

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

	Sayfa No
Cihan BAYINDIRLI Çekici Römork Araçında Spoiler Yapısının Sürükleme Katsayısına Etkisinin Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği ile Analizi The Analysis of The Effect of The Spoiler Structures on the Truck Trailer Vehicle to Coefficient Drag by Computational Fluid Mechanics	251-256
Abdurrahman ÜNSAL, Ahmet KABU Selin BOYDAK, Murat YÜCEL Fiber Optik Kablo da Meydana Gelen Raman Saçılmasının Analizi The Analysis of Raman Scattering in the Fiber Optic Cable.....	257-265
Cahide ÜNAL, İsmail ŞAHİN İstenmeyen Elektronik Postaların (SPAM) Filtrelenmesi için Bir Uzman Sistem Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi Design and Implementation of the Expert System for Filtering of Unwanted Electronic Mails (SPAM)	267-274
Hasan HASIRCI Mekanik Titreşimin Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkileri Effects of Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Cast Iron of Mechanical Vibration	275-282
Abdurrahman ÜNSAL, Ahmet KABU Asenkron Motor Rotor Arızalarının İstatistiksel Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi Evaluation of Rotor Faults of Induction Motors by Statistical Analysis Method.....	283-289
İzzet YÜKSEK, Serkan SIVACILAR Türkiye Şartlarında TS 825 Kapsamında Farklı Duvar Tiplerinin Isıl Etkinlikleri Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma Thermal Efficiency of Different Wall Type A Comparative Study on the Scope TS 825 in Turkey Conditions	291-302
Fatih GÖKTEPE, Erkan ÇELEBİ, Hüseyin Sedar KÜYÜK Doğal Arazi Koşullarında Yapı-Zemin Dinamik Etkileşim Deneyi In-situ Experiment on Dynamic Soil-Structure Interaction	303-311
Barış KINACI Etki on the Electrical Characterizations of Temperature and Frequency Depending on Series Resistance and Interface States in MS Structure MS Yapısında Ara Yüzey Durumları ve Seri Dirence Bağlı Sıcaklık ve Frekansın Elektriksel Karakterizasyonlar Üzerine Etkisi.....	313-318
Ali Rza YILDIZ Taşıt Elemanlarının Yapısal Optimizasyon Teknikleri ile Optimum Tasarım Optimum Design of Vehicle Components Using Structural Optimization Techniques.....	319-323
Mustafa Yavuz ÇETİNKAYA, Erkan ÇELEBİ, Osman KIRTEL Yapı-Temel-Zemin Sismik Etkileşim Probleminin Adapazarı Bölgesi için Empedans Fonksiyonları Yardımıyla Analizi Analysis of Seismic Soil-Foundation-Structure Interaction Problem for Adapazarı Region by Using Impedance Functions	325-332
Ramazan ÇAKIROĞLU, Selçuk YAĞMUR, Adem ACIR, Ulvi SEKER Modelling of Drill Bit Temperature and Cutting Force in Drilling Process using Artificial Neural Networks Delme İşlemlerinde Meydana Gelen Kesme Bölgesi Sıcaklığının ve Kesme Kuvvetlerinin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Modellenmesi	333-340
Hikmet ESEN Fotovoltaik Paneller Kullanılarak Sisleme Sistemi ile Dış Ortamların Soğutulmasının Araştırılması The Investigation of Cooling Outdoor Areas with Misting System by Using Photovoltaic Panels	341-349
Cengiz BAGCI, Zehra DUZGUN Mechanochemical Activation of Sodium Geopolymers Containing Carbon-Nano Powder	351-356
Neslihan TÜRKMEENOĞLU BAYRAKTAR Emre KİŞALİ, Mohammad ABUDSAMHADANA Investigation on the Effects of Thermal Parameters in Historic Primary School in Izmit in the Context of Refurbishment Process.....	357-367
Salih YAZICIOĞLU, Cuma KARA Betonda Atık Mermer Tozu Kullanımının Karbonatlaşmaya Etkisi Effects of Using Waste Marble Dust In Concrete To Carbonation.....	369-376
Kürşad GÖV Experimental Investigation of the Effects of Electrodes on EDM Hole Drilling Process EEl Delik Delme İşleminde Elektrot Etkilerinin Deneysel İncelenmesi	377-382
Ash Pelin GÜRGÜN Türkiye'deki Leed Ne 2009 Sertifikalı Binaların Enerji ve Atmosfer Kredilerinin Değerlendirilmesi Türkiye'deki Leed Ne 2009 Sertifikalı Binaların Enerji ve Atmosfer Kredilerinin Değerlendirilmesi	383-392
Mehmet SUBAŞI, Asghar SAFARIAN, Cetin KARATAS An Investigation of Injection Parameters of Ti-6Al-7Nb Fabricated by Powder Injection Molding	393-399
Gamze BAKKAL, Ülkü SAYIN, İlker İŞİK, Ayhan ÖZMEN, Hamdi Şükür KILIC Kumyur Mevki Arkeolojik Seramiklerin ESR Analizi ve ESR Yaş Tayinine Uygunluğunun Belirlenmesi ESR Analysis of Kumyur Location Archeological Ceramics and Determination of Suitability for ESR Dating.....	401-408
Ulas ÇAYDAŞ, Osman KUNCAN, Mahmut ÇELİK AISI 52100 Rulman Çeliğinin İşlenebilirliğinin Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Ömrü ve Sıcaklık Kriterlerine Göre Araştırılması Investigation of The Machinability of AISI 52100 Bearing Steel for Surface Roughness, Tool Life and Temperature Criterions	409-417
Ulas ÇAYDAŞ, Mahmut ÇELİK Aa 7075-T6 Alaşımının Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Sıcaklığı ve İlerleme Kuvvetine Etkilerinin Araştırılması Investigation of the Effects of Cutting Parameters on The Surface Roughness, Tool Temperature and Thrust Force in Drilling of Aa 7075-T6 Alloy	419-425
Nihal YILMAZ, Kağan CEBE, Pelin FIDANOĞLU YILDIRIM, Asu İNAN and Lale BALAS The Need for the Integration of Land Use Planning and Water Quality Modeling in the Case of Fethiye Bay Kara Kullanım Etkileşimli Su Kalitesi Modellenmesine Gerekçinim: Fethiye Körfezi Örneği	427-435
Emine SERT, Ferhan S. ATALAY Enhancement of Conversion using Ceramic Membrane in Esterification of Acrylic Acid with Butanol	437-440
Mustafa Bahadır ÖZDEMİR, Mehmet Mustafa YATARKALKMAZ, Gökay DAGLI Farklı Soğurucu Yüzey Tiplerine Sahip Düzlemsel Kolektörlerin Deneysel Analizi Experimental Analysis of the Flat Plate Collectors Having Different Types of Absorber Surface.....	441-449
Metin İPEK Analysis of Usability of Waste Erosion Wires as Fiber in Reactive Powder Concrete Atık Erozyon Tellerinin Reaktif Püdr Betonunda Lif Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması.....	451-457
Mustafa Yavuz ÇELİK, Metin ERSOY, Lyvaddin YEŞİL KAYA, Zehra KAYI Mermer Ocaklarında Elmas Tel Kesme ve Zincirli Kollu Kesme Makinelerinin Birlikte Kullanımının İncelenmesi Investigation of Using Diamond Wire Cutting and Chain Saw Machines Combination in Quarries	459-473
Güven GONCA Performance Analysis of A Spark Ignition (SI) Otto Cycle (OC) Gasoline Engine Under Realistic Power (RP) And Realistic Power Density (RPD) Conditions Buji Ateşlemeli Otto Çevrimli Benzinli Bir Motorun Gerçek Güç ve Gerçek Güç Yoğunluğu Koşullarında Performans Analizi	475-486
Ender YILDIRIM Modeling and Analysis of a Microfluidic Capillary Valve Bir Mikroakışkan Kılcal Valfin Modellenmesi ve Analizi.....	487-494
Harun TÜRKMENLER Atık su Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliği Energy Efficiency in Wastewater Treatment Plants	495-502

Journal of Polytechnic

POLİTEKNİK DERGİSİ

VOLUME / CILT 20 NUMBER / SAYI 2 JUNE / HAZİRAN 2017

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ / POLİTEKNİK DERGİSİ**

GAZI UNIVERSITY / JOURNAL OF POLYTECHNIC

<http://www.politeknik.gazi.edu.tr>**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**

Politeknik Dergisi

Journal of Polytechnic

Sahibi / Owner
Prof. Dr. İbrahim USLAN
Rektör / Rector

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager
Prof. Dr. Adnan SÖZEN
Dekan / Dean

Editör / Editor
Prof. Dr. Adnan SÖZEN

YARDIMCI EDİTÖRLER/ASSOCIATE EDITORS

Prof. Dr. Musa ATAR, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Burhanettin İNEM, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. M. Tolga ÖZKAN, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Veysel ÖZDEMİR Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Bünyamin CİYLAN, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Hamit SOLMAZ, Gazi Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK, Gazi Üniversitesi

YAYIN DANIŞMA KURULU/EDITORIAL ADVISORY BOARD

Abdullah KURT, Gazi Üniversitesi	M.Baki KARAMIŞ, Erciyes Üniversitesi
Abid ABU-TAIR, Berzeit University	Mahmood GHORANNEUISS, Azad University
Adel NASİRİ, University of Wisconsin Milwaukee	Metin GÜRÜ, Gazi Üniversitesi
Arcan DEREÇİOĞLU, Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Metin İPEK, Sakarya Üniversitesi
Arif WANI, California State University	Murat HOSOZ, Kocaeli Üniversitesi
Ayhan ÖZÇİFÇİ, Karabük Üniversitesi	Mustafa AKTAŞ, Gazi Üniversitesi
Ayşe MURATHAN, Gazi Üniversitesi	Myung Hyun KİM , Kyung Hee University
Bekir Sami YILBAŞ, King Fahd University	Nadire Şule ATILGAN, Hacettepe Üniversitesi
Cevdet SÖĞÜTLÜ, Gazi Üniversitesi	Nizamettin KAHRAMAN, Karabük Üniversitesi
Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi	Nobumasa Matsui, Nagasaki University
Engin ÖZDEMİR, Kocaeli Üniversitesi	Nusret AS, İstanbul Üniversitesi
Ercan ÖZGAN, Düzce Üniversitesi	Osman ISIKAN, Marmara Üniversitesi
Erol ARCAKLIOĞLU, TÜBİTAK	Peter LUND, Helsinki University of Technology
Farzollah MIRZAPOUR, University of Zanjan	Ramazan BAYINDIR, Gazi Üniversitesi
Halil İbrahim BAKAN, TÜBİTAK, MAM	Ramazan KURT, Bursa Teknik Üniversitesi
Halit KARABULUT, Gazi Üniversitesi	Ramazan YILMAZ, Sakarya Üniversitesi
Hani H.W.SAIT, King Abdulaziz University	Recep ÇALIN, Kırıkkale Üniversitesi
Hanifi SARAÇ, Yıldız Teknik Üniversitesi	Rodica MILICI, Stefan cel Mare Suceava University
Henryka Danuta STRYCZEWSKA, Politechnika Lubelska	Saffa B. RIFFAT, Nottingham University
Hüseyin AKILLI, Çukurova Üniversitesi	Saw Sor HEOH, INTI International University
Hüseyin EKİZ, Süleyman Şah Üniversitesi	Suat CANBAZOĞLU, İnönü Üniversitesi
Hüseyin Rıza BÖRKLÜ, Gazi Üniversitesi	Süleyman GÜNDÜZ, Karabük Üniversitesi
İbrahim DİNÇER, University of Ontario, Institute of Technology	Seyhan FIRAT, Gazi Üniversitesi
İbrahim SEFA, Gazi Üniversitesi	Sing LEE, Institute for Plasma Focus
İhsan KORKUT, Gazi Üniversitesi	Souad A.M.ALBATHI, International Islamic University of Malaysia
İlhami ÇOLAK, Gazi Üniversitesi	Şükrü DURSUN, Selçuk Üniversitesi
İlker USTA, Hacettepe Üniversitesi	Tayfun MENLİK, Gazi Üniversitesi
İshak KARAKAYA, Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Turgay AKBULUT, İstanbul Üniversitesi
İsmail AYDIN, Karadeniz Teknik Üniversitesi	Ulvi ŞEKER, Gazi Üniversitesi
Jamal KHATIB, University of Wolverhampton	Ülkü SAYIN, Selçuk Üniversitesi
Jerzy Smardzewski, Ponzan University	Yakup İÇİNGÜR, Gazi Üniversitesi
John KINUTHIA , University of South Wales	

Cilt / volume : 20

Sayı / number : 2

Haziran / June : 2017

e - ISSN : 2147-9429

Politeknik Dergisi Gazi Üniversitesi tarafından yılda **dört sayı** olarak yayınlanmaktadır / Journal of Polytechnic has been published **four issues** per year by Gazi University

BU SAYIYA (CİLT 20 SAYI 2) KATKI VEREN HAKEMLER

Adem ACIR (2 kez)	Hüseyin BAYRAKCEKEN
Adnan SÖZEN	Hüseyin USTA (2 kez)
Ahmet GÖKÇE	İbrahim ATILGAN
Ahmet HASÇALIK	İhsan TOKTAŞ
Ahmet ÖZDEMİR	M. Tolga ÖZKAN
Ahmet PİNAR	Mehmet AVCAR
Ahmet TAŞKESEN	Melik ÇETİN
Ayhan Mergen	Metin İPEK
Ayşe MURATHAN	Murat ERDEMOĞLU
Berna UNUTMAZ (2 kez)	Mustafa AKTAŞ (3 kez)
Bilgehan KEKEÇ	Mustafa İLBAŞ
Birol ENGİN	Necmettin KAYA
Cem S. ÇETİNARSLAN	Nihat KABAY
Deniz TUMAÇ	Özgür EKİNCİOĞLU
Engin GEDİK	Selçuk KEÇEL
Ercan ÖZGAN	Serdar YÜCESU
Esra ŞATIR	Seyhan FIRAT
Esra YILDIZ	Sinan TOKLU
Fatih ÇELEBİ	Şükrü SKARATAS
Güngör BAL	Tayfun MENLİK (2 kez)
Güzin UYAR	Yakup İÇİNGÜR
Hakan GÜRÜN	Yunus KAYIR (2 kez)
Hakan YAVUZ	Zafer ÖZDEMİR
Haldun GÖKTAŞ	Zinet BURAK
Hasan ULAŞ	
Hatice ÇAĞATAY	

Yazışma Adresi / Correspondence Address :

Politeknik Dergisi Editörlüğü
Gazi Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
Tanıtım ve Yayın Müdürlüğü
06500 Teknikokullar
ANKARA –TÜRKİYE

Tel : 0312-202 34 12

Fax : 0312-212 00 59

Elektronik Posta Adresi / e-mail : politeknik@gazi.edu.tr

Teknik Sorumlu / Technical Manager : **Serhat KARYEYEN, Erdem ÇİFTÇİ**

Dizgi / Compositor: İdris **ÖZÇELİK**

Baskı / Printing : Gazi Üniversitesi Matbaası / Printing Unit of Gazi University

Çekici Römork Aracında Spoiler Yapısının Sürüklenme Katsayısına Etkisinin Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği ile Analizi

Cihan BAYINDIRLI *

* Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Niğde, Türkiye

(Geliş/Received : 03.05.2016 Kabul/Accepted : 09.11.2016)

ÖZ

Bu çalışmada bir çekici römork kombinasyonuna etki eden aerodinamik kuvvetler hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemi ile incelenmiştir. Kuvvet ölçümleri çekici römork için Fluent® programında 4 değişik serbest akış hızında gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler 312 000 - 844 000 Reynolds sayılarında yapılmıştır. Sürtünme ve basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti belirlenmiştir. Model araç için sürüklenme kuvvetini iyileştirmek için bir spoiler tasarlanmıştır. Geliştirilen spoiler ile % 20,9 oranında aerodinamik direnç kuvvetinde iyileşme sağlanmıştır. Çekici römork etrafındaki akış yapısı ve basınç katsayısı dağılımları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik Direnç Katsayısı (C_D), Sürüklenme Kuvveti, Fluent®, Çekici Römork, Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği.

The Analysis of The Effect of The Spoiler Structures on the Truck Trailer Vehicle to Coefficient Drag by Computational Fluid Mechanics

ABSTRACT

In this study, aerodynamic forces which effect to a truck and trailer combinations were investigated with computational fluid mechanics method. The force measurement were performed for the model truck trailer and aerodynamic drag coefficient (C_D) was determined numerically in 4 different free flow velocity on the Fluent® program. Numerical analysis of flow were made on the 312 000 - 844 000 Reynolds number. The friction and pressure based drag force distributions were determined. A spoiler designed to improve the drag force for the base model. % 20,9 improvement obtained for the aerodynamic drag coefficient. The flow structure around the truck and trailer and pressure coefficient distributions.

Keywords: Aerodynamic Resistance Coefficient (C_D), Drag Force, Fluent®, Towing Trailer, Computational Fluid Mechanics.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Motorlu kara taşıtlarının aerodinamik yapıları aracın performansını, yakıt tüketimini, ivmelenme özelliklerini, yol tutuş özelliklerini, çevre kirliliğini, ses gürültüsünü ve konforunu önemli derecede etkilemektedir. Bunların yanında motorun, dişli kutusu ve frenlerin soğutulmasının, iç mekânın havalandırılmasının aerodinamik yapı ile doğrudan ilişkisi vardır. Bunun için taşıt etrafındaki akışın özellikleri iyi bilinmeli ve buna paralel olarak uygun tasarımlar gerçekleştirilmelidir. Motorlu taşıt üreticileri, taşıt performansını ve motor tarafından üretilen gücü arttırmaya yönelik Ar-Ge çalışmalarına büyük önem verirken diğer taraftan aracın hava içerisinde hareketi sırasında aerodinamik yapısından kaynaklanan kayıpları azaltma yollarını aramışlar ve aramaya da devam etmektedirler. Özellikle otomotiv sektöründe daha geniş yer hedefleyen üreticiler araçları-

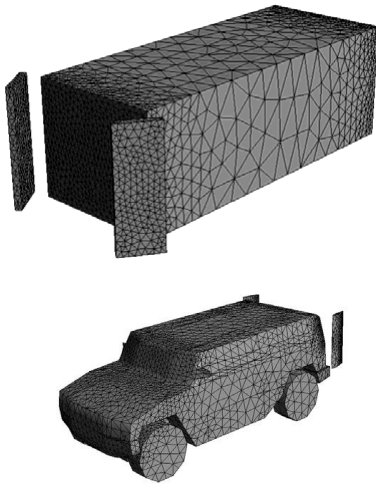
nın ekonomikliğini artırırken, ekonomikliği artırmada en büyük engellerden biri olan aerodinamik direnci azaltmak için bu tür araştırmalara çok büyük yatırım yapmaktadırlar. Adrene olarak adlandırılan hibrit bir aracın aerodinamik yapısını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmaları açık devre tipi ve test alanı 30 cm x 30 cm x 100 cm olan rüzgâr tüneline yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda araç üzerindeki C_p (basınç katsayısı) dağılımını ve C_D katsayısı tespit edilmiştir[1]. Yapılan çalışmada pick-up aracının arka kabin geometrisinin aerodinamik yapıya etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Araç üzerindeki akış yapısını PIV yöntemi ile gözlemlenmiş değişik boyutlardaki kabin yapılarının C_D katsayılarına olan etkilerini tespit edilmiştir [2]. 3/10 ölçekli bir çekici ve römork modelinin deneysel sonuçlarını standart k- ϵ , RNG k- ϵ , Non-Linear Eddy Viscosity ve Reynolds Stress Transport (RSM) model türbülans modellerinin kullanıldığı STARCD ve FLUENT/UNS paket programları yardımı ile elde edilen verilerle karşılaştırılmış, RNG k- ϵ ve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: cbayindirli@ohu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 251-256

Non-Linear Eddy Viscosity modelleri ile durma noktalarındaki basıncın daha doğru tayin edilebildiği belirlenmiştir. Verilerin doğruluğunu arttırmak için çözüm ağını arttırmak gerektiği ifade edilmiştir [3]. STARCD paket programı ile standart k-ε , non-linear ikinci derece k-ε ve non-linear üçüncü derece k-ε türbülans modellerinde transient simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Direnç kuvveti bütün modeller için hesaplanmış ve deneysel verilerden oldukça önemli miktarda sapmalar olduğu tespit edilmiştir. Transient veya transient olmayan k-ε modellerinin direnci çok yüksek belirlediğini ifade etmişlerdir [4]. Pikap modelin aerodinamik yapısını Fluent® paket programı ile LES ve RNG k-ε türbülans modellerini kullanarak incelemiştir. Taşıta gelen akışın durma noktası olarak ön tamponun hemen üst kısmı olduğunu tespit edilmiştir [5]. Eğimli arka geometriye sahip basitleştirilmiş taşıt üzerinden akışa hareketli bir zeminin etkisini ele almıştır. Yapılan incelemede hareketli zeminin C_D katsayısını % 8 C_L katsayısını %16 azalttığı tespit edilmiştir. Türbülans modeli olarak LES (Large Eddy Simulation) kullanılmıştır [6]. Dört değişik yükseklikte konumlandıkları arka spoilerin bir yarış arabasının C_D ve C_L katsayılarına etkilerini Fluent® paket programında k-ε türbülans modeli ile hesaplanmıştır. Spoilerin konumlandırıldığı yükseklik arttıkça C_D katsayısında iyileşme tespit etmişlerdir [7]. Bir otobüs ve SUV aracının (Sport Utility Car) kılavuz kanatlarının ile aerodinamik direnç katsayısına etkisini ANSYS CFX programında SST k-ε ve k-ε türbülans modelleri ile sayısal olarak hesaplanmıştır. SST k-ε türbülans modelinde deneysel çalışma sonuçlarına göre sapma oranı % 8,04, k-ε türbülans modelinde % 8,74 olarak elde etmişlerdir. Deneysel alanın giriş bölümünde türbülans şiddetini % 0,5 olarak alıp aracın C_D katsayısını 0,593 olarak hesaplanmıştır. Kılavuz kanatları ile SUV aracının C_D katsayısında yaklaşık % 18 iyileşme olabileceğini ifade etmişlerdir [8]. Şekil 1' de sayısal analizi için oluşturulan ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 1. SUV aracının sayısal çözümlemesinde ağ dağılımı (Mesh distribution in numerical analysis of SUV vehicle [8])

2. MATERYAL METOD (MATERIALS AND METHOD)

2.1. Genel Denklemler (General Equations)

Sonlu hacimlerin hesaplamalı akışkanlar mekaniği (HAD) ile çözümlenmesinde süreklilik ve momentum denklemleri kullanılır. Uygulamada bu denklemleri analitik olarak çözmek zordur. Bu yüzden bu denklemler paket programlar kullanılarak numerik olarak çözümlenir.

2.1.1. Süreklilik denklemi (Continuity equation)

Süreklilik denklemi, bir akış içerisinde yer alan kontrol hacmindeki kütle dengesi olarak ifade edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad 1$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad 2$$

$$\text{div} \vec{u} = 0 \quad 3$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 4$$

2.1.2. Momentum denklemi (Momentum equation)

Newton'un ikinci kanununa göre bir akışkan parçasının momentumunun değişim hızı bu akışkan parçasına etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir. Bir akışkan parçasının birim hacminin x, y ve z yönlerindeki momentum artış hızı sırasıyla $\rho \frac{Du}{Dt}$, $\rho \frac{Dv}{Dt}$ ve $\rho \frac{Dw}{Dt}$ terimleri ile ifade edilir.

Momentum denkleminin x-bileşeni;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{M_x} \quad 5$$

Momentum denkleminin y-bileşeni;

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{M_y} \quad 6$$

Momentum denkleminin z-bileşeni;

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{M_z} \quad 7$$

2.1.3. Navier – Stokes denklemleri (Navier – Stokes equation)

Navier – Stokes ve süreklilik denklemleri diferansiyel hareket denklemleri olarak da ifade edilir. Bu denklemleri çözümlenmesinde bazı kabuller alınarak basınç ve hızın üç bileşeni (x,y,z) hesaplanır.

Navier – Stokes denklemlerinin sonlu hacimler metodunun geliştirilmesi için en kullanışlı hali,

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{M_x} \quad 8$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad 9$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad 10$$

2.2. Sınır Şartları (Boundary Conditions)

Sayısal çözümlemede tanımlanan sınır şartları ve özellikler Çizelge 2-5’de verilmiştir.

Çizelge 2. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde kullanılan özellikler (Used features in numerical analysis of truck trailer)

Fonksiyon	Özellik
Çözücü	Ayrık (segregated)
Fomülasyon	İmplicit
Zaman	Sabit
Hız formülasyonu	Mutlak
Değişim seçeneği	Düğüm-esaslı
Akışkan	Hava (sıkıştırılmaz)
Basınç – Hız bağlantısı	Simple

Çizelge 3. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde relaksasyon kriterleri (Relaxation criterias in numerical analysis of truck trailer)

Basınç	0.3 Pa
Yoğunluk	1 kg/m ³
Gövde kuvvetleri	1 N
Momentum	0.7 m ² /s
Türbülans kinetik enerji	0.8 m ² /s ²
Spesifik yayılım oranı	0.8
Türbülans viskozite	1 kg/m.s

Çizelge 4. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde havanın özellikleri (Features of air in numerical analysis of truck trailer)

Özellik	Tanım	Sayısal Değer
ρ	Yoğunluk	1 kg/m ³
μ	Dinamik viskozite	1.560×10 ⁻⁵ kg/m.s

Çizelge 5. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde interpolasyon seçenekleri (Interpolation options in numerical analysis of truck trailer)

Özellik	Sayısal Değer
Basınç	İkinci Derece Ayrıklaştırma (Second-Order)
Momentum	İkinci Derece Ayrıklaştırma (Second-Order)
Türbülans kinetik enerjisi	Birinci Derece Ayrıklaştırma (First-Order)
Türbülans yayılım oranı	Birinci Derece Ayrıklaştırma (First-Order)

2.3. Çizim Datalarının Oluşturulması (Obtaining Of Drawing Datas)

2.3.1. Üç boyutlu optik tarama (Three-dimensional optical scanning)

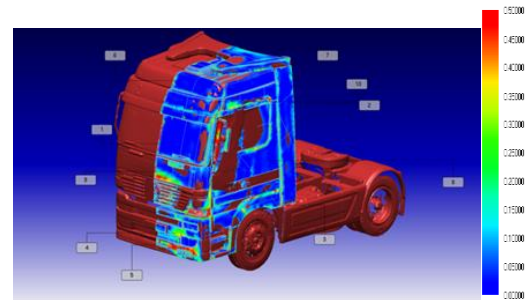
Şekil 5.3’ de çekici ve römork ayrı ayrı 1 adet developer sprej kullanılarak boyanmış, Şekil 5.4’ de üç boyutlu optik tarama cihazı ile optik tarama yöntemiyle 3 boyutlu çizim datası elde edilmiştir. Şekil 2’ de üç boyutlu tarama cihazı, Şekil 3’ de çekicinin çizim datası ve kalite kontrolü, Şekil 4’ de ise römorkun çizim datası ve kalite kontrolü verilmiştir.



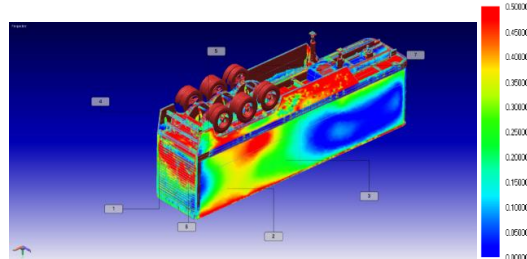
Şekil 2. Üç boyutlu optik tarama cihazı (Three-dimensional optical scanning device)

2.3.2. Modelleme (Modelling)

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 görüleceği üzere noktasal ağ yapılarından faydalanılarak bilgisayar destekli tasarım yazılımı (Catia V5) ile elde edilen ölçüm datası üzerinden parametrik modelleme yöntemi ile 3 boyutlu çizim dataları elde edilmiştir. Elde edilen çizim dataları incelendiğinde geometrik benzerlik büyük oranda sağlanmıştır. Ancak prototip araca göre yüzey pürüzlülüğüne bağlı oluşabilecek hatalar ihmal edilmiştir.



Şekil 3. Çekicinin çizim datası ve kalite kontrolü (Drawing data and quality control of the truck)



Şekil 4. Römorkun çizim datası ve kalite kontrolü (Drawing data and quality control of the trailer)

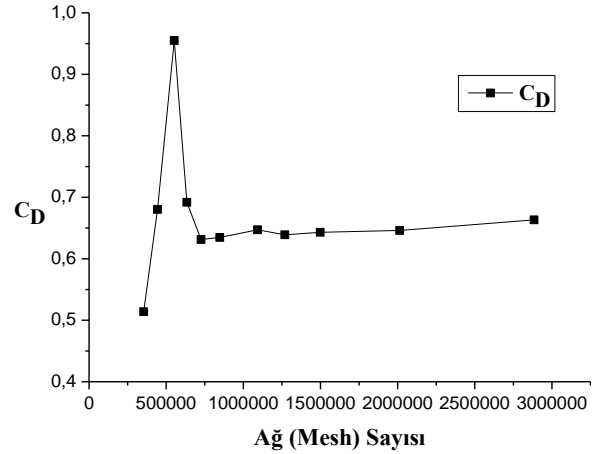
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ (HAD) İLE ÇÖZÜM (CFD ANALYSIS)

Sayısal çözümler Fluent® programında, Intel® Core™ i5 3570 CPU 3.40 GHz işlemci ve 8 GB ram özelliklerine sahip bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Çözümler 10m/s, 15m/s, 20m/s ve 27 m/s hızlarında yapılmıştır.

Sonlu hacimler ile ilgili yapılan sayısal çalışmalarda düzgün ve kaliteli bir ağ oluşturmak sonuçların doğruluğu açısından çok önemlidir. Bu yüzden sayısal çalışmalarda ağ kalitesi aranmaktadır. Ancak geometrinin karmaşıklığı arttıkça bu ağ kalitesini elde etmek zorlaşmaktadır. Çekici römork kombinasyonunun çizim datasında birçok ayrıntılı, küçük ve kavis açısı bulunan parçalar bulunmaktadır. Bu durum da istenilen düzeyde ağ kalitesi elde edilememiştir. Daha iyi ağ kalitesini elde etmek için çizim datasını daha da basitleştirmek, kavis açısı olan parçaların yerine daha düz parçalar çizmek ya da küçük parçaları kapatmak gerekmektedir. Bu durumda da çizim datası geometrik benzerlikten uzaklaşacak sonuçlar deneysel sonuçlardan ve gerçek değerlerden uzaklaşacaktır. Bu çalışmada ağ kalitesi (element quality) ortalama 0,81 olmuştur. Bu değer 0,5 den yüksek olması önerilmemektedir. Sayısal çalışmaların doğrulanmasında başvurulan yöntemlerden birisi de ağdan bağımsızlık testleridir. Sayısal çözümlemede ağ sayısı artmasına rağmen sonuç belli bir değerden sonra değişmiyorsa, çözümlemede ağdan bağımsızlık elde edilmektedir. Bu çalışmada 11 değişik ağ sayısında üçgenel hacim (tetrahedrons) ağ yapısı için ağdan bağımsızlık testleri yapılmıştır. Çekici aracının ağ yapılandırılmalarında üçgenel ağların minimum ve maksimum boyutları değiştirilerek değişik çarpıklık oranında ve değişik sayıda ağ yapısı oluşturulmuş ve aynı türbülans modellerinde çözümleme yapılmıştır.

Çizelge 6. 27 m/s hızda yapılan ağdan bağımsızlık testi sonuçları (Independent test results from the mesh at 27 m / s)

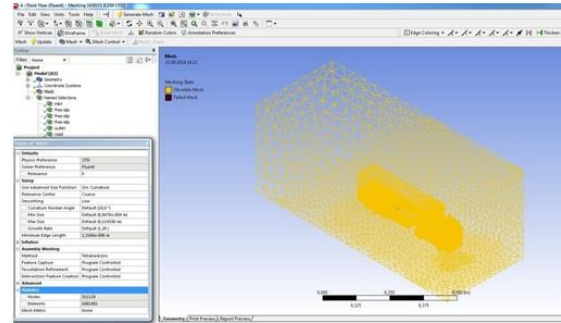
Reynolds Sayısı	Ağ sayısı	Kuvvet (N)	C_D
317 077	354 306	2,03	0,51
317 077	443 632	2,687	0,68
317 077	552 212	3,772	0,95
317 077	633 671	2,733	0,69
317 077	725 898	2,494	0,63
317 077	847 328	2,507	0,63
317 077	1 092 454	2,556	0,65
317 077	1 269 195	2,524	0,64
317 077	1 497 968	2,54	0,64
317 077	2 013 573	2,552	0,65
317 077	3 032 090	2,446	0,62



Şekil 5. Ağ bağımsızlığı grafiği (Mesh independent graph)

3.1. Çekici ve Römorkun Sayısal Çözümleri (Numerical Analysis Of Truck)

Bu çalışmada kullanılan model araç (base model) Bayındırlı ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır [9]. Çalışmanın ikinci kısmında geliştirilen spoiler ile bu model aracın aerodinamik bakımdan iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan sayısal çözümleme sonucunda çekici römork kombinasyonuna etki eden kuvvet değerleri hesaplanarak akış yapısı ile ilgili görümler ve grafikler elde edilmiştir.

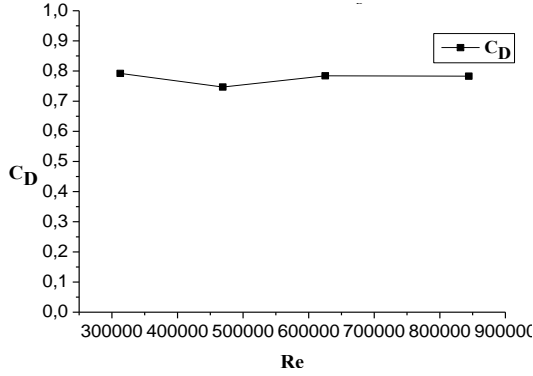


Şekil 6. Çekici römorkun "ağ oluşturma" ara yüzündeki görünümü (The interface view of truck and trailer in meshing section)

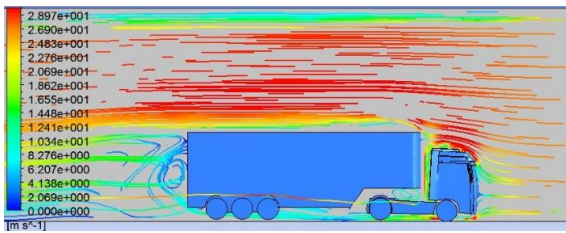
Çizelge 7. Model araca etki eden kuvvet değerleri ve C_D katsayıları (Affecting force values to the model vehicle and C_D coefficients)

Re	Kuvvet (N)	C_D
312000	0,5240	0,792
469000	1,1110	0,747
625000	2,0750	0,784
844000	3,7750	0,783

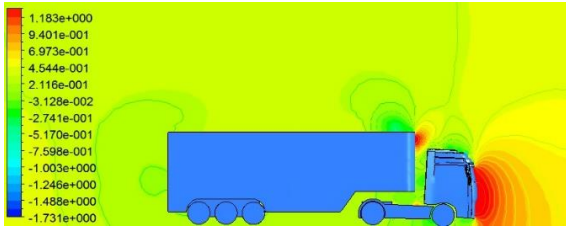
Çizelge 7'de görüleceği üzere 10 m/s, 15 m/s, 20m/s ve 27 m/s hızlarında yapılan sayısal çözümleme sonuçlarına göre çekici römork kombinasyonunun C_D katsayısı ortalama 0,776 olarak tespit edilmiştir. Toplam aerodinamik direnç katsayısının ortalama % 94,2'si basınç kaynaklı % 5,8'i sürtünme kaynaklı olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7. Reynolds sayısına göre çekici römorkun sayısal C_D katsayısı grafiği (According to Reynold number aerodynamic drag coefficient (C_D) of truck and trailer)



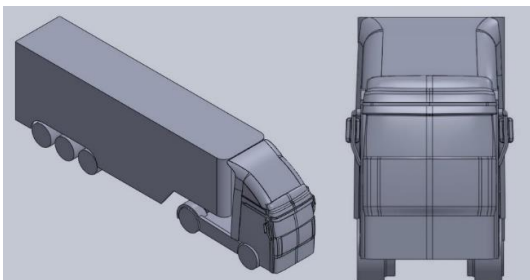
Şekil 8. 27 m/s ($Re=844\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi (The streamline image of the affecting wind speed to truck trailer at $Re=844\ 000$)



Şekil 9. 27 m/s ($Re=844\ 000$) hızda çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı The pressure coefficient (C_p) distribution on the truck and trailer at $Re=844\ 000$)

3.2. Spoiler Tasarımı İle Aerodinamik İyileştirme (Aerodynamic Improvement With Spoiler Design)

Bu çalışmada model aracın spoiler yapısı iyileştirilerek geliştirilen yeni spoiler modelinin sürüklenme katsayısına etkisi tespit edilmiştir. Elde edilen çizim datasının kalıp boşluğu oluşturularak aynı deney şartlarında 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s ve 27 m/s hızlarında sayısal analizi yapılmıştır. Elde edilen görseller ile iyileştirilmiş akış yapısı gözlemlenmiştir.

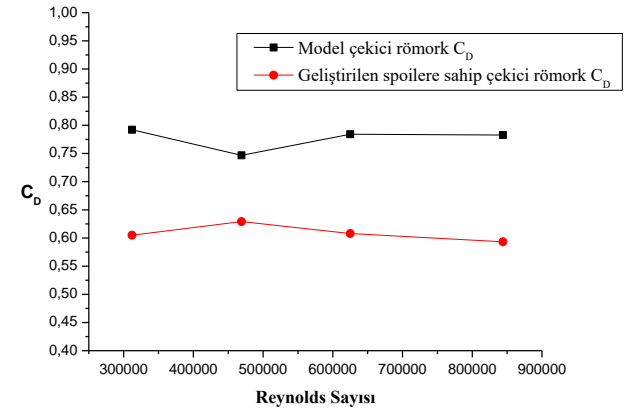


Şekil 10. Geliştirilen yeni spoilere sahip çekici römorkün çizim datası (Drawing datas of truck trailer with developed new spoiler)

Çizelge 8. Geliştirilen spoilere sahip model araca etki eden kuvvet değerleri ve C_D katsayıları (Affecting force values to the model vehicle which has got developed new spoiler and C_D coefficients)

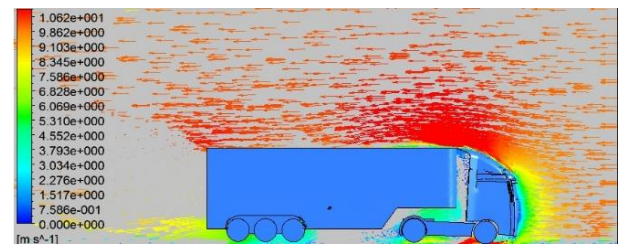
Re	Kuvvet (N)	C_D
312000	0,400	0,605
469000	0,936	0,629
625000	1,608	0,608
844000	2,860	0,593

Çizelge 8’de geliştirilen yeni spoilere sahip model aracın 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s ve 27 m/s hızlarında sayısal analizi yapılmış ve çözümlene sunucunda araca etki eden direnç kuvveti tespit edilmiştir. Yapılan sayısal analizler sonucunda çekici römorkün C_D katsayısı ortalama 0,609 olarak elde edilmiştir. Model araca göre % 20,9’luk aerodinamik iyileşme sağlanmıştır.



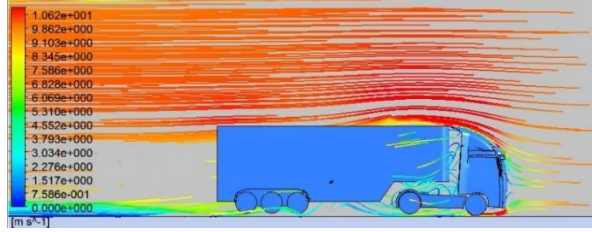
Şekil 11. Reynolds sayısına göre C_D katsayısı karşılaştırma grafiği (The C_D comparison graph according to Reynolds number)

Yapılan sayısal çalışmalar sonucunda römorkün çekiciden yüksek olan üst kısmında basınç katsayısı (C_p) durma basıncına yakın elde edilmiştir. Model 1 aracında geliştirilen spoiler ile bu bölgede aerodinamik iyileşme sağlanmıştır. Şekil 12’de spoilerin hücum açısına bağlı olarak hava akışı römorkün üst kısmına aktarılmış ve bu bölgede oluşan basınç kaynaklı direnç kuvveti azaltılmıştır.



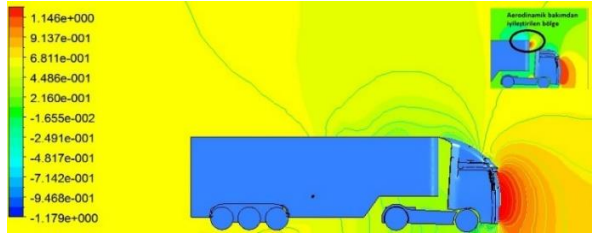
Şekil 12. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi (The vector image of the wind speed on the model 1 vehicle at $Re=312\ 000$)

Şekil 13'de akışın streamline olarak görüntülenmesinde geliştirilen spoiler ile römork üzerine aktarılan hava akışı görülmektedir. Spoilerin üst kısmından uzunluğu boyunca geçen hava burada sürtünmeye bağlı bir direnç oluşturmaktadır. Sürtünmeye bağlı direnç basınca bağlı dirence göre çok düşük etki yaptığında geliştirilen yeni spoilerlere sahip model aracında sayısal olarak % 20,9 oranında aerodinamik iyileşme elde edilmiştir.



Şekil 13. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızdaki model 1 aracıma etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi The streamline image of the wind speed on the model 1 vehicle at $Re=312\ 000$

Şekil 14'de model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı dağılımı verilmiştir. Römorkun çekiciden yüksek olan bu bölge ve akışa dik durumda olup durma basıncına yakın basınç katsayısı oluşmaktadır. Geliştirilen spoiler ile bu bölgedeki basınca bağlı oluşan aerodinamik direnç kuvveti azaltılarak C_D katsayısı düşürülmüştür.



Şekil 14. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızda model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı (The pressure coefficient (C_p) distribution on the model 1 vehicle at $Re=312\ 000$)

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Bu çalışmada bir çekici römork modelinin sürüklenme kuvvetini azaltmak amacı ile bir spoiler tasarımı yapılmıştır. Yeni spoilerin araç etrafındaki akış yapısına olan etkisi 312000 - 844000 Reynolds sayısı aralığında numerik olarak incelenmiştir. Çekici römork etrafındaki akış hızı streamline ve vektör olarak belirlenmiştir. Ayrıca çekici römork üzerindeki basınç katsayısı dağılımları tespit edilerek geliştirilen spoiler ile C_D katsayısında % 20,9 iyileşme sağlanmıştır. Bu orandaki bir aerodinamik iyileşme yüksek hızlarda çekici römorklarda yakıt tüketimini yaklaşık % 10 azaltabilmektedir. Römorkun çekiciden yüksek ön yüzey alanında basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti, geliştirilen spoiler yapısı iyileştirilmiştir. Römorkun ön üst yüzey alanında durma basıncına yakın elde edilen bu basınç kaynaklı drag kuvveti, akışın römorkun üstüne aktarılması ile azaltılmıştır. Ayrıca akış yapısındaki bu iyileşme ses gürültüsü ve konforu da olumlu yönde etkilemektedir. Bu durum özellikle spoiler tasarımının önemini ortaya koy-

muş uygun spoiler tasarımı ile elde edilebilecek iyileşme potansiyelini göstermiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmamda emeği geçen doktora tezi danışman hocalarım Prof. Dr. M. Sahir SALMAN ve Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU hocalarıma, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Selim ÇETİNKAYA ve Prof. Dr. Adnan SÖZEN hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Desai M., Channiwala S. A., Nagarsheth, H. J. Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics* 4(3): 359-366, (2008).
- Ha, J., Shigeru, O., and Yasuaki, K. Drag Characteristics Of A Pickup Truck According to Bed Geometry. Paper presented at *7th IASME/WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics*, Moscow, Russia, (2009).
- Perzon, S., Janson, J., and Höglin, L. On comparisons between CFD methods and wind tunnel tests on a bluff bod. *SAE Technical Paper Series*, 01-0805, 1-11, (1999).
- Perzon, S., and Davidson, L. On transient modeling of the flow around vehicles using the Reynolds equation. *International Conference on Applied Computational Fluid Dynamics (ACFD) Beijing China*, 720-727, (2000).
- Lokhande, B., Sovani, S., and Khalighi, B. Transient simulation of the flow field around a generic pickup truck. *SAE Technical Paper Series*, 01-1313, 1- 19, (2003).
- Krajnovic, S., and Davidson, L. Influence of floor motions in wind tunnels on the aerodynamics of road vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93: 677-696, (2005).
- Apisakkul, K.T., and Kittichaikarn, C. Numerical analysis of flow over car spoiler. Paper presented *The Ninth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering Papers ANSCSE-9*, Bangkok, Thailand, (2005).
- Wahba, C. E.M., Al-Marzooqi, H., Shaath, M., Shahin, M., and El-Dhmarshawy. T. Aerodynamic Drag Reduction for Ground Vehicles Using Lateral Guide Vanes. *CFD Letters*, 4(2): 68-78, (2012).
- Bayındırlı, C., Akansu, Y.E., Salman, M.S., and Çolak, D. The Numerical Investigation of Aerodynamic Structures of Truck and Trailer Combinations. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 4 (3): 139-145, (2015).

Fiber Optik Kabloda Meydana Gelen Raman Saçılmasının Analizi

Selim BOYDAK¹, Murat YÜCEL^{2*}

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 06500, Teknikokullar, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 06500 Teknikokullar-Ankara, TÜRKİYE
(Geliş/Received : 31.05.2016 ; Kabul/Accepted : 15.06.2016)

ÖZ

Fiber optik kablo içerisinde ışık dalgaları ilerlerken, bir fotonun daha düşük enerjili fotona elastik olmayan saçılmasından dolayı, yayılan ışığın dalga boyundan farklı dalga boylarında, geri veya ileri yönlü, yeni ışık dalgaları oluşmaktadır. Bu ışık dalgaları bazı uygulamalarda istenmezken, bazı uygulamalarda ise yeni oluşan ışık dalgalarından faydalanılmaktadır. Bilinen en yaygın saçılma uygulamaları ise Brillouin ve Raman saçılmalarıdır. Bu saçılmalar kullanılarak fiber yükselteçler, fiber lazerler ve fiber sensörler üretilmektedir. Bu çalışmada, Raman saçılması teorik olarak incelenerek, tek ve çok kanallı Raman düzeneklerinde fiber boyuna bağlı olarak oluşan doğrusal olmayan Raman saçılmasının etkileri analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optik Fiber, Lineer Olmayan Saçılmalar, Raman Saçılması.

The Analysis of Raman Scattering in the Fiber Optic Cable

ABSTRACT

The light waves travel in fiber optic cable, due to the inelastic scattering of a photon to a lower energy photon, new light waves consists which have different wavelengths from the emitted light waves wavelength, back or forward directions. The emerging light waves are utilized in some applications although these light waves are undesirable in some applications. The most widely known applications are the Raman scattering and Brillouin scattering. This scattering using fiber amplifiers, fiber lasers and fiber sensors are produced. In this study, examining the Raman scattering theory, the analyzed effects of non-linear Raman scattering which occurs due to length of the fiber at the single and multi-channel Raman configurations.

Keywords: Optic Fiber, Nonlinear Scattering, Raman Scattering.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fiber optik kablo içindeki doğrusal olmayan saçılma etkileri, bir fotonun daha düşük enerjili fotona elastik olmayan saçılmasından kaynaklanmaktadır. Enerji farkı, ortamdaki moleküler titreşimler veya fononlar tarafından emilir. Başka bir deyişle, bir ışık dalgasının enerjisinin, daha yüksek dalga boylu başka bir dalgayla transfer olduğu söylenebilir. Öyle ki enerji farkı fononlar şeklinde görünür [1]. Diğer dalga Stokes dalgası olarak bilinir ve pompa dalgası olarak kabul edilebilir. Anti-Stokes olarak bilinen frekanstaki yüksek enerjili foton, doğru enerjinin ve momentumun fononu varsa oluşturulabilir. Fiber optik kablodaki saçılmalar doğrusal ve doğrusal olmayan saçılmalar olmak üzere iki çeşittir. Doğrusal saçılmalarda kendi arasında Rayleigh ve Mie saçılması olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Fiberde iki doğrusal olmayan saçılma olayı vardır ve ikisi de silikanın titreşimli uyarma modlarıyla ilgilidir [2-9]. Bu olay, uyarılmış Raman saçılması (URS) ve uyarılmış Brillouin saçılması (UBS) olarak bilinir. Temel fark, UBS akustik fononlardan geçerken, optik fononlar URS'ye katılır. Bu farkın bir sonucu olarak;

URS ileriye ve geriye doğru her iki yönde de oluşabilirken, UBS tek bir yönde meydana gelir. Doğrusal olmayan saçılma süreçleri, yüksek optik güç seviyelerinde orantısız zayıflamaya neden olur. Bu ayrıca, farklı bir frekansta ileri veya geri doğrultuda bir moddan diğer modlara optik güç transferine yol açar. Aslında uyarılan saçılma mekanizmaları (UBS veya URS) optik kazanç da sağlar fakat frekanstaki bir kayma ile gerçekleşir.

Literatürde saçılmalar ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Zhang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, yüzeyi artırılmış Raman saçılması algılayıcısı için tek kanal fotonik kristal fiber tasarlamışlardır [10]. Tian ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, süper iletken NdO_{1-x}FxBiS₂ kristallerde Raman saçılması konusunu incelemişlerdir [11]. Zhang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Gelişmiş yüzeyli Raman saçılması için Au:Ag kompozit oranının Nanokap dizisini oluşturmuşlardır [12]. Zhou ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, bir içecek içerisindeki zehirli molekül tespiti için yüzeyi artırılmış Raman saçılması fesleğen tohumu destekli nano parçacıkları incelemişlerdir [13]. Garrido ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Değiştirilmiş gümüş kolloiden olumsuz yüklenmiş bio analitlerin Raman saçılması uygulamasını tasarlamışlardır [14]. Jamil ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Raman saçılması

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: muyucel@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 257-265

sensörü ve 6-amino heksanetiol tarafından 2,4,6 trinitrotoluenin moleküler tanımını yapmışlardır [15]. Qi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, süt ürünlerinde penisilloik asitin hızlı tespiti için Raman saçılması stratejisini incelemişlerdir [16]. Chang yapmış olduğu çalışma da, Raman saçılması özellikleri ve geliştirilmiş optikle ZnO nun düşük sıcaklık ve büyük ölçek gelişimiyle nano enjektör sıralamasını yapmışlardır [17]. Wang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, İnce su tabakasına hapsedilmiş Raman saçılması tarafından dimetil metilfosfonatı incelemişlerdir [18]. Sharma ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Platin kaplama kontrollü altın nano çubukların yüzeyi gelişmiş Raman saçılması ve katalitik aktiviteleri ayarlamasını incelemişlerdir [19]. Akintola ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Toplu 2H-WSe2 nin Raman ve Brillouin saçılması incelemelerini gerçekleştirmişlerdir [20].

Sharma yapmış olduğu çalışma da, Relativistik plazma da ultra yoğun delikli Gaussian ışınının uyarılmış Raman saçılmasını tasarlamıştır [21]. Golasa ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Au/MoS2 hetero yapılarında düzensiz indüklenmiş Raman saçılması konusunu araştırmışlardır [22]. Motochi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, CVD Elması İyon nakliyle sertleştirilme yüzey Brillouin Saçılmasını incelemişlerdir [23]. Zalamai ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Rezonans Raman saçılması ve TlInS2 kristallerde eksitonik spektrumları araştırmışlardır [24]. Gong ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Raman pompasıyla 50 kmlik tek mod fiberde anlık Brillouin Saçılmasının kazanç karakteristiğini çıkarmışlardır [25]. Ramani ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Hava stabil koloidal bakır nanopartiküller: Sentezi, Karakterizasyonu ve Raman saçılması özelliklerini incelemişlerdir [26]. Grima ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Cu3TaSe4 ve Cu3NbSe4 :X-ray ışınlarının kırılarak yayılması, difraksiyonel sıcaklık analizi, optik emilim ve Raman Saçılmasını incelemişlerdir [27]. Meng ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Plasmonik altın nano yapıların etrafındaki Brillouin saçılmasını araştırmışlardır [28]. Lin ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Raman saçılmasıyla Cu/Cu2S/ZnO nano yapıların aktive edilmesi konusunu araştırmışlardır [29]. Feng ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma da, Uyarılmış Raman saçılmasının uyarılmış Brillouin saçılması tarafından halka şeklinde geriye doğru sürülmesi olayını incelemişlerdir [30].

Bu makale çalışmasının, ikinci bölümünde fiber optik kablo içerisindeki Raman saçılması teorik olarak analiz edilerek, üçüncü bölümde Raman saçılmasının benzetimi yapılmıştır. Son bölümde ise meydana gelen lineer olmayan saçılmalar ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

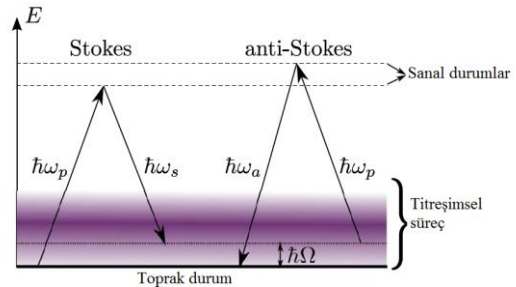
2. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Raman saçılması, bir akustik fonondan ziyade yüksek frekanslı bir optik fonon üretilmesi dışında Brillouin saçılmasına benzer. Raman saçılması ileri yönde meydana gelir ve özel bir fiberdeki Brillouin eşiğinden üç kat kadar büyük bir optik güç eşiğine sahip olabilir. Tek modlu

uzun bir fiberde Raman saçılması için eşik optik güç P_R , $P_R = 5,9 \times 10^{-2} d^2 \lambda \alpha_{dB}$ (1)

ile verilir. Doğrusal olmayan saçılma tarafından işe sokulan kayıplar, uygun bir optik sinyal seviyesinin kullanımıyla ortadan kaldırılabilir. Tek modlu fiberlerde 10 mW kadar düşük optik güçlerde Brillouin eşiğinin meydana gelmesine rağmen, bu seviye optik haberleşmeler için yine de yüksek bir güç seviyesidir ve kolayca korunabilir. Büyük öz çapları ve dolayısıyla yüksek eşik optik güç seviyeleri nedeni ile Brillouin ve Raman saçılması genellikle çok modlu fiberlerde gözlenmez.

Fiber optik kabloda ω_p frekansında ilerleyen eden ışık dalgası titreşim durumunda topraktan fiber moleküllerini harekete geçirebilir. Silika fiber de titreşimsel durumda 0-40 THz aralığında $\hbar|\Omega|$ ile $|\Omega|/(2\pi)$ enerjiye sahiptir. Bu enerji foton enerjisinden $\hbar\omega_p$ daha küçüktür, titreşim durumunda doğrudan uyarma mümkün değildir. Fakat bu durum Şekil 1'de gösterilen ω_s frekansında ikinci foton içeren ikinci dereceden Raman geçişi aracılığıyla olabilir. Kendiliğinden inelastik saçılma $\omega_s = \omega_p - |\Omega|$ fotonunu ω_p titreşimsel uyarımla $|\Omega|$ frekansında kendiliğinden Stokes işlemi olarak fiber isimlendirilebilir. Titreşimsel durumda ki $|\Omega|$ frekansı başlangıçta yerleşim bölgesi haline gelmişse, tamamlayıcı süreç $\omega_a = \omega_p + |\Omega|$ fotonu olmasına olanak sağlar ki bu da kendiliğinden anti-Stokes işlemi olarak isimlendirilebilir [31].



Şekil 1. Silika fiberlerde Stokes ve anti-Stokes işlemleri (The Stokes and anti-Stokes process in the silica fiber)

Moleküler titreşimler fononlar gibi davranır. Bu titreşimsel dalgaların momentumu anti-Stokes dalgalar ve pompanın uyuşmazlık momentumuna karşılık gelir ve $|\Omega|$ ya bağlı değildir. Bu sebeple Raman saçılması tercih edilebilir bir yöne sahip değildir. Bu ileri doğru aynı zaman da geriye doğru olabilir. Bir fonon dalgasının sönümlenmesi dalga sayısına bağlıdır ve daha kısa dalga boyunda daha kuvvetlidir. Fiberler de sönümlenme silikanın amorf doğasından dolayı çok güçlüdür. Bu yüzden moleküler titreşim yerel olarak kabul edildiğinde daha iyi bir yaklaşım olabilir. Buna ek olarak Stokes ve anti-Stokes işlemlerinde pompa fotonları diğer dalga boylarına dönüşebilir. Ayrıca Raman saçılması Stokes ve anti-Stokes saçılma sayesinde pompa modu fotonlar tekrar dönüştürülebilir.

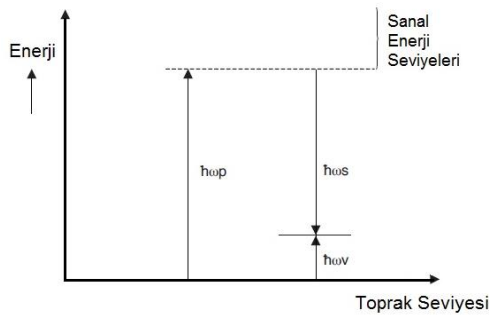
2.1. Uyarılmış Raman Saçılması (Stimulated Raman Scattering)

Raman saçılması etkisi, optik fotonla bir fotonun elastik olmayan saçılmasıdır [1] ki malzemenin üçüncü dereceden doğrusal olmayan sonlu tepki süresinden kaynaklanır

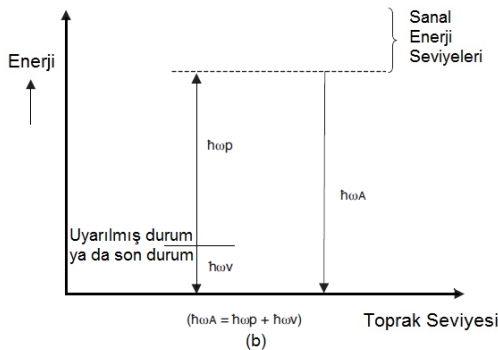
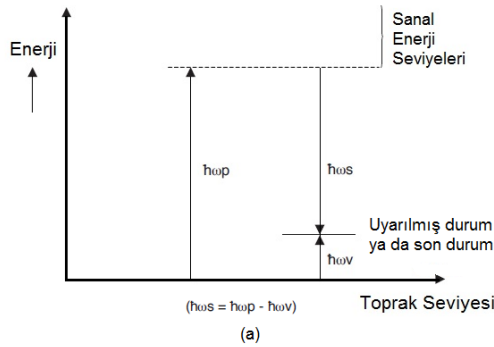
[32-33]. Optik fiber de tek renkli ışık ışını ilerlediğinde, anlık Raman saçılımı meydana gelir. Fotonların bazıları yeni frekanslara aktarılır. Saçılmış fotonlar enerji kaybeder (Stokes kayması) ya da enerji elde edebilir (anti-Stokes kayması). Pompa ışın doğrusal kutuplu ise, saçılmış fotonun polarizasyonu aynı veya dikey olabilir. Diğer frekanslarda mevcut olan fotonlar ise, bu frekanslardaki saçılma ihtimalinden dolayı artar. Bu işlem, uyarılmış Raman saçılması olarak bilinir.

Şekil 2'de Raman Saçılımının şematik gösterimi görülmektedir. Raman Saçılması Rayleigh saçılmasıyla karşılaştırıldığında daha zayıftır. Materyalin moleküler titreşim yoluyla kırılma indisinin hafif modülasyonundan dolayı oluşur. Bir malzeme boyunca enerjisi $\hbar\omega_P$ olan bir foton enerjisi $\hbar\omega_V$ ve biraz daha az enerji $\hbar\omega_S$ bir foton ile optik fonon oluşturan malzemenin bir titreşim geçişini uyarabilir öyle ki;

$$\hbar\omega_S = \hbar\omega_P - \hbar\omega_V \quad (2)$$



Şekil 2. Raman saçılımının şematik gösterimi (Schematic representation of the Raman scattering)



Şekil 3. (a) Stokes saçılma işlemi (Stokes scattering process) (b) Anti-Stokes saçılma işlemi (Anti-Stokes scattering process)

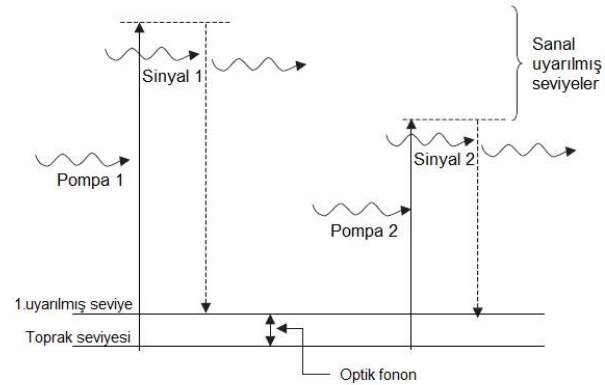
Şekil 3'de Stokes saçılma işlemi görülmektedir. Düşük enerjiyle yayılan ışık ($\hbar\omega_S < \hbar\omega_P$) Stokes saçılımına tekabül eder (Şekil 3.a). Şekil 3.b'de ise yüksek enerjiyle ($\hbar\omega_A > \hbar\omega_P$) anti Stokes saçılım olayını gösterir. Isıl denge durumunda, titreşim durumuna göre toprak seviyesinde büyük iyon sayısı nedeniyle, Stokes saçılması baskındır. Düşük enerjili yayılma seviyelerinde, anlık Raman saçılımı meydana gelir. Bu durumda moleküller titreşime katkıda bulunur ve bu yüzden saçılan ışığın yönü doğrusal değildir. Yoğunluk düzeyi yüksek olduğunda titreşim bir osilatör olarak kabul edilir, fotonlar fazda uyumlu ve tutarlıdır. Bunun neticesinde Raman saçılması meydana gelir.

Kuantum mekaniğinde, Raman etkisi çift kuantum moleküler geçişini içeren bir süreçtir. En sık Stokes saçılımı sürecinde, olay fotonun ($\hbar\omega_P$) enerjisi daha düşük bir seviyeye ($\hbar\omega_S$) indirilir ve bu fark, kinetik enerji şeklinde silis molekülüne transfer edilir. Raman değişimi ($\omega_R = \omega_P - \omega_S$) silika titreşim enerji seviyeleri ile belirlenir. Stokes Raman süreci de ileri Raman süreci olarak bilinir ve işlemin enerji korunması şu şekildedir;

$$E_g + \hbar\omega_P = E_f + \hbar\omega_S \quad (3)$$

E_g ve E_f toprak durumu ve en son durum enerjilerini ayrı ayrı hesaplar. Olay fotonun emilimi, dağılık foton ve uyarılmış durumuna molekülün geçiş emisyonu tek adımda aynı anda gerçekleşir. Bu nedenle, Raman işlemi; yeterli sayıda Stokes fotonu oluşturulan, her zaman uyarılmış Raman etkisini mümkün kılan, tek aşamalı bir süreç olarak kabul edilebilir.

Şekil 4 kompozit uyarılmış Raman saçılmasını açıklamaktadır. Doğrusal olmayan polarizasyon, bir elektronun bir üst sanal seviyeye uyarılmasına neden olur. Farklı pompa frekanslarının seçimi birçok frekanslarda uyarılmış yayılma ile sonuçlanır [33].



Şekil 4. İki pompa dalga boyu için uyarılmış Raman saçılması (Stimulated Raman scattering for two pump wavelength)

Klasik elektromanyetik konsept ile, uyarılmış Raman saçılımı (URS) sinyal yoğunluğu artışı pompa üretimi ve sinyal yoğunluğuyla orantılıdır. Örneğin,

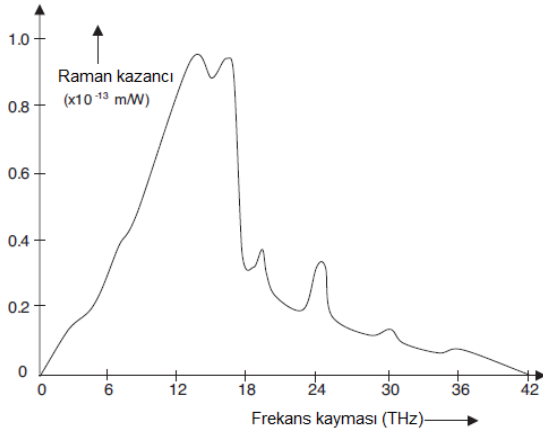
$$\frac{dI_S}{dz} = g_R I_P I_S \quad (4)$$

Burada g_R Raman-kazanç katsayısıdır.

Uyarılmış salınım üretmek için, Stokes ve pompa dalgaları mekânsal ve geçici olarak örtüşmelidir. Raman-kazanç katsayısı g_R kendiliğinden Raman saçılımı ile alakalıdır. Raman saçılımı ihtimali her kesitteki pompa dalgasında bulunan fotonların sayısı ve Raman kesitiyle orantılıdır. Raman kesitinin frekans spektrumunu neredeyse tamamen malzeme özellikleri belirler çünkü Raman süreci moleküllerin titreşim durumuyla ilgilidir. Kristal malzemelerde Raman saçılım ışığı dar bir bant genişliğine sahiptir. Optik fiberlerin ana bileşeni olan silika, doğada biçimsiz halde bulunur. Bu tip malzemelerin titreşimsel enerji seviyeleri açık değildir fakat birleşerek bant biçimini alırlar [35]. Bu tip durumlarda Stokes frekansı (ω_S) pompa frekansından (ω_P) geniş bir aralık boyunca ayrılabilir. Raman kayması için 13 THz ve 15 THz de iki tepe nokta ortaya çıkar ($\omega_R = \omega_P - \omega_S$). Ayrıca bu kayma için spektrum da daha düşük tepe noktaları da mevcuttur (Şekil 5) [36]. Stokes dalgalarının ilk artışı Eşitlik 5’de verilmiştir. Fiber kayıplarını dikkate alarak, Stokes dalgalarındaki net artış aşağıdaki şekilde yazılır;

$$\frac{dI_S}{dz} = g_R I_P I_S - \alpha_S I_S \quad (5)$$

Burada α_S güçyitirim katsayısıdır.



Şekil 5. 1µm pompa dalga boyundaki silika için Raman kazanç spektrumu (Raman gain spectrum for silica in 1µm pump wavelength)

Pompa dalgası için birleştirilmiş eşitlik aşağıdaki gibi yazılır;

$$\frac{dI_P}{dz} = -\frac{\omega_P}{\omega_S} g_R I_P I_S - \alpha_P I_P \quad (6)$$

Eşitlik 5 ve 6 ileri Raman saçılım süreci için birleştirilmiş dalga denklemi olarak bilinir [6]. Geriye doğru URS süreci durumunda, Eşitlik 6 aynı kalır fakat Eşitlik 5’de dI_S/dz ’nin başına eksi getirilir. Bu denklem kurulumu URS süreciyle benzerdir. İleri ve geri doğru URS süreci birleştirilmiş denklemleri, fotonların her bir ışında ortaya çıkması ve gözden kaybolması dikkate alınarak görüngenel şekilde anlaşılabilir. Fiber yüzünden oluşan kayıplar çıkarıldığında Eşitlik 5 ve 6 yeniden yazılabilir;

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{I_S}{\omega_S} + \frac{I_P}{\omega_P} \right) = \quad (7)$$

Bu denklem pompadaki fotonların ve URS süreci boyunca Stokes dalgalarının toplam sayısının korunumu kanununu açıklar. Pompa gücü, eşik gücü olarak bilinen belirli bir güç seviyesini aştığı zaman Raman sürecinde uyarılma ortaya çıkar. Uyarılmış saçılımının büyümesi için uyarılmış artış lineer kayıpları geçmelidir.

URS her iki yönde de meydana gelebilir, örneğin optik fiberlerde hem ileri hem de geri doğrultudadır. İleri URS süreci durumunda pompa tükenmesi Raman eşliğini [36] hesaplamak için ihmal edilebilir. Bu nedenle Eşitlik 6’nın sağ tarafındaki ilk terim ihmal edilebilir.

$$\frac{dI_P}{dz} = -\alpha_P I_P \quad (8)$$

Bu denklemin çözümü şu şekilde yazılabilir;

$$I_P(z) = I_0 \exp[-\alpha_P z] \quad (9)$$

$$I_S(L) = I_S(0) \exp[g_R I_0 L_{eff} - \alpha_P L] \quad (10)$$

Burada efektif uzunluk $L_{eff} = \frac{1 - \exp[-\alpha_P L]}{\alpha_P}$ olup, URS; fiber uzunluğu boyunca kendiliğinden gelişen Raman saçılmasından meydana gelmektedir. Stokes gücü, eşitliğe ve tüm Raman kazanç spektrumuna göre $\hbar\omega$ enerjisinindeki her frekansın yükseltilmesi göz önüne alınarak hesaplanır.

$$P_S(L) = \int_{-\infty}^{\infty} \hbar\omega \exp[g_R(\omega_P - \omega)I_0 L_{eff} - \alpha_S L] d\omega \quad (11)$$

$\omega = \omega_S$ kabul edilerek, Eşitlik 11 aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$P_S(L) = \int_{-\infty}^{\infty} \hbar\omega_S \exp[g_R(\omega_P - \omega)I_0 L_{eff} - \alpha_S L] d\omega_S \quad (12)$$

Güç açısından ise, Eşitlik 9 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_P(L) = P_0 \exp[-\alpha_P L] \quad (13)$$

$P_0 = I_0 A_{eff}$ eşitliğindeki pompa gücü girdi olarak belirtilmiştir ve A_{eff} etkin alandır. Raman eşliği aynı zamanda pompa gücü girdisi (Stokes gücü fiber çıkışında pompa gücüne eşit olduğu an) olarak da ifade edilir. Yani;

$$P_S(L) = P_P(L) = P_0 \exp[-\alpha_P L] \quad (14)$$

$\alpha = \alpha_S$ varsayımıyla, Eşik durumu aşağıdaki gibi tahmin edilebilir:

$$P_{th} \approx \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (15)$$

Benzeri analiz ters URS için de gerçekleştirilebilir ve eşik gücü yaklaşık olarak:

$$P_{th} \approx \frac{20A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (16)$$

İleri URS için eşik gücüne, verilen ilk pompa gücünde ulaşılır. Geri URS ise genellikle fiberlerde gözlemlenmez. Eşitlik 16 bir çok yaklaşımlar kullanılarak elde edilmiştir, ama Raman eşliği oldukça doğru ve kesin olarak elde edilebilmektedir. 1550 nm’deki tipik optik haberleşme sisteminde $A_{eff} \approx 50 \mu\text{m}^2$, $L_{eff} \approx 20 \text{ km}$ ve $g_R = 6 \times 10^{-14} \text{ m/W}$ ’dir. Bu değerler eşliğinde Eşitlik 16’da yerine konulduğunda $P_{th} \approx 570 \text{ mW}$ olarak bulunabilir. Optik haberleşme sisteminde kanal güçleri genellikle 10 mW altındadır, URS süreci tek kanallı optik

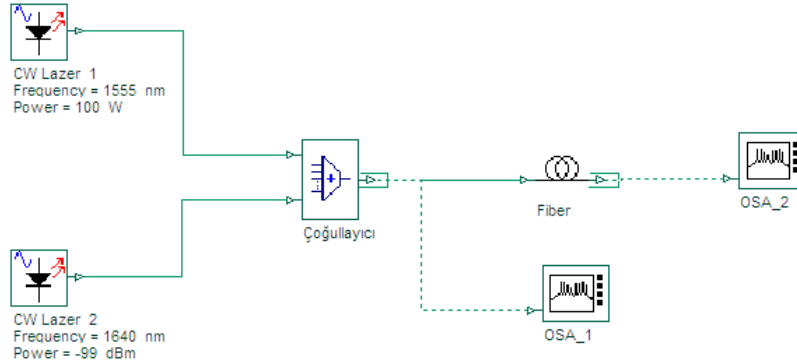
dalga sistemleri için sınırlayıcı bir faktör değildir. Buna rağmen büyük ölçüde çok kanallı dalga boyu bölmeli çoğullama (DBÇ) sistemlerinin performansını etkiler.

3. RAMAN SAÇILMASININ BENZETİMİ (SIMULATION OF RAMAN SCATTERING)

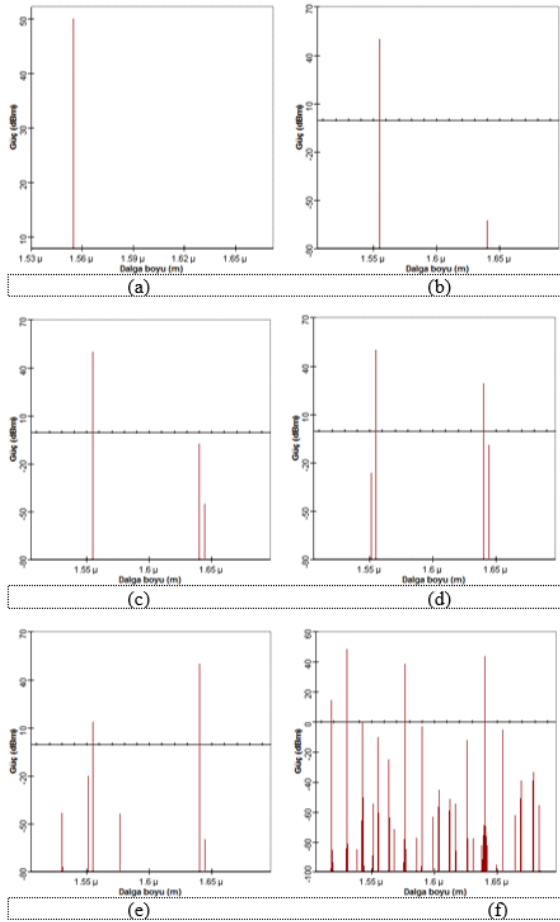
Bu makale de giriş sinyallerinin fiber optik kabloda oluşturduğu Raman saçılması OptiSys 12.0 yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla ilk olarak yüksek güçlü ve

düşük güçlü iki kanal tek modlu fibere uygulanarak fiber boyuna bağlı olarak oluşan Raman saçılmaları analiz edilmiştir. Tek bir zayıf güçlü kanal kullanıldığı için bu düzenek tek kanallı düzenek olarak adlandırılmıştır.

Şekil 6'da Raman saçılmasının tek kanallı analiz düzeneği şematik olarak görülmektedir. 2 adet sürekli dalga (CW) lazer sinyali sırasıyla 1555 nm ve 1640 nm dalga boyu ve 50dBm ve -99 dBm güç değerlerine sahip olarak seçilmiştir. Daha sonra bu sinyaller DBÇ'den ge-



Şekil 6. Raman saçılmasının tek kanallı analiz düzeneği (Single channel analyzed configuration of Raman Scattering)



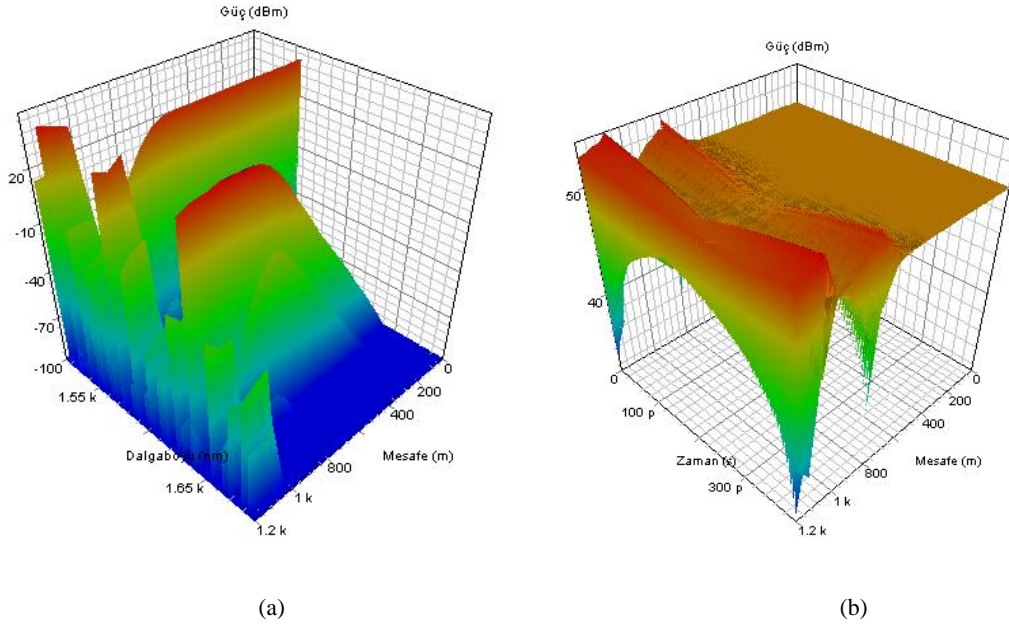
Şekil 7. (a) Giriş sinyallerinin optik spektrumu (Optical spectrum of the input signals), (b) 200 m için (for 200 m), (c) 500 m için (for 500 m), (d) 700 m için (for 700 m), (e) 1000 m için (for 1000 m), (f) 1200 m için (for 1200 m)

çirilerek 200 m, 500 m, 700 m, 1000 m ve 1200 m uzunluklardaki tek modlu fibere uygulanmıştır. DBÇ çıkışındaki optik spektrumlar OSA_1 ile, fiberin sonundaki optik sinyal spektrumları ise OSA_2 ile görülmüştür.

Şekil 7(a)'da, 1555 nm'lik giriş sinyali görülmektedir. Şekilden görüleceği gibi sinyal gücü 50 dBm dir. -99 dBm'lik ikinci kanal çok zayıf olduğu için spektrumda görülmemiştir. Öncelikle 200 m fiber boyu için yapılan simülasyonlarda, Şekil 7(b) incelendiğinde fiber çıkışında 2. kanaldan uygulanan sinyal gücünün değiştiği görülmektedir. İlk kanal için elde edilen dalgaboyu ve güç değerleri aynı iken, ikinci kanal çıkışında -62 dBm'lik güç ölçülmüştür. Şekil 7(c)'de 500 m'lik fiber optik kablo için simülasyon tekrarlanmıştır. Fiber hattın uzunluğu arttıkça ilk kanalın güç değerinin sabit kaldığı, 2. kanaldan uygulanan sinyallerin çıkış gücünün ise yükseldiği (1640 nm için -5 dBm), bunun yanısıra 1644 nm dalgaboyu ve -48 dBm güçte yeni bir saçılmanın meydana geldiği görülmektedir. Şekil 7(d)'de ise 700 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Bu fiber boyu için yapılan simülasyonlarda, ilk kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun sabit kaldığı, diğer kanaldan uygulanan sinyallerin çıkış spektrumlarının yükseldiği, bunun yanısıra bir önceki fiber boyu ile kıyaslandığında 1551 nm dalga boyu ve -28 dBm güçte yeni bir saçılmanın meydana geldiği görülmektedir. Şekil 7(e)'de 1000 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. İlk kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun azaldığı, diğer kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun ise yükseldiği gözlemlenmiştir. 700 m'lik boyda gözlemlenen 1644 nm'lik saçılmanın güç değeri ise bu boyda azalmıştır. Aynı fiber boyundaki

1551 nm'lik saçılmada ise yükselme gözlemlenmiştir. Ayrıca iki yeni lazer saçılması meydana gelmiştir. Meydana gelen yeni saçılmaların dalgaboyu ve güç değerleri sırasıyla 1529 nm ve -40 dBm ile 1575 nm ve -40 dBm dir. Bu saçılmalar Stokes ve anti-Stokes saçılmaları olarak açıklanabilir. Şekil 7.(f)'de 1200 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Bu şekilde de ilk kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun düştüğü diğer kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun ise azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çeşitli dalgaboyu ve güçler de bir çok yeni saçılma meydana gelmiştir.

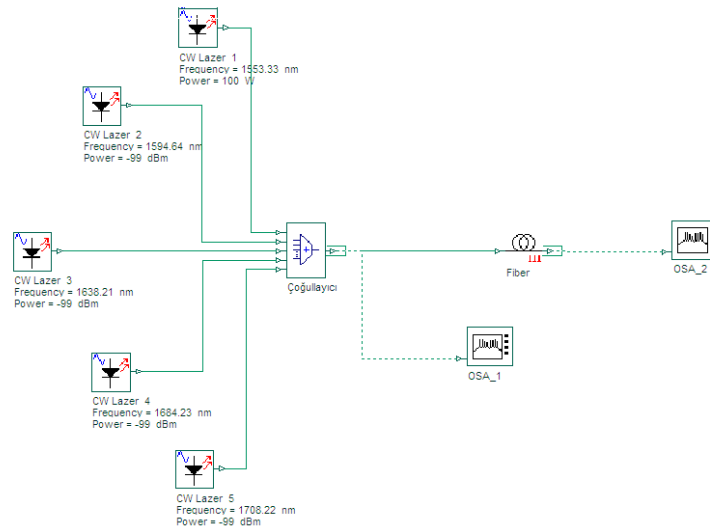
şekillere mesafe eksenini eklenerek üç boyutlu spektrum oluşturulmuştur. Şekilden de görüleceği üzere fiberin başında olmayan veya az olan Raman saçılmaları fiber boyu uzadıkça artmakta ve özellikle 1200 m'ye ulaştığında maksimum sayıda yeni saçılma oluşmaktadır. Simülasyon süresi ve yeni saçılma sayısı arttığı için daha uzun mesafelerde ölçüm yapılmamıştır. Şekil 8.(b)'de ise zamana bağlı 1200 m'lik fiber optik kablunun üç boyutlu çıkış spektrumu görülmektedir. Zamana bağlı üç boyutlu şekil incelendiğinde, 600 m ve 1200 m civarında çıkış güç değerinde zayıflamalar gözlemlenmiştir. Bu zamana bağlı zayıflamalar yaklaşık 300 ps'lik zaman



Şekil 8. 1200 m'lik fiber optik kablo için (for 1200 m fiber optic cable), (a) Dalga boyuna bağlı çıkış spektrumu (The output spectrum depend on the wavelength), (b) Zamana bağlı çıkış spektrumu (the output spectrum depend on the time)

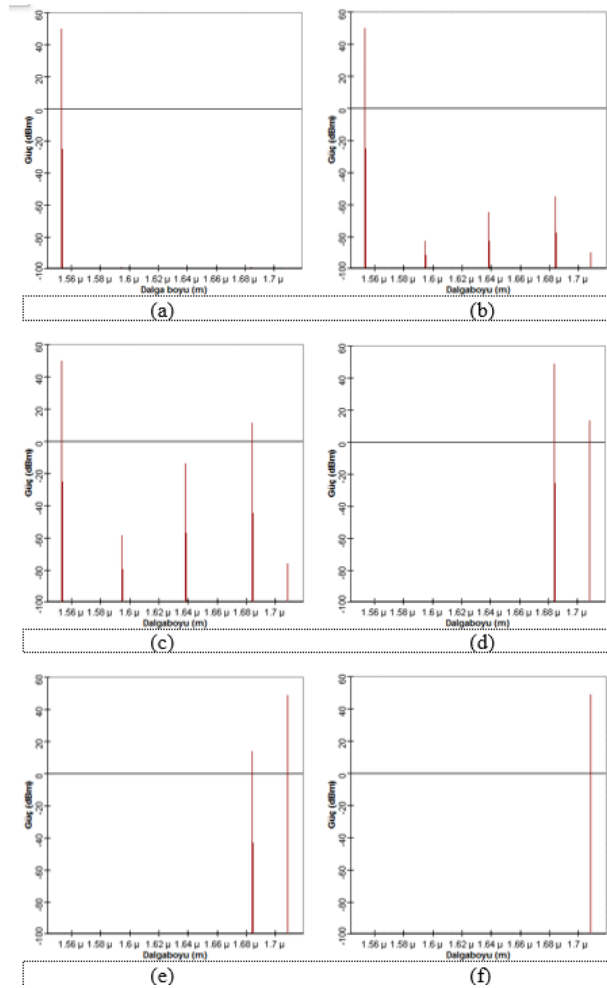
Şekil 8(a)'da dalga boyuna bağlı 1200 m'lik fiber optik kablunun üç boyutlu çıkış spektrumu görülmektedir. Bu şekilde, saçılmaların daha net görülebilmesi için önceki

aralığında gerçekleşmekte olup, rastgele oluşan yeni saçılmaların etkisi olarak açıklanabilir.



Şekil 9. Çok kanallı Raman saçılmasının şematik düzeneği (Multi-channel schematic layout of the Raman scattering)

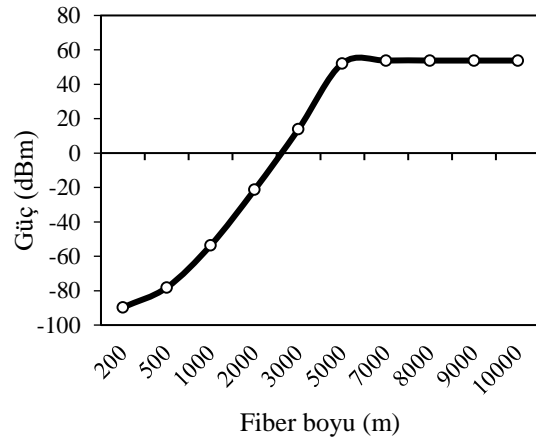
Şekil 9'da birden fazla zayıf güçteki sinyaller için Raman saçılmasının şematik düzeneği görülmektedir. Beş adet sürekli dalga (CW) lazer sinyali sırasıyla 1553.33 nm ve 100 W, 1594.64 nm ve -99 dBm, 1638.21 nm ve -99 dBm, 1684.23 nm ve -99 dBm, 1708.22 nm ve -99 dBm dalgaboyu ve güç değerlerine sahip olarak seçilmiştir. Daha sonra bu sinyaller DBÇ'den geçirilerek farklı uzunluklardaki fiberlere uygulanmıştır. DBÇ çıkışındaki optik spektrumlar OSA_1 ile, fiberin sonundaki optik sinyal spektrumları ise OSA_2 ile görüntülenmiştir.



Şekil 10. (a) Giriş sinyallerinin optik spektrumu (Optical spectrum of the input signals), (b) 200 m için (for 200 m), (c) 500 m için (for 500 m), (d) 3000 m için (for 3000 m), (e) 5000 m için (for 5000 m), (f) 10000 m için (for 10000 m)

Şekil 10(a)'da OSA_1'den elde edilen optik sinyal spektrumu görülmektedir. Beş ayrı kanaldan uygulanan sinyaller incelendiğinde fiber hattın başında sadece 1553 nm

dalgaboyu ve 50 dBm güce sahip lazer sinyali görülmekte olup, diğer kanallar ise zayıf optik güçleri nedeni ile gözlemlenmemektedir. Şekil 10(b)'de 200 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Şekil incelendiğinde fiber çıkışında beş kanaldan uygulanan lazer sinyalleri farklı güçlerde oluşmuştur. Fiber başındaki spektrum ile bu spektrum karşılaştırıldığında diğer kanallardaki sinyallerin güçlendiği ve optik spektrum çıktısında görülmeye başladığı anlaşılmaktadır. Şekil 10(c)'de 500 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Fiber hattın uzunluğu arttıkça zayıf güçteki kanallardan uygulanan sinyallerin çıkış spektrumlarının daha da yükseldiği görülmektedir. Şekil 10(d)'de 3000 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Fiber hat uzunluğu 3000 m olarak değiştirilerek simülasyon tekrarlandığında 1, 2 ve 3. kanaldan uygulanan sinyallerin çıkış spektrumlarının yok olduğu diğer kanallardan uygulanan sinyallerin çıkış spektrumunun ise arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 10(e)'de 5000 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Fiber hat uzunluğu 5000 m olarak değiştirilerek simülasyon tekrarlandığında 4. kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun düştüğü 5. kanaldan uygulanan sinyalin çıkış spektrumunun ise arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 10(f) 10000 m'lik fiber optik kablo çıkışındaki optik spektrum görülmektedir. Daha uzun fiber kullanıldığında son kanal gücünün doyuma ulaştığı görülmüştür. Bu nedenle 10000 m'de benzetim sonlandırılmıştır. Ancak 8 km'lik fiber boyunda doyuma girdiği için bu fiber boyu yeterlidir. Her kanal ve fiber boyu için elde edilen dalgaboyu ve güç değerleri aşağıdaki Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 11. Son kanal için fiber boyuna göre güç değişimi (1708.22 nm) (The power change via to the fiber length for the last channel)

Çizelge 1. Herbir fiber optik kablo için kanal güç değerleri (Power values of channel for each optical fiber cable)

Dalgaboyu (nm)	200 m Güç (dBm)	500 m Güç (dBm)	3000 m Güç (dBm)	5000 m Güç (dBm)	10000 m Güç (dBm)
1553.33	50.25	51.37	-	-	-
1594.64	-81.19	-59.12	-	-	-
1638.21	-61.32	-11.37	-	-	-
1684.23	-51.45	12.49	55.13	18.29	-
1708.22	-89.73	-78.18	13.86	52.13	52.50

Şekil 11'da ise son kanal için fiber boyuna göre güç değişimi görülmektedir. Fiber boyu arttıkça kanal gücü yükselmiş ve yaklaşık 5000 m'de ise doyuma girdiğinden sabit kalmıştır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu makale çalışmasında, Raman saçılması teorik olarak analiz edilerek, tek kanallı ve çok kanallı Raman saçılmasının benzetimleri yapılmıştır. Bu benzetimler sonucunda, tek kanallı düzenekte fiber boyu artırılarak giriş kanallarının güç değerleri incelenmiştir. Fiber boyu arttıkça gücün değiştiği ve farklı dalga boylarında yeni saçılmaların olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra girişe birden çok kanal eklenerek simülasyonlar tekrarlanmıştır.

