hattın\ toplam\ uzunluğu} * 100 \quad (2)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \quad (3)$$

Bu eşitlikte;

X_i = Gerçek arıza yerini,

Y_i = Tahmin edilen arıza yerini

İfade etmektedir.

YSA modeli oluşturulurken ağ tipi, eğitim fonksiyonu, gizli katman sayısı, nöron sayısı, transfer fonksiyonu YSA performansında çok etkili olduğu bilinmektedir. Çalışmada ağ tipi olarak Feed Forward Backprop, Cascade Forward Backprop ve Elman Backprop eğitim için kullanılmıştır. Eğitim fonksiyonu olarak Levenberg-Marquardt (LM), Conjugate Gradient with Powell/Beale Restarts (CGB), One Step Secant (OSS), Variable Learning Rate Backpropagation (GDX), Scaled Conjugate Gradient (SCG) kullanılmıştır. Gizli düğüm sayısı için deneme yanılma yöntemi kullanarak en iyi sonucu veren 4 gizli katmanlı YSA modeli oluşturulmuştur. Gizli düğümlerde ki nöron sayısı sırasıyla 20, 18, 10, 5 olarak belirlenmiştir. Öğrenme oranının 0.1' den 5.0' a adımsal olarak artırılması sonucunda 0.9 değerinin en düşük eğitim ve test hatasına sahip olduğu belirlenmiştir. İterasyon sayısının ise 1000 için en iyi sonucu verdiği görülmüştür.

YSA'nın performansını test etmek ve karşılaştırmak için literatürde sıkça kullandığımız makine öğrenmesi yöntemi Destek Vektör Makineleri (DVM) kullanılmıştır. Matlab Regression Learner literatürde yaygın olarak kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerini eğiterek karşılaştırma yapma ve en uygun modeli belirleme imkânı sunan bir uygulamadır (MathWorks). Giriş ve çıkış veri setleri uygulamaya verilerek veriler kontrol edilir, özellikler seçilir, doğrulama şemaları belirlenir ve farklı modelleri eğiterek performans sonuçları elde edilir. Her eğitim modelinin sonuçları görselleştirilebilir, yanıt grafiğine, tahmin ve gerçek yanıt grafiğine ve artık grafiğine ulaşılabilir. Eğitim modellerinin tahmini doğruluğunu incelemek ve değerlendirmek için performans ölçütleri kullanılır. Çizelge 1'de Cascade-forward neural network ile DVM eğitim modeli performans ölçütü MSE ile karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 1. Cascade-forward neural network ve Destek Vektör Makineleri eğitim modelleri karşılaştırılması

Table 1. Comparison of Cascade-forward neural network and Support Vector Machines training models

Kullanılan Yöntemler	Cascade-forward neural network	Destek Vektör Makineleri
Topraklanmamış Sistem (MSE)	1,53E-05	0,003257
Doğrudan Topraklanmış Sistem (MSE)	4,72E-05	0,003460
Empedans ile Topraklanmış Sistem (MSE)	6,61E-05	0,001159

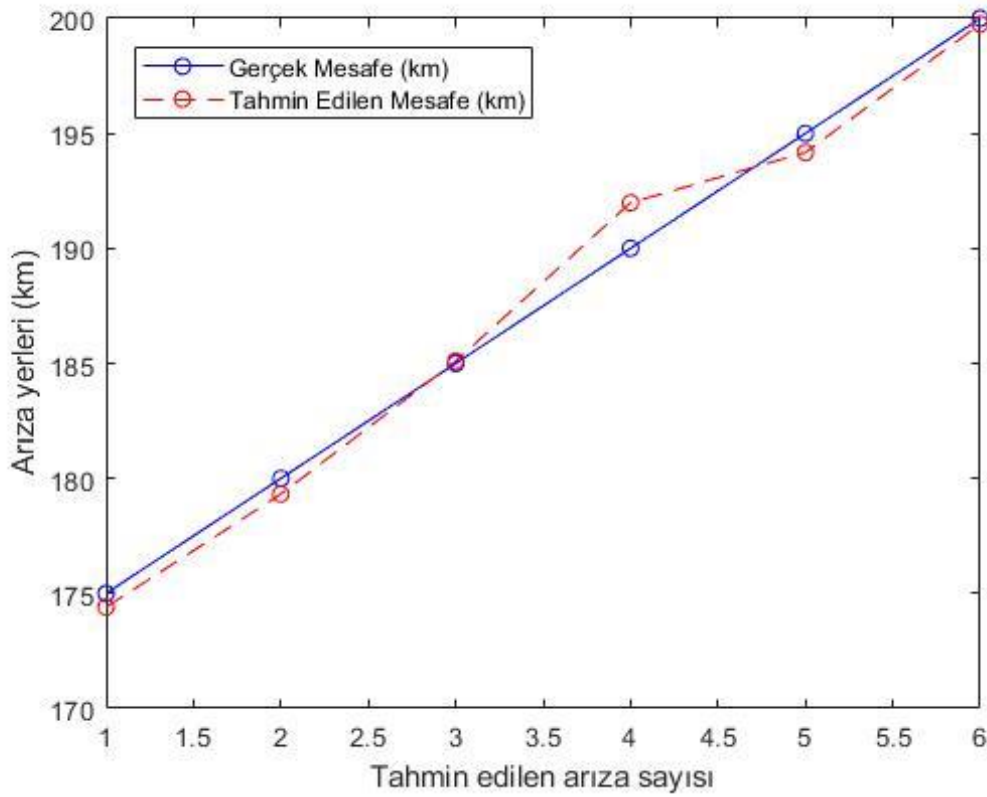
Çizelge 1'de karşılaştırma sonuçlarına göre kullanılan sistemler değişmesine rağmen Cascade-forward neural network eğitim modelinin MSE performans ölçütü daha iyi sonuç vermiştir.

YSA Cascade-forward neural network eğitim sonucunda Çizelge 2, Çizelge 3 ve Çizelge 4'de gerçek arıza yeri, tahmini arıza yeri, her arıza yerinde yüzde hata miktarı ve MSE sayısal verileri verilmiştir. Yapılan çalışmada minimum hata oranını veren ağ tipi, eğitim fonksiyonu dikkate alınmıştır. Çizelge 2'de transformatörün nötr noktası topraklanmamış olarak elde edilen görüntülerin veri setleri ile oluşturulan YSA modeli, Çizelge 3' de transformatörün nötr noktası doğrudan topraklanmış olarak elde edilen görüntülerin veri setleri ile oluşturulan YSA modeli, Çizelge 4' de transformatörün nötr noktası empedans ile topraklanmış olarak elde edilen görüntülerin veri setleri ile oluşturulan YSA modeli aşağıdaki gibidir. İletim hattında oluşturulan 5-200 km arası 40 kısa devre arızasından 34 tanesi eğitim için 6 tanesi test için seçilmiştir. Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da sırasıyla yapılan çalışmaların gerçek ve tahmin edilen arıza yerleri grafiği gösterilmiştir.

Çizelge 2. Topraklanmamış sistemde tahmin edilen arıza yerleri ve hata oranları

Table 2. Estimated failure locations and error rates in an ungrounded system

Kullanılan Metot ve MSE	Ağ tipi: Cascade-forward neural network, Eğitim fonksiyonu: Traincgb, MSE: 1,53E-05					
Gerçek Mesafe (km)	175	180	185	190	195	200
Tahmin Edilen Mesafe (km)	174,4020	179,3199	185,0977	191,9809	194,1694	199,7494
% Yüzde Hata	0,3066	0,3487	0,0501	1,0158	0,4259	0,1285



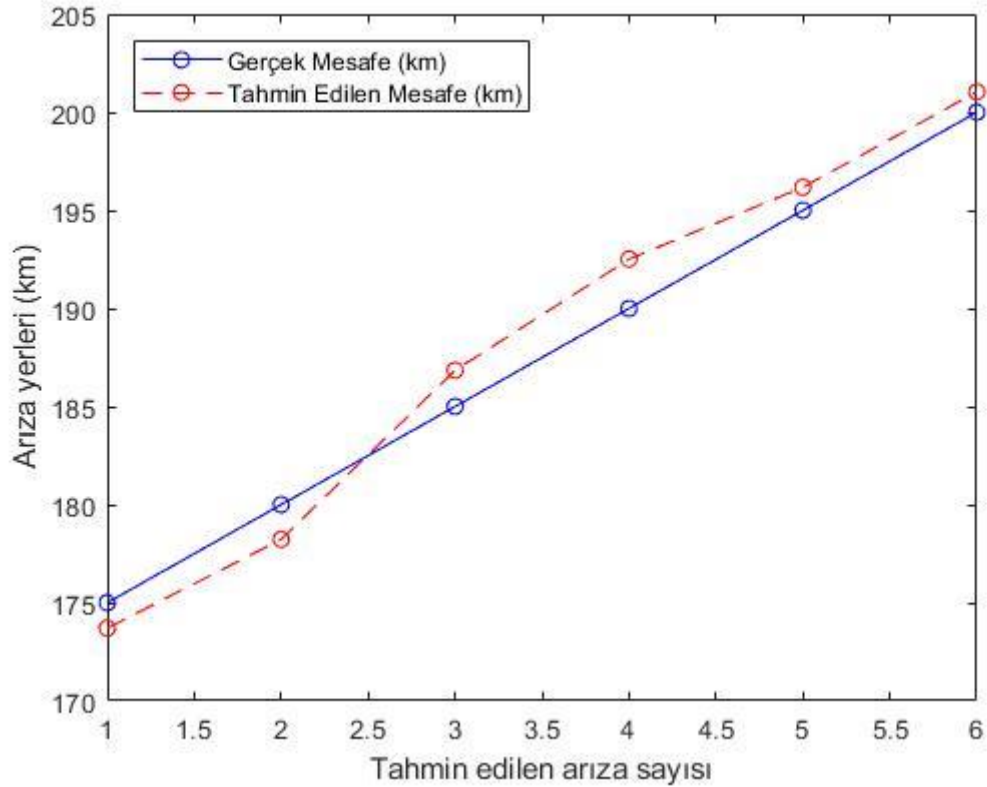
Şekil 8. Topraklanmamış sistemde gerçek ve tahmin edilen arıza yerleri grafiği

Figure 8. Real and predicted fault locations graph in an ungrounded system

Çizelge 3. Doğrudan topraklanmış sistemde tahmin edilen arıza yerleri ve hata oranları

Table 3. Estimated fault locations and error rates in directly grounded system

Kullanılan Metot ve MSE	Ağ tipi: Cascade-forward neural network, Eğitim fonksiyonu: Trainlm MSE: 4,72E-05					
Gerçek Mesafe (km)	175	180	185	190	195	200
Tahmin Edilen Mesafe (km)	173,7079	178,2277	186,8426	192,5089	196,1746	201,0338
% Yüzde Hata	0,6625	0,9088	0,9449	1,2866	0,6023	0,5301



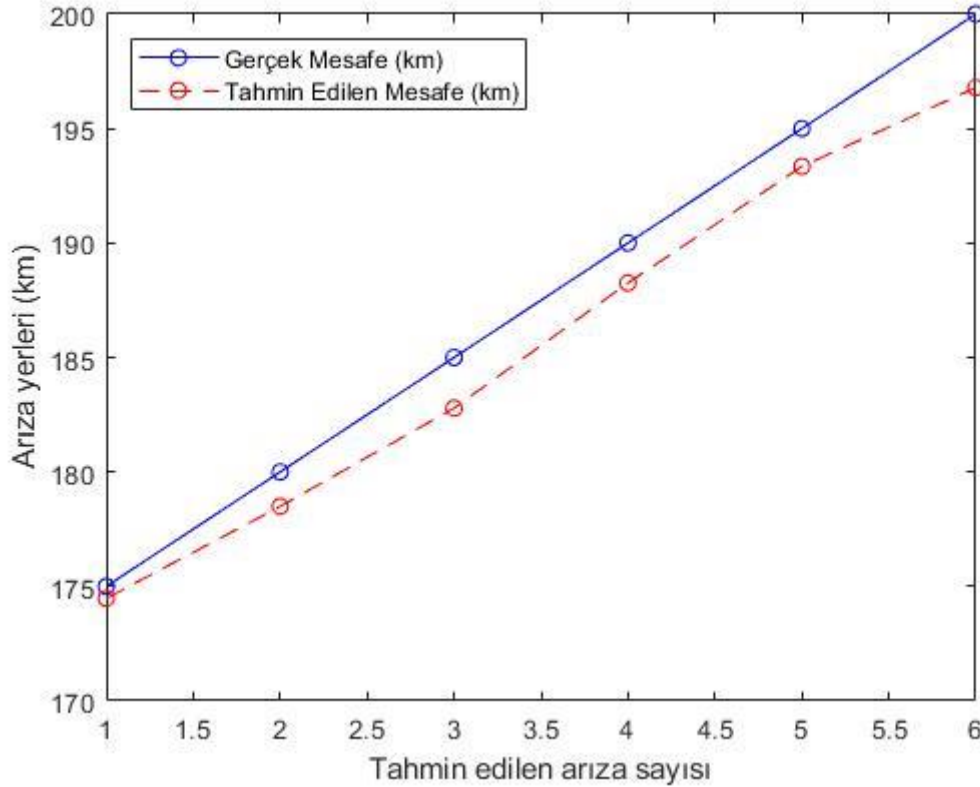
Şekil 9. Doğrudan topraklanmış sistemde gerçek ve tahmin edilen arıza yerleri grafiği

Figure 9. Real and predicted fault locations graph in a directly grounded system

Çizelge 4. Empedans ile topraklanmış sistemde tahmin edilen arıza yerleri ve hata oranları

Table 4. Estimated failure locations and error rates in an impedance grounded system

Kullanılan Metot ve MSE	Ağ tipi: Cascade-forward neural network, Eğitim fonksiyonu: Trainlm MSE: 6,61E-05					
Gerçek Mesafe (km)	175	180	185	190	195	200
Tahmin Edilen Mesafe (km)	174,4736	178,4958	182,7884	188,2539	193,3469	196,7879
% Yüzde Hata	0,2699	0,7713	1,1341	0,8953	0,8476	1,6471



Şekil 10. Empedans ile topraklanmış sistemde gerçek ve tahmin edilen arıza yerleri grafiği

Figure 10. Real and predicted fault locations graph in impedance grounded system

ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA (RESEARCH RESULTS and DISCUSSION)

Görüntü işleme teknikleri kullanılarak YSA modeli ile iletim hatlarında farklı yerlerde oluşturulan ve farklı topraklama tipinde yapılan çalışmada arıza yeri tespiti yapılmıştır. Çizelge 2’de elde edilen tahmini arıza yerlerinde en yüksek hata %1,01 ve MSE değeri $1,53E-05$ olmuştur. Çizelge 3’de elde edilen tahmini arıza yerlerinde en yüksek hata %1,2866 ve MSE değeri $4,72E-05$ olmuştur. Çizelge 4’de elde edilen tahmini arıza yerlerinde en yüksek hata %1,6471 ve MSE değeri $6,61E-05$ olmuştur. Bu sonuçlara göre algoritmaların doğruluğu oldukça iyidir ve topraklama sisteminin farklı olmasından etkilenmemektedir.

SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada güç transformatörün nötr noktası topraklanmamış, doğrudan topraklanmış ve empedans ile topraklanmış sistemlerin kısa devre arızasında mesafe rölesinin arıza tespit doğruluğunu artıracak çalışmalar yapılmıştır. Yüksek gerilim enerji iletim hatlarında oluşabilecek kısa devre arızaların farklı topraklama tiplerinde arıza yerinin doğru bir şekilde belirlenmesi için YSA tabanlı akıllı sistem tasarlanmıştır. Bu yeni sistemde, YSA girişleri olarak mesafe koruma rölesinden R-X empedans diyagramından alınan görüntüler kullanılmıştır. Yapılan çalışma, PSCAD™ / EMTDC™ ile modellenen sistemde test edilmiştir.

YSA kullanımına dayanan arıza ve arıza yeri belirleme algoritmasında kullanılmak üzere belirlenen sinir ağı yapıları denenmiştir ve en iyi olan ağ tipi ve eğitim algoritması kullanılmıştır. Ayrıca YSA’nın performansını test etmek makine öğrenmesi yöntemi DVM ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 2, Çizelge 3 ve Çizelge 4 incelendiğinde ve Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10 karşılaştırma grafikleri görüldüğü üzere yapılan arıza ve arıza yeri belirleme çalışmasında elde edilen hataların düşük olduğu görülmüştür ve

algoritmanın iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Tespit edilen arıza mesafe yerleri bize havai hatlarda gözle görülebilecek durumdadır ve arızayı gidermek için yapılan çalışmalarda büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Bu çalışmanın diğer çalışmalardan avantajı ek maliyet, ek cihaz ve karışık matematiksel denklemler olmadan hızlı bir şekilde mesafe koruma rölesinden aldığımız görüntülerin işlenerek YSA tabanlı akıllı bir sistem tasarlanmasıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Chawla, G., Sachdev, M. S., Ramakrishna, G. (2006). Design, implementation and testing of an artificial neural network based admittance relay. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(7), 125-130.
- Dos Santos, R. C., Senger, E. C. (2011). Transmission lines distance protection using artificial neural networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(3), 721-730.
- Glover, J. D., Sarma, M. S., Overbye, T. J. (2012). *Power System Analysis and Design*, Stamford: Cengage Learning.
- Grainger, J. J., Stevenson, W. D., Stevenson, W. D. (2003). *Power system analysis*.
- Guangfu, X., Jinxue, G., Chunhe, Z., Qunbing, Y. (2010). The influence of low resistance grounding system in delta side of transformer on differential protection and its solutions. *Paper presented at the CIGRE 2010 Proceedings*, China, 1-6, 13-16 September 2010.
- Jihong, H., Jiali, H., Yaming, S., Li, K. (1993). Accurate fault location method for extra high voltage transmission lines. *Paper presented at the 1993 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, APSCOM-93, Hong Kong, 189-193, 7-10 Dec. 1993.
- Jung, H., Park, Y., Han, M., Lee, C., Park, H., Shin, M. (2007). Novel technique for fault location estimation on parallel transmission lines using wavelet. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29(1), 76-82.
- Karasu, S., Altan, A., Saraç, Z., Hacıoğlu, R. (2018). Prediction of Bitcoin Prices with Machine Learning Methods using Time Series Data. *Paper presented at the Signal Processing and Communications Applications (SIU)*, IEEE, İzmir, 1-4, 2-5 May 2018.
- Kırbaş, İ. (2018). İstatistiksel metotlar ve yapay sinir ağları kullanarak kısa dönem çok adımlı rüzgâr hızı tahmini. *Sakarya University Journal of Science*, 22(1), 24-38.
- Liang, F., Jeyasurya, B. (2004). Transmission line distance protection using wavelet transform algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(2), 545-553.
- Liao, Y., Elangovan, S. (1998). Improved symmetrical component-based fault distance estimation for digital distance protection. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 145(6), 739-746.
- Lin, X., Ke, S., Gao, Y., Wang, B., Liu, P. (2011). A selective single-phase-to-ground fault protection for neutral un-effectively grounded systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(4), 1012-1017.
- Maheshwari, A., Agarwal, V., Sharma, S. K. (2019). Comparative Analysis of ANN-Based FL and Travelling Wave-Based FL for Location of Fault on Transmission Lines. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 1-10.
- MathWorks, Train Regression Models in Regression Learner App, <https://www.mathworks.com/help/stats/train-regression-models-in-regression-learner-app.html>: ziyaret tarihi: 04 Nisan 2020.
- Meddeb, A., Amor, N. ve Chebbi, S., 2019, Impact of System Grounding on Distance Relay Operating, *2019 International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*, 1-5.
- Osman, A., Malik, O. (2004). Protection of parallel transmission lines using wavelet transform. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1), 49-55.
- Ram, K., Nirmala, S., Ramesh, K., Vishwakarma, D. (2013). An overview-Protection of Transmission line Using Artificial Intelligence Techniques. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(1), 1-9.