Fiber başında sadece güçlü kanal gözlemlenirken, fiber boyu arttırıldıkça diğer kanalların fiber çıkışın da gözlemlenmeye başlamış ancak 5000 m gibi daha uzun bir mesafeye çıkarıldığında bir kanalın güçlendiği diğer kanalların ise zayıfladığı görülmüştür. 10000 m'ye kadar tekrarlanan simülasyonlarda güçlenen kanalın doyuma ulaşarak aynı güç de seyrettiği gözlemlenmiştir. Diğer kanallar ise tamamen kaybolmuştur. Analiz sonuçlarından hareket edilerek birinci analizde farklı pompa dalga boylarının seçimi ile birçok dalga boyunda uyarılmış Raman yayılması ile sonuçlandırıldığı ve bunun fiber boyu ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. İkinci analizde ise çok kanallı sistemde uygulanan her kanal fiber boyuna bağlı olarak güç yükseltici olarak izlenmiştir.

Fiber boyu arttıkça farklı dalga boylarında oluşan Raman saçılmaları bu dalga boyuna aktarılmakta ve bu kanalın gücü yükselmektedir. Fiber boyu ile dalga boyu doğru orantılı olarak değişmiş ve uzun fiber boylarında en uzun dalga boyu olan 1708.22 nm'lik son kanal kalmıştır. Kısa dalga boyları ise kısa mesafelerde yüksek güce ulaşırken fiber boyu uzadıkça bu güç fiber tarafından soğurulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Boyd, R. W., "Nonlinear Optics", *Academic Press*, SanDiego, CA, (1992).
2. Shen, Y. R., Bloembergen, N., "Theory of stimulated Brillouin and Raman scattering", *Phys. Rev. A*, 137: 1787–1805, (1965).
3. Singh, S. P. and N. Singh, "Nonlinear effects in optical fibers: origin, management and applications", *Progress In Electromagnetics Research*, 73: 249–275, (2007).
4. Buckland, E. L., Boyd, R. W., "Electrostrictive contribution to the intensity-dependent refractive index of optical fiber", *Opt. Lett.*, 21: 1117–1119, (1996).
5. Buckland, E. L., Boyd, R. W., "Measurement of the frequency response of the electrostrictive nonlinearity in optical fiber", *Opt. Lett.*, 22: 676–678, (1997).
6. Agrawal, G. P., "Nonlinear Fiber Optics", 3rd edition, *Academic Press*, SanDiego, CA, (2001).
7. Bars, F. and L. Resnic, "On the theory of the electromagnetic wave-propagation through inhomogeneous dispersive

- media", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 19: 925–931, (2005).
8. Wang, S., X. Guan, D. Wang, X. Ma, and Y. Su, "Electromagnetic scattering by mixed conducting/dielectric objects using high-order MOM", *Progress In Electromagnetics Research*, 66: 51–63, (2006).
9. Anupam, R., M. Chandran, C. K. Anandan, P. Mohanan, and K. Vasudevan, "Scattering behavior of fractal based metallodielectric structures", *Progress In Electromagnetics Research*, 69: 323–339, (2007).
10. Gong, Y., Zhang, B., Notake, T., Minamide, H., Olivo, M., Sugii, S., "Investigations on Polarimetric Terahertz Frequency Domain Spectroscopy", *Applied Physics A*, 115: 83–86, (2014).
11. Yong, T., Anmin, Z., Kai, L., "Raman Scattering in superconducting crystals", *Superconductor Science & Technology*, 29: 1–6, (2016).
12. Zhang, Y., Wang, C., Wang, J., "Nanoparticle array of Au:Ag composite for surface-enhanced Raman scattering", *Spectrochimica Acta Part A-Molecular And Biomolecular Spectroscopy*, 152: 461–467, (2016).
13. Zhou, Q., Meng, G., Wu, N., "Review of microfluidic approaches for surface-enhanced Raman scattering", *Sensors And Actuators B-Chemical*, 223: 447–452, (2016).
14. Garrido, C., Weiss-Lopez, Boris E., Campos Vallette, M. M. "Surface-enhanced Raman scattering activity of negatively charged bio-analytes from a modified silver colloid", *Spectroscopy Letters*, 49: 11–18, (2015).
15. Jamil, Arniza K. M., Sivanesan, A., Izake, Emad L., "Molecular recognition of 2,4,6-trinitrotoluene by 6-aminohexanethiol and surface-enhanced Raman scattering sensor", *Sensors And Actuators B-Chemical*, 221: 273–280, (2015).
16. Qi, M., Huang, X., Zhou, Yujie., "Label-free surface-enhanced Raman scattering strategy for rapid detection of penicilloic acid in milk products", *Food Chemistry*, 197: 723–729, (2016).
17. Chang, Y., "Low temperature and large-scale growth of ZnO nanoneedle arrays with enhanced optical and surface-enhanced Raman scattering properties", *Sensors And Actuators B-Chemical*, 225: 498–503, (2016).
18. Wang, J., Duan, G., Liu, G., "Detection of dimethyl methylphosphonate by thin water film confined surface-enhanced Raman scattering method", *Journal Of Hazardous Materials*, 303: 94–100, (2016).
19. Sharma, V., Sinha, N., Dutt, S., "Tuning the surface enhanced Raman scattering and catalytic activities of gold nanorods by controlled coating of platinum", *Journal Of Colloid And Interface Science*, 463: 180–187, (2016).
20. Akintola, K., Andrews, G. T., Curnoe, S. H., "Raman and Brillouin scattering studies of bulk 2H-WSe₂", *Journal Of Physics-Condensed Matter*, 27: 395–401, (2015).
21. Sharma, P., "Stimulated Raman scattering of ultra intense hollow Gaussian beam in relativistic plasma", *Laser And Particle Beams*, 33: 489–498 (2015).
22. Golasa, K., Grzeszczyk, M., Binder, J., "The disorder-induced Raman scattering in Au/MoS₂ heterostructures", *Aip Advances*, 5: 1–7, (2015).
23. Motochi, I., Naidoo, S. R., Mathe, B. A., "Surface Brillouin scattering on annealed ion-implanted CVD diamond", *Diamond And Related Materials*, 56: 6–12, (2015).

24. Zalamai, V. V., Stamov, I. G., Syrbu, N. N., "Resonance Raman scattering and excitonic spectra in crystals", *Journal Of Luminescence*, 160: 195-201, (2015).
25. Gong, H., Yang, P., Wuliji, H., "Gain characteristic of spontaneous Brillouin scattering in 50 km single-mode fiber with a Raman pump", *Optik*, 126: 2731-2734, (2015).
26. Ramani, T., Prasanth, K., Sreedhar, B., "Air stable colloidal copper nanoparticles: Synthesis, characterization and their surface-enhanced Raman scattering properties", *Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures*, 77: 65-71, (2016).
27. Grima-Gallardo, P., Salas, M., Contreras, O., "X-ray diffraction, differential thermal analysis, optical absorption and Raman scattering", *Journal Of Alloys And Composites*, 658: 749-756, (2016).
28. Meng, Z., Yakovlev, V., Utegulov, Z., "Surface-enhanced Brillouin scattering in a vicinity of plasmonic gold nanostructures", *Conference on Plasmonics in Biology and Medicine XII*, San Francisco, (2015).
29. Lin, Y., Hsu, Y., Chuang, C., "Thermally activated Cu/Cu₂S/ZnO nanoarchitectures with surface-plasmon-enhanced Raman scattering", *Journal Of Colloid And Interface Science*, 464: 66-72, (2016).
30. Feng, C., Diels, J., Xu, X., "Ring-shaped backward stimulated Raman scattering driven by stimulated Brillouin scattering", *Optics Express*, 23: 17035-17045 (2015).
31. Bloembergen, N. & Shen, Y. R., "Coupling between vibrations and light waves in , Raman laser media", *Phys. Rev. Lett.*, 12: 504-507, (1964).
32. Lan, G.-L., P. K. Banerjee, and S. S. Mitra, "Raman scattering in optical fibers", *Journal of Raman Spectroscopy*, 11: 416-423, (1981).
33. Singh, S.P. R. Gangwar, and Singh, N., "Nonlinear scattering effects in optical fibers", *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 74: 379-405 (2007).
34. Lewis, S. A. E., S. V. Chernikov, and J. R. Taylor, "Temperature dependent gain and noise in fiber Raman amplifier", *Opt. Lett.*, 24: 1823-1825, (1999).
35. Stolen, R. H., E. P. Ippen, and A. R. Tynes, "Raman oscillation in glass optical waveguide", *Appl. Phys. Lett.* 20: 62-64, (1972).
36. Stolen, R. H. and E. P. Ippen, "Raman gain in glass optical waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, 22: 276-278, (1973).

İstenmeyen Elektronik Postaların (SPAM)Filtrelenmesi için Bir Uzman Sistem Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

Cahide ÜNAL¹, İsmail ŞAHİN^{2*}

¹MEB, Yenilik ve Eğitim Teknolojileri Genel Müdürlüğü

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği

(Geliş/Received : 31.08.2016 ; Kabul/Accepted : 18.10.2016)

ÖZ

Günümüzde internet teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla gelişen elektronik haberleşme bazı sorunları da beraberinde getirmiştir. Elektronik haberleşmenin en önemli sorunlarından biri SPAM olarak isimlendirilen istenmeyen mesajların internette yayılmasıdır. Bu çalışmada, istenmeyen elektronik postaları (SPAM) filtrelemek için bir uzman sistem tasarlanmış ve sonuçları ortaya konulmuştur. Öncelikle, SPAM filtreleme yazılımları ile ilgili bir literatür taraması yapılmıştır. Daha sonra tasarlanan uzman sistem uygulaması adım adım anlatılmıştır. Uygulamada ilk olarak SPAM ve normal e-posta olmak üzere 4601 elektronik postadan oluşan bir veri kümesi hazırlanmıştır. Veri kümesindeki her e-postanın içeriği incelenmiş, metinlerdeki nitelikler belirlenmiştir. Geliştirilen sistem, bu niteliklerden seçim yaparak ve e-postaların IP adreslerine bakarak sözkonusu niteliklerin SPAM olup olmadığına karar vermektedir. Çalışmanın başarısı gerçek zamanlı uygulamalar ile ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: E-Posta, SPAM, Uzman Sistem, Yapay Zeka.

Design and Implementation of the Expert System for Filtering of Unwanted Electronic Mails (SPAM)

ABSTRACT

Today, the spread of internet technology in developing electronic communication has brought some problems. One of the most important problems of electronic communication on the Internet is to spread unwanted messages known as SPAM. In this study, an expert system is designed for filtering SPAM and its results are given. Firstly, the literature is reviewed related to SPAM filtering softwares. Later, the expert system designed application is explained step by step. A dataset consisting of 4601 electronic mail was prepared including SPAM and normal e-mail. Content of each e-mail in dataset is analyzed and attributes in texts are detected. Developed system decide whether this attributes are SPAM or not by electing from this attributes and by regarding IP address of e-mails. The success of this study is put forth with real time applications.

Keywords: E-Mail, SPAM, Exper System, Artificial Intellegence.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnternetin en çok kullanılan hizmetlerinden biri elektronik haberleşmedir. Ancak internetin gelişmesi ve yaygınlaşması ile birlikte, elektronik haberleşme bir takım sorunları da beraberinde getirmiştir. Elektronik haberleşmenin en önemli sorunlarından biri SPAM olarak isimlendirilen istenilmeyen mesajların internette yayılmasıdır [1].

SPAM veya istenmeyen e-posta kavramı genellikle, reklam, ürün ve web ilanları, pornograf, kolay para kazanma vb. içerikli e-postalar için kullanılır. İnternette ortalama bir kullanıcı bir günde yaklaşık 10-50 SPAM e-posta alır ve gönderilen e-postaların nerdeyse yarısı (yaklaşık 13 milyar adet) kadar istenmeyen ticari e-posta gönderilir [2].

Günümüzde istenmeyen mesajların engellenmesi için veri madenciliği teknikleri ile önlemler alınmaya çalışılmaktadır. Bu amaçla karar destek makineleri,

yapay sinir ağları, genetik algoritma veya karınca kolonisi, karar destek vektör makineleri, bayesian sınıflandırıcı gibi algoritmalar kullanılarak otomatik SPAM filtreleme araçları geliştirilmiştir [1].

İstenmeyen e-postalardan kurtulmak için çok emek ve zaman harcanmaktadır. Aynı zamanda disk alanı ve bant genişliği gibi kaynakların da önemli ölçüde kullanıldığı bir gerçektir. Ayrıca, kötü niyetli kişiler veya şirketler, çeşitli aldatmacalar ile yasadışı ürünler ve diğer uygunsuz malzemeleri işlemek için istenmeyen e-postaları fırsat olarak kullanmaktadır [2].

İstenmeyen e-postalara karşı çeşitli metotlar kullanılmıştır. Bunlar ikiye ayrılır: statik metotlar ve dinamik metotlar. Statik metotlar, SPAM mesajları önceden hazırlanmış bir adres listesi yardımıyla saptamaya çalışırlar. Dinamik metotlar ise, e-posta mesajlarının içeriğini inceleyerek SPAM mesajların filtreleme algortimalarını bu içeriğe göre hazırlarlar [3].

Bu çalışmada dinamik metotlara göre istenmeyen e-postaları (SPAM), niteliklerden seçim yaparak ve e-postaların IP adreslerine bakarak tespit eden bir uzman sistem tasarlanmıştır.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: isahin@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 267-274

Çalışmanın ikinci bölümünde uzman sistemler, üçüncü bölümünde ise SPAM e-posta konusu hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde tasarlanan uzman sistemin yapısı ve uygulanması, son bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. UZMAN SİSTEMLER (EXPERT SYSTEMS)

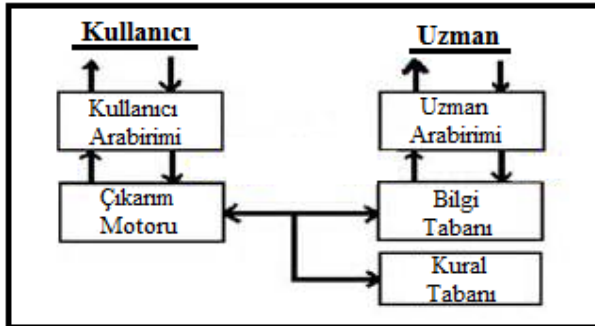
Uzman Sistemler (US), belirli konuda uzman olan bir ve birçok insanın yapabildiği muhakeme ve karar verme işlemlerini modelleyen bir yazılım sistemidir [4].

Günümüzde çok değişik alanlarda uzman sistemler geliştirilmektedir. Bunlar arasında yöneticilere karmaşık planlama problemlerinde yardımcı olan sistemler, hastalık teşhisinde, maden yatakları bulmada ya da karmaşık bilgisayar donanım yapılarını verilen şartlara uygun olarak tasarlamada veya eğitimde kullanılan sistemler olarak sayılabilir [5].

Uzman sistemler ile geleneksel sistemler arasındaki en büyük farklardan birisi muhakeme yeteneğidir. Geleneksel sistemler, uzman sistemlerin aksine muhakeme gerektiren konularda zayıf kalır. Buna karşılık uzman sistemler numerik işlemlerde zayıf kalmaktadır [6].

2.1. Uzman Sistemin Genel Yapısı (General Structure of Expert System)

Tasarlanmış bir uzman sistemde algoritma yoktur. Her zaman bilgiye dayalı işlem yapılır. Bilgi tabanından bilgi çağırılır, işlem yapılarak arama gerçekleştirildikten sonra sonuca varılıp bilgi dâhilinde açıklaması yapılır. Sistem doğru şekilde tasarlanırsa kendini geliştirebilir. Öğrenme yeteneği kazandırılabilir. Bir uzman sistemin genel yapısı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Uzman sistemin genel yapısı [7] (General Structure of Expert System)

Bilgi Tabanı (Knowledge Base): Bilgi mühendisleri tarafından oluşturulur ve bilgi mühendisleri gerçek insan uzmanın bilgisini kurallar ve stratejilere dönüştürür. Bilgi tabanını oluşturan bileşenler kurallar, gerçekler, şebekeler ve çerçevelerden oluşur. Sistem yapısı aynı kalmak koşulu ile konu kapsamı genişletilebilir ve güncellemeler için eklemeler yapılabilir olmalıdır [6].

Kurallar Tabanı (Rule Base): Uzman sistemin bir sonuca varabilmesi için bilgiyi kullandığı, bilgiyi çağırdığı hafızaya “kurallar tabanı” denir. Kurallar genel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Birincisi “Varsayım”; eğer cümlesi ile başlayan ve-veya ile kuralları belirten bir cümle

yapısıdır. İkincisi ise “Çıkarım”; O halde kelimesi ile başlayarak kuralların oluşturulduğu kısımdır [7].

Çıkarım Motoru (Inference Engine): Problem verisini örgütler ve uygulanabilir kurallar için bilgi tabanında arama yapar. Çalışan bellek ve çıkarım motoru “Sonuç Çıkarma Mekanizması” olarak adlandırılan ikinci modülü temsil eder. Bu modül çıkarımı gerçekleştirirken hem ileri hem de geriye doğru zincirleme metodu ile sonuca varabilen mekanizmadır [6].

Açıklama Sistemi (Description Unit): Uzman sistem tasarlanırken ya da bir uzman sistemin en büyük avantajlarından biri, sonuca vardığı şeyin bir sebebi olması ve bunu açıklayabilmesidir [7]. Açıklama ünitesi, geliştirilen yazılım aracılığıyla elde edilen sonuçların kullanıcılara iletmek üzere raporlandığı bölümdür. Raporun doğruluğu geri bildirim için önemlidir.

3. SPAM E-POSTA (SPAM E-MAIL)

SPAM e-posta’ya geçmeden önce e-posta tanımının açıklanması gerekmektedir. E-posta, bireylerin bilgisayar ağına bağlantısını sağlayan ve bir bilgisayardan başka bir bilgisayara internet üzerinden mesaj yollamaya yarayan bir araçtır. E-posta, başlangıçta sadece düz yazı mesajlar göndermek amacıyla geliştirilmişken daha sonra geliştirilen tekniklerle e-posta içinde resim, ses, video, html dokümanları, çalışabilir program vb. kullanımı mümkün hâle gelmiştir [8,9]. e-Posta içerisinde; Gönderen ya da Kimden (From), Alıcı ya da Kime (To), Konu (Subject), Tarih (Date), İleti gövdesi (Body), Karbon Kopya "KK" (CC, Carbon Copy), Gizli Karbon Kopya "GKK" (BCC, Blind Carbon Copy), Yanıtla (Reply), Herkesi yanıtla (Reply All), Yönlendirme (Forward, Fwd), Ek (Attachment) bileşenleri bulunmaktadır [10].

SPAM e-posta ise, çoğunlukla çok fazla sayıda alıcıya gönderilen, talep edilmemiş elektronik iletileri tanımlamak için kullanılan bir terimdir. İlk SPAM, 1 Mayıs 1978 tarihinde DEC’in, ABD’nin Batı kıyısındaki tüm ARPANET adreslerine yeni ürünlerini tanıtmak için gönderdiği e-posta olarak kabul edilmektedir. İlk ciddi SPAM girişimi ise 1994 yılında iki avukatın kendi hizmetlerini anlatan bir reklam iletilerini USENET’teki 1000’lerce gruba göndermeleri olarak kabul edilir.

SPAM e-postaların içerikleri her zaman olmamakla beraber genellikle, ürün ya da hizmet pazarlamak gibi ticari amaçlara hizmet eder [11].

Genel olarak aşağıdaki karakteristiklere sahip olurlar:

- Çoğunlukla alıcıya hiç bir şey ifade etmezler.
- Çirkin ya da yasadışı içerikle gelirler ya da onlara yönlendirirler.
- İçerikleri yalan ya da yanıltıcı olur.
- Mesajın başlık bilgileri tahrip edilmiş olur.
- Alıcıların bu dağıtımdan ileti almak istemediklerini belirtebilecekleri geçerli / fonksiyonel bir adres sunmazlar.

- Elde edilmesi ve kullanılması kişilik haklarına tecavüz niteliği taşıyan içeriklere sahip olurlar ya da bu yolla toplanan bilgiyi, kitleyi kategorize etmek için kullanırlar [11].

3.1. Sıkça Rastlanılan Bazı SPAM Mesaj Örnekleri (Some Common Spam Message Examples)

- Ürün reklamları
- Hemen para kazandıracağını söyleyen SPAM'ler
- Acele kan aranıyor mesajları
- Lösemili hastaya yardım isteyen SPAM'ler.
- Porno içerikli SPAM'ler
- Parti propagandaları
- Satılık binlerce e-posta adresi

3.2. SPAM E-posta Zararları (Spam E-mail Damages)

SPAM türündeki iletilerin yarattığı sorunlar şöyle özetlenebilir:

Gizlilik (Privacy): Hangi e-posta adresleri ve hangi kişisel bilgilerin elde edildiği ve biriktirildiği noktasında önemli gizlilik ihlalleri söz konusudur.

İçerik (Content): SPAM e-postaların ciddi bir çoğunluğunun içerdiği yasalara aykırı içerik, pornografi, çocuk pornografisi, yasadışı online kumar servisleri, piramit satışlar, hemen zengin olma vaatleri ile aldatıcı ticari eylemler bireylerin psikolojilerini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle toplumun küçük yaşta mensuplarının Internet'in olumlu özelliklerinden ziyade zararlı yönleri ile tanışmasına neden olmaktadır.

Aldatıcı Eylemler, Spoofing (Deceptive Actions, Spoofing): Spoofing, e-posta başlıklarının değiştirilmesi ile iletinin orijinal göndericisi yerine başka bir yerden ya da kurumdan geliyormuş gibi gösterme işlemidir. SPAM yapanlar iletilerinin dikkate alınıp okunması ve cevap verilmesi için spoof yaparak ciddi ve saygın kuruluşların isimlerini kullanabilirler. Bu da kurban seçilen kuruluşların ticari ünlerine zarar getirmekte, zaman ve müşteri kayıplarına yol açmaktadır ve bu durumun düzeltilmesi için yapılan harcamalar kuruma ciddi bir mali yük oluşturmaktadır.

Finansal Tutar (Financial Amount): 2001 yılında Avrupa Birliği'nin yaptığı bir araştırmaya göre tüm dünyada bir yılda meydana gelen SPAM faaliyetlerinin tüm internet kullanıcılarına maliyeti olarak 10 milyar dolar dolaylarında [11].

3.3. SPAM Kaynaklı Saldırı Metotları (SPAM-Originating Attack Methods)

SPAM kaynaklı saldırılar çoğunlukla merak uyandırma, reklam, korku, eğlence, politik, yardım gibi konularla karşımıza çıkmaktadır. Saldırı amaçlı kişiler ise hedef olarak öncelikle sistemdeki en kolay giriş yolunu yani açıklıkları denerler.

SPAM postalarla birlikte taşınan virüs vb. yazılımların tespit edilmesi oldukça güçtür. Çok değişik yöntem ve senaryolarla kişinin bilgisayarına gizli bir ajan yazılım

olarak yerleşebilmektedir. Kendilerini faydalı bir program olarak göstererek kullanıcının onayını aldığından dolayı çoğu güvenlik önlemleri yetersiz kalabilmektedir.

Uygulamaların sanal ortama taşındığı e-devlet, e-kurum, e-bankacılık gibi işlemlerde kullanılan kullanıcı kimlik doğrulama, hesap ve şifre bilgilerinin elde edilmesine yönelik phishing türü yanlış yönlendirmelerde de kullanılabilir. Gizli DNS ve hosting yanıltma yöntemleri kullanılarak, gelen bir e-postanın gerçek bir bankadan veya kurumdan geldiği izlenimi vermek suretiyle bir takım kişisel bilgileri sahte formlarla istemektedirler. Çok sık yaşanan bu tür mağduriyetlerden dolayı kurumlar web sayfalarından veya SMS ile ilgili, iletinin SPAM olduğuna dair sürekli uyarıda bulunmaktadırlar.

SPAM yoluyla yerleşen zararlı bir yazılım kişinin Outlook'undan adres defterindeki tüm kullanıcılara kendi adına tuzak olabilecek yanıltıcı postalar gönderebilmektedir. Karşıdaki kişi gelen zararlı eklentiye sahip e-postanın tanıdığı ve güvendiği kişiden geldiği varsayımıyla rahatlıkla onay verebilmektedir. Bu şekilde bilgisayarlara yüklenebilen bir takım yazılımlar klavyeden girilen bilgileri, fare ve ekran görüntülerini saldırgan hedefe doğrudan göndermektedir. Zehirlenmiş PC olarak tanımlanan bu bilgisayarlar üzerinden başkalarına ait binlerce reklam maili gönderilebilir. Uzak masaüstü servisini başlatarak saldırganın doğrudan erişmesini sağlar [12].

3.4. SPAM Önleme Teknikleri (SPAM Prevention Techniques)

SPAM e-postalarla mücadelede sunucu ve istemci tarafında alınması gereken bir takım önlemler vardır. İnternet tabanlı veya Outlook benzeri e-posta okuyucularda önemsiz posta klasörü konfigüre edilerek mutlaka tanımlanmalıdır. Doğrudan tanıma ve öğrenme yeteneği sayesinde daha önce bir kez SPAM olarak belirtilen bir posta türü artık SPAM klasörüne gidecektir. Günümüzde Anti-virüs yazılımları sadece virüs temizlemekle kalmayıp diğer anti-SPAM, antitrojan, anti-spyware, internet security gibi birçok anti-tarama yeteneği olan tümleşik yazılımlar haline gelmiştir. Kullanılmakta olan güncel anti-virüs yazılımının SPAM tarama özelliği aktif tutulmalıdır.

Posta hizmeti veren sunucu sistemlerinde ise domain üzerinden gelen giden tüm e-postalar; içerik, konu, kimden ve ekler olmak üzere birçok kritere göre taratılır. Bu amaçla GFI benzeri pek çok ticari SPAM önleme yazılımları geliştirilmiştir.

3.5. SPAM Filtreleme Yazılımları (SPAM Filtering Softwares)

Günümüze SPAM filtreleme yazılımları iki kola ayrılmaktadır. Bu yöntemlerden birincisi önceleri SPAM içerikli e-posta yollayan adresleri filtrelemekle başlayıp günümüzün sıkça kullanılan RBL sistemlerine uzanan teker teker engelleme metodudur [13].

İlk metoda göre SPAM dağıtımına aracılık eden IP adreslerinin engellenmesi yoluyla SPAM gönderiminin önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Bu metodun avantajı gönderi-

len mesajın içeriğinden bağımsız olarak doğrudan mesajın kaynaklandığı noktaya göre filtreleme yapması sebebiyle içerik üzerinde yapılacak düzenlemeler yoluyla atlatılmasının mümkün olmamasıdır. Buna karşılık SPAM gönderiminde kullanılan sistemleri tespit etmenin zorluğu ve SPAM göndericilerinin çeşitli anonimleştirici sistemler üzerinden bağlantılarını gerçekleştirmeleri sebebiyle engelleme listelerinin yeterince hızlı bir biçimde güncellenmesi mümkün olmamaktadır.

İkinci yöntem olan içerik filtreleme yöntemi ilk olarak e-postaların belirli anahtar kelimeleri içerip içermemesine göre filtrelenmesine dayanır. Kelimelerin teker teker filtrelenmesinin gelen mesajların çokluğu ve çeşitliliği karşısında yetersiz kalmasının yanında bu sistemin normal e-postaları da SPAM olarak tanımlayarak yaptığı hatalı tespitlerin çokluğu sebebiyle mesajları statik kriterler yerine istatistiksel yöntemler kullanarak filtreleyen sistemler geliştirilmiştir. İstatistiksel içerik filtreleme sistemleri, e-posta mesajlarını tek bir kelime yerine içindeki kelimeler arasında tespit edilen istatistiksel bağlantılar yardımıyla sınıflandırır. Günümüzde modern SPAM filtreleme sistemleri bu yöntemleri teker teker uygulamak yerine bu sistemleri birlikte uyarlamakta ve e-posta hakkında nihai kararlarını vermeden önce bu sistemlerden gelen sonuçları değerlendirerek bir karar vermektedirler. Bu sayede sistemlerin tek başlarına ortaya çıkan eksikliklerini gidermek mümkün olmaktadır.

3.6. SPAM Filtrelerine Takılan Noktalar (Points Attached to SPAM Filters)

Format (Format): Tüm yazının büyük harf olması – parlak renkler kullanılması – gereğinden fazla ünlem kullanılması

İçerik (Content): “Para Almak”tan söz eden, geri ödeme, az ödeyin, daha az ödeyin, paranız iade vb. içerikler

Kod (Code): Özensiz yazılmış kodlar, fazla kullanılmış taglar, özellikle Word’den üretilmiş HTML kodları

Görseller ve İmajlar (Visuals and Images): Fazla ve sadece görsel kullanımı – İçerikte Yazı & Görsel dengesi olmaması. Kullanılan veri setinde bu tür noktaları tespit eden alanlar mevcuttur.

3.7. SPAM Filtrelerinin Kontrol Ettiği Alanlar (Spam Filter Controlled Areas)

Konu (Topic): SPAM filtreleri için anahtar konu ilişki ve ilgidir.

To Alanı (To Area): SPAM Filtreleri, gönderim yapılan alıcı ile tanınıp tanınmadığını kontrol eder. Örneğin, “...@...com” şeklindeki bir adrese mail atılmasından sonra <İsim Soyisim> şeklinde, isimlere gönderim yapılması SPAM filtreleri için olumlu bir puanlamadır.

İçerik (Content): İçerikte tanıtmaya yazılarına, şirket hakkında bilgi içeriklerine yer gönderilen maillerde yakınlık fark edileceğinden olumlu bir puanlama sağlar. Ayrıca

içerik temiz, dengeli, SPAM kelimelerden ve noktalama işaretlerinden uzak olmalıdır.

IP Adresi (IP Address): SPAM filtreleri, gönderici IP’sinin kara listedeki IP alanlarından olup olmadığına dair kontrol yapar.

Kimden (From): Alıcılarla tanışmak önemlidir. SPAM Filtreleri, gönderen ve alıcının adres defterlerinde tanımlı olup olmadığını kontrol eder. Doğrulanmış domainler yerine Google, Yahoo gibi ücretsiz anonim domainlerin kullanılması SPAM oranını artırır.

Domain–Alan Adı (Domain Name) : SPAM gönderenler genellikle fake–sahte hesap kullanıyorlar ve Kimlik Denetleme– Authentication yapmadan gönderim yapar [13,14].

4. GELİŞTİRİLEN UZMAN SİSTEMİN YAPISI VE UYGULANMASI (STRUCTURE AND IMPLEMENTATION OF DEVELOPED EXPERT SYSTEM)

Bu çalışmada, SPAM filtrelemek için bir uzman sistem tasarlanmıştır. Çalışma SPAM filtreleme yazılımlarından içerik filtreleme yöntemine bir örnek olacak niteliktedir. Bu yöntemle, e-posta içerisinde kelimeler aranarak bu kelimelerin SPAM olup olmadığına karar verilmektedir.

4.1. Veri Seti (Data Set)

Veri kümesi, UCI makine öğrenmesi [9] veri tabanından alınmıştır. Veri kümesi Hewlett-Packard laboratuvarından elde edilen 4601 elektronik postadan oluşmaktadır. E-postalardan 57 özellik elde edilmiştir. İlk 48 özellik elektronik mesajlardan elde edilen kelimelerin frekanslarını göstermektedir. Bununla birlikte 49-54 arasındaki 6 özellik ise elektronik mesajlarda geçen ‘;’, ‘(’, ‘[’, ‘!’, ‘\\$', ve ‘\#’ gibi karakterlerin frekanslarını göstermektedir. 55-57 arasındaki özellikler ise, büyük harflerle yazılmış kelimelerin “toplam harf sayısı”, “ortalama harf sayısı” ve “en uzun kelimenin harf sayısı”ni belirtmektedir. 58. özellik ise elektronik postanın SPAM olup olmadığını belirtmektedir.

Veri setindeki 4601 e-postanın 1813 (%39.4) adedi SPAM, 2788 (%60.6%) adedi ise SPAM değildir. E-posta girişlerinde kullanılan kelime örnekleri: ‘free’, ‘credit’, ‘business’ (genellikle SPAM e-postalarda kullanılan) ve ‘project’, ‘meeting’, ‘George’, ‘hp’ (genellikle SPAM olmayan e-postalarda bulunan).

Elektronik mesajlardan alınan kelime ve karakterler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Veri setinde kullanılan özellikler (Features used in dataset)

1-make	10-mail	19-you	28-650	37-1999	46-edu
2-address	11-receive	20-credit	29-lab	38-parts	47-table
3-all	12-will	21-your	30-labs	39-pm	48-conference
4-3d	13-people	22-font	31-telnet	40-direct	49-;
5-our	14-report	23-0	32-857	41-cs	50-(
6-over	15-adresses	24-money	33-data	42-meeting	51-[
7-remove	16-free	25-hp	34-415	43-original	52-!
8-internet	17-business	26-hpl	35-85	44-project	53-\$
9-order	18-email	27-george	36-tecnology	45-re	54-#

4.2. Veri Setinin Azaltılması (Data Set Reduction)

Veri seti incelendiğinde bazı giriş özelliklerin gereksiz ve yüksek varyansa sahip olmadığı görülmüştür. Bu durum, ayırt etme işleminde (tespit etme sürecinde) zorluk çıkaracaktır. Bu yüzden bazı özelliklerin değerlendirilmesine gerek kalmamıştır. Dolayısıyla, veri setinde gelen özelliklerden make, adress, all, 3d, our, internet, mail, people, report, adresses, business, e-mail, font, (, [, # gibi özellikler uzman sistem için belirleyici özellik taşımadığından dikkate alınmamıştır. Ancak gerektiğinde yeni kurallar için seçilebileceklerdir.

Bazı giriş özellikleri SPAM e-postalar için yüksek değerler içermektedir. Örneğin, büyük harf içeren kelime sayısı ve “!” işareti gibi alanlar. Bu alanlar SPAM e-posta belirlemek için kullanılabilir.

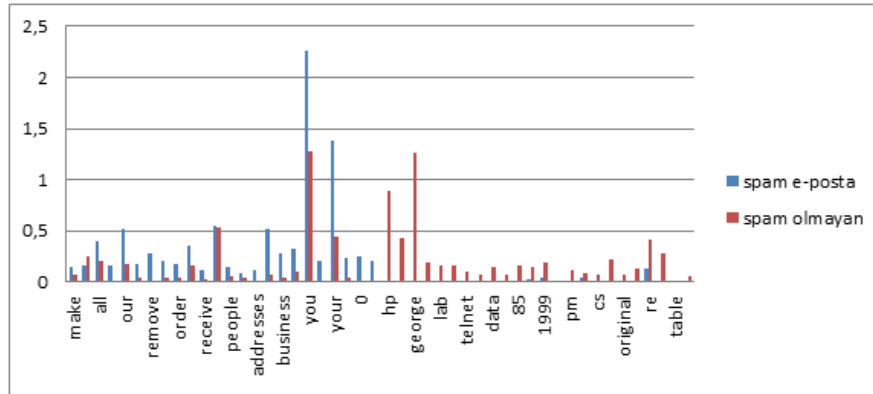
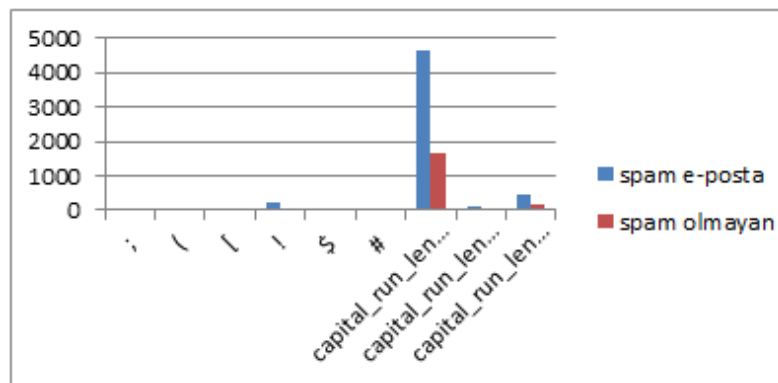
Aynı şekilde conference, George, you, 650 alanları kişisel veri içerdiğinden bunlar da SPAM olmayan e-postaların belirlenmesinde kullanılabilir.

Şekil 2’de SPAM olmayan e-postaların seçici nitelikleri gösterilmiştir. Şekil 3’de ise SPAM olan e-postaların seçici nitelikleri gösterilmiştir. Her iki grafikte uzman sistem tasarımında daha önce sayılan öz niteliklerin neden elendiği açıkça görülmektedir.

4.3. Kullanıcı Arabirimi (User Interface)

Kullanıcı arabirimi kullanıcı ile program arasında iletişimi sağlar. Kullanıcı, bu arabirim sayesinde bilgi tabanını kontrol etme, veritabanındaki özellikleri seçme, kuralları ekleme, çıkarma gibi işlemleri gerçekleştirebilir.

Geliştirilen uzman sistemin kullanıcı arabiriminin Ana Ekranı Şekil 4’de gösterilmektedir. Kullanıcı bu arayüzü

**Şekil 2.** SPAM olmayan e-postaların seçici özellikleri (Optional features of non-SPAM emails)**Şekil 3.** SPAM e-postaların özellikleri (SPAM email features)

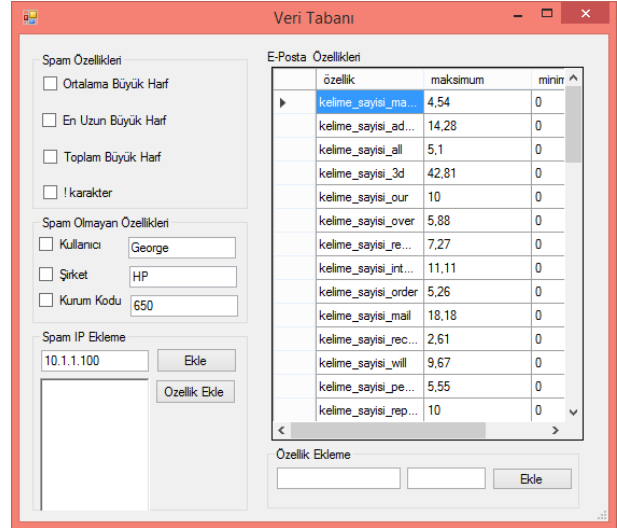
kullanarak SPAM filtrelemede kullanılacak IP'ler ve özellikleri seçeceği "Veri Tabanı" bölümü ile kurallar ekleyebileceği "Kural Tabanı"na erişebilir. SPAM filtrelemede kullanacağı özellikler ile kurallar seçildikten sonra "Analize Başla" düğmesine basılarak sistem tarafından e-postaların SPAM olup olmadığına karar verilir.

4.3. Kullanıcı Arabirimi (User Interface)

Kullanıcı arabirimi kullanıcı ile program arasında iletişimi sağlar. Kullanıcı, bu arabirim sayesinde bilgi tabanını kontrol etme, veritabanındaki özellikleri seçme, kuralları ekleme, çıkarma gibi işlemleri gerçekleştirebilir.

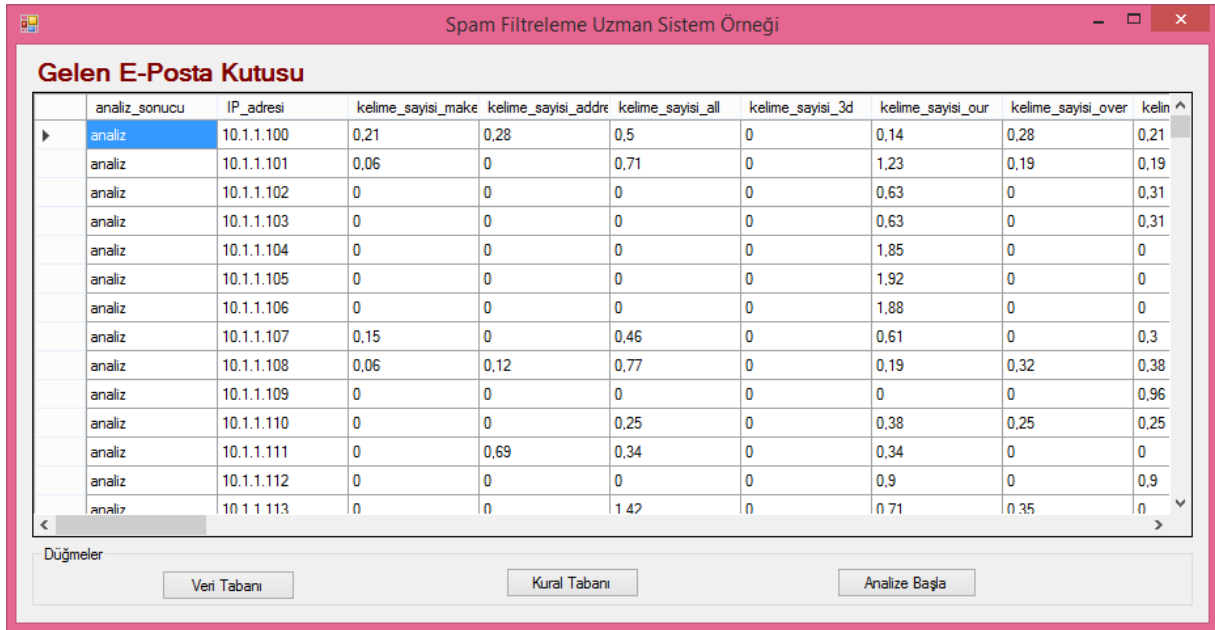
Geliştirilen uzman sistemin kullanıcı arabiriminin Ana Ekranı Şekil 4'de gösterilmektedir. Kullanıcı bu arayüzü kullanarak SPAM filtrelemede kullanılacak IP'ler ve özellikleri seçeceği "Veri Tabanı" bölümü ile kurallar ekleyebileceği "Kural Tabanı"na erişebilir. SPAM filtrelemede kullanacağı özellikler ile kurallar seçildikten sonra "Analize Başla" düğmesine basılarak sistem tarafından e-postaların SPAM olup olmadığına karar verilir.

4.4. Bilgi Tabanı (Konwledge Base)



Şekil 5. Veri tabanı ekranı (Database screen)

Bu bölümdeki özellikler SPAM e-postalarda bulunan tipik kelimelerin e-posta metninin içerisinde geçme oranına göre belirlenmiştir.

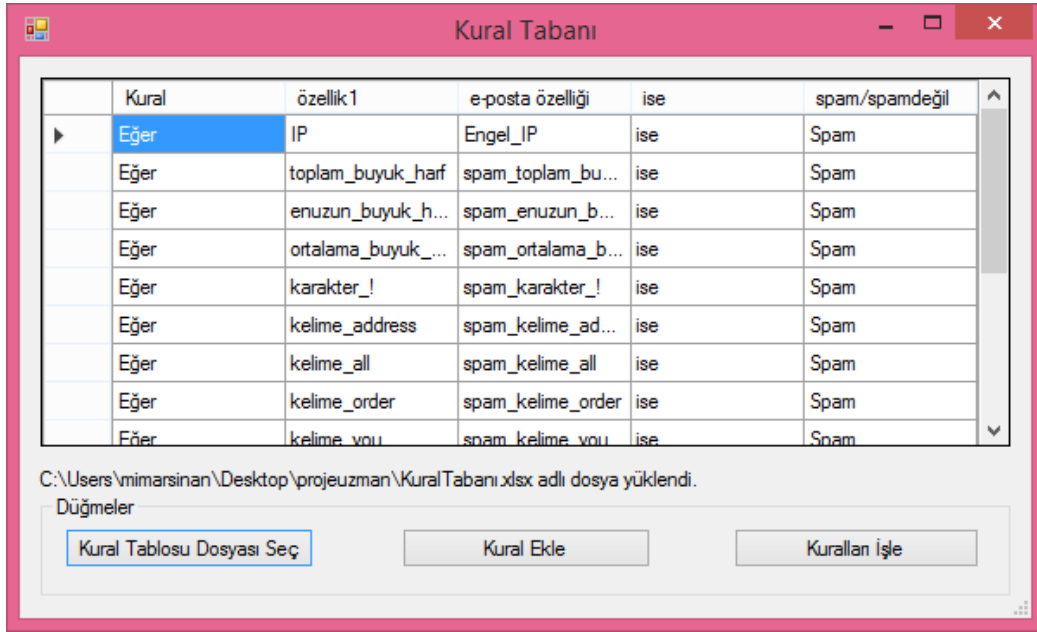


Şekil 4. Geliştirilen uzman sistemin ana ekranı (Main screen of developed expert system)

Bilgi tabanı, problem hakkında ön bilgilerin bulunduğu 'veritabanı' ve uzman bilgisinin aktarıldığı 'kural tabanı'ndan oluşmaktadır. Yapılan çalışmada kullanıcı programın Şekil 5'te yer alan "Veri Tabanı" bölümünde e-postalarda özellik seçimi ile engellenmesini istediği e-posta IP adreslerini ekleme işlemini yapabilmektedir. Ayrıca kullanıcı isterse, "E-posta Özellikler" tablosundan özellik silebilir veya yeni özellik ekleyebilir. Böylece, bilgi tabanı güncellenerek kullanıcıya kendi seçimine göre gelen e-postaların SPAM olup olmadığına karar verilmesi sağlanmaktadır.

Kullanıcı, Şekil 6'da gösterilen Kural Tabanında e-postaların SPAM olup olmadığına karar veren kuralları seçme, silme, ekleme işlemlerini yapabilmektedir.

Kural Tabanında özelliklere göre oluşturulmuş 57 kural yer almaktadır. Kullanıcı "Kural İşle" düğmesine bastığında Veri Tabanı bölümünde seçilen özellikleri içeren kurallar aktif olacaktır. Bu durumu göstermek için program seçilen kuralları kırmızıya boyanmakta ve bir mesaj kutusuyla kullanıcıya bilgi verilmektedir. Sistemde kural tabanı, "eğer-ise" yapısında oluşturulmuştur.



Şekil 6. Kural tabanı ekranı (Rule base screen)

4.5. Çıkarım Mekanizması (Inference Mechanism)

Çıkarım mekanizması, kurallar tabanındaki kuralları kullanarak anlamlı çıkarımların yapıldığı birimdir. Çıkarım mekanizması bilgi tabanındaki verileri ve kuralları kulla-

şartlarını belirlemeyi temel alan ileri zincirleme metodu kullanılmıştır.

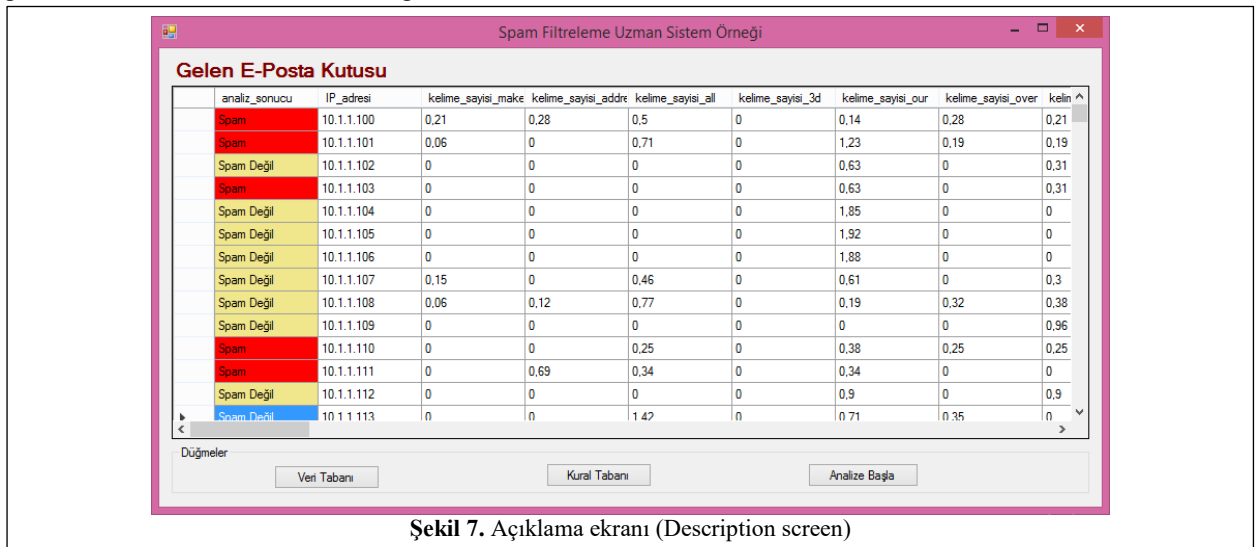
4.6. Açıklama Ünitesi (Description Unit)

Açıklama ünitesi, elde edilen sonuçların kullanıcılar ile-

Kural	Özellik	E-posta Özelliği	Sonuç	SPAM/SPAM Değil
Eğer	IP	Engel_IP	İse	SPAM
	toplam_buyuk_harf	SPAM_toplam_buyuk_harf		SPAM
	enuzun_buyuk_harf	SPAM_enuzun_buyuk_harf		SPAM
	ortalama_buyuk_harf	SPAM_ortalama_buyuk_harf		SPAM
	karakter_!	SPAM_karakter_!		SPAM
	kelime_address	SPAM_kelime_address		SPAM

arak elde ettiği bu çıkarımları kullanıcıya aktarır [14]. Geliştirilen yazılımında çıkarım mekanizması kuralları yorumlamada, Çizelge 2'de gösterilen kurallar kullanıcının veri tabanından seçtiği özelliklerden başlayarak uygun kuralın bulunması durumunda ilgili kuralın mevcut

tilmek üzere uzman sistem tarafından raporlandığı bölümdür. Raporun doğruluğu geri bildirim için önemlidir [15]. Uygulamada açıklama bölümü, her bir e-postanın belirlenen kurallarla değerlendirilerek Şekil



Şekil 7. Açıklama ekranı (Description screen)

7’de gösterildiği gibi açıklama bölümünde yazı ile e-postanın SPAM olduğunu kırmızı renkte, SPAM olmadığını sarı renkte kullanıcıya geri dönüş yapmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Gündelik yaşantımızın bir parçası haline gelen elektronik posta trafiğinin büyük bir kısmını oluşturan SPAM elektronik postaları hem kullanıcılar için hem de internet trafiği için önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu sorundan kurtulmak için kullanıcılar filtreleme yazılımları kullanmaktadır.

Bu çalışmada SPAM filtrelemesi için hem içeriğe göre hem de IP adreslerine göre filtreleme yapan bir uzman sistem tasarlanmıştır. SPAM’lar çok çeşitli olduğundan giriş özellikleri buna göre belirlenmelidir. Kullanıcı kendine uygun filtreleme seçenekleri ile gelen e-postaların SPAM olup olmadığını belirleyebilmektedir.

Çalışmada, daha önce farklı metotlar kullanılarak gerçekleştirilen SPAM filtreleme faaliyeti uzman sistemler tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece hem bu faaliyetler daha hızlı ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmekte hem de harcanacak iş gücü azalmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kaya, Y., Yeşilova, A., & Tekin, R., “İstenmeyen Elektronik Postaların (Spam) Filtrelenmesinde Kaba Küme Yaklaşımının Kullanılması”, *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu* (FEEB 2011), Elazığ, 148-153, (2011).
- [2] Sivanadyan, T., “Detecting Spam emails using neural networks”, www.cae.wisc.edu/~ece539/project/f03/sivanadyan.pdf (Erişim Tarihi: 12.04.2016)
- [3] Gündüz, H. C., “Spam 2.0, Tespit ve Engelleme Yöntemleri”. *Akademik Bilişim 07*, Kütahya, 677-683, (2007).
- [4] Nabiyev, V. V., “Yapay zeka: problemler-yöntemler-algoritmalar”. *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, (2005).
- [5] A. Doğaç, “Uzman Sistemler”, *Elektronik Mühendisliği Dergisi*, 373: 87-91, (1990).
- [6] Üstkan, S., “Uzman Sistemler-Genel”, *Sakarya Üniversitesi*, (2007).
- [7] Baykal, N., & Beyan, T., “Bulanık mantık: uzman sistemler ve denetleyiciler”, *Bıçaklar Kitabevi*, Ankara, (2004).
- [8] Bilişim Teknolojileri., “İnternet ve E-Posta Yönetimi”, *MEB*, Ankara, (2011).
- [9] İnternet: http://yunus.hacettepe.edu.tr/~sadi/dersler/e-posta_kurallar.html. (Erişim Tarihi: 15.05.2016)
- [10] İnternet: <https://tr.wikipedia.org/wiki/E-posta>, (Erişim Tarihi: 15.05.2016)
- [11] İnternet: <https://seminer.linux.org.tr/seminer%adnotlari/spamiltreleme.sxi>, (Erişim Tarihi: 15.05.2016)
- [12] Şahinaslan, Ö., Borandağ, E., Can, E., Şahinaslan, E., “Posta Sunucularında Spam Önleme Teknikleri”, *Akademik Bilişim '09*, Şanlıurfa, 737-743, (2009).
- [13] Yüksel, M. E., Odabaşı, Ş. D., “SMTP Protokolü ve Spam Mail Problemi”, *Akademik Bilişim 2010*, Muğla, (2010).
- [14] Erkalın, M., Calp, M. H., Şahin, İ., “Çoklu Zekâ Kuramından Yararlanılarak Meslek Seçiminde Kullanılacak Bir Uzman Sistem Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi”, *International Journal of Informatics Technologies*, 5 (2): 49-55, (2012).
- [15] Şahin, İ., Calp, M. H., Akça, Ö., “Kredibilitè Notu Değerlendirmeye Yönelik Bir Uzman Sistem Yaklaşımı”. *Politeknik Dergisi*, 14 (1): 79-83, (2011).

Mekanik Titreşimin Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkileri

Hasan HASIRCI*

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Teknikokullar, Ankara/TURKİYE.

(Geliş/Received : 02.06.2016 ; Kabul/Accepted : 29.09.2016)

ÖZ

Bu çalışmada Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (KGDD) mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine mekanik titreşimin etkileri incelenmiştir. Dökümler geleneksel yaş kum kalıpta yapılmıştır. Bu çalışmada, ferritik KGDD (GGG 40) malzeme kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, titreşim uygulamasıyla KGDD malzemesinin mikro yapısı ve mekanik özelliklerinde değişimlerin meydana geldiğini göstermiştir. Sonuçlara bakıldığında, tane ve grafit küre boyutlarındaki küçülmeye bağlı olarak KGDD'in mekanik özellikleri gelişmiştir.

Anahtar Kelimeler: KGDD, Mikroyapı, Mekanik Özellikler, Mekanik Titreşim, Küre Sayısı, Tane Boyutu.

Effects of Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Cast Iron of Mechanical Vibration

ABSTRACT

In this study, effects of mechanical vibration on the microstructure and mechanical properties of the Ductile Iron (DI) were investigated. Castings were made in a conventional green sand mold. In this study ferritic ductile iron (GGG 40) material is used. Results of the study showed that changes on microstructure and mechanical properties of the ductile iron materials occurred with vibration. Looking at the results, mechanical properties of ductile iron are developed depending on the reduction in grain and graphite nodule size.

Keywords: Ductile Iron (DI), Microstructure, Mechanical Properties, Mechanical Vibration, Nodule Count, Grain Size.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dökme demirlerin bir sınıfı olan Küresel Grafitli Dökme Demirler (KGDD), mekanik özellikler yönünden diğer dökme demir malzemelerle karşılaştırıldığında daha üstün mekanik özelliklere sahip bulunmaktadır. Bu üstün mekanik özelliklerin elde edilebilmesinde KGDD'e ilave edilen alaşım elementlerinin tür ve miktarları; sementit oluşumu, grafit küreselleşmesi ve dağılımı ile matris yapı türünü belirlediği için büyük önem taşımaktadır. KGDD'lerde küre sayısının iyi mekanik özelliklerin elde edilmesi açısından mümkün olduğu kadar yüksek sayıda (150-250 küre/mm²) olması istenmektedir [1-8].

Bu nedenle uygun sıcaklıkta, yeterli miktarda küreleştirici (Mg, Ce) ve küreleşmeyi destekleyecek malzeme (Na, Ca) kullanımı gerekmektedir [1,3,6,8]. Sıvı metalin kükürt oranı, karbon eşdeğerliği (KE), diğer malzeme ve proses değişkenleri küreleşme oranına etki etmektedir. Matris yapı içinde iyi küreleşmiş ve üniform dağılmış grafit küre yapısı istenmektedir [1-9]. Düşük küre sayısı, küresel olmayan grafit şekli, üniform olmayan küre dağılımı ve hacmi KGDD'in mekanik özellikleri üzerinde zararlı bir etkiye sahip olmaktadır [1-

7]. Mikro yapı ve mekanik özellikler ilave edilen alaşım elementlerinden (Cu, Ni, Ti, Mn, vb.) etkilendikleri gibi, aynı zamanda döküm işlemlerinin yapısındaki etkenlerden de etkilenmektedir. Bu etkenler; basınç, soğuma hızı, döküm sıcaklığı, vakum, titreşim vb. işlemler olarak sayılabilir. Bu etkenlerin tümü KGDD malzemelerin mikro yapısını etkilemekte ve dolayısıyla mekanik özellikler de etkilenmektedir. İfade edilen bu etkenler döküm yöntemlerinden bağımsız ya da bağımlı olarak değişim gösterebilir [1-19]. Titreşim düşük genliğe ve sık aralıklı bir sürekliliğe sahip olması gereken bir etkidir. Yüksek genlik ve geniş aralıkla uygulandığında olumsuz (çalkantı oluşumu, gaz (hava) boşluğu oluşumu, kalıpta bozulmalar, vb.) etkileri olmaktadır. Belirtilen uygun şartlarda titreşim uygulandığında tane inceltme ve modifikasyon etkilerine benzer sonuçların elde edilebileceği görülmektedir. Bu yöntem aynı zamanda tüm döküm yöntemlerinde uygulanabilen basit ve ekonomik bir işlemdir. Ancak etkileri bakımından büyük yararlar sağlanabilmektedir [19-34]. Titreşim uygulaması sonucunda özellikle tane ve faz boyutları küçülmekte, sıvı metal içerisindeki çözünmüş haldeki gazlar toparlanma etkisiyle atılabilmekte, sıvı metal akıcılığı iyileşmekte, kalıp-metal ara yüzeyinde meydana gelen ayrışma nedeniyle ısı

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: hasirci@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 275-282

transferindeki yavaşlama nispeten azaltılabilmektedir. Görüleceği üzere tüm bunlar döküm parçaların katılaşma hızları ve kaliteleri üzerine olumlu etkileri olan durumlardır [1-23]. Literatür incelemelerinden özellikle KGDD'lerin yapı ve özelliklerine mekanik titreşimin etkilerinin incelenmesi konusunda çalışma bulunmadığı görülmektedir. Kum kalıba döküm yöntemi KGDD malzemelerinin üretiminde en çok kullanılan yöntemdir. Bu nedenle bu konuda araştırma yapılması ve elde edilecek sonuçların olabildiğince yaygınlaştırılması daha gelişmiş KGDD malzeme üretilmesi açısından önemli görülmektedir.

Tüm bunlardan hareketle bu çalışma; KGDD malzemelerin yaş kum kalıba dökülmesi sırasında uygulanan mekanik titreşimin geleneksel yerçekimi etkisiyle elde edilen yapı ve mekanik özelliklere göre sağlanacak avantajların incelenmesi amacıyla yapılmıştır.

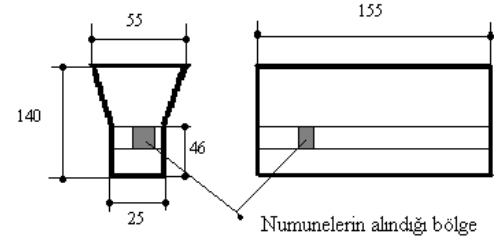
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Dökümün yapıldığı kalıp tasarımı TS EN 1563'de belirtilen Y-bloklardan Y2 [8] tipine göre hazırlanmıştır (Şekil 1). Ergitme işlemi 500 Kg kapasiteli ergitme tipi indüksiyon ocağı kullanılarak yapılmıştır. İndüksiyon ocağına şarj girdisi olarak; sfero piki (külçe şeklinde), KGDD hurdası ve bir miktar çelik hurdası kullanılmıştır. Ergitilmiş metal, döküm sıcaklığına ulaştıktan sonra (1450 °C) aşılama ve küreleştirme işlemleri yapılmıştır. Küreleştirme işlemi Tundish tipi işlem potasında gerçekleştirilmiştir. Küreleştirme işleminde FeSiMg malzemesi kullanılmıştır. Aşılama işlemi ise standart FeSi malzemesi ile yapılmıştır. İşlem potasından alınan ergimiş metal; yaş kum kalıplara küreleştirici etkinliğinin geçmeyeceği bir süre içerisinde (1-3 dakika) Şekil 2'de verilen yaş kum kalıplara yerçekimi etkisi ve 2 farklı mekanik titreşim (50 ve 100 Hz) değerinde dökülerek oda sıcaklığına soğumaya bırakılmıştır. Titreşim uygulaması dökümden önce başlatılmış ve katılaşmanın ardından malzeme tamamen soğuyana kadar devam edilmiştir. Titreşim uygulaması döküm yapılacak kalıbın üzerine bağlandığı her bağlantı noktası yayla desteklenmiş plakanın altına bağlı olan pinömatik bir motor ile gerçekleştirilmiştir.

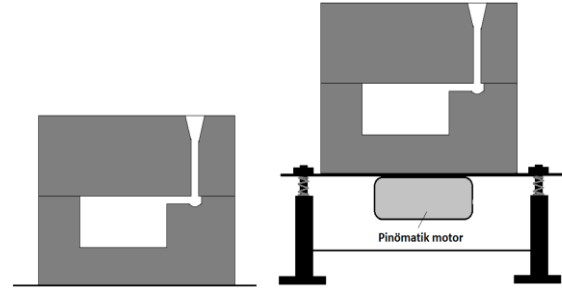
Numunelerin dökümü sırasında kimyasal bileşimin tespiti için ayrıca spektral analiz numuneleri dökülmüş ve numunelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de verilmiştir. Grafit kürelerinin miktarı, küreleşme derecesi ve dağılımı ile ilgili metalografik ölçümler ve testler Şekil 1'de gösterilen bölgeden alınan numuneler üzerinde yapılmıştır. Metalografik incelemeler standart polisaj işleminin tamamlanmasından sonra yapılmıştır. Birim alandaki grafit küre sayımı, dağlanmamış numune yüzeyinde x100 büyütmede görülen grafit küreleri 15 ayrı bölgeden yapılan Image-J yazılımı kullanılarak % 2 nital ile dağlanmış numune yüzeyinden yine mikroskop monitörü üzerinde 15 ayrı bölgeden alınan ölçümlerle belirlenmiştir. Metalografik inceleme için hazırlanan

numunelerin yüzeylerinden HV5 türünden sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için 6 tekrar yapılmış ve bunların ortalaması sonuç olarak verilmiştir.

Y-bloklardan üretilen çubuklar daha sonra TS 138 EN 10002-1 standardına uygun olarak hazırlanan ve Şekil 3'te verilen çekme deney çubukları Dartec 1200 bilgisayar kontrollü numune test cihazında çekme deneyine tabi tutularak bunların çekme dayanımı ve % uzama değerleri belirlenmiştir. Her bir numune için 3 tekrar yapılmış ve bunların ortalaması sonuç olarak verilmiştir.



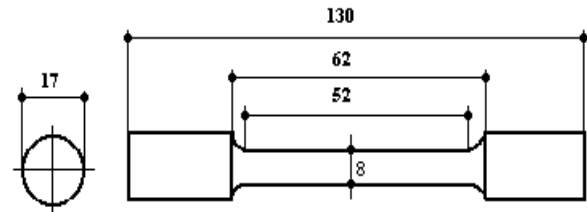
Şekil 1. Döküm numunelerin üretiminde kullanılan standart Y-blok (Standard Y-block used in the production of casting samples)



Şekil 2. Geleneksel ve mekanik titreşim döküm sistemlerinin şematik gösterimi (Schematic representation of the traditional and mechanical vibration casting systems)

Çizelge 1. Bu çalışma için üretilen KGDD numunelerinin kimyasal bileşimleri (The chemical composition of the produced ductile iron samples for this study)

% C	% Si	% Mn	% P	% S
3.5	2.86	0.46	0.033	0.02



Şekil 3. Standart çekme deneyi numunesi (Standard tensile test specimen)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Makro ve Mikro Yapısal Değişimler (Changes of Macro and Micro Structural)

Uygulanan mekanik titreşimin KGDD malzemelerin yapısal özelliklerine etkilerinin değerlendirilebilmesi amacıyla dağlama yapılmadan ve dağlama yapılarak mikroskop altında görüntüleri alınmıştır. Dağlanmamış haldeki görüntüler Şekil 4'de ve dağlanmış haldeki görüntüler ise Şekil 5'te verilmiştir. Ayrıca makro ve mikro yapısal sayısal veriler de Çizelge 3 ve Şekil 6'da verilmektedir.

Şekil 4'de verilen küre sayısının ve boyutlarının kolaylıkla ayırt edilebildiği görüntüler incelendiğinde; titreşim uygulaması sonucunda küre sayısının arttığı, küre boyutlarının ise küçüldüğü görülmektedir. Yapılan ölçümler neticesinde titreşimsiz döküm numunedeki küre sayısının 207 küre/mm² olduğu, 50 Hz titreşim uygulanmasıyla birlikte % 7,8 oranında arttığı ve titreşim miktarının 100 Hz çıkmasıyla birlikte ise % 18,4 oranında artmıştır. Bunun tersine küre boyutunun ise titreşimsiz döküm numunedeki 15 µm olan küre boyutunun 50 Hz titreşim uygulanmasıyla birlikte yaklaşık % 15,7 oranında azaldığı ve titreşim miktarının 100 Hz çıkmasıyla birlikte ise yaklaşık olarak % 24,7 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Kısacası titreşim uygulaması küre sayısını artırırken, boyutunu ise azaltmaktadır.

Ayrıca tane boyutu ve sayısı incelendiğinde de benzer karakterli durumların meydana geldiği görülmektedir. Titreşim uygulaması sonucunda tane sayısı artmış ve buna bağlı olarak tane boyutu ise küçülmüştür. Titreşimsiz döküm sonucunda mm²'de ortalama 35 adet tane meydana gelirken, 50 Hz titreşim sonucunda yaklaşık % 8.6 ve 100 Hz titreşim sonucunda ise yaklaşık % 20 oranında tane sayısı artmıştır. Diğer yandan titreşimsiz dökümde ortalama 65 µm olan tane boyutu 50 Hz titreşim sonucunda yaklaşık % 10 ve 100 Hz titreşim sonucunda ise yaklaşık % 22.6 oranında azalmıştır.

Bu sonuçların meydana gelmesinin çeşitli sebepleri bulunmaktadır. Bunlar; aşılama ve heterojen çekirdeklenme etkinliğinin artması, dentritik katılaşmanın engellenerek eşeksenel katılaşmanın teşvik edilmesi, katılaşma hızının artması, katılaşma başlangıç sıcaklığının düşmesi gibi etkenler olarak sayılabilir. Bu çalışmada da yapılan incelemelerden benzer etkenlerin varlığı görülmektedir. Küre sayısının artması ve boyutunun küçülmesi (Şekil 4, Çizelge 3 ve Şekil 6) çekirdeklenmenin artması ve dolayısıyla katılaşmanın hızlanmasının bir sonucu olduğu bir gerçektir. Aynı şekilde bu katılaşma hızı tane sayısında artışa ve boyutlarında ise küçülmeye neden olmuştur (Şekil 5, Çizelge 3 ve Şekil 6). Çünkü katılaşma süresinin kestiriminin yapıldığı Chvorinov bağıntısına [1] bakıldığında katılaşma hızının artması yada hızlı katılaşma sonucunda daha çok sayıda ve küçük boyutlu küre ve tanelerin meydana geldiği bilinmektedir. Bu çalışma sonuçlarından da titreşim uygulamasına bağlı

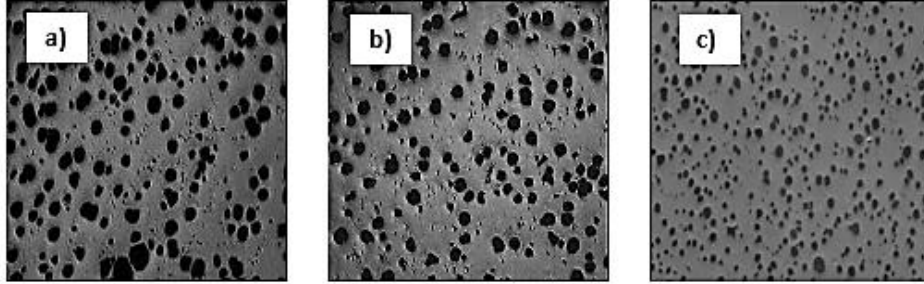
olarak küçük tane ve kürelerin meydana gelmiş olması bunu doğrulamaktadır. Titreşim uygulaması heterojen katılaşma şartlarını güçlendirmekte, neo ötektik katılaşmayı teşvik ederek grafit ve tane sayısının artmasına yol açmakta, kalıp-metal arayüzey temasını artırarak kısmen ısı transferini hızlandırmakta ve böylece ifade edilen yapısal değişimler meydana gelmektedir. KGDD malzemelerde katılaşma şöyle gelişmektedir. KGDD'in katılaşması ve/veya soğumasının denge şartları altında gerçekleştiği kabul edilir. KGDD'ler ötektik altı ve ötektik üstü bileşime sahip olmasına göre katılaşma mekanizmalarında farklılık meydana gelmektedir. Ötektik altı bileşime sahip KGDD'de katılaşma, primer östenit dentritlerinin oluşumuyla başlarken, ötektik üstü bileşime sahip olanda ise küre şekilli grafit fazının oluşuyla başlamaktadır. Ötektik üstü demirde (% C veya KE = % 4.5) ilk kristalleşen katı, grafit fazıdır. Bu grafit partikülleri sıcaklık ötektik noktasına ulaşıncaya kadar sıvı demirin karbon atomlarının tükenmesiyle büyürler. Karbonu azalan bölgelerde östenit çekirdeklenir ve sonuç olarak östenit kabukları grafit kürelerinin etrafını çevirir. Ötektik katılaşma sırasında yalnızca östenit sıvıyla temas halindedir ve kürenin büyümesi için kontrol mekanizması katı östenitin kabuğu boyunca karbon atomlarının difüzyonudur. Bu tür katılaşma "neoötektik katılaşma" olarak isimlendirilir ve her bir grafit küresi ve östenit kabuğu bir ötektik hücre olarak kabul edilir. Neoötektik büyümesi başladıktan sonra, başka küresel grafit çekirdeklenmesi olmaz, dolayısıyla grafit kürelerinin sayısı katılaşmanın başlangıcında belirlenmiş olur. Ötektoid sıcaklığa kadar mevcut grafit çökmesi meydana gelir [1, 15-23].

Östenit, katı hal dönüşümü ile birlikte metalin kompozisyonuna ve sıcaklığa bağlı olarak ferrit+grafit veya ferrit+perlit+grafite dönüşebilir. Aynı zamanda sementit grafit ve ferrite ayrışabilir. Dengeli soğuma şartlarında ferrit, grafit partiküllerinin etrafında karbonca fakirleşmiş bir bölgenin meydana gelmesinden dolayı östenit/grafit arayüzeyinde çekirdeklenir; küreler östenitteki karbon çözünürlüğünün düşen sıcaklıkla birlikte düşmesiyle karbon çöktürücü rol oynarlar. Bu aşamada ferrit/östenit arayüzeyi, östenitin yüksek karbon içeriği nedeniyle perlit için tercih edilen çekirdeklenme bölgeleri haline gelir. Perlit teşvik edici elementler dönüşüm sıcaklığını düşürür ve ferrit oluşum hızını azaltır. Perlit, östenit/östenit sınırlarında veya östenit/grafit arayüzeyinde çekirdeklenir. İşte tüm bunlar katılaşma başlangıcında titreşimin etkisiyle bölgesel alt soğumanın azalması (katılaşmanın kısmen geciktirilmesi ya da neo ötektik katılaşmanın teşvik edilmesi) ve C segregasyonunun teşvik edilmesi neticesinde ortaya çok sayıda grafit fazının çekirdeklenmesi veya başka bir ifadeyle grafit çekirdeklenmesinin teşvik edilmesi sonucu küre sayısı artmaktadır gelir [1, 15-23]. Çekirdeklenmenin teşvik edilmesi KGDD yapısında tane sayısının da artmasına yol açmaktadır. Böylece sayı artarken hem tane hem de küre boyutu ise küçülmektedir. Aynı zamanda katılaşmanın hızlanması neticesinde grafit

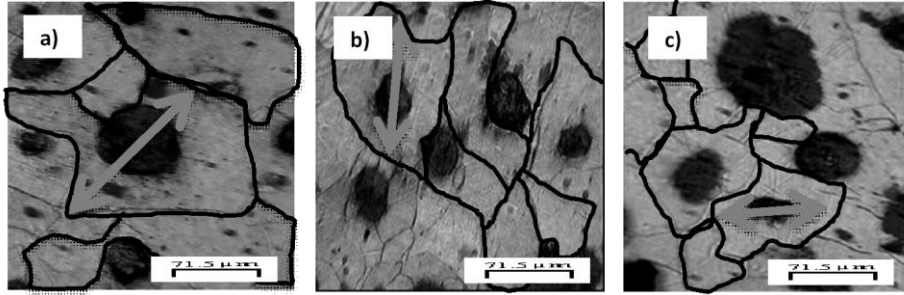
küresine uzak tane sınırlarında C yoğunlaşmasına bağlı olarak difüzyona zaman kalmadığından kısmen perlit oluşumu (Çizelge 3) da teşvik edilmekte ve bu fazın miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu oluşumlar az da olsa KGDD malzemelerin özelliklerini etkilemektedir.

çekme dayanımı, % uzama ve sertlik özelliklerinin geliştiği tespit edilmiştir.

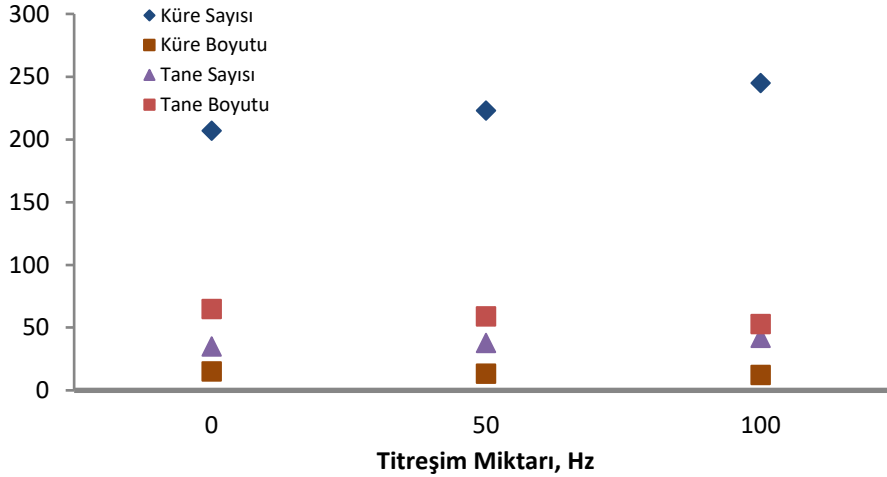
KGDD'lerde döküm kesit kalınlığı ve alaşım kompozisyonuna bağlı olarak dayanım, sertlik ve süneklik gibi mekanik özellikleri döküm durumu matris yapısındaki perlit ve ferrit oranlarına göre değişir.



Şekil 4. Titreşim miktarına bağlı olarak grafit küre yapısının değişimi, a) 0, b) 50 ve c) 100 Hz (Dağlamasız, X 100) (Change of structure of graphite nodule depending on vibration amount; a) 0, b) 50 and c) 100 Hz, non-etching, X 100)



Şekil 5. Titreşim miktarına bağlı olarak tane boyutlarındaki değişimler, a) 0, b) 50 ve c) 100 Hz (Dağlama % 2 Nital) (Changes of grain sizes depending on vibration amount; a) 0, b) 50 and c) 100 Hz, Etching: Nital 2%)



Şekil 6. Titreşim miktarına bağlı olarak makro ve mikro yapısal özelliklerin değişimi (Change of macro and micro structural properties depending on vibration amount)

3.2. Mekanik Özelliklerdeki Değişimler (Changes of Mechanical Properties)

KGDD malzemenin katılaşması sırasında titreşim uygulanmasının mekanik özelliklere etkileri incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 4 ile Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. Sonuçlar genel olarak incelendiğinde; küre ve tane sayısının artmasına bağlı olarak KGDD malzemenin

Alaşımız KGDD türlerinde östenit oda sıcaklığında kararlı değildir ve demirin diğer kristalografik şekli olan ferrite dönüşür. Ferrit hacim merkezli kübik (HMK) demirin çok düşük miktarda karbon ile oluşturduğu katı çözelti halidir ve yapıda serbest halde veya perlit bileşeni olarak bulunabilir. Ferrit oldukça yumuşak sünek ve kısmen dayanıklı bir yapı bileşenidir. Si gibi bazı alaşım elementleri ferritin sertliğini artırır. KGDD'ler de

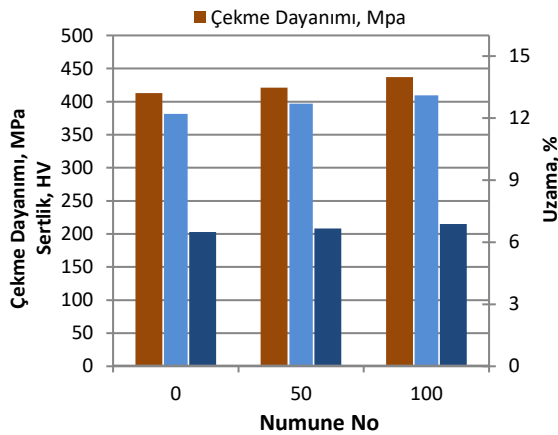
östenitin ferrite dönüşümü matrisin karbon içeriğini de değişikliğe uğratar. Çekirdeklenme sırasında östenitin karbon içeriği yüksek olmakta, ancak soğuma ile birlikte bu oran düşmektedir. Östenit-ferrit dönüşüm sıcaklığında östenitteki karbon çözünürlüğü, yaklaşık olarak % 0.55'dir. Ferrit çok az karbon çözer, dönüşüm esnasında karbon çevreye itilir/kusulur. Ferritin yapıda oluşumu bileşime, soğuma hızına ve grafit dağılımına bağlıdır. Matris yapısını oluşturan ferrit ve perlit hacim oranları soğuma hızına, alaşım elementleri içeriğine ve grafit miktarına göre değişmektedir. Segregasyonlar ve karbürleri en düşük düzeyde tutmak için şarj girdileri optimum düzeyde kontrol edilmelidir. Böylece nihai ürünün istenilen mekanik özelliklere sahip olması ve arzu edilmeyen bileşenlerin en düşük düzeyde kalması sağlanır gelir [1, 15-23].

KGDD'de grafitin gri dökme demirlerdeki keskin köşeli tabakalar (lamel grafit) yerine küreler şeklinde oluşması, gri dökme demire göre dayanımın 5-7 kat daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Grafit kürelerinin şekli mekanik özellikleri etkilemekte, bu nedenle de tam küresellikten uzaklaştıkça KGDD'nin mekanik özelliklerinde düşme meydana gelmektedir. Aynı zamanda grafit kürelerinin boyut ve dağılımının homojenliği de özellikleri etkilemektedir. Aşılama prosesi küre sayısını artırıcı etkiye sahiptir. Böylece karbür oluşumu önlenmesiyle yapıdaki ferrit oranı artırılarak sert ve kırılğan dökümlerin üretilmesi engellenmektedir [20-23].

Çizelge 4. Titreşim miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişimler (Changes of mechanical properties depending on vibration amount)

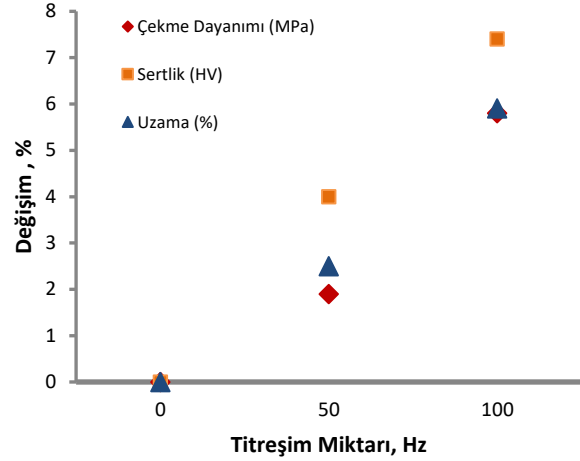
Titreşim Miktarı	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV5)
0 Hz	413 (B. D.)	12.2 (B. D.)	203 (B. D.)
50 Hz	421 (↑% 1.9)	12.7 (↑% 4)	208 (↑% 2.5)
100 Hz	437 (↑% 5.8)	13.1 (↑% 7.4)	215 (↑% 5.9)

(B.D.): Başlangıç değeri



Şekil 7. Titreşim miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişimler (Changes of mechanical properties depending on vibration amount)

Genellikle optimum mekanik özelliklerin elde edilmesi için % 90'dan fazla küreselleşme istenir. Bu oran malzemenin kullanılacağı çalışma şartlarına göre değişebilir. Küresel olmayan grafit oranı yükseldikçe dayanım ve süneklik ile ilişkili bütün özellikler azalmaktadır.



Şekil 8. Titreşim miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerdeki istatistiksel değişimler (Statistical changes of mechanical properties depending on vibration amount)

Yukarıdaki bilgilerden hareketle elde edilen sonuçlar incelendiğinde; mekanik titreşim uygulanması sonucunda tane ve küre sayısının artması, küreselleşmenin iyileşmesi gibi nedenlerle mekanik özellikler gelişmiştir. Çünkü çekirdeklenmenin artmasına bağlı olarak küre ve tane sayısı artarken boyutları küçülmektedir. Hall-Petch yasasına göre [1] tane boyutu azaldıkça dayanım ve sertliğin artması beklenen bir sonuçtur. Titreşim miktarı arttıkça tane ve grafit küre boyutu küçülmekte, sayıları ise artmaktadır. Elde edilen sonuçlar da bu durumu teyit etmektedir. Titreşim miktarı arttıkça tane ve küre boyutu küçülmekte ve mekanik özellikler gelişmektedir. Titreşim uygulanmasına bağlı olarak çekme dayanımı önce % 1.9 ve titreşim miktarı daha da arttıkça % 5.8 oranlarında, uzama miktarı önce % 4 ve titreşim miktarı daha da arttıkça % 7.4 oranlarında ve sertlik miktarı ise önce % 2.5 ve titreşim miktarı daha da arttıkça % 5.9 oranlarında artmıştır. Kısacası katılma sırasında mekanik titreşim uygulanması KGDD malzemelerin mekanik özelliklerinin artmasına neden olmaktadır.

Mekanik özelliklerdeki bu artışların nedenleri olarak tane ve küre sayısının artması, boyutlarının ise küçülmesi olduğu daha önce ifade edilmiştir. Bunun en önemli kanıtları olarak kırılma yüzeyi yada çekme test numunesi kopma yüzey morfolojisinin incelenmesiyle daha da iyi anlaşılacaktır. Bu amaçlarla numunelerin kopma yüzey görüntüleri Şekil 9 ve 10'da verilmiştir.

Yüzeyle bakıldığında titreşimsiz dökümde (Şekil 10.a-c) çatlak oluşumu ve gevrek kırılma (klivaj ya da keskin köşeli) görüntüleri bulunmaktadır. Kırık yüzeylerde bir kademe oluşumu (alçak ve yüksek alanlar)

bulunmaktadır. Bu görüntüler sünekliğin ve deformasyonun az olduğu gevrek malzemelerde görülmektedir.



Şekil 9. Titreşim uygulamasına bağlı olarak kopma yüzey karakteristiğinin değişimi, a) 0, b) 50 ve c) 100 Hz (The change of crack surface characteristics depending on vibration applications; a) 0, b) 50 and c) 100 Hz)

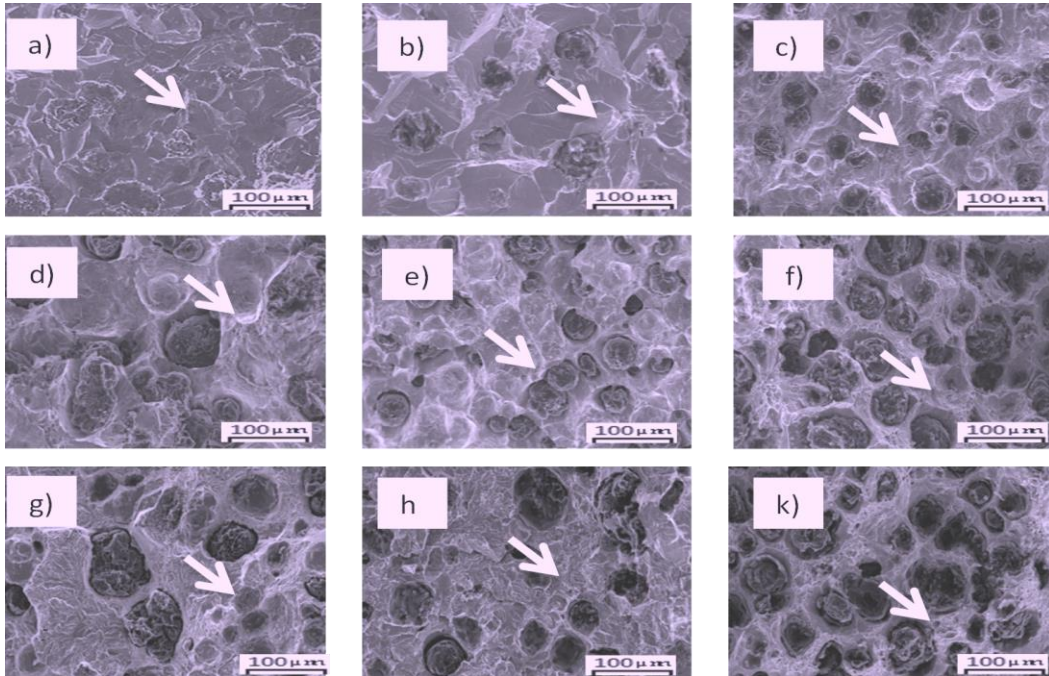
Deformasyon malzemeler yük uygulandığında en zayıf veya kusurlu noktadan başlar. Kısa sürede gerçekleştiği için özellikle dökme demir gibi gevrek malzemelerde bölgesel olarak gerçekleşir. Tane boyutunun büyük olması deformasyonun homojenliğini azaltır. Çünkü bu tür malzemelerde kısmi deformasyon meydana gelebilmekte ve homojen olmayan bölgesel kopmalar (parçalı kopuklar) şeklinde bir kopma yüzeyi oluşmaktadır [18, 22,23]. Aynı zamanda grafit küre dağılımındaki homojensizlikler de kırılma tokluğu ve yüzey özelliklerine olumsuz etkiler yapmaktadır. Çünkü homojen olmayan küre dağılımı kırılmada da homojensizlikler ya da bölgesel kopmalar meydana getirebilmektedir.

Diğer yandan titreşim uygulaması neticesinde (Şekil 10.d-f ve g-k) daha fazla tane ve küre sayısı, daha

(oyuklu ya da sünek kopma) meydana gelmektedir. Dökme demirlerin genel olarak kırılma gösterdiği ifade edilmiştir. Ancak titreşime bağlı olarak gevrek kırılmanın yanında sünek malzemelerde görülen oyuklu (çatlak değil geniş yüzler) kopmaların meydana geldiği görülmekte (Şekil 10.d-f) ve titreşim miktarının artmasıyla bu kopma şeklinin arttığı görülmektedir (Şekil 10.g-k). Titreşim uygulanması sonucunda gevrek kırılma şeklinin yanında sünek kopma devreye girmektedir. Diğer bir ifadeyle titreşim sonucu hem gevrek hem de sünek kopma davranışı birlikte görülmektedir. Titreşim miktarı arttıkça sünek kopma daha fazla görülmektedir.

Titreşimsiz dökümde pekleşme nedeniyle gevrek kırılma meydana gelmektedir. KGDD üzerine kuvvet uygulandığında başka kusurlu noktalar bulunmuyorsa çatlaklar küreselleşmenin yetersiz olduğu grafit kürelerinin uç (sivri ya da keskin köşeler) üzerinden olacaktır.

Çünkü küreler matris malzemeden farklı oluşumlardır ve mekanik davranışları da farklı olacaktır. Mekanik açıdan kusur sayılabilirler. Bu nedenle kuvvet uygulanmaya devam edilirse çatlak büyümeye ve küreleri takip ederek ilerlemeye devam edecektir. Çatlaklar yüksek enerjili ve kaymanın süresiz olduğu tane sınırları yerine tane içerisinden ilerleyerek en yakın küreye ulaşacaktır. Bu tür kırılma sünek (kaymalı) kırılma olarak ifade edilir. Titreşim uygulaması sonucunda oluşan çok sayıda tane nedeniyle kopmalar sünek kırılmalar şeklinde meydana gelmektedir. Gevrek kırılmada yüzeyler keskin köşeler biçiminde olurken, sünek kırılmada daha fazla



Şekil 10. Titreşim uygulamasına bağlı olarak kopma yüzey makro yapılarındaki değişimler; a-c) 0, d-f) 50 ve g-k) 100 Hz (Changes of macrostructures in crack surface depending on vibration applications; a-c) 0, d-f) 50 and g-k) 100 Hz)

homojen matris yapısı ve özellikle süneklik gibi mekanik özelliklerin artmasına bağlı olarak çok noktada deformasyon nedeniyle daha düz bir kopma yüzeyi

deformasyon nedeniyle oyuklanmalar şeklinde yüzeyler meydana gelmektedir.

Bu bilgiler doğrultusunda Şekil 10'daki yüzey görüntüleri değerlendirildiğinde Şekil 10.a-c'deki görüntüler gevrek, Şekil 10.d-f yüzeyleri çoğunlukla gevrek +sünek ve Şekil 10.g-k'da ise daha çok sünek kırılma olduğu söylenebilir. Başka bir işaret de kırılma yüzeylerinin mikroskop altında farklı parlaklık tonlarında görülmesi gösterilebilir. Gevrek kırılmalarda ışık direk yansıtıldığından yüzey daha parlak, sünek kırılmalarda ise oyuklarda ışığın kırınımı nedeniyle daha mat şekildedir.

Ayrıca bazı çalışmalarda [23-30] düşük orandaki ya da kısmı (%3-10) perlit miktarının yorulma ve kırılma direncini artırdığı ifade edilmektedir. Grafit/ferrit ara yüzeyinde başlayan çatlak daha yüksek sertlik ve dayanıma sahip perlit fazına geldiğinde bir dirençle karşılaşacak, buna bağlı olarak çatlağın ilerleyebilmesi için daha fazla gerilim uygulanması gerekecektir. Bu şu anlama gelmektedir; kısmi perlit bulunan KGDD'lerde kırılma direnci ferritik olanlara kıyasla daha fazladır. Mevcut çalışmamızda titreşim uygulamasına bağlı olarak % 2.5 ve 3.4 oranlarında perlit oluşmaktadır. Bu mikroyapısal sonuçlar kırılma direncinin artması ve dolayısıyla dayanımın artmasının nedenlerinden biridir.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

KGDD malzemelerin döküm yoluyla üretimi sırasında mekanik titreşim uygulanması neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Titreşim uygulaması grafit küre ve tane sayısında artışa neden olmakta, boyutları ise küçülmektedir. Titreşim miktarı arttıkça daha fazla küre ve tane elde edilmekte, boyutları da küçülmektedir.
- Titreşim uygulamasına bağlı olarak mekanik özellikler gelişmektedir. Başlangıçta 413 MPa olan çekme dayanımı titreşim miktarına bağlı olarak 421 ve 437 MPa olmaktadır. Sertlik 203 HV'den titreşim miktarına bağlı olarak 208 ve 215 HV'ye ulaşmaktadır. Uzama miktarı da 12.2'den düşük titreşimde 12.7'ye, daha yüksek titreşimde ise 13.1'e artmaktadır.
- Mekanik özelliklerdeki bu gelişmeler yapısal değişim neticesinde titreşimin deformasyon ve kırılma davranışındaki değişime bağlı olarak meydana gelmektedir. Çünkü genellikle gevrek kırılma davranışı görülen KGDD malzemede titreşime bağlı olarak oyuklu veya sünek kopma davranışı görülmektedir. Bu kırılma farklılığı da mekanik özelliklerdeki değişimin en önemli kanıtını oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Elliott, R., "Cast Iron Technology", Butterworth, LONDON, (1990).
- 2) Mills, K., (Edt.), "Cast Irons," ASM, in Metals Handbook, vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, 9th ed. Metals Park, OH, (2002).

- 3) "Ductile Iron; Molten Metal Processing", 2nd ed. Des Plaines, IL: American Foundrymen's Society, (1986).
- 4) "Sorelmetal Book of Ductile Iron", 1st ed. Montréal, Canada: Rio Tinto Iron & Titanium Inc., (2004).
- 5) Angus, H. T., "Cast Iron: Physical and Engineering Properties", 2nd ed. Boston, MA: Butterworths Inc., (1976).
- 6) "Introduction to Gray Cast Iron Processing", 1st ed. Des Plaines, IL: American Foundrymen's Society, (2000).
- 7) "Ductile Iron Handbook", 2nd ed. Des Plaines, IL: American Foundrymen's Society, (1993).
- 8) Hasirci, H., "Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementleri (Cu ve Ni) Ve Östemperleme Süresinin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkileri", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2001).
- 9) Xiao, B., Fan, Z., Jiang, W., Liu, X., Long, W. and Hu, Q., "Microstructure and Mechanical Properties of Ductile CastIron in Lost Foam Casting with Vibration", *Journal Of Iron And Steel Research*, 21:(11), 1049-1054, (2014).
- 10) Campbell, J., "Effects Of Vibration During Solidification,"*International Metals Reviews*, 26: 71-108, (1981).
- 11) Abramov, V., Abramov, O., Bulgakov, V. and Sommer, F., "Solidification of aluminum alloys under ultrasonic irradiation using water-cooled resonator,"*Materials Letters*, 37: 27-34, (1998).
- 12) Gruzleski, J. E., "Microstructure Development During Metalcasting", 1st ed. DesPlaines, IL: American Foundrymen's Society, (2000).
- 13) Mills, K., (Edt.), "Casting," ASM, in Metals Handbook, vol. 15, Principles of Solidification, 9th ed. Metals Park, OH: ASM, (2002).
- 14) Stefanescu, D. M., "Science and Engineering of Casting Solidification", New York: Plenum Publishers, (2002).
- 15) Mills, K., (Edt.), "Cast Iron," ASM, in Metals Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructures, 9th ed. Metals Park, OH: ASM, (2004).
- 16) Higgins, R. A., "The Effects of Composition on the Structure of Cast Iron," "Engineering Metallurgy – Applied Physical Metallurgy, 6th Ed., 353-373, (1993).
- 17) Double, D. D. and Hellawell, A., "The Nucleation and Growth of Graphite – The Modification of Cast Iron," *Acta Materialia*, 43(6): 2435-2442, (1995).
- 18) Walton, C. F., (Edt.), "Gray and Ductile Iron Castings Handbook", 1st ed. Cleveland, OH: R. R.Donnelley & Sons Co., (1971).
- 19) Minkoff, I., "The Physical Metallurgy of Cast Iron", New York, NY: Wiley, (1983).
- 20) Çetin, M., "Östemperlenmiş KGDD'lerin Aşınma Davranışının Geliştirilmesi", *Doktora Tezi*, Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005).
- 21) Karsay, S.I., "Ductile Iron, Production Practices", American Foundrymen's Society, Inc., USA, 24-77, (1985).
- 22) Walton, C.F., "Metallurgy of Cast Iron", Iron Casting Handbook, Iron Casting Society Inc., (1981).
- 23) Walton, C.F., "Mechanical properties of Ductile Iron", Iron Casting Handbook, Iron Casting Society Inc., (1981).

- 24) Hemond, C. J. Jr, "Engineering Acoustics and Noise Control", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, (1983).
- 25) Rossing, T.D., Fletcher, N.H., "Principles of Vibration and Sound", New York, Springer, (2004).
- 26) Abramov, O.V., "Ultrasound in Liquid and Solid Metals", Boca Raton, FL: CRC Press Inc., (1994).
- 27) Lide, D. R. (Edt), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th Edition, Section 14, Geophysics, Astronomy, and Acoustics; Speed of Sound in Various Media, CRC Press, Boca Raton, Florida, (2003).
- 28) Abramov, O.V., "Action of high intensity ultrasound on solidifying metal", *Ultrasonics*, 25, 73-82, (1987).
- 29) Ohsawa, Y., "Effect of ultrasonic vibration on solidification structures of cast irons," *NRIM Research Activities*, 67: 5-6, (1995).
- 30) Chernyshova, N. V., Etelfes, L. S., Zolotereva, R. S. and Yanovskaya, E.I., "Influence of Vibration Treatment of Cast Iron on Glass Mold Performance," *Soviet Casting Technology*, 6: 14-15, (1989).
- 31) Gittus, J. H., "Inoculation of solidifying iron and steel casting by means of vibration," *Journal of the Iron and Steel Institute*, 192: 118-131, (1959).
- 32) Grenko, T.M., "The Effects of Non-Contact Acoustic Vibrations on the Solidification and Microstructure of Aluminum Casting Alloy A356" *MS thesis*, Pennsylvania State University, December (2008).
- 33) Lin, S.C., Lui, T.S., Chen L.H. and Song, J. M., "Role of Matrix Structure on Resonant Vibration Fatigue Fracture of Spheroidal Graphite Cast Iron", *International Journal Cast Metals Resource*, 15: 75-84, (2002).
- 34) Lin, S.C., Lui, T.S. and Chen, L.H., "Effect of nodularity on resonant vibration fracture behavior in upper bainitic and ferritic cast irons", *Metallurgical and Materials Transaction A*, 31A: 2193-2203, (2000).

Asenkron Motor Rotor Arızalarının İstatiksel Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Abdurrahman ÜNSAL^{1*}, Ahmet KABUL¹

¹Dumlupınar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya

(Geliş/Received : 31.05.2016 ; Kabul/Accepted : 05.10.2016)

ÖZ

Bu makalede sincap kafesli asenkron motorlarda yaygın olarak meydana gelen rotor arızalarının istatistiksel olarak analizi ve değerlendirilmesi yapılacaktır. Rotor arızaları genel olarak rotor çubuklarının kırılması ve kısa-devre halkasının çatlama sonucu meydana gelir. Rotor arızaları stator akımına harmonik olarak yansımaktadırlar. Bu harmoniklerin tespiti için çeşitli sinyal işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu harmonikler ve diğer özellik çıkarım yöntemleri asenkron motor arızalarını tespit edilmesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada stator akımı önce zarf analizi ile incelenmiştir. Zarf analizi sonucu elde edilen veriler istatistiksel olarak incelenmiştir. İstatistiksel analizde ortalama, medyan, standart sapma, varyans, basıklık, çarpıklık, olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar istatistiksel analiz yöntemlerinin sincap-kafesli asenkron motorlarda rotor arızalarının incelenmesinde ve tespit edilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, İstatistiksel Analiz, Rotor Arızaları.

Evaluation of Rotor Faults of Induction Motors by Statistical Analysis Method

ABSTRACT

In this article, commonly occurring rotor faults of squirrel-cage induction motors will be statistically analyzed and evaluated. Rotor faults generally occur due to broken rotor bars and cracking of end-rings. Rotor faults are reflected into the stator current as harmonics. Various signal processing methods are used to detect these harmonics. These harmonics and other feature extraction methods are used to detect the faults of induction motor. In this work, the stator current is firstly studied by using envelope analysis. The data gained as result of Envelope analysis are studied statistically. In the statistical analysis mean, median, standard deviation, variance, kurtosis, skewness, probability density function and cumulative density function were calculated. The gained results indicate that the statistical analysis methods can be used for the detection of rotor faults of squirrel-cage induction motors.

Keywords: Induction Motor, Statistical Analysis, Rotor Faults.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asenkron motorlar yapılarının basit, az arıza yapmaları, bakımlarının kolay, fiyatlarının düşük olması nedeniyle en yaygın olarak kullanılan elektrik makineleridir. Asenkron motorlar diğer elektrik motorlarıyla karşılaştırıldığında az arıza yapmalarına karşın çok yaygın olarak kullanıldıklarından dolayı meydana gelebilecek herhangi bir arıza hem işletmeler için hem de motorun sürdüğü proses için önemi miktarda mali kayıplara sebep olabilir. Bundan dolayı asenkron motorların durumlarının izlenmesi ve meydana gelebilecek arızaların erken tespit edilerek meydana gelebilecek kayıpların azaltılması açısından oldukça önemlidir. Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar içerisinde kırık rotor çubuğu arızaları önemli bir yer tutmaktadır [1-4]. Kırık rotor arızaları stator akımına harmonik olarak yansır. Kırık rotor çubuğu arızaları alanında yapılan çalışmalar genellikle motor stator akım verisinin imza analizi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu analiz yönteminde en basit yöntem stator akım

sinyallerine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak yapılan analiz yöntemidir. FFT yönteminde stator akımı yan-band frekans bileşenlerinin taşıyıcı frekans (motorun besleyen şebeke frekansı) bileşenine göre bant genişliği ve genlik yüzdesi baz alınmaktadır. Özellikle motorun düşük yükte yüklenmesi durumunda ve/veya rotor çubuklarındaki kırık sayısının az olduğu durumlarda bu yöntem çok sağlıklı sonuç üretmemektedir [1]. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için akım sinyalinin adaptif bir filtreden geçirilerek işe yaramayan sinyal bileşenlerini elimine edilmesi ve arıza sinyalini daha kolay tespit edilmesi yoluna gidilmiştir [5]. Bu çözüm yöntemi yan-band frekanslarının netliğini arttırmakla birlikte yan-band harmoniklerinin genliklerinde herhangi bir düzelme ortaya koymadığından dolayı özellikle düşük yüklü motorların kırık rotor arızalarının tespit edilmesinde etkin bir çözüm getirmemiştir [6].

Düşük yüklü asenkron motorlarda kırık rotor arızası sonucu stator akımına yansıyan yan-band frekans bileşenlerinin genliğini net bir şekilde tespit edebilmek için stator akım sinyalleri adaptif bir filtreden geçirildikten sonra zarf analizine tabi tutulmaktadır. Daha sonra sinyalin frekans tanım bölgesindeki analizi

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: unsal@dpu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 283-289

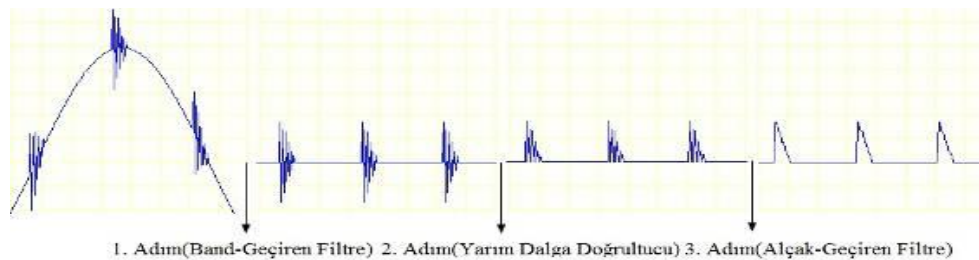
Hilbert Dönüşümü ile yan-band frekans bileşenlerinin genliği ve taşıyıcı frekansa olan mesafesi net bir şekilde tespit edilebilmektedir [7-8].

Son yıllarda, asenkron motor arızaların tespit edilmesinde istatistiksel yöntemler de kullanılmaya başlandı. Ayhan ve arkadaşları tarafından kırık rotor çubuğu arızasına sahip bir asenkron motorun sekiz yan-band frekansları için p-testi analizleri yapılmıştır [9]. Ahamed ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları çalışmada dalgacık analizi yöntemini kullanarak rotor dengesizliği ve kırık rotor çubuğu arızasına sahip motorların akım verilerini standart sapmalarını incelemişlerdir [10]. Vargas ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada kırık rotor çubuğu ve rulman arızalarının analizlerini istatistiksel metotlarla (ortalama ve standart sapma) ve entropi analiziyle tespit etmeye çalışmışlardır [11]. 2014 yılında Khwaja ve arkadaşları rulman arızalarının neden olduğu titreşim sinyallerinin istatistiksel parametre analizini yapmışlardır [12]. Perez ve arkadaşları da 2014 yılında kırık rotor çubuğu arızalarının tespiti için stator akım sinyallerinin varyans analizini yapmışlardır [13].

Bu çalışmada, hem doğrudan stator akım sinyalleri hem de stator akım sinyallerine uygulanan zarf analizi sonucu elde edilen verilerin istatistiksel olarak analiz incelenmiştir. Rotor arızalarının stator akımında izlenmesi için zarf analizi sonucu elde edilen verilerin ayrıca Hilbert Dönüşümü gerçekleştirilerek grafiksel olarak da gösterilmiştir. İstatistiksel analiz sonucu ortalama, medyan, standart sapma, varyans, basıklık ve çarpıklık parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler motorun sağlam olma ve farklı arıza durumlarına göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. ZARF ANALİZİ (ENVELOPE ANALYSIS)

Zarf analizi, kırık rotor çubuğu arızalarının neden olduğu yan-band frekans bileşenlerinin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Zarf analizi üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci adımda stator akım sinyalleri merkez frekans stator akımı temel frekansına eşit olan bir band-geçiren (band-pass) filtreden geçirilir. İkinci adımda filtrelenmiş olan akım sinyalleri akımın sadece pozitif değerlerini işleme alacak şekilde bir yarım-dalga doğrultucudan (rectifier) geçirilir. Üçüncü adımda da doğrultucu çıkışından elde edilen akım sinyali, kırık rotor arızaları sonucu meydana gelen yan-band frekanslarını gösterecek

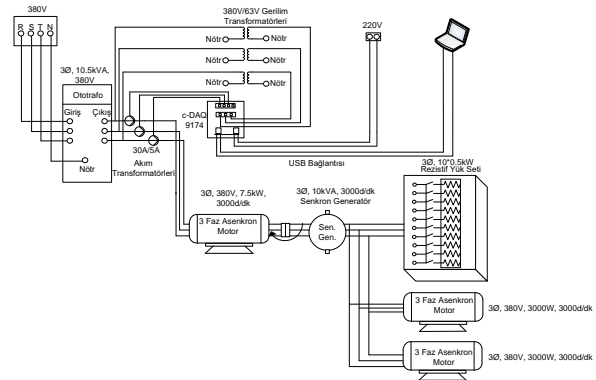


Şekil 1. Zarf analizi adımları (Steps of envelope analysis)

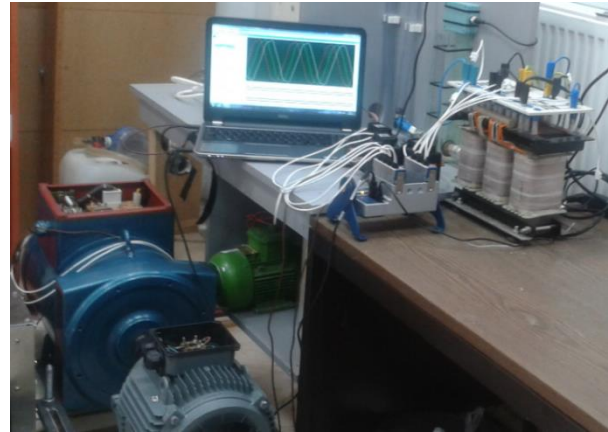
şekilde bir alçak geçiren (low-pass) filtreden geçirilir. Zarf analizi ile yapılan sinyal işleme aşamaları Şekil 1'de görülmektedir.

3. DENEY DÜZENEGİ (EXPERIMENTAL TEST BED)

Veri toplama deney düzeneğinin blok şeması Şekil 2'de görülmektedir. Kırık rotor çubuklarının tespit edilmesinde kullanılan asenkron motorun özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir. Rotor kırıkları rotor üzerinde matkapla delik açılarak oluşturuldu. Motor önce sağlam bir rotor ile test edildi. Daha sonra bir kırıklı rotor ve üç kırıklı rotor ile test edildi. Her çalışma durumu için stator akımı kaydedilerek analiz edildi.



Şekil 2. Deney düzeneği blok şeması (Block diagram of experimental test-bed)



Şekil 3. Deney düzeneği (Experimental test-bed)

Çizelge 1. Test motoru etiket değerleri (The nameplate of the test motor)

Marka	GAMAK
Model	AGM2E 132 S 2b
Faz	3 Fazlı
Güç	7.5 kW
Kutup Sayısı	2
Rotor Dönüş Hızı	2910 d/dk
Nominal Akım	13.6A
Moment	24.6 N
Güç Katsayısı	0.90
Verim	%88.5

Test edilen motora bir oto transformatörü ile yol verildi. Test motorunu farklı kademelerde yüklemek için bir adet üç fazlı, kendinden uyarımlı, sabit mıknatıslı senkron generatör kullanıldı. Senkron generatörün çıkışına da üç fazlı bir adet resistif yük bağlandı. Üç fazlı resistif yükün kapasitesi test motorunun tam yük ile yüklenmesi için yeterli olmadığından dolayı generatörün çıkışına iki adet asenkron motor da resistif yüke paralel bağlanarak testler gerçekleştirildi.

Test motorunun üç faz stator gerilimi ve akımını kaydetmek için National Instrument (NI cDAQ-9174 veri toplama kartı Labview yazılımı ile birlikte) veri toplama sistemi kullanıldı. Veri sisteminde akım ölçmek için NI 9227 modülü kullanıldı. Bu modülün giriş akımını 5 A (rms) ile sınırlı olduğu için NI 9227 modülü 30A/5A dönüştürme oranına sahip 3 adet akım transformatörü kullanıldı. Test motorunun stator gerilimini ölçmek için NI 9225 modülü kullanıldı. Modülün giriş gerilimi 300 V (rms) ile sınırlı olduğundan dolayı modül sistem üç fazlı 380/63 V bir transformatör üzerinden bağlandı. Veri ölçme sisteminin örnekleme frekansı 25 kHz olarak ayarlandı. Bu çalışmada ölçülen stator gerilimleri değerlendirmeye alınmamış, sadece stator akımları değerlendirmeye alınmıştır. Deney düzeneği Şekil 3'te görülmektedir.

4. DENEYSSEL VERİLER (EXPERIMENTAL DATA)

Deneysel çalışmada özellikleri Çizelge 1'de verilen üç fazlı asenkron motor sağlam rotor, bir kırıklı rotor ve üç kırıklı rotor ile birlikte %25, %50, %75, ve %100 yüklenerek çalıştırıldı. Her bir test verisi 32 sn süre ile 800.000 adet örnek olarak kaydedildi. Verilerin analizi MATLAB ortamında gerçekleştirildi. Veriler (akım sinyali) önce bir NLMS (Normalize Edilmiş En Küçük Farklar) filtreden geçirildi. Daha sonra filtrelenmiş olan sinyalin zarf analizi gerçekleştirildi (bu çalışmada sadece %100 yük altındaki akım verileri değerlendirmeye alınmıştır). Daha sonra stator akımının istatistiksel analizleri yapıldı.

Şekil 4, 5 ve 6'da test edilen motorun, sırasıyla, sağlam rotor, tek kırıklı rotor ve üç kırıklı rotor ile birlikte %100 yük akımının zarf analizi ve Hilbert dönüşümü [14-15] sonuçları görülmektedir.

Zarf Analizi sonuçları incelendiğinde sağlam rotorlu motora göre kırık rotorlu motorun akımının kırık sayısı ile arttığı görülmektedir. Hilbert dönüşümü sonucu elde edilen sinyallerin frekans bileşenlerinin kırık sayısı artıkça birbirinden ayrıldığı ve daha belirginleştiği görülmektedir. İstatistiksel analiz sonraki bölümde verilmektedir.

5. İSTATİKSEL ANALİZ (STATISTICAL ANALYSIS)

Test edilen motorun stator akımının (sağlam rotor, bir kırıklı rotor ve üç kırıklı rotor için) öncelikle olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonları hesaplandı. Arızanın artışına bağlı olarak yoğunluk ve dağılım fonksiyonlarında (sağlam rotorlu motor verileri ile karşılaştırıldığında) değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(x)$ Eşitlik 1'de belirtildiği şekilde hesaplanır [16].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

σ sinyalin standart sapması, μ sinyalin ortalama değeridir.

Akım sinyalinin kümülatif dağılım fonksiyonu ise eşitlik 2'de verilmektedir [17].

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (2)$$

Şekil 7 test edilen motorun stator akımına ait olasılık yoğunluk fonksiyonunu (sağlam rotor, bir kırıklı rotor, ve üç kırıklı rotor ve %100 yük altında) göstermektedir. Şekil 8 ise aynı stator akımına ait kümülatif dağılım fonksiyonunu göstermektedir. Rotordaki kırık sayısı artıkça olasılık yoğunluk fonksiyonunda meydana gelen değişimin (sağlam rotorlu motora göre) daha belirgin hale geldiği görülmektedir. (Şekil 7). Rotor kırıkları sonucu kümülatif dağılım fonksiyonunda meydana gelen değişimler olasılık yoğunluk fonksiyonu ile karşılaştırıldığında sınırlı kalmaktadır (Şekil 8).

Test motorunun kırık rotor çubuğu arızalarının tespiti edilmesi amacıyla stator akımı istatistiksel analiz parametreleri olarak standart sapma, varyans (σ^2), ortalama (μ), medyan ($\tilde{\mu}$), çarpıklık ve basıklık hesaplamaları da yapıldı. Stator akım sinyalinin çarpıklığı ve basıklığı sırasıyla eşitlik (3) ve eşitlik (4)'teki gibi hesaplanır.

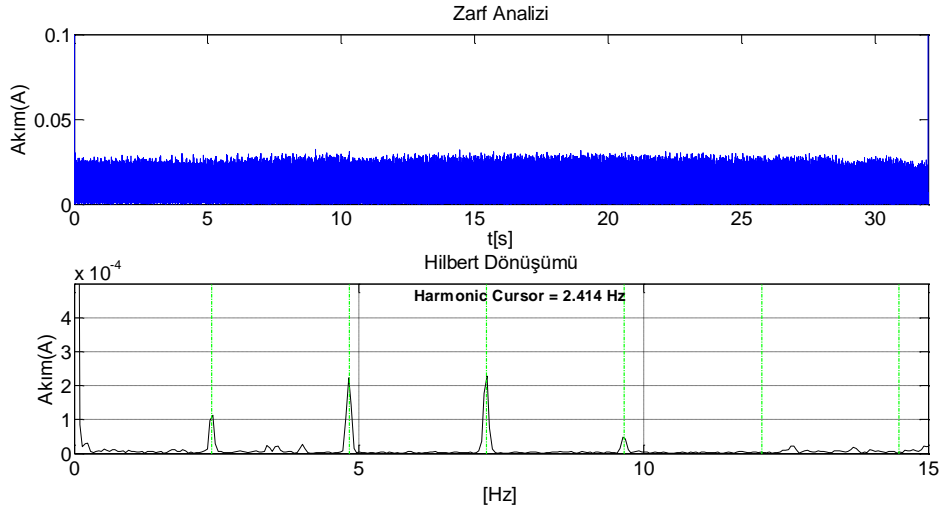
$$\text{Çarpıklık} = \frac{3(\mu - \tilde{\mu})}{\sigma} \quad (3)$$

$$\text{Basıklık} = \frac{(\sigma - \mu)^4}{n * (\sigma)^4} \quad (4)$$

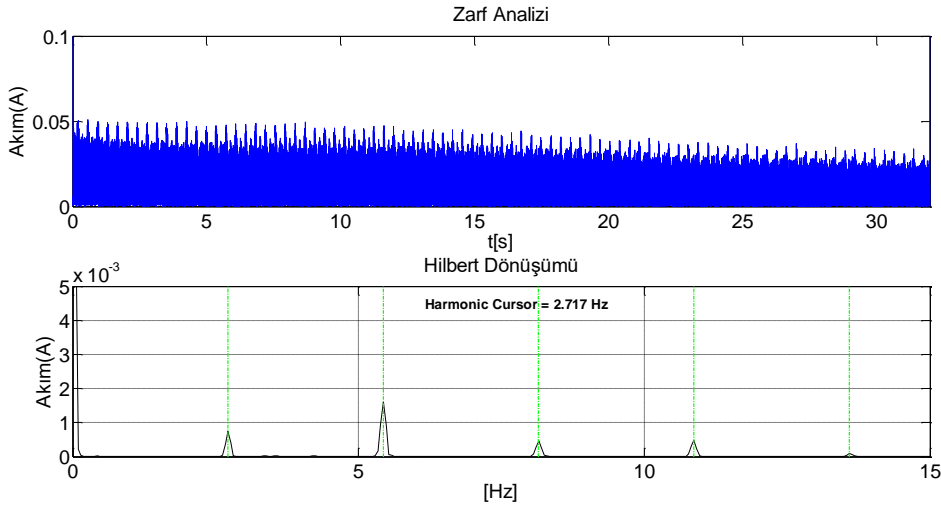
Stator akımı periyodik ve sinüzoidal bir yapıya sahip olduğu için sinyalin ortalama ve medyan değerlerinin sıfıra oldukça yakın çıkması beklenmelidir. Bundan dolayı ortalama ve medyan verisinin kullanıldığı Pearson Çarpıklık değeri de sıfır olarak hesaplanmaktadır. Basıklık hesaplamasında kullanılan n toplam veri sayısını göstermekte olup 800,000(32s * 25,000Hz)

adet veriyi temsil etmektedir. Bu nedenle Çizelge 2'de stator akımının sadece standart sapma ve varyans değer-

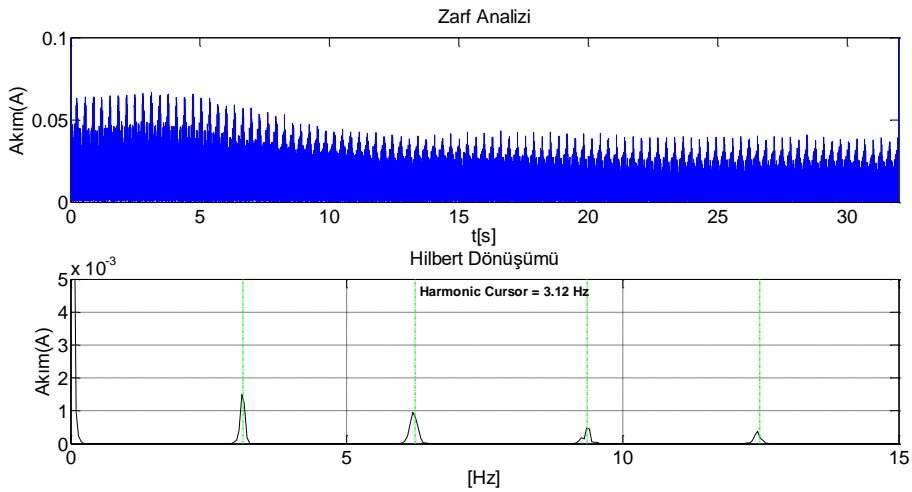
leri verilmektedir. Ortalama ve medyan hesaplamaları zarf analizi sonucu elde edilen akım sinyali için yapıldı.



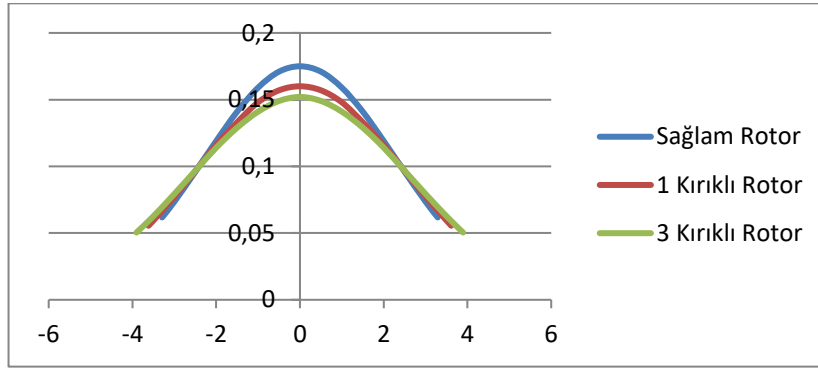
Şekil 4. Sağlam rotor %100 yükleme (Healthy rotor, %100 loading)



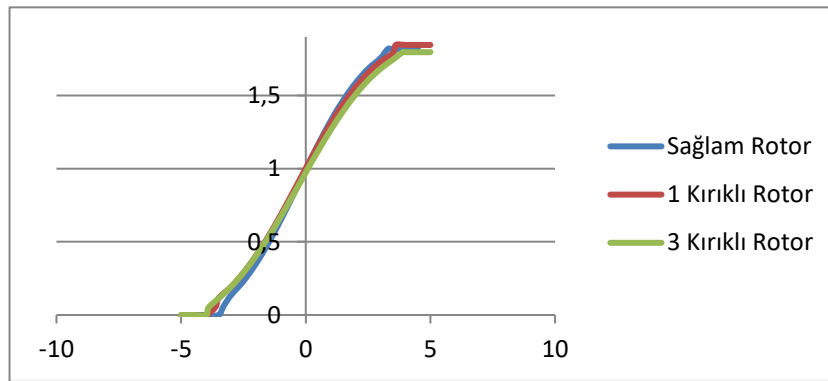
Şekil 5. Bir kırıklı rotor %100 yükleme (Rotor with one broken bar, %100 loading)



Şekil 6. Üç kırıklı rotor %100 yükleme (Rotor with three broken bars, %100 loading)



Şekil 7. Olasılık yoğunluk fonksiyonu (Probability density function)



Şekil 8. Kümülatif dağılım fonksiyonu (Cumulative distribution function)

Çizelge 2. Stator akımı istatistiksel analiz sonuçları (Results of statistical analysis of stator current)

Rotor	Motor Yüğü	Standart Sapma	Varyans
Sağlam Rotor	%25	1.1644	1.356
Sağlam Rotor	%50	1.3019	1.695
Sağlam Rotor	%75	1.9287	3.720
Sağlam Rotor	%100	2.2782	5.19
Bir Kırıklı Rotor	%25	0.9047	0.819
Bir Kırıklı Rotor	%50	1.2865	1.655
Bir Kırıklı Rotor	%75	1.9178	3.678
Bir Kırıklı Rotor	%100	2.4866	6.183
Üç Kırıklı Rotor	%25	0.9316	0.868
Üç Kırıklı Rotor	%50	1.3515	1.827
Üç Kırıklı Rotor	%75	2.0139	4.056
Üç Kırıklı Rotor	%100	2.62863	6.91

Çizelge 2'deki sonuçlar incelendiğinde motorun aynı yük kademesi altında rotorundaki kırık çubuk sayısı arttıkça elde edilen sinyalin standart sapma ve varyans değerleri de artmaktadır. Aynı rotor arızası için motorun yükü arttığında standart sapma ve varyans değerlerinin de arttığı gözlemlenmektedir.

Zarf analizi sonucu elde edilen akım sinyalinin ortalama, medyan, standart sapma ve çarpıklık ve basıklık değerleri Çizelge 3'te verilmektedir.

Aynı yük değeri altında motorun rotorunda meydana gelen arızanın etkisini incelemek için motorun stator

akımı farklı rotor arızaları için istatistiksel olarak analiz edildi. Sonuçlar (varyans, çarpıklık, ve basıklık değerleri) Çizelge 4'te verilmektedir.

Çizelge 3 ve 4'te verilen sonuçlar incelendiğinde sinyalin ortalama, medyan ve standart sapma değerlerinin aynı rotor arızası için motor yükünün arttığı zaman arttığı görülmektedir. Benzer şekilde, aynı yük kademesinde rotor arızası (kırık çubuk sayısının) arttığında ortalama, medyan ve standart sapma değerlerinin de arttığı gözlemlenmektedir. Aynı yük kademesinde rotor kırık sayısı arttığı zaman çarpıklık ve basıklık değerleri sıfıra

oldukça yakın çıktığı için arıza durumu için bu analizlerin sağlıklı sonuç vermeyeceği gözlemlenmektedir. Zarf analizi sonucunda elde edilen akım sinyalinin standart sapma ve varyans değerlerinin arızayla ilişkilendirilmesinin daha mantıklı sonuçlar verebileceği gözlemlenmektedir.

edilmesinde ve durumlarının gözlemlenmesinde kullanılabileceği görülmektedir. Stator akımının olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu %100 yük altında ve farklı rotor arızaları için ayrı karşılaştırmalı olarak hesaplandı. Elde edilen sonuçlara göre motordaki rotor arızaları olasılık yoğunluk

Çizelge 3. Zarf analizi sonucu elde edilen sinyalin istatistiksel analizi (Statistical analysis of the resulting signal of envelope analysis)

Rotor	Yüklenme	Ortalama	Medyan	Standart Sapma	Çarpıklık	Basıklık
Sağlam Rotor	%25	0.0064	0.0057	0.0047	0.447	6.69e-10
Sağlam Rotor	%50	0.0067	0.0062	0.0054	0.278	4.2e-9
Sağlam Rotor	%75	0.0085	0.0077	0.0061	0.393	2.996e-8
Sağlam Rotor	%100	0.0103	0.0094	0.0092	0.293	6.39e-6
Bir Kırıklı Rotor	%25	0.0070	0.0063	0.0054	0.389	0.000241
Bir Kırıklı Rotor	%50	0.0079	0.0071	0.0067	0.358	3.22e-5
Bir Kırıklı Rotor	%75	0.0103	0.0092	0.0070	0.471	0.00154
Bir Kırıklı Rotor	%100	0.0131	0.0116	0.0106	0.425	9.67e-05
Üç Kırıklı Rotor	%25	0.0079	0.0071	0.0056	0.429	0.000889
Üç Kırıklı Rotor	%50	0.0089	0.0080	0.0080	0.338	5.01e-06
Üç Kırıklı Rotor	%75	0.0108	0.0095	0.0109	0.358	2.21e-10
Üç Kırıklı Rotor	%100	0.0135	0.0118	0.0121	0.422	5.60e-06

Çizelge 4. Çarpıklık ve basıklık analizleri (Skewness and kurtosis analysis)

Rotor	Yüklenme	Varyans	Çarpıklık	Basıklık
Sağlam Rotor	%25	2.209e-5	0.447	0.000535
Bir Kırıklı Rotor	%25	2.916e-5	0.389	0.000105
Üç Kırıklı Rotor	%25	3.136e-5	0.429	0.000749
Sağlam Rotor	%50	2.916e-5	0.278	6.39e-6
Bir Kırıklı Rotor	%50	4.489e-5	0.358	0.000241
Üç Kırıklı Rotor	%50	6.4e-5	0.338	3.22e-5
Sağlam Rotor	%75	3.721e-5	0.393	0.00154
Bir Kırıklı Rotor	%75	4.9e-5	0.471	9.67e-05
Üç Kırıklı Rotor	%75	1.1881e-4	0.358	0.000889
Sağlam Rotor	%100	8.464e-5	0.293	5.01e-06
Bir Kırıklı Rotor	%100	1.1236e-4	0.425	2.21e-10
Üç Kırıklı Rotor	%100	1.4641e-4	0.422	5.60e-06

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada üç fazlı bir asenkron motorun sağlam rotor, bir kırıklı ve üç kırıklı rotor ile farklı yük kademelerinde test edilerek stator akımında meydana gelen değişiklikler zarf analizi yöntemi ile ve istatistiksel olarak incelenmiştir. İstatistiksel analiz ortalama, medyan, standart sapma, varyans, basıklık ve çarpıklık değerlerinin hesaplanmasını kapsamaktadır.

Zarf analizi sonucunda elde edilen harmonik frekansları asenkron motorların rotor arızalarının tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da bu durum deneysel olarak gösterildi. Elde edilen sonuçlara göre standart sapma ve varyans değerlerindeki (rotor arızalarına bağlı olarak meydana gelen) değişimlerin asenkron motorların rotor çubuğu arızalarının tespit

fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonunda değişimlere sebep olmaktadır. Bu değişimler de rotor arızalarının tespitinde kriter olarak değerlendirilebilir.

Asenkron motorların rotor arızalarının gözlemlenmesinde ve tespit edilmesinde istatistiksel parametrelerin de kullanılabileceği görülmektedir. Bundan sonra yapılacak çalışmalar ileri düzey istatistiksel metodların asenkron motorların rotor arızalarının ve şiddetinin de tespit edilmesinde kullanılmasını kapsayacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Dumlupınar Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (DPÜ-BAP 2012-29).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ünsal A., Kabul A., “Detection of the broken rotor bars of squirrel-cage induction motors based on normalized least mean square filter and Hilbert envelope analysis”, *Electrical Engineering*, 98: 245-256, (2016).
2. Ünsal A., Kara Ö., “Detection and Classification of the Broken Rotor Bars in Squirrel-Cage Induction Motors”, *International Journal of Engineering Research And Management*, 03: 59-64, (2016).
3. Ünsal A., Karakaya O., “Asenkron Motor Rotor Arızalarının Analizi”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 34: 69-86, (2015).
4. Ünsal A., Güçlü S., “Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırıklarının Mann-Whitney U-Testi İle İncelenmesi”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 35: 79-92, (2015).
5. Lamb M. J., “Monitoring the Structural Integrity of Packaging Materials Subjected to Sustained Random Loads”, *PhD Thesis*, Victoria University, School of Engineering and Science, (2011).
6. Günel S., Ece D. G., Gerek Ö. N., “Induction machine condition monitoring using notch-filtered motor current”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23: 2658-2670, (2009).
7. Thomson W.T., Gilmore R. J., “Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives – Fundamentals, data interpretation, and industrial case histories”, *Proceedings of the 32nd Turbomachinery Symposium*, Texas, 145-156, (2003).
8. Kalaskar C.S. and Gond V. J., “Motor current signature analysis to detect the fault in induction motor”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4: 58-61, (2014).
9. Ayhan B., Chow M. Y., Trussell H. J., Song M. H., et. al., “Statistical analysis on a case study of load effect on PSD technique for induction motor broken rotor bar fault detection”, *Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Atlanta, 119-123, (2003).
10. Ahamed S. K., Karmakar S., Mitra M., Sengupta S., “Diagnosis of induction motor faults due to broken rotor bar and rotor mass unbalance through discrete wavelet transform of starting current at no load”, *Journal of Electrical Systems*, 6(3): 442-456, (2010).
11. Vargas M. H., Yopez E. C., Perez A. G. and Troncoso R. J. R., “Novel methodology for broken-rotor-bar and bearing faults detection through SVD and information entropy”, *Journal of Scientific&Industrial Research*, 71: 589-593, (2012).
12. Khwaja H.A., Gupta S. P. and Kumar V., “A statistical approach for fault diagnosis in electrical machines”, *IETE Journal of Research*, 56 (3): 146-155, (2014).
13. Perez O.D., Escudero L. A. G., Sotelo d. M., Gardel P. E. and Alonso M. P., “Analysis of fault signatures for the diagnosis of induction motors fed by voltage source inverters using ANOVA and additive models”, *Electric Power System Research* 121: 1-13, (2015).
14. İnternet: Kschischang F. R., “The hilbert transform”, *Lecture Notes*, The Edward S. Rogers Sr. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, (2006).
<http://www.comm.utoronto.ca/frank/papers/hilbert.pdf>
15. Poularikas A. D., “Hilbert Transform”, *Transforms and Applications Handbook*, CRC Press , New York (2010).
16. Aczel A. D., “The Bell-Shaped Curve”, *Statistics Concepts and Applications*, IRWIN, United States of America, (1995).
17. İnternet: Freiwald R., “The cumulative distribution function for a random variable X”, *Lecture Notes*, Washington University.
<http://www.math.wustl.edu/~freiwald/Math132/cdf.pdf>

Türkiye Şartlarında TS 825 Kapsamında Farklı Duvar Tiplerinin Isıl Etkinlikleri Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma

İzzet YÜKSEK¹, Serkan SIVACILAR^{2*}

¹Celal Bayar Üniversitesi, Güzel Sanatlar Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Rektörlük, Şehzadeler, Manisa

²İnşaat Mühendisi, Merkez, Kırklareli

(Geliş/Received : 13.05.2016 ; Kabul/Accepted : 12.08.2016)

ÖZ

Yapıların yaşam döngüleri süresince tükettikleri enerjinin büyük bölümünü kullanım sürecinde tüketilen enerji oluşturmaktadır. Bu süreçte yapılarda ısısal konfor koşullarının sağlanması, sıcak su, aydınlatma ihtiyaçlarının karşılanması ile çeşitli elektrikli araç ve makineler için enerji kullanımı söz konusudur. Enerji kullanımındaki en önemli payı da ısıtma/soğutma için yapılan enerji tüketimi almaktadır. Bu nedenle ısıtma/soğutma amaçlı enerji tüketiminin azaltılması enerji etkinliği sağlamada önemlidir. Bu doğrultuda istenmeyen ısı kayıp ve kazançlarını azaltmak gerekmektedir. İklim uygun biçimlenme ve kabuk tasarımı, uygun yapı malzemesi seçimi ve uygun yapı elemanı tasarımıyla istenmeyen ısı kayıp ve kazançları azaltılabilir. Bu çalışmada yapıların enerji etkin özelliklere sahip olması amacıyla, yapı elemanlarının sahip olması gereken ısı geçirgenlik değerini elde edebilmek için, Türkiye koşullarında uygun malzeme seçimi ve yapı elemanı tasarımı konuları tartışılmıştır. Bu doğrultuda 3. derece gün bölgesinde betonarme iskelet bir yapı örnek alınmıştır. Örnek yapının düşey yapı elemanlarında farklı yapı bileşenleri kullanılarak, yeterli ısı iletkenlik değerleri için TS 825 kapsamında uygun kalınlıkların tespiti ve yoğunlaşma tahkikleri yapılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları ile zararlı yoğunlaşmaya neden olmayan ve gerekli ısı geçirgenlik katsayısını sağlayan kesitler tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı Geçirgenlik Değeri, TS 825, Isı Etkinlik Değerlendirmesi, Duvar Tipleri, Enerji Etkin Duvar Tasarımı.

Thermal Efficiency of Different Wall Type A Comparative Study on the Scope TS 825 in Turkey Conditions

ABSTRACT

Operating energy is a big part of consumed energy of building in life cycle period. Building use energy for providing of thermal comfort conditions, for various electric vehicles and machinery, hot water and lighting, is concerned. Heating / cooling energy is the largest share of energy use in total energy consumption. Therefore, reducing energy consumption for heating / cooling is important in ensuring energy efficiency. In this context reducing to undesirable heat loss and gain is necessary. Unwanted heat losses and gains could reduce with shaping and shell design according to the climate, choosing appropriate buildign materials and appropriate building element design. In this study, , in order to buildings have energy-efficient features, selection of appropriate building materials and appropriate building element design issues are discussed for building elements should have in order to obtain thermal transmittance value. In this context, a reinforced concrete building were taken samples. For vertical building elements of building sample, were analyzed according to TS 825 with determining the thickness of the different building components and verifications condensation. According to the results of analysis, suitable sections are determined which do not cause harmful condensation and providing the necessary heat conductivity coefficient.

Keywords: Thermal Insulation, Building Materials, Building Element Design, Energy Efficiency.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapılardan beklenen en önemli fonksiyonlardan biri uygun konfor koşullarını sağlamasıdır. Ancak istenen konfor koşullarını sağlarken de iklimlendirme araçlarına olabildiğince az ihtiyaç duyması ve en az seviyede enerji

tüketmesi beklenmektedir. Bu özelliklere sahip bir yapı oluşturmak, ancak mimari tasarım sürecinde iklimsel verileri dikkate alarak ve pasif iklimlendirmeye yönelik düzenlemelerle, özellikle istenmeyen ısı kayıp ve kazançlarını engelleyen yapı kabuğu tasarlamakla mümkündür.

Soğuk dönemde iç ortamı sıcak tutmak, sıcak dönemde de iç ortamı serin tutabilmek için gerekli enerjiyi en aza

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: srkn_911@hotmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 291-302

indirecek uygun tasarlanmış yapı elemanlarına ve yapı malzemelerine ihtiyaç vardır. İç ve dış ortam arasındaki ısı farklılıkları ortamlar arasında basınç farkı nedeniyle hava akımına sebep olmaktadır. Kış aylarında iç ortamdaki sıcak hava, yapı kabuğunda ısı iletim katsayısı yüksek yapı elemanı aracılığıyla dış ortama geçmektedir. Bu geçiş miktarı ilgili yapı kabuğunun ısı geçirgenlik katsayısına bağlıdır. Bu nedenle yapı kabuğu bulunduğu iklim bölgesi için istenen ısı geçirgenlik katsayısını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bunun yanında ortamlar arası ısı akımları buna paralel oluşan buhar akımları ve bu akımların birlikte oluşturacağı sorunlar gündeme gelir. Yapı elemanı içerisinde veya yüzeyinde yoğunlaşma söz konusu olur. Yoğunlaşma ile birlikte yapı elemanının ısı geçirgenlik değeri yükselir ve yapı malzemelerinde nemlenmeye bağlı bozulmalar oluşur. Yapı elemanlarının bulunduğu iklim bölgesine uygun ısı geçirgenlik katsayılarına sahip olmaları ve aynı zamanda bu yapı elemanlarının yapıların kullanımı sırasında terleme, yoğunlaşma, ısı köprüsü oluşturma gibi yapı fiziki sorunları ile karşılaşmamaları gerekir.

Türkiye’de yapılarda ısı yalıtımı yapılırken TS 825 (Isı yalıtım kuralları standardı) referans alınmaktadır. Bu çalışma, TS 825’in öngördüğü ısı geçirgenlik değerine sahip yapı elemanları oluşturmak için, Türkiye koşullarında hangi malzemelerin hangi kalınlıklarda uygulanacağını tespit etmeye yöneliktir.

Türkiye’de yerleşimler 24 saatlik periyodunun ne kadarının sıcak ve ne kadarının soğuk geçtiğini ölçülmesiyle belirlenen 4 farklı derece gün bölgesine ayrılmıştır [1]. Bu çalışmada 4 farklı derece gün bölgesinden 3. derece gün bölgesi için, çeşitli ısı yalıtım uygulama örnekleri seçilerek gerekli ısı iletkenlik değerlerini sağlayan kesit kalınlıklarının tespiti ve yoğunlaşma tahkikleri yapılarak analiz edilmiştir. Sonuçta farklı yapı malzemeleri için, gerekli ısı geçirgenlik değerini sağlayan ve zararlı yoğunlaşma oluşturmeyen kesit kalınlıkları tespit edilmiştir. Bu çalışma ile yapı ürünü tercihi yapacak yapı profesyonellerine ısı yalıtım yönetmeliğine uyacak seçimleri yapmada kolaylık sağlayacak bilgiler elde edilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR (PREVIOUS STUDIES)

Başta duvarlar olmak üzere yapı kabuğunu oluşturan yapı elemanlarının ısı yalıtım özellikleri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, yapılan çalışmaların gerekli yalıtım kalınlıklarının tespit edilmesi üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Bu çalışmalarda farklı yalıtım malzemeleri ve Türkiye’nin farklı illeri için optimum yalıtım kalınlıkları tespit edilmiş ayrıca yalıtımın enerji tasarrufuna etkisi ve ısıtma enerjisi ihtiyacı hesaplanmıştır [2-10]. Örneğin Kürekçi vd tarafından yapılan çalışmada, doğalgaz yakıtlı örnek bir binada, taş yünü, cam yünü, extrüde polistren (XPS), ekspande polistiren köpük (EPS) ve poliüretan köpük (PU) ısı yalıtım malzemeleri için Türkiye’nin 81 iline ait uygun değer yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır [11].

Optimum yalıtım kalınlığının hesaplandığı çalışmaların yanında farklı duvar tipleri ve farklı ısı yalıtım malzemeleri için malzeme ve yalıtım kalınlıklarının hesaplandığı çeşitli çalışmalar da söz konusudur. Bostancıoğlu tarafından yapılan çalışmada, yapı kabuğunu oluşturan yapısal bileşenler olan, duvar ve çatı bölümünde kullanılan duvar/döşeme ve yalıtım malzemelerinin cinsi ve kalınlığı değiştirilerek oluşturulan farklı kabuk alternatifleri ile İstanbul’da bir konut için ısıtma maliyetleri, inşaat ve yaşam döngüsü maliyetleri hesaplanmıştır. Duvar malzemesi olarak farklı kalınlıklarda tuğla, beton briket, bims briket ve gaz beton seçilmiştir. Isı yalıtım malzemesi olarak ise duvarlarda yine farklı kalınlıklarda XPS ve taş yünü, çatılarda ise cam yünü seçilmiştir. Çalışmada 166 farklı yapı kabuğu alternatifi arasında en düşük ısıtma maliyeti 25 cm Gaz beton üzeri 8 cm XPS ısı yalıtımı ile 10 cm cam yünü yalıtımı ile sağlanmıştır. En yüksek ısıtma maliyeti ise, 25 cm Gaz beton duvar, sadece betonarme yüzeylerde 8 cm cam yünü yalıtım ve çatıda yine 8 cm cam yünü yalıtım yapıldığı durumda ortaya çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar ısı yalıtım performansını arttırmak için yalıtım kalınlığının artırılmasının zorunlu olmadığı, alternatif malzemeler kullanılarak eşdeğer performans sağlanabileceği ortaya konulmuştur [12].

Fertelli tarafından yapılmış bir diğer çalışmada ise, optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve geri ödeme süreleri altı farklı enerji türü (Likit petrol gazı, elektrik, akaryakıt, kömür, doğal gaz ve jeotermal enerji) ve dört farklı duvar türü (tuğla duvar, hava tabakalı tuğla duvar, bims blok duvar ve gaz beton blok duvar) için değerlendirilmiştir. Farklı iklim bölgelerindeki dört şehirde (Aydın, Trabzon, Malatya ve Sivas), iki farklı yalıtım malzemesi (taş yünü ve xps) için analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yalıtım kalınlıkları, 0 - 0,179 m arasında, enerji tasarrufu 0-235.053 \$ / m² arasında çeşitli yakıt ve duvar türlerine bağlı olarak geri ödeme süresi 0-11,53 yıl olarak tanımlanmıştır. Yapılan analiz ile optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde büyük oranda duvarın yapısı, izolasyon malzemesi ve yapının bulunduğu derece-gün sayısının etkili olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 3. derece gün bölgesinde yer alan Malatya ili için doğalgaz yakıt kullanılması durumunda yalıtım kalınlıkları tuğla duvar için 6,1 cm, hava tabakalı tuğla duvar için 5,4 cm, bims blok duvar için 4,4 cm ve gaz beton blok duvar için 3,3 cm olarak tespit edilmiştir [13]. Mishra ve arkadaşları Hindistan için yapmış oldukları çalışmada, üç farklı tip (taş, tuğla ve beton) duvar üzerine uygulanacak iki ayrı ısı yalıtım malzemesi (EPS ve XPS) için optimum yalıtım kalınlıkları tespit etmişlerdir [14].

Kaya tarafından yapılan tez çalışmasında ise en çok tercih edilen dolgu duvar sistemleri yapılan bir anket sonucu tuğla, bims blok ve Gaz beton olarak belirlenmiştir. En çok tercih edilen ısı yalıtım malzemeleri ise EPS, XPS, cam yünü ve taş yünüdür. En çok tercih edilen dış duvar sistemlerinin ısı geçirgenlik katsayıları (U değerleri) hesaplanmış ve bu değerlerin TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kurallarında 1. Derece-Gün

Bölgesi için belirtilen duvar U değerlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilip, maliyet analizi yapılmıştır. Ayrıca tuğla, bims blok ve Gaz beton duvarlar üzerine, EPS, XPS, cam yünü ve taş yünü malzeme ile yalıtım yapılarak, 1. Derece-Gün Bölgesi için optimum yalıtım kalınlıkları tespit edilmiştir [15].

Konu ile ilgili önceki çalışmaların bir kısmı da mevcut uygulamaların standartlara uygunluğunun ölçülmesi üzerine yapılmıştır. Aksoy tarafından yapılan bir çalışmada TS 825'e göre 3.derece gün bölgesinde yer alan Elazığ İlindeki gaz beton duvar ve sandviç duvar uygulamalarının ısı geçirgenlik katsayısı hesaplanarak ısı kayıpları bulunmuş ve bu değerler TS 825 standardına uygun uygulamalar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma ile mevcut uygulamaların yetersiz olduğu ve TS 825'in ön gördüğü detaylara uygun olarak bölgelere göre malzeme kalınlıklarının seçilmesi gerektiği belirtilmiştir [16]. Koçu ve Korkmaz tarafından yapılan çalışmada, Konya çevresindeki yapılarda ısı yalıtımı uygulamalarının TS 825'e göre değerlendirilmesi yapılmış, yapılarda eksik ve hatalı ısı yalıtımının çevre kirliliğine etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda yapılarda ısı yalıtımı konusunda TS 825'e uyulmadığı, gereken önemin verilmediği, neticede ısıtma için gereğinden fazla fosil yakıt tüketiminin arttığı ve Konya'da hava kirliliğinin zamanla Türkiye'de ilk sıralara çıktığı tespit edilmiştir [17]. Cihan vd. tarafından yapılan bir çalışmada ise Türkiye'de uygulanan çift duvar arası ısı yalıtım uygulamalarında betonarme elemanlarda oluşan ısı köprülerini değerlendirilmiş ve mevcut uygulamaların hatalı olduğu bununla birlikte istenen konfor koşullarının sağlanamadığı tespit edilmiştir [18]. Umaroğulları vd. yapılan bir diğer çalışmada, yalıtımsız duvar, çift tabakalı yalıtımlı duvar, ara kat ve teras çatı döşemeleri için döşeme ve giriş bölgelerinde meydana gelen sıcaklık ve ısı akısı dağılımları belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar enerji verimliliği açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışmada yalıtımın betonarme duvar kuruluşundaki üç farklı konumu Edirne ili soğuk dönem koşullarında incelenmiş ve yoğunlaşma açısından en ideal durumun dışarıdan yalıtımlı durum olduğu tespit edilmiştir [19].

3. DIŞ DUVARLARDA TS 825'E UYGUN ISI YALITIM ŞARTLARININ SAĞLANMASINA YÖNELİK UYGULAMALAR (APPLICATIONS FOR THE PURPOSE OF PROVIDING APPROPRIATE TS 825 INSULATION REQUIREMENTS)

Henüz gelişmekte olan ülkeler sınıfında yer alan Türkiye, ihtiyacı olan enerjinin %73'ünü ithalat yolu ile karşılamaktadır [20]. Bu durum ülke ekonomisi üzerinde büyük bir yük oluşturmaktadır ve ilgili kuruluşlar enerji ihtiyacını karşılamaya yönelik arayış içerisinde bulunmaktadır. Yapı sektörü de toplam enerji tüketiminde önemli bir paya sahiptir ve bu tüketimin büyük bir kısmını kullanım sürecinde ısısal konfor koşullarının sağlanması için harcanan enerji

oluşturmaktadır [21]. Yapıların kullanım sürecinde enerji tüketiminin azaltılmasının en basit yolu ısı yalıtım özelliğine sahip bir yapı inşa etmektir. Ancak ülkemizdeki ısı yalıtım özelliğine sahip bina sayısı oldukça azdır. Türkiye İstatistik Kurumu'nun 1998 hane halkı enerji tüketim araştırmasına göre, mevcut binaların % 84'ü tek camlıdır ve yalnızca % 16'sı çatı yalıtımına sahiptir. Isı, Su, Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği "Algılama Araştırması" verilerine göre ise, tüketicilerin ikamet ettikleri binalara yalıtım uygulaması yaptırması ele alındığında, yalnızca % 9'luk bir kesim yalıtım uygulamasına girmiştir [22]. Yalıtım uygulamalarının Türkiye'de coğrafi bölgelere göre dağılımına bakıldığında ise daha çok ısıtma yükünün fazla olduğu Doğu Anadolu, Marmara ve İç Anadolu bölgelerinde yapıldığı bu bölgelere göre daha ılıman iklime sahip diğer bölgelerde daha az tercih edildiği tespit edilmiştir [23]. Isı yalıtımının yeterince yaygınlaşmaması ısısal konfor koşullarının sağlanmasına yönelik enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Türkiye'de birim hacmi ısıtmak için harcanan enerji Fransa'dan % 46, İsveç'ten % 230 daha fazladır [17]. Yeni yapılan binalarda enerji etkinliği sağlamak için, daha iyi bir ısı yalıtımı, düşük ısı iletkenliğe sahip yapı bileşenleri oluşturularak elde edilebilir. İyi bir ısı yalıtımı daha düşük enerji tüketimi, buna paralel olarak daha düşük enerji faturası ve karbondioksit tüketimi sağlamaktadır.

Bir binanın ısıtılması için gerekli olan enerji ihtiyacında, yapı elemanlarının ısı geçirgenlik katsayısı (U, W/m²K) en önemli parametredir. Isı geçirgenlik katsayısı, çeşitli kalınlıklardaki katmanlardan (iç sıva + delikli tuğla + dış sıva gibi) oluşan yapı bileşeninin 1 m²'sinden 1°C'lik sıcaklık farkı bulunması durumunda saatte kJ cinsinden geçen ısı miktarını vermektedir [16]. TS 825 standardının amaçlarından biri "yeni yapılacak bir binaya ait çeşitli tasarım seçeneklerine standartta açıklanan hesap metodunu ve değerlerini uygulayarak, ideal enerji performansını sağlayacak tasarım seçeneğini belirlemek" şeklinde açıklanmıştır [24]. Bu standart içerisinde illere göre derece gün bölgeleri ayrılmış olup, yalıtım performansını hesaplanmak istenen yapı elemanı ve şehir bölgesi seçilerek gereken U değeri çizelgeden okunabilir. Çizelgede verilen değerler, bölgelere göre kullanılması tavsiye edilen en büyük değerlerdir. Binada hesaplama yapılacak bölümlerde hesaplanacak U değerleri, aşağıdaki çizelgede yer alan değerleri geçmemelidir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Binada hesaplama yapılacak bölümlerde kullanılacak U değerleri (U values to be used in the parts where calculation will be made in building) [24]

	U DUVAR (W/m ² K)	U TAVAN (W/m ² K)	U TABAN (W/m ² K)	U PENCERE (W/m ² K)
1.Bölge	0,70	0,45	0,70	2,40
2.Bölge	0,60	0,40	0,60	2,40
3.Bölge	0,50	0,30	0,45	2,40
4.Bölge	0,40	0,25	0,40	2,40

TS 825'in ön gördüğü ısı yalıtım değerlerine ulaşmak için yapılacak yalıtım uygulamaları literatürde ısı yalıtım malzemesinin konumuna göre duvarların dış yüzeyine (Mantolama), duvarın iç yüzeyine, çift duvar arasına (Sandviç Duvar) ve havalandırılmalı dış duvar yalıtım uygulamaları (Giydirme Cephe Sistemi) olarak 4 farklı sistemle karşımıza çıkmaktadır [25]. Bu dört yöntemden farklı olarak yeni geliştirilmiş yapı malzemelerinin kullanımı ile ısı yalıtım malzemesi kullanmadan da yapı bileşenleri kullanılarak istenen ısı yalıtım seviyesine ulaşılabilir.

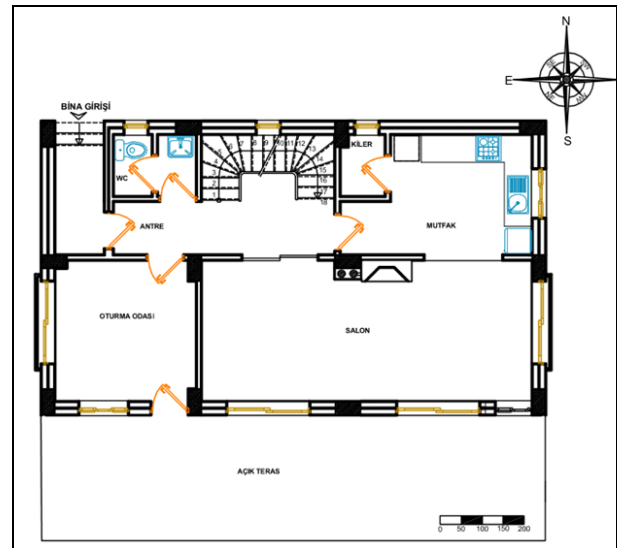
Çalışmanın bu bölümünde ülkemizde çok sıkça uygulanan, ısı ve nem kontrolü açısından karakteristik örnek oluşturacağı düşünülen duvarların belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Bu amaçla ülkemizde kullanımı yaygın olan ısı yalıtım malzemelerinden EPS köpük ile yalıtılmış duvar bileşenleri ve TS 825'in ön gördüğü ısı yalıtım şartlarının sağlanabileceğini gösteren duvar blokları ile dış duvar bileşenleri oluşturulmuştur. Farklı bileşenlerle 3. derece gün bölgesine uygun ve aynı zamanda yoğuşma meydana getirmeyecek ısı yalıtım malzemesi ve duvar bileşeni kalınlıkları tespit edilmiştir. Bu amaçla iki katlı betonarme bir konut projesi kullanılmıştır. Örnek bina modelinde oluşturulan duvar detayları için malzeme kalınlıkları, yoğuşma tahkikleri ve bina modeli için sağladığı ısı enerjisi kazançları belirlenmiştir.

Malzeme kalınlıklarının tespiti, yoğuşma tahkikleri ve ısı enerjisi kazançlarının hesabı için Türkiye Gaz beton Üreticileri Birliği'nin hazırladığı TS 825 Isı Yalıtım Hesaplama Programı'ndan faydalanılmıştır. Bu programla yürürlükteki TS 825 standardında açıklanan hesap kabul ve yöntemlerine tam olarak uyumlu olan yazılımla, farklı yapılar ve bunlara bağlı çok çeşitli kesitler, kapı ve pencereler oluşturulabilmektedir. Geliştirilen yazılım kullanılarak özgül ısı kaybı, yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı, yoğuşma çizelgeleri ve grafikleri kolaylıkla hazırlanabilmekte, raporlar oluşturulabilmektedir [26].

Bu araştırma kapsamında aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

Hesaplamalarda konutların iç sıcaklıkları 19°C , iç ortam bağıl nemi, $\phi_i = \%65$ 'tir. Yakıt türü kömür ve havalandırmasının doğal olduğu kabul edilmiştir. Dış duvarların termik konfor koşuluna göre (tam ısı korunumu) boyutlandırılmasında Eichler' in de kabul etmiş olduğu 3°C 'lik fark değeri esas alınmıştır [27]. Hesaplamalarda kullanılan örnek binaya ve binanın yapı elemanlarında ait özellikler ise şöyledir;

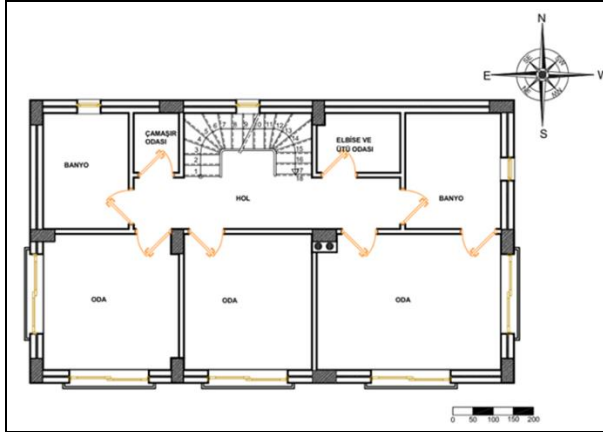
Örnek bina betonarme karkas sistemde, iki katlı, ahşap kırma çatılı müstakil bir bina olarak tasarlanmıştır. Kapı ve pencere doğramaları ısı yalıtımlı PVC doğrama olarak kabul edilmiştir. Zemin katta, ön cephede salon ve oturma odası, arka cephede mutfak, giriş, banyo, giriş ve merdiven vardır. Üst katta, ön cephede yatak odaları, arka cephede banyo, elbise odası gibi hacimler vardır (Şekil 1, 2, 3, 4). Yapıya ait çeşitli ölçüler ve katmanlar aşağıda Çizelge halinde verilmiştir (Çizelge 2 ve 3).



Şekil 1. Betonarme iskelet yapının zemin kat planı (Ground floor plan of reinforced concrete skeleton building)

Çizelge 2. Örnek yapının yapı elemanlarına ait ölçüler (Dimensions of building elements of sample building)

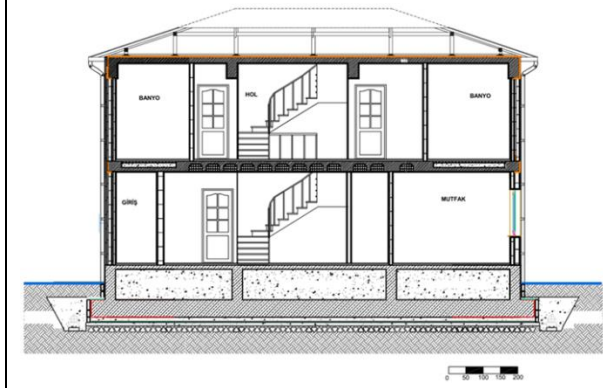
Toplam Alan (m ²)	Taban Alanı (m ²)	Kat Adedi	Binanın Hacmi (m ³)	Toplam Duvar Alanı (m ²)	Toplam Kolon Kiriş Alanı (m ²)	Net Dolgu Duvar Alanı (m ²)	Kolon Kiriş Alanı / Dış Cephe Alanı	Pencere Alanı / Duvar Alanı (%)	Toplam Pencere Alanı (m ²)	Cephelerde Pencerelerin Alanları (m ²)			
										Güney	Kuzey	Doğu	Batı
168,00	84,00	2	546,000	240,000	102,42	124,72	0,40	20	46,48	24,94	1,80	8,80	10,84



Şekil 2. Betonarme iskelet yapının normal kat planı (Second floor plan of reinforced concrete skeleton building)



Şekil 3. Betonarme iskelet yapının ön görünüşü (Front view of reinforced concrete skeleton building)



Şekil 4. Betonarme iskelet yapının kesiti (Section of reinforced concrete skeleton building)

Çizelge 3. Örnek yapının dış yapı elemanlarına ait katmanlar (Layers of outer building elements of sample building)

Tavan döşemesi katmanları (içten dışa):

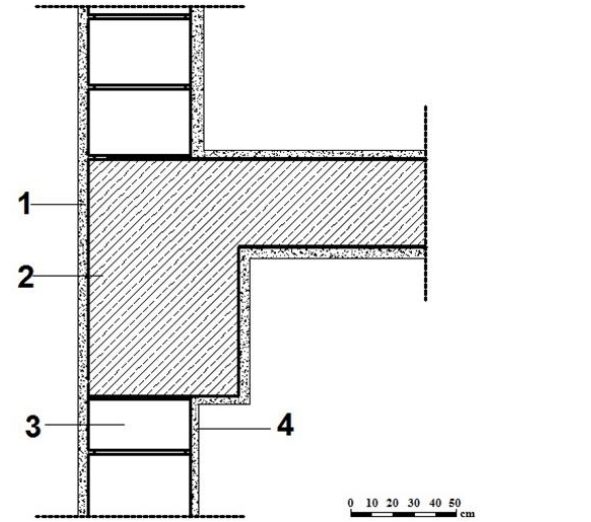
- 1 cm kalınlığında 0,70 W/mK ısı iletkenliğine sahip alçı sıva,
- 15 cm kalınlığında 2,5 W/mK ısı iletkenliğine sahip betonarme döşeme,
- 2,5 cm kalınlığında 1,4 W/mK ısı iletkenliğine sahip çimento şap,

- 11 cm kalınlığında 0,035 W/mK ısı iletkenliğine sahip mineral lifli ısı yalıtım malzemesi (taş yünü)

Zemine oturan döşeme altında bulunan katmanlar (içten dışa doğru):

- 3 cm kalınlığında 0,20 W/mK ısı iletkenliğine sahip (kayın, meşe) parke döşeme kaplaması
- 0,5 cm kalınlığında 0,035 W/mK ısı iletkenliğine sahip yalıtım şiltesi
- 3 cm kalınlığında 1,4 W/mK ısı iletkenliğine sahip çimento şap
- 3 cm kalınlığında 1,65 W/mK ısı iletkenliğine sahip tesviye betonu
- 10 cm kalınlığında 0,035 W/mK ısı iletkenliğine sahip ekstrüde polistiren köpük ısı yalıtım malzemesi uygulanmıştır.
- 90 cm kalınlığında 2,0 W/mK ısı iletkenliğine sahip stabilize dolgu
- 40 cm kalınlığında 2,5 W/mK ısı iletkenliğine sahip betonarme temel

Kapı: 2,0 W/mK ısı iletkenliğine sahip plastik doğrama



1. Çimento harçlı dış sıva 3 cm $\lambda=1,60$ W/mK, $\mu= 15$
2. Betonarme kiriş 30 cm $\lambda=2,5$ W/mK, $\mu= 100$
3. Yatay delikli tuğla 20 cm $\lambda=0,33$ W/mK, $\mu= 8$
4. Alçı harçlı, kireçli alçı harcı 2 cm $\lambda=0,70$ W/mK, $\mu= 10$

Şekil 5. Yalıtımsız duvar detayı (Uninsulated wall detail)

Örnek binanın dış duvarları sekiz ayrı şekilde detaylandırılmıştır; a) Yalıtımsız tuğla duvar b) İçten yalıtımlı tuğla duvar c) Dıştan yalıtımlı tuğla duvar d) Ortadan yalıtımlı tuğla duvar e) Gaz beton blok duvar f) Bims blok duvar g) Perlitli beton blok duvar h) Bims agregalı EPS tabakalı blok duvar. Gaz beton blok, bims blok, perlitli beton blok ve bims agregalı EPS yalıtımlı blok elemanlar Türkiye’de ticari olarak piyasaya sunulan ürünler olduğu için tercih edilmiştir. Isı yalıtım malzemesi olarak ta yine ülkemizde yaygın olarak

kullanılan EPS ısı yalıtım levhası seçilmiştir. Bu uygulamalar için ayrı ayrı hesaplama yapılmıştır.

Yalıtımsız tuğla duvar uygulaması (Uninsulated brick wall application): Binanın öncelikle yalıtımsız durumu analiz edildi ve binanın yapı elemanlarının yalıtımsız durumdaki ısı kayıpları tespit edildi (Şekil 5). Betonarme karkas taşıyıcı sistemde yatay delikli tuğla duvarlı olarak öngörülen yapının duvarının ısı geçirgenlik katsayısı $U = 1,215 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmıştır. Duvar içerisinde yoğuşma meydana gelmiştir, ancak yoğuşan su miktarı TS 825'te belirtilen sınırlar içerisinde ve yoğuşan suyun kütlesi buharlaşan suyun kütlesinden küçük ($0,04 < 1 \text{ kg/m}^2$) olduğundan yoğuşma zararsızdır. Kolon kiriş bölgesi için $U = 2,965 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dır ve bu bölgede ise daha yüksek miktarda yoğuşma meydana gelmiştir. Yoğuşma miktarı TS 825 te belirtilen sınırlardan yüksektir ($4,56 > 1 \text{ kg/m}^2$) ancak yoğuşan suyun kütlesi buharlaşan suyun kütlesinden küçüktür.

Binanın yalıtımsız durumu için yapılan hesaplamalar sonucu iletim yoluyla gerçekleşen ısı kaybı $717,66 \text{ W/K}$, havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı $115,32 \text{ W/K}$, binanın toplam ısı kaybı ise $832,98 \text{ W/K}$ olarak bulunmuştur. TS 825 kapsamında müsaade edilen maksimum yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı $29,99 \text{ kWh/m}^3$

bölgesi için tuğla duvar üzerine EPS köpük ısı yalıtım malzemesi için gerekli kalınlık 5 cm olarak hesaplanmıştır. Isı geçirgenlik katsayısı $U = 0,445 \text{ W/m}^2\text{K}$ bulunmuştur. Duvarda ısı yalıtımı tabakasında yoğuşma meydana gelmiştir, ancak duvarda yoğuşan su miktarı TS 825'te belirtilen sınırlar içerisinde ve yoğuşan suyun kütlesi buharlaşan suyun kütlesinden küçük ($0,31 < 0,50 \text{ kg/m}^2$) olduğundan yoğuşma zararsızdır. Isı tutucudan geçen buhar, soğuk bölgede yoğuşma olasılığına sahiptir. Isı tutucu malzemenin sıcak tarafına buhar kesici bir katman eklenerek yoğuşma önlenir.(Gürdal ve Acun, 2005). Kolon kiriş bölgesinde gerekli yalıtım kalınlığı 6 cm olarak tespit edilmiştir, ancak yoğuşmanın standart değerlerde kalması için yalıtımın 3 cm 'si içten, 3 cm 'si dıştan uygulanmıştır. Bu şekilde ve kolon kiriş bölgesi için ısı geçirgenlik katsayısı $U = 0,489 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmış ve yoğuşma meydana gelmemiştir (Şekil 6). Binanın içten yalıtımlı durumu için hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri çizelgede verilmiştir (Çizelge 5).

Dıştan yalıtımlı tuğla duvar uygulaması (Externally insulated brick wall application): Tuğla duvar üzerine EPS köpük ısı yalıtım malzemesi için hesaplanan gerekli

Çizelge 4. Örnek yapının yalıtımsız durumda yapı elemanlarındaki ısı kayıpları (Heat losses of the sample building in uninsulated building elements)

YAPI ELEMANLARI	ALAN (m ²)	M ² BAŞINA ISI KAYBI (W/m ² K)	TOPLAM ISI KAYBI (W/K)
Betonarme tavan	84	3,349	225,05
Betonarme kolonlar ve kirişler	68,22	2,965	206,02
Tuğla dolgu duvar	124,72	1,215	152,66
Pencere	46,38	2	92,76
Zemine oturan döşeme	84	0,886	37,21
Kapı	1,98	2	3,96
Toplam			717,66

iken yalıtımsız binanın yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı $91,84 \text{ kWh/m}^3$ tür. Yalıtımsız binanın yapı elemanlarının ısı kayıpları aşağıdaki gibidir (Çizelge 4).

İçten yalıtımlı tuğla duvar uygulaması (Internally insulated brick wall application): Üçüncü derece gün

kalınlık 5 cm 'dir. Isı geçirgenlik katsayısı $U = 0,445 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak bulunmuştur ve yoğuşma meydana gelmemiştir. Kolon kiriş bölgesinde gerekli yalıtım kalınlığı 6 cm olarak tespit edilmiştir, ısı geçirgenlik katsayısı $U = 0,489 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmış ve bu

Çizelge 5. İçten/dıştan yalıtımlı duvarda hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri (Calculated values of heat loss and energy needs in internal / external wall insulation)

İletim yolu ile ısı kaybı (W/K)	220,09
Havalandırma yoluyla ısı kaybı (W/K)	115,32
Toplam ısı kaybı (W/K)	336,22
TS 825'e göre yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,99
Yapının hesaplanan yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,47

Çizelge 6. Ortadan yalıtımlı duvarda hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri (Calculated values of heat loss and energy needs in double-layer walls)

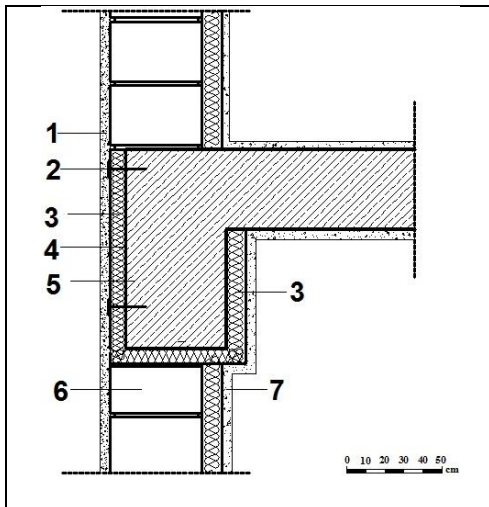
İletim yolu ile ısı kaybı (W/K)	223,5
Havalandırma yoluyla ısı kaybı (W/K)	115,32
Toplam ısı kaybı (W/K)	338,82
TS 825'e göre yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,99
Yapının hesaplanan yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,30

bölgede de yoğuşma meydana gelmemiştir. Yalıtım kalınlığının dış cephede süreklilik ve işçilik kolaylığı açısından 6 cm alınması uygun olacaktır (Şekil 7). Binanın dıştan yalıtımlı durumu için hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri içten yalıtımlı durumla aynıdır (Çizelge 5)

Ortadan yalıtımlı tuğla duvar uygulaması (Insulated cavity brick wall application): Üçüncü derece gün bölgesi için çift tabakalı tuğla duvar arasında EPS köpük ($\lambda=0,035$ W/mK) ısı yalıtım malzemesi için gerekli kalınlık 5 cm'dir. Isı geçirgenlik katsayısı $U = 0,434$ W/m²K olarak hesaplanmıştır. Duvarda ısı yalıtım tabakasında yoğuşma meydana gelmiştir, ancak duvarda yoğuşan su miktarı TS 825'te belirtilen sınırlar içerisinde ve yoğuşan suyun kütlesi buharlaşan suyun kütlesinden küçük ($0,24$ kg/m² < $0,50$ kg/m²) olduğundan yoğuşma zararsızdır. Kolon kiriş bölgesinde gerekli yalıtım kalınlığı 6 cm olarak tespit edilmiştir, ancak yoğuşmanın standart değerlerde kalması için yalıtımın 3 cm'si içten, 3 cm'si dıştan uygulanmıştır. Bu şekilde ve kolon kiriş bölgesi için ısı geçirgenlik katsayısı $U=0,489$ W/m²K olarak hesaplanmış ve yoğuşma meydana gelmemiştir (Şekil 8). Binanın ortadan yalıtımlı durumu için hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri çizelgede verilmiştir (Çizelge 6).

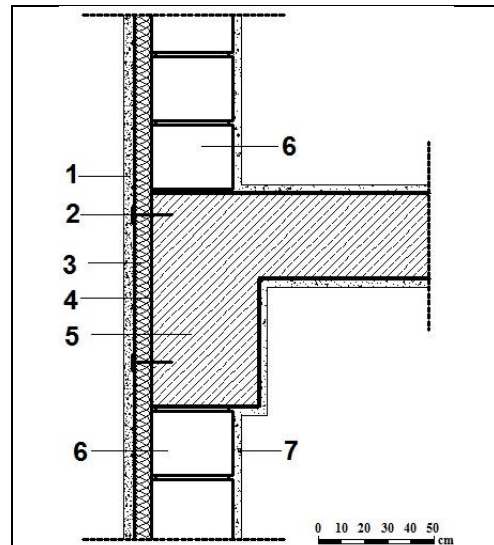
Gaz beton uygulaması (Aerated concrete application): Gaz beton blok uygulaması için iki farklı hesap yapılmıştır. İlki 400 kg/m³ birim hacim ağırlıklı (BHA), $\lambda=0,13$ W/mK ısı iletkenlik hesap değerine sahip gaz beton bloktur ve gerekli ısı yalıtımı değerini sağlayan gaz beton blok kalınlığı 25 cm'dir. Isı geçirgenlik katsayısı $U = 0,434$ W/m²K olarak hesaplanmıştır. Duvarda yoğuşma standart tabakalarda meydana gelmiştir, ancak duvarda yoğuşan su miktarı TS 825'te belirtilen sınırlar içerisinde ve yoğuşan suyun kütlesi buharlaşan suyun kütlesinden küçük ($0,60$ kg/m² < 1 kg/m²) olduğundan yoğuşma zararsızdır. Kolon kiriş bölgesinde $U=0,469$ W/m²K olarak hesaplanmış ve kolon kiriş bölgesinde dıştan 9 cm kalınlığında gaz beton ısı yalıtım levhası kullanılarak yoğuşma engellenmiştir. Kolon kiriş bölgesinde EPS köpük ($\lambda=0,035$ W/mK) ile yalıtım uygulandığında gerekli kalınlık 6 cm'dir (Şekil 9). Binanın gaz beton blok uygulaması için hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri çizelgede verilmiştir (Çizelge 7).

İkincisi 600 kg/m³ BHA'lı, $\lambda=0,19$ W/mK ısı iletkenlik hesap değerine sahip gaz beton bloktur ve gerekli ısı yalıtımı değerini sağlayan gaz beton blok kalınlığı 35 cm'dir. Isı geçirgenlik katsayısı $U = 0,487$ W/m²K olarak hesaplanmıştır. Duvarda yoğuşma standart tabakalarda



Çimento harçlı dış sıva 2 cm $\lambda=1,60$ W/mK, $\mu= 15$
Döbel
Isı yalıtım levhası (eps) duvarda 5 cm kalınlığında kolon kiriş birleşiminde 3 cm içten 3 cm dıştan toplam 6 cm kalınlığında $\lambda=0,035$ W/mK, $\mu=30$
Yapıştırıcı
Betonarme kiriş 30 cm $\lambda=2,5$ W/mK, $\mu= 100$
Yatay delikli tuğla 20 cm $\lambda=0,33$ W/mK, $\mu= 8$
Alçı harçlı, kireçli alçı harcı 2 cm $\lambda=0,70$ W/mK, $\mu= 10$

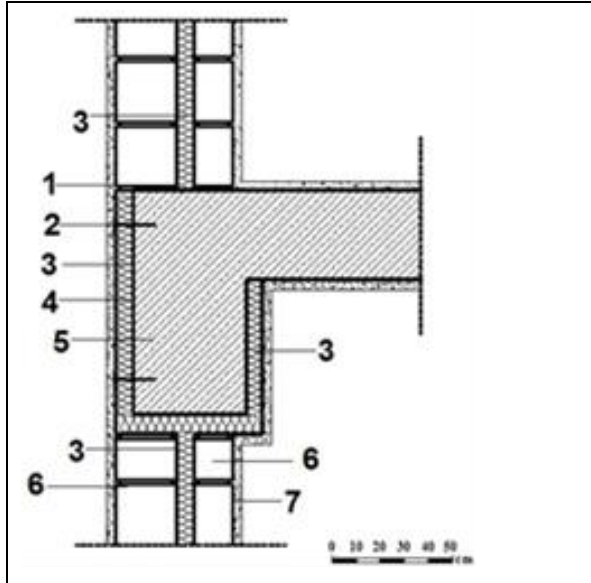
Şekil 6. İçten yalıtımlı duvar detayı (Internally insulated wall detail)



Çimento harçlı dış sıva 2 cm $\lambda=1,60$ W/mK, $\mu= 15$
Döbel
Isı yalıtım levhası (eps) 6 cm $\lambda=0,035$ W/mK, $\mu=30$
Yapıştırıcı
Betonarme kiriş 30 cm $\lambda=2,5$ W/mK, $\mu= 100$
Yatay delikli tuğla 20 cm $\lambda=0,33$ W/mK $\mu= 8$
Alçı harçlı, kireçli alçı harcı 2 cm $\lambda=0,70$ W/mK $\mu= 10$

Şekil 7. Dıştan yalıtımlı duvar detayı (Externally insulated wall detail)

meydana gelmiştir, ancak duvarda yoğuşan su miktarı TS 825'te belirtilen sınırlar içerisinde ve yoğuşan suyun kütlesi buharlaşan suyun kütlesinden küçük ($0,25 \text{ kg/m}^2 < 1 \text{ kg/m}^2$) olduğundan yoğuşma zararsızdır. Kolon giriş bölgesinde $U=0,469 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmış ve kolon giriş bölgesinde dıştan 9 cm kalınlığında gaz beton ısı yalıtım levhası kullanılarak yoğuşma engellenmiştir. Kolon giriş bölgesinde EPS köpük ($\lambda=0,035 \text{ W/mK}$) ile yalıtım uygulandığında gerekli kalınlık 6 cm'dir (Şekil 9).



- 1- Çimento harçlı dış sıva 2 cm $\lambda=1,60 \text{ W/mK}$, $\mu= 15$
- 2- Dübül
- 3- Isı yalıtım levhası (eps) duvarda 5 cm kalınlığında kolon giriş birleşiminde, 3cm içten 3 cm dıştan toplam 6 cm kalınlığında $\lambda=0,035 \text{ W/mK}$, $\mu= 30$
- 4- Yapıştırıcı
- 5- Betonarme kiriş 30 cm $\lambda=2,5 \text{ W/mK}$, $\mu= 100$
- 6- Yatay delikli tuğla 13,5 - 8,5 cm $\lambda=0,33 \text{ W/mK}$, $\mu= 8$
- 7- Alçı harçlı, kireçli alçı harcı 2 cm $\lambda=0,70 \text{ W/mK}$, $\mu= 10$

Şekil 8. Çift tabakalı duvar detayı (Wall detail with double layer)

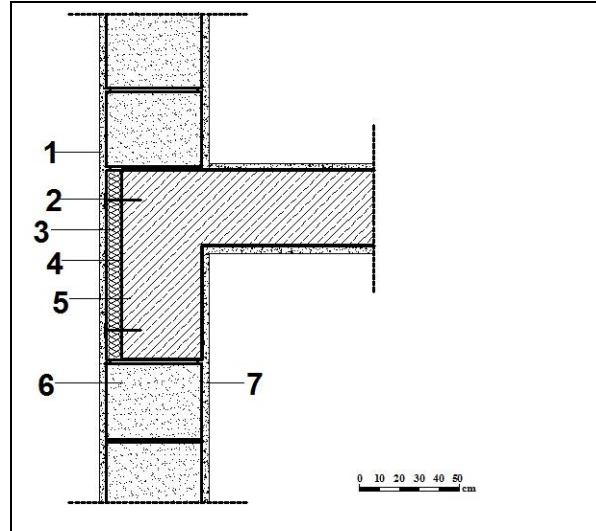
Çizelge 7. Gaz beton (BHA: 400 kg/m^3) duvarda hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri (Calculated values of heat loss and energy needs in aerated concrete block wall)

İletim yolu ile ısı kaybı (W/K)	226,50
Havalandırma yoluyla ısı kaybı (W/K)	115,32
Toplam ısı kaybı (W/K)	341,82
TS 825'e göre yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,99
Yapının hesaplanan yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,67

Binanın gaz beton blok uygulaması için hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri çizelgede verilmiştir (Çizelge 8).