- Ray, P. ve Mishra, D. P., 2016, Support vector machine based fault classification and location of a long transmission line, *Engineering science and technology, an international journal*, 19 (3), 1368-1380.
- Swetapadma, A. ve Yadav, A., 2018, A novel single-ended fault location scheme for parallel transmission lines using k-nearest neighbor algorithm, *Computers & Electrical Engineering*, 69, 41-53.
- Şalvarcı, Ü. B., 2017, Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Görüntü İşlemeye Dayalı Ağırlık Tahmini, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 83.
- Yağan, Y. E. (2015). *Havai Dağıtım Hatlarında Yapay Sinir Ağları Kullanarak Arıza Analizi*. (YÜKSEK LİSANS). Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Yavuz, S., Deveci, M. (2012). İstatiksel Normalizasyon Tekniklerinin Yapay Sinir Ağı Performansına Etkisi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*(40), 167-187.
- Ye, P., Li, K., Chen, D., David, A. (1998). A novel algorithm for high-resistance earth-fault distance protection. *Paper presented at the Proceedings of 1996 Transmission and Distribution Conference and Exposition*, California, 475-480, 15-20 September 1996.
- Zhong, Y., Kang, X., Jiao, Z., Wang, Z., Suonan, J. (2013). A novel distance protection algorithm for the phase-ground fault. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(4), 1718-1725.
- Ziegler, G. (2011). Numerical distance protection: principles and applications: *John Wiley & Sons*.
- Zubić, S., Balcerek, P., Zeljković, Č. (2017). Speed and security improvements of distance protection based on Discrete Wavelet and Hilbert transform. *Electric Power Systems Research*, 148, 27-34.

DÜŞÜK MALİYET VE YÜKSEK ENERJİ TASARRUFUNA SAHİP TERMAL BOYA ÜRETİMİ

Şenay BALBAY 

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Atık Yönetimi Bölümü, Bilecik, TÜRKİYE
senay.balbay@bilecik.edu.tr

(Geliş/Received: 06.11.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 07.05.2020)

ÖZ: Çalışmada özellikle sac kaplı çatılar için 4 farklı firmaya ait Ticari Termal Boyalardan(TTB) daha yüksek ısı yalıtım özelliğine sahip termal boya üretilmesi amaçlanmıştır. İlk olarak karbon esaslı malzemelerin (grafit ve Geri Kazanılmış Karbon Siyahı(GKKS)) ısı yalıtımı üzerine etkisi incelenmiştir. İkinci olarak silisyum esaslı malzemelerin(Perlit(PE) ve Cam tozu(C)) ısı yalıtımı üzerine etkisi belirlenmiştir. Son olarak ticari boyalar ve en iyi sonuçların alındığı (PE-20 ve PE0-C20) boyaların fonksiyonel yapılarını belirlemek üzere FT-IR analizleri yapılmıştır. PE-20 ve PE0-C20 boyalar kullanılarak kaplanmış saclara fiziksel testler (yapışma ve darbe testleri) uygulanmıştır. PE0-C20'in 31 °C alt sıcaklık değeri hem ticari termal boyaların sıcaklık değerinden daha düşük ve hem de literatürde verilen serin boya sıcaklık değeri (28-33°C) içerisinde yer almıştır. Galvaniz kaplanmış sacın alt yüzey sıcaklık değeri esas alınarak TTB1, TTB2, TTB3 ve PE0-C20'in sırasıyla ısı tasarrufu değerleri %9, %6, %9 ve %12'dir. TTB3'ün sadece bir yüzeyi değil tüm binada toplam % 40 enerji tasarrufu sağladığı bilgisine karşılık PE0-C20'in tüm binada tahmini olarak %50-60 enerji tasarrufu sağlaması beklenmektedir. İçerisinde mikro seramik kürecikler bulunan TTB1, cam tozu kullanılarak üretilen PE0-C20'den daha az ısı tasarrufu sağlamıştır. Sonuç olarak cam tozu kullanılarak üretilen boya, TTB'dan daha fazla enerji tasarrufu sağlamakta ve aynı zamanda yaklaşık 2-2,5 kat daha ucuz olduğundan dolayı ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Serin çatı, albedo etkisi, termal boya, ısı yalıtımı, enerji tasarrufu

Thermal Paint Production with High Energy Saving and Low Cost

ABSTRACT: The aim of the study was to produce thermal paints with higher thermal insulation properties than Commercial Thermal Paints (CTP) of 4 different companies, especially for sheet metal roofs. Firstly, the effect of carbon based materials (graphite and recycled carbon black) on heat insulation was investigated. Secondly, the effect of silicon based materials (Perlite (PE) and Glass powder (G)) on thermal insulation was determined. Finally, commercial paints and paints obtained by the best results (PE-20 and PE0-C20) were subjected to FT-IR analysis and physical tests (adhesion and impact tests) on coated sheets using these paints. The lower temperature of PE0-C20 is lower than the temperature of commercial thermal paints and is also within the cool paint temperature (28-33 ° C) given in the literature. The heat saving values of TTB1, TTB2, TTB3 and PE0-C20 based on the surface temperature of the galvanized sheet are 9%, 6%, 9% and 12%, respectively. Despite the fact that TTB3 saves not only one surface but 40% energy in the whole building, PE0-C20 is expected to save 50-60% energy in the whole building. TTB1 with micro ceramic beads has less heat saving than PE0-C20 produced by using glass powder. As a result, the paint produced by using glass powder will save more energy than TTB and will also contribute to the national economy as it is about 2-2.5 times cheaper.

Key Words: Cool roof, albedo effect, thermal paint, heat insulation, energy saving

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, konut ve çalışma alanlarında enerji tasarrufu amacıyla çeşitli yaklaşımların önemi, küresel ısınma ve elektrik enerjisi talebindeki endişelerin bir sonucu olarak artmıştır(Oda ve diğ., 2014). Dünyanın enerji talebi yıllık ortalama % 1,2 oranında artmaktadır (Zhang ve diğ., 2017). Türkiye’de binalardaki enerji tüketiminin % 15’i sıcak su temini, aydınlatma, elektrikli ev aletleri içindir ve kalan % 85’i soğutma ve ısıtma amacıyla harcanmaktadır. Enerji kaynaklarının verimli kullanılması gerektiği açıktır. Isı hareket sisteminin genişletilmesi ile birlikte yaklaşık 7,5 milyar dolar enerji tasarrufu mümkündür. Verimli kullanılmayan enerji, enerji israfına, ithalatına ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Günümüz binalarındaki enerji tasarrufunun en önemli kısmı ise ısı enerji tasarrufudur(Binici ve Kalaycı, 2015). Soğutma ve ısıtma kaygılarıyla ilgili önlemler özellikle önem kazanmıştır. Binaların inşaatı için yeni ısı yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi, enerji kaynakları ve CO₂ emisyonlarının israfını azaltabilmektedir (Oda ve diğ., 2014; Zhang ve diğ., 2017).

Konut soğutması için enerji tüketimi, dünya genelinde artan bir eğilim göstermektedir ve bu nedenle, yalnızca sıcak iklim koşullarıyla karakterize edilen ülkeler için değil, aynı zamanda sıcak ada etkisinden muzdarip olan şehirler için de birincil öneme sahiptir. Gündelik ortalama hava sıcaklığı ve çevresindeki kırsal alanlardan 2-5 °C daha yüksek olan kentsel ısı adaları, dünyadaki birçok şehirde mevcuttur(Synnefa ve diğ., 2007). Soğutma için elektrik enerji talebinin artması, daha fazla fosil yakıt yakmaya zorlayan ve aynı zamanda enerji maliyetlerini ve kirlilik seviyelerini artıran en yüksek elektrik şebekesi yüklerini de arttırmaktadır. Koyu kırmızı estetiğin tercih edildiği durumlarda, yakın kızılötesiyle oldukça yansıtıcı olan yeni serin renkli malzemeler geliştirilmektedir. Serin ve konvansiyonel renk uyumlu bir kaplamanın güneş yansıması arasında 10,2 °C’lik maksimum gelen yüzey sıcaklık farkı bulunmuştur(Synnefa ve diğ., 2007). Enerji tüketimini azaltmak için kullanılabilecek stratejilerden biri sadece cepheleri değil aynı zamanda binaların çatılarını serin boyalar adı verilen özel kaplamalarla kaplamaktır(Dias ve diğ., 2014). Son zamanlarda, enerji tasarrufu performansını artırabilen ısıya dayanıklı veya ısı yalıtımlı boya uygulamasının geleneksel yalıtım malzemeleri uygulama tekniğinden farklı olarak yeni bir enerji tasarrufu tekniği olarak kullanılabileceği yönünde artan bir beklenti vardır(Oda ve diğ., 2014).

Yüzeye çarpan güneş ışığının atmosfere yansıyan kısmından kaynaklanan elektromanyetik enerjiyi yansıtma kapasitesi albedo (yansıtılabilirlik) olarak tanımlanır (Tozam ve Karaca, 2018). Güneş yansımasını artırılarak yüzeyin sıcaklığını düşürülmektedir. Güneş ışınımı absorbe edilmek yerine yansıtıldığında binaya giren ısı azaltılmaktadır. Böylece yaz aylarında, iklimli bir binada daha düşük soğutma yükleri veya bina iklimli değilse daha konforlu termal koşulların oluşması sağlanmış olur (Synnefa ve diğ., 2007).

Isı yansıtıcı boyaların (serin boyalar) asıl kullanımı, görünen rengi değiştirmeden güneş ışığına maruz kalan yüzeylerde kızılötesi radyasyonun emilimini azaltmaktır. Isı yansıtıcı boyalar son yirmi beş yıldır kullanılmaktadır. Sıcaklık kontrolü için düşük enerji kullanımı sayesinde önemli maliyet tasarrufu sağlamak amacıyla endüstriyel ve mimari uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Isı yansıtan boyalar genellikle binalarda güneş ışınlarından kaynaklanan ısı yükünü azaltmak için dış boya olarak kullanılmaktadır. Isı yansıtıcı boyaların reklamı, çoğu zaman yalıtım özelliklerini ifade etmektedir. Boya filmlerinden ısı akışını kısıtlamak, ısı yansıtıcı boyaların faydalarının önemli bir parçası değildir. Binalardaki güneş ısı yükünü azaltmaya ilişkin en önemli faktör termal iletkenlik değil dış yüzeyin toplam güneş yansımasıdır. Bu boyaların çoğunda kızılötesi radyasyonu yansıtmak için silika/seramik mikro küreler kullanılmaktadır. Çalışmada boyaların nasıl işlev gördükleri açıklanmıştır. Elde edilen veriler, bu boyaların neredeyse hiçbir yalıtkan etkisinin olmadığını göstermiştir. Bilimsel ya da mühendislik açısından literatürde bu alan pek ele alınmamıştır (Pocket, 2010).

Sıfır enerji tüketimi ile çalışma ortamını iyileştirmek için iç alt tabaka ve enerji tüketimini azaltmak amacıyla ısı yalıtım kaplamaları kullanılarak güneş ısı etkili bir şekilde önlenabilir. Tek tip ısı yalıtım kaplamasının ısı yalıtım etkisi sınırlıdır, bu nedenle birbirlerinin avantajlarını tamamlamak için iki veya daha fazla tür yalıtım mekanizmasının birlikte kullanılması gereklidir(Zhang ve diğ., 2017). Isı yalıtım kaplamaları temel olarak matraste dağılmış fonksiyonel bir dolgu malzemesi olan bir bağlayıcıdan oluşur. Dolgu, “durgun” hava içerecek şekilde yapılmıştır ve böylece, kaplamanın yalıtım özelliklerini sağlayan

düşük bir termal iletkenliğe sahiptir. İçi boş cam ve seramik küreler, silika aerogeller fonksiyonel dolgu maddelerine örnektir(Kiil, 2014). Perlit (Genleştirilmiş perlit) içeren betonlar, genel betona kıyasla yaklaşık on kat daha fazla ısı yalıtımı sağlar. Ülkemiz dünyadaki perlit rezervlerinin% 74'üne sahiptir(Binici ve Kalaycı, 2015). Yaygın bir yapı malzemesi olan genleştirilmiş perlit belirli mekanik performansa sahiptir ve ısı yalıtımı amacıyla binalarda yaygın olarak kullanılmaktadır(Kong ve diğ., 2016). Perlit, yüksek gözeneklilik ve petek gibi birçok mikrometre çapında gözeneklere sahiptir ve amorf SiO_2 yapıdan oluşur(Peng ve Yang, 2013). Kong ve diğ. (2016) perlitini kullanarak faz değişim malzemesi üretmişlerdir. Perlitin iyi termal özellik, stabilite ve dayanıklılık sağladığını ve büyük ısı depolama kabiliyetine sahip olduğunu belirlemişlerdir(Kong ve diğ., 2016). Camın temel girdileri silika kumu (>%50 SiO_2), kireç taşı (CaCO_3), alüminyum hidroksit, borik asit, sodyum sülfat ve susuz borakstır(Saçak, 2005). Cam ve perlitin oda sıcaklığında ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 0,78 W/m*K ve 0,06 W/m*K'dır (Isı transferi ders notları; Balo ve diğ., 2010).

Türkiye piyasasında ticari olarak satılan termal boyalar TTB1, TTB2, TTB3, TTB4'dir. TTB4 ve TTB3 termal boyaları, sadece bir yüzey değil tüm binaya uygulanarak toplam %40 enerji tasarrufu sağlamaktadır. TTB2 termal boya, sıcak ve soğuk yüzey arasında 10 °C'lik bir sıcaklık farkı oluşturmaktadır. TTB1 Termal boya (içerisinde mikro seramik kürecikler bulunur) ısıyı yansıtarak % 25'e kadar ısı tasarrufu sağlamaktadır.

Buraya kadar edinilen bilgilere göre termal boyaların geliştirilmesine yönelik çalışmalara literatürde pek yer verilmemiştir. Bundan dolayı çalışmada, özellikle sac kaplı çatılar için ticari termal boyalardan daha yüksek termal yalıtım özelliğine sahip termal boya üretilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada mevcut ticari boyalardan 2 kat daha fazla enerji tasarrufu sağlayan ve yaklaşık 2 kat daha ucuz termal boya üretilmiştir. Bu yönüyle çalışma literatüre katkı sağlayacaktır.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

Materyal (Materials)

Reçineler (Stiren Akrilik Kopolimer (SAK) ve Vinil Akrilik Kopolimer(VAK)) Asal Kimya Ltd. Şti, metil alkol Tekkim Ltd. Şti, perlit Ege Perlit San. Tic. Ltd. Şti, karboksi metil selüloz(CMC) DENKİM Kimya A.Ş., cam tozu AkCihan Cam Geri Dönüşüm Ltd. Şti, grafit SKC Karbon San. Tic. Ltd. Şti'den temin edilmiştir. Geri Kazanılmış Karbon Siyahı(GKKS), Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Kimya Mühendisliği laboratuvarında doktora tez çalışması kapsamında atık lastiğin kimyasal bozundurulması sonucunda üretilmiştir (Balbay, 2017; Balbay ve Açıkgöz, 2019). Polisan marka Tavan Boyası(TVB) (hem zaman kazanmak hem de projenin maliyetini düşürmek amacıyla tercih edilmiştir) hırdavatçıdan satın alınmıştır. Galvaniz kaplı ve galvaniz kaplı olmayan 21*28 cm (A4 kağıt boyutunda) DKP saclar Arel Çelik firmasından satın alınmıştır. Isı yalıtımlı ticari boyalar (TTB1, TTB2, TTB3 ve TTB4) üretici firmalardan numune olarak temin edilmiştir.

Yöntem (Methods)

İlk olarak, Çizelge 1'de verilen reçetelere göre termal boyalar, oda koşulunda 150 rpm'de hazırlanmış ve 1 gece bekletilmiştir. Daha sonra galvaniz kaplı sacların boyamaları gerçekleştirilmiştir. Sacların yüzeyi boyama işleminden önce metil alkol ile temizlenmiştir. Şekil 1'de verilen sistemde (ufo ısıtıcı ile güneş ışığı etkisinin olduğu bir ortam oluşturulmaya çalışılmıştır) boyaların yüzey sıcaklık değerleri civalı termometre ile ölçülmüştür. Ölçüm değerleri sabit sıcaklık değerine ulaşana kadar ölçümlere devam edilmiştir. Ölçümler, boyasız yüzey ısıtıcı yönünde ve boyalı yüzey ısıtıcı yönünde olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Her bir plaka için sıcaklık ölçümü üç kez tekrarlanmıştır ve ortalamaları kaydedilmiştir.

Çizelge 1. Grafit ve GKKS kullanılarak hazırlanmış termal boya reçeteleri*Table 1. Thermal dye recipes prepared using graphite and GKKS*

Ürünler	CTB-0(g)	CTB-G5(g)	CTB-G10(g)	CTB-C5(g)	CTB-C10(g)
TVB	40	40	40	40	40
SAK	20	20	20	20	20
VAK	20	20	20	20	20
Su	19	19	19	19	19
CMC	1	1	1	1	1
Grafit	-	5	10	-	-
GKKS	-	-	-	5	10

**Şekil 1.** Sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı sistem*Figure 1. System done of temperature measurements*

İkinci olarak Çizelge 2 ve 3’de verilen reçetelere göre termal boyalar oda koşulunda 150 rpm’de hazırlanmış ve 1 gece bekletilmiştir, daha sonra galvaniz kaplama yapılmamış saclara boyamalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak en uygun perlit oranı ve ikinci olarak en uygun cam tozu oranı belirlenmiştir. Sacların yüzeyi boyama işleminden önce metil alkol ile temizlenmiştir. Şekil 1’de verilen sistemde boyaların yüzey sıcaklık değerleri civalı termometre ile ölçülmüştür. Ölçüm değerleri sabit sıcaklık değerine ulaşana kadar ölçümlere devam edilmiştir. Ölçümler, boyasız yüzey ısıtıcı yönünde ve boyalı yüzey ısıtıcı yönünde olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Her bir plaka için sıcaklık ölçümü üç kez tekrarlanmıştır ve ortalamaları kaydedilmiştir.

Çizelge 2. Perlit kullanılarak hazırlanmış termal boya reçeteleri*Table 2. Thermal dye recipes prepared using perlite*

Ürünler	PE0(g)	PE5(g)	PE10(g)	PE15(g)	PE20(g)
TVB	40	40	40	40	40
SAK	20	20	20	20	20
VAK	20	20	20	20	20
Su	19	19	19	19	19
CMC	1	1	1	1	1
Perlit	0	5	10	15	20

Çizelge 3. Cam tozu ve perlit kullanılarak hazırlanmış termal boya reçeteleri*Table 3. Thermal powder recipes prepared using glass powder and perlite*

Ürünler	PE15-C5(g)	PE10-C10(g)	PE5-C15(g)	PE0-C20(g)
TVB	40	40	40	40
SAK	20	20	20	20
VAK	20	20	20	20
Su	19	19	19	19
CMC	1	1	1	1
Perlit	15	10	5	0
C	5	10	15	20

Üçüncü olarak, ticari boyalar ve en iyi ısı aktarım sonuçlarının elde edildiği boyaların fonksiyonel yapılarını belirlemek için FT-IR analizleri gerçekleştirilmiştir. Galvaniz kaplı saclara kaplanmış ticari boyalar ve en iyi ısı aktarım sonuçlarının elde edildiği boyalara fiziksel testler (darbe testi ve yapışma (cross-cut)) uygulanmıştır. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği laboratuvarında FT-IR analizleri Perkin Elmer Cary 600 cihazı kullanılarak 400-4000 cm⁻¹ dalga boyunda gerçekleştirilmiştir. Darbe testi ISO6272-1 standardına göre TQC-IP2000 cihazı yardımıyla 1 kg ağırlığa sahip kütle 32 cm yükseklikten bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Yapışma (cross-cut) testi ASTM D 3359 standardına göre Metriko marka cross-cut cihazı ile yapılmıştır. Kesici ile sac yüzeyinde yapılan çentiklerin yüzeyine yapıştırılan bandın 45° açı ile çekilmesiyle boyanın sac yüzeyine yapışma derecesi belirlenmiştir.

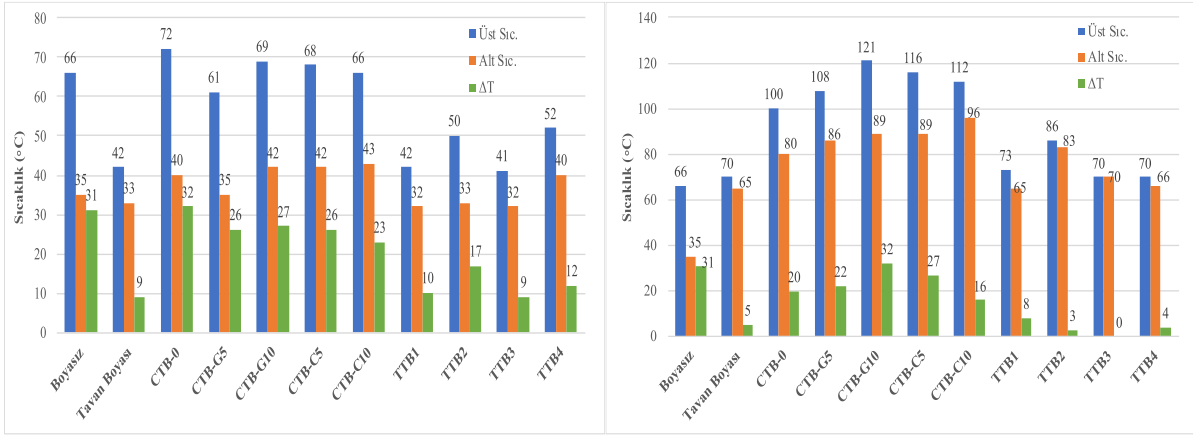
ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

Çalışmada hem zaman kazanmak hem de maliyeti düşürmek amacıyla tavan boyası kullanılarak termal boya reçeteleri hazırlanmıştır. Üretici firmaların hazırlamış oldukları genel tavan boya reçetesi Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. Tavan boyası reçetesi (AYKİM, 2012)*Table 4. Ceiling paint recipe*

	Miktar (%)
Su	29
Küf önleyici	0,2
Kalınlaştırıcı	0,3
Asitlik giderici	0,1
Disperzant	0,6
Köpük kesici	0,4
Rutil Titan	2
Kalsit	61
Kaolin	3
Mono etilen glikol (antifriz)	0,5
Butil glikol (aktivatör)	0,5
Film yapıcı	0,2
Stiren akrilik kopolimer	5
Kalınlaştırıcı	0,1
Toplam	100

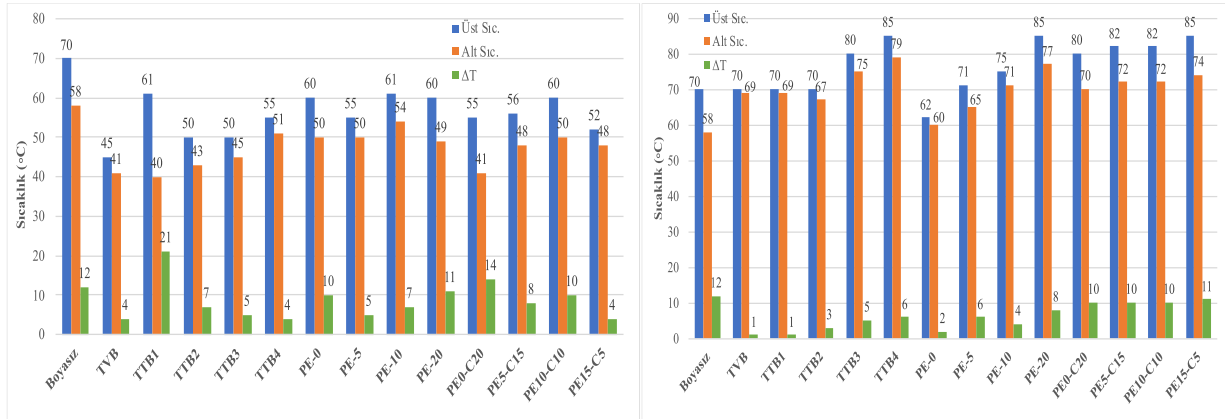
Karbon esaslı malzemeler (grafit ve GKKS) kullanılarak hazırlanmış termal boyaların yüzey sıcaklık değerleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Boyasız sac ve boyanmış (grafit ve GKKS ile hazırlanmış boyalar ve ticari boyalar) sacların yüzey sıcaklık ölçümleri (sol: boyanmamış yüzey ısıtıcı yönünde, sağ: boyanmış yüzey ısıtıcı yönünde)

Figure 2. Surface temperature measurements of unpainted sheet and painted (paints done by graphite and GKKS, and commercial paints) sheets (left: unpainted surface heater direction, right: painted surface heater direction)

SiO₂ esaslı malzemeler (perlit ve cam tozu) kullanılarak hazırlanmış termal boyaların yüzey sıcaklık değerleri Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Boyasız sac ve boyanmış (perlit ve cam tozu ile hazırlanmış boyalar ve ticari boyalar) sacların yüzey sıcaklık ölçümleri (sol: boyanmamış yüzey ısıtıcı yönünde, sağ: boyanmış yüzey ısıtıcı yönünde)

Figure 3. Surface temperature measurements of unpainted sheet and painted (paints done by perlite and glass powder, and commercial paints) sheets (left: unpainted surface heater direction, right: painted surface heater direction)

Galvaniz kaplı ve galvaniz kaplı olmayan saclara uygulanmış ticari, PE20 ve PE0-C20 boyaları ile boyanmış sacların fotoğrafları Şekil 4 ve 5’de verilmiştir.



Şekil 4. Galvaniz kaplı olmayan saclara uygulanmış ticari, PE20 ve PE0-C20 boyalar ile boyanmış sacların fotoğrafları (TTB3, TTB2, TTB4 (üst soldan sağa), TTB1, PE20, PE0-C20 (alt soldan sağa))

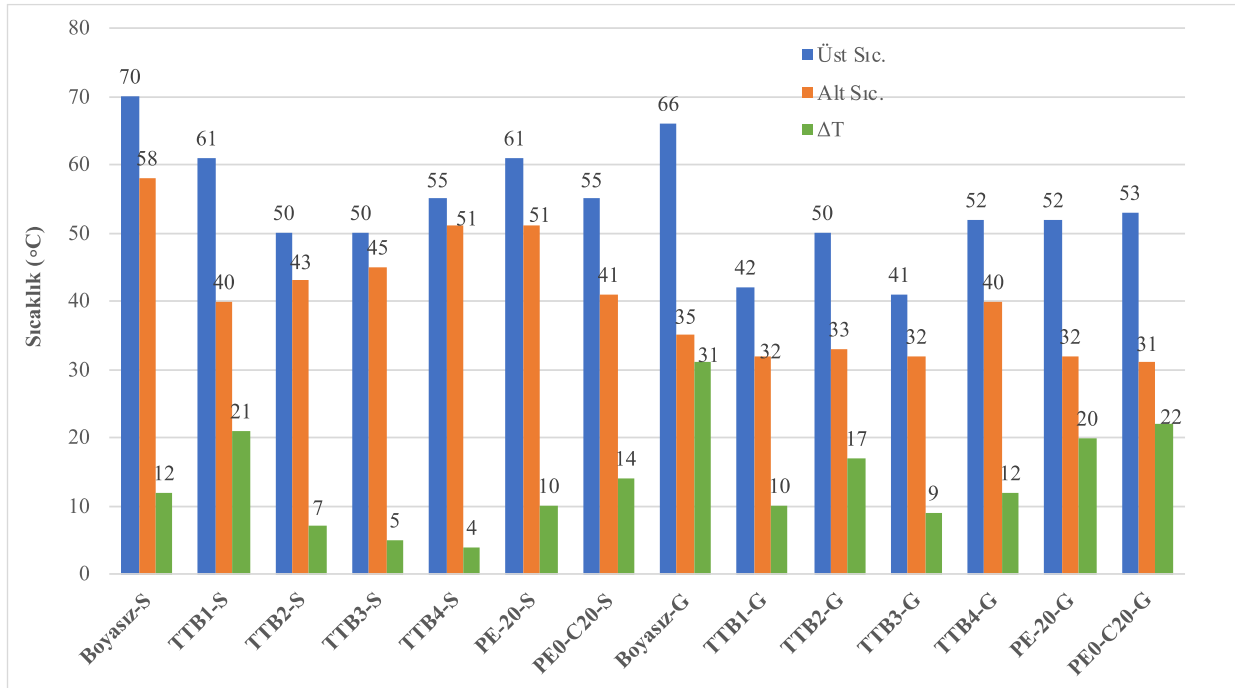
Figure 4. Photos of painted sheets by commercial, PE20 and PE0-C20 paints applied to non-galvanized sheets (TTB3, TTB2, TTB4 (top left to right), TTB1, PE20, PE0-C20 (bottom left to right))



Şekil 5. Galvaniz kaplı saclara uygulanmış ticari ve PE0-C20 boyalar ile boyanmış sacların fotoğrafları (TTB3, TTB2, TTB4 (üst soldan sağa), TTB1, PE0-C20 (alt soldan sağa))

Figure 5. Photos of painted sheets by commercial and PE0-C20 paints applied to galvanized sheets (TTB3, TTB2, TTB4 (top left to right), TTB1, PE0-C20 (bottom left to right))

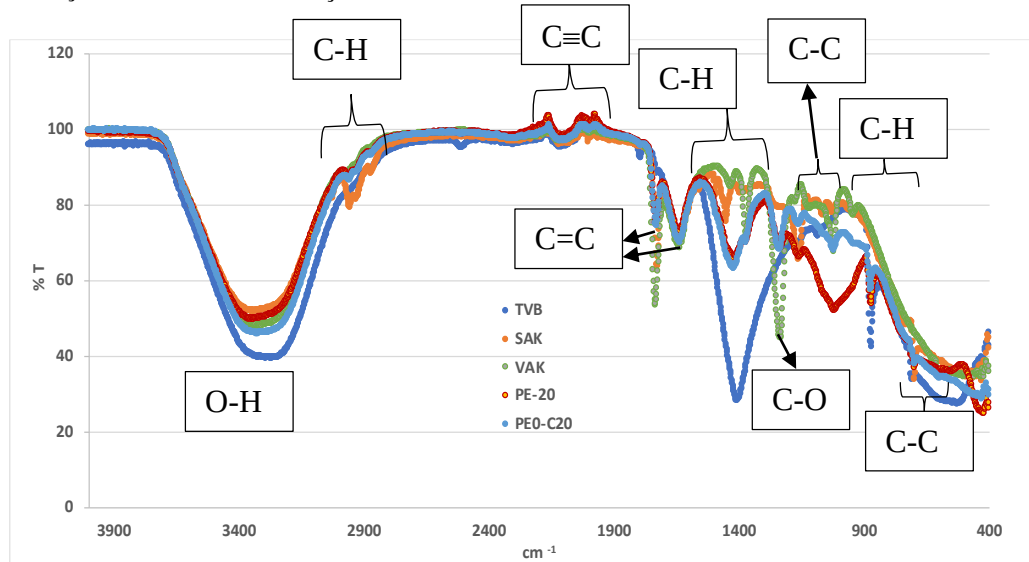
Galvaniz kaplı ve galvaniz kaplı olmayan saclara uygulanmış ticari, PE20 ve PE0-C20 boyaları ile boyanmış sacların yüzey sıcaklık karşılaştırmaları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. PE-20, PE0-C20 ve ticari boyalar ile boyanmış sacların yüzey sıcaklık ölçümleri karşılaştırması (boyanmamış yüzey ısıtıcı yönünde)(S: Galvaniz kaplama yapılmamış sac, G:Galvaniz kaplama yapılmış sac)

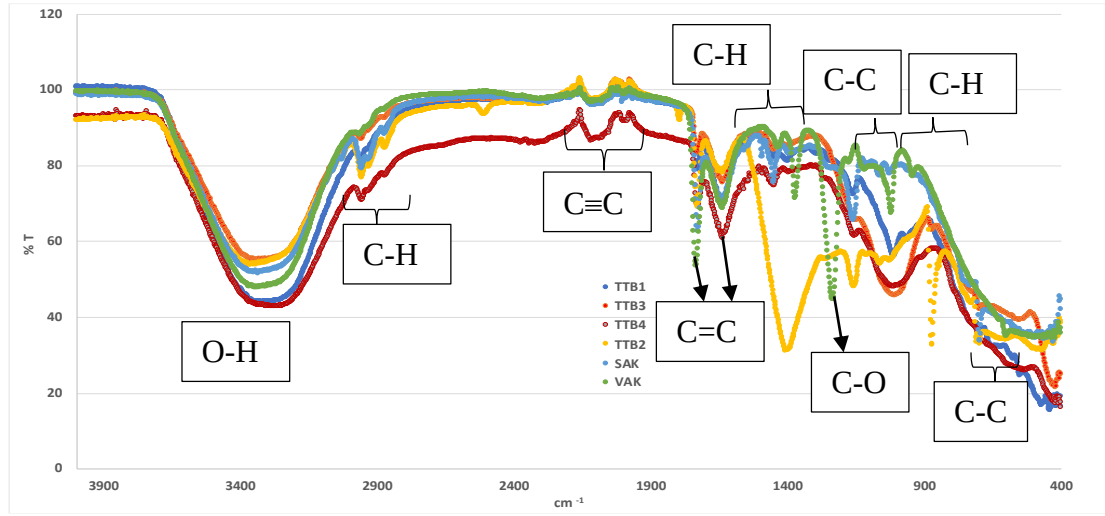
Figure 6. Comparison of surface temperature measurements of commercial, PE-20 and PE0-C20 paints (Unpainted surface heater direction)(S: Non-galvanized sheet, G: Galvanized sheet)

Tavan boyası, ticari boyalar ve en iyi sonuçların (PE20 ve PE0-C20) elde edildiği boyaların FT-IR spektrumları Şekil 7 ve 8’de verilmiştir.