Bims blok uygulaması (Pumice block application):

Duvar bileşeni olarak bims blok ($\lambda=0,186 \text{ W/mK}$) kullanıldığında duvarda gerekli ısı yalıtımı değerini sağlayan blok kalınlığı 35 cm'dir. Isı geçirgenlik katsayısı $U = 0,478 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmış ve duvarda yoğuşma meydana gelmemiştir. Kolon giriş bölgesinde $U=0,489 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmış ve kolon giriş bölgesinde dıştan 6 cm kalınlığında EPS köpük ısı yalıtım levhası kullanılarak yoğuşma engellenmiştir (Şekil 10). Binanın bims blok uygulaması



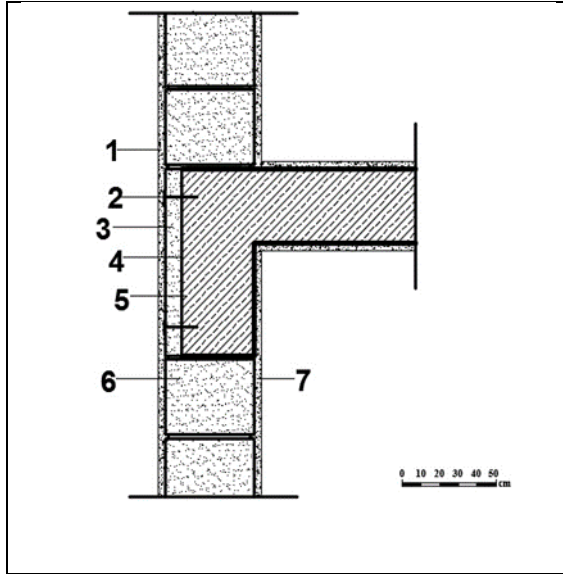
- 1- Çimento harçlı dış sıva 2 cm $\lambda=1,60 \text{ W/mK}$, $\mu= 15$
- 2- Dübül
- 3- Isı yalıtım levhası (gazbeton) kolon giriş birleşiminde, 9 cm kalınlığında $\lambda=0,05 \text{ W/mK}$, $\mu= 3$
- 4- Yapıştırıcı
- 5- Betonarme kiriş 30 cm $\lambda=2,5 \text{ W/mK}$, $\mu=100$
- 6- A) 400 kg/m^3 yoğunluğa sahip gaz beton blok 25 cm kalınlığında $\lambda=0,13 \text{ W/mK}$, $\mu= 8$
- 6- B) 600 kg/m^3 yoğunluğa sahip gaz beton blok 35 cm kalınlığında $\lambda=0,19 \text{ W/mK}$, $\mu= 8$
- 7- Alçı harçlı, kireçli alçı harcı 2cm $\lambda=0,70 \text{ W/mK}$, $\mu= 10$

Şekil 9. Gazbeton blok duvar detayı (Wall detail of aerated concrete block)

Çizelge 8. Gaz beton (BHA: 600 kg/m^3) duvarda hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri (Calculated values of heat loss and energy needs in aerated concrete block wall)

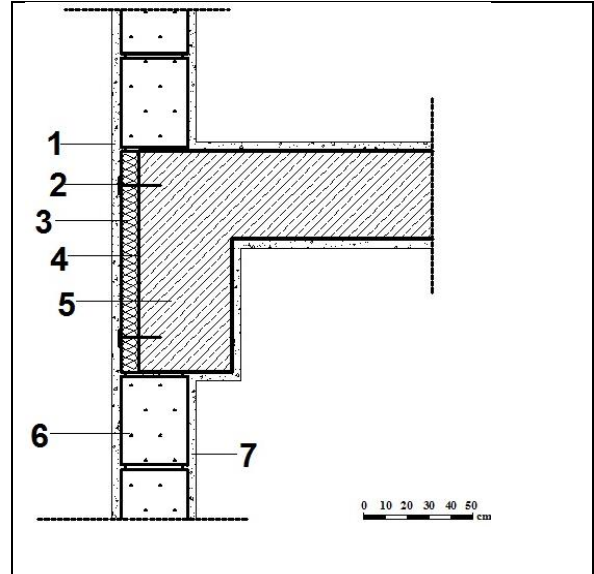
İletim yolu ile ısı kaybı (W/K)	228,75
Havalandırma yoluyla ısı kaybı (W/K)	115,32
Toplam ısı kaybı (W/K)	344,07
TS 825'e göre yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,99
Yapının hesaplanan yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,95

için hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri çizelgede verilmiştir (Çizelge 9).



1. Çimento harçlı dış sıva 2 cm $\lambda=1,60$ W/mK, $\mu=15$
2. Dübel
3. Isı yalıtım levhası (eps) kolon kiriş birleşiminde, 6 cm kalınlığında $\lambda=0,035$ W/mK, $\mu=30$
4. Yapıştırıcı
5. Betonarme kiriş 30 cm kalınlığında $\lambda=2,5$ W/mK, $\mu=100$
- Bims blok 35 cm kalınlığında $\lambda=0,186$ W/mK, $\mu=8$
6. Alçı harçlı, kireçli alçı harcı 2 cm $\lambda=0,70$ W/mK, $\mu=10$

Şekil 10. Bims blok duvar detayı (Pumice block wall detail)



1. Çimento harçlı dış sıva 2 cm $\lambda=1,60$ W/mK, $\mu=15$
2. Dübel
3. Isı yalıtım levhası (genleştirilmiş perlitli) kolon kiriş birleşiminde, 9 cm kalınlığında $\lambda=0,05$ W/mK, $\mu=8$
4. Yapıştırıcı
5. Betonarme kiriş 30 cm kalınlığında $\lambda=2,5$ W/mK $\mu=100$
6. Perlitli blok 15 cm kalınlığında $\lambda=0,060$ W/mK, $\mu=8$
7. Alçı harçlı, kireçli alçı harcı 3 cm $\lambda=0,70$ W/mK $\mu=10$

Şekil 11. Perlitli blok duvar detayı (Perlite block wall detail)

Çizelge 9. Bims blok duvarda hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri (Calculated values of heat loss and energy needs in pumice block wall)

İletim yolu ile ısı kaybı (W/K)	228,99
Havalandırma yoluyla ısı kaybı (W/K)	115,32
Toplam ısı kaybı (W/K)	344,31
TS 825'e göre yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,99
Yapının hesaplanan yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,98

Çizelge 10. Perlit agregalı blok duvarda hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri (Calculated values of heat loss and energy needs in perlite block wall)

İletim yolu ile ısı kaybı (W/K)	213,57
Havalandırma yoluyla ısı kaybı (W/K)	115,32
Toplam ısı kaybı (W/K)	328,89
TS 825'e göre yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,99
Yapının hesaplanan yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	28,08

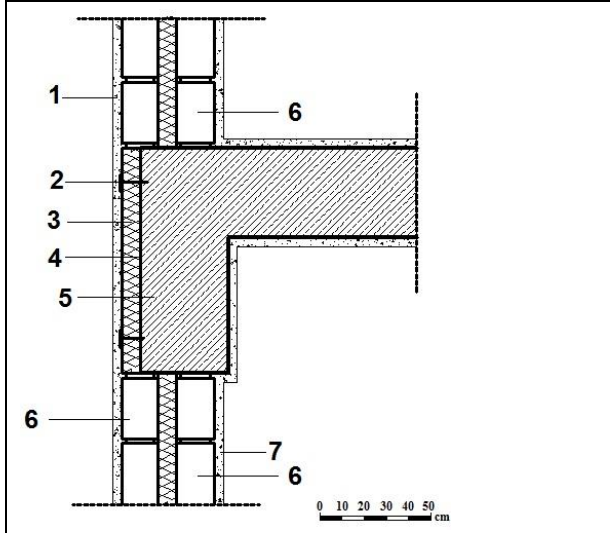
Perlit agregalı blok uygulaması (Perlite aggregated block application): Duvar bileşeni olarak perlit agregalı blok ($\lambda=0,060$ W/mK) kullanıldığında duvarda ısı yalıtımı değerini sağlayan blok kalınlığı 15 cm'dir, ticari olarak 16 cm kalınlıkta temin edilebilmektedir. Isı geçirgenlik katsayısı $U = 0,367$ W/m²K olarak hesaplanmıştır.

Duvarda yoğuşma standart tabakalarda meydana gelmiştir, ancak duvarda yoğuşan su miktarı TS 825'te belirtilen sınırlar içerisinde ve yoğuşan suyun kütlesi buharlaşan suyun kütlesinden küçük ($0,49$ kg/m² < 1 kg/m²) olduğundan yoğuşma zararsızdır. Kolon kiriş bölgesinde $U=0,469$ W/m²K olarak hesaplanmış ve

engellenmiştir. Kolon kiriş bölgesinde EPS köpük ısı yalıtım levhası kullanıldığında 6 cm kalınlık yeterli olmaktadır. (Şekil 11). Binanın perlit agregalı blok uygulaması için hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri çizelgede verilmiştir (Çizelge 10).

EPS yalıtımlı bims blok uygulaması (Application of pumice block with EPS insulated): EPS yalıtımlı bims blok için gerekli kalınlık 20 cm olarak tespit edilmiştir. Bu kalınlık için $U=0,352$ W/m²K olarak hesaplanmış ve duvarda yoğuşma standart tabakalarda meydana gelmiştir. Duvarda yoğuşan su miktarı TS 825'te belirtilen sınırlar içerisinde $6,26 > 1$ kg/m² değildir. Yoğuşan suyu buharlaşma yoluyla atılabilmektedir.

Ancak yapı bileşenlerinin nemlenmesi ısı iletkenlik katsayılarını arttıracığından yoğuşmanın da artması muhtemeldir. Kolon giriş bölgesinde dıştan 6 cm kalınlığında EPS köpük ısı yalıtım levhası kullanılarak $U=0,489$ W/m²K olarak hesaplanmış ve yoğuşma engellenmiştir (Şekil 12). Binanın perlit agregalı blok uygulaması için hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri çizelgede verilmiştir (Çizelge 11).



- 1- Çimento harçlı dış sıva 2 cm $\lambda=1,60$ W/mK, $\mu=15$
- 2- Döbel
- 3- Isı yalıtım levhası (eps) kolon giriş birleşiminde, 6 cm kalınlığında $\lambda=0,035$ W/mK
- 4- Yapıştırıcı
- 5- Betonarme kiriş 30 cm kalınlığında $\lambda=2,5$ W/mK
- 6- EPS'li Duvar bileşeni 20 cm kalınlığında $\lambda=0,076$ W/mK
- 7- Alçı harçlı, kireçli alçı harcı 2 cm $\lambda=0,70$ W/mK

Şekil 12. Isı yalıtımlı bims blok duvar detayı (Wall detail of perlite block with EPS)

Çizelge 11. Bims agregalı hafif beton ve EPS yalıtımlı blok duvarda hesaplanan ısı kaybı ve enerji ihtiyacı değerleri (Calculated values of heat loss and energy needs in double-layer block wall)

İletim yolu ile ısı kaybı (W/K)	213,27
Havalandırma yoluyla ısı kaybı (W/K)	115,32
Toplam ısı kaybı (W/K)	328,59
TS 825'e göre yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	29,99
Yapının hesaplanan yıllık ısıtma ihtiyacı (kWh/m ³)	28,05

Aşağıda farklı duvar detayları için yapılan analiz sonuçları toplu olarak çizelge halinde verilmiştir (Çizelge 12). Sonuçlarda yapı elemanları aracılığı ile gerçekleşen ısı kayıplarındaki artışa paralel olarak, binanın yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacının da arttığı görülmüştür. Yapının duvarlarının ısı yalıtımsız hali ile standarda uygun yalıtım şartlarının sağlandığı durumlar karşılaştırıldığında enerji ihtiyacının en az 1/3 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 12. Farklı bileşenlerle oluşturulmuş duvarlarda oluşan ısı kayıpları ve bu duvarların bulunduğu yapıların yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı (Heat losses in walls formed with different components and annual heating energy need of the buildings that have these walls)

Duvar örnekleri	Duvar kalınlığı (cm)	Isı yalıtım (eps) kalınlığı (cm)	Betonarme yüzey yalıtımı	Duvarda yoğuşma tahkiki sonucu	Kolon-kiriş bölgesinde yoğuşma tahkiki sonucu	U değeri (W/m ² K)	Toplam ısı kaybı (W/K)	TS 825'e göre yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh/m ³)	Hesaplanan yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh/m ³)
Yalıtımsız duvar örneği									
Yalıtımsız duvar	19	Yok	Yok	Var	Var	1,215	808,75	29,99	91,84
Yalıtımlı duvar örnekleri									
İçten yalıtımlı duvar	19	5	6 cm (eps)	Zararsız	Yok	0,445	224,87	29,99	29,47
Dıştan yalıtımlı duvar	19	5	3 cm + 3 cm (eps)	Yok	Yok	0,445	224,87	29,99	29,47
Ortadan yalıtımlı duvar	19	5	6 cm (eps)	Zararsız	Yok	0,434	338,82	29,99	29,30
Uygun yapı malzemesi seçilen duvar örnekleri									
Gaz beton duvar (400 kg/m ³)	25	Yok	9 cm (gaz beton)	Zararsız	Yok	0,434	341,82	29,99	29,67
Gaz beton duvar (600 kg/m ³)	35	Yok	9 cm (gaz beton)	Zararsız	Yok	0,487	344,07	29,99	29,95
Bims blok duvar	35	Yok	6 cm (eps)	Yok	Yok	0,478	344,31	29,99	29,98
Perlitli blok duvar	15	Yok	9 cm (perlit)	Zararsız	Yok	0,367	328,89	29,99	28,08
Tabakalı blok duvar	20	Yok	6 cm (eps)	Zararsız	Yok	0,352	328,59	29,99	28,05

Yalıtım malzemesi kullanılan duvar detayları ile doğrudan yapı bileşenleri ile yalıtım şartlarının sağlandığı detaylar karşılaştırıldığında ise, yapı bileşenlerinin kalınlığının çok fazla arttırmaya gerek kalmaksızın, enerji kaybı değerinin ısı yalıtımlı örneklerden daha düşük seviyede kaldığı belirlenmiştir. Yapı bileşeni ve yalıtım malzemesi için elde edilen kalınlık değerleri 3. Derece gün bölgesi için TS 825 tarafından istenen yapı elemanları ısı geçirgenlik (U) sayısını sağlayan ölçülerdir. Yapının ısı kayıplarını daha fazla azaltmak ve yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacını düşürmek için ısı yalıtım malzemesi ve yapı bileşeni kalınlıkları artırılabilir.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Oluşturulan farklı detaylandırmalara ait veriler şu şekilde değerlendirilmiştir;

Tuğla dolgu duvarlı betonarme iskelet yapı, EPS köpük ısı yalıtım malzemesi ile içten, dıştan ve çift tabakalı duvarda ortadan yalıtılmıştır. Her üç uygulama için de

yalıtım kalınlığı 5 cm olarak tespit edilmiştir. İçten yalıtım ve sandviç duvar yalıtım uygulamasında kolon giriş bölgesinde içten ve dıştan üçer santimetre yalıtım yapılarak yoğunlaşma oluşması engellenmiştir. Dıştan yalıtımda ise kolon giriş bölgesinde EPS köpük ısı yalıtım malzemesi ile 6 cm yalıtım yapılmıştır.

Yalıtımlı uygulamalara alternatif olarak görülebilecek gaz beton, bims, perlit, yalıtımlı blok uygulamaları için malzeme kalınlığı ve kolon giriş bölgesinde yalıtım malzemesi kalınlığı tespit edilmiştir. 400 kg/m³ yoğunluklu, 0,13 w/mK ısı iletkenlik hesap değerine sahip gaz beton için, gerekli duvar kalınlığı, 3. Derece gün bölgesi için 25 cm olarak tespit edilmiştir. Kolon giriş bölgesinde uygulanması gereken yalıtım kalınlığı 0,05 W/mK ısı iletkenlik hesap değerine sahip gaz beton yalıtım paneli için 9 cm, EPS köpük için 6 cm'dir. 600 kg/m³ yoğunluklu, 0,19 w/mK ısı iletkenlik hesap değerine sahip gaz beton için gerekli duvar kalınlığı, 3. Derece gün bölgesi için 35 cm olarak tespit edilmiştir. Zararsız seviyede yoğunlaşma meydana gelmiştir. Kolon giriş bölgesinde ise yoğunlaşma yoktur.

Bims blok için ise, gerekli duvar kalınlığı, 3. Derece gün bölgesi için 35 cm olarak tespit edilmiştir. Kolon giriş bölgesinde uygulanması gereken yalıtım kalınlığı 0,035 W/mK ısı iletkenlik hesap değerine sahip EPS köpük ısı yalıtım malzemesi ile 6 cm yalıtım yapılmıştır. Duvarda ve kolon giriş bölgesinde ise yoğunlaşma yoktur.

2200 kg/m³ yoğunluklu, 0,060 w/mK ısı iletkenlik hesap değerine sahip perlit agregalı duvar bloğu için, gerekli duvar kalınlığı, 3. Derece gün bölgesi için 15 cm olarak tespit edilmiştir. Kolon giriş bölgesinde uygulanması gereken yalıtım kalınlığı 0,05 W/mK ısı iletkenlik hesap değerine sahip perlit esaslı ısı yalıtım paneli için 9 cm, EPS köpük ısı yalıtım malzemesi için 6 cm dir. Yoğunlaşma meydana gelmiştir ancak yoğunlaşan su buharlaşma yoluyla atılabilmektedir. Kolon giriş bölgesinde ise yoğunlaşma yoktur.

EPS yalıtım tabakalı bims agregalı hafif beton 0,076 w/mK ısı iletkenlik hesap değerine sahiptir. Bu duvar bloğu için, gerekli kalınlık, 3. Derece gün bölgesi için 20 cm olarak tespit edilmiştir. Yoğunlaşma miktarı 6,26>1 kg/m² olarak diğer detaylandırmalara kıyasla yüksek seviyede bulunmuştur. Bu yoğunlaşma diğer aylarda buharlaşma yoluyla atılabilir gözükse de yoğunlaşmanın meydana geldiği dönemlerde yapı elemanlarının ısı geçirgenliklerini arttıracığından zararlı boyutlara ulaşacağı beklenebilir. Kolon giriş bölgesinde ise yoğunlaşma yoktur.

Bir yapı sistemi içinde yer alan her yapı gereci, difüzyon olayına karşı birbirinden oldukça farklı dirençleri ortaya koyarlar. Difüzyon dirençleri, nemsel akım yönünde belli ölçülerde azalarak gelişen yapı düzenlerinde, yoğunlaşma yönünden herhangi bir sakınca olmayacaktır. Aynı şekilde, tek bir katmandan oluşan yapı elemanında da, difüzyon direnci ne düzeyde olursa olsun, söz konusu eleman açısından nemsel bir sakıncadan bahsedilemez. Katman sayısı çoğaldığında, bu katmanlara ait difüzyon dirençlerinin, nemsel akım yönünde belli ölçülerde

artarak sıralanması, nemsel akımın yapı bileşeni içinde uzun süre alıkonulması ya da en azından yavaşlatılması anlamına gelir. Bu, difüzyon olayı ile ilgili en önemli sorunlardan birisidir. Bu açıdan bakıldığında ortadan ısı yalıtımlı ve havalandırmasız çift kabuk dış duvarların, kış aylarında ısı akımına paralel gelişen su buharı akımı sonucu, yoğunlaşma olayı nedeni ile nemlenme olasılığı vardır. Duvar katmanları arasında higrotermik uyumun sağlanması için bir dizi önleme ek olarak iç, dış kabuk ve ısı yalıtım malzemelerinin uygun seçilmesi gerekir [27].

Yoğunlaşmanın hiç oluşmadığı konstrüksiyonlar en uygun konstrüksiyonlardır. Ancak, yoğunlaşmanın oluştuğu konstrüksiyonlarda mevsimlik yoğunlaşma suyu miktarı, belirlenen veya standartların önerdiği bir limitin altındaysa, yoğunlaşma düzlemi veya bölgesindeki tabakaların ısı iletkenlik katsayıları ve duvarın ısı geçirgenlik direnci hesaplanır. Dirençte bir azalma söz konusu değilse ve yoğunlaşma suyu sıcak dönemde buharlaşabiliyorsa, bu konstrüksiyonlar da uygun kabul edilir. Yoğunlaşma suyunun, belirlenen bir limiti aşması halinde, duvar tasarımının yeniden yapılması gerekir.

Isı tutuculuğu yeterli çok tabakalı bir duvarda, malzemelerin su buharı difüzyon direnç faktörü değerlerinin içten dışa doğru gittikçe küçülmesi halinde, buhar yoğunlaşması tehlikesi azalmakta, kuruma kolaylaşmaktadır [28].

Yapı malzemeleri içinde meydana gelen yoğunlaşmayı önlemek veya zararsız miktarlara indirebilmek için yapı elemanını meydana getiren tabakaları difüzyon tekniğine uygun bir şekilde sıralamak yani, yapı elemanının sıcak tarafına yalıtım malzemesi, soğuk tarafına buhar kesici koymaktan kaçınılmalıdır. Ayrıca iç ortam bağıl nemini mümkün olduğu kadar azaltmak da yararlıdır [29].

Farklı yapı bileşenleri ile oluşturulan detaylar için yapılan hesaplamalarla elde edilen sonuçlar yapının ısı yalıtım performansını arttırmak için yalıtım malzemesi kullanılabilir gibi, ek yalıtım malzemesi kullanmadan da uygun ısı geçirgenlik değerine sahip yapı bileşenleri kullanılarak eşdeğer performans sağlanabileceği ortaya konulmuştur. Bunun yanında duvar ve yalıtım uygulaması için ayrı ayrı malzeme ve işçilik maliyeti yerine duvar bloğu ile gerekli yalıtım koşulları sağlandığında sadece tek bir kalem için malzeme ve işçilik maliyeti söz konusu olacaktır.

Bims, perlit, silisli kum gibi malzemeler Türkiye coğrafyasında bol miktarda bulunan doğal kaynaklardır. Bims, perlit, silisli kum gibi yöresel malzemeler kullanılarak üretilen yapı malzemelerinin kullanımı, ithalat yolu ile elde edilen malzemelere olan bağımlılığı azaltır ve önemli ekonomik yararlar sağlar. Yöresel işgücünü harekete geçirerek bölgelerin ekonomisinin gelişmesine de katkı sağlar. Ayrıca hammaddesi dış kaynaklı malzemeler için harcanan taşıma enerjisinden de tasarruf edilmiş olur. Yapıların inşasında bulunduğu derece gün bölgesi dikkate alınmalıdır. Yapı elemanlarında gerekli U değerlerini sağlayan kesitlerin kalınlıkları ve özellikle ısı yalıtım katmanının konumu yoğunlaşma riski dikkate alınarak belirlenmelidir. Ayrıca bu

özelliklerle beraber yapı malzemesi ve bileşenin seçiminde enerji içeriği düşük malzemelere öncelik verilmelidir. Hammaddesi yöresel olarak elde edilebilen, yöresel olarak üretilen malzemeler taşıma enerjisinden de tasarruf sağlarlar. Doğal ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilmiş, geri dönüştürülebilir, yaşam döngüsü boyunca çevresel etkisi az olan malzemeler yapıların çevresel etkisinin azaltılmasına katkı sağlar. Yapı profesyonellerinin yapı malzemesi ve bileşeni seçiminde önceliklerini bu bağlamda belirlemeleri önem kazanmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Isıtma ve Soğutma Gün Dereceleri <http://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/gun-derece.aspx> Erişim:03.05.16
- [2] Bolattürk, A., “Binalarda Optimum Yalıtım Kalınlıklarının Hesabı ve Enerji Tasarrufundaki Rolü”, *14. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Isparta, 41-47, (2003).
- [3] Bolattürk, A., “Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey”, *Applied Thermal Engineering*, 26: 1301–1309, (2006).
- [4] Bolattürk, A., “Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey”, *Building and Environment*, 43: 1055-1064, (2008).
- [5] Çomaklı, K., Yüksel, B., “Optimum insulation thickness of external walls for energy saving”, *Applied Thermal Engineering*, 23: 473-479, (2003).
- [6] Hasan, A., “Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost”, *Applied Energy*, 63: 115-124, (1999).
- [7] Kaynaklı, O., “A study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness”, *Renewable Energy*, 33: 1164-1172, (2008).
- [8] Özel, M., Pıhtılı, K. “Determination of optimum insulation thickness by using heating and cooling degree-day values”, *Sigma, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 26 (3): 191-197, (2008).
- [9] Şişman, N., Kahya, E., Aras, N., Aras, H., “Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Turkey’s different degree-day regions”, *Energy Policy*, 35: 5151-5155, (2007).
- [10] Uçar, A., Balo, F. “Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey”, *Applied Energy*, 86: 730–736, (2009).
- [11] Kürekçi, A., Bardakçı, A.T., Çubuk, H., Emanet, O., “Türkiye’nin tüm illeri için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi”, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 131: 5-21, (2012).
- [12] Bostancıoğlu, E., “Residential building envelope alternatives with equivalent cost”, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 24 (2): 355-363, (2011).
- [13] Fertelli, A. “Determination of optimum insulation thickness for different building walls in Turkey” *Transactions of Famena*, 37 (2): 103-113, (2013).
- [14] Mishra, S., Usmani, J.A., Varshney, S., “Energy saving Analysis in building walls through thermal insulation system”, *International Journal of Engineering Research and Applications* 2 (5): 128-135, (2012).
- [15] Kaya, A.F., “Binalarda Isı Yalıtım Kurallarına Uygun Yapı Üretiminde Duvar Malzemesi Seçimine Yönelik Öneriler”, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, (2010).
- [16] Aksoy, T.U., “Sandviç ve gaz beton duvar uygulamalarının ortalama ısı geçirgenlik katsayısı ve ısı kaybı üzerindeki etkisinin incelenmesi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24, (1-2): 277- 290, (2008).
- [17] Koçu, N., Korkmaz, S.Z., “Konya çevresindeki yapılarda ısı yalıtımı uygulamalarının TS 825’e göre değerlendirilmesi ve çevre kirliliğine etkisi”, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 74: 35-43, (2003).
- [18] Cihan, M.T., Sezer, F.Ş., Dilmaç, Ş., “Ülkemizde çift duvar arası yalıtım uygulamalarında betonarme kirişlerin oluşturduğu ısı köprülerinin değerlendirilmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 10 (2): 33-47, (2005).
- [19] Umaroğulları, F., Gedik, G.Z. Mihlayanlar, E., “Periyodik rejimde yalıtımlı ve yalıtımsız betonarme duvarlarda yoğuşma denetimi: Edirne örneği”, *Megaron Dergisi*, 6 (1): 13-20, (2011).
- [20] Türkçülmaz, O., “Türkiye enerjide nereye gidiyor?” *Mühendis ve Makine Dergisi*, 52(617): 40-46, (2011).
- [21] Esin T., Yüksek İ.,”Yapıların kullanım sürecindeki enerji etkinliğine etki eden faktörler” *International Sustainable Buildings Symposium*, Ankara, 562-564, (2010).
- [22] Keskin, T., “Binalar sektörü mevcut durum değerlendirmesi raporu”, Türkiye’nin İklim Değişikliği Ulusal Eylem Planının Gerçekleştirilmesi Projesi, *Çevre ve Orman Bakanlığı*, Ankara. (2010).
- [23] WEB (2016). Isı yalıtım sanayicileri derneği, XPS Derneği’nden Türkiye’nin Isı Yalıtımı Bilinci Haritası, <http://www.xpsturkiye.org/haber-detay.asp?ID=10> Erişim Tarihi 03.05.16
- [24] TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı”, Türk Standartları Enstitüsü, (2008).
- [25] Sezer, F.Ş., “Türkiye’de ısı yalıtımının gelişimi ve konutlarda uygulanan dış duvar ısı yalıtım sistemleri”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 10 (2): 79-85, (2005).
- [26] TGUB Türkiye Gaz beton Üreticileri Birliği, “TS 825 Isı Yalıtımı Hesaplama Programı” <http://www.tgub.org.tr/default.asp?mid=239&L=TR> (2016).
- [27] Pehlevan, A., “Difüzyon tekniği açısından ortadan ısı yalıtımlı dış duvarlar”, *V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, (2001).
- [28] Gürdal, E., Acun, S., “Dış duvarların tasarımında ısı ve rutubet etkisi”, *Çatı Cephe Fuarı - CNR*, İstanbul, 94-100, (2005).
- [29] Heperkan, H.A. Bircan, M.M. Sevindir, M.K. “Yapı malzemelerinde buhar difüzyonu ve yoğuşma”, *5. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 461-470, (2001).

Doğal Arazi Koşullarında Yapı-Zemin Dinamik Etkileşim Deneyi

Fatih GÖKTEPE^{1*}, Erkan ÇELEBİ², Hüseyin Serdar KÜYÜK²

¹ Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bartın

² Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya

(Geliş/Received : 01.06.2016 ; Kabul/Accepted : 27.09.2016)

ÖZ

Günümüzde yapıların depreme karşı tasarımında kullanılan geleneksel yöntemlerde, yapının oturduğu zemin ortamının şekil değiştirmedeği varsayımı ile yapının temelinden zemine ankastre bağlı olduğu kabul edilir. Depremden dolayı oluşan kuvvetli yer hareketi de yapı varlığından etkilenmeyen yatay bir ötelenme hareketi olarak kabul edilir. Buna karşın, yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin sismik analizi ise üstyapı, yapı temeli ve temel çevresini saran zemin olmak üzere ayrı karakterdeki üç sistemin ortak titreşimine bağlı olarak, yapının gerçek tepkisini inceler. Bu çalışmada bina varlığının titreşim dalgasının yayılımına, dolayısıyla yer hareketi üzerindeki etkisi yapı-zemin etkileşimi açısından deneysel olarak incelenmiştir. Yapay dinamik yük kaynağı ile titreşime zorlanan iki katlı betonarme çerçevesel bir binanın temelinde yerleştirilen ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları, söz konusu binaya yakın serbest zemin yüzeyi titreşim kayıtları ile karşılaştırılarak, yapı-zemin ortak davranışında kinematik etkileşimin, temel titreşim hareketindeki etkin rolü gösterilmiştir. Bu özel saha çalışması ile seçilmiş ölçüm noktalarından elde edilen titreşim verilerinden yararlanarak ivme, yer değiştirme zaman geçmişi ve Fourier spektrumlarındaki farklılıklar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Yapı-Zemin Etkileşimi, Serbest Zemin Hareketi, Bina Titreşimleri, Dalga Yayılımı, Kompaktör.

In-situ Experiment on Dynamic Soil-Structure Interaction

ABSTRACT

The traditional methods utilized in today's seismic design of structures involve structure's foundation as a fixed base by assuming soil does not deforms. Earthquake input motion is also considered as a horizontal movement that is not being affected by the structure. On the other hand, the seismic analysis of dynamic soil-structure interaction which considers superstructure, foundation and surrounding soil of building, aims to evaluate structural response based on the interaction of these three components. In this study, presence of building, which is effecting on wave propagation, is experimentally investigated including soil-structure interaction. Acceleration record from the foundation of a two-story reinforced concrete, that is forced to vibrate by artificial dynamic load, is compared with the free ground surface vibration record around the building to indicate the effect of soil-structure kinematic interaction on foundation vibration. With this specific field study, differences in acceleration, displacements time histories and Fourier spectrums are comparatively presented using recorded vibrations from selected locations of interest

Keywords: Soil-Structure Interaction, Free Field Motion, Building Vibration, Wave Propagation, Compactor.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nükleer güç santralleri, viyadükler, rijit köprü ayakları, barajlar, çok katlı masif ve rijit binalar gibi yapı sistemlerinin günümüzde zorunlu olarak büyük depremler üreten aktif faylara yakın bölgelerde, özellikle taşıma kapasitesi zayıf zemin koşullarında inşa edilmek zorunda kalınması, problemin sağlam temellendirilmiş varsayımlar altında ayrıntılı çözüm teknikleriyle ele alınmasını gerektirir. Bu tür önemli mühendislik yapılarının sismik yükler altında tam güvenliğini sağlayabilmek için dinamik davranışının gerçeğe daha yakın olarak izlenmesi ancak yapı-zemin etkileşim problemini çözüm sürecine dahil eden matematik modelin doğruluk düzeyi ve sayısal analizde kullanılacak yöntemin niteliği karar verecektir.

Günümüzde deprem hesabında kullanılan geleneksel çözüm yöntemlerinde, yapı temelini oturduğu zemin ortamının şekil değiştirmedeği kabul edilir. Sonsuz rijit zemin varsayımı altında yapı temelinden zemine ankastre mesnetlenmiş bir sistem olarak hesaba katılır. Deprem verisi yer hareketi de yapının varlığından etkilenmeyen zemin yüzeyinde ölçülmüş ve temel seviyesinde etki eden yatay doğrultuda rijit bir ötelenme titreşimi olarak dikkate alınır. Kinematik etkileşim sonucunda, sismik analizde yapı temelinde tanımlanacak olan yer hareketi, serbest zemin deprem verisine göre farklılık göstermektedir. Zeminin serbest yüzeyinde meydana gelecek titreşim hareketi, yapısal titreşimlerin, temel ve temel çevresindeki dalga saçılmalarının etkisini göz ardı eden bir yaklaşımdır.

Dinamik dış yüklere maruz kalan yapıların dinamik davranışı birbirine bağlı üç ortak sistemin etkileşimi

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: fgoktepe@bartin.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 303-311

altındadır. Bunlar üstyapı, yapı temeli ile temelin altını ve çevresini saran jeolojik zemin ortamıdır. Bir bölgedeki yapı davranışının ayrıntılı değerlendirilmesinde, yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı dinamik etkileşiminin çözüme dâhil edilmesi gerekmektedir. Özellikle yumuşak zemin koşullarında inşa edilen yapıların tasarımında kuramsal hesaplama altyapısı hazırlanırken zemin ortamının şekil değiştiren ve yapının davranışına eylemsizlik yönünden etkide bulunan dinamik bir sistem olarak ele alınması gerekmektedir [1-5].

Sismik yükler altında yapı-zemin etkileşiminin zayıf zemin koşulları açısından önemsendiği bir problemde ise, yumuşak veya gevşek zemin ortamına ait geoteknik özelliklerinin taban kayasından gelen deprem dalgalarını değişikliğe uğratması sonucunda üstyapıya aktarılan titreşim davranışı incelenmektedir. Günümüzde yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin sayısal yöntemlerle analizinde doğrudan çözüm yöntemi [6-8] ve alt sistem yaklaşımı [9-12] kullanılarak, üstyapı davranışının etkileri yapısal ve geoteknik parametrelere bağlı incelenmektedir. Ayrıca bu tür sismik etkileşim problemleri laboratuvarlarda sarsma tablalarında ölçekli model deneyleri ile de gözlemlenmektedir [13-17].

Temel ortamının dinamik rijitliğini tespit edebilmek için doğal saha koşullarında titreşim deneyleri model rijit plaklar kullanılarak yapılmıştır [18-23]. Bununla birlikte, depremselliği yüksek bölgelerde inşa edilecek önemli yapıların dinamik analizinde yerel zemin koşullarının hesap yöntemine katılması konusunda tavsiye niteliğinde önemli raporlar yayınlanmıştır [24, 25].

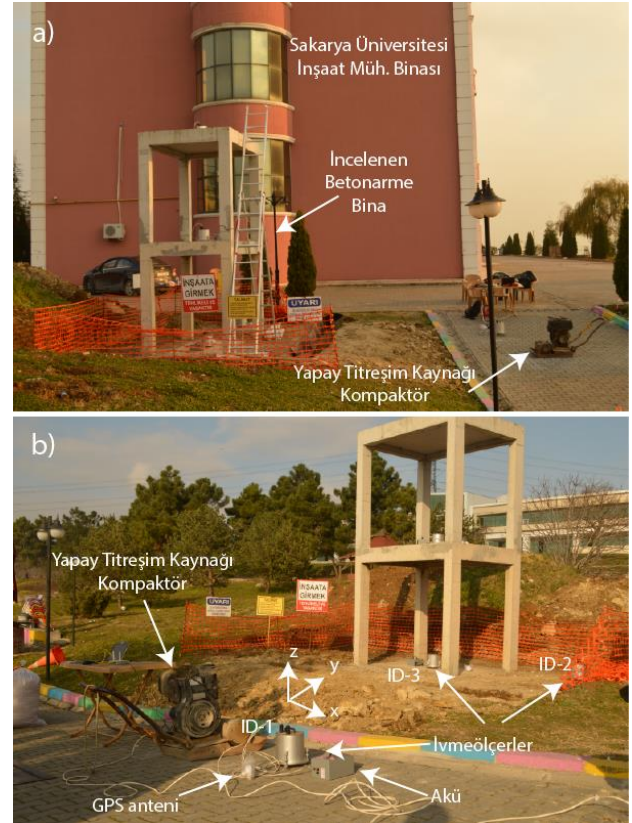
Bu çalışmanın amacı, titreşime zorlanan yapı-temel-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkileşimini deneysel araçlarla ölçmek, değerlendirmek ve sonuçlarını tartışmak şeklinde özetlenebilir. Bu amaçla sahada gerçekleştirilen deneylerde, yapay yük kaynağı ile üretilen titreşim hareketi serbest zemin yüzeyinde ve bina temelinde kayıt altına alınarak, kinematik etkileşimin yer hareketi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Serbest zemin yüzey kayıtları ile bina zemin titreşimleri karşılaştırılarak yapı varlığının temel hareketi üzerindeki etkisi yapı-zemin etkileşimi açısından incelenmiştir.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. İncelenen Arazi Özellikleri (Characteristic of the Investigated Area)

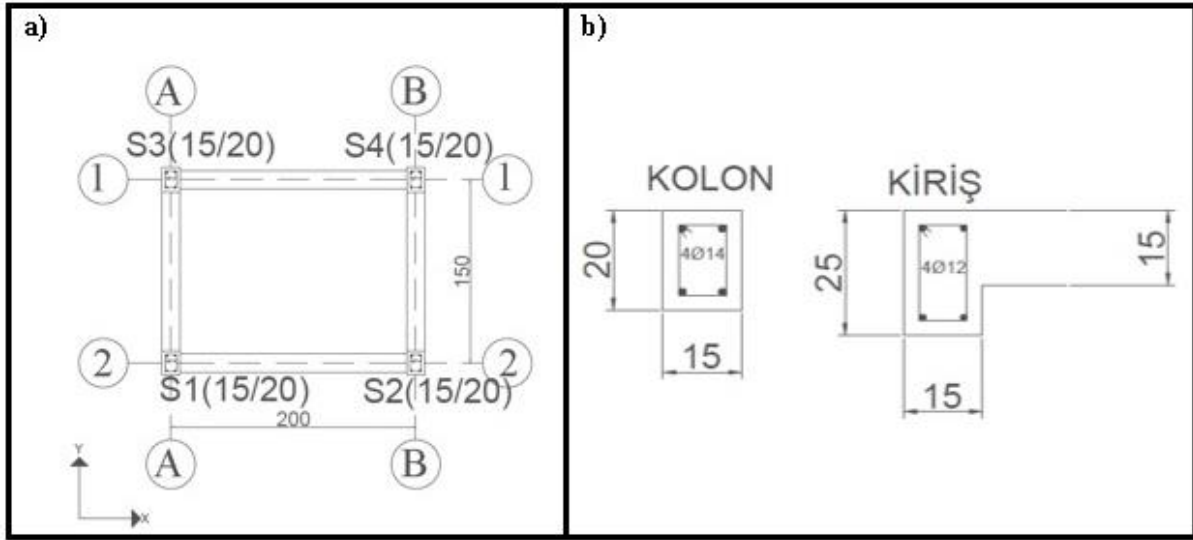
Bu çalışmanın yapıldığı arazi Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsünde bulunmaktadır. Arazide yapılan Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi sonucu zeminin iki tabakadan oluştuğu ve 2007 Deprem Yönetmeliği'ne [26] göre Z2 zemin sınıfı olduğu tespit edilmiştir. Deneysel saha çalışmalarının yapıldığı araziye ait zeminin dinamik özellikleri, balyoz ya da ağırlık düşürme gibi yapay bir mekanik etki oluşturularak çeşitli tepkilerin alıcılar tarafından ölçüldüğü bir yüzey dalgası analiz yöntemi olan Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi deneyi ile belirlenmiştir. Yapılan deneyde mevcut yapının kuzey yönüne offset aralığı 10 m olacak şekilde çelik levha yerleştirilmiş ve ilk jeofon levhadan 10 m ileriye

konulmuştur. Daha sonra ikişer metre aralıklarla 11 jeofon düz bir hat boyunca triger tetikleyici kablosuna bağlanmıştır. Jeofonlar 12 kanallı, örnekleme aralığı 0,5 ms olan yüksek-orta-alçak geçişli filtreye sahip olup frekans içeriği 4,5 Hz'dir. 2.4 metreye inen birinci tabakanın kayma dalgası hızı yaklaşık 310 m/s ve 11.10 metreye kadar olan ikinci tabakanın ise yaklaşık 530 m/s olarak bulunmuştur. Birim hacim ağırlığın iki tabakada da ortalama olarak 16 kN/m³ olduğu tespit edilmiştir. Deneysel saha çalışmalarının yapıldığı alan ve zorlanmış titreşim koşulları altında yapı-zemin dinamik özellikleri araştırılan yapı Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma sahasının genel yapısı (Layout of the experimental site)

Zorlanmış titreşim koşulları altında dinamik özellikleri araştırılan üstyapı 0.50 m derinlikteki radye temele sahip olup iki katlı tek açıklıklı betonarme bir çerçevedir. Binanın yüksekliği 4 m ve x, y gibi her iki doğrultudaki genişlikleri sırasıyla 2 m ve 1.5 m'dir. Titreşim özellikleri belirlenmeye çalışılan betonarme yapının döşeme kalınlığı 0,15m, beton sınıfı C30 ve çelik sınıfı S 420 olup, bina planı Şekil 2a' de verilmiştir. İncelenen yapının kolonları 0.15x0.20 m ve kirişleri 0.15x0.25 m boyutlarına sahiptir. Kolon ve kiriş elemanlarının geometri ve donatı detayları Şekil 2b' de verilmiştir. Betonarme yapının çevre düzenlenmesi dozer yardımıyla yapılarak ölçüm yapılacak arazinin zemin kotu binanın zemin döşeme kotu seviyesine indirilmiştir.



Şekil 2. a) Bina planı b) Kolon ve kiriş donatı detayı [boyutlar cm cinsindedir] (a) Building plan b) Detail of reinforcement for column and beam) [Dimensions are in cm]

2.2 Deneyselde kullanılan dinamik yük kaynağının özellikleri (The Properties of Dynamic Load Source used in Experimental Study)

Bina varlığının zeminin dinamik özelliklerine göre etkisi, binanın kompaktör tipi bir yük kaynağının oluşturduğu titreşim hareketine tepkisi incelenerek araştırılmıştır. Deneysel arazi çalışmalarında kullanılacak yapay yük kaynağı temini, çeşitli dinamik parametreleri dikkate alındığında çok zor bulunabilen bir teçhizatır. Yapay dinamik yük kaynağı seçimi açısından, tekrarlı olarak mümkün olduğu kadar aynı konum, frekans ve kuvvette titreşim verebilen, kolay temin edilebilir ve ekonomik olma kriterlerine bağlı olarak bir tercih yapılmıştır. Bu nedenle dinamik yük kaynağı olarak 73-75 Hz frekans aralığında çalışan 46 kN düşey yük kapasiteli kompaktör kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Dinamik yük kaynağı (Dynamic load source)

Genellikle toprak, sıcak asfalt gibi, küçük çaplı zemin ve yol kaplama malzemelerini sıkıştırma işlemlerinde kullanılan makinenin özellikleri Çizelge 1'de özetlenmiştir. Dizel motora sahip yapay yük kaynağı 46 kN'luk bir santrifüj kuvveti üretebilmektedir.

Çizelge 1. Dinamik yük kaynağının özellikleri (Properties of dynamic load source)

Özellikler	Büyükük
Motor Gücü	12 HP Dizel
Santrifüj Kuvveti	46 kN
Ebad	0.65 m x 0.8 m
Ağırlık	225 kg
Frekans	73-75 Hz

2.3 Deneyselde Kullanılan İvmeölçerlerin Özellikleri (The Properties of Accelerometers used in Experimental Study)

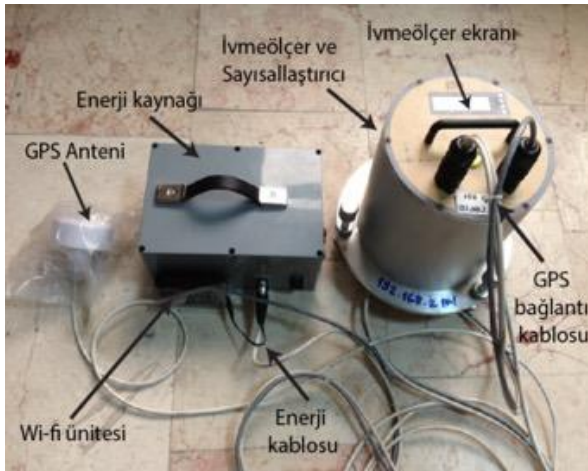
Araştırma sahasında ölçülen titreşimler üç eksenli ivmeölçerler yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Kullanılan ivmeölçerler çok düşük gürültü seviyelerine sahip zayıf titreşim hareketlerini 24 bit yüksek çözünürlüklü analog dijital çeviriciler vasıtası ile ölçüm yapan

ivme kaydedicilerdir. Deneysel arazi çalışmasında kullanılan ivmeölçerler ve diğer ekipmanlara ait teknik ve donatım özellikleri Çizelge 2'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 2. Teknik ve donatımsal özellikler (Technical and Equipment Features)

Donanım	Özellikleri
İvmeölçer	3 Eksen a-) <u>Kapasitif Kuvvet ile Mikroışlenmiş Sensör</u> b-) <u>300ng/√Hz. Gürültü</u> c-) <u>±2g Tam Kalibrasyon</u> d-) <u>±5 V Aralıklısal Çıktı</u> e-) <u>Bant Genişliği 200 Hz üzerinde Çözünürlük</u> f-) <u>Kendi Kendini Test Edebilme Girişi</u>
Güç Kaynağı	12 VDC
Çalışma Sıcaklığı	-20 +80
Haberleşme Portu	1 Ethernet / TCP-IP
GPS	<u>50 Kanal Süper Eğilim Dahili</u>
Çalışma Frekansı	50/100/200 Hz. (5mS)
Hafıza Kartı	2 Gb Dahili, (140 saat kayıt alabilme yeteneği.) Kutu
ADC	24 Bit
Filtre	2 Kanal FIR/Antialiasing

Yapılan deneylerde üç ayrı cihaz kullanılmıştır (ID-1, ID-2 ve ID-3). İvmeölçerler birbirlerinden bağımsız olarak çalışmaktadır. Her ünite de GPS anteni ve enerji kabloları ivmeölçerlere iki kablo yardımı ile bağlanmıştır. Her cihazda, MEMS sensörü, ADC sayısallaştırıcı ve ivmelerin kayıt altına alındığı bellek bir kutunun içerisinde yer almaktadır (Şekil 4). Dijital kayıtlar çalışmanın sonraki aşamalarında kullanılan bilgisayar yazılımları ile senkronize edilerek değerlendirilmiştir.

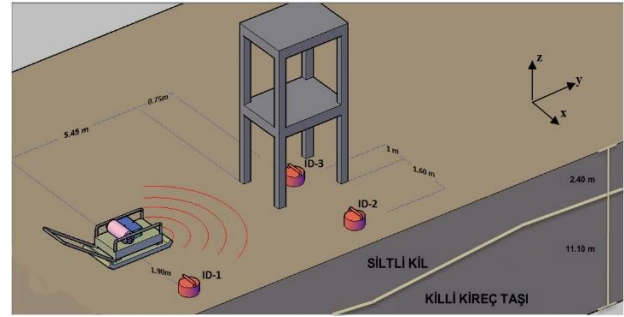


Şekil 4. DAC-3HDG GPS senkronizasyonlu sayısallaştırıcı ve veri kaydedici ivmeölçer (DAC-3HDG GPS synchronized digitizer and data recorder accelerometer)

2.4. Deneyin Yapılması (Performing the Experiment)

Yapay dinamik yük kaynağı ile titreşime zorlanan yapı-temel-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkileşimini deneysel olarak ölçmek amacıyla kullanılan cihazlar binanın zemin katı ve etrafına belirli mesafelerde yerleştirilerek serbest zemin yüzeyindeki titreşimler ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan üç eksenli ölçüm yapma kapasitesine sahip ivmeölçerlerin biri dinamik yük kaynağının yakınında, diğeri serbest

zemin yüzeyinde olup bir diğeri ivmeölçer ise binanın zemin katına yerleştirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Çalışma sahasının genel şematik yapısı (Schematic structure of investigated area)

ID-1 olarak tanımlanan ivmeölçer, yapay dinamik yük kaynağına çok yakın konumlandırılmıştır. Kaynağa uzaklığı 1.90 m'dir. Mevcut yapının zemin ile dinamik etkileşimi açısından daha iyi değerlendirilebilmesi amacıyla ID-2 olarak tanımlanan ivmeölçer ise bina köşe noktasından 1.60 m uzaklığa serbest zemin yüzeyine yani yapısız alana yerleştirilmiştir. ID-3 olarak tanımlanan ivmeölçer kaynaktan 5.45 m uzaklıkta, binanın zemin katına ve binanın ağırlık merkezine yerleştirilmiştir (Şekil 5).

2.5. Verilerin İşlenmesi (Data Processing)

Araziden alınan veriler kablosuz olarak dizüstü bir bilgisayara kaydedilmiştir. Fakat veri kayıplarına rastlandığı için manuel olarak kayıtlar tekrar SQL veri tabanı kullanılarak bilgisayarda işlenmiştir. Kayıtlar saniyede 200 veri olacak şekilde kaydedilmiştir. Kayıtların içindeki veriler LabView yazılımı ile ASCII formatına dönüştürülmüştür. Daha sonra MATLAB yazılımı kullanılarak yazarlar tarafından geliştirilen bir program ile bir seri sinyal işlemlerden geçirilmiştir.

Öncelikli olarak dijital veriler temel sıfırlama düzeltmesine tabi tutulmuştur. Daha sonra Butter worth

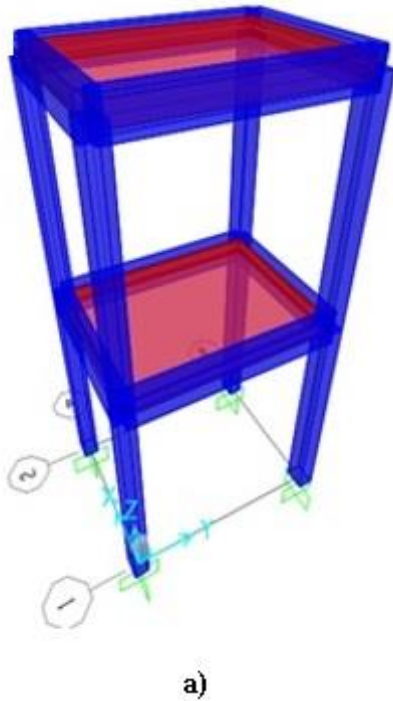
5 Hz - 90 Hz Bandpass filtrelemeden geçirilmiştir. İstenmeyen gürültüler ayıklandıktan sonra çift integrasyon ile ivme kayıtları hız ve yerdeğiştirme verilerine dönüştürülmüştür. Son olarak Hızlı Fourier Dönüşümü yapılarak, ivme kayıtların frekans tanım aralığındaki enerji içerikleri incelenmiştir. Tüm bu işlemler kayıtlardaki üç bileşen için tekrarlanmıştır.

2.6 Titreşim Kaydı Alınan Binanın Dinamik Özelliklerinin Deneysel, Teorik ve Bilgisayar Destekli Yazılımlarla Belirlenmesi

(Determination of the Dynamic Properties of the Building with Experimental, Theoretical and Computer-aided Software)

Titreşim kaydı alınan 2 katlı betonarme tek açıklıklı çerçeve sistemin dinamik davranışının daha gerçekçi bir biçimde elde edilebilmesi amacıyla yapıya ait serbest

Titreşim özellikleri araştırılan binanın etkili bileşeni olan x doğrultusundaki hakim moduna ait elde edilen periyot değerlerine göre, deneysel ve sayısal model sonuçları ile sayısal model ve nümerik çözüm sonuçlarının benzer şekilde % 98 yakın olduğu gözlenmiştir. Bu değer, deneysel ve teorik çözüm için % 96 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, yapının x doğrultusundaki 2. moduna ait periyot değerlerine göre, deneysel ve matematik model sonuçlarının % 99,5 yakın olduğu tespit edilmiştir. Bina dinamik parametrelerini belirlemek amacıyla yapılan teorik çözümlerle hem deneysel hemde sayısal model sonuçlarının yaklaşık % 97,2 civarında yakın olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6. Titreşim kaydı alınan binanın üç boyutlu a) Sap 2000 modeli b) ideCAD modeli (Three-dimensional a) Sap 2000 model b) ideCAD model of the building that the vibration is recorded)

titreşim parametreleri ilk aşamada deneysel çalışmalarla elde edilmiştir. Sonraki aşamada yapının 1. ve 2. moduna ait serbest titreşim periyotları analitik çözüm ile belirlenmiştir. Bununla birlikte, yapı sonlu elemanlar yöntemine dayanan Sap 2000 ve ideCAD paket programları yardımıyla üç boyutlu (3D) modellenerek modal dinamik analizleri yapılmıştır (Şekil 6).

Çizelge 3. Yapıya ait modal periyot değerlerinin karşılaştırılması [x doğrultusu] (Comparison of the modal period values of the structure) [x direction]

	Deneysel (sn)	Teorik (sn)	Sayısal Model (sn)	
			ideCAD	Sap 2000
1.Mod	0.171	0.131	0.157	0.157
2.Mod	0.133	0.0979	0.123	0.128

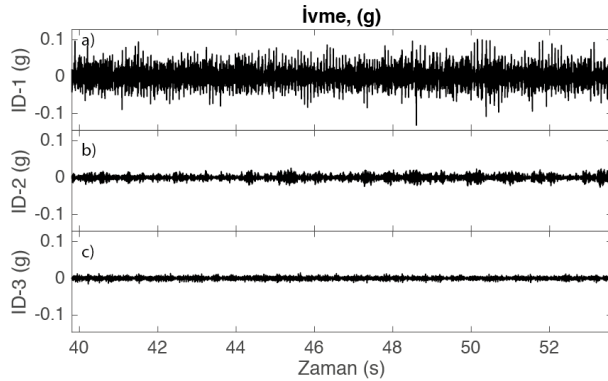
3. BİNA VE SERBEST ZEMİN TİTREŞİM KAYITLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF BUILDING AND FREE FIELD VIBRATIONS RECORDS)

Yapı-temel-zemin ortak sisteminin karşılıklı dinamik etkileşiminin araştırıldığı bu çalışmada ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım aralığındaki genlikler, üç bileşen (x, y, z) doğrultuları için sırasıyla Şekil 7, 8 ve 9'da gösterilmiştir.

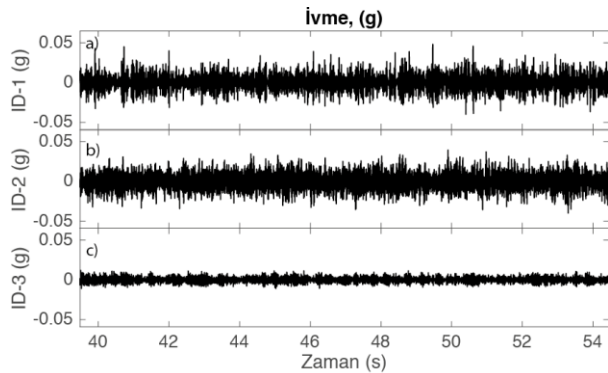
İncelenen doğrultuya bağlı olarak elde edilen kayıtlar birbirinden farklılık göstermektedir. x doğrultusu için ID-1'de ölçülen genlikler, diğer iki kayıta göre daha yüksektir. Mesafeye bağlı olarak genliklerin yani dinamik yük kaynağından yayılan titreşim enerjisinin azaldığı Şekil 7'de görülmektedir. Yapı temelinde ise

genlik değerleri en küçüktür (Şekil 7c). Benzer durum y doğrultusu için söylenememektedir. Dinamik kaynağa yakın (ID-1) ve serbest zemin ölçümleri (ID-2) birbirine benzemekte olup, yapı zemininden alınan ölçümlere (ID-3) göre çok daha büyük enerjiye sahiptirler (Şekil 8).

Diğer yandan yukarı-aşağı bileşen olan z doğrultusu x bileşenindeki davranışa benzer bir eğilim göstermiştir. Titreşim kaynağının z doğrultusunda ürettiği enerji diğer iki bileşene göre daha fazladır. Tüm bileşenler incelendiğinde, bina zemin katında ölçülen ivme değerleri (ID-3) ile serbest zemin yüzeyine ait ivme değerleri (ID-2) kıyaslandığında, genliklerin serbest zeminde daha fazla olduğu gözlenmiştir (Şekil 7-9).

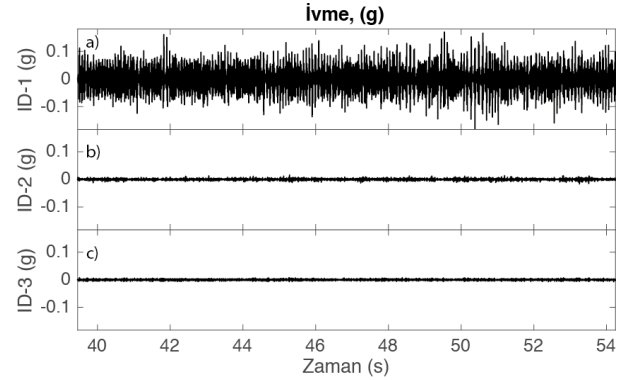


Şekil 7. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerleri [x doğrultusu] (The acceleration values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [x direction]



Şekil 8. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerleri [y doğrultusu] (The acceleration values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [y direction]

Saha çalışmalarında elde edilen ivme kayıtlarına ait verilerin üç bileşen için frekans içerikleri (x, y, z) Şekil 10, 11 ve 12'de gösterilmiştir. Grafiklerde kırmızı renkteki çizgiler filtrelenmemiş, ham veriyi ifade ederken siyahlar çizgiler, 5 Hz – 90 Hz arasındaki enerjiye sahip kayıtların frekans içeriğini belirtmektedir. Üç doğrultu içinde dinamik yük kaynağının hakim

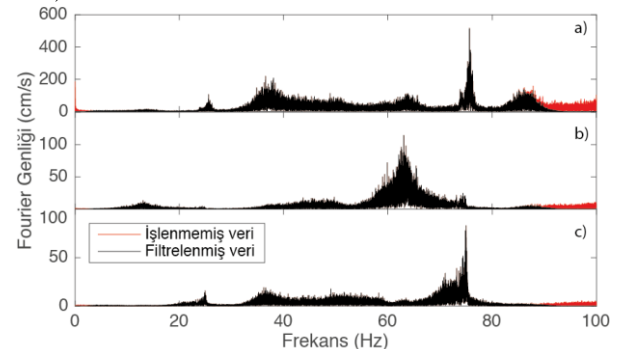


Şekil 9. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerleri [z doğrultusu] (The acceleration values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [z direction]

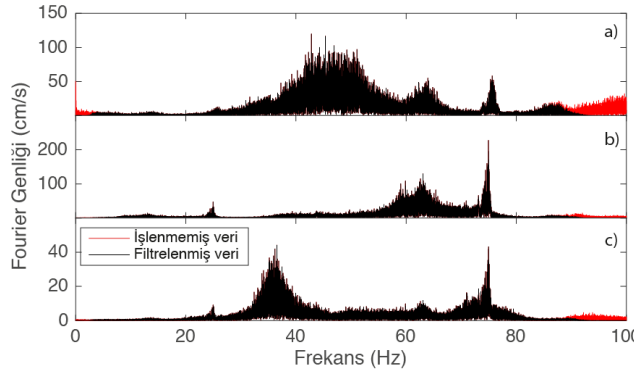
frekansı yaklaşık olarak 73 Hz – 75 Hz bandında olduğu göze çarpmaktadır (Şekil 10-12).

Serbest zemine ait x doğrultusu incelendiğinde hakim enerjinin 65 Hz olduğu gözlenmiştir (Şekil 10b). Ayrıca yaklaşık 13-15 Hz bandında, diğer iki kayıta gözküymeyen enerji görülmektedir. Bina zemin katı ile dinamik yük kaynağına yakın kayıtların frekans içeriği (Şekil 10a ve 10c) yaklaşık olarak aynıdır. Fakat frekans genlikleri yapay yük kaynağının yakınında yaklaşık olarak on kat daha fazla çıkmaktadır. Bununla birlikte, dinamik kaynağı yakınında 85 Hz'de görülen enerjinin, serbest zemin ve bina zemin katına gelmeden tamamen sönmüldüğü tespit edilmiştir.

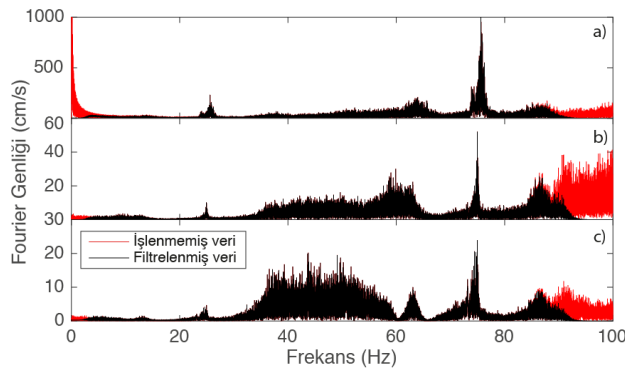
Genel olarak y bileşenine ait tüm ivmeölçerlere bakıldığında, dinamik yük kaynağının genliği gözlemlenmektedir. Fakat uzakta olmasına rağmen serbest zemin kaydındaki genlik değeri, yapay yük kaynağına yakın ivmeölçerdeki genlikten daha yüksek çıkmıştır (Şekil 11a ve 11b). Bunun sebebi olarak, yapay yük kaynağının x doğrultusuna göre, y doğrultusunda daha güçlü titreşim üretmesi ve titreşimlerin basınç dalgası şeklinde aktarılmasından dolayı olabileceği düşünülmektedir (Şekil 11c).



Şekil 10. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerlerine ait Fourier genlik spektrumu [x doğrultusu] (The fourier amplitude values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [x direction]



Şekil 11. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerlerine ait Fourier genlik spektrumu [y doğrultusu] (The fourier amplitude values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [y direction]

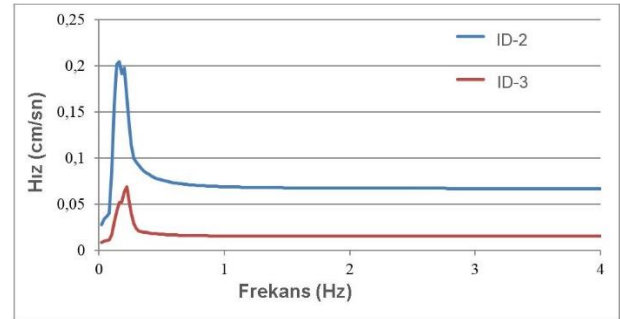


Şekil 12. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerlerine ait Fourier genlik spektrumu [z doğrultusu] (The fourier amplitude values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [z direction]

Titreşim kaynağının yakınındaki ivmeölçerlerin üç bileşeni incelendiğinde (ID-1) z doğrultusundaki genliklerin en büyük olduğu görülmektedir (Şekil 12a). Genel olarak z doğrultusundaki veriler incelendiğinde, kaynaktan uzaklaştıkça frekans genliklerinin, diğer bileşenlere göre çok daha fazla azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 12b ve 12c). Özellikle yapı temelinde 85 Hz mertebelerinde görülen frekans genliklerinin, yapının düşey doğrultusundaki davranışı olduğu ve bunun diğer ivmeölçerlere etkisinden kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Bununla birlikte, tüm ivmeölçer ve doğrultularda görülen 25 Hz civarındaki frekans içeriği ise, iki tabakalı zeminin hakim frekansı olduğu düşünülmüştür. Deneysel saha çalışmalarının yapıldığı zemin ortamına ait tahmin edilen bu değer, literatürde tabakalı zeminler için tanımlanmış ve pratik uygulamalarda yaygın biçimde kullanılan teorik formülasyon yardımıyla hesaplanarak karşılaştırılmış ve doğruluğu yaklaşık olarak teyit edilmiştir. Teorik olarak zemin hakim frekansının hesaplanmasında kullanılan zemine ait tabaka kalınlıkları ve kayma dalgası hızı gibi

dinamik parametreler, bir yüzey dalgası analiz yöntemi olan Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi deneyi ile arazide belirlenmiştir.

Titreşime zorlanan iki katlı betonarme çerçevesi bina üzerinde gerçekleştirilen özel saha çalışması ile seçilmiş ölçüm noktalarından elde edilen titreşim verilerinin hız spektrumlarındaki farklılıklar etkili bileşen olan x doğrultusu için elde edilmiştir. Söz konusu binanın köşe noktasından 1.60 m uzaklığa serbest zemin yüzeyine konumlandırılan ivmeölçerden (ID-2) alınan titreşim kayıtları ile binanın zemin katına ve ağırlık merkezine yerleştirilen ivmeölçerden (ID-3) elde edilen titreşim kayıtları hız spektrumları cinsinden karşılaştırılmalı biçimde Şekil 13’de verilmiştir. İncelenen etkili doğrultuya (x doğrultusu) bağlı olarak elde edilen grafikten, kinematik etkileşimin 0.5 Hz civarındaki küçük frekans değerlerinde hız spektrum eğrilerini önemli biçimde değiştirdiği gözlenmiştir.



Şekil 13.Yapısız alandaki serbest zeminde (ID-2) ve bina zemin katında (ID-3) elde edilen hız spektrum eğrileri [x doğrultusu] (The velocity response spectra at the free field in non-building (ID-2) and ground floor of the building (ID-3)) [x direction]

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada bina varlığının titreşim dalgasının yayılımına, dolayısıyla yer hareketi üzerindeki etkisi yapı-zemin etkileşimi açısından deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel saha çalışması ile seçilen ölçüm noktalarından elde edilen ivme, yerdeğiştirme zaman geçmişi ve Fourier spektrumlarındaki farklılıklar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Yapay dinamik yük kaynağı ile titreşime zorlanan iki katlı betonarme çerçevesi bir binanın temeline yerleştirilen ivmeölçerlerden alınan titreşim kayıtları, söz konusu bina yapısına yakın serbest zemin yüzeyi titreşim kayıtları ile karşılaştırarak, yapı-zemin ortak davranışında kinematik etkileşimin temel titreşim hareketindeki etkin rolü gösterilmeğe çalışılmıştır. Genel anlamda dinamik yük kaynağından yayılan titreşim enerjisinin mesafeye bağlı olarak azaldığı ve yapının varlığının, serbest zemin hareketini kinematik etkileşimden dolayı önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yapı temelinde ortaya çıkan 35 Hz – 40 Hz arasındaki genliklerin y doğrultusundaki ikinci hakim modun olabileceği düşünülmektedir. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan tüm ivmeölçerlere ait kayıtların her üç doğrultusunda görülen 25 Hz

civarındaki frekans içeriği ise, iki tabakalı zemin ortamının hakim frekansı şeklinde yorumlanmıştır.

Sahada gerçekleştirilen bu deneysel çalışma ile dinamik yapay yük kaynağının serbest zemin yüzeyinde ve bina temelinde meydana getirdiği titreşim kayıtlarından elde edilen hız spektrum eğrisi, kinematik etkileşimin yer hareketini önemli biçimde etkilemiş olup yapının varlığının serbest zemin hareketini değiştirdiği anlaşılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada kullanılan ivmeölçerlerin alımı, Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) tarafından Merkezi Araştırma Laboratuvarı kapsamındaki DPT 2011K120350 proje no ile desteklenmiştir. Yazarlar bu destekten dolayı teşekkürlerini sunarlar. Ayrıca saha çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Dr. Eray Yıldırım ve öğrencilerimiz Lütfü İhsan Akpunar, Engin Pullu, Serhat Tatlı, Beyzanur Ceylan, Mustafa Esin, Aziz Ahmad Noor Ahmad, Halil Kılıçaslan, Emrah Balıkcı'ya teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Viladkar, M.N., Godbole, P.N. and Noorzaei, J., "Soil-structure interaction in plane frames using coupled finite-infinite elements", *Computers and Structures*, 39: 535-546, (1991).
- Choi, J.S., Yun, C.B. and Kim, J.M., "Earthquake response analysis of the Hualien soil-structure interaction system based on updated soil properties using forced vibration test data", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30: 1-26, (2001).
- Halabian, A.M. and Naggar, M.H.E., "Effect of non-linear soil-structure interaction on seismic response of tall slender structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22: 639-658, (2002).
- Gouasma, A. and Djeghaba, K., "Non-linear dynamic soil-structure interaction analysis of buildings", *Technological and Economic Development of Economy*, XIII: 266-271, (2007).
- Gouasma, A. and Djeghaba, K., "Direct approach to seismic soil-structure-interaction analysis-building group case", *Engineering Structures and Technologies*, 2: 22-30, (2010).
- Wolf, J.P. and Song, Ch., "Finite-Element Modelling of Unbounded Media", John Wiley & Sons, Chichester, (1996).
- Celebi, E., Goktepe, F. and Karahan, N., "Non-Linear Finite Element Analysis for Prediction of Seismic Response of Buildings Considering Soil-Structure Interaction", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 3495-3505, (2012).
- Galvín, P. and Romero, A., "A 3D time domain numerical model based on half-space Green's function for soilstructure interaction analysis", *Computational Mechanics*, 53: 1073-1085, (2014).
- Pais, A. and Kausel, E., "Approximate Formulas for Dynamic Stiffnesses of Rigid Foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7: 213-227, (1988).
- Mylonakis, G. and Gazetas, G., "Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental", *Journal of Earthquake Engineering*, 4: 377-401, (2000).
- Çelebi, E. and Gündüz, A.N., "An efficient seismic analysis procedure for torsionally coupled multistory buildings including soil-structure interaction", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 29: 143-157, (2005).
- Mylonakis, G., Nikolaou, S. and Gazetas, G., "Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26: 824-85, (2006).
- Hosseinzadeh, N.A. and Nateghi, F., "Shake Table Study of Soil Structure Interaction Effects on Seismic Response of Single and Adjacent Buildings" *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver*, Vancouver, B.C., Canada, (2004).
- Choi, I-K., Kim Min, KYU., Choun, Y-S. and Seo, J-M., "Shaking Table Test of Steel Frame Structures Subjected to Scenario Earthquakes", *Nuclear Engineering and Technology*, 37: 191-200, (2005).
- Haibo, W. and Deyu, L.L., "Experimental Study of Dynamic Damage of an Arch dam", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36: 347-366, (2006).
- Tain, C., Xiao C., Zhang H. and Cao J., "Shaking Table Model Test and Seismic Performance Evaluation of Shanghai Tower", *International Journal of High-Rise Buildings*, 1: 221- 228, (2012).
- Tabatabaiefar, S.H.R., Fatahi B. and Samali, B., "Numerical and Experimental Investigations on Seismic Response of building Frames under Influence of Soil-Structure Interaction", *Advances in structural Engineering*, 17: 109-130, (2014).
- Lin, A.N. and Jennings, P.C., "Effect of embedment on foundation-soil impedances", *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 110: 1060-1075, (1984).
- Luco, J.E., Trifunac, M.D. and Wong, H.L., "Isolation of soil-structure interaction effects by full-scale forced vibration tests", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 16: 1-21, (1988).
- Wong, H.L., Trifunac, M.D. and Luco, J.E., "A comparison of soil-structure interaction calculations with results of full-scale forced vibration tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7: 22-31, (1988).
- Crouse, C.B., Hushmand, B., Luco, J.E. and Wong, H.L., "Foundation impedance functions: Theory versus Experiment", *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)*, 116: 432-449, (1990).
- De Barros, F.C.P. and Luco, J.E., "Identification of foundation impedance functions and soil properties from vibration tests of the Hualien containment model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14: 229-248, (1995).
- Tileylioglu, S., Stewart, J. P. and Nigbor, R.L., "Dynamic Stiffness and Damping of Shallow Foundation from Forced Vibration of a Field Test Structure", *Journal of*

- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137: 344-353, (2011).
24. FEMA, “Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures”, prepared by the Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences for the Federal Emergency Management Agency, Washington, The United States, (2009).
25. NIST GCR 12-917-21, “Consultants Joint Venture; Soil-Structure Interaction for Building Structures”, U.S. Department of Commerce National Institute of Standards and Technology, (2012).
26. DBYBHY, “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, (2007).

Effect on the Electrical Characterizations of Temperature and Frequency Depending on Series Resistance and Interface States in MS Structure

Bariş KINACI*

Faculty of Science, Department of Physics, Istanbul University, Vezneciler, 34134, Istanbul, Turkey

(Received : 22.04.2016 ; Accepted : 20.08.2016)

ABSTRACT

In order to explain the experimental effect of series resistance and interface states of device on current–voltage, capacitance–voltage and conductance–voltage characteristics of Ni/Au/n–Si structure have been investigated. Current–voltage characteristics of structure have been measured in the temperature range of 100K–380K by steps of 40K. In addition, capacitance–voltage and conductance–voltage characteristics of structure have been measured in the frequency range of 100kHz–1MHz at room temperature. The obtained results show that the Ni/Au/n–Si structure is a good candidate for the electronic device applications.

Keywords: MS Structure, Ni/Au Metal Contact, Electrical Characterizations.

MS Yapısında Ara Yüzey Durumları ve Seri Dirence Bağlı Sıcaklık ve Frekansın Elektriksel Karakterizasyonlar Üzerine Etkisi

ÖZ

Ni/Au/n–Si yapısının akım–voltaj, kapasitans–voltaj ve kondüktans–voltaj karakteristikleri cihazın seri dirence ve ara yüzey durumlarının deneysel etkilerini incelemek için incelendi. Yapının akım–voltaj karakteristikleri 100K–380K sıcaklıkları aralığında 40K lik artışlarla ölçüldü. Ayrıca, yapının kapasitans–voltaj ve kondüktans–voltaj karakteristikleri 100kHz–1MHz aralığında oda sıcaklığında ölçüldü. Elde edilen sonuçlar Ni/Au/n–Si yapısının elektronik cihaz uygulamaları için iyi bir aday olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: MS Yapı, Ni/Au Metal Kontak, Elektriksel Karakterizasyonlar.

1. INTRODUCTION

To date, researchers have been investigated various applications of Silicon (Si)-based structures [1–10]. Studies on the application of these structures are still performed [11–16]. Deposition of metal thin films on Si semiconductor are used in the optoelectronics and microelectronics device applications [1, 3, 6, 17–23], and the quality of metal–semiconductor (MS) structures are especially dependent on the interface states (N_{ss}) between metal and semiconductor and series resistance (R_s) of the structures [1,3]. Therefore, the temperature and frequency dependent electrical characterization of MS structures is of great importance for technological applications to understand the device performance in detail [3, 6]. The temperature dependent analysis give detailed information about the current conduction mechanism and M/S interface [9]. Since current-voltage (I–V) characteristics deviate from linearity at sufficiently high bias voltages due to the effect of R_s . In addition, the values of capacitance (C) and conductance (G/ω) depend

on N_{ss} and R_s . Since N_{ss} is a strong function of frequency, it exponentially decreases with increasing frequencies. Therefore, capacitance-voltage (C–V) and conductance-voltage (G/ω –V) characteristics of MS devices are also a strong function of a frequency.

The aim of this work is to investigate temperature and frequency-dependent behaviors of R_s and N_{ss} values of Ni/Au/n–Si structure. I–V measurements of the structure were performed in temperature range of 100–380 K to examine the effect of R_s and N_{ss} on current-voltage-temperature (I–V–T) characteristics. Moreover, C–V and G/ω –V measurements of the structure were performed at room temperature in the frequency range of 100 kHz–1 MHz to examine the effect of R_s and N_{ss} on capacitance–voltage–frequency (C–V–f) and conductance–voltage–frequency (G/ω –V–f) characteristics.

2. EXPERIMENTAL DETAILS

Prior the characterizations, n-type Si substrate (diameter 3 inches) was cleaned using organic solvents for the removal of the native oxide layer. Then, to compare the main electrical parameters, firstly the 1500 Å thick AuGe back metal was deposited at 360 °C by thermal

*Corresponding Author

e-mail: baris.kinaci@istanbul.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 313-318

evaporation system. After the metal deposition, alloying for forming the ohmic contact was done by annealing the sample at 310 °C at 30 second by thermal evaporation system. Then, dot shaped rectifier front contacts with 2 mm diameter and 1500 Å thickness Ni/Au (500 Å / 1000 Å) were formed by deposition of high purity Au and Ni at 70 °C. The temperature dependent I–V measurements were carried out in the temperature range of 100–380K using a Keithley 2400 source–meter. The temperature was adjusted using Janisvpf–475 cryostat and a Lake Shore model 321 auto–tuning temperature controllers with sensitivity better than ± 0.1 K. The frequency dependent C–V and G/ω–V measurements were performed in the frequency range of 100 kHz–1 MHz by using HP 4192 A LF impedance analyzer. Schematic diagram of Ni/Au/n–Si structure is represented in Figure 1.

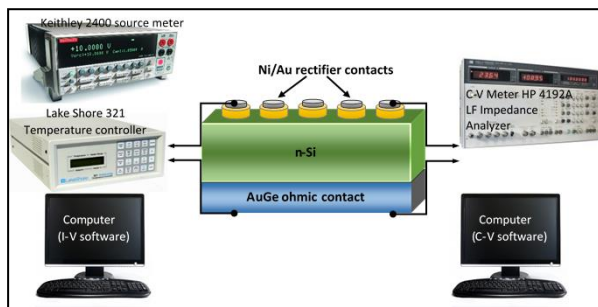


Figure 1. Schematic diagram of Ni/Au/n–Si structure.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Current–voltage characterizations

The experimental I–V data can be analyzed by the following relation [9].

$$I = I_o \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \right] \quad (1)$$

where q is the electronic charge, k is the Boltzmann’s constant, T is the absolute temperature in Kelvin and I_o is the saturation current and is expected as

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (2)$$

where A is the effective diode area, A^* is the effective Richardson constant and equals to $112 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ for n–type Si. Barrier height (Φ_b) values can be obtained from Eq. (2). The ideality factor (n) is calculated from the slope of the linear region of the forward–bias I–V curve and is given by

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (3)$$

The reverse and forward bias I–V characteristics of Ni/Au/n–Si structure in the temperature range of 100–380 K is given in Figure 2. While the I–V characteristics are linear at low forward bias voltages, they deviate from

linearity at high forward bias due to the existence of the R_s and N_{ss} .

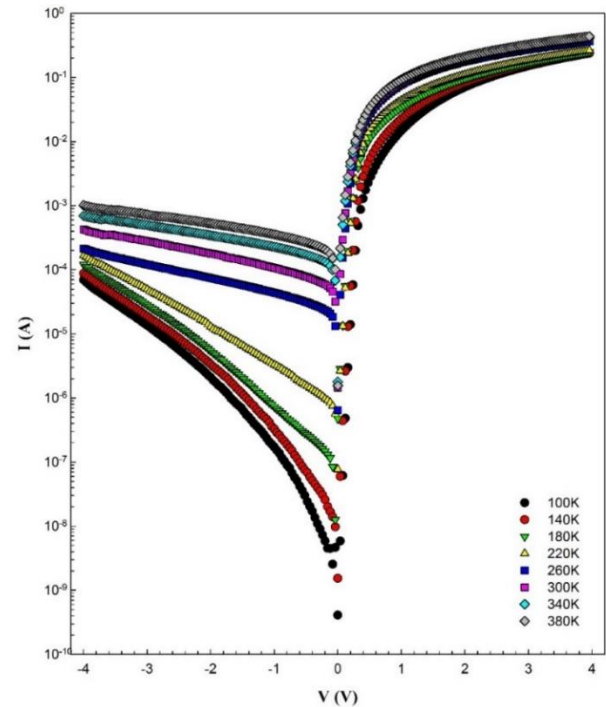


Figure 2. The forward and reverse bias I–V–T characteristics of Ni/Au/n–Si structure in the temperature range 100–380 K.

The experimental values of F_b , n were calculated by using Eq. (2) and Eq. (3) and these values were given in Table 1. An increase in the value of F_b and a decrease in n with increasing temperature are observed.

Table 1. Electrical parameter values of Ni/Au/n–Si structure determined from I–V–T characteristics.

T (K)	n	Φ_b (eV)	R_s (Ω)
100	5.45	0.17	16.64
140	5.30	0.21	16.34
180	4.92	0.26	15.78
220	4.46	0.30	14.99
260	3.89	0.35	10.87
300	3.48	0.40	9.88
340	3.13	0.45	9.50
380	2.85	0.51	9.10

R_s values were determined from the structure resistance (R_i) vs applied bias voltage (V_i) plot determined from the I–V characteristics where $R_i = dV_i/dI_i$ and given in Figure 3.

The structure’s resistance values approach to a constant value which is R_s , when a sufficiently high forward bias voltage applied. R_s values change from $16.64 \text{ }\Omega$ at 100 K and 380 K, respectively, and given in Table 1. Similar results have been previously reported in the literature [6, 7].

The expression for N_{ss} as deduced by Card and Rhoderick [24] is reduced as follows [25]. In addition, $E_{ss}-E_{ss}$ values can be obtained from Eq. (2) [25].

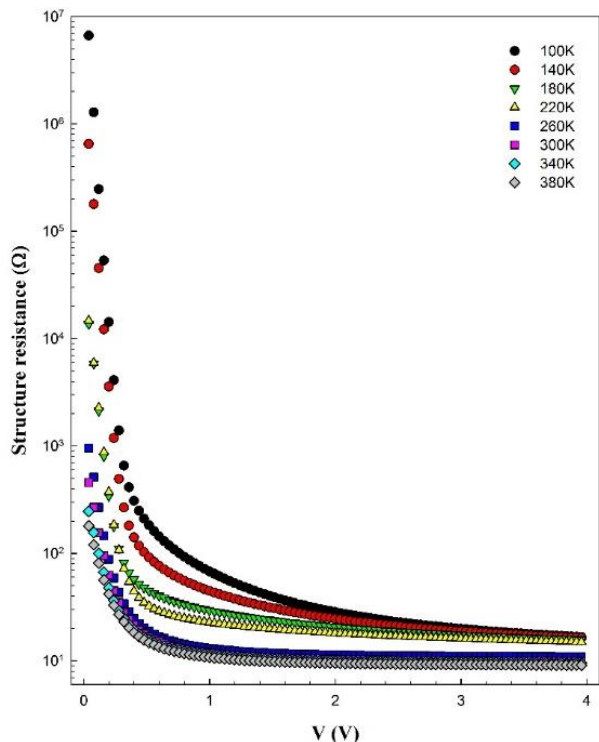


Figure 3. Structure resistance of Ni/Au/n-Si structure in the temperature range 100–380K.

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right] \tag{4}$$

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \tag{5}$$

Figure 4 shows the energy distribution profiles of N_{ss} as a function of E_c-E_{ss} extracted from forward bias I-V-T characteristics for 100K, 220K, 260K, and 380K. As shown in Figure 5, N_{ss} values decrease with increasing temperature and are effective in all forward bias regions

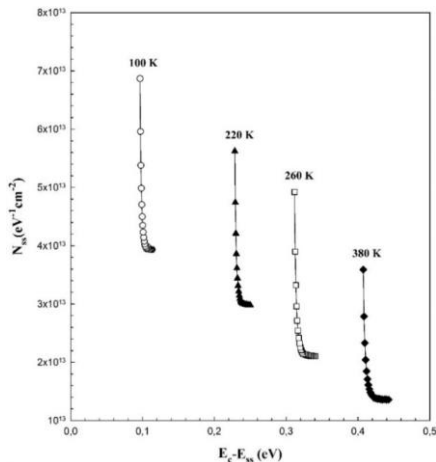


Figure 4. The energy distribution profiles of N_{ss} as a function of E_c-E_{ss} extracted from the forward bias I-V data of Ni/Au/n-Si structure at various temperature.

3.2. Capacitance/Conductance–Voltage Characterizations

C-V-f and G/ω-V-f characteristics was carried out at a frequency of 100, 200, 300, 500, 700 kHz and 1 MHz, and given in Figure 5(a) and (b), respectively.

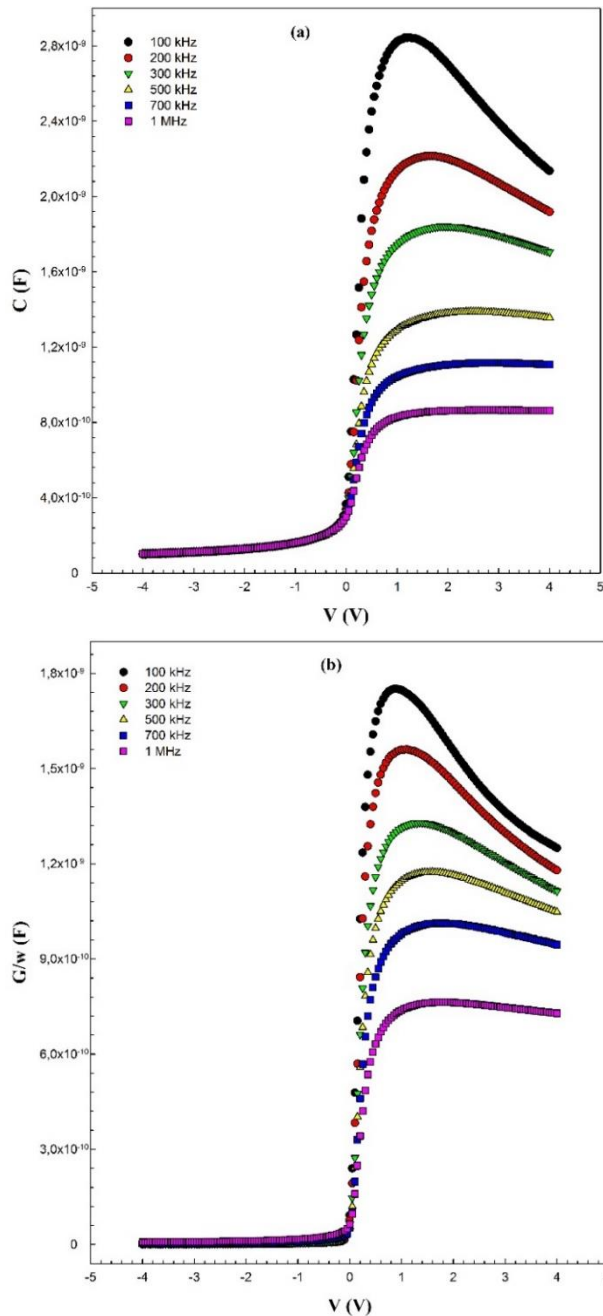


Figure 5. Frequency-dependent (a) C-V and (b) G/ω-V characteristics of Ni/Au/n-Si structure at room temperature and various frequency

According to Figure 5(a) and (b), capacitance and conductance values increase with the decreasing frequency, especially in the depletion region due to the existence of N_{ss} , while capacitance and conductance values decrease with increasing frequency especially in the accumulation region due to the existence of R_s .

In order to extract the R_s values of the structure, several methods have been suggested in the literature [26–29]. Among all these methods, in our work, Nicollian and Brews method was exploited [26]. To determine the voltage dependency of the resistance (R_i) values, admittance method was developed by Nicollian and Brews [26], and according to this method, R_i values can be determined in the whole voltage range. Thus real R_s values of MS devices can be calculated from the measured capacitance (C_m) and conductance (G_m) in the strong accumulation region using the equation [26]

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \tag{6}$$

In Figure 6, calculated R_s values for different frequencies were given. As shown in Figure 6, R_s values decrease with increasing frequency.

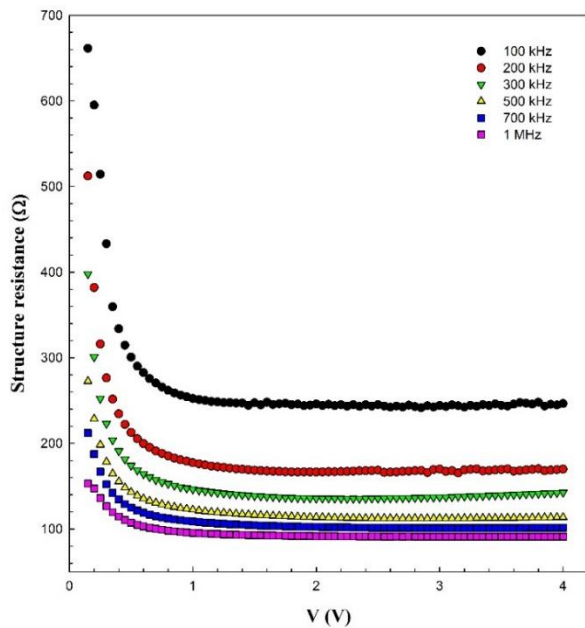


Figure 6. R_s versus V plot of Ni/Au/n-Si structure at room temperature and various frequency.

Figures 7, 8, and 9 show the voltage-dependent C , G/ω , and R_s values obtained from the capacitance–frequency (C – f), conductance–frequency (G/ω – f), and series resistance–frequency (R_s – f) plots for various applied forward-bias voltages (0.1 V to 1.1 V in steps of 0.1 V) at depletion region. It is clearly seen that the values of C , G/ω and R_s decrease with increasing frequencies for each bias voltage value due to the existence of N_{ss} . The changes in the C , G/ω , and R_s values can be attributed to restructuring of the interface charge at the M–S interface.

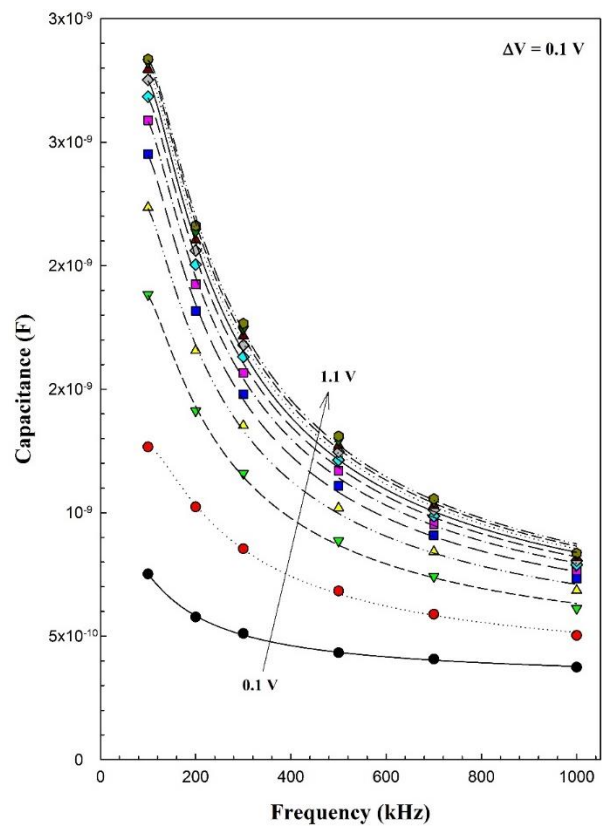


Figure 7. Frequency–dependent capacitance values of Ni/Au/n-Si structure at room temperature and various bias voltage.

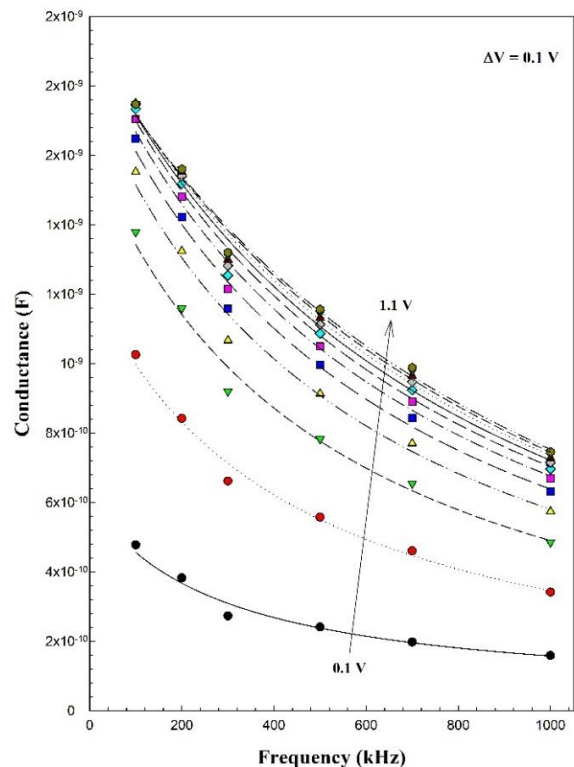


Figure 8. Frequency–dependent conductance values of Ni/Au/n-Si structure at room temperature and various bias voltage.

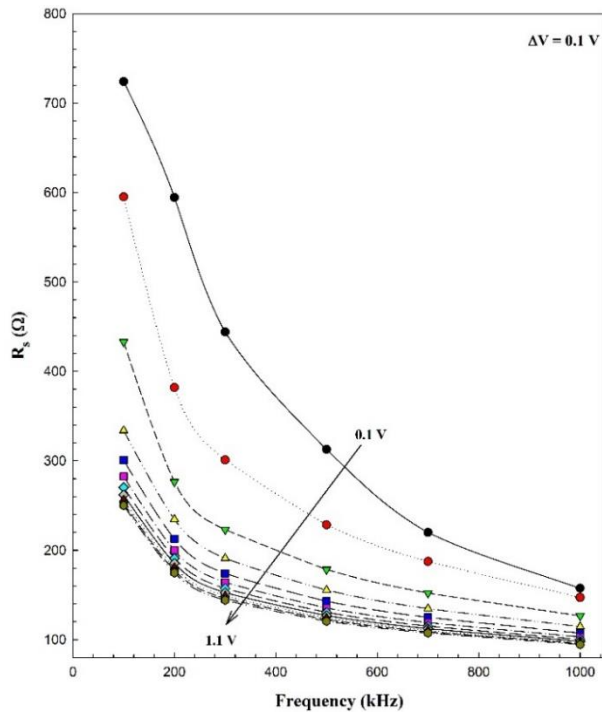


Figure 9. Frequency-dependent series resistance values of Ni/Au/n-Si structure at room temperature and various bias voltage.

Furthermore, frequency dependency of interface states density were obtained using the Hill-Coleman method [30]. According to this method, the N_{ss} values can be calculated by using following equation:

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G/\omega)_m}{\left\{ \left[\frac{(G/\omega)_m}{C_i} \right]^2 + (1 - C_m/C_i)^2 \right\}} \quad (7)$$

N_{ss} values were given in Figure 10 for different frequencies (in the frequency range of 100 kHz–1 MHz), and it is seen that N_{ss} values exponentially decrease with increasing frequency. Similar results have been previously reported in the literature [3, 8].

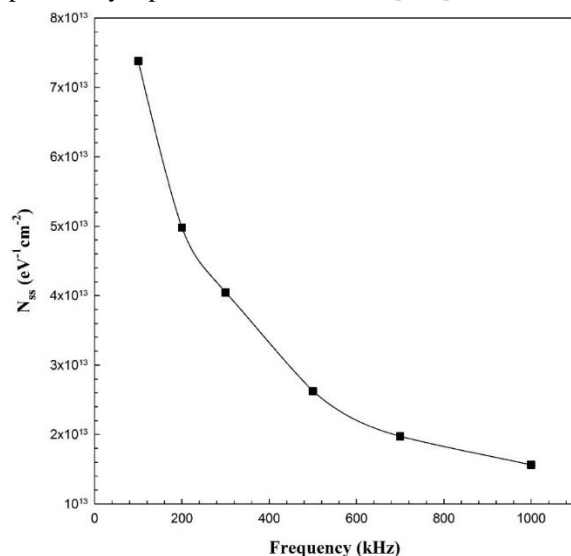


Figure 10. The variation in N_{ss} as a function of frequency for Ni/Au/n-Si structure at room temperature.

In summary, in the present study, the temperature-dependent I–V and the frequency-dependent C–V and G/ω –V characteristics of Ni/Au/n-Si structure were analyzed. The experimental results show that both R_s and N_{ss} are very effective on electrical characteristics. In addition, R_s and N_{ss} values decrease with increasing temperature and frequency.

4. CONCLUSION

In this work, temperature dependency of I–V, and frequency dependency of C–V and G/ω –V characteristics of Ni/Au/n-Si structure has been studied. Ni/Au/n-Si structure with the low R_s values and ideal N_{ss} behavior were observed from the I–V–T measurements in the temperature range of 100–380K. In addition, the ideal R_s and N_{ss} behaviors were observed from the frequency dependent C–V and G/ω –V characteristics in the frequency range of 100 kHz–1 MHz. According to these results, Ni/Au/n-Si MS structure is very promising for novel device design due to its lower series resistance and state-of-the-art energy distribution of the interface states.

ACKNOWLEDGEMENT

This work is supported by the State of Planning Organization of Turkey under Grant no. 2011K120290 and Gazi University Photonics Application and Research Center.

REFERENCES

- [1] Ayyıldız E., Nuhuğlu Ç. and Türüt A., “The determination of the interface state density distribution from the Capacitance-Frequency measurements In Au/N-Si Schottky barrier diodes”, *Journal of Electronics Materials*, 31: 119, (2002).
- [2] Bülbül M. M., Zeyrek S., Altındal Ş., Yüzer H., “On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si3N4/p-Si (MIS) Schottky diodes”, *Microelectronic Engineering*, 83: 577, (2006).
- [3] Karataş Ş., Türüt A., “The frequency-dependent electrical characteristics of interfaces in the Sn/p-Si metal semiconductor structures”, *Microelectronics Reliability*, 50: 351, (2010).
- [4] Bengi A., Aydemir U., Altındal Ş., Özen Y., Özçelik S., “A comparative study on the electrical characteristics of Au/n-Si structures with anatase and rutile phase TiO2 interfacial insulator layer”, *Journal of Alloys and Compounds*, 505: 628, (2010).
- [5] Uslu H., Altındal Ş., Aydemir U., Dökme İ., Afandiyeva İ. M., “The interface states and series resistance effects on the forward and reverse bias I–V, C–V and G/ω –V characteristics of Al–TiW–Pd 2 Si/n-Si Schottky barrier diodes”, *Journal of Alloys and Compounds*, 503: 96, (2010).
- [6] Demircioğlu Ö., Karataş Ş., Yıldırım N., Bakkaloglu Ö. F., Türüt A., “Temperature dependent current-voltage and capacitance-voltage characteristics of chromium Schottky contacts formed by electrodeposition technique

- on n-type Si", *Journal of Alloys and Compounds*, 509: 6433, (2011).
- [7] Güllü O., Türüt A., "Electronic Properties of Al/DNA/P-Si MIS diode: Application as temperature sensor", *Journal of Alloys and Compounds*, 509: 571, (2011).
- [8] Demirezen S., Sönmez Z., Aydemir U., Altındal Ş., "Effect of series resistance and interface states on the I-V, C-V and G/ω-V characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature", *Current Applied Physics*, 12: 1, (2012).
- [9] Kınacı B., Çetin S. Ş., Bengi A., Özçelik S., "The temperature dependent analysis of Au/TiO₂(rutile)/n-Si (MIS) structure using current-voltage-temperature (I-V-T) characteristics", *Material Science in Semiconductor Processing*, 15: 531, (2012).
- [10] Kınacı B. and Özçelik S., "Temperature dependent capacitance-voltage and conductance-voltage characteristics of Au/TiO₂(rutile)/n-Si MIS structure at 1 Mhz", *Journal of Electronics Materials*, 42: 1108, (2013).
- [11] Tecimer H., Uslu H., Alahmed Z. A., Yakuphanoglu F., Altındal Ş., "On the frequency and voltage dependence of admittance characteristics of Al/PTCDA/P-Si (MPS) type Schottky barrier diodes (SBDs)", *Composites: Part B*, 57: 25, (2014).
- [12] Kasprzak W., Amirkhiz B. S., Niewczasz M., "Structure and properties of cast Al-Si based alloy with Zr-V-Ti additions and its evaluation of high temperature performance", *Journal of Alloys and Compounds*, 595: 67, (2014).
- [13] Tombak A., Benhaliliba M., Ocak Y. S., Kiliçoğlu T., "The novel transparent sputtered p-type CuO thin films and Ag/p-CuO/n-Si Schottky diode applications", *Result in Physics*, 5: 314, (2015).
- [14] Leonard S., Markevich V. P., Peaker A. R., Hamilton B., Murphy J. D., "Evidence for an iron-hydrogen complex in p-type silicon", *Applied Physics Letters*, 107: 032103 (2015).
- [15] Khusayfan N. M., Al-Ghamdi A. A., Yakuphanoglu F., "Solar light photodetectors based on nanocrystalline copper indium oxide/p-Si heterojunctions", *Journal of Alloys and Compounds*, 663: 796, (2016).
- [16] Tozlu C., Mutlu A., "Poly (melamine-co-formaldehyde) methylated effect on the interface states of metl/polymer/p-Si Schottky barrier diode", *Synthetic Metals*, 211: 99, (2016).
- [17] Lee J. L., Mun J. K., Lee B. T., "Thermal-Degradation mechanism of Ti Pt/Au Schottky contact to n-type GaAs", *Journal of Applied Physics*, 82: 5011, (1997).
- [18] Vanalme G. M., Goubert L., Meirhaeghe R. L. V., Cardon F., Daele P. V., "A ballistic electron emission microscopy study of barrier height inhomogeneities introduced in Au/III-V semiconductor Schottky barrier contacts by chemical pretreatments", *Semiconductor Science and Technology*, 14: 871, (1999).
- [19] Sun Y., Shen X. M., Wang J., Zhao D. G., Feng G., Fu Y., Zhang S. M., Zhang Z. H., Feng Z. H., Bai Y. X., Yang H., "Thermal annealing behaviour of Ni/Au on n-GaN Schottky contacts", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35: 2648, (2002).
- [20] Reddy V. R., Reddy N. R., Choi C. J., "The effect of annealing temperature on electrical and structural properties of Rh/Au Schottky contacts to n-type GaN", *Semiconductor Science and Technology*, 21: 1753, (2006).
- [21] Ravinandan M., Rao P. K., Reddy V. J., "Analysis of the current-voltage characteristics of the Pd/Au Schottky structure on n-type GaN in a wide temperature range", *Semiconductor Science and Technology*, 24: 035004 (2009).
- [22] Korkut H., Yıldırım N., Turut A., "Thermal annealing effects on I-V-T characteristics of sputtered Cr/n-GaAs diodes", *Physica B*, 404: 4039, (2009).
- [23] Naik S. S., Reddy V. R., "Analysis of current-voltage-temperature (I-V-T) and capacitance-voltage-temperature (C-V-T) characteristics of Ni/Au Schottky contacts on n-type InP", *Superlattice Microstructures*, 48: 330, (2010).
- [24] Card H. C. and Rhoderick E. H., "Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4: 1589, (1971).
- [25] Singh A., "Characterization of interface states at Ni/nCdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation", *Solid-State Electron*, 28: 223, (1985).
- [26] Nicollian E. H. and Brews J. R., "MOS Physics and Technology", *Wiley*, New York, (1982).
- [27] Cheung S. K., and Cheung N. W., "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", *Applied Physics Letters*, 49: 85, (1986).
- [28] Norde H., "A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance", *Journal of Applied Physics*, 50: 5052, (1979).
- [29] Hill W. A., Coleman C. C., "A single-frequency approximation for interface-state density determination", *Solid-State Electronics*, 23: 987, (1980).

Taşıt Elemanlarının Yapısal Optimizasyon Teknikleri ile Optimum Tasarımı

Ali Rıza YILDIZ*

Bursa Teknik Üniversitesi Doğa Bil. Müh. MİM. Fak. Makine Mühendisliği Bölümü, BURSA/TÜRKİYE
(Geliş/Received : 03.06.2016 ; Kabul/Accepted : 07.09.2016)

ÖZ

Otomotiv endüstrisinde optimum ürünlerin geliştirmesi süreci ürün maliyeti üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle, ürün tasarım sürecinde, optimum tasarımın elde edilmesi gerekmektedir. Optimizasyon çalışmaları sırasında seçilecek yöntem optimum tasarıma ulaşmada en önemli unsurlardan birisidir. Bu bağlamda optimum noktaya hızlı ve doğru şekilde yakınsayan yöntemlerin seçimi çok önemlidir. Bu çalışmada otomobillerin ön süspansiyon sisteminde kullanılan salıncak kolunun, sırasıyla topoloji ve şekil optimizasyonu yapılarak optimum boyutları bulunmuştur. Bu çalışmada şekil optimizasyonu için yeni geliştirilen interior arama algoritması literatürde ilk defa optimum ürün tasarımı sürecinde kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Topoloji optimizasyonu, Şekil Optimizasyonu, Taşıt Salıncak Kolu, Interior arama Algoritması.

Optimum Design of Vehicle Components Using Structural Optimization Techniques

ABSTRACT

The development of optimum products in the automotive industry has a significant impact on the process product cost. For this reason, in the product design process, optimum design must be achieved. The method to choose during optimization studies is one of the most important elements in achieving optimum design. In this context, it is very important to choose the methods that are optimum to the point and converge correctly. In this study, the swing arm used in the front suspension system of the automobiles was optimized by topology and shape optimization respectively. The newly introduced interior search algorithm for shape optimization has been used in the literature for the first time in the optimum product design process.

Keywords: Topology Optimization, Shape Optimization, Suspension Arm, Interior Search Algorithm.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv sektöründe optimum ürün geliştirme aşaması ürün ömrü üzerinde maliyet açısından en etkili olan adımdır. Üretilen ürünlerin toplam yaşam çevrimi maliyetinin tasarım sürecinde belirlendiği dikkate alınırsa etkin imalat açısından tasarım aşamasında istenen kriterleri sağlayan ürünlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

1970'li yıllardan itibaren bilgisayar teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak sayısal ve türev temelli optimizasyon yöntemlerinin yetersizliklerine çözüm olarak geliştirilen popülasyon temelli optimizasyon algoritmaları farklı alanlardaki optimizasyon çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmıştır [1-13].

Bu çalışmanın amacı, ürün tasarım sürelerini minimize eden optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini ortaya koymak ve optimum ürün tasarımında kullanılabileceğini göstermektir. Bu kapsamda otomobillerin ön süspansiyon sistemlerinde kullanılan salıncak kolunun optimum tasarımı, topoloji ve şekil optimizasyonu yaklaşımları kullanılarak yapılmıştır. Şekil

optimizasyonu için literatürde ilk defa bu çalışmada uygulanan interior arama algoritması kullanılmıştır.

2. INTERIOR ARAMA ALGORİTMASI (INTERIOR SEARCH ALGORITHM)

Interior arama algoritması Gandomi [14] tarafından 2014 yılında geliştirilen yeni bir optimizasyon metodudur. Bu yöntem koordine ve sistematik bir yaklaşımdır. Interior arama algoritmasında sonuca gitmek için data oluşturmak yerine, data setinin istenen parametreler doğrultusunda işlenip hedefe yönlenmesi temel alınır [14]. Bu yöntemde genellikle data setinin uç sınırlarından başlanıp içe doğru gidilerek çözümün diğer parametreleri nasıl etkilediği gözlemlenir (Şekil 1). Bu sayede tasarımcı parametreleri değiştirirken oluşan eğrilerin birbirine yakınlığı yada kesişmesi durumlarında kısa sürede bilgi sahibi olabilir. Bu algoritmadaki elemanlar, bileşim elemanları ve ayna elemanları olmak üzere iki gruba ayrılırlar ve algoritmanın çözümü aşağıdaki adımlardan oluşur:

1. Üst limit (UB) ve alt limit (LB) arasında olmak üzere rasgele elemanlar üretilir.
2. En uygun eleman tespit edilir. Eğer bu işlem bir minimum optimizasyon işlemiyse, en uygun eleman amaç fonksiyonunun minimumu, aksi

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

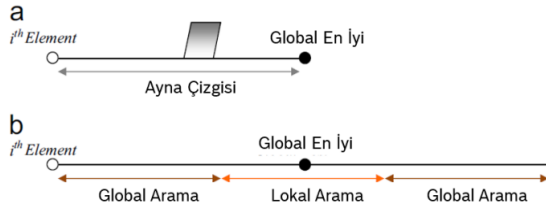
e-posta: draliryildiz@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 319-323

durumda maksimizasyonu olmalıdır. Bu eleman j^{th} iterasyonda, x_{gb}^j , global en iyi olarak tanımlanır.

3. Data seti rasgele bir biçimde bileşim elemanları ve ayna grubu olarak ikiye ayrılır. Bu adımda α parametresi tanımlanır. Eğer $r_1 \leq \alpha$ ise ayna grubuna ayrılır değil ise bileşim grubuna ayrılır (Şekil 1).
4. Bileşim grubundaki her bir eleman rasgele olarak aşağıdaki 1 nolu formüle göre belirlenen araştırma uzayında değiştirilir. r_2 , 0 ile 1 arasında seçilen rasgele bir sayıdır.

$$x_i^j = \text{LB}^j + (\text{UB}^j - \text{LB}^j) \cdot r_2 \quad (1)$$



Şekil 1. Ayna grubu için seçilen parçanın şematik gösterimi (Schematic mirror search part of the interior search algorithm)

5. Ayna grubu için çözüm uygulamasında ayna, ilk olarak rasgele seçilen eleman ile global en iyi arasına konumlanır. j . iterasyonuna sahip i . parça için konumlandırılan ayna'nın pozisyonunu bulmak için aşağıdaki formül kullanılır:

$$x_{\text{m,i}}^j = r_3 x_i^{j-1} + (1 - r_3) x_{\text{gb}}^j \quad (2)$$

r_3 , 0 ile 1 arasında rasgele seçilen bir sayıdır. Görüntünün yada elemanın pozisyonu ise ayna'nın konumuna bağlı olarak değişmekle birlikte aşağıdaki şekilde formülize edilir:

$$x_i^j = 2x_{\text{m,i}}^j - x_i^{j-1} \quad (3)$$

6. Global en iyiyi bulmak için, rasgele arama çalışması aşağıdaki formüle göre küçük iterasyonlar uygulanarak gerçekleştirilir:

$$x_{\text{gb}}^j = x_{\text{gb}}^{j-1} + r_n \cdot \lambda \quad (4)$$

r_n ; rasgele dağıtılmış elemanlardan x ve λ ile aynı boyutlara sahip olanlarla vektörel aynıdır. Burada λ ise $0.01 * (\text{UB} - \text{LB})$ olarak ayarlanmıştır. Bu rasgele yürüyüş çalışması global en iyi etrafında yapıldığı için lokal aramadır.

7. Gerçek ve görüntü elemanlarının lokasyonlarına en uygun değerleri hesaplanır ve lokasyonlar güncellenir. Bu güncelleme minimize problemlerinde aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$x_i^j = \begin{cases} x_i^j, & f(x_i^j) < f(x_i^{j-1}) \\ x_i^{j-1}, & \text{değilse} \end{cases} \quad (5)$$

8. Eğer bu kriterlerden herhangi biri sağlanmıyorsa, işlem adım 2'den tekrarlanır.

Interior arama algoritmasının pseudo kodu[14] aşağıda verilmiştir.

Başlat

Koşul herhangi bir durdurma kriteri sağlanmazsa

Bul x_{gb}^j

$i=1$ 'den n 'e kadar olan değerler için

eğer x_{gb}^j

$$x_{\text{gb}}^j = x_{\text{gb}}^{j-1} + r_n \cdot \lambda$$

veya eğer $r_1 \leq \alpha$

$$x_{\text{m,i}}^j = r_3 x_i^{j-1} + (1 - r_3) x_{\text{gb}}^j$$

$$x_i^j = 2x_{\text{m,i}}^j - x_i^{j-1}$$

veya

$$x_i^j = \text{LB}^j + (\text{UB}^j - \text{LB}^j) \cdot r_2$$

ayrışım elemanları dışında sınırları kontrol et

$i=1$ 'den n 'e kadar olan değerler için

Değerlendir $f(x_i^j)$

$$x_i^j = \begin{cases} x_i^j, & f(x_i^j) < f(x_i^{j-1}) \\ x_i^{j-1}, & \text{değilse} \end{cases}$$

Son

Son

3. RADYAL TABANLI FONKSİYONLAR (RADIAL BASIS FUNCTIONS)

Radyal tabanlı fonksiyonlar (RRF) meta-modelleme tekniği[1], optimizasyon işleminde gerekli olan amaç ve kısıt fonksiyonlarına ait denklemlerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Radyal tabanlı fonksiyonlar meta-modelleme tekniği ile elde edilen denklemler, salıncak kolu optimizasyon probleminde ait matematiksel modelin oluşturulmasında ve bu matematiksel modelin interior arama algoritması ile optimizasyonu çalışmalarında kullanılmıştır. Literatürde bazı taşıt parçalarının optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar [1] incelendiğinde, radyal tabanlı fonksiyonlar ile elde edilen denklemler kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen optimum tasarıma ait sonuçlar ile optimum tasarım için tekrar yapılan doğrulama analizleri ile elde edilen sonuçlar arasındaki farkın başka bir ifade ile hata oranının düşük olması bu çalışmada tercih edilme sebebidir.

4. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU (TOPOLOGY OPTIMIZATION)

Tasarımın sürecinin başında optimum yapısal modelin bulunmasını sağlayan topoloji optimizasyonu teorisi

optimizasyon işlemi uygulanacak parçanın dış boyutlarında herhangi bir değişiklik olmaksızın, parçanın rijitliğini bozmayacak şekilde belirli bölgelerden malzeme boşaltılması esasına dayanır. Topoloji optimizasyon teorisi, yapısal kompliansı minimum yapan yada rijitliği maksimum yapan bir Ω alanındaki boşluk ve katı bölgelerin konfigürasyonunu araştırır [15].

Topoloji optimizasyon yöntemleri, homojenleştirme metodu ve yoğunluk metodu olmak üzere iki farklı metodu kapsar. Homojenleştirme tasarım metodu, 1988 yılında Kikuchi ve Bendsoe tarafından geliştirilmiştir [15].

Diğer bir topoloji optimizasyonu yaklaşımı olan yoğunluk metodu 1993 yılında Yang ve Chuang tarafından geliştirilmiştir[16].

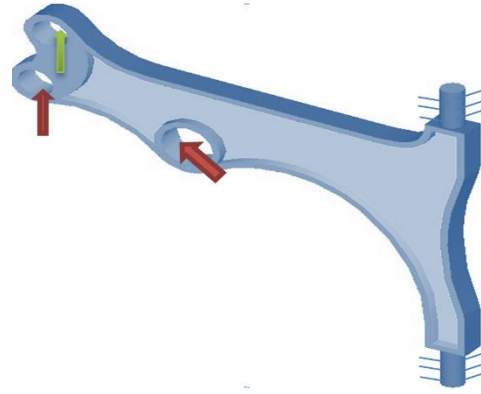
Bu çalışmada otomobillerin süspansiyon sisteminde kullanılan salıncak kolunun optimum tasarımının belirlenmesi çalışması yapılmıştır.

5. TAŞIT SALINCAK KOLUNUN YAPISAL OPTİMİZASYONU (STRUCTURAL OPTIMIZATION OF VEHICLE SUSPENSION ARM)

Taşıtlarda kullanılan salıncak kolunun optimum tasarımının geliştirilmesi çalışmasına, şekil 4 de görülen parçanın başlangıç modelinin oluşturulması ile başlanmıştır. Şekil 1'de mevcut sınır şartları görülmektedir.

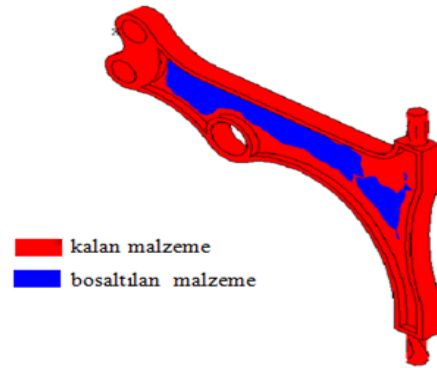


Şekil 1. Salıncak kolu başlangıç modeli (Initial design of the suspension arm)



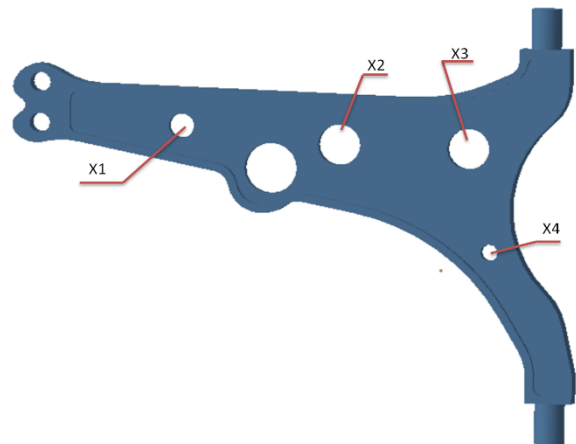
Şekil 2. Sınır şartları (Boundary conditions)

İlk tasarım modeli oluşturulan parça şekil 2 de verilen sınır şartlarında amaç fonksiyonu olarak komplians minimizasyonu, kısıtlayıcı olarak % 50 hacim azalması seçilerek topoloji optimizasyonu yapılmış ve şekil 3 de görülen malzeme dağılımı elde edilmiştir.



Şekil 3. Topoloji optimizasyonu sonrası malzeme dağılımı (Material distribution after topology optimization)

Şekil 3 de elde edilen topoloji optimizasyonu dağılımına göre salıncak kolu şekil 4 de görüldüğü gibi tekrar tasarlanmıştır.



Şekil 4. Tasarım değişkenleri (design variables)

Salıncak kolu tasarımında göz önüne alınan amaç ve kısıt fonksiyonları sırasıyla ağırlık ve parça üzerinde çalışma koşullarında oluşacak maksimum gerilme değeri olarak belirlenmiştir. Bu amaca ulaşmak için şekil 4 de verilen geometri üzerindeki dört adet delik çapı tasarım

parametresi/değişkenleri olarak belirlenmiştir. Başlangıç tasarımı olarak belirlenen bu model üzerindeki dört adet tasarım değişkeninin geometrik olarak maksimum ve minimum değerleri üç boyutlu tasarım programında denenerek Çizelge 1 deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 1. Tasarım değişkenlerinin alt ve üst değerleri (Upper and lower limits of design variables)

Değişken numarası	Alt değeri	Üst değeri
x ₁	5	15
x ₂	4	16
x ₃	6	24
x ₄	2	6

Optimizasyon sürecinde aşağıda detaylı olarak açıklanan işlem adımları uygulanmıştır:

1- Şekil 4 de gösterilen dört tasarım değişkenine ait Çizelge 2 de verilen değerler latin hiperküp yöntemiyle seçilerek optimizasyon çalışmasında kullanılmak üzere yüz farklı salıncak kolu modeli Catia programında oluşturulmuştur.

2- Yüz farklı salıncak kolu modelinin ağırlığı ve şekil 2 de verilen sınır şartları altında sonlu elemanlar analizi yapılarak yüz farklı sonlu elemanlar analizi sonucunda her bir parça için ortaya çıkan gerilme değerleri bulunmuştur.

3- Daha önceki çalışmalarımızda kullanılan ve kendi geliştirdiğimiz radyal tabanlı fonksiyonlar metamodelleme yöntemine ait Matlab kodları[1] yardımıyla amaç ve kısıt fonksiyonlarına ait denklemler elde edilmiştir. Radyal tabanlı fonksiyonlar metamodelleme yönteminde giriş değerleri yüz farklı tasarıma ait dört değişkenin boyutları, çıkış değerleri ise sonlu elemanlar analizi ile elde edilen gerilme değerleri ve her bir parçanın ağırlığıdır. Bu giriş ve çıkış verilerini temsil eden denklemler, gerilmeyi ve parça ağırlığını ifade eden matematiksel denklemlere dönüştürülmüştür.

4- Bu denklemler optimizasyon probleminde amaç ve kısıt fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

5- Optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu olarak ağırlığın minimize edilmesi, kısıt fonksiyonu olarak gerilmenin 350 MPa dan küçük olması tanımlanmıştır ve bu işlem için üçüncü adımda elde edilen denklemler kullanılmıştır.

6- Optimizasyon işleminde Çizelge 1 de verilen tasarım değişkenlerinin alt ve üst limitleri arasında kalacak şekilde tasarım değişkenlerinin seçilmesine izin verilmiştir.

Yukarıda detaylı olarak anlatılan adımlarda elde edilen denklemler ikinci bölümde detayları verilen interior arama algoritması ve genetik algoritmalar optimizasyon yöntemleriyle yapılan optimizasyon çalışmalarında amaç ve kısıt fonksiyonları olarak tanımlanıp yapılan optimizasyon işlemi sonucunda Çizelge 2 de verilen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5. Optimum tasarım (Optimum design)

Çizelge 2. Salıncak kolu optimizasyonu için karşılaştırılmalı sonuçlar (Comparative results for suspension arm optimization)

	Ağırlık (gr)	Maksimum gerilme (N/mm ²)
Başlangıç	275	248
Topoloji Optimizasyonu Sonrası	236	327
Genetik Algoritmalar	218	345
Interior arama Algoritması	198	349

Çizelge 2 de görüleceği üzere interior arama algoritması ile elde edilen değerler genetik algoritmalar[2] ile elde edilen değerlere göre daha iyidir. Interior arama algoritması ile yapılan optimizasyon çalışması sonucu elde edilen optimum salıncak kolu tasarımında oluşan maksimum gerilme 349 MPa ve optimum salıncak kolu ağırlığı 198 gr olarak şekil 5 de verildiği gibi elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada binek araçların süspansiyon sistemlerinde kullanılan salıncak kolunun radyal tabanlı fonksiyonlar meta-modelleme yöntemi ve interior arama algoritması kullanılarak optimum tasarımı yapılmıştır.

Optimizasyon çalışmasında topoloji optimizasyonu sonuçlarına göre dört adet tasarım değişkeni belirlenerek bu değişkenlerin alt ve üst limitleri ihlal edilmeyecek şekilde latin hiperküp yöntemi ile yüz farklı salıncak kolu modeli oluşturulmuştur. Her tasarım için verilen çalışma koşullarında sonlu elemanlar analizi yapılarak salıncak kolu üzerinde oluşan gerilme değerleri ve her bir tasarımın ağırlığı hesaplanmıştır. Oluşan sonuçlara göre radyal tabanlı fonksiyonlar yöntemi ile gerilme ve ağırlık değeri için

matematiksel denklemler elde edilmiştir.

Bu denklemler optimizasyon çalışmasında amaç ve kısıt fonksiyonu olarak kullanılarak optimum boyutlara sahip salıncak kolu geometrisi interior arama optimizasyon algoritması ile elde edilmiştir. Optimum tasarım, 350 Mpa olarak verilen gerilme kısıtını ihlal etmemektedir. Optimum tasarımın ağırlığı 198 gr olarak elde edilmiştir. Optimum tasarımın ağırlığı başlangıç tasarımına göre % 28 daha azdır.

Sonuçlar interior arama algoritmasının taşıt elemanlarının optimum tasarımında etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yıldız, A.R., Solanki, K. "Multi-Objective Optimization Of Vehicle Crashworthiness Using A New Particle Swarm Based Approach", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1-4): 367-376, (2012).
- [2] Yıldız, A.R., Saitou, K. "Topology Synthesis Of Multi-Component Structural Assemblies in Continuum Domains", *Transactions Of Asme, Journal Of Mechanical Design*, 133(1): 011008-1– 011008-9, (2011).
- [3] Bureerat, S., Limtragool, J., "Performance Enhancement Of Evolutionary Search for Structural Topology Optimisation", *Finite Elements in Analysis and Design*, 42(6), Pp.547-566, (2006).
- [4] Yıldız, B.S., Lekesiz, H., Yıldız A.R., "Structural design of vehicle components using gravitational search and charged system search algorithms", *Materials Testing*, 58:79-81, (2016).
- [5] Karagöz, S., Yıldız, A.R. "A comparison of recent metaheuristic algorithms for crashworthiness optimisation of vehicle thin-walled tubes considering sheet metal forming effects", *International Journal of Vehicle Design*, 73:179-188, (2017).
- [6] Pholdee, N., Bureerat, S., Yıldız, A.R. "Design of steel frames using ant colony optimization", *International Journal of Vehicle Design*, 73:20-53, (2017).
- [7] Yıldız, B.S., Lekesiz, H. " Fatigue-based structural optimisation of vehicle components", *International Journal of Vehicle Design*, 73:54-62, (2017).
- [8] Yıldız, B.S. "Artificial Immune System for Multi-Objective Design Optimization of Composite Structures", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21:1416–1429, (2008).
- [9] Yıldız, A.R., "A comparative investigation of eight recent population-based optimization algorithms for mechanical and structural design problems", *International Journal of Vehicle Design*, 73: 208-218, (2017).
- [10] Yıldız, A.R., "A New Design Optimization Framework Based On Immune Algorithm And Taguchi Method", *Computers in Industry*, 60(8):613-620, (2009).
- [11] Yıldız, A.R., Hybrid Taguchi-Harmony Search Algorithm For Solving Engineering Optimization Problems, *International Journal Of Industrial Engineering Theory, Applications and Practice*, 15(3): 286-293, (2008).
- [12] Yıldız, A.R., A Novel Particle Swarm Optimization Approach for Product Design and Manufacturing, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 40:617-628, (2009).
- [13] Yıldız, A.R., "A Novel Hybrid Immune Algorithm for Global Optimization in Design and Manufacturing", *Robotic And Computer Integrated Manufacturing*, 25:261-270, (2009).
- [14] Gandomi, A.H. 'Interior search algorithm (ISA): a novel approach for global optimization', *ISA Transactions*, 53:1168–1183, (2014).
- [15] Bendsoe M.P. and Kikuchi, N. "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", *Computational Methods Application Mechanics Engineering*, 71, 197-24, (1988).
- [16] R.J. Yang ve C.H. Chuang, "Optimal topology design using linear programming", *Structural Optimization*, 68:265-290, (1993).

Yapı-Temel-Zemin Sismik Etkileşim Probleminin Adapazarı Bölgesi İçin Empedans Fonksiyonları Yardımıyla Analizi

Mustafa Yavuz ÇETİNKAYA¹, Erkan ÇELEBİ², Osman KIRTEL^{3*}

¹İnşaat Mühendisi, USA

²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya

³Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya

(Geliş/Received : 20.06.2016; Kabul/Accepted : 09.07.2016)

ÖZ

Yumuşak zemin koşullarında meydana gelen depremler göstermiştir ki, zemin ortamının özellikleri üst yapının dinamik davranışını büyük oranda değiştirmektedir. Bu çalışmada, temel empedans fonksiyonları kullanılarak yapı-temel-zemin dinamik etkileşimi dikkate alınmıştır. Adapazarı bölgesi zemin özellikleri göz önünde bulundurularak köprü ayağı-zemin sisteminin, deprem etkisindeki davranışı temel sönümüne bağlı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Empedans Fonksiyonları, Yapı-Zemin Etkileşimi, Temel Ortamının Sönümü.

Analysis of Seismic Soil-Foundation-Structure Interaction Problem for Adapazarı Region by Using Impedance Functions

ABSTRACT

Earthquakes occurring in the soft ground conditions show that the soil medium alters substantially the dynamic behavior of the structure. In this study, the impedance functions are used for considering the dynamic structure-foundation-soil interaction. The seismic response of bridge footing-soil system is investigated depending on the foundation damping by taking into consideration of soil characteristics for Adapazarı region.

Keywords: Impedance Functions, Soil-Structure Interaction, Foundation Damping.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sismik riskin yüksek olduğu bölgelerde yumuşak zemin koşullarında inşa edilecek olan önemli mühendislik yapılarının deprem performanslarını daha ayrıntılı incelemek ve depreme karşı tam güvenliği sağlayabilmek için yapı-zemin dinamik etkileşiminin problemin çözüm sürecine katılması zorunlu hale gelmektedir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrası önemli can ve mal kaybına yol açan yapısal hasarların zeminin geoteknik özelliklerine bağlı dağılımı incelendiğinde, kalın alüvyol tabakalardan oluşan yumuşak zeminler üzerinde kurulmuş kentlerde yoğunlaştığı görülmektedir. Zemin ortamının şekil değiştirebilme özelliğinin hesap sürecine katılması, yapıların titreşim davranışının birbirine bağlı üç ortak sistemin dinamik etkileşimi altında değerlendirilmesini gerektirir. Bunlar üstyapı, yapı temeli ve temelin çevresini saran jeolojik zemin ortamıdır. Yapı-zemin birlikteliğinin sayısal araçlarla idealleştirilmesinde, doğrudan çözüm yöntemi [1-3] ve altsistem yaklaşımı

[4-6] kullanılarak, sismik yüke bağlı olarak zemin şartlarının yapının dinamik tepkisi üzerindeki etkileri yönetici anahtar parametrelere bağlı incelenmektedir. Yapıların sismik performansının analizinde yerel zemin koşullarının etkisinin hesap ilkelerinde doğrudan yer alması hususunda yakın zamanda önemli birçok araştırma raporu tavsiye kararları yayınlamıştır [7-8].

Bu çalışmanın amacı, serbest yüzey deprem yer hareketiyle zorlanan yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkileşimini ve zeminin üstyapıların dinamik davranışı üzerindeki etkilerini altsistem yaklaşımıyla yapı temeli-zemin arakesitinde tanımlanan empedans fonksiyonlarına bağlı analiz etmek, değerlendirmek ve sonuçlarını tartışmak şeklinde özetlenebilir. Sayısal araştırmalar için, sonuçların sağlıklı ve doğru yorumlanabilmesi açısından üstyapı olarak seçilen köprü ayağı örneğine farklı büyüklüklerde deprem senaryoları uygulama yoluna gidilmiştir. Örnek modelin temel-zemin arakesitinde zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini ve geometrik sönümünü temsil etmek üzere yaylar ve söndürücüler kullanılmıştır. Yapı-zemin dinamik etkileşim problem-lerinde temel ortamında oluşan ilave sönümün nasıl deprem yer hareketini değiştirdiğini, daha etkili ve kritik olduğunu göstermek için analizlerde

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: okirtel@sakarya.edu.tr

Dijital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 325-332

Adapazarı merke-zinde farklı noktalarda gerçekleştirilen geoteknik saha deneylerinden elde edilen zemin mekanik özellikleri genelleştirilerek kullanılmıştır.

2. ÇÖZÜM YÖNTEMİ (ANALYSIS METHOD)

2.1. Genel Bakış (Overview)

Yapı-temel-zemin ortamlarının birbirleriyle etkileşimleri arasında iki mekanizma yer alır:

- **Eylemsizlik Etkileşimi:** Titreşim etkisindeki bir yapıda burulma, eğilme momenti ve kesme kuvveti oluşur. Bu kuvvet ve momentler temel-zemin etkileşim arakesitin-de yerdeğiştirme ve dönme meydana getirir. Tüm yapı-sal sistemin şekil değıştirmesine önemli katkı sağlayan bu yerdeğiştirme ve momentler yalnız temel-zemin sisteminin şekil değıştirebilirliğinde mümkündür (Yapı periyodunun artması). Aynı zamanda bu yerdeğiştir-meler histerezis zemin sönümü ve geometrik sönüm vasıtasıyla enerji tüketimine yol açar ve bu durum sistemin sönümünü önemli derecede etkiler. Bu etkilerin yapısal ataletten kaynaklanmasından dolayı eylemsizlik etkileşimi olarak adlandırılır.

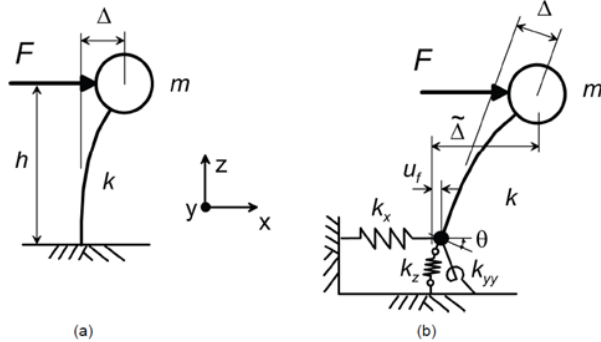
- **Kinematik Etkileşim:** Zemin içinde veya üzerinde rijit temel elemanlarının varlığı temel girdi hareketini serbest zemin hareketinden farklılaştırmasına kinematik etkileşim denir. Kinematik etkiler serbest zemin hareketiyle ilişkili frekansa bağlı transfer fonksiyonları yardımıyla ifade edilir.

2.2. Yapı-Temel-Zemin Sisteminin Davranışı

(Behavior of Structure-Foundation-Soil System)

Dış yük etkisinde yapı temelinin davranışı üzerine iki yaklaşım bulunmaktadır:

- **Rijit Taban Yaklaşımı:** Temelin oturduğu zemin ortamının sonsuz rijit kabul edilmesi durumunda üst yapının dış yük etkisi altında sadece ötelenme yaptığı gözlemlenir (Şekil 1a).
- **Esnek Taban Yaklaşımı:** Zemin ortamının şekil değıştirmesi söz konusu olduğunda temelin dönmesi ve ötelenmesi sonucunda üst yapının toplam yer değıştirmesinin değıştiğı gözlemlenir (Şekil 1b).



Şekil 1. Üstyapının kuvvet etkisinde yaptığı deformasyonlar: (a) üstyapının zemine rijit bağlı durumu (b) üstyapının yapı temelinin esnekliğiyle yaptığı dönme ve ötelenmeler [7]. (Structure deformation under lateral forces: (a) fixed base (b) flexible base)

Şekil 1a'daki gibi rijitliği k ve kütlesi m olan rijit taban yapısının statik kuvvet etkisinde yaptığı yer değıştirme Δ :

$$\Delta = \frac{F}{k} \quad (1)$$

Yapı dinamiğinden bilinen yapının periyodu, T :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2)$$

Şekil 1b deki gibi rijitliği k ve kütlesi m olan esnek taban yapısının statik kuvvet etkisinde yaptığı yer değıştirme $\tilde{\Delta}$:

$$\tilde{\Delta} = \frac{F}{k} + u_f + \theta.h \quad (3)$$

Bu durumda esnek taban yapısının periyodu, \tilde{T} :

$$\tilde{T} = (2\pi)\sqrt{\frac{m}{k} + \frac{m}{k_x} + \frac{mh^2}{k_{yy}}} \quad (4)$$

Denklem (4) ve (2) birbirine oranlandığında:

$$\frac{\tilde{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_x} + \frac{kh^2}{k_{yy}}} \quad (5)$$

Burada, u_f temelin yatay yerdeğıştirmesini, θ temelin dönmesini, k_x temel ortamının yanal ötelenme rijitliğini ve k_{yy} ise temel ortamının dönme rijitliğini ifade etmektedir. Denklem (5); esnek taban yapısının rijit taban yapısına göre periyod oranını gösteren bir ifadedir [9]. Yapı-zemin etkileşimini dolayısıyla \tilde{T}/T 'yi kontrol eden anahtar parametreler aşağıda verilmiştir [10,11].

$$\frac{h}{V_s T}, \quad \frac{h}{B}, \quad \frac{B}{L}, \quad \frac{m}{\rho_s 4BLh}, \quad \text{ve } \nu \quad (6)$$

Burada h modal yapı yükseliğidir, B ve L sırasıyla temel yarı genişliği ve temel yarı uzunluğudur, ρ_s zemin birim hacim kütlesi, ν zeminin Poisson oranı, h/B yapı modal yüksekliğinin temel yarı genişliğine oranı, B/L temel yarı genişliğinin temel yarı uzunluğuna oranı, $m/\rho_s 4BLh$ yapı modal yüksekliğine eşit bir derinliğe uzanan bir hacimde üst yapının kütesinin zeminin kütesine oranıdır. Kütle oranının etkisi küçüktür ve 0.1-0.2 arasında alınır [12]. $h/(V_s T)$ yapının zemine rijitlik oranını temsil eder. $h/(V_s T)$ oranı çerçeve yapılar için 0.1 den daha azdır. Perde duvar ve çaprazlı yapılar için yaklaşık olarak 0.1 ve 0.5 arasında değışmektedir [13].

2.3. Temel Sönümü (Foundation Damping)

dış yük etkisindeki esnek tabanlı bir yapıda artan periyod oranına ek olarak temel-zemin etkileşimiyle ortaya çıkan bir sönüm meydana gelir ve bu sönüme temel sönümü adı verilir β_f . Temel sönümü iki

parçadan oluşur (1) zeminin birim şekil değiştirmesine bağlı olarak meydana gelen sönüm katkısı (histerezis sönüm) ve (2) zemin ortamının sınırsızlığı nedeniyle enerji kaybına eşdeğer anlamda karşı gelen fiktif zemin sönümü diğer bir adıyla geometrik sönümdür.

Temel sönümünün tanımlanması için geliştirilen birçok analitik yaklaşımdan bir tanesi de Wolf'un önerdiği formülasyondur [14]. Bu yaklaşımda;

- Temel rijitlik terimlerinin frekansa bağımlı olmadığı
- Temel geometrik sönümünün doğrusal viskoz olduğu

kabullerine göre sönümü hesaplar.

$$\beta_i = \left[\frac{(\tilde{T}/T)^{n_s} - 1}{(\tilde{T}/T)^{n_s}} \right] \beta_s + \frac{1}{(\tilde{T}/T_x)^{n_x}} \beta_x + \frac{1}{(\tilde{T}/T_{yy})^{n_{yy}}} \beta_{yy} \quad (7)$$

Burada β_s zemin histerezis sönümü, β_x ve β_{yy} ötelenme ve dönme titreşim modları için geometrik sönümdür. T_x ve T_{yy} fiktif titreşim periyodlarıdır. Eğer titreşim kaynağı sadece ötelenme ve dönme yapıyorsa fiktif titreşim periyodları;

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_x}}, \quad T_{yy} = 2\pi \sqrt{\frac{mh^2}{k_{yy}}} \quad (8)$$

formülleriyle hesaplanır. Denklem (7)'de kullanılan n_s, n_x, n_{yy} katsayılarının 2 alınması önerilir [15]. Hesap edilen temel sönümü β_i 'e üstyapının sönümünün eklenmesiyle yapı-temel-zemin sisteminin sönümü;

$$\beta_0 = \beta_i + \frac{1}{(\tilde{T}/T)^n} \beta_i \quad (9)$$

elde edilir. Burada β_i tipik yapısal sistemler için genellikle %5 alınan rijit taban yapı sönümüdür. Denklem (9)'da $(\tilde{T}/T)^n$ ifadesinde n , doğrusal viskoz yapı sönümü için 3 aksi durumlar için 2 alınır (örneğin histerezis sönüm) [15].

2.4. Dikdörtgen Yüzeysel Bir Temelin Empedansı için Teorik Model (Theoretical Model for Rectangular Surface Foundation Impedance)

Empedans fonksiyonları temel-zemin etkileşiminin frekansa bağlı sönüm ve rijitlik karakterlerini temsil eder. Klasik çözümler kompleks değerli empedans fonksiyonu için şu şekilde yazılabilir [16,17]:

$$\bar{k}_j = k_j + i\omega c_j \quad (10)$$

Burada \bar{k}_j kompleks değerli empedans fonksiyonu,

j ise ötelenme ve dönme modlarını belirtir. k_j ve c_j sırasıyla temel dinamik rijitliği ve temel-zemin etkileşimiyle ilgili sönümü temsil eder. Denklem (10) için alternatif bir form;

$$\bar{k}_j = k_j (1 + 2i\beta_j) \quad (11)$$

ifadesi ile verilir. Burada;

$$\beta_j = \frac{\omega c_j}{2k_j} \quad (12)$$

denklemleri ile elde edilir. c_j yerine β_j alınmasının avantajı, yapı-temel-zemin sisteminin rezonans frekansının dikkate alınabilmesidir [18].

Elastik bir yarı-uzaya oturan dikdörtgen rijit temellerin empedans fonksiyonlarının hesabı için ampirik bağıntılar literatürde sunulmuştur [5]. Yüzeysel dikdörtgen temelin geometrisi Şekil 2'de verilmiştir. Denklem (11)'de j indisi x, y, z eksenleri boyunca ötelenme rijitliğini ve bu eksenler etrafındaki dönme rijitliklerini ise xx, yy, zz olarak tanımlar. Sönüm çözümleri ayrıca elde edilir. Dinamik rijitlik (k_j) temel boyutunun, zemin kayma modülünün G , zemin Poisson oranının ν ve dinamik düzeltme katsayısı α_j 'nin bir fonksiyonudur.

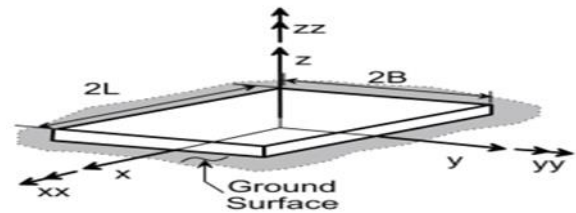
$$k_j = K_j \alpha_j \quad (13)$$

$$K_j = GB^{mf}(B/L, \nu), \quad \alpha_j = \alpha_j(B/L, a_0) \quad (14)$$

Burada K_j , j modu için frekanstan bağımsız temel statik rijitliğidir. Ötelenme ve dönme modu için sırasıyla m değerleri 1 ve 3 alınmaktadır. Statik rijitliğin dinamik düzeltme katsayısı α_j boyutsuz frekans parametresi a_0 'a bağlıdır.

$$a_0 = \frac{\omega B}{V_s} \quad (15)$$

Zaman tanım alanı analizi için, a_0 'a bağlı olan temel yay ve sönüm katsayıları için tek bir açılal frekans ω seçilir. Bu ω seçilirken esnek tabanlı yapının baskın tepkisinin oluşacağı andaki açılal frekansı $\bar{\omega}$ kullanılabilir [7].



Şekil 2. Dikdörtgen yüzeysel temel geometrisi [7]. (Figure 2. Foundation geometry)

3. ADAPAZARI ZEMİN YAPISI VE DEPREM SENARYOLARI (SOIL PROPERTIES OF ADAPAZARI REGION AND EARTHQUAKE SCENARIOS)

3.1. Adapazarı Zemin Yapısı (Soil Properties of Adapazarı)

Temel-zemin arakesitinde tanımlanan dinamik rijitlik fonksiyonlarında zemin ortamı 3 parametre ile ele alınmaktadır. Bu 3 parametre zemin ortamının; (ρ), birim hacim kütlesi [t/m^3], (V_s) kayma dalga hızı [m/s] ve (ν), Poisson oranı [-] dir. Bilindiği üzere bir bölgedeki zemin özellikleri o bölgede yapılacak olan arazi deneyleriyle belirlenir. Adapazarı bölgesi için bölge merkezinde farklı noktalarda 1999 Kocaeli

sonucunda elde edilen zemin özellikleri Çizelge 1’de gösterilmiştir.

3.2. Deprem Senaryoları (Earthquake Scenarios)

Herhangi bir deprem ivme kaydının üstyapıya etkisi araştırılmak istenildiğinde; deprem ivme kaydının kaydedildiği yerdeki zemin özellikleri ile üstyapının oturduğu zemin özelliklerinin benzer olması gerekmektedir. Adapazarı bölgesinde Çizelge 1. de



Şekil 3. Zemin özellikleri için deney yapılan noktalar [20]. (Figure 3. Test site for soil properties)

Çizelge 1. Saha deneylerinden elde edilen geoteknik parametreler [19]. (Geotechnical parameters obtained from site investigations)

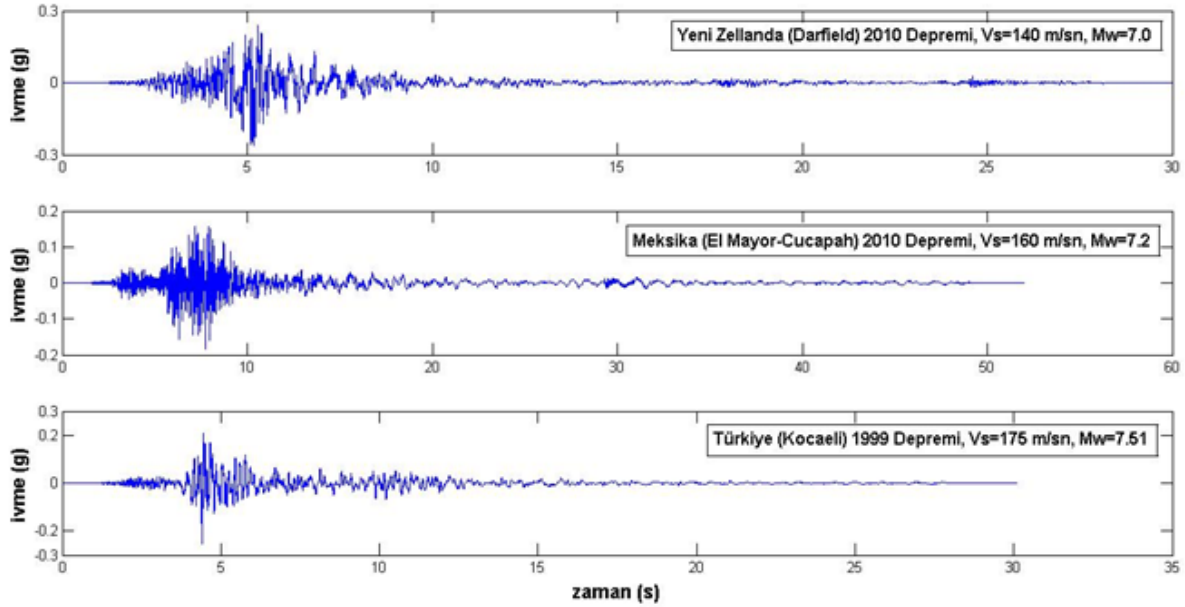
Deney Bölgesi	$\rho [t/m^3]$	$V_s [m/s]$	$\nu [-]$
Adapazarı_A	2	85	0.4984
Adapazarı_B	2	185	0.4923
Adapazarı_C1	2	180	0.4927
Adapazarı_C2	2	155	0.4946
Adapazarı_D	2	145	0.4953
Adapazarı_G	2	120	0.4968
Adapazarı_J	2	135	0.4959
Adapazarı_1-11	2	140	0.4956
Adapazarı_1-24	2	150	0.4949
Adapazarı_1-41	2	170	0.4935
Adapazarı_1-42	2	135	0.4959

depremi sonrası yapılan SPT ve CPT deneyleri sonucunda, ilgili 3 parametre elde edilmiştir [19]. Analizlerde Adapazarı bölgesi için 11 farklı noktada yapılan deneylerin yerleri Şekil 3’de, çalışmalar

verilen zemin özelliklerinde bir deprem ivme kaydı mevcut değildir. Bu sebeple Adapazarı zemin özelliklerine yakın Adapazarı bölgesi dışında kaydedilmiş olan deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Deprem ivme kayıtlarının bulunmasında kuvvetli yer

hareketi veri tabanından faydalanılmıştır [21]. Veri tabanı arama motorunda bölge zemininin kayma dalga hızı aralığı $V_s = 85-185$ (m/s), bölgedeki etkin fay tipi ve istenilen deprem büyüklüğü (moment magnitude) aralığı girilerek uygun 3 ivme kaydı seçilmiştir. Seçilen ivme kayıtları ile ilgili özellikler Şekil 4. de verilmiştir.

çizelgelerde daha iyi ifade edilebilmesi açısından Yeni Zellanda (Darfield) depremi için Adapazarı-1, Meksika (El Mayor-Cucapah) depremi için Adapazarı-2 ve Türkiye (Kocaeli) depremi için Adapazarı-3 zemin bölgesi olarak adlandırılmıştır. Yapılan bu adlandırmalar ve köprü ayağı modeli Şekil 5. de verilmiştir. Köprü ayağı modelinde dikkate alınan temel

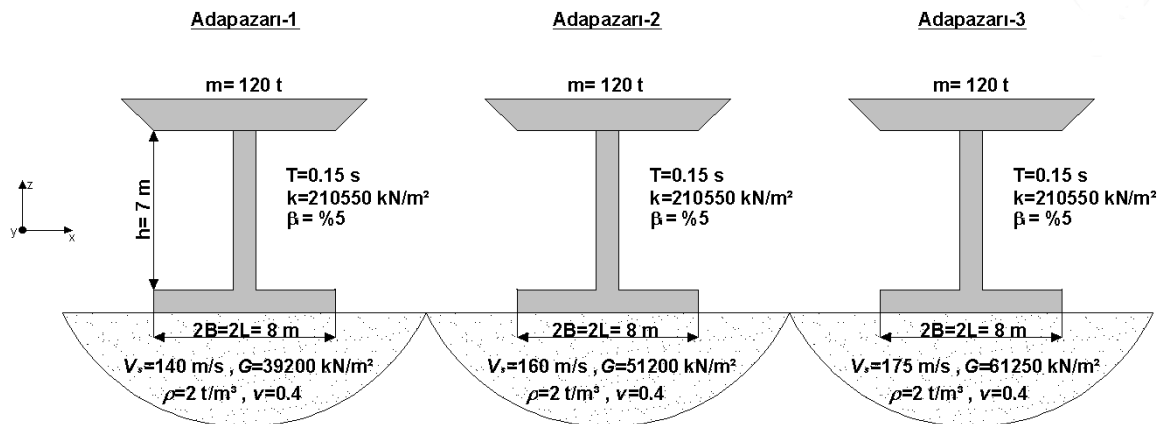


Şekil 4. Kullanılan depremlere ait ivme-zaman ilişkiler (Acceleration time histories for applied earthquakes)

4. SAYISAL UYGULAMA (NUMERICAL APPLICATION)

Bu bölümde ele alınan bir köprü ayağı modeli Adapazarı zemin yapısına uygun 3 farklı zemin bölgesinde yapı-temel-zemin ortamlarının birbirleriyle etkileşimi sonucunda artan periyod ve esnek tabanlı yapının sönüm değerleri hesap edilmiştir. Daha öncede bahsedildiği üzere 3 depremin kaydedildiği istasyonların zemin özellikleri bakımından Adapazarı zemin yapısına uygunluğu ortaya konulmuştur, sonuçların karşılaştırılması olarak verileceği

tipi dikdörtgen yüzeysel temel olmuştur. Kullanılan temelin gömülü olmaması, dikkate alınması gereken kinematik etkilerin ihmal edilebilecek seviyelere getirdiğinden, bu çalışmada kinematik etkileşim göz önünde bulundurulmamıştır. Kinematik etkiler ihmal edildiğinden dolayı Adapazarı zeminine uygun olan ivme kayıtları temel girdi hareketi olarak kullanılabilmiştir. Periyod oranı ve temel sönümü denklemleri içerisinde yer alan değişkenlerin hesabı için literatürde dikdörtgen yüzeysel temeller için tanımlanmış ampirik bağıntılar kullanılmış ve bu



Şekil 5. Üstyapı, temel geometrisi ve zemine ait özellikler (Properties of structure, foundation geometry and soil)

	Adapazari-1	Adapazari-2	Adapazari-3
$T(s)$	0.150	0.150	0.150
$\tilde{T}(s)$	0.203	0.193	0.186
$\frac{\tilde{T}}{T}$	1.36	1.28	1.24
$\beta_r(\%)$	6.41	4.85	3.96

Çizelge2. Dikdörtgen yüzeysel bir temelin empedans fonksiyonları ve geometrik sönüm denklemleri [5]. (Impedance function for rectangular surface function and radiation damping)

	x eksenini boyunca ötelenme	y eksenini etrafında dönme
Statik rijitlik	$K_x = \frac{GB}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right]$	$K_{yy} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[3.73 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.27 \right]$
Dinamik düzeltme katsayısı	$\alpha_x = 1.0$	$\alpha_{yy} = 1.0 - \left[\frac{0.55a_0^2}{\left(0.6 + \frac{1.4}{(L/B)^3} \right) + a_0^2} \right]$
Geometrik sönüm	$\beta_x = \left[\frac{4(L/B)}{(K_x/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right]$	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B)^3 a_0^2}{\left(\frac{K_{yy}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)} \right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right]$

Not: Burada $\psi = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$; $\psi \leq 2.5$, L = temel yarı uzunluğu, B = temel yarı genişliği, $a_0 = \frac{\omega B}{V_s}$

bağıntılar Çizelge 2’de verilmiştir [5]. Sayısal uygulamanın çözüm sürecinde üstyapı-temel ve zeminin doğrusal davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Çizelge 1’de verilen zemin özelliklerinde histerezis zemin sönümü (β_s) % 4.5 - 6 aralığında değişmektedir [20]. Bu aralıktaki β_s değerlerinin temel sönümü (β_f) hesabında ciddi bir katkısı olmadığından, problemin çözümünde $\beta_s = 0$ alınarak β_f değerleri hesaplanmıştır.

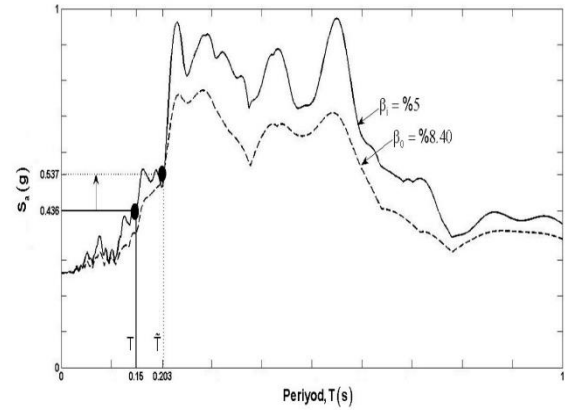
Sayısal uygulama için çözüm aşamaları kısaca özetlenecek olursa:

- $\frac{\tilde{T}}{T}$ ifadesinin hesabı için temel-zemin arakesitinde tanımlanan statik rijitlik terimlerinin her bir titreşim modu için elde edilmesi.
- Yapı-zemin ortak sisteminin yani esnek tabanlı yapının en büyük tepki vereceği açılal frekansa göre temel sönümünün hesabı.
- Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı sisteminin toplam sönümünün bulunması.
- Sönümdeki değişim ve periyodun artmasından ilişkili elde edilen spektral ivme üzerinde yapı-zemin etkileşim etkilerinin gösterilmesi.

Verilen denklemler ve yapılan kabuller ışığında temel yapısının bu üç zemin bölgesi için periyod ve sönüm değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler rijit tabanlı yapı değerleri ile birlikte Çizelge 3. de

verilmiştir. Çizelge 3. de elde edilen değerlerin belirlenen depremler için davranış spektrumlarında gösterimi Şekil 6-9 ve taban kesme kuvvetine etkileri Çizelge 4-6 da verilmiştir.

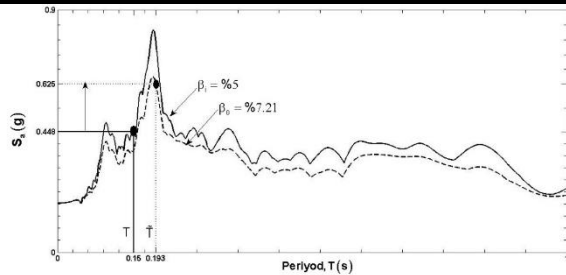
Çizelge 3. Farklı zemin koşullarının yapı-zemin ortak sisteminin dinamik parametreleri üzerindeki etkileri (The effect of different soil conditions on dynamic parameters of soil-structure coupled system)



Şekil 6. Adapazari-1 bölgesi için yapı-zemin etkileşiminin hesaba katıldığı problemde Darfield (2010) depremi için davranış spektrumu (Earthquake response spectra Darfield (2010) including SSI effect for Adapazari-1 region)

Çizelge 4. Köprü ayağı modelinin Adapazari-1 zemin bölgesinde rijit veya esnek taban kabulüyle inşa edilmesi durumunda hesaplanan taban kesme kuvveti (Base shear force computed bridge pier on Adapazari-1 region in the case of for rigid and flexible base)

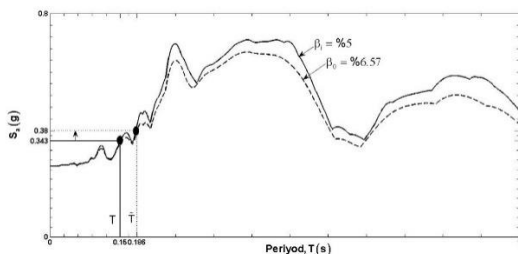
	Taban Kesme Kuvveti (V) (kN; T, β ₀)	Taban Kesme Kuvveti (Ṽ) (kN; T̃, β̃ ₀)	Taban Kesme Kuvvetindeki artış (%)
Adapazari-1	52.4	64.4	%23



Şekil 7. Adapazari-2 bölgesi için yapı-zemin etkileşiminin hesaba katıldığı problemde El-Mayor Cucapah (2010) depremi için davranış spektrumu (Earthquake response spectra El-Mayor Cucapah (2010) including SSI effect for Adapazari-2 region)

Çizelge 5. Köprü ayağı modelinin Adapazari-2 zemin bölgesinde rijit veya esnek taban kabulüyle inşa edilmesi durumunda hesaplanan taban kesme kuvveti (Base shear force computed bridge pier on Adapazari-2 region in the case of for rigid and flexible base)

	Taban Kesme Kuvveti (V) (kN; T, β ₀)	Taban Kesme Kuvveti (Ṽ) (kN; T̃, β̃ ₀)	Taban Kesme Kuvvetindeki artış (%)
Adapazari-2	53.7	75	%40



Şekil 8. Adapazari-3 bölgesi için yapı-zemin etkileşiminin hesaba katıldığı problemde Kocaeli (1999) depremi için davranış spektrumu (Earthquake response spectra Kocaeli (2010) including SSI effect for Adapazari-3 region)

Çizelge 6. Köprü ayağı modelinin Adapazari-3 zemin bölgesinde rijit veya esnek taban kabulüyle inşa edilmesi durumunda hesaplanan taban kesme kuvveti (Base shear force computed bridge pier on Adapazari-3 region in the case of for rigid and flexible base)

	Taban Kesme Kuvveti (V) (kN; T, β ₀)	Taban Kesme Kuvveti (Ṽ) (kN; T̃, β̃ ₀)	Taban Kesme Kuvvetindeki artış (%)
Adapazari-3	41.2	45.6	%10

5. SONUÇLAR (RESULTS)

Yumuşak zemin koşullarında inşa edilen bir yapının periyod ve sönüm değerleri yapı-temel-zemin etkileşiminden dolayı, üst yapının dinamik davranışını önemli derecede etkileyecek şekilde artmaktadır. Periyodu ve sönüm değerleri değişen yapı sisteminde dikkate alınacak tasarım kuvveti, yapının zemine rijit bağlı olması durumuna göre (yapı-zemin etkileşimsiz durum) % 40 a kadar artmıştır. Yapılan araştırmalarda özellikle bu değişimlerin zayıf zemin üzerine konumlanmış düşük periyoda sahip yapılarda ciddi boyutlara ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu yüzden binaların tasarım hesaplarında kullanılan davranış spektrum eğrilerinin bu etkileri göz önünde bulundurularak düzenlenmesi ve bu şekilde kullanılması önerilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Celebi, E., Goktepe, F., ve Karahan, N., "Non-Linear Finite Element Analysis for Prediction of Seismic Response of Buildings Considering Soil-Structure Interaction", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 3495-3505, (2012).
- [2]. Lida, M., "Three Dimensional Non-Linear Soil Buding Interaction Analysis in Lakebed Zone of Mexico City During the Hypothetical Guerro Earthquake", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27: 1483-1502, (1998).
- [3]. Halabian, A.M., and Naggar, M.H.E., "Effect of Non Linear Soil-Structure Interaction on Seismic Response of Tall Slender Structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22: 639-658, (2002).
- [4]. Çelebi, E., Fırat, S., Çankaya, İ., "Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları", *İmo Teknik Dergi*, 3827-3849, Yazı 252, Ankara, Türkiye, (2006).
- [5]. Pais, A., and Kausel, E., "Approximate Formulas for Dynamic Stiffnesses of Rigid Foundations," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7(4): 213-227, (1988).
- [6]. Mylonakis, G., and Gazetas, G., "Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental," *Journal of Earthquake Engineering*, 4: 377-401, (2000).

- [7]. NIST GCR 12-917-21, NEHRP Consultants Joint Venture; "Soil-Structure Interaction for Building Structures", NIST GCR 12-917-21, U.S. Department of Commerce National Institute of Standards and Technology, (2012).
- [8]. FEMA, "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures", FEMA 440, prepared by the Applied Technology Council for Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C (2005).
- [9]. Veletsos, A.S., and Meek, J.W., "Dynamic Behavior of Building-Foundation Systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3: 121-138, (1974).
- [10]. Veletsos, A.S., and Nair, V.V., "Seismic Interaction of Structures on Hysteretic Foundations," *Journal of Structural Engineering*, 101: 109-129, (1975).
- [11]. Bielak, J., "Dynamic Behavior of Structures With Embedded Foundations," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3: 259-274, (1975).
- [12]. Veletsos, A. S., "Dynamics of Soil-Foundation Systems", in W.J. Hall (ed.), *Structural and Geotechnical Mechanics*, **Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs**, New Jersey, 333-361, (1977).
- [13]. Stewart, J.P., Fenves, G.L., and Seed, R.B., "Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings II: Empirical Findings," *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125, 38-48, (1999).
- [14]. Wolf, J.P., "Dynamic Soil-Structure Interaction", **Prentice-Hall, Upper Saddle River**, New Jersey, (1985).
- [15]. Givens, M.J., "Dynamic Soil-Structure Interaction of Instrumented Buildings and Test Structures", **Ph.D. Dissertation**, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, California (2013), (Advisor: Jonathan P. Stewart).
- [16]. Luco, J.E., and Westmann, R.A., "Dynamic response of circular footings," *Journal of Engineering Mechanics*, 97(5): 1381-1395, (1971).
- [17]. Veletsos, A.S., and Wei, Y.T., "Lateral and rocking vibrations of footings," *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9): 1227-1248, (1971).
- [18]. Clough, R.W., and Penzien, J., "Dynamics of Structures", **McGraw Hill**, New York (1993).
- [19]. Youd, T.L., Bray, J.D., Önalp, A., Durgunoğlu, H.T., Stewart, J., "CPT Liquefaction Investigations, Adapazari, Turkey", PEER, USA (2000).
- [20]. Kirtel, O., "Doğrusal Olmayan Zemin Ortamında Rijit Şerit Temeller için dinamik empedans fonksiyonları", **Doktora Tezi**, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Anabilim Dalı, Sakarya, Türkiye (2013), (Danışman: E. Çelebi).
- [21]. <http://Peer.berkeley.edu>

Modelling of Drill Bit Temperature and Cutting Force in Drilling Process Using Artificial Neural Networks

Ramazan ÇAKIROĞLU^{1*}, Selçuk YAĞMUR², Adem ACIR², Ulvi ŞEKER²

¹Gazi University Technical Sciences Vocational School

²Gazi University Faculty of Technology

(Received : 24.06.2016 ; Accepted : 12.08.2016)

ABSTRACT

This study applied artificial neural networks (ANN) to estimate the drill bit temperature and cutting force in drilling process using Firex® coated carbide and uncoated drills. Also, the effects of the different network structures in the modeling the drill bit temperature and cutting force were also investigated. The numbers of neuron in network structure of ANN models are 2-6-2, 2-5-2, 2-3-5-2, 2-5-4-2, 2-3-4-4-2 and 2-2-4-3-2 structures. The best ANN model, the 2-5-2 network structures in predicting the drill bit temperatures were obtained whereas; the 2-2-4-3-2 structures were found in predicting the cutting force. The empirical equations for the best ANN models in the prediction of drill bit temperature and cutting force were developed and the obtained results were confirmed. When the results of mathematical modelling are examined, the computed the drill bit temperature and cutting forces are observed to be apparently within acceptable values.

Keywords: Artificial Neural Network, Drill Bit Temperature, Cutting Force, Machining.

Delme İşlemlerinde Meydana Gelen Kesme Bölgesi Sıcaklığının ve Kesme Kuvvetlerinin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Modellenmesi

ÖZ

Bu çalışmada, kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplar kullanarak yapılan delme işlemi esnasında meydana gelen matkap kesme bölgesi sıcaklığı ve kesme kuvvetlerini tahmin etmek için Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılmıştır. Ayrıca kesme bölgesi sıcaklığı ve kesme kuvvetleri, farklı ağ yapıları denenerek modellemede etkileri araştırılmıştır. YSA modellerinin ağ yapılarındaki nöron sayıları: 2-6-2, 2-5-2, 2-3-5-2, 2-5-4-2, 2-3-4-4-2 ve 2-2-4-3-2'dir. Kesme bölgesi sıcaklığını tahmin etmek için en iyi YSA modeli 2-5-2 ağ yapısı, kesme kuvvetlerinde ise 2-2-4-3-2 ağ yapısı bulunmuştur. Kesme bölgesi sıcaklığı ve kesme kuvvetlerinin belirlenmesinde en iyi YSA modelleri için ampirik denklemler geliştirilmiş ve elde edilen sonuçların doğrulanması yapılmıştır. Matematiksel modellemenin sonuçları incelendiğinde, hesaplanan kesme bölgesi sıcaklığı ve kesme kuvvetlerinin açık bir şekilde kabul edilebilir değerler içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yapay Sinir Ağları, Kesme Bölgesi Sıcaklığı, Kesme Kuvveti, İşlenebilirlik.

1. INTRODUCTION

Drilling is one of the most common and fundamental machining processes in manufacturing industry. Drills are most frequently performed in material removal and are used as a preliminary step for many operations, such as reaming, tapping and boring. Therefore, drills were exposed to mechanical loading with chip formation. The mechanical loads with chip formation caused increasing cutting force and drill bit temperature. In machining process, the importance of knowing the temperature distribution in metal cutting is two parts. Firstly, the temperature affects the workpiece material mechanical properties and therefore the interplay of forces at tool and workpiece.

Secondly, the temperature has a considerable influence on the tool wear, both on the rake face and on the flank

face [1-5]. As well as cutting force, the experimental measurement of cutting temperature was very difficult.

Therefore, alternative methods both cutting force and drill bit temperature to simplicity and fast calculation were developed by using ANN and statistical methods. In the literature, some studies based on ANN and statistical methods were given by different researchers. Yalçın et al., optimized of cutting parameters in face milling with neural networks and Taguchi based on cutting force, surface roughness and temperatures [6]. The prediction of cutting temperatures by using back propagation neural network modeling when cutting hardened H-13 steel in CNC end milling was performed by Ref.[7]. Kara et al.,[8] was performed for the cutting forces generated during the orthogonal turning of AISI 316L stainless steel using an artificial neural network (ANN) and a multiple regression analysis. Metal cutting parameters using intelligent techniques was presented by Ref [9]. Masud et al., modelled of chip tool interface temperature in machining

*Corresponding Author

e-mail: rcakiroglu@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 333-340

steel- an artificial intelligence (AI) approach [10]. Abhang investigated chip-tool interface temperature prediction model for turning process [11]. Application of regression and artificial neural network analysis in modelling of tool-chip interface temperature in machining were performed by Ref. [12]. The cutting force model for self-propelled rotary tool (SPRT) cutting force prediction using artificial neural networks (ANN) has been performed by Ref [13]. Özkan was performed for heat formation during the drilling Al7075 T6 materials using an artificial neural network (ANN) Ref [14]

In this paper, modelling of drill bit temperature and cutting force in drilling process using artificial neural network were presented. Also, ANN models developed by using different numbers of nodes in the hidden layer structure were investigated to predict of drill bit temperature and cutting force. The empirical equations for prediction of drill bit temperature and cutting force by the using ANN models were developed and the confirmation tests with obtained empirical equations were performed. The best of these models was obtained and empirical equations were given to predict of drill bit temperature and cutting force.

2. EXPERIMENTAL STUDY

The drilling conditions and properties of the cutting tools were summarized in Table 1. The drilling tests were performed using Firex® coated carbide twist drilling tools in dry conditions. Coated carbide Firex® tools was a multi-layer coating that combines TiN, TiAlN, and TiCN. The workpiece dimensions were 25 mm in diameter and 25 mm in length. The drill diameter was 14 mm. A Kistler dynamometer was used for measuring the thrust force (Fz). The tests in the measurement of drill bit temperature were used K type thermocouples with a diameter of 1mm. The thermocouple measurement ranges was -200° to 1200° with ± 0.05 %. The thermocouple response time was 10 µs. As shown in Figs. 1 and 2, the thermocouples was inserted through the coolant hole inside of the drills and the thermocouple used through the coolant hole was fixed near to the drill bit surface.

Table 1. Drilling process conditions

Machine tool	Johnford VMC-550 Fancu Serial O-M CNC controlled vertical machining center
Workpiece materials (Al 2014)	0.447 % Si, 0.275 % Fe, 3.189 % Cu, 0.400 % Mn, 1.483 % Mg, 0.005 % Cr, 0.026 % Zn, 0.021 % Ti and 94,12 % Al.
Cutting parameters	Cutting speed (V): 170, 200 and 230 m/min Feed rate (f): 0.1, 0.2 and 0.3 mm/rev

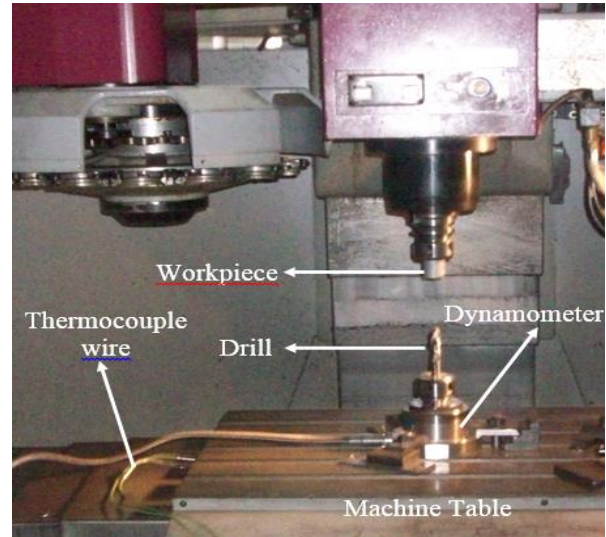


Fig. 1. CNC vertical milling machine and measurement method used in the experimental study [3, 4]



Fig. 2. The twist drilling tool and thermocouple inserted through the hole of internal coolant carbide drill[3, 4]

3. ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Artificial neural-network (ANN) is a computational model for prediction in the system performance and analysis. ANN can be used as alternative methods to simplicity and fast calculations in the engineering fields [15-16]. ANN network structure is consisting of layers and nodes. Nodes are also known as neurons. The ANN network structure with layers and nodes is given in Fig. 3. As shown in Fig. 3, the ANN network structure consists of three layers which are the input layer, hidden layer and output layer. The network structure has two nodes in the input layer, j nodes in the first hidden layer, k nodes in the second hidden layer, l nodes in the m th hidden layer and two nodes in the output layer [17]. Two nodes for the input layer stand for the two decision values of the case study which are cutting speed (V) and feed rate (f). Two nodes for the output layer stands for the predicted drill bit temperature and cutting force values. When considering that a back-propagation (BP) network is applied at the m th hidden layer with j , k and l nodes for each hidden layer, the network structure given in Fig. 3 could be defined as a 2- j - k - l -2 structure.

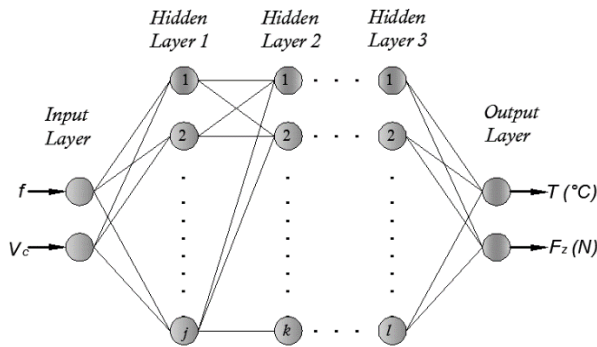


Fig. 3. Example illustration of the ANN

The back-propagation (BP) algorithm is one of the most powerful learning algorithms in neural-networks. Each connection links between neurons on available layers in the ANN is called a weight vector (w) [15-16]. The BP with Levenberg–Marquardt (LM) algorithm is commonly used and has a wide acceptance in the ANN. The back propagation neural network with LM in the ANN has been described in Refs. [15-19]. In this study, the ANN model was developed with two neurons in the input layer and two neurons in the output layer to estimate of drill bit temperature and cutting force at different V and f. The six different network structures (2-6-2, 2-5-2, 2-3-5-2, 2-5-4-2, 2-3-4-4-2 and 2-2-4-3-2) were performed as shown in Fig. 4. The normalization values were given in Table 2.

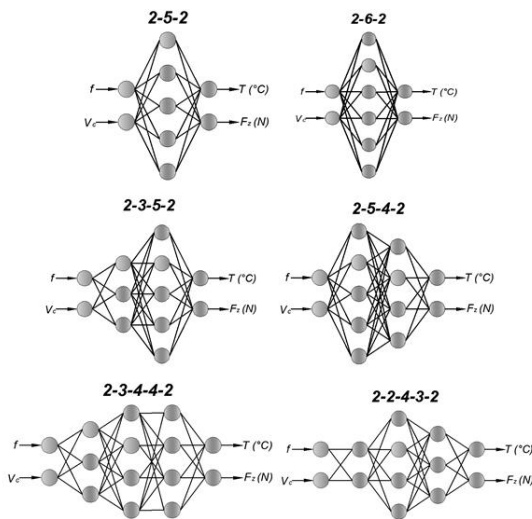


Fig. 4. Network structure models with various hidden layers

Table 2. Parameter values used for in the drill process

Symbol	Machining Parameter	Coded levels		
		1	2	3
A	Tool	Uncoated	Coated	----
B	Feed rate, f (mm/rev)	0.1	0.2	0.3
C	Cutting Speed, V_c (m/min)	170	200	230

The normalization for inputs and outputs is done in the ranges between -1 and +1. The values of the operation conditions (ANN inputs) and drill bit temperature and cutting force (ANN targets) were normalized. ANN

model used for the performance prediction was prepared in “PHYTICA” toolbox software with back propagation neural network based on Levenberg–Marquardt algorithm. The equations used in back propagation algorithm with LM are mentioned below [20]:

Hidden layer calculations:

$$net_i = \sum x_i w_{ij} \tag{1}$$

$$y_i = f(net_i)$$

Output layer calculations:

$$net_k = \sum y_i w_{jk} \tag{2}$$

$$o_k = f(net_k)$$

where, xi are the input data, yi are the results obtained from layer 1 and ok are the results of layer 2.

Transfer function:

The fermi transfer function has been used for both hidden and output layers in calculation:

$$F_i = \frac{1}{1 + e^{-4(NET_i - 0.5)}} \tag{3}$$

The ANN model was performed through two stages: training stage and testing stage. A training drill bit temperature and cutting force data was a group of matched input and output patterns used for training the networks. The measuring drill bit temperature and cutting force data was used to train the ANN and it can precisely predict the drill bit temperature and cutting force. Therefore, the training network model was tested with random selected experimental data to predict output in the testing stage.