Şekil 7. Tavan boyası, stiren akrilik ve vinil akrilik kopolimer reçineleri, PE20 ve PE0-C20 kaplamaların FT-IR spektrumları

Figure 7. FT-IR spectra of PE20 and PE0-C20 coatings, ceiling paint, styrene acrylic and vinyl acrylic copolymer resins



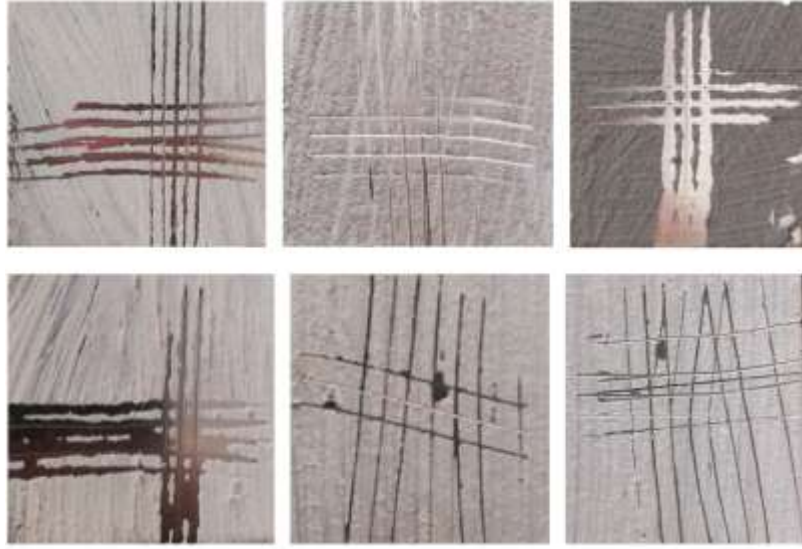
Şekil 8. Stiren akrilik ve vinil akrilik kopolimer reçineleri ve ticari boyaların FT-IR spektrumları
Figure 8. FT-IR spectra of styrene acrylic and vinyl acrylic copolymer resins and commercial paints

Galvanizli saca kaplanmış ticari, PE20 ve PE0-C20 boyaların darbe ve yapışma testi sonucu görünüşleri Şekil 8 ve 9'da verilmiştir.



Şekil 8. Galvanizli saca kaplanmış ticari, PE20 ve PE0-C20 boyaların darbe testi görünüşleri (TTB1, TTB3, TTB4 (üst soldan sağa), TTB2, PE20, PE0-C20 (alt soldan sağa))

Figure 8. Impact test appearance of commercial, PE20 and PE0-C20 paints coated with galvanized sheet (TTB1, TTB3, TTB4 (top left to right), TTB2, PE20, PE0-C20 (bottom left to right))



Şekil 9. Galvaniz saca kaplanmış ticari, PE20 ve PE0-C20 boya ların yapışma testi görünümleri (TTB1, TTB3, TTB4 (üst soldan sağa), TTB2, PE20, PE0-C20(alt soldan sağa))

Figure 9. Adhesion test appearance of commercial, PE20 and PE0-C20 paints coated with galvanized sheet (TTB1, TTB3, TTB4 (top left to right), TTB2, PE20, PE0-C20 (bottom left to right))

PE0-C20 boyasının hammadde maliyet analizi Çizelge 5’de verilmiştir.

Çizelge 5. PE0-C20 boyasının hammadde maliyet analizi

Table 5. Raw material cost analysis of PE0-C20

Ürünler	PE0-C20(g)	Birim fiyat(TL/1000g)	Top. Fiyat(TL)
Tavan boyası	40	17 TL	0,68
Stiren akrilik kopolimer	20	25TL	0,5
Vinil akrilik kopolimer	20	15TL	0,3
Su	19	0,002TL	0,5
CMC	1	30 TL	0,03
Perlit	0	-	-
Cam Tozu	20	12 TL	0,24
Toplam maliyet (TL)			2,25 TL/120 g

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada özellikle sac kaplı çatılar için ticari termal boyalardan daha yüksek ısı yalıtımı sağlayan termal boya üretilmesi amaçlanmıştır. Ticari termal boyalar ve karbon esaslı malzemeler (grafit ve GKKS) kullanılarak hazırlanmış termal boya ların galvaniz kaplı sac yüzeyine kaplanması sonucu ölçülen yüzey sıcaklık değerleri incelenmiştir. Ölçümler, boya kaplanmış sac yüzey ısıtıcı yönünde ve boya kaplanmamış sac yüzey ısıtıcı yüzey yönünde olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Grafit ve GKKS kullanılarak hazırlanmış termal boyalar ile kaplanmış sac ların boya kaplanmış yüzeyin ısıtıcı yönünde olduğu durumda yüzey sıcaklık değerleri >100 °C ölçülmüştür. Sac plakaların diğer yüzeye ait yüzey sıcaklık değerleri 86-96 °C olduğu belirlenmiştir. Aynı plakaların boya kaplanmamış yüzeyi ısıtıcı yönünde olduğu durumda yüzey sıcaklık değerleri 61-66 °C ve diğer yüzeye ait yüzey sıcaklık değerleri 35-43 °C ölçülmüştür(Şekil 2). Sıcak güneşli yaz günlerinde koyu renkli çatıların güneş enerjisinin %5’ini yansıtır ve sıcaklığın %90’dan fazlasını absorbe ettiği bilgisini (EPA, 2009) bu sonuçlar desteklemektedir. Bu boya ların ısıyı yansıtma özellikleri ticari termal boyalardan daha düşüktür. Güneş ışığı yansıtıcılığı yüksek, beyaz renkli veya akrilik beyaz boya ile kaplanmış yüzeylerde enerji verimliliği daha

yüksektir(Tozam ve Karaca, 2018). Tavan boyası ile kaplanmış sacların boya kaplanmamış yüzeyi ısıtıcı yönünde olduğu durumda yüzey sıcaklık değerleri TTB1 ve TTB3 termal boyaları ile aynı olduğu belirlenmiştir ve ayrıca TTB2 ve TTB4 termal boyalarından daha iyi sonuç elde edilmiştir(Şekil 2).

Metal çatı, enerjisinin %60'ını yansıtır ve sıcaklığın %25'den fazlasını absorbe eder. Beyaz çatı ise güneş enerjisinin %75'ini yansıtmaktadır (EPA, 2009). Ticari termal boyalar ve SiO₂ esaslı katkıları (perlit ve cam tozu) kullanılarak hazırlanmış termal boyaların galvaniz kaplanmamış sac yüzeyine kaplanarak ölçülen yüzey sıcaklık değerleri Şekil 3'de verilmiştir. Boyanmamış sac yüzeyinin ısıtıcı yönünde olduğu durumda PE-0, PE-5, PE-10, PE-20, PE0-C20, PE5-C15, PE10-C10, PE15-C5 numunelerinin üst ve alt yüzey sıcaklık değerleri sırasıyla 60:50°C, 55:50°C, 61:54°C, 60:49°C, 55:41°C, 56:48°C, 60:50°C, 52:48 °C'dir. Alt sıcaklığın 41°C olduğu PE0-C20 numunesinde en iyi sonuç elde edilmiştir ve galvaniz kaplanmamış sac yüzeyinde bu numune ticari termal boyalara benzerlik göstermiştir. Boyanmış sac yüzeyinin ısıtıcı yönünde olduğu durumda PE-0, PE-5, PE-10, PE-20, PE0-C20, PE5-C15, PE10-C10, PE15-C5 numunelerinin üst ve alt yüzey sıcaklık değerleri sırasıyla 62:60°C, 71:65°C, 75:71°C, 85:77°C, 80:70°C, 82:72°C, 82:72°C, 85:74 °C'dir. Boyanmış sac yüzeyinin ısıtıcı yönünde olduğu durumda yüzey sıcaklık değerleri, boyanmamış sac yüzeyinin ısıtıcı yönünde olduğu durumdan daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Aynı durum grafit ve GKKS kullanılarak hazırlanmış termal boyaların galvaniz kaplı sac yüzeyine kaplanması sonucu ölçülen yüzey sıcaklık değerlerinde de gözlenmiştir.

Ticari, PE20 ve PE0-C20 boyalar kullanılarak boyanmış galvaniz kaplanmış ve galvaniz kaplanmamış sacların yüzey sıcaklık değerleri karşılaştırması Şekil 6'da verilmiştir. Boyama işlemi uygulanmamış galvaniz kaplı ve galvaniz kaplanmamış sacların üst ve alt yüzey sıcaklık değerleri sırasıyla 66:35°C ve 70:58 °C'dir. Saca uygulanan galvaniz kaplamanın ısı aktarımını azalttığı belirlenmiştir.

Serin çatı malzemelerinin ısı tutma kapasiteleri, geleneksel malzemelere göre daha düşük olabilmektedir. Geleneksel çatı malzemeleri kullanılarak hazırlanan çatıların yüzey sıcaklık değerleri 66-85°C arasında olduğu için sıcak çatı zeminlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Serin çatı malzemeleri ile yüzey sıcaklık değerleri 28-33°C'ye kadar azaltılabilir(EPA, 2009). Serin çatıların özgül ısı, termal iletkenlik ve termal yayılım değerleri düşüktür(Tozam ve Karaca, 2018). Güneş ışığının katı yüzeylerde ısı aktarımı, iletim ve ışınlam olmak üzere iki yolla gerçekleşmektedir ve sıcaklık farkı, ısı iletimi ve ısı yayılımı ile doğru orantılıdır (İnce, 2008).

SiO₂ esaslı katkıları kullanılarak hazırlanmış PE20, PE0-C20 ve CT15-CE5 boyaları hem galvaniz kaplanmış saca hem de galvaniz kaplanmamış saca uygulanmıştır. Boyanmış sac yüzeyinin ısıtıcı yönünde olduğu durumda galvaniz kaplanmış saca uygulanmış PE20, PE0-C20 ve CT15-CE5 numunelerinin üst ve alt yüzey sıcaklık değerleri sırasıyla 52:32°C, 53:31°C, 53:46°C'dir. Aynı koşullarda sac yüzeylere kaplanmış ve testleri gerçekleştirilmiş TTB1, TTB2, TTB3, TTB4 ticari termal boyaların üst ve alt yüzey sıcaklık değerleri sırasıyla 42:32°C, 50:33°C, 41:32°C, 52:40°C'dir. PE20, PE0-C20 ve CT15-CE5 numunelerinin ve TTB1, TTB2, TTB3, TTB4 ticari termal boyaların üst ve alt yüzey sıcaklık farkı değerleri ise sırasıyla 20 °C, 22 °C, 7 °C, 10 °C, 17 °C, 9 °C, 12 °C'dir. PE0-C20'in 31 °C alt sıcaklık değeri ticari termal boyaların sıcaklık değerinden daha düşük ve literatürde verilen serin boya sıcaklık değeri (28-33°C) içerisinde belirlenmiştir. Sıcaklık farkı arttıkça ısı iletimi ve ısı yayılımı azaldığından dolayı PE0-C20'in 22 °C sıcaklık farkının ticari boyaların sıcaklık farklarından daha yüksek olmasına bağlı olarak ısıyı daha az ileterek daha fazla yansıttığını göstermiştir (Şekil 6). Galvaniz kaplı ve boyanmamış sac yüzeyinin ısıtıcı yönünde olduğu durumda daha fazla albedo etkisinin gerçekleştiği belirlenmiştir.

Ticari, PE20, PE0-C20, CT15-CE5 boyalar kullanılarak galvaniz kaplı ve galvaniz kaplı olmayan saclara boyanmış sac plakaların fotoğrafları karşılaştırıldığında galvaniz kaplamanın yapılmadığı saclarda korozyonun olduğu gözlenmiştir(Şekil 4 ve 5).

Tavan boyası, ticari boyalar, PE20 ve PE0-C20 boyaların FT-IR spektrumları incelendiğinde tespit edilen pikler şöyledir; su molekülüne ait 3400-3200 cm⁻¹ O-H (Thill, 2016), alifatik yapıda bulunan alkana ait 3000-2800 cm⁻¹ C-H (Tiryaki, 2013), alkine ait ~2100 cm⁻¹ C≡C (OChemOnline, 2019), aromatik yapıya ait 2000-1900 cm⁻¹ C=C (Cetinkaya, 2015), metil yapısında bulunan alkana ait 1500-1300 cm⁻¹ C-H (Tiryaki, 2013), aromatik ester yapısına ait 1300-1000 cm⁻¹ C-O (Tiryaki, 2013) ve 1200-1000 cm⁻¹ C-C (Sarıcı

Özdemir, 2008), aromatik yapıya ait 900-700 cm⁻¹ C-H (OChemOnline, 2019), ~500 cm⁻¹ C-C (Tiryaki, 2013) piki (Şekil 7 ve 8).

Galvaniz kaplı saca uygulanmış ticari, PE20 ve PE0-C20 boyaların darbe testi sonucu görünüşleri incelendiğinde ticari boyaların ezildiği, ancak PE20 ve PE0-C20 boya kaplamalarının etkilenmediği görülmüştür (Şekil 9).

Galvaniz kaplı saca uygulanmış ticari, PE20 ve PE0-C20 boyaların yapışma testi sonucu görünüşleri incelendiğinde ise ticari boyalardan TTB3 hariç diğer boyaların yapışmadığı, ancak PE20 ve PE0-C20 boya kaplama yüzeylerinin %5 'ten daha az bölümlerinin etkilendiği görülmüştür (Şekil 13). ASTM D-3359 standardına göre TTB3 5B, PE20 ve PE0-C20 4B, TTB1, TTB2, TTB4 1B sınıfında olduğu belirlenmiştir (ASTM D-3359). 5B kesiklerin kenarı düzgün ve yüzeyde bozulma gözlenmemiş, 4B kesişme noktalarında ince kaplama tabakaları dökülmüş ve yüzeyin %5 'ten daha az bölümü bozulmuş, 1B ise kaplama, kenarlarda geniş şeritler halinde soyulmuş ve karelerin tamamı sökülüş, aynı zamanda yüzeyin %35 - %65'lik kısmı bozulmuştur.

PE0-C20 boyasının hammadde maliyet analizi Çizelge 5'de verilmiştir. Üretilen boyanın birim hammadde maliyeti 18,75TL/kg olarak hesaplanmıştır. Ayrıca işçilik, enerji ve diğer giderler için 10TL/kg olarak düşünülmüş ve PE0-C20 boyasının toplam maliyeti 28,75TL/kg olarak belirlenmiştir.

www.n11.com sitesinden 31.05.2019 tarihinde alınan ticari boyaların fiyatları;

TTB1 : 49,5 TL/kg (495 TL/10kg)

TTB2: 54,99 TL/kg (549,9 TL/10 kg)

TTB3: 59,8 TL/kg (598 TL/10 kg)

TTB4: 62,3 TL/kg (623TL/10kg)

Üretilen PE0-C20 (28,75TL/kg) boyasının maliyeti ticari boyalardan yaklaşık 2-2,5 kat daha ucuz olduğu görülmüştür.

Galvaniz kaplanmış sacın alt yüzey sıcaklık değeri esas alınarak TTB1, TTB2, TTB3 ve PE0-C20'in sırasıyla ısı tasarrufu değerleri %9, %6, %9 ve %12'dir. TTB3 termal boyasının sadece bir yüzey değil tüm binada toplam % 40 enerji tasarrufu sağladığı bilgisine karşılık PE0-C20'in tüm binada tahmini olarak %50-60 enerji tasarrufu sağlaması beklenmektedir. İçerisinde mikro seramik kürecikler bulunan TTB1 termal boyası, cam tozu kullanılarak üretilen PE0-C20'den daha az ısı tasarrufu sağlamıştır. Ayrıca perlitin yüksek gözeneklilik ve düşük termal iletkenliğe sahip olmasına rağmen cam tozunun içeriği (silika kumu, kireç taşı (CaCO₃), alüminyum hidroksit, borik asit, sodyum sülfat ve susuz boraks) nedeniyle cam tozu kullanılarak üretilen boyanın enerji tasarrufu daha yüksektir.

Sonuç olarak cam tozu kullanılarak üretilen boya, ticari termal boyalardan daha fazla enerji tasarrufu sağlamakta ve aynı zamanda yaklaşık 2-2,5 kat daha ucuz olduğundan dolayı ülke ekonomisi için büyük önem arz etmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Cemal Tuğrul Bilgiç tarafından TÜBİTAK 2242 Üniversite Öğrencileri Araştırma Proje Yarışmalarına katılmış ve "Enerji ve Çevre" kategorisinde İzmir Bölge Sergisinde 2.'lik Ödülü kazanmıştır. Taraflar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. ASAL Boya Kimya Sanayi Tic.Ltd.Şti., Akcihan Cam San. ve Tic. Ltd. Şti. (AkCihan Cam Geri Dönüşüm) ve SKC Karbon San. ve Tic A.Ş. firmalarına çalışmamız boyunca karşılıksız numune desteklerinden dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- ASTM D-3359, Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test
 AYKİM, 2012, "Hammaddeler ve başlangıç boya reçeteleri", 7. Baskı
 Balbay, S., Açıkgoz, Ç., 2019, "Atık Lastiklerin Ucuz Ve Ekonomik Bir Yöntemle Devulkanizasyonu Ve Hammadde Olarak Değerlendirilmesi", Patent No: 2015/13034

- Balbay, S., 2017, *Atık lastiklerin kimyasal yöntemle bozundurulması ve elde edilen ürünlerin değerlendirilmesi*, Doktora tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik
- Balo, I., Ucar, A., Yücel, H.L., 2010, "Development Of The Insulation Materials From Coal Fly Ash, Perlite, Clay And Linseed Oil", *Ceramics – Silikat*, 54 (2), ss.182-191.
- Binici, H., Kalaycı, F., 2015, "Production Of Perlite Based Thermal Insulating Material", *International Journal of Academic Research and Reflection*, Vol. 3, No. 7
- Cetinkaya, M.S., 2015, *Production and characterization of activated carbon from almond bark and pine nut Shell*, Yüksek lisans tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş
- Dias, D., Machado, J., Leal, V., Mendes, A., 2014, "Impact of using cool paints on energy demand and thermal comfort of a residential building", *Applied Thermal Engineering*, 65, 1–2, ss. 273-281, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.056>
- EPA, 2009, *Reducing Urban Heat Islands: Conpendium of Strategies, Cool Roofs*. Isı transferi ders notları, Ankara üniversitesi, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/72277/mod_resource/content/0/HAFTA_2.pdf, ziyaret tarihi: 20 Haziran 2019.
- İnce, R., 2008, *Bazı Yağlı Tohumların Isısal Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma*, Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
- Kiil, S., 2014, "Quantitative analysis of thermal insulation coatings", *In Proceedings of the 10th Coatings Science International 2014*, Peer reviewed version
- Kong, X., Zhong, Y., Rong, X., Min C., Qi, C., 2016, "Building Energy Storage Panel Based on Paraffin/Expanded Perlite: Preparation and Thermal Performance Study", *Materials*, 9, 70; doi:10.3390/ma9020070
- OChemOnline, Infrared spectroscopy absorption table http://www.ochemonline.com/Infrared_spectroscopy_absorption_table, ziyaret tarihi: 20 Haziran 2019.
- Oda, T., Yamanaka, K., Kawakami, M., 2014, "Evaluation of the energy-saving performance of heat-resistant paint", *Science Journal of Energy Engineering*, 2(5), ss. 53-57, doi: 10.11648/j.sjee.20140205.11
- Peng K., Yang, H., 2013, "Preparation of Aerogel-Modified Expanded Perlite and Its Application in Heat Insulation Coating", *Advanced Materials Research*, 668, ss. 360-364, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.668.360
- Pocket, J., Heat Reflecting Paints And A Review Of Their Advertising Material, <https://www.researchgate.net/publication/267640159>, ziyaret tarihi: 20 Haziran 2019.
- Saçak, M., 2005, *Polimer Teknolojisi*, Gazi Kitabevi, Ankara
- Sarıcı Özdemir, C. 2008, *High surface area activated carbon from various polymeric based wastes, characterization and application areas*, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Synnefa, A., Santamouris, M., Akbari, H., 2007, "Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions", *Energy and Buildings*, 39, ss.1167–1174, doi:10.1016/j.enbuild.2007.01.004
- Thill, A., 2016, "Characterisation of Imogolite by Microscopic and Spectroscopic Methods", *Developments in Clay Science*, 7, ss. 223-253, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100293-3.00010-8>
- Tiryaki, B., 2013, *Production of cellulose, hemicellulose and lignin activated carbon*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tozam, İ., Karaca, Ü.B., "Kentsel Isı Adası Etkisi ve Serin Çatılar", T.C. İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 9. *Ulusal Çatı & Cephe Konferansı*, 12 - 13 Nisan 2018 www.n11.com, ziyaret tarihi: 31 Mayıs 2019.
- Zhang, H., Wang, F., Liang, J., Tang, Q., Chen, Y., 2017, "Design of Thermal Insulation Energy-Saving Coatings for Exterior Wall", *Chemical Engineering Transactions*, 61, ss. 1207-1212 DOI:10.3303/CET1761199