The root-mean-square error (RMSE), the minimum error level of the mean absolute percentage (MAPE), and absolute fraction of variance (R^2) used in this paper for neural networks analyses as described in Refs. [21-22] are below:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (y_{pre,m} - t_{mea,m})^2}{n}} \tag{4}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_j \left[\frac{t_{mea,m} - y_{pre,m}}{t_{mea,m}} \right] \times 100 \tag{5}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{m=1}^n (y_{pre,m} - t_{mea,m})^2}{\sum_{m=1}^n (t_{mea,m})^2} \tag{6}$$

where n is the number of data patterns, ypre,m, tmea,m indicate the predicted value and the measured value respectively of one data point m.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the experimental results and prediction values obtained with different ANN structures were investigated. In the experiment, the drill bit temperature and cutting force have been measured for various cutting speed and feed rate with Firex® coated carbide drills through Al 2014 work piece. The experimental drill bit temperature and cutting force values in drilling process were measured. The measured values were given in Table 2. In this study, the ANN models were developed with two neurons in the input layer, two neuron in the output layer and six networks of different numbers of nodes in the hidden layer which are 2-6-2, 2-5-2, 2-3-5-2, 2-5-4-2, 2-3-4-4-2 and 2-2-4-3-2 structures for predicting the drill bit temperature and cutting force as shown in Fig 4. The empirical equations with different ANN structures were developed. In the ANN model, the experimental data set includes 9 values, of which 7 values were used for training the network and 2 values were selected randomly to test the performance of the trained network. Comparison of the experimental data and the testing/training ANN model results for different numbers of nodes in the hidden layer were given in Table 3 and 4. The best results for both drill bit temperature and cutting force were obtained with different hidden layer structures. The weight values between the input layer, hidden layer and output layers for drill bit temperature and cutting force were illustrated in Table 5-6. Mathematical equations derived from the best of ANN models for the drill bit temperature and cutting force were given in Eqs. (7) and (8). The Eqs. (7) and (8) can be helped in the drill bit temperature and cutting force calculations without the need for any experimental work.

$$T = (1 + \exp(-4 * (1.453103 * F_1 + 2.261108 * F_2 - 1.08586 * F_3 + 1.857236 * F_4 + 1.290021 * F_5 - 0.5)))^{-1} \tag{7}$$

$$F_2 = (1 + \exp(-4 * (-1.08961 * F_7 + 2.364955 * F_8 + 1.187011 * F_9 - 0.5)))^{-1} \tag{8}$$

Table 3. Experimental design values for drill bit temperature and cutting force

Experiment no	A (Tool)	B (Feed rate)	C (Cutting Speed)	Actual values T(°C)	Actual values Fz (N)
1	1	1	1	165	985
2	1	1	2	182	942
3	1	1	3	189	842
4	1	2	1	118	1198
5	1	2	2	125	1135
6	1	2	3	149	1071
7	1	3	1	114	1227
8	1	3	2	120	1198
9	1	3	3	135	1170

Table 4. Comparative cutting force results obtained in testing ANN structure

Trial no	Actual	2-6-2	2-5-2	2-3-5-2	2-5-4-2	2-3-4-4-2	2-2-4-3-2
1	985	984,99	984,98	1004,46	984,8	984,99	984,73
2	942	854,96	850,26	954,53	845,76	853,02	857,56
3	842	843,23	843,05	971,74	843,34	843,22	844,06
4	1198	1225,57	1197,99	1183,13	1198,36	1197,75	1196,73
5	1135	1216,05	1135,26	1174,53	1135,84	1135,33	1136,5
6	1071	1172,7	1071,26	1114,56	1070,34	1071,22	1071,11
7	1227	1226,65	1224,97	1223,8	1225,65	1225,74	1225,31
8	1198	1226,32	1211,78	1223,61	1212,81	1221,25	1226,49
9	1170	1223,73	1169,74	1216,1	1171,26	1169,98	1169,45

Table 5. Weights among layers for drill bit temperature

$$NET_{j(1-5)} = w_{1j} * f + w_{2j} * V_c$$

j	w1j	w2j
Weights values between input and first hidden layers		
1	0,024762	1,044968
2	-1.01652	-0.82036
3	1.0589	0.33337
4	-2.08636	0.539196
5	-0.1187	-1.286649

The testing and training prediction results obtained with ANN and experimental results for drill bit temperature and cutting force were given in Fig. 5-10. As shown in Figs. 5-10, the predicted testing and training values were similar to the experimental results. ANN models with experimental results were given with straight line for training and testing data as shown in Figs. 5-10. However, the best predicted ANN model were determined with obtained R² values and R² values were very close to 1. The statistical RMSE, R² and MAPE values for training and testing data's were given to performances analysis of the ANN models as shown in Table 7 and 8. It can be seen that R² values were computed for drill bit temperature with 2-5-2 ANN model whereas, the R² values for drill cutting force were found with 2-2-4-3-2 ANN model as shown in Table 7 and 8. In the best ANN model developed for drill bit temperature prediction, R² values were calculated as 0.999863 and 0.999997 for testing and training, respectively. On the other hand, R² values were calculated as 0.996454 and 0.999999 for testing and training, respectively, in the best ANN model developed for cutting force. Also, RMSE values for drill bit temperature were calculated as 0.009014 and 0.001329 whereas; these values for cutting force were computed as 0.031508 and 0.000637 for testing and training, respectively. MAPE values for drill bit temperature were obtained as 5.671018 and 0.10075 whereas; these values for cutting force were calculated as 0.016046 and 0.011679 for testing and training, respectively as shown in Table 7 and 8. Also, comparison of experimental values and values predicted by ANN for testing and training sets of the drill bit

temperature and cutting force were illustrated in Figs. 11 and 12.

4-2 and 2-2-4-3-2) were used to learn the collected experimental data's. The ANN models was trained with 7 experimental data and tested with 2 experimental data. It was obtained that the best of these models has given 2-5-

Table 6. Weights among layers for cutting force

$$NET_{j(1-2)} = w_{1j} * f + w_{2j} * V_c$$

<i>j</i>	<i>w_{1j}</i>	<i>w_{2j}</i>
Weights values between input and first hidden layers		
1	-0.12973	0.603726
2	0.947081	0.055854

$$NET_{k(3-6)} = w_{1k} * F_1 + w_{2k} * F_2$$

<i>k</i>	<i>w_{1k}</i>	<i>w_{2k}</i>
Weights values between first and second hidden layers		
3	0.24062	0.542858
4	0.122185	0.023141
5	1.514466	-2.37058
6	-1.6263	0.635417

$$NET_{l(7-9)} = w_{1l} * F_3 + w_{2l} * F_4 + w_{3l} * F_5 + w_{4l} * F_6$$

<i>l</i>	<i>w_{1l}</i>	<i>w_{2l}</i>	<i>w_{3l}</i>	<i>w_{4l}</i>
Weights values between second and third hidden layers				
7	0.630884	-0.21587	3.353198	-0.58664
8	0.540065	0.968921	-0.54426	1.191272
9	-0.90567	-0.75655	-0.34898	0.469698

Table 7. Statistical results of the a) testing data and b) training data for drill bit temperature

	2-6-2	2-5-2	2-3-5-2	2-5-4-2	2-3-4-4-2	2-2-4-3-2
RMSE	0.02184 ^a 0.044952 ^b	0.009014 0.001329	0.020081 0.047369	0.200205 0.160017	0.018895 0.001257	0.03206 0.001778
R²	0.999199 0.995807	0.999863 0.999997	0.999308 0.995345	0.889378 0.926745	0.999404 0.999997	0.998312 0.999994
MAPE	3.082372 4.478924	1.271932 0.126797	2.635348 4.45407	17.60284 14.98127	2.634844 0.140868	4.342766 0.21023

Table 8. Statistical results of the a) testing data and b) training data for drill cutting force

	2-6-2	2-5-2	2-3-5-2	2-5-4-2	2-3-4-4-2	2-2-4-3-2
RMSE	0.032361 ^a 0.027098 ^b	0.032799 0.00044	0.01008 0.028678	0.034427 0.000482	0.032515 0.000343	0.031508 0.000637
R²	0.996251 0.997725	0.996073 0.999999	0.999662 0.997427	0.995663 0.999999	0.996189 0.999999	0.996454 0.999999
MAPE	5.801927 3.386576	5.444552 0.051774	1.733939 4.339491	5.726394 0.080407	5.693297 0.045827	5.671018 0.10075

5. CONCLUSIONS

In this work, the drill bit temperature and cutting force experiments were performed with two levels of cutting parameters such as cutting speed and feed. Six different network structures (2-6-2; 2-5-2; 2-3-5-2; 2-5-4-2; 2-3-4-

2 and 2-2-4-3-2 ANN model in prediction of drill bit temperature and cutting force. It was found that there was agreement between experimental data and predicted values for drill bit temperature (R² = 0.999997) and cutting force (R² = 0.999999). The R² values confirmed that the

obtained 2-5-2 and 2-2-4-3-2 ANN models were acceptable. As a result, the neural network can help the researchers to carry out the drill bit temperature and cutting force in machining and can provide both simplicity and fast calculation.

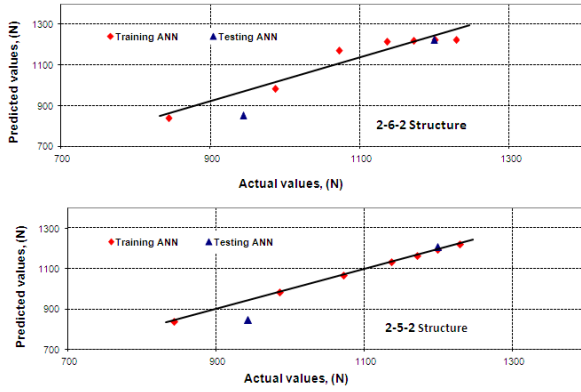


Fig. 5. Comparison of drill cutting force of the actual values with ANN model results for a single hidden layer

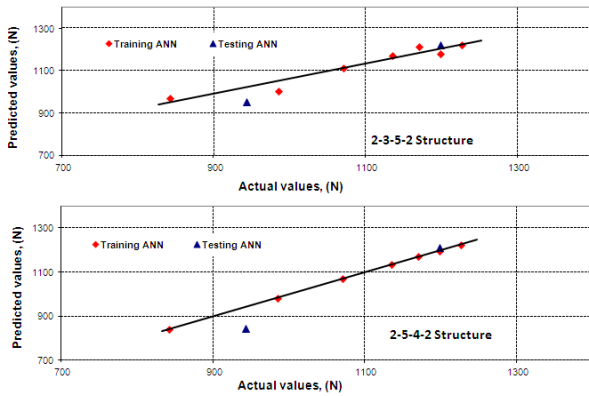


Fig. 6. Comparison of cutting force of the actual values with ANN model results for two hidden layer

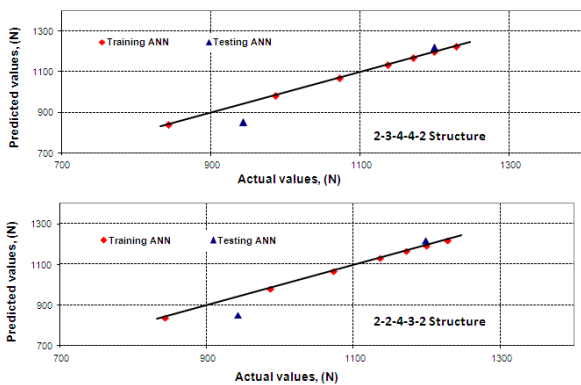


Fig.7. Comparison of drill cutting force of the actual values with ANN model results for three hidden layer

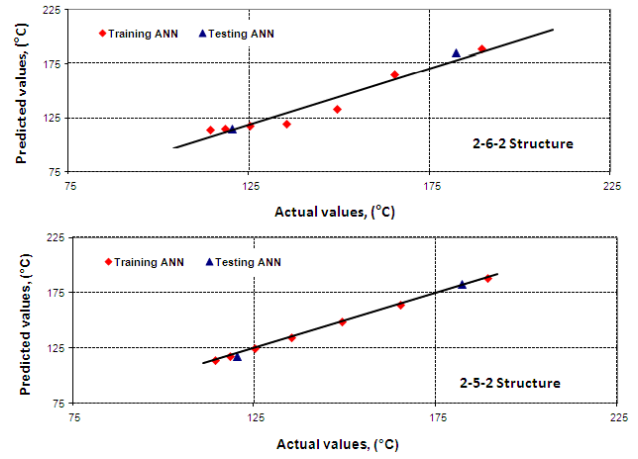


Fig. 8. Comparison of drill bit temperature of the actual values with ANN model results for a single hidden layer

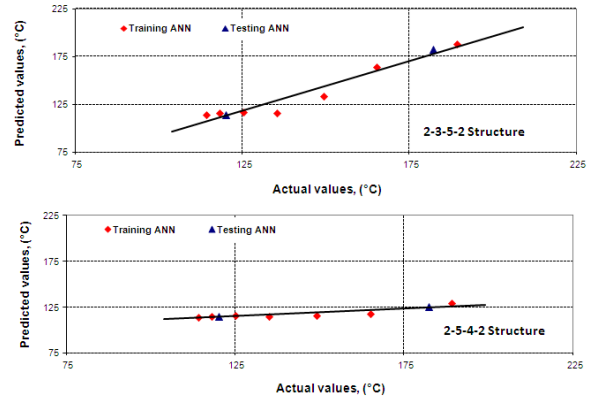


Fig. 9. Comparison of drill bit temperature of the actual values with ANN model results for two hidden layer

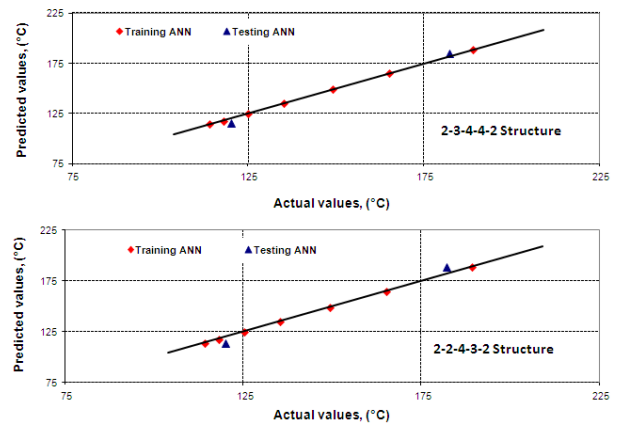


Fig. 10. Comparison of drill bit temperature of the actual values with ANN model results for three hidden layer

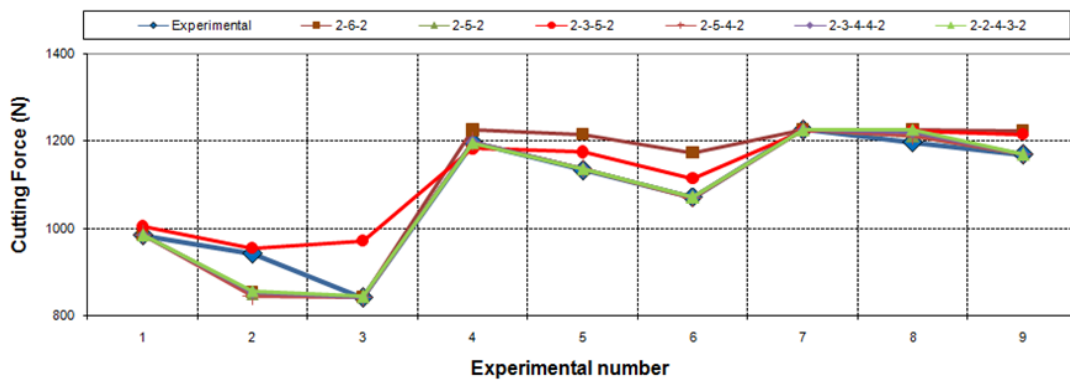


Fig. 11. Comparison of predicted results with actual results for cutting force in testing ANN models

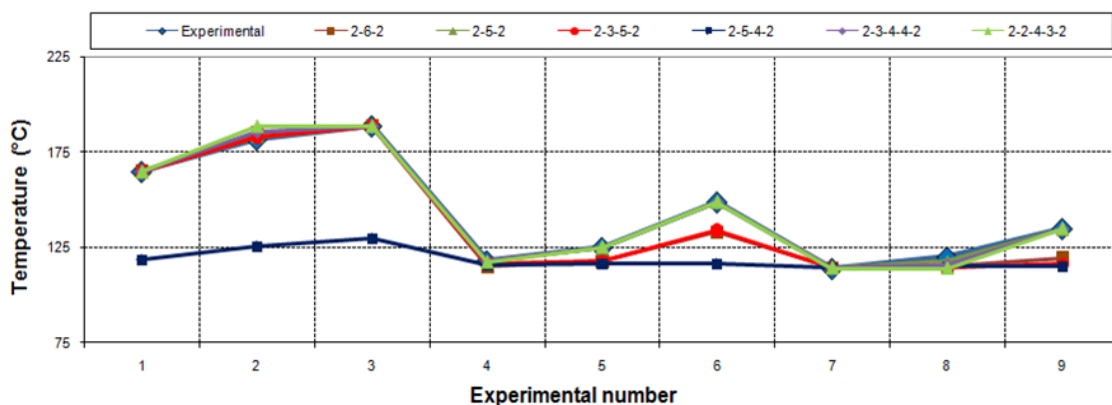


Fig. 12. Comparison of predicted results with actual results for drill bit temperatures in testing ANN models

REFERENCES

[1] Shaw, M. C. "Metal Cutting Principles Oxford University Press." *New York, NY, USA* 457, (1984).

[2] Jaspers, S. P. F. C., J. H. Dautzenberg, and D. A. Taminiau. "Temperature measurement in orthogonal metal cutting." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(1): 7-12, (1998).

[3] R. Çakıroğlu, A. Acir, "Optimization of cutting parameters on drill bit temperature in drilling by Taguchi method", *Measurement*, 46(9): 3525-3531, (2013).

[4] S. Yagmur, A. Acir, U. Seker and M. Günay, "An experimental investigation of effect of cutting parameters on cutting zone temperature in drilling", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(1): 1-6, (2013).

[5] R. Komanduri, Z.B. Hou, "A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology", *Tribology International*, 34: 653-682, (2001).

[6] Yalcin, A. D. Karaoglan, İ. Korkut, "Optimization of Cutting Parameters in Face Milling with Neural Networks and Taguchi based on Cutting Force, Surface Roughness and Temperatures", *International Journal of Production Research*, 51(11): (2013).

[7] T. E. Y. Adesta, M. H.F. Al Hazza, M.Y. Suprianto, M. Riza, "Prediction of Cutting Temperatures by Using Back Propagation Neural Network Modeling when Cutting Hardened H-13 Steel in CNC End Milling", *Advanced Materials Research*, 576: 91-94, (2012).

[8] Kara F, Aslantaş K., Çicek A., "ANN and multiple regression method based modeling of cutting forces in orthogonal machining of AISI 316L stainless steel", *Neural Computing and Applications*, 26(1): 237-250, (2015).

[9] D. Tanikić, M. Manić, G. Devedžić, Z. Stević: "Modeling, Metal cutting Parameters Using Intelligent Techniques", *Journal of Mechanical Engineering*, 561: 52-62, (2010).

[10] A. Al Masud, S. M. Ali, N. R. Dhar, "Modeling of Chip Tool Interface Temperature in Machining Steel- An Artificial Intelligence (AI) Approach", *Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Kuala Lumpur, Malaysia, January 22 – 24, (2011).

[11] L.B. Abhang and M. Hameedullah, "Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process", *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(4): 382-393, (2010).

[12] İ. Korkut, A. Acir, M. Boy, "Application of regression and artificial neural network analysis in modelling of tool-chip interface temperature in machining", *Expert Systems with Applications*, 38(9): 11651-11656, (2011).

[13] Wangshen Hao, Xunsheng Zhu, Xifeng Li, Gelvis Turyagyenda, "Prediction of cutting force for self-propelled rotary tool using artificial neural networks", *Journal of Materials Processing Technology*, 180: 23-29, (2006).

- [14] M. T. Özkan, “Experimental and artificial neural network study of heat formation values of drilling and boring operations on Al 7075 T6 workpiece, *Indian Journal of Engineering & Materials Science*, 20: 259-268. (2013).
- [15] Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H., & De Jesús, O., “Neural network design” *Boston: PWS publishing company*, 20: (1996).
- [16] Haykin S., “Neural networks, a comprehensive foundation” *New Jersey: Prentice*, 697 Hall, (1994).
- [17] Zain A.M., Haron, H., Sharif S., “Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network”, *Expert Systems with Applications*, 37: 1755–1768, (2010).
- [18] T.H. Martin, B.M. Mohammed, “Training feed forward networks with the Marquardt algorithm”, *IEEE Trans. Neural Netw.*, 5(6): 989–994, (1994).
- [19] Battiti, R., “First-and second-order methods for learning: between steepest descent and Newton's method”, *Neural computation*, 4(2): 141-166, (1992).
- [20] Mohanraj, M., Jayaraj, S., & Muraleedharan, C., “Exergy analysis of direct expansion solar-assisted heat pumps using artificial neural networks”, *International Journal of Energy Research*, 33(11): 1005-1020, (2009).
- [21] Lin J.T., D. Bhattacharyya, V. Kecman, “Multiple regression and neural networks analyses in composites machining”, *Composites Science and Technology*, 63: 539–548, (2003).
- [22] Acir A., “Application of artificial neural network to exergy performance analysis of coal fired thermal power plant”, *Int. Journal of Exergy*, 12(3): 362-379, (2013).

Fotovoltaik Paneller Kullanılarak Sisleme Sistemi ile Dış Ortamların Soğutulmasının Araştırılması

Hikmet ESEN*

Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 23119 Elazığ
(Geliş/Received : 14.04.2016 ; Kabul/Accepted : 05.05.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, Elazığ ilinde iki farklı açık ortamın (çardak ve balkon) soğutulması için güneş enerjisi destekli sisleme sistemi kurulmuştur. Bu sistem ile çardak ve balkon bölgesinin sıcaklığı düşürülmüş ve bağıl nemi artırılmıştır. Sağlanan sıcaklık düşümleri termal kamera ile gözlenmiştir. Deneyler sırasında çardak ve balkon bölgesi sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki maksimum fark, yaklaşık olarak 20 °C olarak bulunmuştur. Güneş pillerinin verimleri ve dolum faktörleri sayısal yöntemle sırasıyla % 17.12 ve 73.71 olarak hesaplanmış ve bu değerlerin literatürle uyumlu olduğu ortaya konmuştur. Son derece çevreci olan sisleme sistemin avantajları ve ekonomikliği de çalışmanın sonunda sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sisleme, Serinletme, Çardak, Balkon, Ekonomik, Çevresel.

The Investigation of Cooling Outdoor Areas with Misting System by Using Photovoltaic Panels

ABSTRACT

In this study, two different open areas (arbor and balcony) in Elazığ for solar-assisted cooling with misting system has been established. Here, we present a system that reduces interior temperature of the arbor and balcony while increasing humidity. Provided temperature drops were monitored using a thermal camera. During the experiments the maximum difference between the arbor and the balcony in temperature and ambient temperature was found to be approximately 20 °C. Solar cell of efficiency and fill factor calculated by numerical methods 73.71%, and 17:12, respectively, these values have been demonstrated to be consistent with the literature. Misting system is extremely environmentally friendly, and economical advantages are presented at the end of the study.

Keywords: Misting, Refreshment, Arbor, Balcony, Economic, Environmental.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknoloji ve artan nüfusla birlikte enerji tüketimindeki hızlı artış enerjii tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de önemli bir olgu olarak karşımıza çıkarmaktadır. Fosil kaynaklara dayalı sektör petrol, doğalgaz ve kömürden oluşurken, nükleer sektör başlı başına bir sektör özelliği taşımaktadır. Yenilenebilir kaynaklara dayalı enerji sektörü ise güneş, rüzgar, jeotermal, hidrolik, biyokütle ve dalga gibi birimlerden oluşmaktadır. Günümüzde enerji kaynağı olarak yoğun bir şekilde kullanılan yenilenebilen (fosil veya konvansiyonel) enerji kaynaklarının gelecek 100 yıl içinde tükeneyeceği öngörülmektedir. Ayrıca konvansiyonel enerji kaynaklarının kullanımı yoğun hava kirliliğinin yanı sıra milyarlarca dolar zarara yol açan doğal felaketlerin gözle görülür şekilde artmasına neden olmuştur. Kendini sınırsız tekrarlayan yenilenebilir ve hammadde bağımlısı olmayan enerji kaynakları çok kısa bir süre içinde daha çok önem kazanacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında güneş enerjisi gelmektedir.

Güneş pilleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir.

Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları 100 cm² civarında, kalınlıkları özellikle en yaygın olan silisyum güneş pille-rinde 0.2-0.4 mm arasındadır. Fotovoltaik (PV) ilkeye dayalı olarak çalışan güneş pillerinin üzerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Yöreyle bağılı olarak 1m²'ye düşen güneş enerjisi miktarı yılda 800-2600 kWh arasında değişir. Bu enerji, güneş pilinin yapısına bağılı olarak %5 - %70 arasında bir verimle elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilebilir. Bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir [1-4].

Uzun yıllar meteorolojik gözlemler yapılarak Türkiye'nin yıllık güneşlenme süresinin 2640 saat olduğu (günlük toplam 7.2 saat), maksimum değerinin toplam 362 saat ile Temmuz ayında ve minimum değerinin toplam 98 saat ile Aralık ayında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ancak Türkiye'de bu sahip olunan güneş enerjisi potansiyelinden sadece sıcak su eldesinde etkin bir biçimde faydalanılmaktadır. Türkiye güneş enerjisi-den sıcak su eldesinde dünya genelinde üçüncü sırada yer almaktadır [5].

Son yıllarda güneş pili teknolojisi kullanılarak soğutma sistemleri üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: esenhikmet@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 341-349

Ortam serinletme yöntemlerinden olan sisleme sistemi (misting system) suyu yüksek basınç altında mikron büyüklüğünde zerrelere parçalar ve uygulanan ortamda sis oluşturur. Sisleme olayı doğrudan evaporatif serinletme türü olup literatürde bu konu ile ilgili bazı çalışmalara rastlamak mümkündür. Wong vd. [6] sisleme fanı sistemi ile farklı ısı konfor seviyelerinde bağlı nemin artırılmasını incelemişlerdir. Dombrovsky vd. [7] güneş ışınımının zararlı etkilerinden korunmak için sulu sisleme sisteminin potansiyelini araştırmak ve su damlalarının bir sis tabakası tarafından bulutsuz atmosferden doğrudan ve dağınık güneş ışınımını etkilerini araştırmak için bir yarım küre modelini geliştirmişlerdir. Sethi ve Sharma [8] tarımsal seralarda kullanılan uluslararası soğutma teknolojilerini incelemişlerdir. Havalandırma, gölgeleme/yansıma, evaporative soğutma (fan-ped, sis, ve çatı soğutma) ve kompozit sistemler (toprak-hava ısı değiştirgeci sistemi ve akifer bağlantılı oluk akışı sağlayan ısı değiştirgeci sistemi) bu çalışmada sunulmuştur. Burger [9] çalışmasında güneş pilleri yardımıyla aralıklı nem kontrolü yapmıştır. Atieh ve Al Shariff [10] güneş enerjisi destekli bir serinletme sistemini tanıtmışlardır. Bu sistem, Arabistan'ın Medine şehrinde açık alanların serinletilmesi için kullanılmıştır. Deney yapılan ortam ve yakın çevresi farklı zaman dilimlerinde sislenerek serinletilmiştir. Bu fotovoltaik destekli sisleme sisteminin maliyet olarak geri dönüşüm süresini 2.5 yıl olarak hesaplamışlardır. Eicker vd. [11] Avrupa'nın farklı üç şehrinde değişik iklim koşullarında güneş enerjisi ve fotovoltaik soğutma sistemlerinin ekonomik analizini yapmışlardır. Ban-Weiss vd. [12] bir ofis çatısında kurulu olan fotovoltaik sistemin elektrik üretimini ve soğutmada enerji kazanımlarını incelemişlerdir.

Yapılacak olan bu çalışmada, iki farklı açık alanda (çardak ve balkon) güneş pili panelleri kullanılarak, alanların serinletilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan güneş pillerinin modellemesi de yapılarak, iki farklı açık ortam için serinletme etkisi ve sağlanan sıcaklık düşümleri termal kamera ile gözlenmiştir. Son derece çevreci olan bu sistemin avantajları ve ekonomikliği de çalışmanın sonunda sunulmuştur.

2. KURULAN SİSTEMLER VE DENEYSEL ÇALIŞMA (SYSTEM ESTABLISHED AND EXPERIMENTAL STUDY)

2.1. Sisleme Sistemi ile Serinletme Yöntemi (Misting Cooling System and Method)

Sisleme sisteminin kalbini oluşturan 70 ile 100 bar arası yüksek basınca ulaşabilen pompa, suyu çok daha küçük zerrecikler haline getirir. Bu yöntemle oluşturulan zerrecikler o kadar küçüktür ki çökelmeyip havada askıda durduğu gibi, ortamın nemine bağlı olarak kısa sürede de buharlaşır. Düşük basınç sistemlerinden farklı olarak ortalama büyüklüğü 5-15 mikron olan daha küçük zerrecikler oluşması aynı miktarda su kullanımıyla daha fazla yüzey alanı sağlar. Bu etki uygulamada daha hızlı

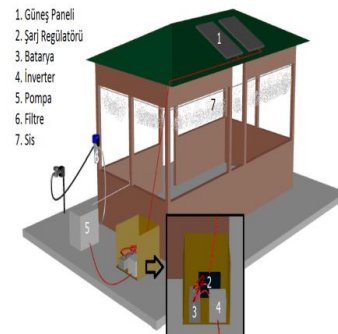
ısı aktarımı, verimli serinletme ve nemlendirme olarak hissedildiği gibi koku giderimi uygulamalarında da yüksek verimlilik sağlar. Hatlı sistem ve fanlı sistem olarak ikiye ayrılan sisleme sistemi sayesinde istenirse ortama dozaj pompası sayesinde parfümlendirme yapılarak istenilen güzel koku sürekli olarak ortama verilebilmektedir. Sistemin çalıştığı ortamlarda sinek, sivrisinek ve kanatlı haşerelerin yaşamadığı ve bu ortamlardan uzak durdukları gözlenmiştir. Stadyum ve seraların serinletilmesinde oldukça kullanışlıdır. Sistem tarafından elde edilen su oldukça hijyeniktir. Çünkü bu su nozullardan geçmeden önce filtrelenir. Saatte ortalama dört ile sekiz litre su tükettiği için de oldukça ekonomiktir.

2.1.1. Çardak bölgesi serinletme (Arbor cooling region)

İlk uygulama olarak 24 m²'lik bir çardakta güneş pillerinden elektrik sağlanarak sisleme sistemi çalıştırılmıştır. Şekil 1'de serinletme sisteminin çardakta kurulmuş hali, Şekil 2'de ise çardak bölgesi sisleme sisteminin detayları ve Şekil 3'de ise çardak alt bölgesinin sisleme anındaki görüntüsü verilmiştir. Güneş pilleri DC akım üretirler AC akımla çalışan cihazları çalıştırmak için invertere ihtiyaç vardır. İnverterler DC akımı AC akıma dönüştürürler. Panelden gelen akımı düzenleyerek aküye (batarya) ulaştıran ekipmana şarj regülatörü denir. Akünün tam dolmasını ve aşırı kullanımlarda deşarj (boşalmasını) olmasını engeller. Akü gelen elektrik enerjisini depolamaya yarar.



Şekil 1. Çardak bölgesi sisleme sistemi (In arbor misting system)



Şekil 2. Çardak bölgesi sisleme sisteminin detayları (The details of arbor area misting system)



Şekil 3. Sisleme anında çardak alt bölgesinin görünümü (The view of the lower arbor at the time of mist)

2.1.2. Balkon bölgesi sisleme (Balcony area cooling)

İkinci uygulama olarak 20 m²'lik bir ev balkonunda güneş pillerinden güç sağlanarak sisleme sistemi ile serinletme yapılmıştır. Özellikle dış hava değişimlerinden fazla etkilenmeyen sinek ve sivrisinekleri bol olan bir balkon ortamı başarılı bir şekilde serinletilmiştir. Sinek ve sivrisineklerin insanlara verdiği rahatsızlıklar giderilmiştir. Şekil 4'de balkon bölgesindeki güneş pili sistemi ile sisleme sistemi ekipmanlarının fotoğrafı ve Şekil 5'de ise balkon alt bölgesinin sisleme anındaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4. Balkon serinletilmesi sistemi (Balcony misting system)



Şekil 5. Balkon serinletilmesinin görünümü (The view of balcony refreshment)

İki farklı açık alan için de aynı güç ve aynı özellikte sisleme sistemi ve güneş pili kullanılmıştır. Alanlar için kullanılan sisleme sisteminin teknik ve ekonomik özellikleri Şekil 2'de verilen ekipman numaralarına göre Çizelge 1'de verilmiştir. Çalışmanın yapıldığı Elazığ ilinin iklim özellikleri aşağıda verilmiştir. Deneyler, Elazığ'da dış hava sıcaklığı ve ortalama güneşlenme süresinin yıl boyunca en yüksek olduğu ve bağül nemin en düşük olduğu Temmuz ayında yapılmıştır. Çizelge 2'de Elazığ ilinin 1960-2012 yılları aralığındaki bazı meteorolojik verileri verilmiştir.

3. GÜNEŞ PİLLERİNİN MODELLENMESİ (MODELING OF SOLAR CELLS)

3.1. Modelleme İle İlgili Genel Bilgiler (General Information about Modeling)

Sistemin genel performansını analiz etmeden önce PV panelinin performansını analiz etmekte fayda vardır. Bu nedenle, güneş paneli özellikleri bu çalışmada ayrı bir başlık altında değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. Güneş pilleri destekli sisleme sisteminin ana bileşenleri, özellikleri ve fiyatları (The main components, features and prices of solar cells backed misting system)

Sistemler	Eleman	Teknik özellik	Fiyat (Euro)
Fotovoltaik sistem	Güneş panelleri (1)	Bluesun 150W mono kristal.	465 (iki adet)
	Şarj regülatörü(2)	Vista 15a 12/24V	90
	Akü (3)	VRLA GEL; 100 Ah, Nominal gerilim: 12 V; Standby durumunda şarj gerilimi: 12-16 V; Şarj akımı: 2.25 A.	100
İnverter (4)	Üretici: SKN-S2012; Giriş 220 VAC, 50/60 Hz, 30 A, Maks., 1φ; Çıkış 220 VAC, 50/60 Hz, 2000 W, Maks., 1φ; DC Giriş: 12 VDC; Renk: Siyah; N.W.: 19 kg, G.W.:20 kg.	550	
			Güneş pili bağlantıları
Sisleme sistemi	Basınçlı su pompası (5) ve filtresi (6)	Üretici: Normist; tip: RR-2; basınç: 70 bar; akış LPM:2; motor gücü: 0.75 HP, 0.55 kW; gerilim: 220 V; nominal akım: 2.5 A; nozul çapı: 0.2 mm; su giriş/çıkış çapı: 9.525/12 mm, gürültü seviyesi: 78 dB.	1000
	Dağıtım sistemi (7)	Üretici: Normist; hegzagonal nozul serisi: 0.2 mm, nozul sayısı: mini. 16 unit, maks. 28 ünite; nozul akış değeri: 0.075 lt/dak (70 bar'da), kısaçlar, basınçlı pompa regülatörü, sonlandırma hattı, hızlı boşaltma, yüksek basınç plastik borusu, düşük basınç plastik borusu, plastik klips, hızlı bağlantı elemanları, T-bağlantı, L-bağlantı, basınç ölçer.	
Toplam maliyet			2480

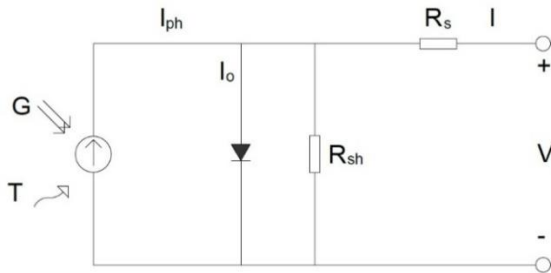
Çizelge 2. Elazığ ili için bazı meteorolojik ortalama değerler (The average values of some meteorological for the province of Elazığ) [13].

Meteorolojik faktörler	Aylar											
	Oc.	Şub.	Mar.	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağs.	Eyl.	Ek.	Kas.	Ara.
I	-0.8	0.5	5.8	11.9	17.2	22.9	27.3	26.8	21.6	14.6	7.1	1.9
II	2.9	4.9	11.1	17.7	23.6	29.6	34.3	34.1	29.4	21.7	12.6	5.6
III	-3.9	-3.1	1.0	6.4	10.7	15.2	19.3	19.0	14.3	9.0	3.0	-1.1
IV	2.4	3.4	5.2	6.5	9.1	11.4	12.2	11.4	9.5	7.1	4.4	2.3
V	11.9	11.9	12.2	12.7	10.6	4.3	1.1	0.8	2.2	7.2	9.1	11.7
VI	75	72	64	56	49	36	30	30	35	51	69	76

I: Ortalama sıcaklık (°C), II: Ortalama en yüksek sıcaklık (°C), III: Ortalama minimum sıcaklık (°C), IV: Ortalama güneşlenme saati (saat), V: Ortalama yağmurlu gün sayısı (gün), VI: Ortalama bağıl nem (%).

Bir PV panel jeneratör güneş hücreleri, eklemler, koruyucu parça ve ikincil unsurlardan oluşur. Güneş pilleri ince bir silikon devre levha üzerine ya da yarı-iletken tabaka üzerine toplanır, p ve n eklemlerden oluşur. Karanlıkta bir güneş panelinin akım-gerilim (I-V) özellikleri, bir diyotun eksponansiyel karakteristiklerine benzerdir. Güneş enerjisi (fotonlar), yarı-iletken bant aralığı enerjisinden daha büyük bir enerji miktarı ile güneş hücresine geldiğinde, çarpışma meydana gelir ve daha sonra elektron çifti ortaya çıkar. Bu hareketlilik p ve n eklemlerinin iç elektrik alan etkisi altında ayrı bir alana süpürülür ve ışınım ile orantılı bir akım ortaya çıkar. Bu akım kısa devre paneli hücrede ortaya çıktığında dış devreye akar ve devre açık olduğunda p ve n diyotu ile iç paralel devreye yönelir. Bu nedenle, bu diyotun özellikleri panel hücresinin açık devre özelliklerini teşkil eder. Basit bir güneş pili eşdeğer devre diyotlu bir paralel akım kaynağıdır. Akım kaynağından alınan çıkış, panel hücre üzerinde ışınım ile doğrudan orantılıdır. Güneş pili karanlıkta aktif bir unsur değildir. Bir diyot olarak gerçekleştirir. Bu akım veya gerilim üretmez. Ancak, harici kaynağına bağlıysa, "diyot akımı" ya da "karanlık akımı" olarak adlandırılan bir akım oluşturur [14-15].

Diyot, hücrenin I-V özelliklerini belirler. En iyi I-V grafik eğrisi çizmek veya elde etmek için, diyot idealite faktörü ve tek bir paralel diyot kullanılır. Bu model Gow ve Manning tarafından elde edilmiş olup iki diyot modelinin basitleştirilmiş sürümüdür [16]. Güneş pili hücre devre şeması Şekil 6'da gösterilmektedir.

**Şekil 6.** Güneş pili hücresi çevrim şeması (Solar battery cell cycle scheme)

burada; I_{ph} : ışıl akım, I_0 : diyot doyma akımı, R_s : seri direnç, R_{sh} : paralel devre direnci, T : çevre sıcaklığı, G : ışınım, V : çıkış gerilimi değerini gösterir. I_0 ve I_{ph} sıcaklığa bağlıdır. R_s maksimum güç noktasının ve açık devre geriliminin açıklanması amacıyla devreye dahil edilir. R_s akımının akışının neden olduğu iç kayıpları anlamına gelir. R_{sh} diyot ile paralel olan ve toprağa olan kaçak akımı gösterir. R_{sh} genellikle ihmal edilebilir ve eşdeğer devrede gösterilmemiştir. İdeal bir güneş paneli hücresinde $R_s = R_{sh} = 0$ [16].

Güneş paneli I-V özellikleri aşağıda verilen denklemler ile hesaplanabilir. Orta düzey karmaşıklığı modeli bu çalışmada kullanılmıştır.

$$I_{ph} = I_d + I \quad (1)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (3)$$

burada; q : ilk şarj (1.602×10^{-19} C), k : Boltzman sabiti (1.381×10^{-23} J/K), n : Diyot idealite faktörünü gösterir, bu değer Çizelge 3'de verildiği gibi PV teknolojisine bağlıdır.

Çizelge 3. Farklı PV tiplerinin idealite faktörü (Ideality factor of different types of PV)

PV tipi	n
mono-crystalline silicon	1.2
poly-crystalline silicon	1.3
cadmium telluride	1.5
gallium arsenide	1.3
amorphous silicon	1.8

Denklem 1, 2 ve 3 I-V karakteristik eğrisini çizmek için yeterli değildir: I_{ph} , V_{oc} ve I_0 değerleri modeli tamamlamak için gereklidir.

$$I_{ph} = I_{ph}(T_{ref}) + K_0(T - T_{ref}) \quad (4)$$

$$I_{ph}(T_{ref}) = I_{sc}(T_{ref}) \frac{G}{G_{ref}} \quad (5)$$

$$I_0(T_{ref}) = \frac{I_{SC}(T_{ref})}{\left(\frac{qV_{OC}(T_{ref})}{nkT_{ref}} - 1 \right)} \quad (6)$$

$$I_0 = I_0(T_{ref}) \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\frac{qV_g(T_{ref})}{nk\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1\right)}} \quad (7)$$

burada; ref. test şartlarının standardını veya referansını gösterir

$$(T_{ref} = 25^{\circ}C, G_{ref} = 1000 \frac{W}{m^2})$$

grafikleri analiz edilerek tespit edilebilir. Güneş pillerinde maksimum verim, maksimum güç ile anlık ışınım arasındaki orandır.

$$\eta = \frac{P_{max}}{AG} = \frac{I_{max} V_{max}}{AG} \quad (10)$$

burada A, panel hücre alanı, G ise anlık güneş ışınım şiddetidir.

Güneş pilinin dolun faktörü, şarja sebep olan maksimum gücün I_{SC} and V_{OC} çıkışına oranıdır.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC}I_{SC}} = \frac{I_{max} V_{max}}{V_{OC}I_{SC}} \quad (11)$$

Çizelge 4. BSM-150 güneş pilinin tipik elektriksel özellikleri (Typical electrical properties of BSM-150 solar cells)

Parametre	Gösterim	Değer	Parametre	Gösterim	Değer
Maksimum güç	P_m	150 W	Hücre boyutu	Mm	156x156
Güç toleransı	%	+5	I_m sıcaklık katsayısı	(%/°C)	+0.1
Mak.-güç gerilimi	$V_m (V)$	18.11	V_m sıcaklık katsayısı	(%/°C)	-0.38
Mak.-güç akımı	$I_m (A)$	8.32	P_m sıcaklık katsayısı	(%/°C)	-0.47
Açık devre gerilimi	$V_{OC}(V)$	22.51	I_{SC} sıcaklık katsayısı	(%/°C)	+0.1
Kısa devre akımı	$I_{SC}(A)$	9.08	V_{OC} sıcaklık katsayısı	(%/°C)	-0.38
Mak.-sistem gerilimi	VDC	1000	NOCT-Nominal İşletme	°C	48±2
Hücre verimi	$\eta_c (%)$	≥17	Hücre Sıcaklığı		
			Dolun faktörü	%	≥73.3

K_0 , akımın sıcaklık katsayısı, I_{sc} kısa devre akımı, V_{oc} açık devre gerilimini gösterir. R_s değerleri bilinmeli çünkü I-V karakteristik eğrileri üzerinde önemli bir etkisi vardır.

$$R_s = - \frac{dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_V} \quad (8)$$

$$X_V = I_0(T_{ref}) \frac{q}{nkT_{ref}} e^{\frac{qV_{OC}(T_{ref})}{nkT_{ref}}} \quad (9)$$

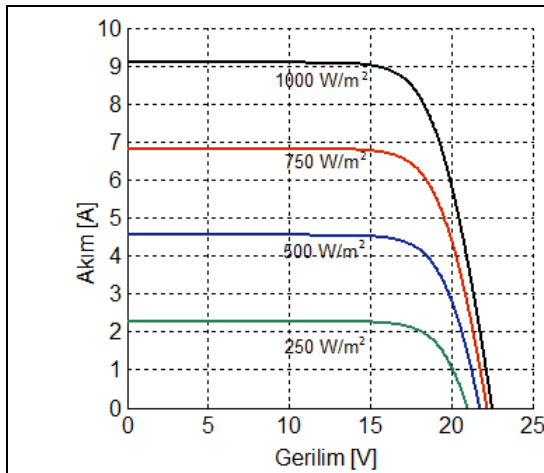
Bu denklemlerdeki sabitler, ölçülen veya PV sistem üreticilerinin ürün kataloglarında yayınlanan I-V eğrisi

Dolun faktörü gerçek I-V özelliklerinin bir ölçüsüdür. Bu değer, iyi olarak kabul edilebilir hücreleri için 0.7'den daha yüksektir.

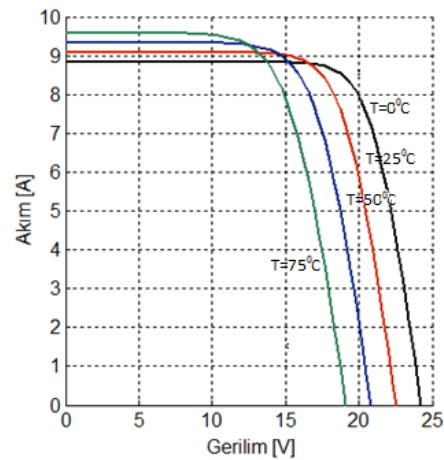
3.2. Çalışmada Kullanılan Güneş Panelinin

Modellemesi (Modeling of the Solar Panel in this Study)

Hem çardak deneyinde hem de balkon deneyinde kullanılan güneş panellerinin modeli Bluesun 150W mono kristaldir (BSM-150). Bu güneş panelinin katalog değerleri Çizelge 4’de verilmiştir.



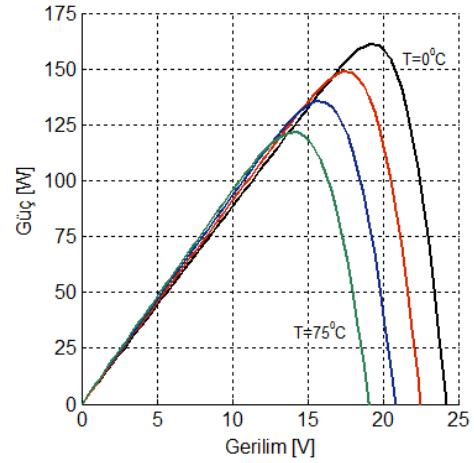
Şekil 7. Değişik ışınım değerlerine göre I-V eğrileri (I-V curves according to the different radiation values)



Şekil 8. Değişik sıcaklıklara göre I-V eğrileri(I-V curves according to the different temperatures)

Program, gerilim, ışınım ve sıcaklık değişkenlerini göz önüne alarak elektriksel parametreleri (I_{SC} , V_{OC}) hesaplar. Buna ek olarak, bu program modelin dizi dirençlerini de dikkate alır. Bu direnç akımı için bir çözüm oluşturur (Denklemler 3). Newton-Raphson yöntemi bu programda kullanılır çünkü bu yöntem, hem pozitif hem negatif akımların çok daha hızlı hesaplanmasını sağlar. Matlab fonksiyonu çıkışı değişik ışınım değerlerine göre Şekil 7’de ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$ için) değişik dış ortam sıcaklıklarına göre ise Şekil 8’de ($G=1000\text{ W/m}^2$ için) gösterilmiştir.

Ayrı veri noktalarının sayısı Şekil 8’deki eğrilerde gösterilmiştir. Bu üreticinin yayınlanan eğrileri ile doğrudan alınan noktalardır ve model ile mükemmel uyumu vardır. Çalışmamızda kullanılan güneş pili için elde edilen eğriler I_L akımının 9.08 ile 9.35 A ($\approx 3\%$) arasında değiştiğini T ’nin ise 25 ile $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değiştiğini gösterir. Şekil 9 farklı dış ortam sıcaklıkları için güç gerilim (P-V) eğrisini ($G=1000\text{ W/m}^2$ için) gösterir. Üreticiden alınan ayrı veri noktaları eğrilerinin model sonucu elde edilen eğrilerle yine mükemmel uyumlulukta olduğu görülür. Çalışmalarımızda kullanılan BSM-150 güneş pili hücresinin verimi ve doluluk faktörü sırasıyla 17.12% ve 73.71 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4’deki verilere göre).



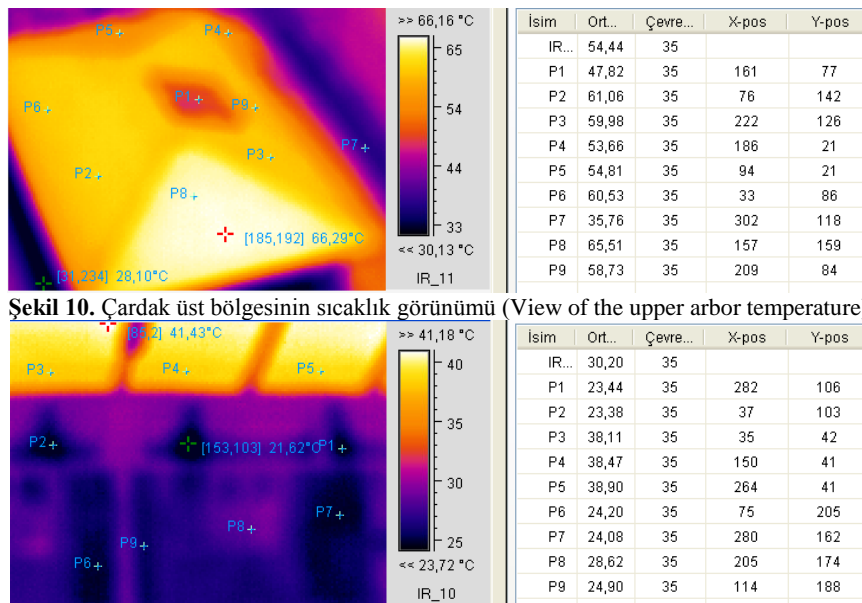
Şekil 9. Farklı sıcaklıklar için P-V eğrileri (P-V curves for different temperatures) ($T=0, 25, 50, 75\text{ }^{\circ}\text{C}$).

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE EKONOMİK ANALİZ (EXPERIMENTAL STUDY AND ECONOMIC ANALYSIS)

Bir önceki bölümde modellemesini yaparak verim ve doluluk faktörü değerlerinin iyi olduğunu gördüğümüz güneş pilleri ile rastlamadığımız bir şekilde çardak ve balkon ortamları serinletilmesi yapılmıştır. İki farklı açık ortamdaki serinletmeler termal kamera ile gözlenmiş ve yorumlanmıştır.

Şekil 10’da çardak üstüne konulan güneş pillerinin durumu ve çardağın üstündeki belli noktalardaki sıcaklıklar verilmiştir. Maksimum $66.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve minimum $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’lik sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Çevre sıcaklığı $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve ortamın bağıl nemi % 30’dur. Şekillerde kırmızı + maksimum değeri, yeşil + minimum değeri gösterir.

Şekil 11’de çardak alt bölgesinde sisleme anındaki termal kamera görüntüleri verilmiştir. Maksimum $41.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve



Şekil 10. Çardak üst bölgesinin sıcaklık görünümü (View of the upper arbor temperature)

Şekil 11. Çardak alt bölgesinin sisleme anındaki görüntüsü (The image of the sub-region of arbor at the time of misting)

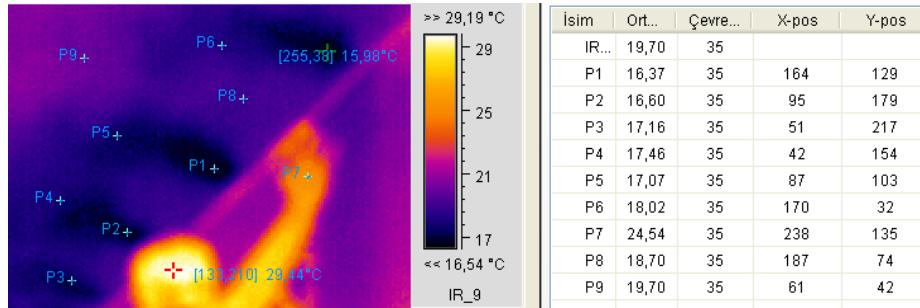
minimum 21.62 °C'lik sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Rastgele seçilen koordinatlardaki sıcaklık değerleri de gözlenmiştir. Şekilde koyu mor renk ile gösterilen yerler sisleme sisteminin nozul çıkışlarıdır. Nozullardan mikron mertebesinde basınçlı filtrelenmiş su atılmaktadır. Çevre sıcaklığının 35 °C'lerden yaklaşık 25 °C'lere indiği durumlarda çardak altı bölgesinde bağıl nem değeri % 30'lardan % 45'lere yükseltilmiştir.

Şekil 12'de sisleme anında çardak altında bulunan bir kişi üzerindeki sıcaklık noktaları verilmiştir. Çardak alt bölgesinin maksimum, minimum, ortalama ve çevre sıcaklığı ile nozul çıkış sıcaklıkları rasgele seçilen noktalara göre elde edilmiştir.

İlk olarak sisleme sistemi 20 s açık 20 s kapalı konumda çalıştırılmıştır. Ancak sisleme pompasının devreye girdiği andaki demeraj akımı inverttere zarar vermiştir. Bu nedenle sistem 50 s çalışıp 20 s bekleme konumunda kalacak şekilde kontrol edilerek çalıştırılmıştır.

Sisleme sisteminin performansını analiz etmek için Enerji Verimliliği Oranı (EVO) ve Performans Katsayısı (COP) değerleri hesaplanmıştır. Bir soğutma sisteminin EVO değeri, zaman içinde belirli bir noktada Wh olarak sistem tarafından tüketilen elektrik giriş gücünün BTU cinsinden soğutma çıkışına oranıdır. COP, soğutma sistemlerinin performansını EVO'nun yanı sıra açıklar. COP değeri, termodinamikte yaygın olarak kullanılan Carnot çevrimi kullanılarak aşağıdaki ilişki ile verilir [17]:

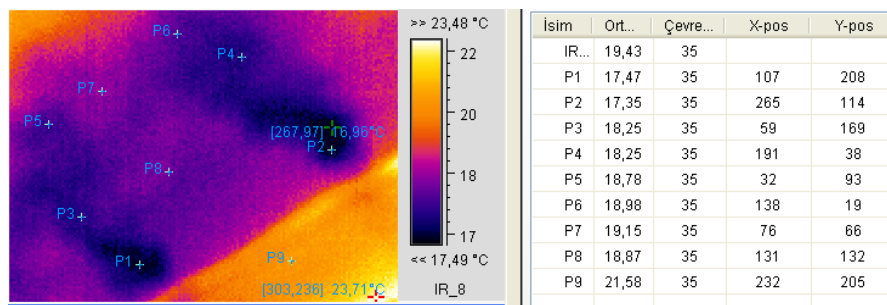
$$COP_{carnot} = \frac{T_i}{T_o - T_i} \quad (12)$$



Şekil 12. Çardak altında bir kişinin sisleme anındaki görüntüsü (The image of a person under the arbor at the time of misting)

Şekil 13'de ikinci açık ortam olan balkondaki sisleme görüntüleri verilmiştir. Balkon alt bölgesinin maksimum, minimum, ortalama ve çevre sıcaklığı ile nozul çıkış sıcaklıkları rasgele seçilen noktalara göre elde edilmiştir.

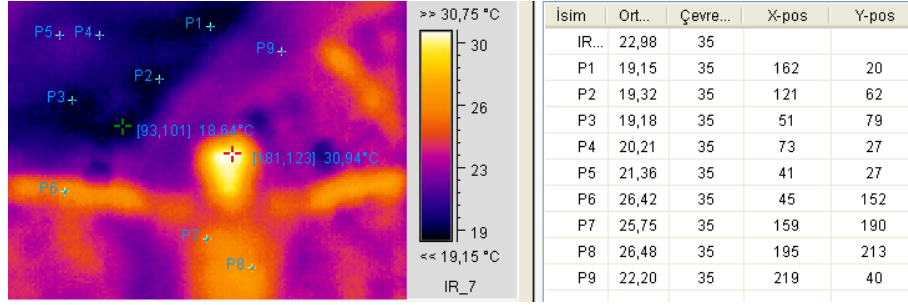
burada, T_i çardak veya balkon bölgesi sıcaklığı ve T_o ise çevre sıcaklığını Kelvin cinsinden gösterir. Konut ve küçük ticari binalarda kullanılan soğutma ekipmanları sistemleri genellikle EVO ve/veya Mevsimsel Enerji Verimlilik Oranı (MEVO) açısından sistem soğutma verimliliğini ifade eder [17-19]: $EVO=3.412COP$,



Şekil 13. Balkon alt bölgesinin sisleme anındaki görüntüsü (The image of the sub-region of balcony at the time of misting)

Şekil 14'de balkon alt bölgesinde bir kişi bulunduğu andaki sisleme görüntüleri verilmiştir. Balkon alt bölgesinin maksimum, minimum, ortalama ve çevre sıcaklığı ile nozul çıkış sıcaklıkları rasgele seçilen noktalara göre elde edilmiştir. Çevre sıcaklığının 35 °C olduğu balkon alt bölgesinde bağıl nem değeri % 30'lardan % 45'lere yükseltilmiştir.

burada EVO'nun birimi $BtuW^{-1}h^{-1}$ 'dir. Bu çalışmada, soğutma veya serinletme anında sırasıyla ortalama COP_{carnot} ve EVO değerleri 2.5 ve 8.53 olarak hesaplanmıştır. Yaz döneminde sınırlı deneyler yapıldığı için bu çalışmada MEVO değerini rapor etmek mümkün değildir. Deneyler sırasında T_i çardak/balkon bölgesi sıcaklığı ve T_o çevre sıcaklığı arasındaki maksimum fark yaklaşık olarak 20 °C bulunmuştur. Bu fark, tipik sisleme



Şekil 14. Balkonun altında bulunan bir kişinin sisleme anındaki görüntüsü (The image of a person under the balcony at the time of misting)

sistemleri için 25 °C kadar büyük olan bir değerden daha düşüktür [10].

Enerji verimliliği yatırımlarına yeterli bir ekonomik getiri yeşil bina sektörünün sürdürülebilir gelişimi için çok önemlidir. Sisteminin kurulması için harcanan miktar belli bir miktar için kullandıktan sonra telafi edilecektir. Yatırım parametresi geri dönüş sistemi kullanılan parçaların maliyetine bağlıdır. Bu çalışmada, güneş pili destekli sisleme sistemi için yatırım getirisi, bir 4m X 6m alanı soğutmak için kullanılan bir klima işletim maliyeti ile karşılaştırılabilir. Bu alan sisleme sistemi tarafından kullanılan çardak ve balkon alanına yaklaşık olarak eşdeğerdir. Seçilen klima Doğu Anadolu bölgesi katsayısı olan 308 BTU/h'e göre alınmıştır. 24 m²'lik bir alan için 24x308 = 7392 BTU/h olarak hesaplanmıştır. Çardağın veya balkonun altında 10 kişi oturacak şekilde hesaplamalar yapılarak her bir kişi için 600 BTU/h'lık bir değer alınmıştır. Böylece, 10x600=6000 BTU/h olarak kişilerin vereceği yük hesaba katılmıştır. Deneyler gündüz yapıldığı için aydınlatma etkisi ihmal edilmiştir. Toplam gerekli soğutma yükü 13392 BTU/h olarak hesaplanmıştır. Bu değere yakın soğutma yükü 17400 BTU/h olan Mitsubishi SRK56 modeli bir klima için tüketim değerlerine bakılmıştır [20]. Bu klimanın fiyatı yaklaşık olarak 1000 Euro civarındadır ve yaklaşık elektrik fiyatı 0.082 Euro/kW alınmıştır. Klimanın güç tüketimi yaklaşık 5.09 kW (17400 BTU/h) ve klimanın günde 8 saat, yılda 4 ay çalıştığı varsayımı ile karşılaştırma yapılmıştır. Sisleme sisteminin ilk yatırım maliyeti Çizelge 1'de de gösterildiği gibi 2480 Euro'dur. Bu verilere göre sistem kendini 3.7 yılda amorti edecektir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Deneysel bir uygulama olan güneş pili destekli çardak ve balkon serinletme sistemi bu çalışmada incelenmiştir. Yazın güneş enerjisinin bol olduğu ülkemizde insanların serinlemek için sığındıkları çardak ve balkon bölgesi açık gölge ortamlarının serinletilerek insanlara rahat edebilecek bir ortam hazırlanması hedeflenmiştir. Özellikle yazın insanların açık gölge ortamlarda sinek ve sivrisineklerden olan rahatsızlıkları giderilmiştir. Bu çalışmada ortam sıcaklıkları yaklaşık olarak 10-15 °C düşürülmüştür. Bağıl nem değerleri de % 20-25'lerden % 40-50'lere çıkarılmıştır. Çalışmada kullanılan 150 W'lık

güneş pillerinin modellenmesi yapılarak I-V, P-V eğrileri gözlenmiştir. Pillerin verimleri ve dolun faktörleri sırasıyla % 17.12 ve 73.71 olarak bulunmuş ve bu değerlerin literatürde iyi sayılabilecek güneş pilleri arasında olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca bu çalışmada kurulan sistemin sık kullanılan klima sistemlerine göre çevreci ve ekonomik olduğu da vurgulanmıştır. Bu çalışma ile güneş pili destekli çalışan sisleme veya serinletme sistemlerinin sorunsuz çalıştığı görülmüş ve bu çalışmanın bundan sonraki çalışmalara da katkı sağlayacağı fikri oluşmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın yapılmasında, proje kapsamında Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Biriminden destek alınmıştır. TEKF 2012/12.04 ve TEKF 2012/12.05 nolu projeler ile desteğini esirgemeyen Fırat Üniversitesi yönetimine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Karamanav M., "Güneş enerjisi ve güneş pilleri", *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 8, (2007).
2. Preuss P., "An unexpected discovery could yield a full spectrum solar cell", Berkeley Lab., *Research News*, November 18, (2002).
3. Atwater H., Polman A., Kosten E., Callahan D., Spinelli P., Eisler C., Escarra M., Warmann E., and Flowers C., "Nanophotonic design principles for ultrahigh efficiency photovoltaics", *AIP Conference Proceedings*, 17: 1519, (2013).
4. Polman A., and Atwater A., "Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics" *Nature Materials*, 11: (2012).
5. Şenol R., "Tarımsal sulama ve güneş enerjisi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3): 519-526, (2012).
6. Wong N.H., Chong A. and Adrian Z.M. "Performance evaluation of misting fans in hot and humid climate", *Building and Environment*, 45(12): 2666-2678, (2010).
7. Dombrovsky L.A., Solovjov V.P. and Webb B.W., "Attenuation of solar radiation by a water mist from the ultraviolet to the infrared range", *Journal of Quantitative*

- Spectroscopy&Radiative Transfer*, 112: 1182-1190, (2011).
8. Sethi V.P. and Sharma S.K., "Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications", *Solar Energy*, 81: 1447-1459, (2007).
 9. Burger D.W., "Intermittent mist control via solar cells", Technology and Product Reports, *Hort Technology*, July/September 273-274, (1994).
 10. Atieh A. and Al Shariff S., "Solar energy powering up aerial misting system for cooling surroundings in Saudi Arabia", *Energy Conversion and Management*, 65: 670-674, (2013).
 11. Eicker U., Colmenar-Santos A., Teran L., Cotrado M. and Borge-Diez, D., "Economic evaluation of solar thermal and photovoltaic cooling systems through simulation in different climatic conditions: an analysis in three different cities in Europe", *Energy and Buildings*, 70: 207-223, (2014).
 12. Ban-Weiss G., Wray C., Delp W., Ly P., Akbari H. and Levinson R., "Electricity production and cooling energy savings from installation of a building-integrated photovoltaic roof on an office building", *Energy and Buildings*, 56: 210-220, (2013).
 13. Turkish State Meteorological Service, <http://www.mgm.gov.tr/en-US/>
 14. Walker G., "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model", *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, Australia, 21: 49-56, (2001).
 15. Lorenzo E., "Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems", *Artes Graficas Gala, S.L.*, Spain, (1994).
 16. Gow J.A. and Manning C.D., "Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies", *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, 146: 193-200, (1999).
 17. Çengel A. and Boles M.A. "Thermodynamics: An Engineering Approach", Seventh edition, *Mc Graw Hill*, (2011).
 18. The Engineering Tool Box, http://www.engineeringtoolbox.com/39_442.html
 19. Glossary of Efficiency Terms, http://www.cwlp.com/Energy_services/Energy_systems_t ech/btu
 20. Calculations about the air conditioning, <http://www.iklimplus.com.tr/klimalar-hakkinda/klima-hesabi.html>

Mechanochemical Activation of Sodium Geopolymers Containing Carbon-Nano Powder

Cengiz BAGCI*, Zehra DUZGUN

Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering,

Hitit University, Corum, 19030, TURKEY

(Received : 20.09.2016 ; Accepted : 01.10.2016)

ABSTRACT

Two different sodium geopolymers including 9 or 18 moles carbon nano-powder were prepared for mechanochemical activation by using the well-known geopolymer route. While 9 moles carbon were incorporated into geopolymer resin during the geopolymer route, 18 moles carbon were mixed with produced geopolymer after the geopolymer route. Both geopolymer carbon precursors named as NaGP9C and NaGP18C were mechanochemically activated for 24 hours and, the NaGP18C was also activated for 48 hours. Activation processes were carried out in a planetary ball mill with a ball to powder wt % ratio of 25:1 at 250 rpm. Depending on the activation and carbon content, room and high temperature properties of resultant compositions were evaluated by making optical microscope, XRD, SEM and DSC analyses.

Keywords: Geopolymer, Mechanochemical, Activation.

ÖZ

Mekanokimyasal aktivasyon için 9 veya 18 mol karbon nano-tozlar içeren iki farklı sodyum geopolymer iyi bilinen geopolymer yöntemi ile hazırlanmıştır. 9 mol karbon, geopolimer üretimi aşamasında geopolimer reçineye dahil edilirken, 18 mol karbon, geopolimer işleminden sonra üretilen geopolimer ile karıştırılmıştır. NaGP9C ve NaGP18C olarak adlandırılan her iki geopolimer karbon başlangıç malzemesi 24 saat mekanokimyasal olarak aktive edilmiş ve NaGP18C ayrıca 48 saat aktive edilmiştir. Aktivasyon işlemleri 250 dev/dak' da ağırlıkça bilye toz oranı 25:1 olacak şekilde bir gezegen bilyeli değirmende gerçekleştirilmiştir. Aktivasyon ve karbon içeriğine bağlı olarak, sonuç kompozisyonların oda ve yüksek sıcaklık özellikleri optik mikroskop, XRD, SEM ve DSC analizleri yapılarak değerlendirildi.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, Mekanokimyasal, Aktivasyon.

1. INTRODUCTION

Global warming is one of the most important problems continuing on the World due to its both environmental and social effect. In recent years, environmentally friendly materials are starting to draw attention to overcome the effect of global warming. Having geopolymers energy efficient and less environmental impact have increased its usage as Portland cement alternative materials. Namely, GP are made at ambient temperature and release less CO₂ emission (about 80%) to the atmosphere [1-4].

GPs are X-ray amorphous materials and can be produced by mixing an aluminosilicate source and silica in the presence of highly caustic aqueous alkaline (MOH) media. Although they can be made a large composition range, TEM studies revealed the typical composition of M₂O•Al₂O₃•4SiO₂•11H₂O or [1:1:4:11]. Where, M is a charge balancing cations such as Na⁺, K⁺ and Cs⁺. Thanks to their intrinsic properties, GPs have found a lot of application such as fire and corrosion resistance coating, porous insulators, refractories and concrete production [5].

However, low strength and brittle fracture nature of GPs limit their usage for the structural applications. GPs have

been reinforced with various continuous fibers and short fibers in order to improve their mechanical properties. By developing of GP composites with the introduction of these high strength fibers, even though the catastrophic brittle failure of the materials can be prevented, very weak GP matrix and matrix-reinforcement interface problems are still ongoing. In addition to being considered as matrices for GP composites, GPs can be considered as a precursor to ceramic fabrication. Pure GPs were crystallized into useful refractoriness ceramics, such as Na-based GPs crystallized into nepheline, K-based GPs crystallized into leucite, Cs-based GPs crystallized into pollucite on heating to high temperatures [6-8].

In our previous study, we systematically studied on the conversion of crystalline phase by a subsequent heat treatment of mixed GPs with carbon. In the present study, achieving of geopolymeric structures by using just mechanochemical activation at room temperature would be more energy efficient production. Additionally, this effect would be seen during heat treatment of the activated precursors. Mechanochemical activation of different silicon sources were made in literature [9-12], we used a sodium geopolymer in this study.

The aim of this study was to investigate low and high temperature properties of mechanochemically activated NaGPs with carbon addition. Tailored geopolymeric structures as well as above crystallize structures would be

*Corresponding Author

e-mail: cengizbagci@hitit.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 351-356

expected to depend on the carbon amount, activation duration and heating temperature.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Materials

Laboratory grade NaGPs were made with alkaline of sodium hydroxide (99.0 wt% trace metal basis), supplied from Fisher Scientific. Amorphous fumed silica having a fine particle size was used as a silica source. Metakaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) used as aluminosilicate source had an average particle size of 1.2 μm , a specific surface area of 13 m^2/g , and was of ~97% purity.

2.2. Geopolymer Processing (Geopolimer İşlemleri)

Geopolymer carbon composition deemed NaGP9C and NaGP18C were made in-situ and ex-situ routes, respectively. The composition of both geopolymers were $\text{M}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4.5\text{SiO}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. We added 0.5 mole excess silica in geopolymer to improve any possible reaction between silica and carbon during mechanochemical activation and to dissolve the excess silica and carbon, 1 mole water was also added the composition.

In the in-situ route, alkali sodium silicate solution (waterglass) was prepared by dissolving the fumed silica in a pre-prepared NaOH alkaline solution in a stainless steel container on a magnetic plate. In order to dissolve the silica properly, a total of 2.5 moles silica was added in small batches, before adding the next batch, each time allowing for complete dissolution of the silica. Additionally, the temperature of magnetic plate was kept at about 45-50 °C and the container sealed with a plastic film to contribute fully dissolving of silica for overnight. Although this process, any water content lost due to the exothermic reactions in solution was replaced to maintain the proper chemical compositions. After preparing the clear sodium silicate solution having low viscosity, the metakaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) was added the sodium silicate solution and then mixed in a high shear mixer for 5 min. Following, 9 moles carbon was incorporated in to the viscous and homogenous NaGP slurry and the slurry was mixed for 5 min again to obtain NaGP9C. The NaGP9C slurry was poured into the poliasetal mold, sealed with a plastic film and then kept in an open air furnace, at a constant temperature of 45 °C for 1 day.

In the case of ex-situ route, due to rapid solidification effect of carbon into the GP resin, the pre-prepared and powdered pure NaGP were ball milled with 18 moles carbon to obtain NaGP18C. So, after the pure NaGP prepared by following the typical GP route as mentioned above, the NaGP sample were then additionally dried in an open air furnace at 300 °C for 1 h at a heating rate of 5 °C/min and then powdered in a ceramic crucible. 18 moles of carbon were added to the dried and powdered geopolymer samples to make NaGP18C precursors. Table 1 shows the molar compositions of both GP carbon samples.

Table 1. The molar compositions of both GP carbon samples

Sample	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	H ₂ O	C
NaGP9C	1	1	4.5	12	9
NaGP18C	1	1	4.5	12	18

NaGP9C and NaGP18C precursors were planetary milled in a zirconia bowl (45 ml) with cylindrical zirconia balls at room temperature. Table 2 shows the mechanochemical activation conditions of GP samples. Along with ball to powder ratio and rotation speed can be selected within a wide range, a greater ball to powder ratio and rotation speed could contribute to the reaction between reactant particles [12-14]. Rotation speed was selected relatively lower due to high milling duration and dry milling media.

Table 2. Mechanochemical activation conditions of GP samples

Sample	Rotation speed (rpm)	Ball to powder wt % ratio	Duration (Hour)
NaGP9C	250	25:1	24
NaGP18C	250	25:1	24
NaGP18C	250	25:1	48

2.3. Characterization

Differential scanning calorimetry (DSC) was conducted on all mechanochemically activated GP carbon samples using a **SEIKO - EXSTAR 6300**. Each of the GP carbon samples was placed in Pt/Rh pans fitted with a lid. The DSC signal was acquired while heating in a high purity (99.99%) nitrogen atmosphere under dynamic conditions, between 900 °C -1500 °C at a rate of 5 °C/min.

Raw GP carbon and mechanochemically activated GP carbon samples were characterized by X-ray diffraction in **PANalytical- EMPYREAN** diffractometer equipped with a $\text{CuK}\alpha$ source ($\lambda = 15406 \text{ nm}$). Tests were carried out at 40 kV, 30 mA, and the Bragg angle (2θ) varied from 5° to 80° with a step size of 0.02, and at a scan rate of 1°/min. The reaction products were finely ground to powders before X-ray analysis. Whole pattern fitting and manual matching was carried out and the phases were determined using Jade 9 software.

Carbon added NaGP9C and NaGP18C precursors were examined by the optical microscope (Nikon ECLIPSE LV150N). All the mechanochemically activated GP carbon samples were microstructurally investigated by SEM (Scanning Electron Microscopy). SEM studies were performed at 25k magnification using an accelerating voltage of 20 kV with SEI in high vacuum mode.

3. RESULT AND DISCUSSION

XRD patterns of NaGP9C and NaGP18C compositions before mechanochemical activation were shown in Fig. 1. A broad 2θ peak at about 28° shows the well-known amorphous geopolymer formation. We can also see from the XRD pattern that the two GP compositions revealed similar trends in the XRD patterns. This meant that the carbon couldn't seriously affect the geopolymerisation in the case of NaGP9C, which the carbon was added the GP slurry during the preparation of GP. In the case of NaGP18C which the carbon was added the final GP, it can also be seen that the pattern was very close to the typical XRD pattern of pure GP [15].

Recently, we have studied in our previous work that it is mostly related to composition optimization by making and analyzing one series of GP carbon samples [10]. So, excess carbon could prevent the fully reaction between GP components by playing a barrier role. Therefore, excess silica could be present in the form of unreacted silica in the final GP. Before mechanochemical activation, proper preparation of GP and achieving of homogeneous carbon distribution in GP were so important in terms of reaching the end.

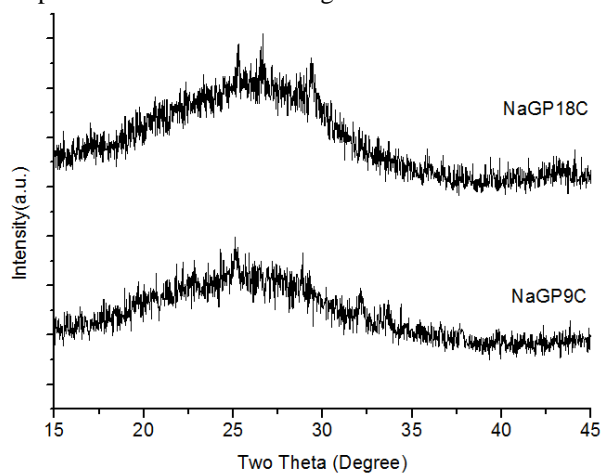


Fig. 1. XRD patterns of geopolymer carbon compositions before mechanochemical activation

Fig. 2 reveals that optical micrographs of two different starting geopolymer carbon compositions after powdering the samples in a mortar and pestle. It is clearly seen that the microstructure of NaGP9C (Fig. 3a) mainly consisted of coarse particles, whilst excessive carbon in the case of (Fig. 3b) promoted the formation of fine particles [16, 17]. In NaGP9C, nano particles of the carbon nearly diffused into the porous geopolymeric structure and dispersed homogeneously [18]. Moreover, being the addition of 9 moles carbon during the geopolymer production route resulted in geopolymerization of more reactive GP resin with carbon [19]. Being powdered of GP9C compact following the drying GP9C resin gave rise to coarse particles. Any individual carbon could not be seen on the optical micrograph.

NaGP18C samples were prepared by the addition of 18 moles carbon in GP compact after completing of the geopolymerization. This resulted in fine particles due to brittle nature of pure GP and also excess carbon which did not incorporate into the solid GP structure by mixing the constituent in a mortar and pestle yet [5, 6]. Particle agglomeration was seen due to increasing surface area of the smaller particles.

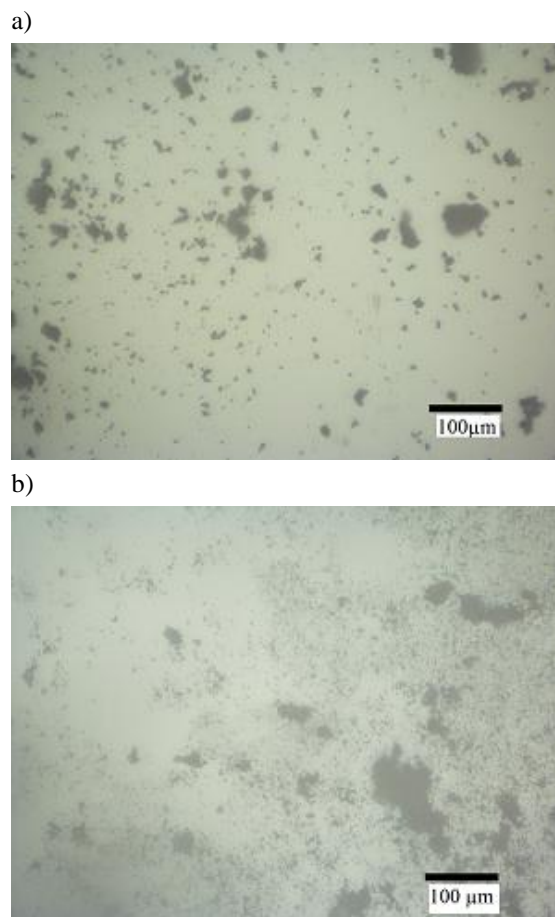


Fig. 2. Optical micrographs of (a) NaGP9C and (b) NaGP18C precursors.

Fig. 3 presents XRD patterns of NaGP9C after 24 h and NaGP18C compositions after 24 h and 48 h mechanochemical activation, respectively. The broad 2θ peak at about 28° seen from Fig. 1 began slightly to be narrow in the case of NaGP9C sample. Some sharp peaks showing crystallization was also observed in the amorphous section of this sample. These peaks were assigned to quartz (SiO_2). As for NaGP18C, we can see a similar pattern after 24 h mechanochemical activation. When compared to the XRD pattern before mechanochemical activation, amorphous structure retained after 24 h. Even the mixing was carried out in high reactivity GP, due to less carbon content, little crystallite phase occurred in the NaGP9C for 24 h activation.

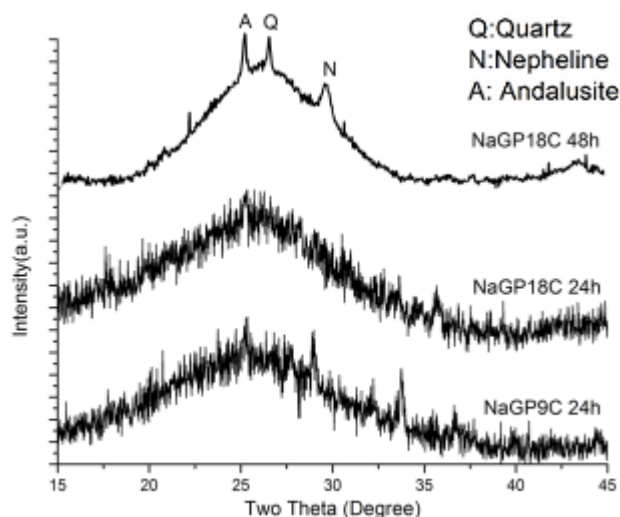


Fig. 3. XRD patterns of (a) NaGP9C for 24 h, (b) NaGP18C for 24 h and (c) NaGP18C for 48 h mechanochemical activation.

On the other hand, even we used high carbon content, due to low reactivity; little crystallization was carried out in NaGP18C sample after 24h activation as well. Moreover, low diffusion of solid particles in NaGP18C could not allow intensive crystallization. When NaGP18C samples mechanochemically activated for 48h, with the increase of activation time, peak broadening decreased and intensities of peaks increased. This was the result of crystallization of some refractory phases. These refractories were assigned to quartz (SiO_2), nepheline ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) and andalusite (Al_2SiO_5) as seen in the XRD pattern (Fig. 3). Although there was no crystalline phase detected related to the carbon, excess carbon could serve to form the geopolymeric refractory phases by incorporating into microporous in amorphous GP and by allowing structural ordering [20-21].

The scanning electron micrographs studies of all the mechanochemically activated samples are shown in Fig. 4. The NaGP9C for 24 h sample has particles ranging from submicron-size to nano-size size distribution (Fig. 4a). It is clear that particle size decreased and particle shape became globular with narrow particle size distribution in the case NaGP18C for 24 h (Fig. 4b). This was the fact that the excess carbon could contribute to formation of finer particles by preventing the particles growth during activation [21]. In Fig. 4c, the increment of the activation duration to 48 h resulted in an agglomeration of the finer particles due to a greater surface area and energy. Higher milling duration doesn't mean finer particle size since finer particles could more readily adhere to each other in the bowl. On the other hand, compared with the classical solid state reaction methods, owing to the increase in the particle surface area where the reaction takes place and creation of valance electrons, it is expected from the particles that are produced with the mechanochemical activation method to have better reactivity [9-11]. This reactivity resulted in better crystallization seen in the

XRD analysis and this could also be confirmed by SEM analysis.

As well as surface reactivity, another advantage of mechanical activation is of improving bulk reactivity. Mechanical activation MA enables the possibility to alter the reactivity of solids through physicochemical changes in bulk without altering overall chemistry of the material. When, a fly ash that is used for aluminosilicate source for GP were mechanochemically activated before GP route, an increment of compressive strength of resultant GP [9]. Therefore, mechanically activated fly ash gives rise to nano-scale particles [11] and shows improved geopolymerisation rate [10]. If bulk materials make from the produced powders in this study, it would be expected that they show better mechanical properties.

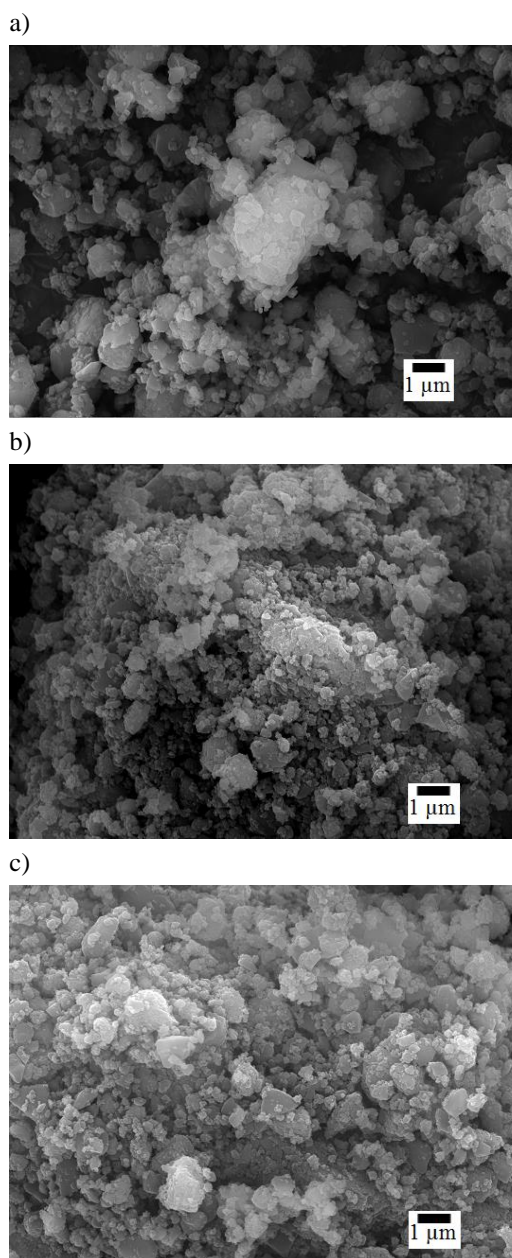


Fig. 4. SEM micrographs of (a) NaGP9C for 24h, (b) NaGP18C for 24h and (c) NaGP18C for 48h mechanochemical activation.

To investigate possible conversion related to annealing temperature of samples, the DSC analyses of activated three samples was carried out and seen in Fig. 5. There was no sharp exothermic peak seen in three samples but a broad exotherm observed between 900 °C - 1000 °C indicated that the well-known nepheline crystallization [6]. Comparatively narrower exotherm showed a conversion of new crystalline phase after ~1300 °C. Consistent with our recent works [18], these result showed that initially, intensive nepheline formation was occurred and then Si in nepheline reacted with carbon nano-powder in all samples. Crystallization temperature between silicon and carbon increased with increasing carbon content and milling duration due to reamorphization of crystallized GP carbon structure [22].

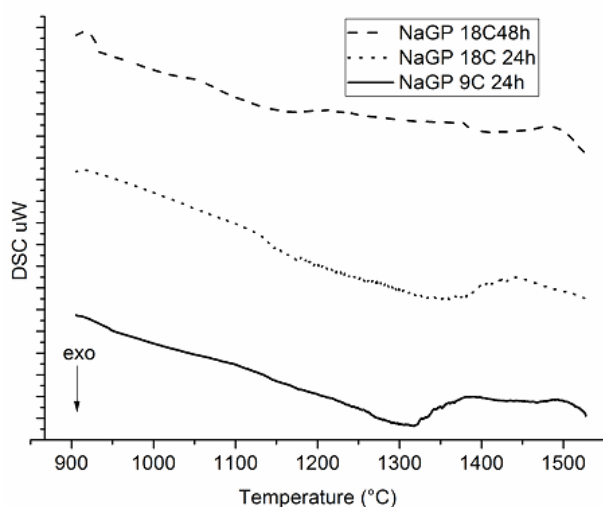


Fig. 5. DSC analysis of geopolymer carbon compositions after mechanochemical activation

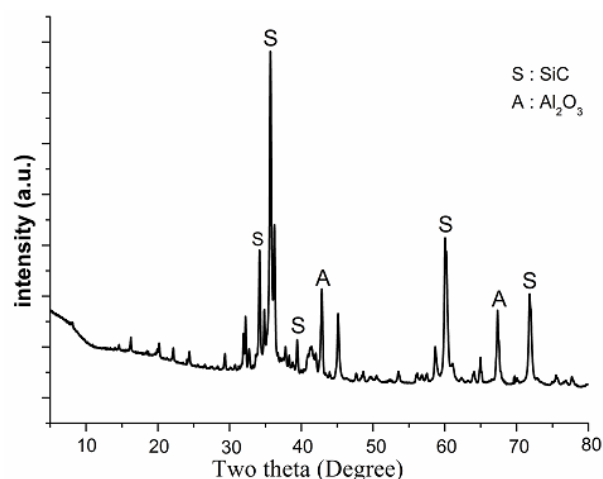


Fig. 6. XRD pattern of NaGP18C annealed at 1550°C for 2 h following mechanochemical activation for 24 h.

One of the DSC analyzed samples was also examined with XRD and Fig. 6 shows XRD pattern of NaGP18C annealed at 1550°C for 2 h following mechanochemical activation for 24 h. Sample mostly consisted of Silicon carbide (SiC) and a minor amount of alumina (Al₂O₃)

impurity. The details of conversion depending on heat treatment were previously reported by us [18].

4. CONCLUSION

By mechanochemical activation of NaGP carbon precursors, tailored geopolymeric powders (nepheline/quartz/andalusite) can be produced at room temperature. Depended on the carbon amount, activation duration and heating temperature, the crystal phases (such as SiC) can be obtained by heating the mechanochemically activated GP carbon nano-powder precursor over 1300 °C.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to thank the Hitit University, Scientific Researches Unit for financial supports of this research, Bulent Alkan for some XRD analysis and Duygu Candemir for help with laboratory instruments.

REFERENCES

- [1] Davidovits J., "Geopolymers and Geopolymeric Materials," *J. Therm. Anal. Calorim.*, 35: 429-41, (1989).
- [2] Davidovits, J., "Geopolymer Chemistry and Properties"; pp.25-48 in *Geopolymer'88 First European Conference on Soft Mineralurgy*, Vol.1 Edited by J. Davidovits and J. Orlinski. *Geopolymer Institute and Technical University, Compiègne*, France, (1988).
- [3] Davidovits, J., Davidovits, N., Davidovits, M. "Manufacture for Rapid -setting Geopolymeric Matrix Materials and Binders for Impregnating Fibrous Structures, and The Composition Obtained", *FR. Patent* No.2, 666, 328, 1992.
- [4] Davidovits, J., Davidovits, M., Davidovits, N. 1998. "Alkaline Alumina-silicate Geopolymeric Matrix for Composite Materials with Fiber Reinforcement and Method for Obtaining Same", *U.S. Patent* No.5, 798, 307.
- [5] Kriven, W. M. "Inorganic Polysialates or "Geopolymers," *American Ceramic Society Bulletin*, 89 (4): 31-34, (2010).
- [6] Kuenzel, C., Grover, L. M., Vandeperre, L., Boccaccini, A. R., Cheeseman, C. R., "Production of Nepheline/Quartz Ceramic from Geopolymer Mortars," *J. Eur. Ceram. Soc.* 33: 251-258, (2013).
- [7] J. L. Bell, P. E. Driemeyer and W. M. Kriven, "Formation of Ceramics from Metakaolin-based Geopolymers: Part I. Cs-based Geopolymer," *J. Am. Ceram. Soc.*, 92 (1): 1-8, (2009).
- [8] J. L. Bell, P. E. Driemeyer and W. M. Kriven, "Formation of Ceramics from Metakaolin-based Geopolymers: Part II. K-based Geopolymer," *J. Am. Ceram. Soc.*, 92 (3): 607-615, (2009).
- [9] Kumar, S., Kumar, R., "Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer" *Ceram. Int.* 37: 533-541, (2011).
- [10] J. Temuujin, R.P. Williams, A. van Riessen, "Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature" *J.of Mater. Proc. Tech.* 209: 5276-5280, (2009).

- [11] Marjanovic, N., Komljenovic, M., Bascarevic, Z., Nikoli V., "Improving reactivity of fly ash and properties of ensuing geopolymers" *Construction and Building Materials* 57: 151–162, (2014).
- [12] Yang, Z. G., and Shaw, L. L." Synthesis of Nanocrystalline SiC at Ambient Temperature Through High Energy Reaction Milling" *Nanostructured Materials* 8: 873-886, (1996).
- [13] Lai, M.O., Lu, L., Laing, W., "Formation of magnesium nanocomposite via mechanical milling" *Composite Structures* 66: 301–304, (2004).
- [14] Lu, L., Lai, M.O., Liang W., "Magnesium nanocomposite via mechanochemical milling" *Composites Science and Technology* 64: 2009–2014, (2004).
- [15] Kriven, W. M., Bell, J. L. and Gordon, M. Microstructure and Microchemistry of Fully-Reacted Geopolymers and Geopolymer Matrix Composites, *Ceramic Transactions* 153: 227-250, (2003).
- [16] Matovic, B., Sponjic, A., Devceveski, A. and Miljkovic, M. "Fabrication of SiC by Carbothermal-Reduction Reactions of Diatomaceous Earth," *J. Mater. Sci.* 42: 5448-5451, (2007).
- [17] Changhong, D., Xianpeng, Z., Jinsong, Z., Yongjin, Y., Lihua, C. and Fei, X., "The Synthesis of Ultrafine SiC Powder by the Microwave Heating Technique," *J. Mater. Sci.* 32: 2469-2472, (1997).
- [18] Bagci, C., Kutyla, G. P. Seymour, K. C. and Kriven, W. M., "Synthesis and Characterization of Silicon Carbide Powders Converted from Metakaolin-based Geopolymers," *J. Am. Ceram. Soc.*, 99(7): 2521-2530, (2016).
- [19] Bagci, C. Kutyla, G. P. and Kriven, W. M. "In Situ Carbothermal Reduction / Nitridation of Geopolymer Composites Containing Carbon Nanoparticles," *Cer. Eng. and Sci. Proc.* 35(8): 15-28, (2015).
- [20] R. Koc, and S. V. Cattamanchi, "The Synthesis of Ultrafine SiC Powders Using Carbon Coated Fumed Silica," *J. Mater. Sci.* 33: 2537-2549, (1998).
- [21] Lu, Y., Wang, Y. Pan, Z., Shen, H. and Wu, L., "Preparation of Carbon-Silicon Carbide Composite Powders via a Mechanochemical Route," *Ceram. Int.* 39: 4421-4426 (2013).
- [22] Kirsever, D., Toplan, N., and Toplan, H. O. "Effects of Mechanical Activation on the Structure of Talc," *Journal of Ceramic Processing Research.* 16(5): 544-547, (2015).

Investigation on the Effects of Thermal Parameters in Historic Primary School in İzmit in the Context of Refurbishment Process

Neslihan TÜRKMEÑOĞLU BAYRAKTAR*, Emre KİŞHALI, Mohammad ABUDSAMHADANA

Kocaeli University, Faculty of Design and Architecture, Department of Architecture

(Received : 17.05.2016 ; Accepted : 21.09.2016)

ABSTRACT

Historic schools are the building types where climatic comfort requirements of students, influencing the learning process have to be maintained. These buildings face deteriorations in long periods by especially climatic parameters, causing insufficient conditions for the students. The diagnostic process for historic school buildings is important in order to investigate the existing problems on the envelope and climatic comfort conditions before implementation of intervention strategies. The combined effect of climatic parameters, changing heat gain and losses, thermal sensation and energy efficiency have to be examined in order to lower the energy consumption, create comfortable climatic environment for students which directly influence their concentration and health in the classrooms. In this context the level of climatic conditions in different oriented classrooms are investigated by thermal measurements and concurrently conducted survey with questionnaires in historic Ulugazi Primary School in İzmit, Turkey. During the measurement process of climatic parameters, a survey was conducted among 40 students in two classrooms, located on North-northwest, (NNW) and South-southeast, (SSE) orientations. The findings on distribution of individual thermal satisfaction sensation of the students obtained by the questionnaires were compared to the graphics of distribution of temperature, air velocity, humidity measurement values.

Keywords: Thermal Performance, Thermal Comfort, Historic School Building, Non-Destructive Tests.

ÖZ

Tarihi okul yapıları, öğrencilerin öğrenim süreçlerini etkileyen iç ortam iklimsel konfor gereksinimlerinin optimum koşullarda sağlanmasının gerekli olduğu yapı tiplerindedir. Bu yapılar uzun sürelerde öğrenciler için istenmeyen iç ortam fiziksel koşullarının oluşmasına da neden olan dış ve iç iklimsel parametrelerin yarattığı bozulmalarla yüzleşebilmektedir. Tarihi yapılarda müdahale stratejilerini uygulamadan önce yapı kabuğundaki bozulmaları ve iç ortam iklimsel konfor seviyelerini belirlemek üzere teşhis süreçleri yürütülmelidir. Enerji tüketimini azaltmak ve sınıflarda öğrencilerin konsantrasyon ve sağlıklarını direkt olarak etkileyen konforlu iç ortam koşullarını yaratmak için iklimsel parametrelerin bileşik etkisini, değişen ısı kayıp ve kazançlarını, ısı konfor memnuniyet derecesi ve enerji verimliliğinin incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda ısı ölçümleri ve eşzamanlı olarak yürütülen anket çalışması ile İzmit tarihi Ulugazi tam zamanlı ilköğretim okulunda farklı yönlerde konumlanan sınıflardaki iç ortam iklimsel koşulların yarattığı etkiler incelenmiştir. KKB ve GGD yönlerinde yer alan sınıflarda öğrenim gören 40 öğrenciye iklimsel parametrelerin ölçümü esnasında anket soruları yöneltilmiştir. Isıl koşullardan memnuniyet derecesi ve dağılımına yönelik veriler sıcaklık, iç hava hareketi hızı ve nem dağılımına yönelik verilerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıl Performans, Isıl Konfor, Tarihi Okul Binası, Hasarsız Test Yöntemleri.

1. INTRODUCTION

Historic primary schools are the building types which have to be cared not only for their historical values but also with the function of education which can only be satisfactorily provided when healthy and comfortable interior environment conditions in the classrooms are maintained. In these buildings, the students, at the age of 6-10 have to spend most of their daytime for education activities.

It has to be the first step to diagnose the behaviors and the effects of climatic parameters as humidity, temperature, interior air flow velocity in the classrooms which have direct effect on generation of optimum climatic comfort requirements of the students before the implementation of energy refurbishment activities.

Micro climatic conditions, under the impact of physical environmental conditions influence not only the student's mental and physical performance during their education period but also the amount of energy consumption of the buildings. In the literature, it is stated that the studies on investigating the effects of thermal environments in the classrooms on students have been started since 1950s [1, 2, 3]. In school buildings some parameters become more of an issue. Comfort condition is under the effect of;

Physical parameters of environment as;

- Interior and outdoor air, surface temperatures,
- Relative humidity,
- Local airflow velocity,
- Odour,
- Interior environment comprising biologic, chemical pollutants,

*Corresponding Author

e-mail: neslihanurkmenoglu@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 357-367

- Surface colour,
- Lighting,
- Acoustic level,

Physiological parameters of occupants as;

- Age,
- Gender,
- Activity type,
- Metabolism rate,
- Clothing level,
- Social conditions [4,5]

Energy performances of school buildings in Greece have been evaluated by the measurement and simulation activities by Dimoudi et. al. and night ventilation strategy as an appropriate solution is recommended in order to stabilize interior thermal conditions [6]. The study providing data on energy performance of school buildings remaining from Hellenism Hellenistic period have been conducted by surveys in 135 schools and results have been compared by the other studies in the literature and also data on thermal comfort and interior air quality have been presented. [7].

Hourly temperature measurements and survey study have been generated in the study conducted by Theodosiou et. al. in order to determine climatic conditions and their effects on occupants in different classrooms [3]. Infrared thermography was used in order to investigate the existing condition of building envelope.

It is possible to ensure conscious and sustainable preservation by non-destructive test methods with comprehensive measurement and recognition process based on the collection of information in order to observe the current physical condition of the buildings, in terms of building envelope, the indoor comfort conditions and determination of its effects on the occupants [8, 9]. In this context, historic Ulugazi Primary School building in İzmit, Türkiye, under the effect of temperate - humid climatic conditions is examined in terms of the variation of physical environmental parameters in NNW and SSE oriented classrooms and their effects on student's climatic comfort sensations. The school complex includes historical building, constructed in 1932 and other 2 additional buildings one of which is constructed in 1964 and the other in 1992 [10]. Micro climatic conditions and their effect on students are investigated by the measurement processes of airflow velocities, temperature and humidity values and their variations in different locations of classrooms by comparison of questionnaire results giving information on individual thermal sensation of students to local environmental conditions in the classroom. Systematically collected measurements on 11 November 2015 are presented by areal map graphs for the 2 classrooms. Thermal sensation variations obtained by questionnaire results are compared with the results of measurements in order to get essential and fundamental data for further refurbishment strategies.

2. DIAGNOSIS PROCESS FOR ENERGY REFURBISHMENT IN HISTORIC SCHOOL BUILDINGS

Existing school buildings generate the largest group by 30 % among all public building typologies. In school buildings 67 % of total energy is spent for heating [11, 12]. Lowering energy consumption in these structures for energy efficiency contribute the national economy and mitigate the negative effects on environment caused by the consumption of energy resources. Besides, refurbishment of existing school structures would enable students to continue their educational life in better spaces providing higher thermal, visual and acoustical comfort conditions. Also historic school buildings have a special importance among existing school building stock which have to be renovated with care like other historic buildings without interference the original form, structure and envelope. They have to be sustained to next generation as being part of a common sense of a district with social, cultural, technical reflections of a period of time. Historic school buildings continue serving for education of students with their original function. Because of this, they are the building types where visual, climatic comfort requirements of students which directly affect their learning process have to be maintained besides structural conservation. Historic buildings can be kept alive if they serve with their original or new functions with structural protection which can not only be provided by structural interventions but also by energy efficient retrofit processes with consideration of comfort parameters for users. Energy efficient refurbishment is important for improving both the thermal and visual comfort conditions and reducing energy demand and consumption in heritage buildings. This must be cared more in historic school buildings as they are the places for students that they have to spend most of their day time.

These building types face deteriorations in long periods of time due to unwanted effects of climatic parameters and by seismic actions. They have to be renovated in order to increase the efficiency of microclimate, structure and provide energy conservation. Interior climatic conditions also change by the effect of new formation of structures around the building. Most of the time, these effects make the climatic and visual comfort conditions insufficient for the students in the historic school buildings. The diagnostic process for these buildings is an important approach in order to find out the existing structural situation, problems on envelope and visual, acoustical, climatic comfort conditions, before taking decision on the implementation of intervention strategies [13]. Diagnosis and monitoring instruments are used in order to study historic buildings and to find out the best technological and constructive energy retrofit solutions, to support their commissioning, to assess the actual performances of buildings once retrofitted and to monitor such performance.

In order to diagnose problems on the envelope and determine visual, acoustical, climatic comfort problems

in the zones before taking decision on implementation of intervention strategies, the existing thermal and visual comfort conditions have to be examined by surveys directly learning the satisfaction levels occupants particularly by survey activities and the micro climatic conditions that they are under the effect of should be monitored and observed as a primary step before energy refurbishment activities [14].

It is possible to obtain realistic data on building envelope and the physical conditions of interior ambient by preliminary and comprehensive research on existing and historic buildings by slightly destructive and non-destructive tests. Non-destructive tests (NDT) take part as wide spread used method for also historic buildings which comprise testing and measuring technics with minimum intervention on buildings. The technics provide investigation of the structural and micro climatic problems affecting building, occupants and assessment of the level and type of deteriorations on buildings [15, 16].

3. THE IMPORTANCE OF ANALYSIS OF INTERIOR THERMAL COMFORT CONDITIONS IN SCHOOL BUILDINGS

Thermal comfort is a feeling of satisfaction with the combination of climatic factors named as temperature, average radiant temperature, relative humidity, relative air velocity which occurs in interior environment. Thermal comfort is defined as “*that condition of mind which expresses satisfaction with the thermal environment*”, according to ASHRAE 2005 code (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) [17]. Indoor thermal comfort affects the health and the productivity of the occupants, especially the people who have to spend most of their time in interior spaces. Thermal sensation level which betray the feeling of how warm it is in an interior zone, changes according to everyone with different characteristics of physical, mental features as a matter of age, gender, habits, origin of location, activity and clothing level [18,19].

Also the most important parameters that effect thermal sensation are the parameters as temperature, humidity levels, interior air distribution and velocity, creating a combined effect on interior climate [20]. Primary schools are one of the most important building types in which healthy and comfortable interior environment conditions have to be maintained. Because climatic, visual, acoustical conditions of the classrooms affect the pros and cons of education period, through which the students have to participate by all their sensory perceptions. Minimal changes in room temperatures, in the appropriate limits of comfort schedules, influence the mental abilities which need full concentration as addition, subtraction, multiplication, and framing sentence in a positive or negative way. According to these studies, heating and climatization affect learning conditions. High temperatures in classrooms generate

environment for diseases and also students face complications as breathing quickly, decrease in activity under the condition of even minimal increase in temperature and humidity. In these kind of environments, attention and abilities in implementation, listening and perception of students decrease. Comfort, activity and productivity increase in the classrooms which have low temperatures creating cooling effect. In these kind of interior environments students get more success on studies related to numerical and grammatical works. But it is specified that the manual skills and velocities of students decrease in low temperatures [3]. The effects of climatic parameters in inappropriate levels on human health can be seen in table1. ASHRAE 2005 Standard recommends acceptable operating temperature in winter comfort zones for clothing level of 0.9 clo as 21 – 24.5 °C for humidity range of, 30% and 20.5-23 °C, humidity range of 60 %.

Table 1. The effects of climatic parameters on human health in schools [5] (Çevresel parametlerin okullarda insan sağlığına etkisi)

Health problem	Risk factor
Eye, mouth, neural symptoms on throat	High temperature
	Poor natural ventilation
Nasal congestion, throatache and prunella	Low temperature
	Mechanical ventilation
	High temperature

4. INFORMATION ON CASE STUDY- HISTORIC ULUGAZI PRIMARY SCHOOL

4.1 Definition of the Case Study

Original historic Ulugazi Primary School, built in 1932 after 9 years of the establishment of the Turkish republic, has the signs of modern architecture with its symbolic, historical, aesthetic characteristics of 1st National Architecture period (modern classic architecture) (Figure 1). It is located near a main road and walking route, ex-railway tracks transformed into pedestrian way, passing all along the city.

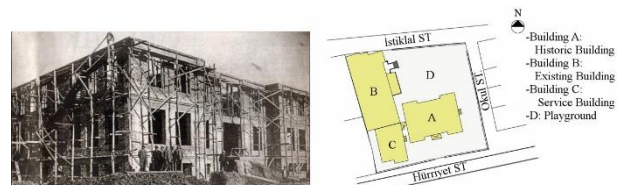


Figure 1. Historic Ulugazi Primary School in İzmit-Türkiye (Tarihi Ulugazi İlkokulu, İzmit – Türkiye)

Today it is comprised of 3 blocks constructed in different time periods. Education still goes on in the other blocks one of which was constructed in 1964 and the other in 1992 with original architecture features of historical

building [10]. Ulugazi Primary School complex has totally 22 classrooms in 3 blocks, 9 of which are located in historic building (A). Approximately 500 enrolled students aged between 6-11 are divided into two groups some of which to get education in the morning hours; 07:00 AM until 12:00 PM, while the second group to get education from 12:30 PM until 06:00 PM (Fig. 2).

autumn. The measurements for the study were conducted on 11 November 2015 through the hours 11:15- 12:15 in both classrooms located on SSE and NNW orientations of Historic Ulugazi Primary School. Outside temperature, humidity values obtained during the survey and measurement processes were respectively, 21.2 °C and % 61 [21].

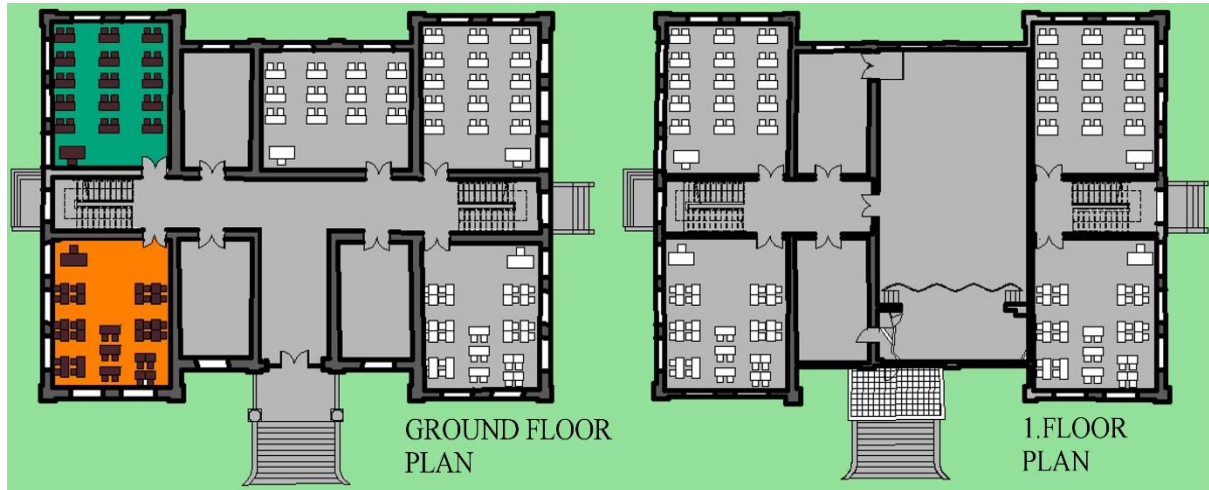


Figure 2. First and ground floor plan of the historic block of Ulugazi Primary School (Ulugazi İlkokulu tarihi blokun zemin ve birinci kat planları)

4.2 Definition of Climate in Kocaeli

Kocaeli is under the effect of temperate- humid climatic conditions. Coldest period actualize through the months as December, January, February and March. Average

4.3 Classrooms

The findings of the results presented in this study were collected from measurement and survey campaigns in order to understand thermal comfort sensation levels of



Figure 3. NNW and SSE Oriented classrooms on ground floor plan in the historic building (Tarihi yapıda KKB ve GGD yönüne bakan sınıflar ve Zemin kat planı)

temperature obtained in these months is 7.4 °C. Lowest average temperature values as 3.4 °C are obtained in January and February. Measured lowest temperature value is -9.7 °C. Prevailing wind of coldest period acts from Southeast and West-northwest. Hottest period actualize through the months as June, July, August and September. Average temperature obtained in these months is 22.3 °C. Highest average temperature values as 29.4 °C is obtained on July and August. Measured highest temperature value is 44 °C. Prevailing wind in hottest period acts from south-east. An average value of temperature varies between 13-15 °C in spring and

students. The study was carried out in 2 classrooms on the ground floor of Ulugazi Primary school building. The location of radiators for heating also can be seen as blue dots on the Figure 3.

Thermal measurements and survey were conducted during lecture time when also active heating system operated. Two classrooms located on SSE and NNW of the building was selected for the study in order to compare the orientation effects on the thermal comfort sensation. Characteristics of the classrooms selected for the survey and measurement processes are defined on Table 2.

Table 2. Characteristics of the classrooms selected for the survey and measurement processes. (Araştırma ve ölçüm için seçilen sınıfların özellikleri)

	Orientation	Location	Total number of the students	Number of the girls	Number of the boys	Average clothing level of the students	Met values of the students
Classroom1 (3.rd class- 9 years old students)	NNW	Ground floor	20	9	11	0.47 clo girls	1.2
						0.41 clo boys	
Classroom2 (3 rd class- 9 years old students)	SSE	Ground floor	20	12	8	0.32 clo girls	1.2

Questionnaire surveys were conducted among nine-year-old 40 students in 2 classrooms at the same time with measurements. Metabolic rate and cloth insulation were estimated in accordance with ASHRAE 2005. Metabolic heat production of students was assumed to fall into the category of 'light activity while seated' (1.2 met, or 70 W/m²) [22]. Respondents were wanted to write what they were wearing during survey by means of clothing checklist included in the questionnaire. Total "clo" values were calculated for every student by summing up clo values of every piece of clothing. Then average clo values are obtained for the girls and the boys separately (Fig. 4).

Humidity Temperature datalogger device located outside the building on North (Fig. 5).



Figure 5. Measurement equipment - respectively from left to right: datalogger, anemometer. (Ölçüm aletleri - soldan sağa doğru sırasıyla: veri kaydedici ve anemometer.)



Figure 4. Typical uniform clothing worn by students in Ulugazi Primary school (Ulugazi İlkokul öğrenciler tarafından kullanılan uniformalar).

5. MEASUREMENT AND QUESTIONNAIRES

5.1 Measurements of Thermal Variables

Extech AN340 CMM/CFM Anemometer/ Psychrometer Datalogger was used to measure interior ambient temperature, humidity and air flow velocities in the NNW and SSE oriented classrooms during survey process. Outside temperature and humidity variations during the study was recorded by Extech RHT10

18 reference measurement points located near the desks in the classroom were arranged in order to get information on the variation of temperature, humidity and airflow velocities affecting students individually at the sitting position height of 100-110 cm, as it can be seen from Figure 6. Temperature, humidity, airflow velocity values were read manually in every 3 minutes time period in every point with defined reference point order in the 2 classrooms concurrently through 11:15 - 12:15.

‘Window1’ and the door were open during the measurement and survey process in SSE oriented classroom. Curtain on the south wall was closed. ‘Window 1’ and ‘Window 5’ were open; the door was closed in NNW oriented classroom. Temperature values are higher in SSE classroom as expected in comparison to NNW classroom because of direct solar radiation gain from windows. Temperature values obtained by measurements in NNW oriented classroom can be seen on the graphics. Average, maximum and minimum temperature values are respectively; 24,5 °C, 25,4 °C and 22,6 °C.

Average, maximum and minimum temperature values obtained by measurements in SSE classroom are respectively, 25,8 °C, 26,5 °C, 24,9 °C. ASHRAE 2005 Standard recommends acceptable operating temperature in winter comfort zones for clothing level of 0,9 clo as 20,5-23 °C for humidity range of 60 % and 20,7-23,9 °C for humidity range of 50 %. Measured relative humidity values in both classrooms change in a range of maximum

60,4 % and minimum 47,5 %. Temperature, airflow velocity and relative humidity values measured in 18 points can be observed in Figure 7 and Figure 8. Airflow velocity entering from ‘Window 5’ is 0,8 m/s, from ‘Window 1’ is 0,4 m/s in NNW classroom. Airflow velocity entering from ‘Window 1’ and the door is 0.00 m/s.

The location of measured high, low temperatures and relative humidity values can be seen on the figure 9. High temperature values, among 26,4-26,1 °C are obtained at measurement points 4, 5, 6, 7, 8, 9, 18 located among south wall and the center of the SSE oriented classroom. Although inlet and outlet airflow velocities are 0.00 m/s, low temperature values, among 24,9-25,5 °C are obtained at the measurement points among open door and ‘Window 1’. Maximum relative humidity values of 62,6 %-55,5 % are measured at the points, 1, 2, 3, 4, 5, 15, 18, near the east wall without window. Low relative humidity values are obtained in the middle part of the classroom and near the open window.

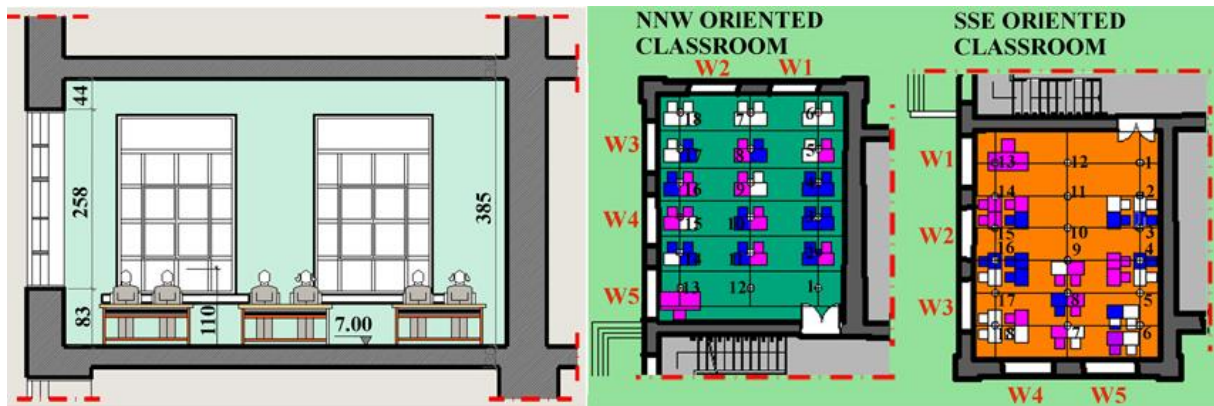


Figure 6. Measurement points in NNW and SSE oriented classrooms. (KKB ve GGD yönüne bakan sınıflardaki ölçüm noktaları)

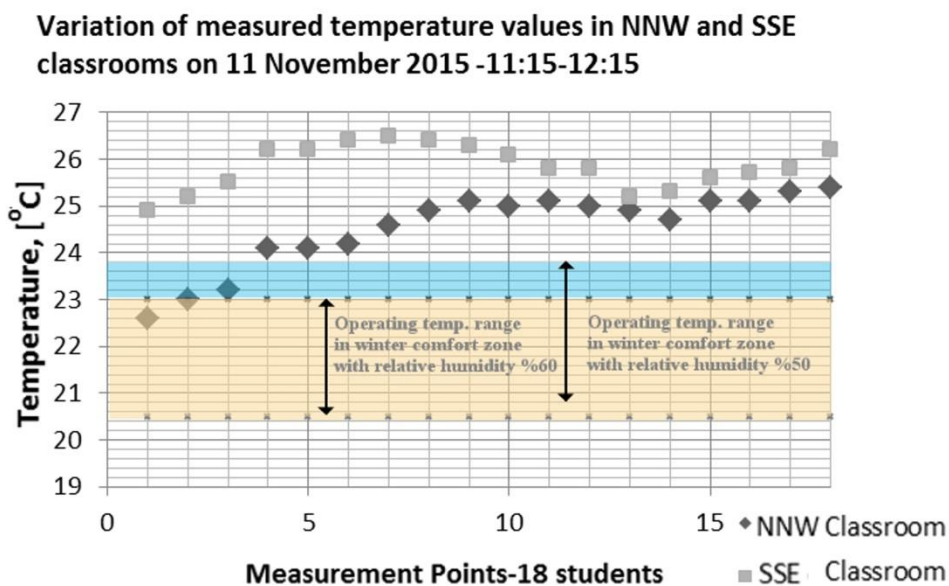


Figure 7. Temperature values in NNW and SSE classroom on 11.11.2015 through 11:15-12:15 (11 Kasım 2015 11:15 ve 12:15 arasında KKB ve GGD yönüne bakan sınıflardaki sıcaklık değerleri).

On the other hand, high temperature values, among 26,4-26,1 °C are obtained at measurement points 9, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18 in NNW oriented classroom. Although inlet and outlet airflow velocities are too low and lowest temperature values, 22,6- 23,2 °C are obtained at the measurement points near the door. Maximum relative humidity values are measured at the point '4' which is near the east wall without window. Lowest relative humidity values are obtained near 'Window 5' on the west wall.

categories: cold, cool, slightly cool, neutral, slightly warm, warm, and hot. The values -1, 0, +1 regarding slightly cool, neutral and slightly warm are accepted to be within the comfort zone. In the questionnaire students were asked about their personal information. There were questions on Fanger's seven point rating scales by which the thermal conditions of the classrooms could be evaluated [23].

Students' sensation of comfort was examined in two classrooms by questionnaire on 11 November 2015 in

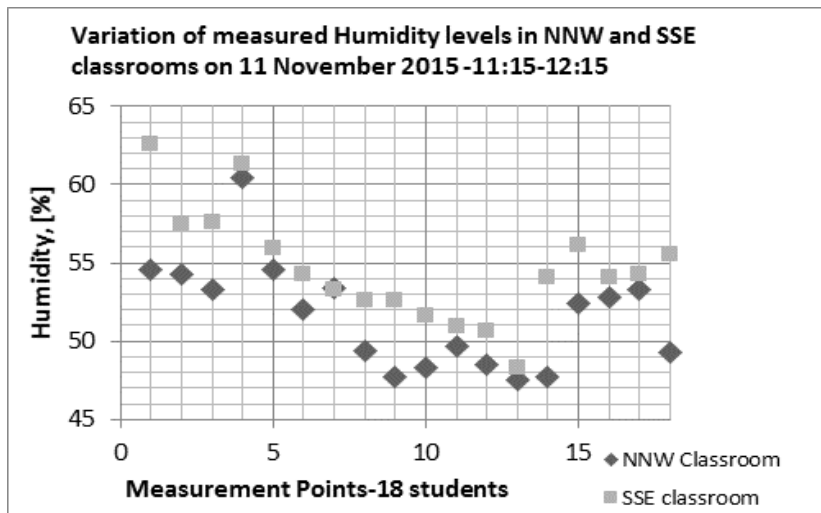


Figure 8. Relative Humidity values in NNW and SSE classroom on 11.11.2015 through 11:15-12:15 (11 Kasım 2015 11:15 ve 12:15 arasında KKB ve GGD yönüne bakan sınıflardaki bağıl nem değerleri).

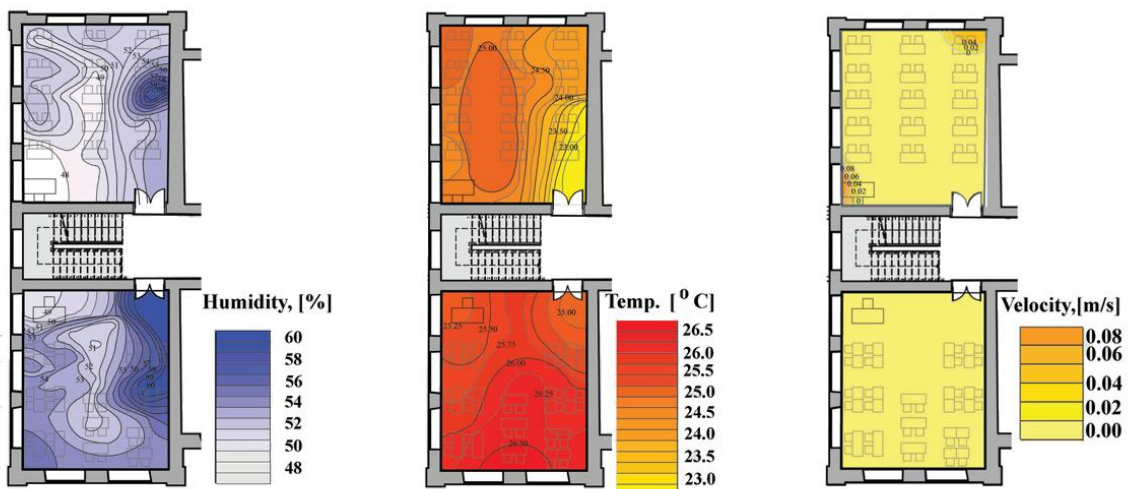


Figure 9. Relative Humidity values in NNW and SSE classroom on 11.11.2015 through 11:15-12:15 (11 Kasım 2015 11:15 ve 12:15 arasında KKB ve GGD yönüne bakan sınıflardaki bağıl nem değerleri).

5.2. Questionnaire

The subjective assessments were based on the occupants' vote on thermal sensation, thermal preference, thermal acceptance in terms of temperature, air velocity and humidity parameters in the occupied zone derived from ASHRAE 2005. Thermal sensation is defined with seven

historic block of Ulugazi Primary School. The questionnaire period was limited to one time in a day in order not to interrupt lectures. In the morning, through 11:15 – 12:30, questionnaires were answered by 3rd class students with average age of 9, in NNW and SSE oriented classrooms. The questionnaire derived from literature

was set up to understand the instantaneous sensation of students to microclimatic environment were delivered and answered by the students while measurements were enduring [19, 24, 25]. It included questions on; personal information (age and gender), thermal comfort questions including temperature, humidity and airflow velocity sensation level.

Students were wanted to mark on the clothing check-list what they wore during measurement and survey process. They also defined their location in the classroom. The criteria as temperature, humidity and natural ventilation sensation scale, satisfaction scale and preference scale were considered and asked to the students in the questionnaires as marking the appropriate level of sensation during survey and measurements. According to the results, 60 % of the students among 20 students with 9 girls and 11 boys stated that they were not satisfied with the thermal environment in the classroom, NNW (Fig.10). 40% stated that they felt comfortable while 55 % of the students expressed that the interior environments was hot and for some warm. While 45% wanted no change in temperature, 40 % preferred cooler environment in the classroom. 50% of the students stated that they were satisfied with humidity level while 35 % felt the sensation of dryness. 60 % of the students stated that still air conditions existed and 50 % wanted increase in airflow velocities in the classroom. 80% of the students wanted air conditioner in the classroom.

5.3. Comparison of Questionnaire and Measurement Results

Fanger's seven point rating scale was used to get information on the sensation of the students on natural ventilation potential, humidity levels and temperature [17]. It was stated by most of the students that the airflow velocity and distribution in the classroom was very poor although 2 openings in the opposite walls were open during the measurement process. Comparison of the votes of the students with the measured temperature and velocity range on the 18 reference points demonstrate the fact that all other students were unsatisfied in different levels by the airflow distribution and velocities in the NNW classroom except the students sitting close to the openings, 'Window 1- Window 5', under the effect of low volume flow rates. Highest measured temperatures were obtained close to west wall with a value of 25 °C but some of students sitting opposite east wall also voted as hot. Highest humidity levels in the classroom measured on these points can be the cause of this thermal sensation. It was stated by 50% of the students that the humidity level in the classroom was sufficient in classroom NNW. 35% of the students sitting near East wall stated that interior air was too dry although the measurement showed that the humidity level was the highest, close to these reference measurement points. Inconsistence in the sensation of the measurement results and students thermal sensation votes in terms of humidity

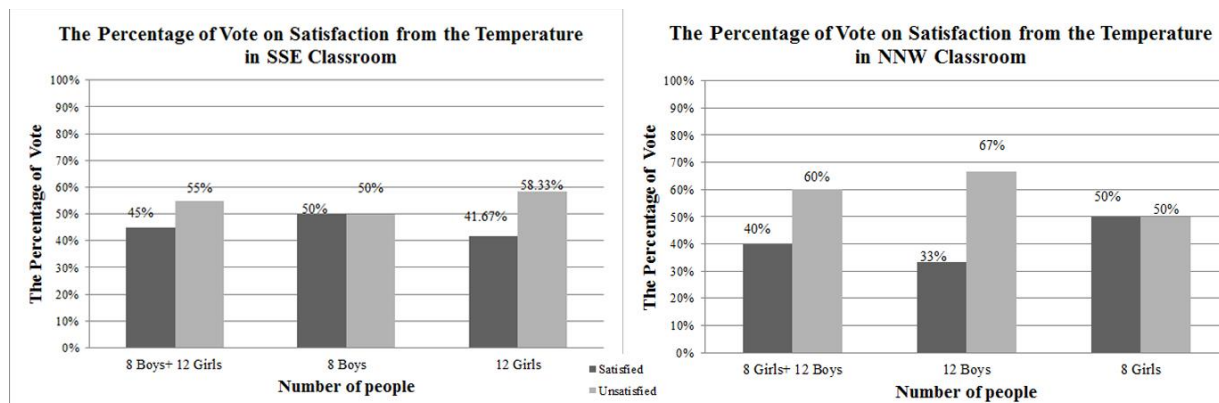


Figure 10. The percentage of satisfaction from the temperature in SSE and NNW classrooms (GGD ve KKB yönüne bakan sınıflardaki memnuniyet yüzdeleri).

According to the results, 55% of the students among 20 students with 12 girls and 8 boys stated that they were not satisfied with the thermal conditions in SSE oriented classroom (Fig.10). 20% stated that they felt comfortable while 50% expressed that the interior environments was very hot and warm. While 30% wanted no change in temperature, 50% wanted the classroom to be cooler. 50% of the students stated that they were satisfied with humidity level while total 35% felt the sensation of humidity. %35 of the students stated that still air conditions existed. 50% wanted increase in airflow velocities in the classroom. 75% of the students wanted air conditioner in the classroom.

level, temperature can be because of the student's misunderstanding the questions on humidity. Temperature values in the classroom except reference measurement points, 1, 2, 3 are outside the comfort zone for mostly measured level of 60% and 50% relative humidity in NNW oriented classroom according to ASHRAE standard.

Although the door and 'Window 1' was open during measurement process in the classroom SSW, the answers of the students reveal the fact that most of the students found air flow velocities and distribution insufficient. Airflow velocities were measured as 0.00 m/s through the door and the window. This could be the blocking effect

of the other school construction very close to the historic school building to the wind acting on 'Window 1'. The windows on south wall also had closed curtains in order to get protection from solar radiation effects. Unfortunately the interior shading device as curtains inside the wall is insufficient way of protection from the

unwanted effects of solar radiation as it cannot be blocked before it enters the classroom. This could be the cause of the results of the survey that showed, students sitting near the south wall with no open window felt the disadvantage of still air more in comparison to other students. In accordance with these results, temperature

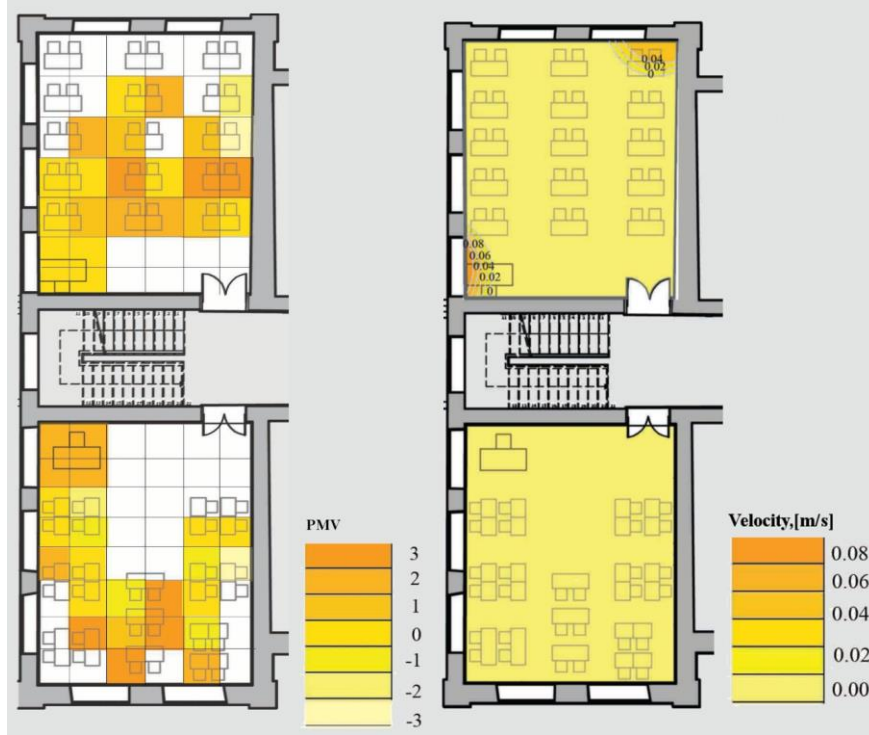


Figure 11. Comparison of air velocity results with questionnaire results of students in NNW and SSE classroom on 11.11.2015 through 11:15-12:15. (11 Kasım 2015 tarihinde 11:15 – 12:15 saat aralığında hava hareketi hız ölçümleri ve anket sonuçlarının karşılaştırılması)

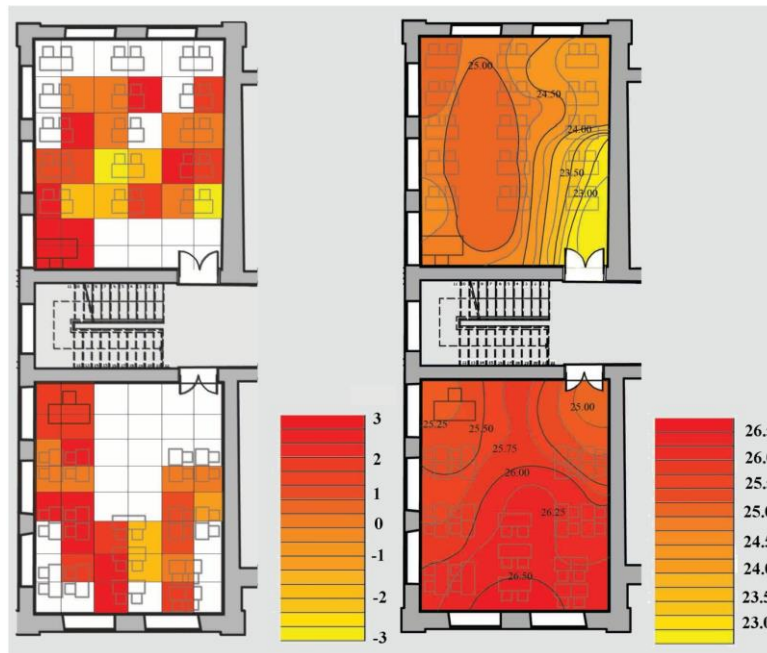


Figure 12. Comparison of temperature measurement results with questionnaire results of students in NNW and SSE classroom on 11.11.2015 through 11:15-12:15. (11 Kasım 2015 tarihinde 11:15 – 12:15 saat aralığında sıcaklık ölçümleri ve anket sonuçlarının karşılaştırılması)

values obtained near these part reach to high levels as it can be seen from the figure 13 and also students sitting near these measurement points stated that they felt very hot.

Half of the students in SSE classroom had satisfaction with humidity levels. 35% of the students sitting on the measurement points where the highest humidity values were obtained expressed that humidity level in the classroom was high as it was observed by the measurement process. All temperature values in the classroom are outside the comfort zone for mostly measured level of 60% and 50% relative humidity in SSE oriented classroom according to ASHRAE standard (Fig. 12 and 13).

Measurement results and votes of students on thermal sensation in the classroom in terms of humidity, temperature and air flow velocity levels are consistent except the relation of measured temperature and humidity values and the votes of students on these parameters. This can be the result of misunderstanding the meaning of the question on humidity by the students. This shows the importance of the definition of the questions to students during survey campaign.

In both classrooms temperature and humidity values are high and the survey also supports the measurement results. Most of the students stated that they had health problems as headache, throatache, stuffiness, etc. in the classrooms because of high temperatures which also

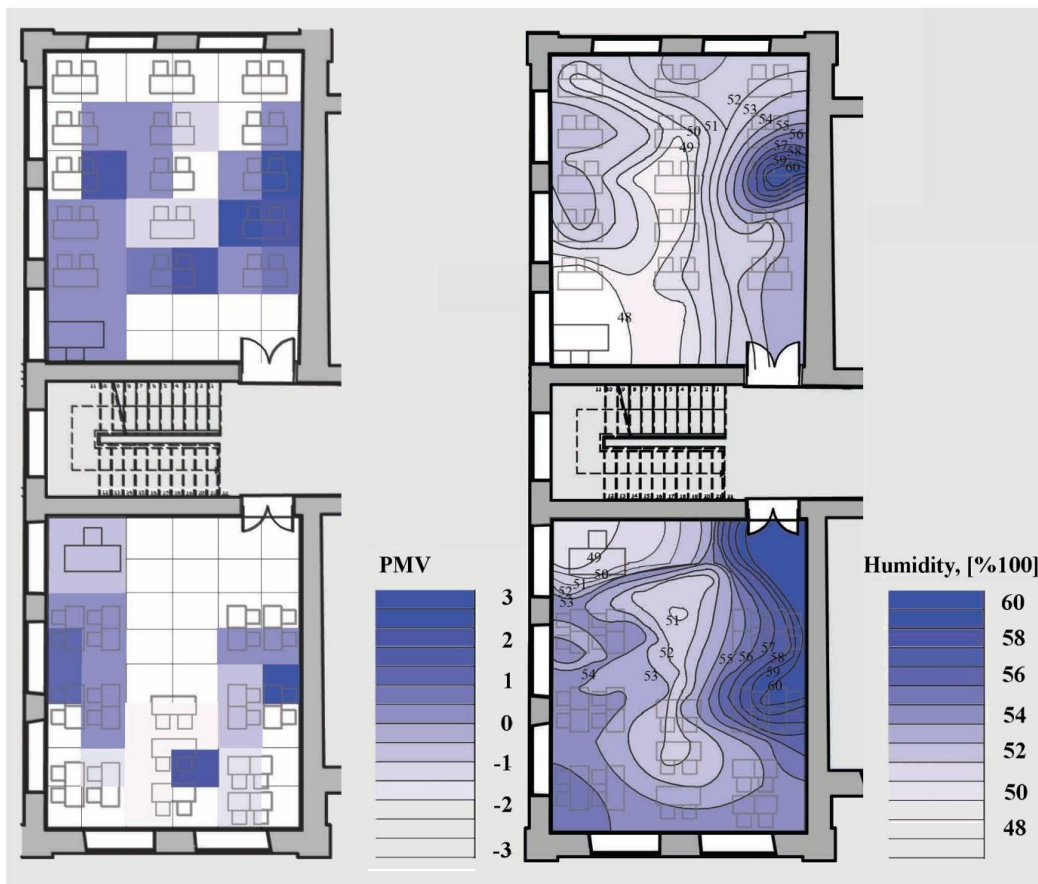


Figure 13. Comparison of relative humidity measurement results with questionnaire results of students in NNW and SSE classroom on 11.11.2015 through 11:15-12:15. (11 Kasım 2015 tarihinde 11:15 – 12:15 saat aralığında bağıl nem ölçümleri ve anket sonuçlarının karşılaştırılması)

6. CONCLUSION

In the context of the study thermal comfort conditions of the two, NNW and SSE oriented classrooms in historic Ulugazi Primary School was investigated by concurrently conducted survey process and measurement of temperature, relative humidity and airflow velocity process on 11 November 2015 in the morning, in order to diagnose the problems in terms of micro climatic conditions and their effect to students who have to spend most of their day time in healthy and comfortable interior environment for their qualified learning period.

decrease their concentration. The most important problem in the classrooms seems to be the insufficient amount of natural ventilation. The location of the new built blocks prevents the wind acting from west where most of the openings are located. Strategies on occupant behaviors for opening the right windows, in the right times for increasing natural ventilation efficiency have to be investigated by CFD simulations and measurements.

The hot interior environment is also caused by the heating system which was active during the measurement and survey campaign. Instead of making heating system

active whole day, intermittent heating strategies have to be improved in order to provide energy efficiency and thermal comfort conditions.

ASHRAE Standard recommends acceptable operating temperature in winter comfort zones for clothing level of 0.9 clo as 20.5-23°C for humidity range of 60% and 20.7-23.9 °C for humidity range of 50%. In the 2 classrooms students clo values changed in the range of 0.29-0.47. Although the clothing levels are lower than the ASHRAE reference clo level students still felt uncomfortable from the hot environment in the two classrooms. But for these clo levels and comfort zone humidity and temperature values have to be investigated as a future study.

Finally, non-destructive tests on thermal comfort are an essential issue on the refurbishment of historic buildings. Unlike, new constructions, interventions on upgrading thermal performance of old buildings having historical, monumental and artistic values are a complicated issue. In this research, the importance of surveying regarding to temperature, relative humidity, air velocity and thermal comfort is highlighted prior to any kind of interventions in the context of energy efficiency.

REFERENCES

- Corgnati, S.P., Filippi, M. and Viazzo, S. "Perception of the thermal environment in high School and university classrooms: Subjective Preferences and Thermal Comfort", *Building and Environment*, 42: 951-959, (2007).
- Teli, D., Jentsch F. M. and James, A. B. P. "The role of a building's thermal properties on pupils' thermal comfort in junior school classrooms as determined in field studies", *Building and Environment*, 82: 640-654, (2014).
- Theodosiou, T.G. and Ordoumpozanis, K.T., "Energy, comfort and indoor air quality in nursery and elementary school buildings in the cold climatic zone of Greece", *Energy and Buildings*, 40: 2207-2214, (2008).
- Allard, F., "Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook", ed. Matheos Santamouris and Francis Allard, *Earthscan*, ISBN: 1873936729, London, 978, (1998).
- Mendell, M.J. and Heath, G.A., "Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature", *Indoor Air*; 15: 27-52, (2005).
- Dimoudi, A. and Kostarela, P., "Energy monitoring and conservation potential in school buildings in the climatic zone of Greece", *Renewable Energy*; 34(1): 289-296, (2009).
- Dascalaki, E.G. and Sermpetzoglou, V.G., "Energy performance and indoor environmental quality in Hellenic schools", *Energy and Buildings* 43: 718-727, (2011).
- Della Torre, S., "Economics of planned conservation", Integrating aims - Built heritage in social and economic development, *Aalto University, Centre for urban and regional studies publications*, Helsinki, (2010).
- Della Torre S. and Moiola R., "Designing an active monitoring system: the Planned Conservation Project in Monza and Brianza Province", *6th Seminar on Urban Conservation - Measuring Heritage Conservation Performance*, Recife, Brazil, 142 - 148, (2011).
- Şenyurt, O., "1923-1960 / İzmit - Cumhuriyet'in tanıkları binalar ve kentten haberler", *TMMOB Mimarlar Odası Kocaeli Şubesi*, ISBN: 9944899968, İstanbul, (2010)
- Türkiye İstatistik Kurumu – Total energy consumption by sectors and usage areas, 2005 [online]. [Retrieved Date 2015-02-27] <http://www.tuik.gov.tr/>
- Türkiye İstatistik Kurumu – Education Statistics, 1997-2014 [online]. [Retrieved Date: 2015-06-12]. <http://www.tuik.gov.tr/>
- V. Pracchi and Rosina, E., "Protecting historical buildings doesn't mean only to respect their appearance", *3rd European Workshop and training day on cultural heritage EWCHP*, Bolzano/Bozan, Italy, 211-217, (2013).
- Kishalı, E. and Bayraktar, N. T., "Evaluation of the studies for assessment of earthquake damages on historical monumental structures by non-destructive tests", *5th International Earthquake Symposium*, Kocaeli, 127 – 135, (2015).
- Binda, L., Saisi, A. and Tiraboschi, C. "Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries", *Construction and Building Materials*, 14: 199 – 233, (2000).
- Ramos L.F., Marquesa L., Lourenço P.B., De Roeckb G., Campos-Costac A. and Roqued J., "Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24: 1291-1305, (2010).
- ASHRAE 2005 (SI Edition), "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Handbook Fundamentals SI Edition, F08- Thermal Comfort", (2005).
- Haddad, S., King, S, Osmond, P. and Heidari, S., "Questionnaire design to determine children's thermal sensation, preference and acceptability in the classroom", *PLEA2012 - 28th Conference, opportunities, limits & needs towards an environmentally responsible architecture Lima*, Perú, (2012).
- Tuncer, K., "Isıl Konforun Fanger Yöntemiyle İncelenmesi", *M.Sc. thesis*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi University, Ankara, (2006).
- Yılmaz, Z. and Oral, G.K., "Yapı kabuğu ısı yalıtım değerinin yapı formuna bağlı olarak belirlenmesi için bir yöntem önerisi", *Yapıda Yalıtım Konferansı*, İstanbul, 153-163, (1999).
- T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü – Weather Centre –Weather: Average Conditions, 1970-2011- Kocaeli.
- Kwok, A.G. and Chun, C., "Thermal Comfort in Japanese Schools", *Solar Energy*, 74: 245-252, (2003).
- Yaşar, Y., Pehlevan, A. and Altıntaş, E., "İlköğretim dersliklerinde termal konfor araştırması", *8th Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 199-208, (2007).
- Buratti, C. and Ricciardi, P., "Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: Correlation between experimental data and mathematical models", *Building and Environment*, 44: 674-687, (2009).
- Ogoli, D. M., "Thermal comfort in a naturally-ventilated educational building", *ARCC Spring Research Conference*, Eugene, Oregon, 19 – 26, (2007).

Betonda Atık Mermer Tozu Kullanımının Karbonatlaşmaya Etkisi

(Bu çalışma 2. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu(ISBS2015)'nda sözlü bildiri olarak sunulmuştur.)

Salih YAZICIOĞLU^{1*}, Cuma KARA²

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

² Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar MYO, İnşaat Bölümü, Artvin, Türkiye

(Geliş/Received : 187.08.2016 ; Kabul/Accepted : 03.10.2016)

ÖZ

Son yıllarda çevre kirliliğinin azaltılabilmesi amacıyla atık malzemelerin inşaat sektöründe değerlendirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Atık malzemelerin yeniden kullanılabilirliği sınırlı olan doğal kaynakların kullanımını azaltmakta ve atıkların depolanması sorununu da ortadan kaldırmaktadır. Mermer ocakları ve mermer işleme tesislerinde de her yıl tonlarca mermer tozu atığı ortaya çıkmaktadır. Atık mermer tozunun kullanılabilir olduğu sektörlerden biri de hazır beton sektörüdür.

Bu çalışma da atık mermer tozu kullanımının betonun sürdürülebilirlik ölçütlerinden biri olan dayanıklılığını nasıl etkilediği karbonatlaşma faktörü açısından araştırılmıştır. Farklı oranlarda çimento ile ikame edilmiş atık mermer tozu (MT) katkılı betonların karbonatlaşma derinliklerinin belirlenmesi amaç edinilmiştir. Bu amaca yönelik olarak; % 0, % 5, % 10 ve % 15 MT çimento ile ikameli olmak üzere çökme miktarları aynı olan 4 farklı C30 sınıfı beton karışımı hazırlanmıştır. 28 gün standart kür uygulanan örnekler, 56 gün boyunca karbonatlaşmaya maruz bırakılmış ve karbonatlaşma derinlikleri ölçülmüştür. Karbonatlaşmamış ve karbonatlaşmış numuneler üzerinde ultrasonik test cihazı ile ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılmış, kapilerite katsayıları, aşınma ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Sonuç olarak, karbonatlaşma en çok % 15 MT içeren örneklerde görülmüş olup, karbonatlaşma deneyi sonrası MT miktarı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin ve basınç dayanımının arttığı, aşınma dayanımı ve kapilerite katsayısının azaldığı elde edilen bulgular arasındadır. Ayrıca, çevre kirliliğinin azaltılması amacıyla MT'nun beton üretiminde en uygun ikame oranının % 5 olduğu, optimum MT kullanımının betonun sürdürülebilirliğini olumlu etkilediği kanaatine varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton, Atık Mermer Tozu, Dayanıklılık, Karbonatlaşma.

Effects Of Using Waste Marble Dust In Concrete To Carbonation

ABSTRACT

In recent years, for the purpose of reducing environmental pollution, studies about recycling waste material in construction sector has accelerated. Reusability of waste materials reduces using of limited natural resources and resolves the problem of storing waste materials. Every year, marble quarries and marble processing plants produces tons of waste marble dust. Ready mixed concrete industry is a branch of industry which waste marble dust is usable.

In this study, how using waste marble dust affects durability of concrete-which is one measure of sustainability is researched in carbonation factor. Determining carbonation depth of concrete-which blended waste marble dust (WMD) that substituted with cement at different rates-is taken as a goal. For this goal, four different concrete mix –with the same slump- substituted with 0%, 5%, 10% and 15% WMD is prepared. 28 days standard cured samples were exposed to carbonation for 56 days and their carbonation depths were measured. Samples which has become carbonated and not carbonated, tested with ultrasonic pulse velocity, and their capillary coefficient, compressive strength and abrasion resistance are determined. As a result, carbonation mostly seen in sample which contains 15% WMD. After the carbonation experiment, it's obtained that as WMD amount increases, carbonation depth and compressive strength increases; and it's also obtained that abrasion resistance and capillary coefficient decreases. Furthermore, on the purpose of reducing environmental pollution, it's reached that optimum substitution percent of WMD in concrete production is 5% and the optimum usage of WMD affects sustainability of concrete positively.

Keywords: Concrete, Waste Marble Dust, Durability, Carbonation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda atık olarak meydana çıkan malzemelerin yeniden kullanımı ve geri dönüşümü konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda atıklardan yeni ürünler elde edilmesi ve/veya bunların katkı maddesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Atıkların yeniden kullanımı veya geri dönüşümü; sınırlı olan doğal kaynakların kullanımını azaltarak, doğanın tahrip

edilmesini önlemekte, üretimde verimliliği arttırmakta ve atık depolanması sonucu oluşacak çevre problemlerini en aza indirmektedir [1].

Temel bir yapı malzemesi olan beton, doğası bakımından diğer yapı malzemelerinden ayrılır. Betonun bir bütün olarak doğası, bileşenlerinin özelliklerinin tek tek süperpozisyonu ile elde edilemez. Beton davranışlarının önemli bir bölümü, bu bileşenlerin arasındaki etkileşimler sonucu ortaya çıkmaktadır [2]. Betonun kalitesi, dayanıklılık ve dayanım olmak üzere iki temel kavram ile ifade edilmektedir. Dayanıklılık, betona tesir

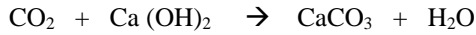
*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: syazicioglu@gazi.edu.tr

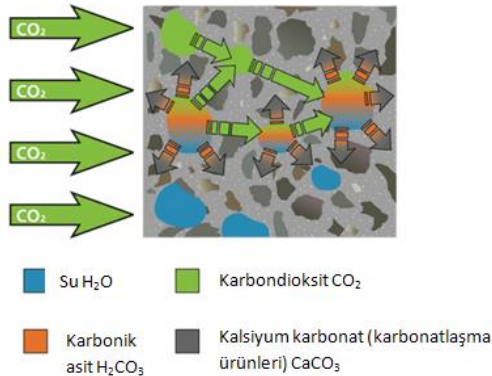
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 369-376

eden iç ve dış etkenlerle oluşan bozulma ile azalma göstermektedir. Bu bozulmalar fiziksel etkenler, mekanik etkenler, kimyasal ve biyolojik etkenler olarak literatürde yer almaktadır. Bu etkenler sonucunda, betonda çatlama, dökülme, kapak atma, dayanım ve rijitlik kaybı, deformasyon meydana gelmektedir [3].

Beton dayanıklılığını etkileyen olaylardan biri de kimyasal etken olan karbonatlaşmadır. Bazı zararlı kimyasal maddeler içeren atmosfer ve su beton ve beton içindeki donatı için zararlı etkileri olan bir ortam oluşturmaktadır. Betonun geçirgenliği ile beraber karbondioksit, yumuşak ve asitlik oranı yüksek sular, klorürlü sular, sülfatlı sular ve deniz suları tehlike oluşturmaktadır [4]. Atmosferde serbest durumda bulunan karbondioksitin nemli ortamlarda, betonda bulunan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmesi sonucu beton içerisinde CaCO_3 ortaya çıkmakta “karbonatlaşma” adı verilen olay meydana gelmektedir [5,6]. Karbondioksit ve kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyon kimyasal olarak;



formülü ile ifade edilmektedir. Karbonatlaşma sürecinin şematik gösterimi Şekil 1’de görülmektedir [7].



Şekil 1. Karbonatlaşmanın şematik gösterimi (Schematic presentation of carbonation)

Beton karbonatlaşması, betonun geçirgenliği ve ortamdaki nem durumuna bağlıdır. Yapılan araştırmalarla karbonatlaşma oluşumuna etki eden faktörler;

- Boşluk suyu
- Bağıl nem
- Beton sınıfı
- Beton geçirgenliği
- Betonun korumalı olup olmadığı
- Zaman

olarak belirlenmiştir [8].

Karbonatlaşma olayının meydana gelmesi için ortamda bulunan bağıl nem miktarı önemlidir. Beton gözeneklerinde karbonatlaşma % 40 - % 90 arası bağıl nemde meydana gelmektedir. Bağıl nem % 90’un üzerinde olduğunda, gözeneklere karbondioksit girmesi

mümkün değildir. Bağıl nem % 40’ın altında olduğunda ise karbondioksit su içinde çözülmez. Bunun nedeni gaz halindeki karbondioksitin doğrudan karbonatlaşma reaksiyonuna girememesidir. Bazı kaynaklarda ise “bağıl nem oranı % 25’ten küçük ise karbondioksitin karbonik asit haline geçmesi için beton içindeki su yeterli olmaz” şeklinde ifadeler yer verildiği görülmüştür [9].

Şimşek ve Baharavar (2014), %1 oranında çelik lifli ve %0, %10, %20 ve %30 oranlarında çimento ikameli uçucu küllü betonlar ürettikleri çalışmalarında 28 ve 90 günlük numuneleri sodyum dikromat tuzu kullanılarak yaklaşık ± 5 sabit nemde ve 20 ± 2 °C , %1 CO_2 ortamlı kapalı tankta karbonatlaşma etkisine maruz bırakmıştır. Çelik lifin % 1 kullanıldığı karışımlarda karbonatlaşma lifsiz betonlara göre azalma göstermiştir. Bu durum çelik lif ilavesi ile betonların daha az su emmesine bağlanmıştır. Sonuç olarak, uçucu kül ve çelik lif kullanımının karbonatlaşmaya olumlu etki sağladığını belirlemişlerdir [10].

Betonun karbonatlaşma derinliğine kür etkisinin incelendiği bir çalışmada, betonun yaşı ve su/çimento oranı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin arttığı, su içindeki ilk kür süresinin karbonatlaşma için kritik olduğu belirlenmiştir. Su kürü yapılmış ve havada kür edilmiş örnekler arasında karbonatlaşma derinliği açısından büyük fark olduğu, ama bu farkın zamanla azaldığı elde edilen bulgular arasındadır. Havada kür edilmiş örneklerin karbonatlaşma derinliğinin daha fazla olduğu görülmüştür [11].

Küresel iklim değişikliğinin betonarme yapılarda karbonatlaşmadan kaynaklanan korozyonu ve uzun vadede karbonatlaşma derinliğini daha fazla arttıracakları düşünülmektedir. Talukdar ve ark.’a göre, iklim değişikliği 2000’li yıllarda inşa edilen beton yapıların dayanıklılığını çok etkilemese de, yaklaşık 30 yıl sonra gerçek etkileri ortaya çıkacaktır açıklamasını yapmışlardır [12].

Yüksek miktarda çimento içeren betonların, düşük çimento içeren betonlara göre daha az karbonatlaşma meydana geldiği bilinmektedir. Karbonatlaşma olayı ile betonun boşluk miktarı birbiriyle ilişkilidir. Su/çimento oranı arttıkça boşluk artmakta ve geçirimsizlik miktarı yükselmektedir. Bu durum karbonatlaşma miktarının artmasına yol açar. Beton kür edilmesi de boşluk miktarını dolayısıyla karbonatlaşma miktarını etkilemektedir. Uzun süre su kürü yapılmış betonlarda hidratasyon ürünleri boşlukları tıkar böylelikle daha az karbonatlaşma oluşur [13, 14].

Mermer ocakları ve mermer işleme tesislerinde her yıl tonlarca mermer tozu atığı ortaya çıkmakta, bu atıkların değerlendirilmesi çevre kirliliğinin önlenmesi açısından önem taşımaktadır. Mermer tozu (MT)’nin kullanılabilir olduğu sektörlerden biri de hazır beton sektörüdür. MT’nin gerek ince agrega, gerekse çimento yerine ikame edilerek kullanılabilirliği, dayanım ve dayanıklılığı ile ilgili araştırmalar geçmişten günümüze halen sürmektedir. Ancak Türkiye’de betonda MT kullanımı ve karbonatlaşma ilişkisi üzerine yapılmış

deneysel bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın amacı farklı oranlarda mermer tozu ikame edilerek üretilmiş betonlarda karbonatlaşma sonucu meydana gelen fiziksel ve mekanik değişimleri belirlemektir.

2. MALZEMELER VE METOD (MATERIALS AND METHOD)

2.1. Malzemeler (Materials)

Yapılan çalışmada; Limak Ankara çimento fabrikası ürünü olan CEM I 42,5 R çimentosu, Kırşehir yöresi kırmataş agregası, süper akışkanlaştırıcı (SA), atık MT ve şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

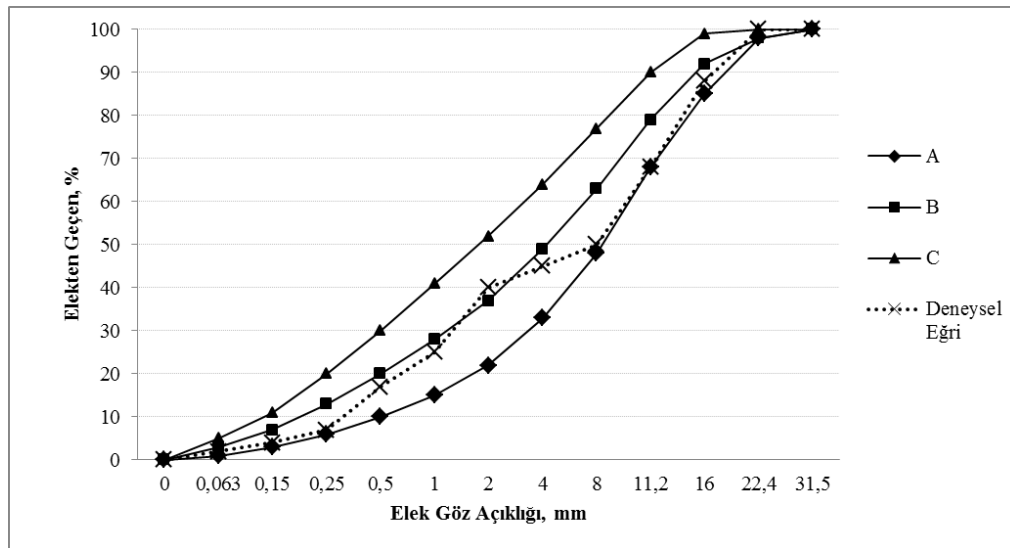
Kırmataş agregalara ait tane dağılımı TS 706 EN 12620+A1 ve TS 706 EN 933-1 standardında belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [16, 17]. Granülometri eğrisi Şekil 2’de görülmektedir.

İri ve ince agreganın birim hacim ağırlıkları TS EN 1097-6 standardında belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [18]. Agregaların fiziksel özellikleri Çizelge 2’te verilmiştir.

Çizelge 2. Agregaların fiziksel özellikleri (Physical properties of aggregate)

Fiziksel özellik	Agrega gurubu	Deney sonucu
Tane Yoğunluğu (g/cm ³)	0-4	2,63
	4-11	2,65
	11-22	2,69
Su Emme Oranı (%)	0-4	1,43
	4-11	0,70
	11-22	0,41

Karışımında kullanılan atık MT Kırşehir Kaman’da bulunan ARP granit ve mermer işletmesine ait çökelti havuzundan çamur halinde temin edilmiştir. MT etüvde 100±5°C’de kurutulmuştur. Tane yoğunluğu 2,73 g/cm³ olan MT 0,125 mm’lik elekten elenmiş ve elekten geçen



Şekil 2. Deneysel Granülometri eğrisi (Experimental Granulometry Curve)

Çizelge 1. CEM I 42,5 R kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (Chemical, physical and mechanical properties of cement) [15]

Analiz	Oksit	Değer	Analiz	Deneysel	Değer	
Kimyasal (%)	CaO	63,50	Fiziksel	Özgül yüzey, cm ² /g	3320	
	Al ₂ O ₃	5,35		Hacim Genleşme, mm	1,2	
	Fe ₂ O ₃	3,30		Su ihtiyacı, gr	28,5	
	SiO ₂	20,41		Yoğunluk, g/cm ³	3,12	
	SO ₃	2,93		Priz baş. sür., dak	163	
	MgO	1,65		Priz bit. sür., dak.	240	
	Na ₂ O	0,15		Mekanik	Gün	MPa
	Cl	0,011			2. gün	28,2
	K ₂	0,71			7. gün	42,7
	HCl	0,28			28. gün	51,4

malzeme kullanılmıştır.

Çizelge 3. MT’ye ait kimyasal özellikler (Chemical properties of marble dust)

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
MT	39,40	15,20	7,65	34,20	0,65

Katkı maddesi olarak kullanılan Polikarboksilik Eter Esaslı süper akışkanlaştırıcı (SA)’dır. Katkı maddesinin bazı özellikleri Çizelge 4’te verilmiştir [19].

Çizelge 4. SA katkı maddesinin bazı özellikleri (Some properties of superplasticizer)

Malzeme yapısı	Analiz değerleri
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,082-1,142 kg/litre
Klor içeriği % TS EN 480-10	< 0,1
Alkali içeriği % TS EN 480-12	< 3

2.2. Metod (Method)

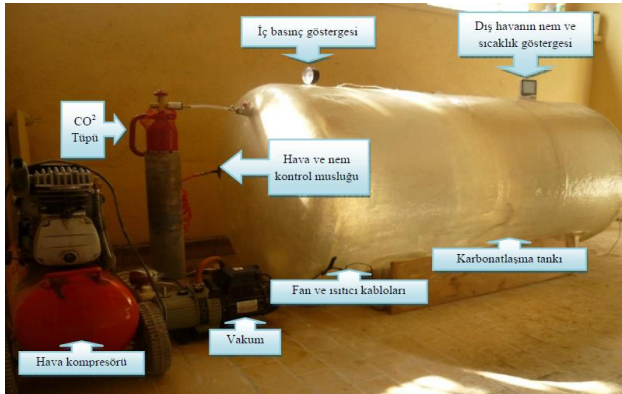
Betonların karışım hesabı TS 802 ve TS EN 206-1 standartlarına uygun olarak belirlenmiştir [20, 21]. Farklı oranlarda MT çimento ile ikame edilmiştir. Referans (% 0 MT), % 5 MT, % 10 MT, % 15 MT olmak üzere C30 sınıfı toplam 4 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Her bir tür için beton karışımına giren 1 m³'lük malzeme miktarları Çizelge 5'da verilmiştir.

- **Çizelge 5.** 1 m³ beton karışımına giren malzeme miktarları (The amount of material in 1 m³ of concrete mix)

Malzemeler	Referans % 0 MT	% 5 MT	% 10 MT	% 15 MT
Çimento (kg)	340	323	306	289
MT (kg)	-	17	34	51
Su (lt)	195	196	175	182,5
SA (kg)	3,4	3,4	3,4	3,4
Agrega (kg)	0-4	750	750	750
	4-11	825	825	825
	11-22	300	300	300
SLAMP, cm	8	8,5	8,3	8,5

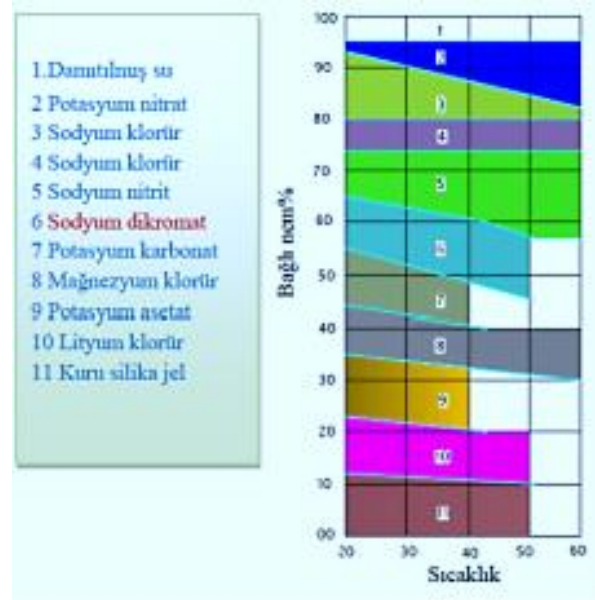
Karışım için gerekli malzemelerin hepsi laboratuvar tipi beton mikserinde sabit hızla karıştırılmıştır [22]. TS EN 12350-2 standardına göre taze betonun çökme miktarı belirlenmiştir [23]. Taze beton karışımı 100x100x400 mm boyutlarında prizmatik ve 100x100x100 mm boyutlarındaki küp kalıplara dökülmüştür.

Kür havuzunda 28 gün bekleyen prizmatik beton örnekleri 14 gün süre ile laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Bekleme sonrası, beton örnekleri karbonatlaşma uygulamasının yapılması için tank içine yerleştirilmiştir. Karbonatlaşma tankı düzeneği Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Karbonatlaşma tank düzeneği (Carbonation tank)

Yapılan araştırmalara göre en fazla karbonatlaşmanın olduğu nem miktarı %50 -%70 arasında olduğu zamandır [24]. Nem ortamı oluşturmak amacıyla farklı sıcaklıklarda kullanılacak tuzlara ilişkin sayısal değerler (Şekil 4) araştırılmış ve bu çalışmada karbonatlaşma olayının meydana gelmesi için 20 °C sıcaklıkta % 55 nem için sodyum dikromat seçilmiştir.

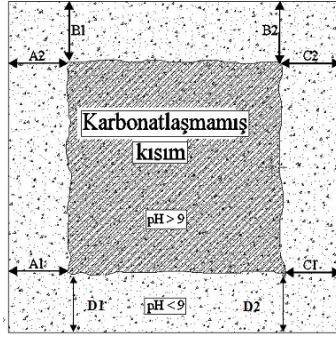


Şekil 4. Değişik tuzların nem sağlama miktarları (Amounts of moisture supplied by different salts) [25].

Sodyum dikromatın doymuş çözeltisi tank içerisindeki kaba bırakılmış ve deney süresince suyun sıcaklığı 20 °C'de tutulmuştur. Tankın içindeki CO₂ miktarını % 1 olarak ayarlanmıştır. İç basınç göstergesinden okuma yapılarak CO₂ gazı tank içine kontrollü bir şekilde verilmiştir.

2.2.1. Sertleşmiş beton deneyleri (Hardened concrete tests)

Karbonatlaşma uygulanmış ve uygulanmamış örnekler üzerinde eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme, basınç dayanımı ve aşınma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. TS EN 12390-5 standardı esas alınarak eğilme dayanımı testi gerçekleştirilmiştir [26]. Eğilme dayanımı testi sonucunda 100x100x400 mm boyutlarındaki üç adet prizmatik beton örnekleri iki parçaya ayrılmıştır. Her bir beton karışım türü için 3 adet prizmatik örneğin kırılmasıyla oluşan toplam altı yüzeye fenolftalein çözeltisi sıkılarak, karbonatlaşma derinliği ölçülmüştür. Beton numuneleri üzerinde renk değiştirmeyen kısımların derinlikleri ölçülerek ortalama karbonatlaşma derinliği (KD) hesaplanmıştır (Şekil 5) [27]. Karbonatlaşma derinliği BS EN 13293-2004 standardına uygun olarak ölçülmüştür [28].



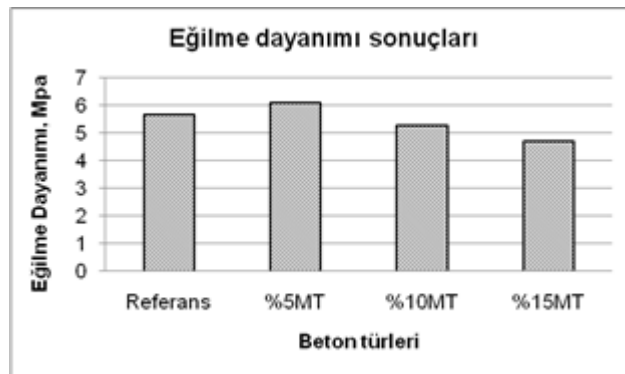
Şekil 5. Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi (Determination of the depth of carbonation)

$$KD = \frac{A1+A2+B1+B2+C1+C2+D1+D2}{8} \quad (1)$$

Ultras ses geçiş hızı tayini deneyi ASTM C 597 standardına göre yapılmıştır [29]. TS EN 772-11 standardına uygun olarak farklı karışımlara ait karbonatlaşma uygulanmış ve karbonatlaşma uygulanmamış 100x100x100 mm boyutlarındaki küp örnekler üzerinde kapiler su emme deneyi yapılmıştır [30]. Karbonatlaşma uygulanmış ve karbonatlaşma uygulanmamış küp örnekler üzerinde aşınma dayanımı deneyleri ASTM C 944-99 standardında belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [31]. Basınç dayanımı deneylerinde TS EN 12390-3 standardı esas alınmıştır [32].

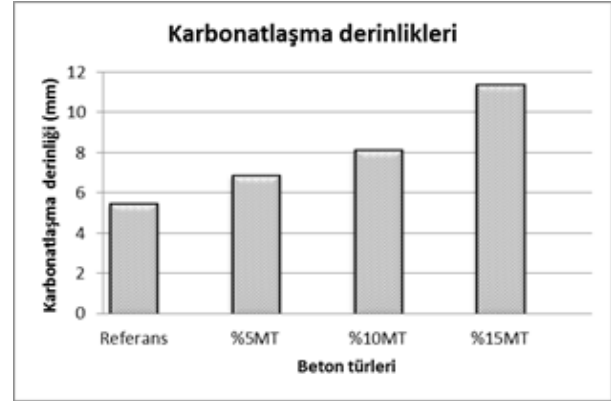
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Karbonatlaşmaya maruz bırakılan prizma şeklindeki beton örneklerine ait eğilme dayanımı sonuçları Şekil 6'da görülmektedir. Karbonatlaşma uygulanmış örnekler arasında en yüksek eğilme dayanımı değeri %5 MT karışimli beton örneklerinde, en düşük eğilme dayanımı ise %15 MT karışimli beton örneklerinde görülmektedir. MT miktarı arttıkça eğilme dayanımının düştüğü belirlenmiştir.

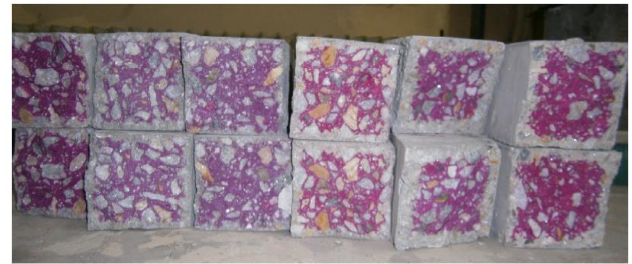


Şekil 6. Karbonatlaşma uygulaması yapılmış beton örneklerinde eğilme dayanımı (Bending strength of concrete samples subjected to carbonation application)

Dört farklı karışıma ait betonların karbonatlaşma derinliklerine ilişkin sayısal veriler Şekil 7'de görülmektedir. En yüksek karbonatlaşma derinliğinin % 15 MT karışımına ait beton örneklerinde olduğu, en düşük karbonatlaşma derinliğinin ise % 5 MT karışım örneklerinde olduğu belirlenmiştir. MT oranı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin arttığı görülmektedir (Şekil 8). Çalışmada kullanılan MT %34,20 oranında CaO içermektedir. MT kullanımı ile beton bünyesinde bulunan Ca(OH)₂ artmış ve karbonatlaşma olayı daha fazla meydana gelmiştir.

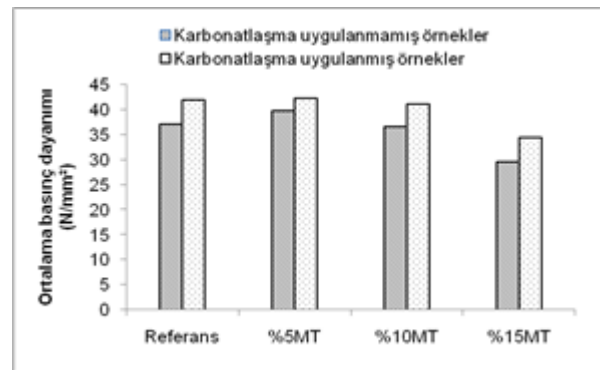


Şekil 7. Beton karışımlarına ait karbonatlaşma derinlikleri (Carbonation depths of concrete mixtures)



Şekil 8. Karbonatlaşma deneyi uygulanmış örnekler (Samples that are applied Carbonation test)

Farklı oranlarda MT kullanılarak üretilen beton karışımlarının ortalama basınç dayanımları Şekil 9'da görülmektedir

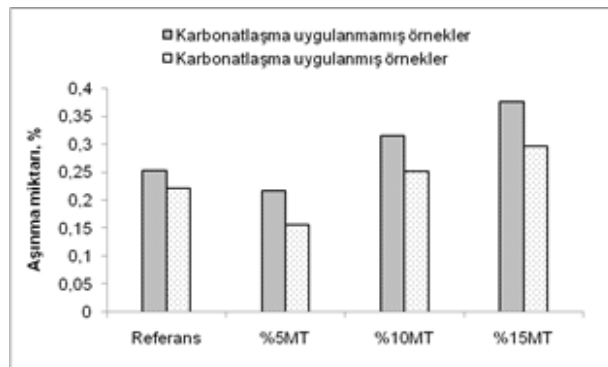


Şekil 9. Beton karışımlarına ait ortalama basınç dayanımı değerleri (Mean values of compressive strength of concrete mixtures)

Beton örnekleri arasında en yüksek basınç dayanımı değeri % 5 MT katkıli karışımına, en düşük basınç dayanım değeri ise % 15 MT karışımına aittir. Karışımlarda MT ikame miktarının artmasıyla basınç dayanımlarının düştüğü, karbonatlaşma sonucu ise basınç dayanımlarının bir miktar arttığı belirlenmiştir.

Betonda karbonatlaşma reaksiyonunun ürünü olan CaCO_3 'ün ortaya çıkmasıyla karbonatlaşan kısımlarda yoğunluk artışı gerçekleşmiş ve yüzeydeki bu yoğunluk artışı dayanımda az da olsa artış ile kendini hissettirmiştir. Bu durum literatür ile de uyumludur. Erdoğan karbonatlaşma olayı sonucunda serbest kalan suyun, çimentonun hidratasyonuna yardımcı olarak dayanımda bir miktar artış meydana getirebileceğini belirtmiştir [33].

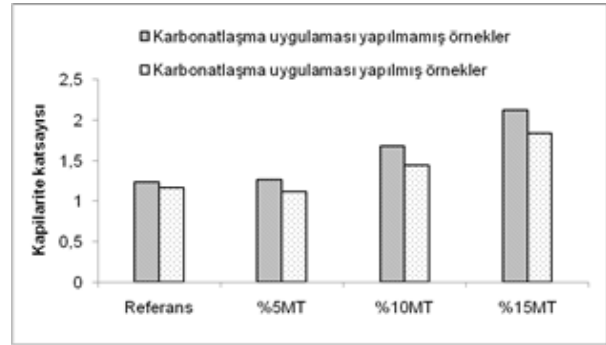
Farklı karışımlara ait betonların aşınma deneyinden elde edilen aşınma miktarları kullanılarak, aşınma oranları hesaplanmıştır (Şekil 10). En yüksek aşınma gösteren beton örnekleri % 15 MT karışımına, en düşük aşınma miktarı ise Referans (% 0 MT) karışımına aittir. MT içeren karışımların aşınma miktarları arasında en düşük değer % 5 MT'ye ait olduğu görülmektedir. Karbonatlaşma olayı beton örneklerinde aşınma miktarının azalmasını sağladığı görülmüştür.



Şekil 10. Karışımlara ait aşınma miktarları (Abrasion amounts of concretes)

Karbonatlaşmanın beton yüzeyinde sertleşmeyi arttırdığıda bilinmektedir. Aşınma miktarının karbonatlaşma uygulaması yapılmış olan örneklerde daha düşük çıkması beklenen bir sonuç olmuştur.

Karbonatlaşmaya maruz bırakılmış ve karbonatlaşma uygulaması yapılmamış örneklerin kapiler su emme değerleri Şekil 11'de görülmektedir.

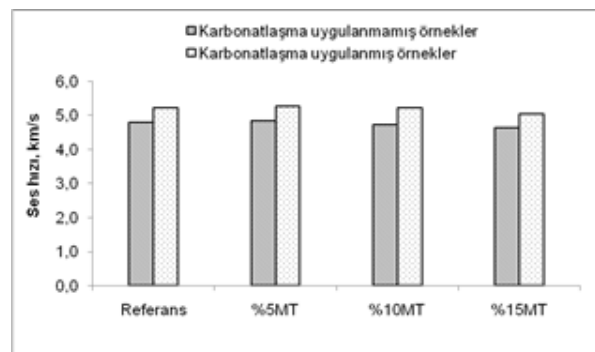


Şekil 11. Karbonatlaşma uygulaması yapılmamış örneklerin kapilarite katsayısı (The capillarity coefficient of samples without carbonation application)

En yüksek kapilarite katsayısı % 15 MT karışımına aitken, en düşük değer % 5 MT karışımına aittir. MT miktarı arttıkça kapilarite katsayısının arttığı karbonatlaşma sonrasında ise kapilarite katsayılarının azaldığı görülmüştür. % 5 MT içeren örneğin kapilarite katsayısı Referansa (% 0 MT) göre daha düşüktür.

Kalsiyum karbonat bileşimi geçirgenliği azaltmakta, daha küçük kapiler bağlantılı gözenekler arasındaki bağlantıları tıkamaktadır [4]. Karbonatlaşmaya maruz bırakılmış örneklerin kapilarite katsayılarının karbonatlaşmamış örneklere göre daha düşük çıkması beklenen bir durumdur. Karbonatlaşma sonucu meydana gelen CaCO_3 kristalleri, çimento hamurundaki boşlukların içine yerleştiği için nispeten daha geçirimsiz bir beton meydana gelmiştir [33].

Literatürde karbonatlaşma ve ses hızı ilişkisi hakkında bir bilgiye rastlanmamıştır. Ancak ses hızı ve beton basınç dayanımının birbiriyle paralellik gösterdiği bilinmektedir. Karbonatlaşma uygulanmış örneklerin basınç dayanımlarında meydana gelen artış, ses hızı değerlerinde de kendini göstermiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Beton karışımlarına ait ortalama ses hızı değerleri (Average sound velocity values for concrete mixtures)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND)

Farklı oranlarda MT kullanılarak üretilmiş beton karışımları ile yapılan çalışmada karbonatlaşma uygulanmamış ve karbonatlaşma uygulanmış örnekler incelendiğinde:

- Karbonatlaşma derinliğinin en çok % 15 MT içeren örneklerde olduğu, en az derinliğin ise % 5 MT içeren örneklerde meydana geldiği bulgusu elde edilmiştir
- MT miktarı arttıkça basınç ve eğilme dayanımlarının azaldığı belirlenmiştir. En yüksek basınç ve eğilme dayanımının % 5 MT içeren örnekler için olduğu, en düşük basınç ve eğilme dayanımının ise % 15 MT içeren örnekler için olduğu görülmüştür. Basınç ve eğilme dayanımı düştükçe karbonatlaşma derinliğinin arttığı belirlenmiştir. Karbonatlaşma öncesi ve sonrası basınç dayanımlarının değişimleri bakımından incelendiğinde, bir miktar karbonatlaşma sonrası dayanımlarının arttığı görülmektedir. Betonda karbonatlaşma reaksiyonunun ürünü olan CaCO_3 'ün ortaya çıkmasıyla karbonatlaşan kısımlarda yoğunluk artışı gerçekleşmiş ve yüzeydeki bu yoğunluk artışı dayanımda az da olsa artış ile kendini hissettirmiştir. Bu durum literatür ile de uyumludur. Erdoğan karbonatlaşma olayı sonucunda serbest kalan suyun, çimentonun hidrasyonuna yardımcı olarak dayanımda bir miktar artış meydana getirebileceğini belirtmiştir [33].
- MT miktarı arttıkça aşınma miktarının arttığı görülmüştür. Aşınma miktarının en fazla % 15 MT içeren karışım olduğu, aşınma miktarının en az olduğu örnek ise % 5 MT içeren karışım olduğu belirlenmiştir. Karbonatlaşma uygulaması yapılmamış ve yapılmış örneklerin aşınma miktarları karşılaştırılmalı olarak incelendiğinde, tüm beton karışımlarında karbonatlaşma uygulamasının ortalama aşınma miktarı değerlerini düşürdüğü böylelikle karbonatlaşmanın aşınma dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Karbonatlaşmanın beton yüzeyinde sertleşmeyi arttırdığıda bilinmektedir. Aşınma miktarının karbonatlaşma uygulaması yapılmış olan örneklerde daha düşük çıkması beklenen bir sonuç olmuştur.
- En yüksek ultrases hızı değerinin % 5 MT karışımında, en düşük ultrases hızı değerinin % 15 MT karışımına ait olduğu saptanmıştır. Karbonatlaşma uygulanmış örneklerde ultrases hızı değerleri artış göstermiştir.
- Kapiler su emme incelendiğinde, dayanım değerleriyle ilişkili olarak en düşük kapilarite katsayısının % 5 MT içeren örnekler için olduğu, en yüksek kapilarite katsayısının diğer özelliklerle ilişkili olarak, % 15 MT içeren karışıma ait olduğu belirlenmiştir. Kalsiyum karbonat bileşimi geçirgenliği azaltmakta, daha küçük kapiler bağlantılı gözenekler arasındaki bağlantıları tıkamaktadır [4]. Karbonatlaşmaya maruz bırakılmış örneklerin kapilarite katsayılarının karbonatlaşmamış

örnekler için daha düşük çıkması beklenen bir durumdur. Karbonatlaşma sonucu meydana gelen CaCO_3 kristalleri, çimento hamurundaki boşlukların içine yerleştiği için nispeten daha geçirimsiz bir beton meydana gelmiştir [33].

- Beton türlerinde MT miktarı arttıkça karbonatlaşma derinliği artmıştır. Bu durumun MT bünyesinde bulunan CaO 'den kaynaklandığı düşünülmektedir. MT ile üretilen beton örneklerinde Ca(OH)_2 miktarı referans betona göre fazla olup, karbonatlaşma olayı daha fazla meydana gelmiştir.