ÖSTENİTLEME SICAKLIĞININ EN-GJS-600-3 KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN ÖSTEMPERLENME DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

¹Erkan KONCA , ²Kâzım TUR

^{1,2}Atılım Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE
¹erkan.konca@atilim.edu.tr, ²kazim.tur@atilim.edu.tr

(Geliş/Received: 17.03.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 20.05.2020)

ÖZ: Bu çalışmada östenitleme sıcaklığının EN-GJS-600-3 (GGG-60) küresel grafitli dökme demirin östemperlenme davranışına etkisi araştırılmıştır. Y bloklarına dökülen % 0,5 Cu alaşımlı EN-GJS-600-3 küresel grafitli dökme demirden çıkarılan numuneler kullanılarak iki farklı östenitleme sıcaklığı (850 ve 950°C) ve iki farklı östemperleme sıcaklığının (290 ve 320°C) dört ayrı kombinasyonunda östemperleme deneyleri yapılmıştır. Östemperleme deneyleri sonrası numunelerin sertlik ölçümleri, çekme testleri ve iç yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Her iki östemperleme sıcaklığında da 950°C’de östenitlenmiş numunelerde 850°C’de östenitlenmiş numunelere göre daha yüksek sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, 950°C’de yapılan östenitlemenin 850°C’ye göre östenit matris içinde hem daha çok karbonun çözünmesini hem de östenitin daha iri taneli olmasını sağlayarak östemperlenmeye daha elverişli östenit yapısı oluşturabilmesiyle ilişkilendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: EN-GJS-600-3, östemperlenmiş sünek dökme demir, östemperleme, östenitleme sıcaklığı, östenit tane boyutu, östenit karbon içeriği, segregasyon

Investigation of the Effects of Austenitizing Temperature on the Austempering Behavior of EN-GJS-600-3 Spheroidal Graphite Cast Iron

ABSTRACT: The effect of austenitizing temperature on the austempering behavior of EN-GJS-600-3 (GGG-60) spheroidal graphite cast iron was investigated. 0.5% Cu alloyed EN-GJS-600-3 spheroidal graphite cast iron samples obtained from Y-blocks were subjected to four different austempering experiments as a combination of two different austenitizing (850 and 950°C) and two different austempering temperatures (290 and 320°C). Hardness measurements, tensile tests and microstructural examinations were performed after the austempering experiments. The samples austenitized at 950°C produced higher hardness, yield and tensile strength values as compared to the samples austenitized at 850°C. This observation was linked to the fact that as compared to 850°C austenitizing at 950°C provided both more carbon to dissolve in the austenite matrix and larger austenite grain size resulting in better austemperability.

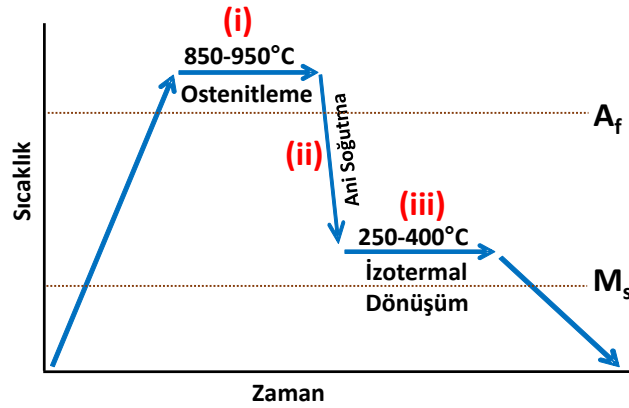
Key Words: EN-GJS-600-3, austempered ductile iron, austempering, austenitizing temperature, austenite grain size, austenite carbon content, segregation

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Östemperleme ısı işlemleri uygun kimyasal kompozisyona sahip küresel grafitli dökme demirin mukavemetini çok ciddi oranda arttırmakta ve kırılma tokluğunu da yükseltmektedir. Böylece üstün mekanik özelliklere sahip ve üretim kolaylığı, hafiflik, daha iyi sönümlenme kabiliyeti gibi yönlerden çeliklere göre daha avantajlı olan yeni bir mühendislik malzemesi ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda

otomotiv ve iş makineleri sektörlerinde bazı çelik ve sfero döküm malzemelerden üretilmekte olan parçalar avantajlı özelliklerinden dolayı östempelenmiş sünek dökme demir (Austempered Ductile Iron - ADI) malzemeden üretilen parçalarla değiştirilmeye başlanmıştır (Keough ve Hayrynen, 2000), (Harding, 2007), (Lefevre ve Hayrynen, 2013). Endüstriyel uygulamalarda her geçen gün daha çok yer bulan östempelenmiş dökme demirler hem Avrupa (EN 1564, 2011) hem de Amerikan (ASTM A897, 2003) standartlarıyla düzenlenmiştir.

Şekil 1’de gösterildiği üzere dökme demirlerin östempelenmesi çeliklerin östempelenmesine benzer olarak üç adımda gerçekleştirilmektedir: 1) dökme demirin östenitlenmesi (genel olarak 850-950°C arası), 2) perlit oluşumuna fırsat vermeyecek şekilde izotermal işlem sıcaklığına (genel olarak 250-450°C arası) hızlı soğutma ve 3) izotermal ısı işlem sıcaklığında yeteri kadar süre bekletme. Ancak çeliklerden farklı olarak dökme demir malzeme izotermal işlem sıcaklığında beynit iç yapısı (ferrit + sementit) oluşturmak amacıyla bekletilmez. Burada amaç, ferrit ve yüksek karbonlu östenitten (γ_{yk}) oluşan ösferrit iç yapısını elde etmektir. Östempelenmiş dökme demirlerin sahip olduğu üstün mekanik özellikler işte bu ösferrit iç yapılı matris sayesinde.



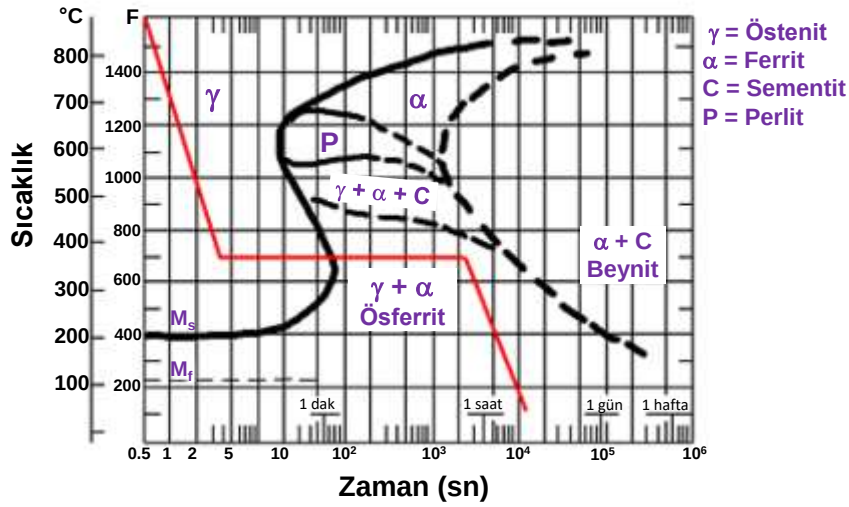
Şekil 1. Östempelenme işlem adımları

Figure 1. Austempering treatment steps

Östempelenmenin yapılacağı sıcaklık nasıl bir ösferrit iç yapısı elde edileceğini belirleyen en önemli parametredir. Zira östempelenme sırasında oluşacak ferritin miktarı ve buna bağlı olarak östenitin karbon bakımından ne kadar zenginleşebileceği (yani γ_{yk} 'nin karbon içeriği) östempelenme sıcaklığına bağlıdır (Li ve diğ. 2019). Östempelenme sıcaklığı düştükçe yüksek karbonlu östenitin karbon içeriği artmakta ve bu durum mekanik özellikleri etkilemektedir (Öztürk ve Yıldırım, 2019). Yüksek östempelenme sıcaklıkları ($T > \sim 350^\circ\text{C}$) görece yumuşak ve sünek ösferritik iç yapılar üretirken düşük östempelenme sıcaklıklarında ($T < \sim 350^\circ\text{C}$) ortaya daha sert ve daha gevrek iç yapılar çıkmaktadır (Voigt ve Loper, 1984).

Sünek dökme demir malzemenin östempelenme sıcaklığında ne kadar süre tutulacağı da diğer kritik parametredir (Şekil 2). Eğer malzeme östempelenme sıcaklığında gereğinden az süre tutulursa östenitten ösferrite dönüşen oran az olmakta, dolayısıyla dönüşüme girmemiş “kalan” östenit miktarı çok olmaktadır. Yeteri kadar karbon içermeyen bu östenitin termodinamik kararlılığı da az olduğundan oda sıcaklığına inildiğinde martensite dönüşmekte veya termal/mechanik aktivasyonla her an dönüşme potansiyeli taşımaktadır (Panneerselvam, 2015). Östempelenme işlem süresinin çok uzun tutulması durumunda ise oluşan ösferritik iç yapı içindeki yüksek karbonlu östenit beynit dönüşümünü tamamlamak üzere bozunarak ferrit ve sementite dönüşmeye ve bununla beraber mekanik özellikler de kötüleşmeye başlamaktadır (Bayati ve Elliot, 1995).

İşlem penceresi (Processing Window) terimi dökme demir matrisin hedeflenen ösferritik yapıya dönüşümünü (1. Dönüşüm) tamamladığı ancak beynit oluşumunun (2. Dönüşüm) henüz başlamadığı ısı işlem koşul aralıklarını (sıcaklık ve süre) tanımlamak için kullanılmaktadır (Bayati ve Elliot, 1999), (Eric, 2010).



Şekil 2. Östempereleme işleminin dökme demir matrisin temsili TTT diyagramı üzerinde gösterimi.

Figure 2. Schematic representation of austempering treatment on a representative TTT diagram of the ductile cast iron matrix.

1. Dönüşüm: $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma_{yk}$ (Östenit $\rightarrow$ Ferrit + Yüksek Karbonlu Östenit)
2. Dönüşüm: $\gamma_{yk} \rightarrow \alpha + Fe_3C$ (Yüksek Karbonlu Östenit $\rightarrow$ Ferrit + Sementit)

Krank mili örneğinde olduğu gibi döküm parçalar çoğu zaman farklı kesit kalınlıklarında ve karmaşık geometrilerde olduklarından bu parçalar için östempereleme koşullarının iyi belirlenmesi gerekmektedir. Östemperelemede hedef, parçanın bütününde yaşanan koşulların işlem penceresi içinde kalmasını sağlamaktır. Zira döküm parçaların değişik yerlerindeki kesit alanı farklılıkları hem parçanın döküm aşamasında katılaşma davranışını etkileyerek iç yapı farklılıkları doğurmakta hem de parçanın ısı işlem performansını etkilemektedir. İyi seçilmeyen östempereleme koşulları parçanın bir tarafında istenen ösferritik iç yapıyı üretirken başka bir yerinde o iç yapının henüz istenen düzeyde oluşmamasına (tamamlanamayan 1.Dönüşüm) diğer bir yerinde ise oluşan ösferritik iç yapının bozunarak 2. Dönüşümün başlamasına neden olabilmektedir (Eric, 2010).

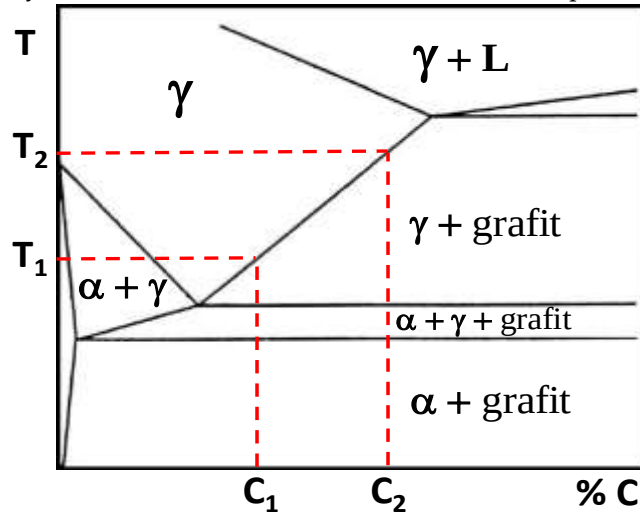
Ancak burada 1. Dönüşümün tamamlanması izotermal işlem sıcaklığında tutulan parçanın tamamında yapının %100 ösferrite dönüşmesi anlamında değildir. 1.Dönüşümün tamamlanmasından kastedilen eldeki başlangıç östenitten, bu östenitin karbon içeriği ve östempereleme sıcaklığına bağlı olarak, yüksek karbonlu östenite dönüşecek kısmının bu dönüşümünü tamamlaması, daha uzun süre beklenildiğinde yüksek karbonlu östenit miktarının artmak yerine 2. Dönüşümün başlamasıyla azaldığı durumdur.

Östenitleme Sıcaklığının Östenitin Karbon İçeriğine Etkisi (Effect of austenitizing temperature on the austenite carbon content)

Eldeki dökme demirden östempereleme işlemiyle en iyi sonucun alınabilmesi östenitleme ve östempereleme koşullarının bir bütün olarak ele alınmasıyla mümkündür (Voigt ve Loper, 1984), (Górny, 2019). Zira östempereleme sonunda elde edilecek iç yapı östempereleme sıcaklık ve süresine bağlı olduğu kadar östemperelemeye tabi tutulacak östenitin içindeki özellikle karbon ve diğer elementlerin konsantrasyonları ve dağılımlarına da bağlıdır (Konca ve diğ., 2017). Burada östenitin karbon içeriği östenitleme sıcaklığıyla doğrudan ilişkilidir. Şekil 3'te gösterilen Fe-C-Si dengesi uyarınca östenitleme sıcaklığı yükseldikçe ($T_1 \rightarrow T_2$), östenitin denge karbon içeriği artmakta ($C_1 \rightarrow C_2$) ve karbon atomu arayer atomu olması nedeniyle östenit matris içinde hızla yayılmaktadır (Voigt ve Loper, 1984), (Chang, 2003), (Ławrynowicz ve Dymski, 2007), (Radulovic ve diğ., 2000), (Batra ve diğ. 2003).

Östenitin içinde çözünecek karbon, küresel grafitli dökme demirin ne tür bir matrise sahip olduğuna bağlı olarak, iki kaynaktan sağlanabilmektedir. Ferrit matrisli dökme demirlerde karbon kaynağı olarak

sadece grafit nodülleri vardır. Dolayısıyla karbon, grafit nodül-östenit matris ara yüzeylerinden matrisin içine doğru difüzyon yoluyla taşınmak durumundadır. Dökme demirin perlitli matrise sahip olması



Şekil 3. Östenitleme sıcaklığı ile dökme demirin östenit matrisinin karbon içeriği arasındaki ilişkinin temsili Fe-C-Si diyagramı üstünde gösterimi.

Figure 3. Schematic representation of the relation between the austenitizing temperature and the carbon content of the ductile cast iron matrix on a representative Fe-C-Si phase diagram

durumunda ise birincil karbon kaynağı perlitin içindeki sementit olmaktadır. Isıtılan dökme demir parçanın sıcaklığı üç fazlı (ferrit + östenit + grafit) bölgeye ulaştığında östenit oluşumu ve ötektoid reaksiyonun tersi olacak şekilde sementitin bozunup östenite karbon sağlaması gerçekleşmeye başlar. Ancak östenitleme sıcaklığı östenitin içinde sementitin sağlayabildiğinden daha yüksek denge karbon konsantrasyonu gerektirmesi durumunda diğer karbon kaynağı olan grafit nodülleri devreye girmektedir.

Östenitleme sıcaklığına (T_γ) bağlı olarak dökme demirin östenit matris içinde çözünecek denge karbon konsantrasyonunu (C_γ^o) bulmak için çeşitli formülasyonlar geliştirilmiştir (Voigt ve Loper, 1984), (Chang, 2003). Aşağıda verilen (1) numaralı formül sadece Fe-C-Si sistemini baz alırken (2) numaralı formül dökme demir içinde bulunabilecek diğer alaşım elementlerini de dikkate almaktadır.

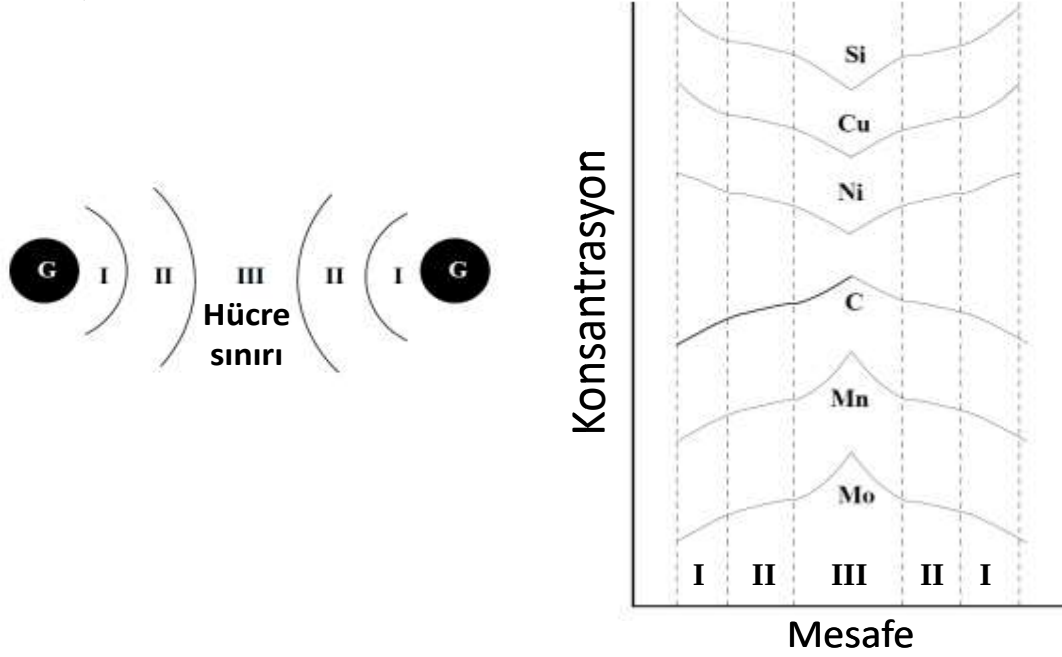
$$C_\gamma^o = \frac{T_\gamma}{420} - 0.17(\%Si) - 0.95 \dots \dots \dots (1)$$

$$C_\gamma^o = -1.70 + 0.0028 * T_\gamma + 0.11 * \%Mn - 0.057 * \%Si - 0.058 * \%Ni + 0.013 * \%Cu - 0.12 * \%Mo \dots \dots (2)$$

Diğer Alaşım Elementlerinin Durumu (Situation of other alloying elements)

Östenitleme sıcaklığı ile östenitin karbon içeriği arasında önceki bölümde bahsedilen ilişki dökme demir içindeki diğer elementler (Si, Mn, Cu, Ni, Mo vs) için geçerli değildir. Bu elementlerin dökme demir matrisi içindeki toplam miktarları esas olarak döküm öncesi ocak kompozisyon değerleri olup, sabittir. Ancak söz konusu elementlerin dökme demir matrisi içindeki dağılımları homojen olmayıp küresel dökme demirin katılaşması sürecinde gerçekleşen segregasyonlara bağlı olarak oldukça heterojen bir dağılım söz konusudur (Rivera, 1995), (Jincheng ve Elliott, 1999). Katılaşma sırasında ötektik reaksiyonla grafit nodülü ve onu çevreleyen östenit oluşurken bazı elementler, sıvı-katı dağılım katsayıları uyarınca, oluşan östenitle beraber daha çok katı faza geçmekte (pozitif segregasyon), bazı elementler ise geriye kalan ve daha sonra katılaşacak olan sıvı fazda birikmektedir (negatif segregasyon) (Bayati ve Elliot, 1995) (Akbarzadeh, 2016). Küresel grafitli dökme demir matrisinde çeşitli elementlerin konsantrasyonlarının iki

grafit nodülü mesafesinde nasıl değişebildiği Şekil 4'te şematik olarak gösterilmiştir. Buna göre grafit nodüllerine yakın bölgeler Si, Cu ve Ni içeriği açısından zengin, C, Mn ve Mo açısından fakir iken en son katılan hücre sınırı bölgesinde ise durum tam tersidir (Rivera, 1995), (Akbarzadeh, 2016), (Schissler ve Saverna, 1985).



Şekil 4. Küresel grafitli dökme demirde çeşitli element konsantrasyonlarının iki grafit nodülü arası mesafedeki değişimi. (Schissler ve Saverna, 1985) kaynağından uyarlanmıştır.

Figure 4. The variation of the concentrations of various elements between two graphite nodules in spheroidal graphite cast iron. Adopted from (Schissler and Saverna, 1985))

Karbon dışındaki diğer tüm bu elementlerin atomları yer alan atomlar oldukları için yayınımları karbon atomlarıyla karşılaştırılamayacak kadar yavaş gerçekleşmekte (Çizelge 1) ve pratikte uygulanan östenitleme sıcaklık ve süreleri bu elementlerin dökme demir matris içindeki dağılımlarını anlamlı bir seviyede değiştirmeye yetmemektedir (Schissler ve Saverna, 1985). Dolayısıyla, söz konusu elementlerin katılaşmayla oluşan dağılımları daha sonraki östenitleme ve östemperleme işlemleri sırasında da esas olarak korunmaktadır. Bu durum, östemperlemeye girecek östenitin kimyasal kompozisyonunun bölgesel olarak her yerde aynı olmamasına ve dolayısıyla östemperleme sırasındaki dönüşümlerin östenit matris içinde her yerde aynı anda başlayıp aynı anda bitmemesine neden olmaktadır.

Çizelge 1. 1000°C'de Fe, C, Si ve Mn elementlerinin östenit fazı içindeki difüzyon katsayıları (Bazhenov ve Pikunov, 2018)

Table 1. Diffusion coefficients of Fe, C, Si and Mn in austenite at 1000°C (Bazhenov and Pikunov, 2018)

Element	Difüzyon Katsayısı (m ² /s)
Fe	1,6x10 ⁻¹⁶
C	4,3x10 ⁻¹¹
Si	8,7x10 ⁻¹⁶
Mn	2,3x10 ⁻¹⁶

Sonuç olarak, ilk katılan ve görece yüksek Si, düşük C ve Mn içeren grafit nodüllerine yakın bölgelerle katılaşması en sona kalan düşük Si, yüksek C ve Mn içeren ötektik hücreler arası bölgelerin östemperleme sonrası iç yapılarında büyük farklar görülmektedir (Lin ve diğ., 1998), (Boneti ve diğ., 2017).

Ösferit iç yapısının oluşmasını sağlayan 1. Dönüşümün özellikle en son katılaşılan bölgelerde tamamlanamadığı birçok çalışmada tespit edilmiştir (Ławrynowicz ve Dymski, 2007), (Boneti ve diğ., 2017).

Östenitleme Sıcaklığının Östenit Tane Boyutuna Etkisi (Effect of austenitization temperature on the austenite grain size)

Östenitin karbon içeriğini belirlemenin yanı sıra östenitleme sıcaklığının östemperleme sonunda elde edilecek iç yapıya ikinci büyük etkisi östenit tane büyüklüğü üzerinden olmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi östemperleme işlemindeki üç ana aşamadan ikincisi östenitlenen parçayı östenitleme sıcaklığından perlit oluşumuna fırsat vermeyecek hızda izotermal işlem sıcaklığına soğutmaktır (Şekil 1).

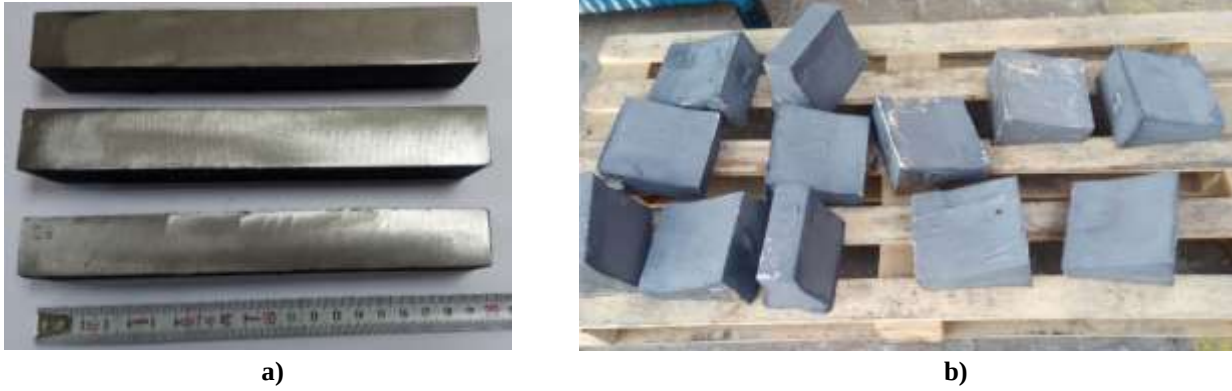
Perlitin çekirdeklenmesi östenit tane sınırları boyunca gerçekleşmektedir. Östenit taneleri ufaldıkça toplam tane sınırı arttığından perlit oluşumu gittikçe daha kısa sürede başlar ve tamamlanır (TTT diyagramı sola kayar). Bu da, çeliklerin ısıl işleminden bilindiği gibi, sertleşebilirliğin azalması demektir. Eldeki dökme demir parçanın östenitleme sıcaklığını yükselterek ve/veya östenitleme süresini uzatarak ortalama östenit tane büyüklüğünü arttırmak ve böylece östemperleme sıcaklığına inerken perlit oluşma riskini azaltmak mümkündür.

Özetlenecek olursa, östemperleme öncesi östenitin karbon içeriği ve tane boyutu östenitleme sıcaklık ve süresine bağlıdır. Bu durumda, farklı koşullarda östenitlenmiş özdeş numunelere aynı koşullarda östemperleme uygulandığında iç yapı gelişiminde farklılıklar olması, bunun da farklı mekanik özelliklere yol açması beklenmelidir. Bu çalışmada, aralarında 100°C fark olan iki östenitleme sıcaklığı (850°C ve 950°C) kullanılarak küresel grafitli dökme demirin östemperlenmesinde östenitleme sıcaklığının etkisini araştırılmıştır.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Malzeme (Material)

Östemperleme deneyleri için 2,5x2,5x19,5 cm boyutlarında % 0,5 Cu içeren EN-GJS-600-3 (GGG- 60) küresel grafitli dökme demir numuneler kullanılmıştır (Şekil 5.a). Bu numuneler, Ekstrametal Döküm Ltd. Şti'nin (Ankara) kompozisyonunu (Çizelge 2) kendi EN-GJS-600-3 pratiğine uygun olarak hazırladığı ocaktan döküm yapılan Y blokları (Şekil 5.b) kesilerek çıkarılmıştır. Numunelerin östemperleme deneyleri öncesine ait ham (döküldüğü haliyle) iç yapı görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Bu görüntülerden ham numunelerin dana gözü (bull's eye) olarak adlandırılan ferrit sarılı grafit nodüllerine sahip perlit matrisli iç yapıda oldukları görülmektedir. Dağlanmamış numune görüntüleri üzerinden ImageJ yazılımı (Rasband, 2016) kullanılarak yapılan sayıma göre grafit nodül sayısı 236 nodül/mm²'dir. Yine aynı yazılımla ham numunelerin matrisinde ferrit/perlit oranı 19/81 olarak belirlenmiştir. Ham numunelerin ortalama yüzey sertliği 235 Brinell, akma dayanımı 424 MPa, çekme dayanımı 709 MPa ve uzaması % 7,3 olarak ölçülmüştür.



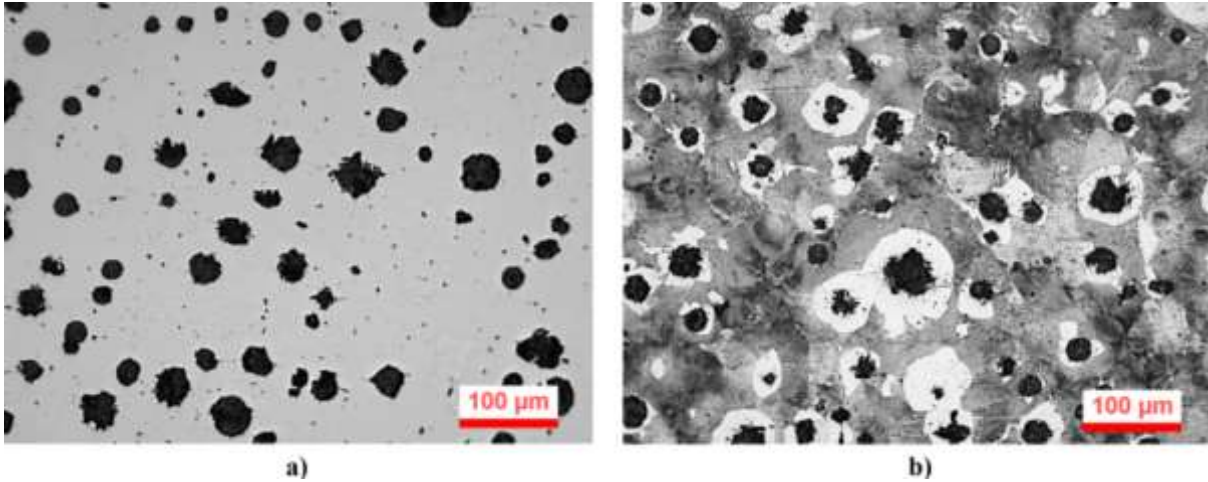
Şekil 5. a) Östempereleme denemelerinde kullanılan EN-GJS-600-3 numuneler, **b)** Numunelerin çıkarıldığı Y blok döküm parçalar

Figure 5. (a) EN-GJS-600-3 samples used in austempering experiments, b) Y-blocks from which the austempering samples were obtained)

Çizelge 2. Östempereleme denemelerinde kullanılan dökme demirin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

Table 2. Chemical composition of the cast iron used in the austempering experiments (wt.%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Mo	Mg	Fe
%	3,64	2,16	0,297	0,031	0,015	0,014	0,51	<0,001	0,051	kalan



Şekil 6. EN-GJS-600-3 numunelerin östempereleme denemeleri öncesine ait ham iç yapı görüntüleri: **a)** Dağlama öncesi ve **b)** % 2 nital ile dağlama sonrası. Görüntüler 200x büyütmede alınmıştır.

Figure 6. The optical images of the as-cast microstructure of the EN-GJS-600-3 samples before the austempering experiments: a) without etching, and b) after etching with 2% nital. The images were taken at 200x magnification.

Östempereleme Deneyleri (Austempering Experiments)

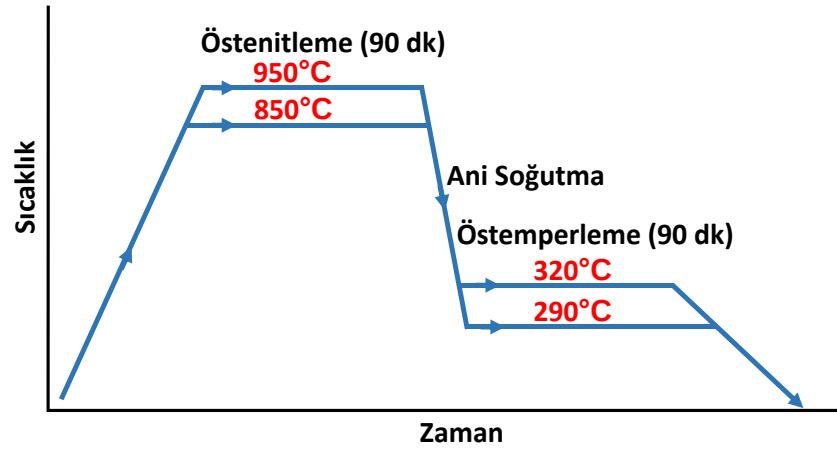
Bu çalışmada 2 farklı östenitleme sıcaklığı (850 ve 950°C) ve 2 farklı östempereleme sıcaklığının (290 ve 320°C) kombinasyonları olarak 4 ayrı ısıtma işlem koşulu denenmiştir (Çizelge 3). Tüm koşullar için östenitleme ve östempereleme süreleri 90'ar dakika olmuştur. Östempereleme süresi belirlenirken literatürde benzer sınıf malzemelerle yapılan östempereleme çalışmalarının sonuçlarından yararlanılmıştır. Uzun östempereleme süresinin ikinci dönüşümü (yüksek karbonlu östenitin beynite dönüşümü) başlatma ihtimalinden dolayı işlem penceresi içinde kalmak amacıyla tüm numuneler için 90

dakikalık sabit östemperleme süresi seçilmiştir. Uygulanan ısı işlem koşulları Şekil 7’de şematik olarak gösterilmiştir. Her deney koşulu için iki numune kullanılmıştır.

Çizelge 3. Uygulanan ısı işlem koşulları

Table 3. Applied austempering conditions

Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Östemperleme Sıcaklığı (°C)	
	320	290
850	850-320	850-290
950	950-320	950-290
Tüm numuneler için östenitleme ve östemperleme süreleri 90’ar dakika olarak sabit tutulmuştur.		



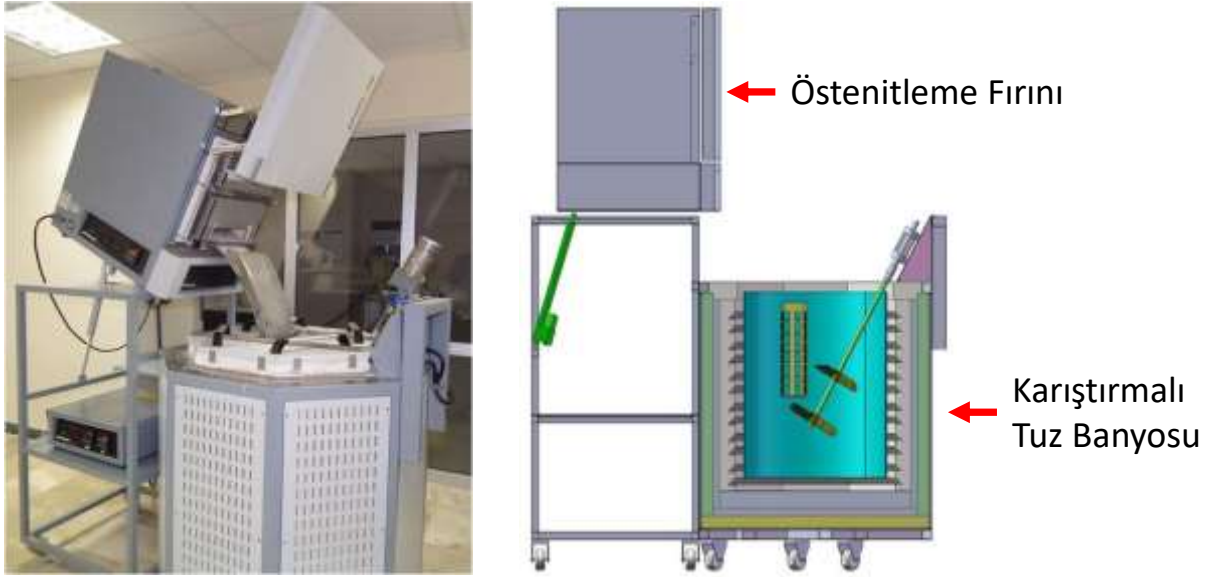
Şekil 7. Uygulanan ısı işlem koşullarının şematik gösterimi

Figure 7. Schematic representation of the applied heat treatment conditions

Östemperleme deneyleri özel yapım izotermal ısı işlem düzeneği (Şekil 8) kullanılarak yapılmıştır. Bu düzene östenitleme fırını ve tuz banyosu olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Sürekli karıştırma sistemine sahip 200 litre hacimli tuz banyosunda Petrofer AS135 ($\text{NaNO}_2\text{-KNO}_3$ karışımı) ısı işlem tuzu kullanılmaktadır.

Östemperleme deneylerinden sonra numunelerin bir yüzeyinden yaklaşık 1 mm malzemenin freze ile alınmasından sonra yüzey sertlik ölçümleri yapılmıştır. Kesit yüzey üzerinden iç yapı incelemeleri ve sertlik ölçümleri için numunelerin bir ucundan 2 cm kalınlıkta parçalar alınmış, kalan kısımlar (yaklaşık 17,5 cm) işlenerek çekme test çubukları çıkarılmıştır.

% 2 nital dağlanmış ve dağlanmamış numunelerin metalografik incelemeleri için Nikon LV 150 optik mikroskobu (Nikon Corporation, Miyagi, Japan) kullanılmıştır. Verilen Brinell sertlik değerleri beş ölçümün (HBW 2.5/187.5) ortalaması olup ölçümler için EMCO M4U 025 G3 universal sertlik test makinası (EMCO-TEST GMBH, Kuchl, Avusturya) kullanılmıştır. Çekme testleri ASTM E8’e uygun olarak Alşa marka çekme testi cihazında (Alşa Laboratuar Cihazları, İstanbul) yapılmıştır.



Şekil 8. Östempereleme deneylerinin gerçekleştirildiği özel ısıtma işlemi düzeneği

Figure 8. Custom designed heat treatment setup used to perform austempering experiments

BULGULAR (RESULTS)

Mekanik Test Sonuçları (Mechanical test results)

4 ayrı koşulda gerçekleştirilen östempereleme deneyleri sonucunda numunelerden elde edilen sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerleri Çizelge 4'te toplu olarak verilmiştir. 850°C'de östenitlenip 320°C'de östemperelenen numunelerde ortalama akma ve çekme dayanımı değerleri sırasıyla 965 MPa ve 1180 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler GGG 60 numunenin başlangıç akma ve çekme dayanımı değerleri olan 424 ve 709 MPa ile karşılaştırıldığında, akma dayanımında yaklaşık 2,3 kat çekme dayanımında ise yaklaşık 1,7 kat artış sağlandığı görülmektedir. 235 Brinell olan numunenin sertliği de 391 Brinell değerine çıkmıştır. Öte yandan uzama % 7,3'ten % 4,3'e inmiştir. 950°C'de östenitlenip 320°C'de östemperelenen numunelerde ise mukavemet değerleri çok daha fazla artmış ve akma dayanımı 1057 MPa, çekme dayanımı da 1321 MPa değerine ulaşmıştır. Numunelerin ortalama sertliği de 402 Brinell'e çıkmıştır. Bununla birlikte uzama % 3,1'e inmiştir.

Östenitleme sıcaklığının etkisi bu çalışmada denenen diğer östempereleme sıcaklığı olan 290°C'de daha da belirgin hale gelmiştir. 850°C'de östenitlenip 290°C'de östemperelenen numunenin sertlik, akma ve çekme dayanımı değerleri 320°C'de östemperelenen numunenin değerlerine göre (391 Brinell, 965 MPa ve 1180 MPa) yaklaşık % 5 civarında artarak sırasıyla 412 Brinell, 1014 MPa ve 1244 MPa değerine yükselmiştir. Bununla birlikte 320°C'de % 4,3 olan % uzama değeri ise 290°C'de % 1,5'e kadar inmiştir.

Çizelge 4. Östemperlenmiş numunelerin sertlik değerleri ve çekme test sonuçları

Table 4. Hardness values and tensile test results of the austempered samples

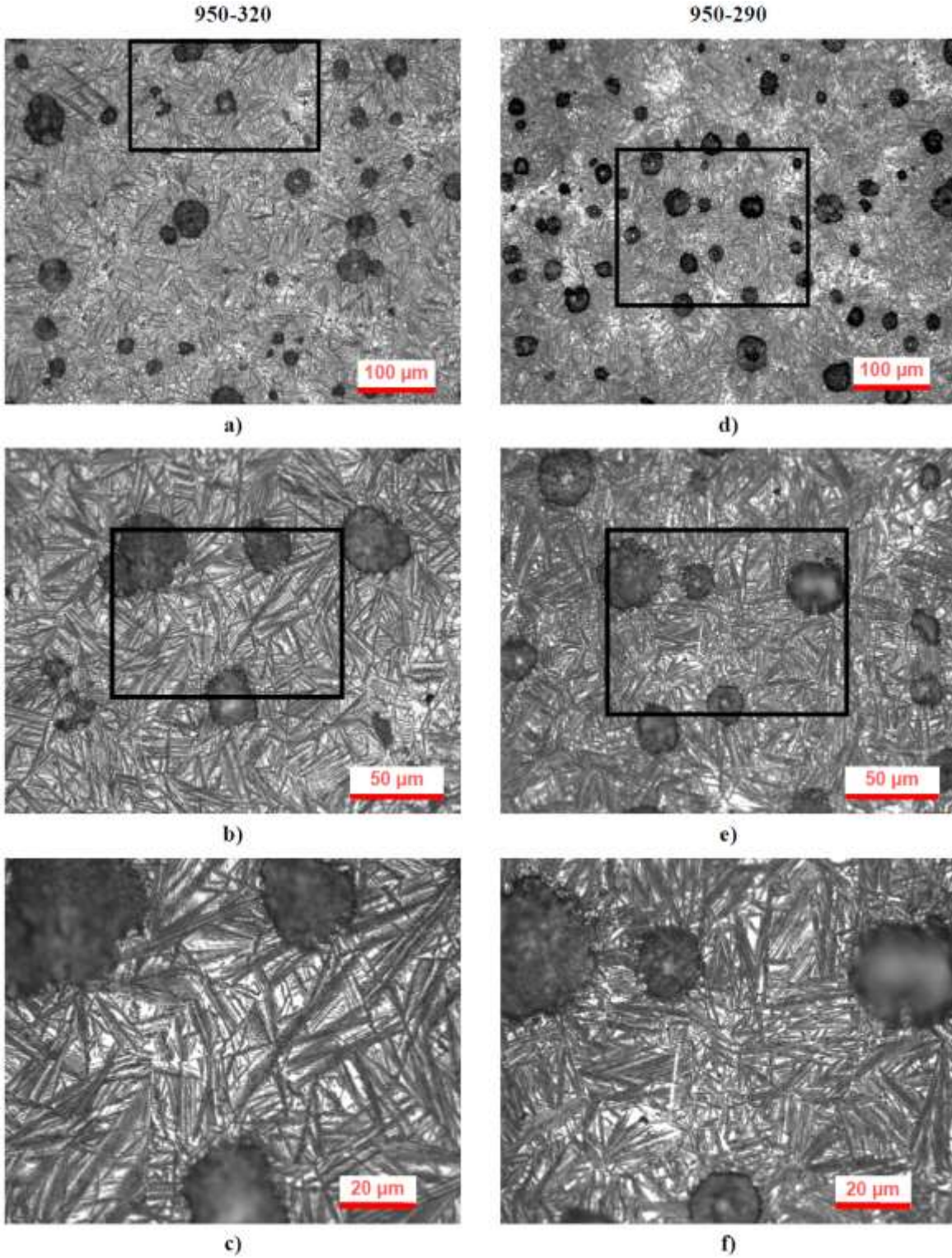
Numune	Sertlik (Brinell)	Akma D. (MPa)	Çekme D. (MPa)	Uzama (%)
Ham	235 ± 2,9	424 ± 1,5	709 ± 5,5	7,3 ± 1,6
850-320	391 ± 6,6	965 ± 29,5	1180 ± 24,0	4,3 ± 0,5
950-320	402 ± 4,2	1057 ± 22,0	1321 ± 27,2	3,1 ± 1,1
850-290	412 ± 9,1	1014 ± 38,5	1244 ± 29,0	1,5 ± 0,3
950-290	452 ± 3,6	1237 ± 18,0	1532 ± 32,5	2,0 ± 0,4

Diğer taraftan, 950°C’de östenitlenip 290°C’de östemperlenen numunelerin ortalama sertlik ve mukavemet değerleri çok daha yüksek oranda artmıştır. 320°C numunesinde 402 Brinell olan sertlik 290°C numunesinde 452 Brinell’e yükselmiştir. 320°C numunesinde 1057 MPa ve 1321 MPa olan akma ve çekme dayanımı değerleri, 290°C numunesinde %15’in üzerinde artışlarla sırasıyla 1237 MPa ve 1532 MPa değerine çıkarak bu çalışmadaki en yüksek değerlere ulaşmıştır. Mukavemet tarafında bu yüksek değerlere çıkılırken uzama % 2,0 seviyesine düşmüştür.

İçyapı İncelemeleri (Microstructural examinations)

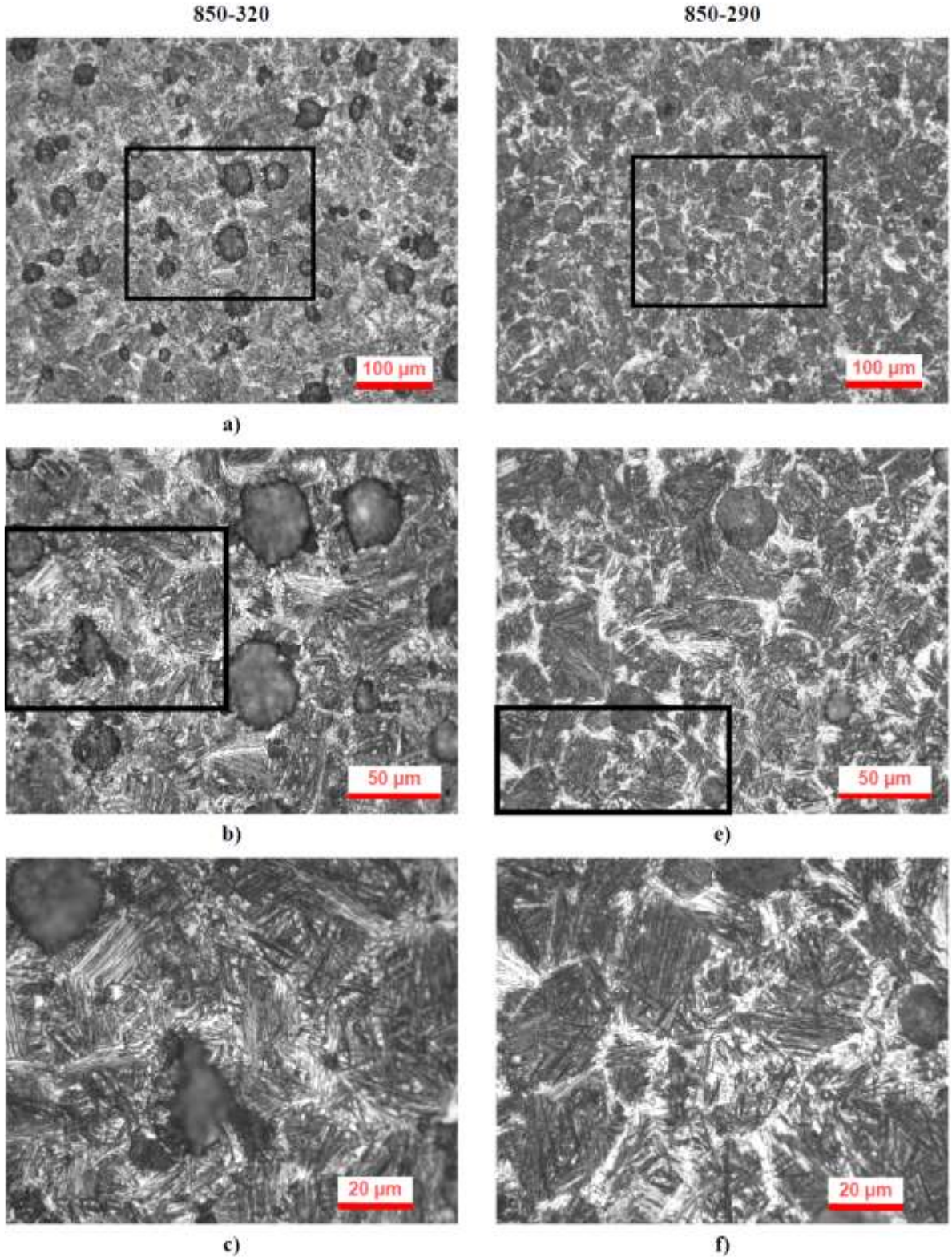
4 ayrı koşulda östemperlenmiş numunelerin optik iç yapı görüntüleri Şekil 9 ve Şekil 10’da verilmiştir. 950°C’de östenitlenip 320°C’de östemperlenen numunenin esas olarak ösferrit iç yapısında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9.a-c). Aynı sıcaklıkta östenitlenip 290°C’de östemperlenen numunenin de yine ösferrit iç yapısında olduğu ve belirlenen daha yüksek mukavemet değerleriyle uyumlu olacak şekilde ösferritteki ferrit plakalarının daha kısa ve daha ince/rafine şekilde olduğu görülmüştür (Şekil 9.d-f).

Öte yandan, östenitlemenin 950°C yerine 850°C’de yapılması östemperleme sonrası çok farklı iç yapıların oluşmasına yol açmıştır (Şekil 10). 850°C’de östenitlenip 320°C’de östemperlenen numunede hedeflenen ösferrit iç yapısı yerine beynit içeren karışık iç yapı olduğu görülmüştür (Şekil 10.a-c). 290°C’de yapılan östemperleme de yine beynitli iç yapı üretmiş ve 320°C’ye göre iç yapının heterojenliği daha belirgin hale gelmiştir (Şekil 10.d-f).



Şekil 9. 950°C'de östenitlenip (a-c) 320°C'de ve (d-f) 290°C'de östemperlenen numunelerin optik iç yapı görüntüleri. Görüntüler 200x (a ve d), 500x (b ve e) ve 1000x (c ve f) büyütmelemlerde alınmıştır. 500x büyütmede alınan görüntülerin konumları 200x büyütmede alınan görüntülerde, 1000x büyütmede alınan görüntülerin konumları ise 500x büyütmede alınan görüntülerde çerçevelenmiştir.

Figure 9. Optical microstructural images of the samples austenitized at 950°C and austempered at 320°C (a-c) and 290°C (d-f). Images were taken at 200x (a and d), 500x (b and e) and 1000x (c and f), respectively. The locations of the 500x images are framed in 200x images and the locations of the 1000x images are framed in 500x

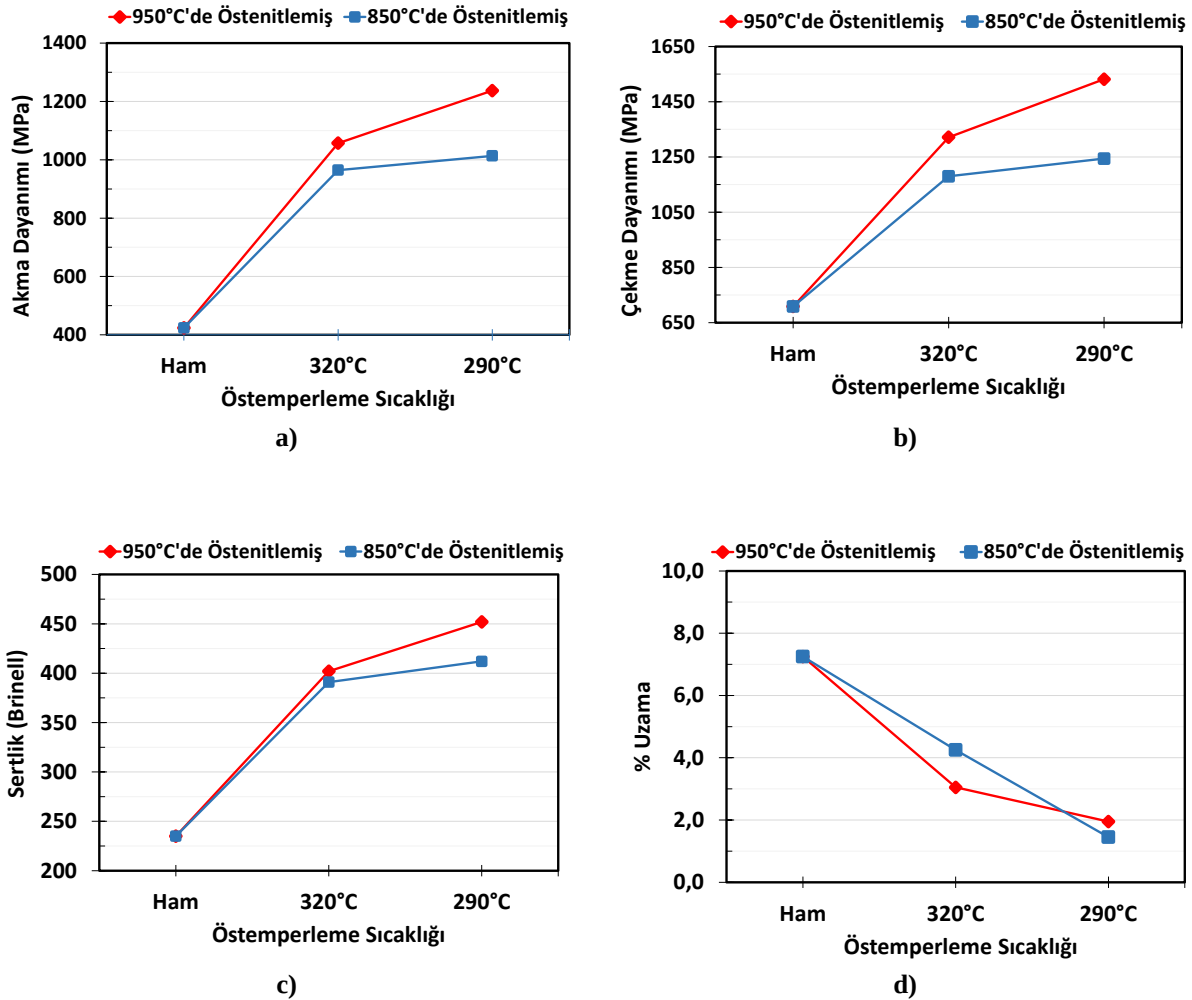


Şekil 10. 850°C'de östenitlenip (a-c) 320°C'de ve (d-f) 290°C'de östemperlenen numunelerin optik iç yapı görüntüleri. Görüntüler 200x (a ve d), 500x (b ve e) ve 1000x (c ve f) büyütmelemlerde alınmıştır. 500x büyütmede alınan görüntülerin konumları 200x büyütmede alınan görüntülerde, 1000x büyütmede alınan görüntülerin konumları ise 500x büyütmede alınan görüntülerde çerçevelenmiştir

Figure 10. Optical microstructural images of the samples austenitized at 850°C and austempered at 320°C (a-c) and 290°C (d-f). Images were taken at 200x (a and d), 500x (b and e) and 1000x (c and f), respectively. The locations of the 500x images are framed in 200x images and the locations of the 1000x images are framed in 500x images

SONUÇLARIN İRDELENMESİ (DISCUSSION)

Östenitleme ve östempereleme sıcaklıklarının numunelerin sertlik, mukavemet ve % uzama değerlerini nasıl etkilediğinin daha iyi görülebilmesi için Çizelge 4'te verilen değerler Şekil 11'de grafikler halinde gösterilmiştir. Şekil 11.a-b incelendiğinde, 950°C'de östenitlenen numunelerin mukavemet değerlerinde görece çok daha yüksek artışların gerçekleştiği net olarak görülmektedir. Östenitleme sıcaklığının etkisi sertlik değerlerinin verildiği Şekil 11.c'de de kendini göstermektedir. Öte yandan Şekil 11.d incelendiğinde östemperelenen numunelerde ham numuneye göre % uzama değerlerinin ciddi şekilde azaldığı görülmektedir.



Şekil 11. Uygulanan östenitleme ve östempereleme sıcaklıklarına göre numunelerin a) akma dayanımı, b) çekme dayanımı, c) sertlik ve d) % uzama değerlerinin değişimi.

Figure 11. The variation of the a) yield strength, b) tensile strength, c) hardness, and d) % elongation values with respect to the applied austenitization and austempering temperatures

950°C'de yapılan östenitlemenin 850°C'de yapılan östenitlemeye göre aynı östempereleme koşulları altında bariz daha yüksek mekanik dayanıma sahip numuneler ürettiği ortadadır. Bu durum, 950°C'de yapılan östenitlemenin 850°C'ye göre östemperelemeye daha elverişli östenit yapısı oluşturduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçları östenitleme sıcaklığının östenitin karbon içeriği ve tane boyutuna olan etkileri üzerinden değerlendirmek gerekmektedir.

Östenit Karbon İçeriğinin Etkisi (Effect of austenite carbon content)

Östenitleme sıcaklığına bağlı olarak küresel grafitli dökme demirde östenit matrisin denge karbon konsantrasyonunun hesaplanabileceği (1) ve (2) numaralı formüller daha önce verilmişti. Bu formüller kullanılarak çalışılan dökme demirin kimyasal kompozisyonu baz alındığında 850°C’de yapılan östenitleme sonunda östenitin karbon içeriği ortalama % 0,65 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5). Östenitleme 950°C’de yapıldığında ise östenitin karbon içeriği % 0,91’e yükselmektedir. Dolayısıyla 950°C’de östenitlenen numunelerin 850°C’de östenitlenen numunelere göre östenit matris içinde çok daha fazla karbona (% 0,91’e karşı % 0,65) sahip olarak östemperelemeye girdiği açıktır.

Çizelge 5. (1) ve (2) numaralı formüllere göre bu çalışmada kullanılan dökme demirin östenitleme sıcaklığına bağlı olarak östenit matrisinin karbon içeriği

Table 5. The carbon content of the austenite matrix of the ductile cast iron used in this work according to formulas (1) and (2))

Östenitleme Sıcaklığı	Östempereleme Öncesi Östenitin Karbon İçeriği, C_{γ}^o (% ağı.)		
	(1)’e göre	(2)’ye göre	Ortalama
850°C	0,71	0,59	0,65
950°C	0,94	0,88	0,91

Östenit Tane Boyutunun Etkisi (Effect of austenite grain size)

Östenitleme sıcaklığının östempereleme sonunda elde edilen iç yapılara olan ikinci etkisinin östenit tane büyüklüğü üzerinden olduğu görülmektedir. Literatürde küresel grafitli dökme demirlerin östenitlenme davranışına yönelik çalışmalar olsa da spesifik olarak östempereleme öncesi östenit tane boyutunun belirlendiği çalışmalar, içerdiği belirsizlik ve zorluk nedeniyle, çok kısıtlıdır (Solntsev ve diğ., 1977). Alaşım elementlerinin dökme demirin içinde katılaşma sürecinden kaynaklanan heterojen dağılımları ve diğer komplikasyonlar bir an için göz ardı edilirse, eldeki küresel grafitli dökme demirin matrisi perlit iç yapılı çelik malzeme gibi düşünülebilir. Bu şekilde, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak oluşacak östenitin ortalama tane boyutu hakkında kabaca bir tahminde bulunmak mümkün olabilir.

Tek fazlı metallerde tane büyümesi kinetiğinin aşağıda genel formu (eş. 3) verilen ilişkiyi takip ettiği bilinmektedir (Porter ve Easterling, 1992):

$$D_t^n - D_0^n = K * t \quad (3)$$

Burada, D_0 ilk tane boyutunu, D_t belli bir (t) süresi sonundaki tane boyutunu, K ise değeri sıcaklığa ve atom sıçramaları için gerekli aktivasyon enerjisine Arrhenyus tipi eşitlikle bağlı olan katsayıyı ifade eder. Sabit östenitleme sıcaklığında belli bir süre sonunda tanelerin ulaşacağı büyüklüğü hesaplamak üzere (3) numaralı eşitlik aşağıdaki (eş.4) gibi yeniden düzenlenebilir:

$$D = A * e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)} * t^n \quad (4)$$

Bu eşitlikte D tane boyutu (μm), A eşitlik sabiti, Q aktivasyon enerjisi (J/mol), R gaz sabiti (8.314 J/mol.K), T sıcaklık (Kelvin) ve t (saniye) süredir. Çeliklerde östenit tane büyümesi için bu formata göre düzenlenmiş literatürde mevcut bilgiler (Lee ve Lee, 2008) kullanıldığında 850°C’de 90 dakikalık östenitleme sonunda östenit tane boyutunun 23 μm civarında olması beklenmektedir. 850°C’de östenitlenip 320 ve 290°C’de östemperelenen numunelerin Şekil 10’da verilen optik iç yapı görüntüleri de bu değeri yaklaşık olarak doğrulamaktadır. Dolayısıyla 850°C’de östenitlenen numunelerde dönüşüm

öncesi östenitin küçük taneli yapısıyla östemperleme sırasında oluşan öbeklerin ulaşabilecekleri büyüklüğü, öbekler bir östenit tanesinden diğerine geçemeyeceğinden, sınırladığı anlaşılmaktadır.

Öte yandan, söz konusu hesaplama 950°C'de 90 dakikalık östenitleme süresi için yapıldığında ise ortalama östenit tane büyüklüğü 57 µm çıkmaktadır. Ancak 850°C'den farklı olarak 950°C'de östenitlenip 320°C ve 290°C'de östemperlenen numunelerin Şekil 9'da verilen optik iç yapı görüntülerinde bu değere karşılık gelecek dönüşüm öncesi tane sınırları ayırt edilememektedir. Bu durumu numunelerde grafit nodülleri arası mesafenin çoğunlukla 57 µm'den az olmasıyla ilişkilendirmek gerekir. Zira ösferritteki ferrit plakaları en fazla bir grafit nodülünden diğerine kadar olan mesafe boyunca büyüyebilmiştir. Dolayısıyla 950°C'de östenitlenen numunelerde östenit tane boyutunun ösferrit içindeki ferrit plakalarının uzunluğu üzerinde belirleyiciliğinin olmadığı görülmektedir. Bu numunelerde ösferrit plakalarının uzunluğu ösferritin kendi oluşum mekanizması tarafından belirlenmiştir. 950°C'de östenitlenip 290°C'de östemperlenen numunede 320°C'de östemperlenen numuneye göre ösferritteki ferrit plakaları daha kısadır (Şekil 9). Buradaki boy farkı daha düşük östemperleme sıcaklığında dönüşüm için istegin daha yüksek olması ve dolayısıyla çekirdeklenmenin daha çok sayıda yöreden başlamasıyla ilişkilendirilebilir. Çekirdeklenme hızındaki artışın hem ösferrit oluşumunu hem de devamında beynit yapısına dönüşümü hızlandırdığı anlaşılmaktadır. Görüldüğü üzere östenit tane boyutu sertleşebilirliği etkilediği gibi (Sikora ve Boeri, 1999) östemperlenebilirliği de etkilemektedir.

Özetle, iki farklı sıcaklıkta (850 ve 950°C) östenitlenmiş özdeş numunelere aynı koşullarda östemperleme işlemi uygulandığında 950°C'de östenitlenen numunelerde yüksek mekanik özelliklere sahip ösferrit iç yapısı elde edilirken, 850°C'de östenitlenen numunelerde görece daha düşük mekanik özelliklere sahip beynit içeren karışık iç yapılar elde edilebilmiştir.

SONUÇLAR (CONCLUSION)

Y bloklarından çıkarılan % 0,5 Cu alaşımlı EN-GJS-600-3 küresel grafitli dökme demir numuneler 2 farklı östenitleme sıcaklığı (850 ve 950°C) ve 2 farklı östemperleme sıcaklığının (290 ve 320°C) kombinasyonları olarak 4 ayrı ısıtma işlemi koşulunda östemperlenmiştir.

1. 950°C'de östenitlenmiş numunelerde 850°C'de östenitlenmiş numunelere göre daha yüksek sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır.
2. Her iki östenitleme sıcaklığında da östemperleme sıcaklığı olarak 320°C'den 290°C'ye inildiğinde numunelerin akma ve çekme dayanımları artmış ancak 950°C'de östenitlenmiş numunelerde görülen artışlar çok daha yüksek olmuştur.
3. Ham numune ile karşılaştırıldığında yapılan östemperleme işlemleri sonucunda % uzamalar ciddi oranda düşmüştür.
4. 950°C'de östenitlenmiş numunelerde 90 dakikalık östemperleme sonrasında hedeflenen ösferrit iç yapısı elde edilmiş ancak 850°C'de östenitlenmiş numunelerde aynı östemperleme süresi sonunda beynit iç yapısı oluşumu görülmüştür.
5. 850°C'de yapılan östenitlemede ufak tane yapılı ve görece az karbon içeren östenit elde edilmesinin ösferrit oluşumunu ve devamında beynit yapısına dönüşümü hızlandırdığı değerlendirilmiştir.
6. Östenitlemenin 950°C'de yapılmasının hem östenit tanelerinin daha büyük olmasını hem de bu tanelerin daha yüksek karbon içerikli olmalarını sağlayarak östemperlenebilirliği arttırdığı sonucuna varılmıştır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

C_{γ}^0 = östenit denge karbon konsantrasyonu

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

EN-GJS-600-3 alaşımından Y blokların döküldüğü Ekstrametel Döküm İzabe ve Mak. San. Tic. Ltd. Şti'ne, metalografik numune hazırlıkları için Özdemir Dinç'e, sertlik ölçümleri için Yaşar Kazanç'a ve çekme testleri için Erkin Koç'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akbarzadeh C.E., Iranipour, N., Yazdani, S., 2016, "Effect of nodule count and austempering heat treatment on segregation behavior of alloying elements in ductile cast iron", *China Foundry*, 13, 217-222. <https://doi.org/10.1007/s41230-016-6034-6>,
- ASTM A897/A897M—03 Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2003.
- Batra U., Ray S., Prabhakar S.R., 2003, "Effect of Austenitization on Austempering of Copper Alloyed Ductile Iron, *Journal of Materials Engineering and Performance*", 12 (5), 597-601, <https://doi.org/10.1361/105994903100277120>
- Bayati H., Elliot R., 1995, "Austempering process in high manganese alloyed ductile cast iron", *Materials Science and Technology*, 11 (2), 118-130.
- Bayati, H., Elliott, R., 1999, "The Concept of an Austempered Heat Treatment Processing Window", *International Journal of Cast Metals Research*, 11:5, 413-417, DOI: 10.1080/13640461.1999.11819309
- Bazhenov V.E., Pikunov M.V. 2018, "Microsegregation of Silicon in Cast Iron", *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 61(3):230-236. (Rusça) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-3-230-236>
- Boneti L.L.T., Hupalo M.F., Junior S.V., Rosário A.M., 2017, "Influence of casting heterogeneities on microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron (ADI)", *Revista Materia*, 22 (3), 11858. DOI: 10.1590/S1517-707620170003.0192
- BSI (British Standards Institution). EN 1564:2011 Founding—Ausferritic Spheroidal Graphite Cast Irons; BSI:London, UK, 2011.
- Chang L.C., 2003, "An Analysis of Retained Austenite in Austempered Ductile Iron", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34A (2), 211-217.
- Eric O., Brdaric T., Stojavljevic N., Tonic M., Grahovac N., Duricic R., 2010, "Determination of Processing Window for ADI Materials Alloyed with Copper", *MJoM, Metallurgical and Materials Engineering*, 16 (2), 91-102, 2010.
- Górny M., Angella G., Tyrała E., Kawalec M., Paż S., Kmita A., 2019, "Role of Austenitization Temperature on Structure Homogeneity and Transformation Kinetics in Austempered Ductile Iron", *Metals and Materials International*, 25, 956–965. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00245-y>
- Harding R. A., 2007, "The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron", *Kovove Mater.* 45, 1–16.
- Jincheng L., Elliott R., 1999, "The influence of cast structure on the austempering of ductile iron", *International Journal of Cast Metals Research*, 11:5, 407-412, DOI: 10.1080/13640461.1999.11819308
- Keough J.R., Hayrynen K. L., 2000, "Automotive Applications of Austempered Ductile Iron (ADI): A Critical Review", *Journal of Materials & Manufacturing*, SAE Transactions, 109 (5), 344-354.
- Konca, E., Tur, K., Koç, E. 2017, "Effects of Alloying Elements (Mo, Ni, and Cu) on the Austemperability of GGG-60 Ductile Cast Iron", *Metals*, 7, 320.
- Ławrynowicz Z., Dymski S., 2007, "Carbon Concentration of Austenite in Austempered Ductile Iron (ADI)", *Archives of Foundry Engineering*, 7 (3), 93 – 98.
- Lee, S-J., Lee, Y-K., 2008, "Prediction of austenite grain growth during austenitization of low alloy steels", *Materials and Design*, 29 1840–1844, doi:10.1016/j.matdes.2008.03.009
- Lefevre J., Hayrynen K.L., 2013, "Austempered Materials for Powertrain Applications", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22 (7), 1914-1922. DOI: 10.1007/s11665-013-0557-4

- Li, X.; Wagner, J.N.; Stark, A.; Koos, R.; Landesberger, M.; Hofmann, M.; Fan, G.; Gan, W.; Petry, W., 2019, "Carbon Redistribution Process in Austempered Ductile Iron (ADI) During Heat Treatment—APT and Synchrotron Diffraction Study", *Metals*, 9, 789. <https://doi.org/10.3390/met9070789>
- Lin B.Y., Chen E.T., and Lei T.S., 1998, "The Effect of Segregation on the Austemper Transformation and Toughness of Ductile Irons", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 7(3), 407-419.
- Öztürk E., Yıldırım M., 2019, "Östemperleme Sıcaklık ve Süresinin Östemperlenmiş Sünük Dökme Demirlerin Mikro Yapı ve Sertliğine Etkisi", *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(3), 604-611. <https://doi.org/10.36306/konjes.613878>
- Panneerselvam, S., Martis, C.J., Putatunda, S.K., Boileau, J.M., 2015, "An investigation on the stability of austenite in Austempered Ductile Cast Iron (ADI)", *Materials Science and Engineering: A*, 626, 237-246, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.038>
- Porter, D.A., Easterling K.E. *Phase Transformations in Metals and Alloys*, 2nd Ed., Chapman & Hall, London, UK, 1992; p. 139.
- Radulovic B., Bosnjak B., Harding R., Pop-Tonev K., Asanovic V., 2000, "The Influence of Austenitising Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Low-Alloyed Ni-Mo-Cu Austempered Ductile Iron", *Mater. Tehnol.*, 34 (5), 207-212.
- Rasband, W., ImageJ; U.S. National Institutes of Health: Bethesda, MD, USA, 1997–2016
- Rivera, G. L., Boeri, R. E., Sikora, J. A., 1995, "Revealing the solidification structure of nodular iron", *Cast Metals*, 8:1, 1-5, DOI: 10.1080/09534962.1995.11819186
- Schissler J. M., Saverna J., 1985, "The Effect of Segregation on the Formation of Austempered Ductile Iron", *J. Heat Treating*, 4 (2), 167-176.
- Sikora J., Boeri R., 1999, "Solid state transformations in ductile iron—influence of prior austenite matrix microstructure", *International Journal of Cast Metals Research*, 11:5, 395-400, DOI: 10.1080/13640461.1999.11819306
- Solntsev, L.A., Pavlyuchenko, A.A., Minyailo, T.L. et al., 1977, Effect of alloying on austenite grain size of magnesium cast iron, *Met Sci Heat Treat* 19, 316–317. <https://doi.org/10.1007/BF00700821>
- Voigt R. C., Loper C. R., 1984, "Austempered Ductile Iron - Process Control and Quality Assurance", *J. Heat Treating*, 3 (4), 291-309.