Sonuç olarak farklı oranlarda MT içeren beton örneklerinde karbonatlaşma sonucu; ultrases hızı değerlerinin arttığı, kapilarite katsayılarının ve aşınma miktarlarının düştüğü, basınç ve eğilme dayanımlarının arttığı görülmüştür. Ayrıca, çevre kirliliğinin azaltılması amacıyla MT'nun beton üretiminde en uygun ikame oranının % 5 olduğu, optimum MT kullanımının betonun sürdürülebilirliğini olumlu etkilediği kanaatine varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Şahin, M. ve Tanyıldızı, H., "Vişne Çürüğü Mermer Tozu Katkılı Betonun Basınç Dayanımına Donma Çözülme Etkisinin Belirlenmesi", *Hazır Beton Kongresi*, İstanbul, (2011).
- [2] Şimşek, O., "Beton ve Beton Teknolojisi", *Seçkin yayıncılık*, Ankara153: 113-119, Ankara, (2009).
- [3] Baradan, B. ve Aydın, S., "Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık)" *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi*, İstanbul 265-288, (2013).
- [4] Massazza, F., "Betonun Dayanımı ve Yapıların Hizmet Ömrü: İki, Çözülebilir Sorun", *Hazır Beton Dergisi*, Aralık (2005).
- [5] Gönen, T. ve Yazıcıoğlu, S., "Farklı Nem Ortamlarındaki Betonlarda Karbonatlaşma Gelişimi", *F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2): 367-373, (2004).
- [6] Park, D. C., "Carbonation Of Concrete In Relation to CO_2 Permeability And Degradation Of Coatings", *Construction and Building Materials*, 22, 2260-2268, (2008).
- [7] İnternet : <http://carboncure.com/2012/06/concrete-carbonation/> (2013).
- [8] Newman, J., Choo, B. S., "Advanced Concrete Tecnology Concrete Properties", ISBN: 07506-5104-0, 8/17, (2003).
- [9] Yalçın, H., Gürü, M., "Çimento ve Beton", *Palme Yayıncılık*, ISBN: 9944-341-16-9, Ankara, 216 (2006).
- [10] Şimşek, O. Baharavar, S., "Karbonatlaşmanın Çelik Lifi Ve Uçucu Küllü Betonlarda Etkisi", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(1): (2014).
- [11] Lo, Y., Lee, H. M., "Curing Effects On Carbonation Of Concrete Using A Phenolphthalein Indicator And Fourier-Transform Infrared Spectroscopy", *Building and Environment*, 37, 507-514, (2002).
- [12] Talukdar, S., Banthia, N., "Carbonation In Concrete Infrastructure In The Context Of Global Climate Change: Development Of A Service Lifespan Model",

- Construction and Building Materials*, 40: 775–782, (2013).
- [13] Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., “Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, İzmir (2002).
- [14] Özgen, M. M., “Betonarme Yapılarda Bozulma Süreçleri Ve Beton Sınıfının Yapının Durabilitesine Ve Maliyetine Etkileri”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniv. Fen Bil. Ens., Mimarlık ABD, Ankara 74-75, (2006).
- [15] LİMAK Çimento Fabrikası, Çimento Analiz Raporu, (2014).
- [16] TS 706 EN 12620+A1, “Beton agregaları”, (2009).
- [17] TS 3530 EN 933-1, “Agrega tane büyüklüğü dağılımı”, (2007).
- [18] TS EN 1097-6, “Agregaların Mekanik Ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu Ve Su Emme Oranının Tayini”, (2002).
- [19] İnternet: BASF Yapı Kimyasalları, http://www.basfcc.az/az/mehsullar/BETON_QATKILARI/emtee_beton_qatkilari/glenium_128/Documents/glenium_128.pdf (2009).
- [20] TS 802, “Beton Karışımı Hesap Esasları”, (1985).
- [21] TS EN 206-1, “Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk”, (2002).
- [22] TS 1247, “Beton Yapım, Döküm Ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında)”, (1984).
- [23] TS EN 12350-2, “Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi”, (2002).
- [24] Gönen, T., Yazıcıoğlu, S., “Betonda Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi ve Aparatı”, *Politeknik Dergisi*, 8(2): 233-237, (2005).
- [25] Baharavar, S., “Karbonatlaşmanın Çelik Lifli ve Uçucu Küllü Betonarlarda Etkisi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. Yapı Eğitimi ABD (2012).
- [26] TS EN 12390-5, “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini”, (2002).
- [27] Yazıcıoğlu, S., Demirel, B., Gönen, T., Özer, Ş., “Farklı Tip Çimentoların Betonun Karbonatlaşmasına Etkisi”, *SDU International Technologic Science*, 4(3): 112-120, (2012).
- [28] BS EN 13293-2004, “Products And Systems For The Protection And Repair Of Concrete Structures-Test Methods-Determination Of Resistance To Carbonation”, (2004).
- [29] ASTM C 597-83, “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”, (2009).
- [30] TS EN 772-11, “Kâgir Birimler - Deney Metotları - Bölüm 11: Betondan, Yapay Ve Doğal Taştan Yapılmış Kâgir Birimlerde Kapiler Su Emme Ve Kil Kâgir Birimlerde İlk Su Emme Hızının Tayini”, (2002).
- [31] ASTM C 944-99, “Standard Test Method For Abrasion Resistance Of Concrete Or Mortar Surfaces By The Rotating-Cutter Method”, (1999).
- [32] TS EN 12390-3, “Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini”, (2003).
- [33] Erdoğan, T.Y., “Beton”, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını*, Ankara, 191: 502-518, (2007).

Experimental Investigation of the Effects of Electrodes on EDM Hole Drilling Process

Kürşad GÖV*

Gaziantep University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Aircraft and Aerospace Engineering Department, GAZİANTEP

(Received : 24.08.2016 ; Accepted : 19.10.2016)

ABSTRACT

In this experimental comparative study, holes were machined to the DIN 1.2379 die steel by using Electrical Discharge Hole Drilling (EDHD) method. The effect of the different electrode materials, channel type and machining current on EDHD performance was investigated. In the experiment, single and multi-channel brass and copper electrodes were used. The performance parameters were defined as machining speed (MS), electrode wear (EW), surface roughness (Ra) and white layer thickness (WLT). The experimental results reveal that the single-channel brass electrode has comparatively better MS and lower EW than the multi-channel brass and copper electrodes. Also, the surface quality and WLT of the single-channel brass electrode has the better values than the others.

Keywords: EDHD, Machining Speed, Electrode Wear, Surface Roughness, White Layer Thickness.

EEİ Delik Delme İşlemine Elektrot Etkilerinin Deneysel İncelenmesi

ÖZ

Bu kıyaslamalı deneysel çalışmada, elektro erozyonla delik delme (EEDD) yöntemi ile DIN 1.2379 kalıp çeliğine delikler delinmiştir. Farklı malzeme ve kanala sahip elektrotların ve elektrik akımının EEDD performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Pirinç ve bakır elektrotların tek ve çok kanallı tiplerinin kullanıldığı çalışmada, performans parametreleri olarak işleme hızı (İH), elektrot aşınması (EA), yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve beyaz katman tabakası kalınlığı (BKT) dikkate alınmıştır. Deneyler neticesinde, tek kanallı pirinç elektrotun çok kanallı pirinç ve bakır elektroda göre işleme hızının yüksek ve elektrot aşınmasının düşük olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca Ra ve BKT değerleri tek kanallı pirinç elektrot kullanıldığında diğer elektrotlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: EEDD, İşleme Hızı, Elektrot Aşınması, Yüzey Pürüzlülüğü, Beyaz Katman Tabakası.

1. INTRODUCTION

Electrical Discharge Machining (EDM) is one of the most important abrasion-free machining methods for manufacturing complex component shapes of hard, brittle and advanced materials. Hole EDM is recognized and accepted as the third method of ED machining along with sinker EDM and wire EDM. The hole EDM machine is given in Figure 1. Hole EDM is an improved method of utilizing EDM to drill small holes in conductive material at speeds that are typically faster than those achieved with conventional EDM [1]. The tubular electrode is held in either a special holder, chuck, or collet. The electrode is sealed by a grommet to assure that all the high pressure dielectric is forced through the hole centre. The spindle rotates to evenly distribute the wear on the electrode, assist in the removal of the debris, and assure that the hole is round. The electrode is guided by a guide assembly which is located in line with the spindle axis just above the top of the workpiece. This assures that the hole will be in the correct location. As the electrode enters and sparks into the workpiece, it is

surrounded by high pressure dielectric fluid emanating from the inner diameter of the tube. The high pressure dielectric fluid forces the debris out of the gap toward the top of the hole and also has the effect of stabilizing and self-centring the electrode in the hole (Figure 2). The rapid rotation of the electrode by the rotating spindle hole may also have a hydro-dynamic centring effect.

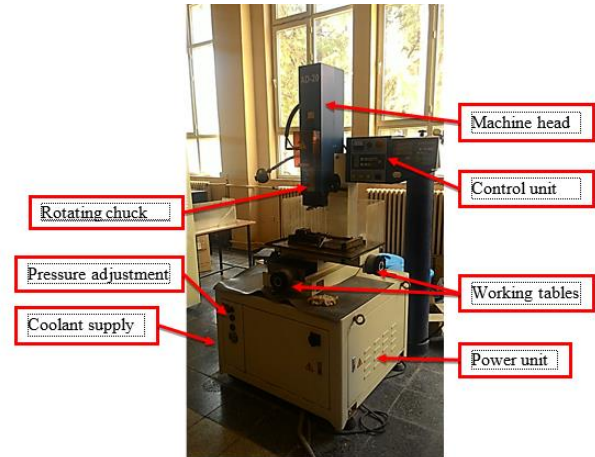


Figure 1. Hole EDM machine

*Corresponding Author

e-mail: gov@gantep.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 377-382

Although originally conceived as a method of economically producing small holes with large depth-to-diameter ratios, hole EDM is utilized in many industries where conventional drilling a small hole is normally difficult: Diesel fuel injection nozzles, fibre spinning nozzles, small draw dies, turbine blade cooling holes, silicon masks tool and wire EDM starting holes

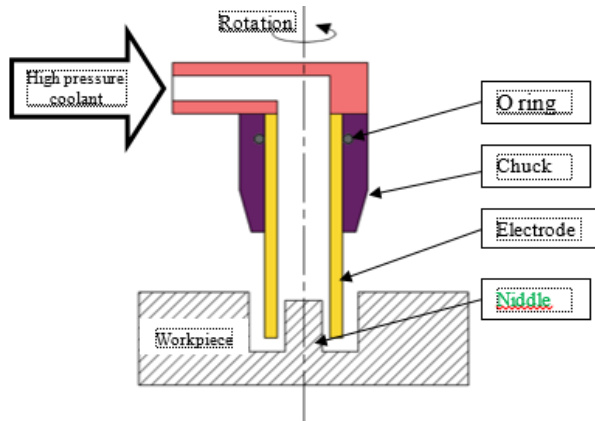


Figure 2. Schematic view of hole EDM process

The tool for hole EDM is the tubular electrode, the electrode material is usually dictated by either the requirements of the machine tool power supply or the workpiece. Hole EDM electrodes are usually made from two materials. Copper electrodes are also the tube of choice when burning carbide and some aerospace alloys. Most copper tubes are made from electrolytic copper. The majority of hole EDM process are designed to utilize brass electrodes for most applications. Brass electrodes made from yellow brass (Cu65:Zn35) and cartridge brass (Cu70:Zn30). Electrodes are available in a variety of configurations (Figure 3) single-channel electrodes are utilized in the majority of Hole EDM applications. Multi-channel electrodes are used in deep hole applications where the needle can cause problems or in blind hole applications where the remaining needle is not acceptable. There are various styles of multi-channel tubes based upon the number of flushing channels required and the construction used to create those channels.

Drilling small holes is one of the difficult machining processes; approximately 35% of all manufacturing time is spent to drill holes. Conventional drilling techniques cannot be employed to produce small in diameter holes on advanced materials as tool breakage/wear and slow machining speed cause imprecise hole sizes and improper surface characteristic. The performance of advanced parts such as combustion chambers and turbine blades directly related to the great number of very small in diameter holes for cooling of hot components [2].

Conventional cooling holes have diameter from 2 to 4 mm and have length to diameter ratio from 1 to 200 [3, 4]. Electrical discharge machining process takes away microchips from the workpiece surface by aid of a sequence of repetitive electrical flushing. The EDM process is accomplished by applying a sequence of distinct discharges between the workpiece and the electrode cooled by a coolant. By using hole-EDM process; injection mould cooling holes, fuel injectors, turbine blade holes and starting holes of wire-EDM are machined [5-7]. The main performance parameters of hole-EDM process are the machining speed, electrode wear, surface quality and the white layer thickness. In all EDM processes, white layer (recast layer) is generated. The workpiece profile, surface quality and the dimensional accuracy are directly related to the white layer characteristic [8]. Gov [4] reported that the effect of EDM parameters is more important than the effect of the other parameters on hole-EDM process. Yilmaz and Okka [9] investigated the single and multi-channel copper and brass electrodes in hole-EDM process for Inconel and Titanium alloys. They concluded that the brass electrodes have better material removal rate and electrode wear performance than copper electrodes. And also, they showed that the single-channel electrodes have better performance than the multi-channel electrodes. Though, the surface quality is better when using multi-channel brass electrode. Kuppan et al. reported that MRR is affected by duty factor, tool rotation and current, while current and pulse on time effect the surface quality [10]. Singh et al. [11] studied the effect of EDM parameters over performance parameters of sink-EDM and they concluded that taper angle, MRR, surface quality and

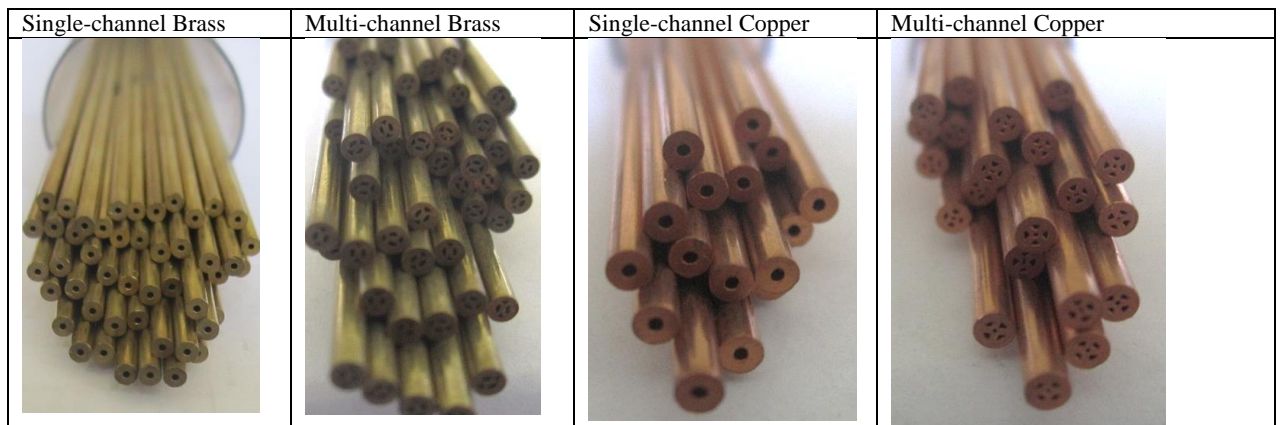


Figure 3. Electrode and channel types

increase whereas the pulse on-time and current were higher. In micro hole-EDM process, the effect of pulse energy on surface quality and workpiece geometry for blind holes was studied by Ekmekci et al. [12]. The effects of input parameters on the response parameters for example surface quality and average circularity of the drilled holes in nickel-based super alloy was studied by Yadav et al. [13]. Janmanee and Muttamara [14] studied the effect of EDM parameters on EWR, MRR and taper angle of AISI 431 martensitic stainless steel. The recast layer creation was much thinner by using oxygen-assisted hole-EDM machining process. Gov [15] investigated that the effects of the dissolved oxygen in the coolant on the hole-EDM performance parameters such as MR, EW, surface quality, over cut, taper and white layer thickness. The results showed that the increasing in the oxygen dissolution in the coolant, improving the performance parameters. The variations of machining performance outputs were studied with the EDM parameters for metallic powder mixed coolant in EDM by Çogun et al. [16] it is reported that the powder concentration and powder type in the coolant and the pulse-on time were current output parameters of EDM process. The powder mixed EDM was studied by Ekmekci et al. [17], the SiC powder mixed distilled water was used as coolant fluid. They concluded that the surface morphology extremely affected the powder as means of secondary discharges and particle migration from dielectric liquid. In this study, electro discharge hole drilling processes (EDHD) was applied to DIN 1.2379 tool steel by using single-channel and multi-channel brass electrodes and single-channel and multi-channel copper electrodes. The electro erosion parameters of arc on-time (T_{on}), arc off-time (T_{off}), and capacitance (C) kept constant and the effect of the current (I) and electrode materials and types on the performance parameters were examined. The performance parameters are chosen as machining speed (MS), electrode wear (EW), surface roughness value (R_a) and white layer thickness (WLT) of the workpiece surface.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

Experiments were performed by using JS-EDM AD-20 type hole electrical discharge machine which is available in Mechanical Engineering Department of Gaziantep University. The samples were cut by 10x10x40 mm from DIN 1.2379 die steel using wire electro discharge machine. Each face of the samples was ground by using 320 to 3000 size emery papers gradually and polished by using 1 μ m diamond suspension before drilling. 2 mm diameter single and multi-channel brass and copper electrodes were used for drilling the holes which were drilled on the centre of the matched polished faces vertically (Figure 4). The major electrode material properties are given in Table 1. Experiments were performed in 3 repetitions and the performance parameters were calculated by average of these three measurements. The EDM parameters; current, arc on-time, arc off-time, and capacitance were chosen as the

constant values which were proposed previous studies [4]. The list of the EDM parameters are given in Table 2.

Table 1. Electrode Properties

Electrode material	Copper	Brass
Melting point (°C)	1085	900-950
Thermal conductivity (W/m.°K)	390	160
Electrical resistivity (Ω .cm)	1.7	4.71
Specific heat capacity (J/g.°C)	0.385	0.380

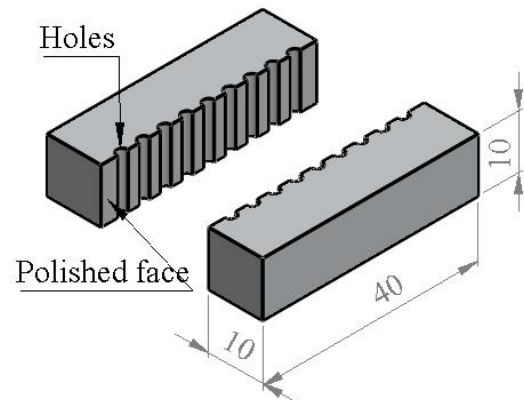


Figure 4. Perspective view of the specimen

Table 2. Experiment Parameters (Deney parametreleri)

Fixed parameters	Value
Time on, T_{on} (μ s)	30
Time off, T_{off} (μ s)	10
Capacitance C (μ F)	1422
Voltage (volt)	30
Electrode rotation (rpm)	200
Coolant pressure (bar)	100
Electrode polarity	Negative (-)
Variable parameters	
Electrode types	Single-ch. Brass, Single-ch. Copper, Multi-ch. Brass, Multi-ch. Copper
Current, I (Ampere)	10,11,12

In the hole EDM drilling process, spark intensity is concentrated on the tip of the electrode. This spark intensity causes high erosion at the tip of the electrode rather than root of the electrode. This high erosion causes the taper on the electrode tip. The electrode is initially flat and sharp edges. Overcut and white layer are created during the hole EDM drilling process due to the high level erosion. The eroded surfaces have the surface roughness related to the EDM parameters, the surface roughness value increased when the current increased [8].

2.1. Performance Parameters

EDM is defined as the high-energy sparks that occur between the workpiece and electrode cause material removal and evaporation. In EDM process, the machining speed is defined as the amount of material removal at unit time and the high machining speed is

proposed. In this study, the specimens were weighed before and after the experiments by using 0.1 mg sensitive Shimadzu AUX220 digital instrument. The machining time was measured by using digital stopwatch. And the machining speed was calculated as the weight loss of workpiece in machining time.

In EDM process, high temperature sparks provide the chip removal from the workpiece, at the same time these sparks erode the electrode. This erosion is known as electrode wear in EDM process. In EDM drilling process, machined geometry is directly related to the electrode wear, so the minimum electrode wear gives better geometric performance on workpiece. The electrode wear was defined as the weight loss of electrode during the machining time in the study.

In EDM drilling process, the average surface roughness value (R_a) is related to the electrical parameters of the EDM. In the present study, the EDM electrical parameters were taken as constant. The surface roughness value (R_a) was measured by using Mitutoyo SJ 401 stylus type surface roughness measuring machine. Measures were performed according to the standard tables as the cut-off length 0.8 and sampling length 4 mm. The surface roughness value was taken as the average of the 3 measurements of each hole.

In all types of EDM processes, white layer is generated, related to the high electrical discharge that is caused by the high temperature generation and sudden cooling between the workpiece and electrode. This white layer has the very hard and brittle properties. Thermal stresses are generated in the white layer and it causes the micro cracks which lays from white layer to main material [18]. These micro cracks tend to develop from the white layer to main material and they decrease the fatigue strength and service life of the part [18]. In this experimental study, the cross section images were taken by Scanning Electron Microscope (SEM) and the white layer thickness were measured by using these images.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

3.1. Machining Speed

In the study, four types of tubular electrodes were used. The effects of electrodes on machining speed for DIN 1.2379 die steel are presented in Figure 5. When machining speed is considered according to the current, the MS is decreased as the current increased for all electrode types. The better MS was obtained at 10 A current value for DIN 1.2379 die steel. When MS compared to the electrode types, brass electrode has the best machining speed than the copper for all current levels. And the single-channel electrodes performed better machining speed compared to the multi-channel electrode types. The lower machining speed of the copper electrode can be explained due to the thermal conductivity difference between the brass and copper electrodes. Lower thermal conductivity decreased the heat energy absorption for the brass electrode. Thus the material removed from the workpiece due to the higher

heat is employed to the workpiece [19]. Single-channel electrodes performed better machining speed due to the higher coolant flow rate. High coolant flow increased the cooling effect, pulverization of the bubbles and material removal rate from the surface. Thus, the single-channel electrode has higher machining speed than the multi-channel one.

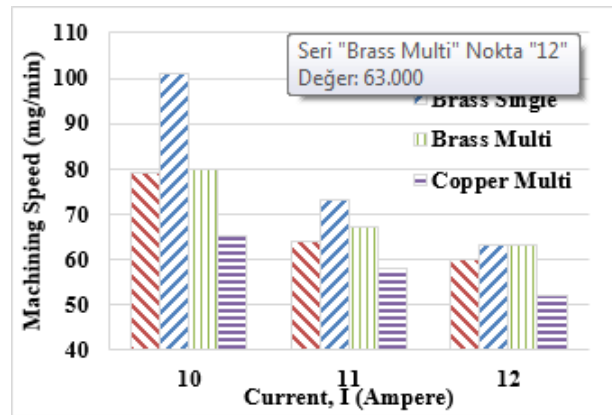


Figure 5. Current versus Machining speed

3.2. Electrode Wear

In EDM process, high energetic electrical spark erodes the workpiece and picks off the particles from the workpiece surface, nonetheless it erodes the electrode and picks off the particles from the electrode respectively. Normally, electrode wear is related to the electrical parameters of the EDM process. In this study, the electrical parameters of T_{on} , T_{off} and capacitance (C) were taken constant and the effect of the current and electrode types on the electrode wear was examined. Electrode wear is generally depending on the EDM parameters and electrode materials [20]. Figure 6 Shows that electrode wear is lower for brass electrodes than copper for all current levels. And the single-channel electrodes have the lower electrode wear compared to the multi-channel electrodes. The thermal properties of the brass cause the lower material removal from the electrode. And higher coolant flow decreased the electrode wear for single-channel electrode compared to the multi-channel ones.

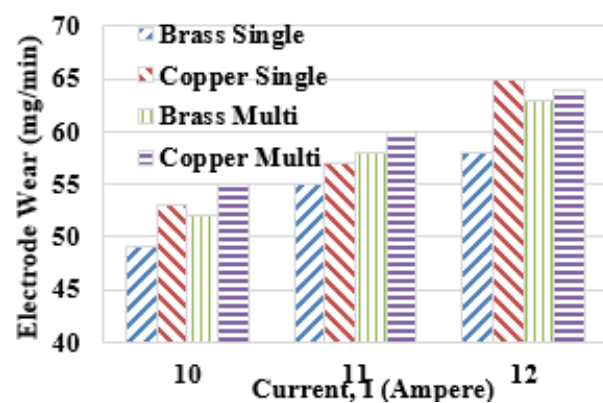


Figure 6. Current versus Electrode wear

3.3. Surface Roughness

Surface roughness (R_a) value was changed according to the reattach particles which was picked off from the workpiece, and also directly affected by the electrical parameters that causes the creation of the debris and craters on the surface of workpiece. In this study, surface roughness measurements were achieved on through holes in each set of experiments. The average surface roughness value was calculated based on surface roughness values obtained from the repeated experiments. The results shown in Figure 7 reveal that use of single-channel brass electrode provides better surface quality, the R_a value was measured as $3,0 \mu\text{m}$ for single-channel brass electrode. The flushing effect in single-channel electrodes were stronger than multi-channel electrodes. This enables the dielectric fluid to pulverize particles in very small size and these very small particles were easily thrown away from machining zone during the EDM drilling. Thus, the machined surface by single-channel brass electrode has smoother surface than the multi-channel electrodes. From the figure, it can be seen that surface roughness value increased when the current is increased.

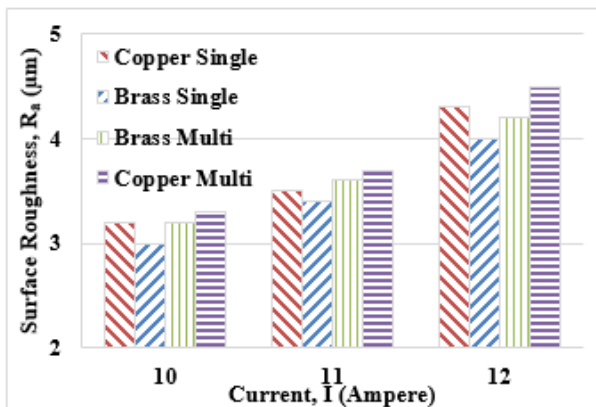


Figure 7. Current versus Surface roughness

3.4. White Layer Thickness

Through the EDM drilling of holes, white layers are created at the side walls of each hole. In this section, the effects of electrodes and current coupled with the hole-EDM drilling process on average white layer thickness were compared. The white layer thickness was not uniform throughout the hole length, so average white layer thickness was determined according to the series of measurements. It is seen in Figure 9, white layer thicknesses of the holes were changing from $10 \mu\text{m}$ to $20 \mu\text{m}$ for all electrodes. Figure 8 shows that the WLT increased when the current increased. The single-channel brass electrode has the lower WLT than the multi-channel brass and copper ones. Single-channel electrodes performed better WLT than multi-channel electrodes. The flushing effect of the single channel electrodes is the higher than the multi-channel electrodes. Due to this reason white layer creation is lower for single-channel electrodes.

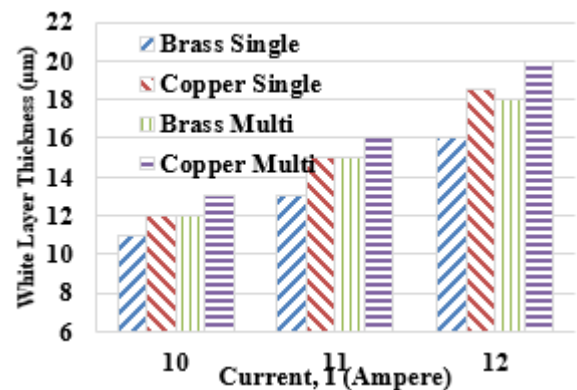


Figure 8. Current versus White layer thickness

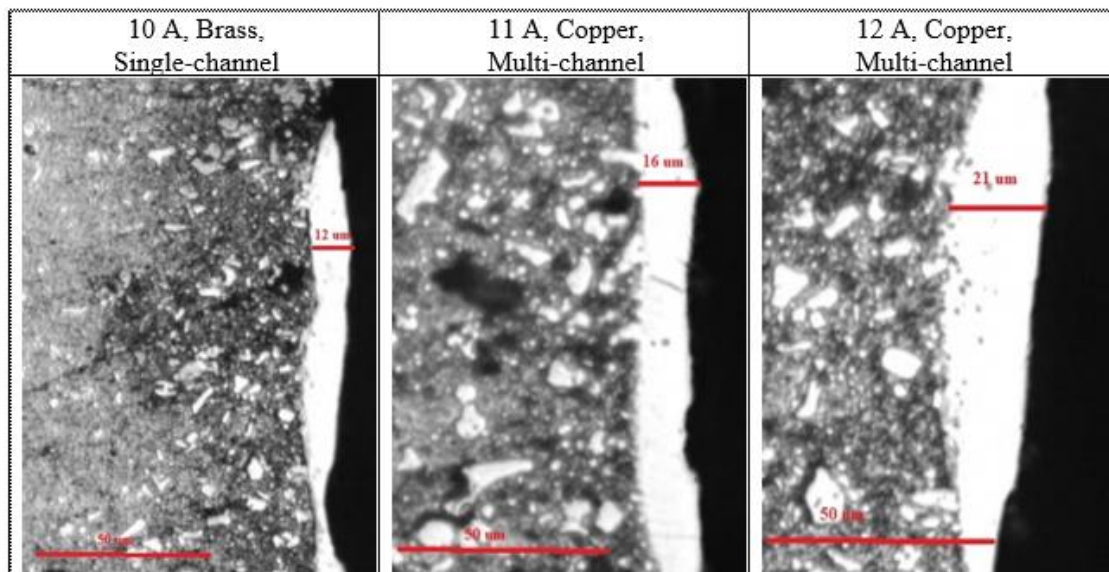


Figure 9. White layer thickness measurements

4. CONCLUSIONS

The outcomes of this study can be concluded as:

- Nearly 50 percent decrease in MS has been achieved by using the single-channel brass electrode compared to the multi-channel copper electrode. This provides a significant improvement of the machining time for EDM drilled deep holes.
- MS is decreased as the current increased for all electrode types. The better MS was obtained at 10 A and single-channel brass electrode.
- Electrode wear rate is reduced approximately 20% by using single-channel brass electrode. This means reduction in electrode cost. (i.e., manufacturing cost).
- EW is decreased as the current increased for all electrodes. The better EW was obtained at 12 A and single-channel brass electrode.
- Surface roughness value is increased as the current increased for all electrodes. The better surface quality was obtained at 10 A and single-channel brass electrode.
- Approximately 30 percent surface improvement has been achieved by using single-channel brass electrode.
- It can be expected that the service life and fatigue strength of the workpiece will be improved by decreasing the white layer thickness.

REFERENCES

1. Sommer, C. and S. Sommer, "Complete EDM handbook". *Advance Pub.*, (2005).
2. Gov, K. "Experimental Investigation of The Effects of The Coolant on The Performance Parameters of Electrical Discharge Drilling of Some Aerospace Materials", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(1): (2017).
3. Gov, K. "The effects of the dielectric liquid temperature on the hole geometries drilled by electro erosion", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2017).
4. Göv, K. "Influence of the Coolant on Performance of Electro Discharge Hole Drilling", *Journal of Polytechnic*, 20(1): 191-196, (2017).
5. Yusuf Keskin, H., H. Selcuk, and K. Mevlut. "An experimental study for determination of the effects of machining parameters on surface roughness in EDM", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 28: 1118-1121, (2006).
6. Puranik, M.S. and S.S. Joshi. "Analysis of accuracy of high-aspect-ratio holes generated using micro-electric discharge machining drilling", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(11): 1453-1464, (2008).
7. Mujumdar, S.S., S.A. Mastud, R.K. Singh, and S.S. Joshi. "Experimental characterization of the reverse micro-electrodischarge machining process for fabrication of high-aspect-ratio micro-rod arrays", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224(5): 777-794, (2010).
8. Kurnia, W., P.C. Tan, S.H. Yeo, and Q.P. Tan. "Surface roughness model for micro electrical discharge machining", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(3): 279-287, (2009).
9. Yilmaz, O. and M.A. Okka. "Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(1-4): 185-194, (2010).
10. Kuppan, P., A. Rajadurai, and S. Narayanan. "Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(1-2): 74-84, (2008).
11. Singh, P.N., K. Raghukandan, M. Rathinasabapathi, and B. Pai. "Electric discharge machining of Al-10% SiC p as-cast metal matrix composites", *Journal of materials processing technology*, 155: 1653-1657, (2004).
12. Ekmekci, B., A. Sayar, T.T. Öpöz, and A. Erden. "Geometry and surface damage in micro electrical discharge machining of micro-holes", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(10): 105030, (2009).
13. Yadav, U.S. and V. Yadava. "Experimental investigation on electrical discharge diamond drilling of nickel-based superalloy aerospace material", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, (2015).
14. Janmanee, P. and A. Muttamara. "A study of hole drilling on stainless steel AISI 431 by EDM using brass tube electrode", *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 2(4): 471-481, (2011).
15. Gov, K. "Investigation of the Effects of the Dissolved Oxygen in the Coolant on the Hole Geometries Drilled by Electro Erosion", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(2): 231-239, (2016).
16. Çogun, C., B. Özerkan, and T. Karaçay. "An experimental investigation on the effect of powder mixed dielectric on machining performance in electric discharge machining", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(7): 1035-1050, (2006).
17. Ekmekci, B., F. Ulusöz, N. Ekmekci, and H. Yaşar. "Suspended SiC particle deposition on plastic mold steel surfaces in powder-mixed electrical discharge machining", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(3): 475-486, (2015).
18. Ergün, Z.E. and C. Çoğun. "Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) İş Parçası Yüzey Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(3): (2006).
19. Khan, A.A. "Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(5-6): 482-487, (2008).
20. Haşçalık, A. and U. Çaydaş. "Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V)", *Applied Surface Science*, 253(22): 9007-9016, (2007).

Türkiye'deki LEED NC 2009 Sertifikalı Binaların Enerji ve Atmosfer Kredilerinin Değerlendirilmesi

Ashlı Pelin GÜRGÜN*

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
(Geliş/Received : 12.08.2016 ; Kabul/Accepted : 15.09.2016)

ÖZ

ABD'de United States Green Building Council (USGBC) tarafından geliştirilen ve halen kullanılmakta olan LEED sistemi, tüm dünyada inşaat projelerinde yoğun olarak kullanılan bir yeşil bina sertifikasyon sistemidir. Türkiye'de de sıkça tercih edilen bu sistem, enerji verimliliği dahil olmak üzere değişik konularda sürdürülebilir uygulamaların inşaat projelerinde kullanılmasını teşvik eder ve değişik kredi kategorileri üzerinden puanlar. Kazanılan puanlara göre binalar değişik seviyelerde sertifika almaya hak kazanırlar. LEED'in yeni binalar için geliştirdiği versiyonunda en yüksek puana sahip olan kredi kategorisi, enerji ve atmosfer kategorisidir. Bu kredilerin amaçları, enerji verimliliğinin artırılması, hedeflenen verimliliğin binanın kullanımı sırasında gerçekleştiğinin takip edilmesi, yenilenebilir enerji kullanımının teşvik edilmesi ve karbon emisyonlarını azaltıcı teknolojilerin kullanılmasıdır. Bu çalışmada, Türkiye'de LEED sistemi kullanarak yeşil bina sertifikası alan binaların, enerji ve atmosfer kredi kategorisindeki performansları, kazandıkları puanlar kullanılarak analiz edilmiştir. Ağırlıklı olarak ABD inşaat sektörünün koşullarına göre geliştirilmiş olan sistemin, Türk inşaat projelerindeki uygulanma düzeyi incelenmiştir. Ayrıca, başarılı sürdürülebilir inşaat uygulama örnekleri, yeşil bina projelerinde karşılaşılan sıkıntılar, engeller ve zorluklar irdelenerek daha sonraki çalışmalara ışık tutması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: LEED, Türkiye, Enerji, Yeşil Bina.

Türkiye'deki LEED NC 2009 Sertifikalı Binaların Enerji ve Atmosfer Kredilerinin Değerlendirilmesi

ABSTRACT

LEED green building certification system, which is developed by Green Building Certification Council (USGBC) is one the most commonly used certification systems in the world. Being the frequently preferred certification system in Turkey, it encourages and rates sustainable practices including energy efficiency in construction projects with different credit categories. Buildings are certified at different levels based on earned. Energy and atmosphere credits share the largest portion of all achievable points in LEED for new construction projects. The objectives of the credits are improving energy efficiency, monitoring energy consumption to control if there is any gap between designed and actual values during operation, encouraging renewable energy consumption and using technologies to reduce carbon emissions. In this study, the performance of LEED-certified green buildings in Turkey is evaluated in energy and atmosphere credits by analyzing earned points in this category. The level of practices in Turkish green building projects is investigated, considering the fact that the system is developed based on U.S. construction sector. Additionally, successful construction applications, problems, barriers and challenges in such projects are presented as examples for further studies and practices.

Keywords: LEED, Turkey, Energy, Green Building.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnşaat projelerindeki faaliyetlerin doğal çevre üzerinde yarattığı olumsuz etkiler sıkça tartışılan ve araştırılan bir konudur. Mevcut kaynakların verimli kullanılması bu noktada çok önemlidir ve sürdürülebilirlik kavramı kapsamında yoğun olarak gündeme getirilmektedir. Binaların yaşam döngüleri boyunca, tüm dünyadaki ana enerji kaynaklarının %30-%40'ını tükettiği [1] ve enerji kullanımı ve karbon emisyon oranlarının artması ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir [2]. Bu noktada, binalardaki enerji tüketiminin endüstriyel tüketimi geçtiği belirlenmiştir [3]. İnşaat projeleri oldukça fazla

sayıda faaliyet içeren, gerek bunların gerçekleştirilmesi sırasında, gerekse kullanılan yapı malzemelerinin üretilmesi ve şantiyelere taşınması sırasında yoğun enerji kullanımı gerektiren projelerdir [4]. Projelerin içinde var olan faaliyetlerin her aşamasında kaynak kullanımı ve enerji tüketimi söz konusudur.

İnşaat sektörünün sürdürülebilir uygulamalara yönelmesi, tüm bu olumsuz etkilerin azaltılmasına yönelik adımlardır. Bu kapsam çerçevesinde yoğun olarak son yirmi yıldır, özellikle gelişmiş ülkelerde binalarda enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, ozon tabakasına zarar veren gazların üretildiği teknolojilerin terk edilmesi veya kullanımının azaltılması teşvik edilmiştir. Çevre dostu ve sürdürülebilir uygulama ve teknolojilerin projelerin inşaat, mimari, mekanik ve elektrik gibi değişik

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: apelin@yildiz.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 383-392

alanlarında puanlandığı ve ödüllendirildiği yeşil bina sertifikasyon sistemleri, bu konuda atılmış bir adımdır. Bu sistemler, ulaşım, malzeme, iç hava kalitesi, sürdürülebilir alanlar gibi konuların yanı sıra, özellikle enerji konusundaki çevre dostu yaklaşımları büyük ölçüde destekler. Enerji verimliliği, yeşil bina projelerinde hedeflenen en temel konudur ve tüm sertifikasyon sistemlerinde yüksek puanlar ayrılarak vurgulanır.

ABD’de United States Green Building Council (USGBC) tarafından geliştirilen Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) 2009 sisteminde değişik kategorilerdeki sürdürülebilir uygulamalar teşvik edilmiştir. Bu kategoriler, sürdürülebilir alanlar, su kullanımında verimlilik, enerji ve atmosfer, malzeme ve kaynaklar, iç hava kalitesi, tasarımda inovasyon ve bölgesel öncelikler bölümlerinde ayrıntılarıyla belirtilmiştir. 2014 yılında güncellenen sisteme bütünleşik süreçler ve ulaşım ile ilgili krediler de eklenmiştir. Her iki versiyonda da kazanılabilecek en yüksek kredi puanlarını enerji kullanımı ile ilgili alana ayrılmıştır.

Dünyada LEED sistemi dışında başka ülkeler tarafından da geliştirilmiş olan başka yeşil bina sertifikasyon sistemleri vardır. Bunlara örnek olarak İngiltere’deki BREEAM, Japonya’daki CASBEE, Almanya’daki DGNB ve Birleşik Arap Emirlikleri’ndeki ESTIDAMA sistemleri verilebilir. Bunların dışında pek çok ülke, bu sistemleri örnek alarak kendi yerel koşullarına göre düzenlenmiş olan sistemler üzerinde çalışmakta, bir çoğu da bu sistemlerden projelere uygun olanı doğrudan uygulamaktadır. Bu açıdan bakıldığında, LEED sistemi Türkiye de dahil olmak üzere tüm dünyada bir çok ülkede en sık kullanılan yeşil bina sertifikasyon sistemidir.

LEED sisteminde binalar, sertifikalı (40-49 puan), gümüş (50-59 puan), altın (60-79 puan) ve platin (80+ puan) olmak üzere dört farklı seviyede sertifika kazanır ve bu seviyeler her kredi kategorisinden kazanılan puanların toplamı sonucu belirlenir. Alınabilecek en yüksek puan 110’dur. İlk olarak kullanıldığı yıllardan bu yana, güncellenip yeni versiyonları kullanıma sunulan

LEED sistemi, Türkiye’de yaygın olarak tercih edilmektedir.

LEED sertifikasyon sistemleri, inşaat projelerinin çeşitlerine göre farklılaşacak şekilde düzenlenmiştir. Yeni inşaat ve renovasyon projeleri için hazırlanan sistem, LEED BD+C sistemidir. Nisan 2009 yılında üçüncü versiyonu LEED 2009 ve Kasım 2013 yılında dördüncü versiyonu LEED v4 yayınlanmıştır. Halen her iki versiyon da devrededir ve LEED 2009’un kullanımına 31 Ekim 2016 tarihine kadar izin verilmiştir. Enerji ve atmosfer kategorisi LEED içinde bir projenin en çok puan toplayabileceği kredi kategorisidir [4]. 2009 versiyonunda toplam puanın %33’lük kısmını oluştururken, 2014 versiyonunda %35’e yakın bir kısmını karşı gelmektedir. Dolayısıyla, bu kredi kategorisi her iki versiyonda da toplam puanın önemli bir bölümünü teşkil eder. LEED 2009’da enerji ile ilgili kriterler, üç adet ön şart ve altı adet kredi ile düzenlenmiştir. Her iki sistemde var olan ön şart ve krediler Çizelge 1’de görülmektedir. Bu Çizelgeden de anlaşıldığı üzere, daha fazla sayıda bulunan LEED NC 2009 sistemi ile sertifika almış binaların incelenmesi, ülkemizdeki projelerde enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kullanımı, yerinde enerji üretimi gibi kredilerin yeşil bina projelerindeki uygulanma seviyelerini göstermesi açısından önemlidir.

LEED yeşil bina sertifikasyon sistemi, ABD inşaat sektörünün içinde bulunduğu koşullara, uygulama alışkanlıklarına ve yasa ve yönetmeliklerine göre hazırlanarak ortaya çıkarılmış bir sistemdir. ABD dışındaki ülkelere de kullanımının yaygınlaşması ile bölgesel, coğrafi, yerel özellikler, iklimsel ve yasal farklılıkların, puan almada önemi ortaya çıkmıştır. Bazı özel krediler bu amaçla sisteme eklenirken diğerleri için de kullanıcılara seçenek geliştirme imkanları tanınmıştır. İlk kullanılmaya başlandığı günden bu yana birçok versiyonu çıkarılmış, ancak yerine getirilmesi ve puan toplamaya katkı sağlayan kredilerin çoğu benzer kalmıştır. Bu nedenle, farklı ülkelerdeki projelerde kredilerin uygulanma seviyelerini analiz etmek, o

Çizelge 1. LEED NC 2009 ve LEED 2014’te yer alan Enerji ve Atmosfer ön şart ve kredileri (LEED NC 2009 and Prerequisites and credits in Energy and Atmosphere)

LEED NC 2009	Puan	LEED v4	Puan
Ön şart 1. Temel seviyede bina enerji sistemlerinin testi ve devreye alınması	-	Ön şart 1. Temel seviyede bina enerji sistemlerinin testi ve devreye alınması	-
Ön şart 2. Minimum enerji performansı	-	Ön şart 2. Minimum enerji performansı	-
-	-	Ön şart 3. Bina bazında enerji kontrolü	-
Ön şart 3. Temel seviyede soğutucu akışkan yönetimi	-	Ön şart 4. Temel seviyede soğutucu akışkan yönetimi	-
EAc1. Enerji performansının optimize edilmesi	1-19	EAc2. Enerji performansının optimize edilmesi	1-18
Minimum enerji tasarruf maliyeti yüzdesi			
12%	1	6%	1
14%	2	8%	2
16%	3	10%	3
18%	4	12%	4

20%	5	14%	5
22%	6	16%	6
24%	7	18%	7
26%	8	20%	8
28%	9	22%	9
30%	10	24%	10
32%	11	26%	11
34%	12	29%	12
36%	13	32%	13
38%	14	35%	14
40%	15	38%	15
42%	16	42%	16
44%	17	46%	17
46%	18	50%	18
48%	19		
EAc2. Yerinde yenilenebilir enerji Yenilenebilir enerji yüzdesi		EAc5. Yenilenebilir enerji üretimi	
1%	1		
3%	2	1%	1
5%	3	5%	2
7%	4	10%	3
9%	5		
11%	6		
13%	7		
EAc3. İleri seviyede test ve devreye alma	2	EAc1. İleri seviyede test ve devreye alma	2-6
EAc4. İleri seviyede soğutucu akışkan yönetimi	2	EAc6. İleri seviyede soğutucu akışkan yönetimi	1
EAc5. Ölçme ve doğrulama	3	EAc3. İleri seviye ölçme ve doğrulama	1
EAc6. Yeşil güç	2	EAc7. Yeşil güç ve karbon dengelemesi	1-2
-	-	EAc4. Talep katılımı	1-2
Maks. Toplam	35		33

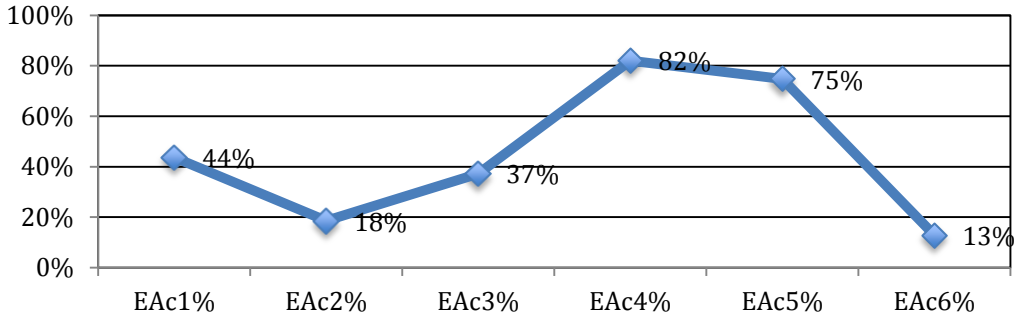
ülkelerde yeşil bina projelerinde karşılaşılan güçlükleri, riskleri ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerin anlaşılması açısından anlamlı ve önemlidir.

2. ÇALIŞMANIN AMACI VE METODOLOJİSİ (OBJECTIVE AND METHODOLOGY OF THE STUDY)

Yeşil bina sertifikasyon sistemleri, gelişen teknoloji, üretilen çevre dostu yeni malzemeler, çevre bilincinde artan farkındalık ve projelerin gerçekleştirildiği bölgelerdeki yerel koşullarda görülen değişkenlikler gibi nedenlerle zaman içinde güncellenmiş ve yenilenmiştir. Malzeme kullanımında kaynak tüketimi azaltacak ve geri dönüşümü teşvik edilecek uygulamalar, su verimliliğini artıracak teknolojiler, proje yerini seçerken doğal ortama en az zarar verme, bina kullanıcıları için iç hava kalitesinin iyileştirilmesi gibi faydalı uygulamalar özendirilerek puanlandırılmıştır. LEED yeşil bina sistemi, ABD'de geliştirilen bir sertifikasyon olduğu için, bu ülkedeki inşaat sektörünün içinde bulunduğu

koşullar esas alınmış, ilgili yasa ve yönetmelikler dikkate alınarak geliştirilmiştir. Ancak LEED sadece ABD içinde değil, tüm dünyada yaygın olarak kullanılan bir sistem haline gelmiştir [5, 6]. Bu nedenle sistemde yer alan kriterlerin farklı ülkelerde uygulanabilirliğinin anlaşılabilmesi için, kredi kategorilerden elde edilen puanların incelenmesi önemlidir.

Enerji verimliliği konusu, tüm kategoriler içinde ağırlıklı olarak sistem içinde yerini almıştır. LEED yeşil bina sertifikasyon sistemine bakıldığında da durum farklı değildir ve sistemin en çok puan toplanabilen ağırlıklı bölümü olmaya devam etmektedir. Bu nedenle konuyla ilgili uygulamalarının yaygınlaşması, enerjiji daha verimli kullanan projelerin geliştirilmesi hem olumsuz çevresel etkilerin azaltılması, hem de sertifikalanma süreci sırasında puan kazanılması açısından önemlidir. LEED'in yeni inşaatlar dışında iç mekan tasarımı ve inşaatı, evler, mahalle gelişimi, bina işletmesi ve bakımı gibi farklı proje çeşitleri için geliştirilmiş sertifika sistemleri de mevcuttur. USGBC'nin proje veri



Şekil 1. Enerji ve atmosfer kredilerine ait puanların elde edilme yüzdeleri (Achievement percentage of Energy and Atmosphere credits)

tabanında Haziran 2016 itibarıyla 93.341 bina kayıtlı bulunmaktadır ve bunların LEED 2009 Yeni İnşaat sistemi ile sertifikalanmış veya sertifika almak üzere başvurmuş bina sayısının 15.252 olduğu görülmektedir [7].

LEED sistemi ile sertifikalanan binaların elde ettikleri puanlar değişik araştırmacılar tarafından incelenmiştir. A.B.D.'de bulunan 53 adet LEED NC 2.0, 2.1 ve 2.2 (önceki versiyonlar) sertifikasına sahip binanın incelenmesinde Enerji ve Atmosfer kategorisinden elde edilen puanların değeri %48 olarak bulunmuştur [8]. Benzer bir çalışmada 42 adet LEED NC 2.0 sertifikalı bina grubu incelenmiş ve %43'lük bir uygulanma düzeyi belirlenmiştir [9]. Ayrıca kategoride yer alan krediler arasında da anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Kanada'da yapılan çalışmada ise Enerji ve Atmosfer kategorisinde en çok puan toplanabilen kredinin EAc1 – enerji performansının optimize edilmesi kredisinde olduğu sonucuna varılmıştır [10]. Benzer bir çalışmada da değişik ülkelerdeki binaları kapsayacak şekilde yapılmış ve en yüksek puan kazanılabilen kredilere sıraladığında yine EAc1 kredisinin ilk beş kredi içine girdiği belirlenmiştir [11].

Türkiye'ye bakıldığında, Haziran 2016 itibarıyla LEED'in yeni inşaat dışındaki diğer sistemleri de dahil olmak üzere toplam 469 proje bu sistemde kayıtlıdır ve bunlardan 233 adedi yeni inşaat sistemi ile sertifika almak üzere başvurmuş veya sertifikalandırılmıştır [7]. Rakamlara bakıldığında, ülkemizdeki projelerin yaklaşık yarıya yakını LEED 2009 Yeni İnşaat sistemi ile ilgilidir. Bu makalenin yazıldığı sıralarda, sertifika almak üzere başvurmuş olan 233 adet binanın 87 adedi sertifika alma hakkı kazanmıştır. Bunlardan 78 adedinin aldıkları puan bilgileri USGBC'nin internet sitesinde yer almaktadır. Bu binaların aldıkları sertifikalara göre dağılımı Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Türkiye'de bulunan ve USGBC tarafından puanlarıyla birlikte listelenen LEED NC 2009 sertifikalı projelerin dağılımı (Distribution of LEED NC 2009 certified buildings in Turkey listed by USGBC)

Sertifika Seviyesi	Adet
Sertifikalı	7
Gümüş	13
Altın	51
Platin	7

Bu çalışmada, Türkiye'de LEED NC 2009 ile yeşil bina sertifikası almaya hak kazanmış 78 adet projenin enerji ve atmosfer kredi kategorisinde elde ettikleri puanlar incelenmiştir. Bu sayede, enerji verimliliğinin hedeflendiği ve sürdürülebilir uygulamaların kullanıldığı projelerin, LEED sertifika sisteminde ulaşabildiği puanlar analiz edilmiş ve bu puanları elde edebilmek için kullanılan uygulamalar değerlendirilmiştir. Puanların kazanılmamasına etken olan faktörler de incelenerek sektörde görev yapan profesyonellerin dikkatine sunulmuştur.

3. ENERJİ AND ATMOSFER KREDİLERİNİN ANALİZİ (ANALYSIS OF ENERGY AND ATMOSPHERE CREDITS)

Bu bölümde, Türkiye'deki LEED NC 2009 ile sertifika almaya hak kazanmış projelerin Enerji ve Atmosfer kategorisinde elde ettiği puanlar analiz edilmiştir. Öncelikle, listede bulunan binaların elde ettikleri puanların ortalaması hesaplanmıştır. Her kredi için alınabilecek en yüksek puan farklıdır (Çizelge 1). Örneğin, EAc1 – enerji verimliliğinin optimize edilmesi kredisinden elde edilebilecek en yüksek puan 19'dur. Bu nedenle, karşılaştırma yapabilmek ve yüzdesel olarak kredi elde etme puanlarını hesaplayabilmek için, herbirinin ortalama elde edilme puanları en yüksek edilebilecek değerlerine bölünmüştür. Örnek vermek gerekirse, EAc1 – enerji verimliliğinin optimize edilmesi kredisinden elde edilen 8.3 ortalama kredi puanı değeri, alınabilecek en yüksek puan olan 19'a bölünerek $(8.3 / 19) \times 100 = \%44$ olarak hesaplanmıştır. Ardından,

kredilerin elde edilme ortalamaları istatistiksel olarak analiz edilmiş ve sunulmuştur. Yapılan analizlerden çıkarılan sonuçlar ilgili bölümlerde açıklanarak yorumlanmıştır.

3.1. Kredilerin Elde Edilme Yüzdesinin Değerlendirilmesi (Assessment of Credit Achievement Percentage)

LEED NC 2009 sistemi içinde elde edilebilecek puanların en büyük oranını temsil eden enerji ve atmosfer kriterlerinin Türkiye'deki uygulamalarında elde edilen değerleri Şekil 1 ve Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda puanların elde edilme yüzdeleri sırasıyla EAc4-ileri seviyede soğutucu akışkan yönetimi (%82), EAc5-ölçme ve doğrulama (%75), EAc1-enerji performansının optimize edilmesi(%44), EAc3-ileri seviyede test ve devreye alma(%37), EAc2-yerinde yenilenebilir enerji (%18) ve EAc6-yeşil güç (%13) olmuştur.

Çizelge 3'te binaların sertifika seviyelerine göre ve hepsi birlikte yapılmış olan değerlendirmeleri görülmektedir.

Beklendiği üzere sertifika seviyelerine göre ortalama elde edilen puanlar ve başarı yüzdeleri farklı olmuştur. Buna göre sertifikalı, gümüş, altın ve platin sertifikalı binaların bu kategoriden ettiği ortalama puanlar sırasıyla 8.9, 9.5, 15.0 ve 25.7 olmuştur. Hep birlikte yapılan değerlendirmeye göre ise ortalama 14.5 olarak bulunmuştur.

Bu kredilerin istatistiksel değerlendirmeleri Kruskal-Wallis ve Mann-Whitney U testleri ile yapılmış ve Çizelge 4'te gösterilmiştir. Kruskal-Wallis testi parametrik olmayan ve sıralamalı tek-yönlü varyans analizi testidir. Bulunan *p* değeri seçilen hipotez güven aralığı değerinden küçük ise, test edilen grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğu sonucuna varılır. Mann-Whitney U testi ise parametrik olmayan t-testidir ve iki bağımsız grup içinde yer alan değerleri sıralı hale dönüştürerek karşılaştırır. Böylece gruplar arasındaki sıralamanın farklı olup olmadığının analizini yapar. Bu testte de hesaplanan *o* değeri seçilen hipotez güven aralığından küçük ise değerler arasında anlamlı farklılıklar olduğu

Çizelge 3. Türkiye'deki LEED-NC 2009 sertifikasına sahip yeni binaların Enerji ve Atmosfer kategorisinde elde ettiği ortalama puan yüzdeleri (LEED-NC 2009 certified buildings and their achievement mean percentages in Energy and Atmosphere category in Turkey)

Sertifika seviyesi	Bina adedi	Ort. Puan		EAc1 (19 p.)	EAc2 (7 p.)	EAc3 (2 p.)	EAc4 (2 p.)	EAc5 (3 p.)	EAc6 (2 p.)
Sertifikalı (40-49 p)	7	8.9	Elde edilen ortalama puan	4.7	3.7	0.0	0.3	0.1	0.0
			Elde edilen ortalama puan (%)	25%	53%	0%	14%	5%	0%
			St. Sapma	2.9	2.6	0.0	0.8	0.4	0.0
			"0" puan alan bina sayısı	0	2	7	6	6	7
			"en yüksek." puanı alan bina sayısı	0	0	0	1	0	0
Gümüş (50-59 p)	13	9.5	Elde edilen ortalama puan	6.3	0.1	0.0	1.7	1.4	0.0
			Elde edilen ortalama puan (%)	33%	1%	0%	85%	46%	0%
			St. Sapma	4.5	0.3	0.0	0.8	1.4	0.0
			"0" puan alan bina sayısı	0	12	13	2	5	13
			"en yüksek." puanı alan bina sayısı	0	0	0	10	5	0
Altın (60-79 p)	51	15.0	Elde edilen ortalama puan	8.3	0.9	0.9	1.8	2.6	0.4
			Elde edilen ortalama puan (%)	44%	13%	47%	90%	88%	18%
			St. Sapma	4.1	1.9	1.0	0.6	1.0	0.8
			"0" puan alan bina sayısı	0	38	27	5	6	42
			"en yüksek." puanı alan bina sayısı	2	3	24	46	45	9
Platin (80 p ve üstü)	7	25.7	Elde edilen ortalama puan	15.3	4.0	1.4	1.7	3.0	0.3
			Elde edilen ortalama puan (%)	80%	57%	71%	86%	100%	14%
			St. Sapma	5.0	3.1	1.0	0.8	0.0	0.8
			"0" puan alan bina sayısı	0	1	2	1	0	6
			"en yüksek." puanı alan bina sayısı	4	3	5	6	7	1
Tüm binalar için	78	14.5	Elde edilen ortalama puan	8.3	1.3	0.7	1.6	2.2	0.3
			Elde edilen ortalama puan (%)	44%	18%	37%	82%	75%	13%
			St. Sapma	4.8	2.3	1.0	0.8	1.3	0.7
			"0" puan alan bina sayısı	0	53	49	14	17	68
			"en yüksek." puanı alan bina sayısı	6	6	29	64	57	10

değerlendirilir. Wu ve arkadaşları tarafından yapılan ve 5000 adet LEED NC 2.2 ile sertifikalandırılmış bina grubunun incelendiği çalışmada kredilerin uygulanabilirlikleri incelenmiş, veriler Kruskal Wallis ve Mann-Whitney U testleri ile analiz edilerek aralarındaki farklılıklar araştırılmıştır [12]. Bu çalışmada da enerji ve atmosfer kategorisinde bulunan altı adet kredinin

yapılan tasarruflar üzerinden yüzdesel olarak hesaplanır. Enerji ve atmosfer kategorisinden elde edilebilecek en yüksek puan olan 35 puanın 19'u tek başına bu krediye aittir. Bu nedenle özellikle yüksek sertifika seviyesi hedefleyen proje sahipleri ve yatırımcılar tarafından dikkat edilmesi gereken bir kredidir.

Çizelge 4. Kredi ortalamalarının istatistiksel değerlendirmeleri - Bonferroni Mann-Whitney U testi (Statistical evaluation of creits means – Bonferroni Mann-Whitney U test)

		p-değeri	%1 güven aralığı ile hipotez testi
EAc1%	EAc2%	0.000	Reddet
	EAc3%	0.001	Reddet
	EAc4%	0.000	Reddet
	EAc5%	0.000	Reddet
	EAc6%	0.000	Reddet
EAc2%	EAc3%	0.069	Kabul et
	EAc4%	0.000	Reddet
	EAc5%	0.000	Reddet
	EAc6%	0.017	Kabul et
EAc3%	EAc4%	0.000	Reddet
	EAc5%	0.000	Reddet
	EAc6%	0.000	Reddet
EAc4%	EAc5%	0.231	Kabul et
	EAc6%	0.000	Reddet
EAc5%	EAc6%	0.000	Reddet

Türkiye’de LEED NC 2009 sistemi ile sertifikalanmış projelerdeki uygulanma seviyeleri arasında anlamlı farklılık bulunup bulunmadığını belirlemek amacıyla belirtilen istatistik testler kullanılmıştır. Yapılan analizlerde hipotez testi güven aralığı %1 olarak seçilmiştir. Çizelge 4’ten görüldüğü üzere, kredilerin elde edilme puan yüzdelarının çoğu farklı seviyelerdedir. Başka bir deyişle, projelerdeki kredilerin başarı oranları büyük ölçüde birbirinden farklıdır. Sadece EAc2 ile EAc3 ve EAc6, ve EAc4 ve EAc5 arasında istatistiksel olarak farklılık belirlenememiştir. Her kredinin detaylı olarak değerlendirilmesi takip eden bölümlerde anlatılmıştır.

3.1.1. EAc1 – Enerji Performansının Optimize Edilmesi (Optimize Energy Performance)

Bu kredinin amacı projelerde tercih edilen enerji ile ilgili uygulama, sistem ve teknolojilerin olumsuz çevresel ve ekonomik etkilerini azaltarak sürdürülebilir binalarda etkin enerji tasarrufu yapılmasını sağlamaktır. Bu kredi temel olarak ASHRAE 90.1-2007 standardını göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir. Enerji performansının optimizasyonu enerji giderlerinden

Hem ülkemizde hem de yurtdışındaki projelerde enerji performansı optimizasyonu kredisinden değişik yöntemler kullanılarak puan toplanmıştır. İspanya’dan örnek vermek gerekirse, 2015 yılında LEED platin sertifikası almış olan KIO Networks Murcia projesinde, enerji modellemesi yapılarak uzun vadede enerji tasarrufu sağlayacak yöntem ve malzemeler araştırılmış ve yatırımın geri dönüş oranları hesaplanmıştır. Bu çalışmaların sonunda 6 adet fotovoltaik panel iç aydınlatmada kullanılmak üzere yerleştirilmiştir [13]. Proje bu krediden 19 tam puan almıştır. LEED altın sertifikasına sahip olan A.B.D.’de bulunan University of Arkansas at Little Rock kampüsünde yer alan yurt binasında %32 oranında enerji kullanımını azaltacak şekilde yüksek verimli mekanik ve aydınlatma sistemleri kullanılarak 10 puan toplanmıştır [X14].

Türkiye’de de projelerde bu krediden puan alarak kullanılan enerjiden tasarruf etmek için değişik stratejiler kullanılmıştır. Örneğin;

- Teknopark İstanbul Ar-ge Binası ve Kuluçka Merkezi projesinde ASHRAE 90.1 standardı enerji verimliliği standardı göz önüne alınarak verimli aydınlatma

armatürleri, yüksek yalıtım değerleri, verimli ısıtma, soğutma cihazları kullanılmıştır. Enerji modellemesi yapılarak muhtemel verimsizlikler önceden belirlenmiştir [15]. Enerji ve atmosfer kategorisinden 16 puan kazanmış olan projede 6 puan bu krediden elde edilmiştir ve proje LEED Gold sertifikasına sahiptir.

- Uçak bakım, onarım ve modifikasyon konularında faaliyet gösteren İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı içinde bulunan HABOM binası projesinde, ASHRAE 90.1 standardından en az yüzde 30 daha enerji verimliliği oranı hedeflenerek toprak kaynaklı ısı pompası ve trijen sistemi kullanılmıştır [16]. Kullanılan aydınlatma ve mekanik sistemlerde enerji verimliliği ön plana çıkarılmıştır. LEED gold sertifikasına sahip olan bina, enerji ve atmosfer kategorisinden aldığı 25 puanın 16'sını bu krediden almıştır.
- Ankara'da inşa edilen ve LEED platin sertifikasına sahip olan Eser Holding projesinde, değişik yöntemlerle %40'lara varan enerji tasarrufu sağlanmıştır. Örneğin, termal enerji depolama sistemi düşünülerek sıcak ve soğuk su tankları kullanılmaktadır. Bu tanklar toprak kaynaklı ısı pompası, soğutma grubu ve kojenerasyon ünitesi kullanılarak, pik yüklerin olduğu saatler haricinde sıcak, soğuk ve buz depolaması yapılmaktadır. Bu şekilde enerji tüketimi minimize edilmektedir [17]. Proje bu krediden 14 puan almıştır.

Çizelge 3'den görülebileceği gibi incelenen bina envanterinin içinde toplam 6 bina bu krediden alınabilecek en yüksek puan olan 19 puanı almıştır. Bunlardan 4 tanesi platin, 2 tanesi altın sertifikalı binalardır. Ayrıca yapılan istatistiksel değerlendirmelere göre bu krediden elde edilen yüzdesel puan ortalamaları diğerlerinden farklıdır (Çizelge 4).

3.1.2. EAc2 – Yerinde Yenilenebilir Enerji (On-site Renewable Energy)

Binaların yaşam döngüsü boyunca enerji tüketim gereksinimi nedeniyle ortaya çıkan olumsuz çevresel etkileri azaltmanın etkin yollarından biri de yenilenebilir enerji teknolojilerinin inşaat projelerinde kullanımının yaygınlaştırılmasıdır. LEED sisteminde de enerji ve atmosfer kategorisinde yer alan kredilerden biri de yerinde yenilenebilir enerji kredisidir. Buradaki amaç fosil yakıtlar gibi tükenen ve sınırlı enerji kaynakları yerine, yenilenebilir ve doğada sınırlı olmayan kaynaklardan temiz enerji üretimini teşvik etmektir.

Gerek ekonomik gerekse çevresel olumsuz etkilerin azaltılmasına yönelik seçenek ve stratejiler tüm yeşil bina sertifika sistemlerinde desteklenir. LEED sisteminde bu farklı değildir ve de bu krediden alınabilecek en yüksek puan 7 olarak belirlenmiştir. Bu puanlardan kazanabilmek için güneş, rüzgar, jeotermal, biyokütle ve biogaz gibi kaynaklardan enerji üretim olanakları değerlendirilmelidir [18]. Belirtilen kaynaklar kullanarak elde edilen enerji, diğer kaynaklardan üretilen enerji

kullanımını azaltılmasının yanı sıra projenin yeşil bina imajının da güçlenmesine katkı sağlar [19].

Yurtdışında bulunan projelerden örnek vermek gerekirse, A.B.D.'deki SUNY-ESF College of Environmental Science and Forestry Gateway Center projesinde, birleşik ısı ve güz santrali kurularak kampüsteki ısınma gereksiniminin %60'ı, elektrik gereksiniminin de %20'lik kısmının buradan karşılanması tasarlanmıştır [X20]. Projenin krediden 7 puanı bulunmaktadır. Türkiye'de gerçekleştirilen ve LEED sertifikası almış projelerde bu konuda uygulanan değişik örnekler bulunmaktadır.

- Teknopark İstanbul Ar-ge Binası ve Kuluçka Merkezi projesinde güneş kollektörleri ile kullanma sıcak suyu temin edilmiş ve fotovoltaik panelleri kullanılarak elektrik üretimi sağlanmıştır [15].
- Eser Holding projesinde, binada kullanılan toplam enerji harcamasının %2 kadarlık kısmı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanacak şekilde tasarlanmıştır. Temiz elektrik ve ısı üretimi amacıyla 1 adet 90 kVv termal kapasiteye sahip kojenerasyon ünitesi yerleştirilmiştir [17].
- Şişecam Ar-ge Binası projesinde fotovoltaik paneller aracılığıyla kullanılan enerjinin %7'si yenilenebilir enerji olarak tasarlanmıştır [21]. Bu krediden 4 puan alan proje LEED altın sertifikasına sahiptir.

Ülkemizde T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına bağlı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün yayınladığı yenilenebilir enerji üretimi ile ilgili değişik kanunlar bulunmaktadır. Bunlar 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu, 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 5686 sayılı Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineraller Kanunudur. Bunların yanı sıra rüzgar, güneş ve jeotermal kaynaklarda elde edilecek enerjisi üretimini düzenleyen çok sayıda yönetmelik ve tebliğ bulunmaktadır [22]. Ancak buna rağmen temiz enerji üretimine verilen teşvik oranlarının diğer ülkelere göre düşük kalması, Türkiye'nin taraf olduğu ticaret anlaşmalarına aykırı olmaması ve yatırımcıların uzun vadeli düşünmek yerine kısa vadeli stratejiler geliştirmesi gibi nedenlerle ülkemizde yenilenebilir enerji uygulamaları henüz ulaşması gereken seviyeye gelememiştir [23,24].

Çalışmada incelenen binaların bu krediden elde ettiği puan ortalaması değerleri diğerlerine göre düşüktür (Çizelge 3, 4 ve Şekil 1).

3.1.3. EAc3 – İleri seviyede test ve devreye alma (EAc3 – Enhanced commissioning)

Bu kredinin amacı tasarım aşamasında planlanmış olan enerji verimliliği hedefleri ile proje sahibinin binadan beklediği enerji verimliliği arasında bir uyumsuzluk olmamasını sağlamaktır. Asıl olarak LEED-NC 2009 sistemi, test ve devreye alma işleminin projenin tasarım aşamasının başında yer almasını öngörür. LEED v4 sisteminde ise bu durum, sadece tasarım aşamasında değil, inşaat ve binanın kullanım aşamalarına da dahil edilmesini belirtir.

Proje sahibinin enerji, su, iç hava kalitesi ve dayanıklılık gibi konulardaki talep ve beklentilerinin yerine getirilmesi ana amaçtır. Test ve devreye alma işlemleri ısıtma, soğutma, havalandırma sistemleri, aydınlatma sistemleri, gün ışığı kontrolü, sıcak su sistemleri ve yenilenebilir enerji sistemlerinin tümünü kapsar. Bu amaçla, binalardaki verimlilik konusundaki anahtar konumda bulunan sistemlerin, sistematik olarak kontrol edilmesi gereklidir. Tüm sistemler prosedürlere uygun olarak test ve devreye alma aşamalarından geçerek beklenen performansı sağladıkları konusunda denetlenir. LEED-NC 2009'a göre bu krediden elde edilebilecek en yüksek puan 2 puandır, LEED v4'te ise 2-6 puan arası olacak şekilde artırılmıştır. Çizelge 3'e göre EAc3'ten elde edilen puan yüzdesi %37 mertebesindedir. En düşük iki seviye olan sertifikalı ve gümüş sertifikaya sahip 20 bina hiç puan alamamıştır. Altın ve platin seviyelerinde ise sırasıyla %47 ve %71 değerlerine ulaşmıştır. Test ve devreye alma işlemlerinin kapsadığı çalışmalar, binalarda kullanılan sistemlerin içeriği ve komplike olup olmaması ile yakından ilgilidir. Örnek vermek gerekirse, Teknopark İstanbul Ar-ge Binası ve Kuluçka Merkezi projesinde, enerji harcayan tüm sistemler, LEED tarafından belirtilen uluslararası test ve devreye alma prosedürlerine uygun olarak denetlenmiş, binanın kullanımı esnasında hedeflenen performans kriterlerin uygun olarak çalıştıkları kontrol edilmiştir [25]. Proje bu krediden 2 tam puan almıştır. Yurtdışından örnek vermek gerekirse, University of South Florida'da bulunan Chowdhari Golf Center binasında da, tesiste kullanılacak tüm mekanik, aydınlatma ve sıcak su sistemleri benzer devreye alma prosedürlerinden geçerek onaylanmıştır [26].

3.1.4. EAc4 – İleri seviyede soğutucu akışkan yönetimi (EAc4 – Enhanced refrigerant management)

İncelenen binalarda en yüksek puan yüzdesi elde edilen kredi, "EAc4 - ileri seviyede soğutucu akışkan yönetimi" olmuştur (%82) ve "EAc5 – Ölçme ve doğrulama" kredisi hariç diğer kredilerin ortalama puan yüzdelerinden farklıdır (Çizelge 4). Bu kredinin amacı ozon tabakasının incelmelerini azaltacak ve Montreal protokolüne uygun olarak iklim değişikliğine yol açabilecek uygulamaların projelerdeki kullanımını kontrol etmektir. Temel olarak mekanik soğutma sistemlerini kullanmadan binaların tasarım ve işletmesinin yapılması hedefler. Mekanik soğutma ve iklimlendirme sistemlerinin kullanılması durumunda ise kloroflorokarbon (CFC) ve hidrokloroflorokarbon (HCFC) içermeyen ve atmosfere zarar vermeyecek şekilde çalışan ürünlerin kullanımı teşvik edilmiştir. Temel seviyede soğutucu akışkan yönetimi ise bu kategoride ön şart olarak belirtilmiştir. Çizelge 3'e göre incelenen sertifikalı, gümüş, altın ve platin seviyesinde sertifika almış binalar ortalama olarak sırasıyla 0.3, 1.7, 1.8 ve 1.7 puanlarını almışlardır. Kredilerin elde edilme yüzdeleri ise sırasıyla %14, %85, %90 ve %86 olmuştur. Sertifika seviyeleri dikkate alınmadan tüm binalara bakıldığında ise bu değerler 1.6 puan ve %82 olarak hesaplanmıştır.

Ülkemizde soğutucu gazların zararlı çevresel etkilerinin azaltılmasına yönelik yasal çalışmalar mevcuttur. Çevre Bakanlığı'nın hazırladığı Ozon Tabakasını İncelten Maddelerin Azaltılmasına İlişkin Yönetmeliğine göre Montreal Protokolü ve değişiklikleri uyarınca, Montreal Protokolü ve değişiklikleri uyarınca üretim, tüketimi ve ticareti kontrol altına alınan maddelerden, kloroflorokarbonlar, triklorflormetan (CFC-11), diklorodiflormetan (CFC-12), triklorflormetan (CFC-113), diklorotetrafloretan (CFC-114), klorpentafloretan (CFC-115) servis amaçlı ithalatı 1.1.2006 tarihinden itibaren tamamen yasaktır [27]. Yasal altyapı ile birlikte soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde bu kredi kapsamında puan kazanacak şekilde projelerde uygulama yapmak daha kolay hale gelmiştir. Örneğin, LEED altın sertifikasına sahip Teknopark İstanbul Ar-ge Binası ve Kuluçka Merkezi ve HABOM projelerinde soğutma sistemlerinde ozon tabakasına zarar vermeyen soğutucu akışkanlar kullanılmıştır [15, 16]. Eser Holding binasında da tüm soğutucu ve ısıtıcı gazlar aynı şekilde seçilmiştir [28].

Yurtdışındaki projeler incelendiğinde de küresel ısınma ve ozon tabakasına en ölçüde zarar verecek malzemelerin seçildiği A.B.D.'de Minnesota'da bulunan Washburn center for Children [X29] ve University of Texas at Austin'deki gibi CFC soğutucu içeren chiller sistemlerindeki CFC-12yi HFC-134aye dönüştürecek bir plan yapılan proje örnekleri bulunmaktadır [X30].

3.1.5. EAc5 – Ölçme ve doğrulama (EAc5 – Measurement and verification)

Bu kredinin amacı, binalardaki enerji tüketiminin zaman içindeki durumu ile başlangıçta hedeflenen tüketim miktarı ile uyumlu olup olmadığını takip edilmesidir. Binadaki ısıtma, soğutma, aydınlatma ve sıcak su sistemleri, sayaç, enerji analizörleri ve kalorimetre gibi ölçüm cihazlarıyla ölçülmeli ve izleme sistemleriyle takip edilmelidir. Tasarlanan ve gerçekleşen tüketim oranları arasında ciddi farkların olması, enerji verimliliği hedeflerinden sapma yaratabileceğinden, binanın kullanıma girdikten sonra enerji kullanımının bir yıl boyunca ölçülerek gözlemlenir. Elde edilebilecek en yüksek puan 3'tür.

İncelenen tüm binaların ortalama puan yüzdeleri 2.2 olarak bulunmuştur. Bu binalardan 7 adet platin sertifikalı binanın tamamı ve 51 adet altın sertifikalı binanın 45'i tam puan almıştır (Çizelge 3). Buradan yüksek seviye sertifika hedefleyen projelerin bu krediden daha fazla yararlandığı belirtilebilir. Örnek vermek gerekirse; LEED altın sertifikasına sahip olan SİF İş Makinaları Binası'nda sistemlerin planlandığı gibi çalıştığını incelemek ve gerekli ayarları yapmak için devreye alma çalışması yapılarak takip sistemleri kurulmuştur [31]. Proje bu krediden 3 tam puan almıştır. Benzer şekilde, Eser Holding binasında da sistemlerin ölçülmesi ve takip edilmesi için gerekli çalışmalar yapılarak [17] ve HABOM projelerinde her türlü enerji tüketimi enerji analizörleri ve bina otomasyon sistemi aracılığıyla gözlenmesi sağlanarak [16] tam puan

almıştır. Teknopark İstanbul Arge binasında da hem montaj hem de kullanım sırasında sistemlerin hedeflenen performans değerlerine uygun çalışıp çalışmadıkları denetlenmiştir [15]. Benzer takip uygulamaları yurtdışı projelerinde de sıkça uygulanmakta ve puan kazanılmaktadır. Örneğin, University of Texas at Austin'de birleşik ısı ve güç santralının performansını kontrol etmek amacıyla takip sistemi kurulmuştur [X30].

3.1.6. EAc6 – Yeşil güç (EAc6 – Green power)

Enerji ve atmosfer kategorisinde yer alan son kredi, yeşil enerji üreten kaynaklardan binanın ihtiyacı olan enerji miktarının en az %35'lik kısmının 2 yıl boyunca temin edilmesini sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Alınabilecek en yüksek puan 2 olarak belirlenmiştir. Hem LEED NC 2009'da , hem de LEED v4'te yer almaktadır.

Bu çalışma kapsamında incelenen toplam 78 adet binanın sadece 10'u 2 tam puan almıştır. Bunlardan biri platin diğerleri altın sertifikalıdır. Diğer tüm projeler hiç puan alamamıştır. Bu açıdan bakıldığında Şekil 1'den de görülebileceği gibi puan yüzdesi en düşük olan kredi olarak belirlenmiştir. Ayrıca "EAc2 - yerinde yenilenebilir enerji" ile birlikte diğer krediler arasında en az puan alınan kredi olarak tespit edilmiştir. Ülkemizde bu krediden tam puan alan projelerden Eser Holding binasında, %100 yenilenebilir enerji satıcısı bir firma ile enerji alımı konusunda anlaşma yapılmıştır [17]. Daha önceki bölümlerde adları geçen HABOM, Şişecam Arge ve SİF İş Makinaları binalarında bu krediden puan alınmıştır [16, 21, 31]. Bazı gelişmiş ülkelerde yenilenebilir enerji üreten firmalardan enerji temin etmek daha kolay ve yaygındır. Örneğin, A.B.D.'de yenilenebilir kaynaklardan enerji üreten ve akreditasyonları bulunan çok sayıda firma vardır. Bu sayede yeşil güç kredisinden faydalanmak mümkündür. Bir örnek vermek gerekirse, NCEF Pediatric Dental Center projesinde böyle bir firma ile anlaşma yapılmış ve binanın yıllık enerji tüketiminin %70'ini 2 yıl süreyle bu şekilde temin edileceği garantisi verilerek puan kazanılmıştır [32].

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS)

Sürdürülebilir projeler için enerji verimliliği önemli bir konudur. LEED-NC 2009'da Enerji ve Atmosfer kredi kategorisi en çok puan toplanabilen kategoridir. Bu çalışmada LEED-NC 2009 sistemi ile Türkiye'de sertifika almış olan 78 binanın Enerji ve Atmosfer kategorisindeki uygulanma düzeyleri incelenmiştir. Projelerin bu kategoriden elde ettiği puanlar analiz edilmiş, tercih edilen yöntemler ve karşılaşılan güçlükler aktarılmıştır. Bu sayede yeşil bina projelerindeki profesyonel uygulamalar araştırılarak ileride gerçekleştirilecek projelere ışık tutmak amaçlanmıştır.

Yeşil bina projelerinde enerji verimliliği ile ilgili kullanılacak sistemler ve yöntemler büyük ölçüde projeleri geliştirenlerin ve tasarlayanların enerji verimliliği hedefleri ile ilgilidir. Bu hedefleri ise

çoğunlukla tercih edilebilecek teknolojilerin ilk yatırım maliyetleri, işçilik ve yasal altyapı gibi faktörler etkiler. Ayrıca bu sistemlerinin önemli bir kısmının başka ülkelerden temin edilmesi nedeniyle lojistik ve gümrük işlemlerinden kaynaklanan ek maliyet ve işler de uygulamaları etkiler.

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Enerji ve Atmosfer kredilerinin puan yüzdelерinin sıralaması, "EAc4 – İleri seviyede soğutucu akışkan yönetimi" (%82), "EAc5 – "Ölçme ve doğrulama" (%75), "EAc1 – Enerji performansının optimize edilmesi" (%44), "EAc3 – "İleri seviyede test ve devreye alma" (%37), "EAc2 – Yerinde yenilenebilir enerji" (%18), ve "EAc6 – Yeşil güç" (%13) olarak belirlenmiştir.
- İncelenen 78 adet binanın 64 adeti, EAc4 – İleri seviyede soğutucu akışkan yönetimi kredisinden tam puan almıştır. Bu yüksek puan yüzdesinin elde edilmesinde Çevre Bakanlığı'nın hazırlamış olduğu Ozon Tabakasını İncelten Maddelerin Azaltılmasına İlişkin Yönetmelikle birlikte oluşturulmuş olan yasal altyapı etkili olmuştur.
- Ülkemizde yenilenebilir enerji üretimi ile ilgili çok sayıda yasa, yönetmelik ve tebliğ bulunmaktadır. Ancak yasada yer alan teşviklerin yeterli görülmemesi nedeniyle uzun vadeli yatırımların henüz geniş olarak yapılamaması gibi nedenlerle yenilenebilir enerji üretimi yüksek maliyetli ve temini zor olmaktadır. İncelenen binalarda EAc2 ve EAc6 kredileri en az puan başarısı elde edilen krediler olmuştur.
- Enerji tüketimini verimli hale getirerek kullanıma bağlı maliyetleri azaltmaya yönelik olarak düşünülmüş olan EAc1 kredisine, Enerji ve Atmosfer kategorisi içinde en yüksek paya sahiptir (19/35). Bu nedenle yüksek puan hedefleyerek daha üst seviyede bir sertifika seviyesine ulaşmak isteyen yatırımcı ve proje geliştiricilerinin bu krediye dikkat etmesi gerekir. İncelenen binalar sertifika seviyelerine göre puan yüzdeleri açısından farklılık göstermiştir. Örneğin platin sertifikalı binalarda bu kredinin puan yüzdesi %80'e kadar çıkmıştır.
- Sürdürülebilir olarak hayata geçirilen yeşil bina projelerinde yer alan bazı işler ve uygulamalar, geleneksel inşaat projelerinde yer alan iş ve uygulamalardan farklılık gösterir. Sürdürülebilir projelerin hedeflerine ulaşabilmesinde ve sertifikasyon sistemlerinin öngördüğü şartları yerine getirilmesinde pek çok etken faktör vardır. Bunlardan bazıları, yenilenebilir enerji kullanımı, enerji verimliliği için kullanılan sistemler, teknik destek ve altyapı, kaliteli işçilik gerektiren uygulamalar ve sertifikasyon sürecinin kendisi ile ilgili yapılması gereken dokümantasyon işleridir. Gerekli şartların yerine getirilebilmesinin önünde maliyet, lojistik, yasal altyapı gibi farklı engel ve güçlükler olabilir. Bunların önüne geçmek veya hangi sistemlerin

kullanılıp kullanılmayacağına karar vermek için projenin başındaki aşamalarda karar almak gerekir. Böylece tasarlanan ve gerçekleşen değerler arasındaki uyumsuzluklar azaltılabilir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda LEED yeşil bina sertifikasyon sisteminin diğer kategorilerinin Türkiye'deki performansları incelenerek sürdürülebilir inşaat uygulamalarının daha iyi anlaşılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] United Nations Environment Programme, Sustainable Buildings and Climate Initiative, 2009. "Buildings and Climate Change, Summary for Decision-Makers", <http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>. 20 Haziran 2016 tarihinde erişilmiştir.
- [2] Mir M. 2008, "Energy efficient architecture and building systems to address global warming", *Leadership in Engineering*, 8: 113-123, (2008).
- [3] L. Perez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, "A review on buildings energy consumption information", *Energy and Buildings*, 40: 394-398, (2008).
- [4] A. Sabapathy, A., Ragavan, S.K.V., Vijendra, M., and Nataraja, A.G., "Energy efficiency benchmarks and the performance of LEED rated buildings for information technology facilities in Bangalore, India", *Energy and Buildings*, 42: 2206-2212, (2010).
- [5] Penny, J., "LEED: Evolution and expansion", *Buildings*, 107(11): 32-36, (2013).
- [6] Beauregard, S.J., Berkland, S., and Hoque, S., "Ever green: a post-occupancy building performance analysis of LEED certified homes in New England", *Journal of Green Building*, 6(4): 138-145, (2011).
- [7] USGBC, <http://www.usgbc.org/projects>. 15 Haziran 2016 tarihinde erişilmiştir.
- [8] Sullivan, K.T. and Oates, H.D., "Analysis of Arizona's LEED for New Construction Population's Credits", *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(12): 1386-1393, (2012).
- [9] Kim, J. and Cheung, S.L., "Evaluation of Green Project Rating System for New Construction Projects", *Proceedings of ICSDC 2011: Integrating Sustainability Practices in the Construction Industry*, 360-367, (2011).
- [10] Da Silva, L. ve Ruwanpura, J.Y., "Review of the LEED points obtained by Canadian building projects", *Journal of Architectural Engineering*, 5(2): 38-54, (2013).
- [11] Todd, J.A., Pyke, C., and Tufts, R., "Implications of trends in LEED usage: rating system design and market transformation", *Building Research and Information*, 41(4): 384-400, (2013).
- [12] Wu, P., Mao, C., Wang, J., Song, Y. and Wang, X., "A decade review of the credits obtained by LEED v2.2 certified green building projects", *Building and Environment*, 102: 167-178, (2016).
- [13] USGBC. <http://www.usgbc.org/projects/kio-networks-murcia>.
- [14] USGBC. <http://www.usgbc.org/projects/ualr-west-hall>.
- [15] Teknopark İstanbul A.Ş., <http://www.teknoparkistanbul.com.tr/tr/leed-sertifikasyonu>.
- [16] Yeşil Bina, "LEED gold sertifikalı HABOM", Sayı 29. <http://www.yesilbinadergisi.com/?pid=32761#.V2L4y1KYdpk>
- [17] Altensis, <http://www.altensis.com/proje/eser-holding-merkez-ofisi-ilk-leed-platin-sertifikali-bina/>
- [18] LEED-NC, LEED 2009 for New Construction and Major Renovations, (2009).
- [19] Elston, J., "Demystifying the On-site / Off-site Renewable Energy Credit for LEED®", https://www.usgbc-ncc.org/storage/documents/Presentations/SAC/2012-1-19_demystifying.pdf.
- [20] USGBC, <http://www.usgbc.org/projects/suny-esf-gateway-center?view=overview>.
- [21] Gbig, "Sisecam ARGE Building: Green Building Information Gateway" <http://www.gbig.org/activities/leed-1000031156>.
- [22] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/y_mevzuat.aspx.
- [23] Uğurel, A. "Türkiye'de güneş enerjisi: sorunlar ve beklentiler" https://tr.boell.org/sites/default/files/downloads/ates_ugu_rel_1_sayi_tr.pdf.
- [24] Uluatam, E., "Yenilenebilir enerji teşvikleri", <http://www.tobb.org.tr/AvrupaBirligiDairesi/Dokumanlar/Raporlar/YenilenebilirEnerjiTevsikleri.pdf>.
- [25] Yeşil Bina, "LEED Gold sertifikalı Teknopark İstanbul", <http://www.teknoparkistanbul.com.tr/tr/leed-sertifikasyonu>.
- [26] Chowdhari Golf Center, <http://www.usf.edu/administrative-services/facilities/documents/leed-chowdhari-case-study.pdf>.
- [27] Bulgurcu, H., Kon, O. ve İlten, N. "Soğutucu akışkanların çevresel etkileri ile ilgili yeni yasal düzenlemeler ve hedefler", *VIII Uluslararası Tesilat Mühendisliği Kongresi*, 915-928, (2007).
- [28] Öncül, S., "LEED platin sertifikalı Türkiye'nin ilk binası", http://www.emo.org.tr/ekler/76441652bb56f52_ek.pdf.
- [29] USGBC, <http://www.usgbc.org/projects/washburn-center-children>.
- [30] Reid, R. and Thompson R., "The utilities and energy management department Carl J Eckhardt heating and power complex, supporting the district and energy requirements of LEED0NC 2009, demonstration of M\$V requirements for EA5". <https://utilities.utexas.edu/sustainability/leed/EAc5-MeasurementandVerification-UTguidelines.pdf>.
- [31] Yeşil Bina, "SİF İş Makinaları Binaları", Sayı 22. <http://www.yesilbinadergisi.com/?pid=29695#.V2L7YV KYdpk>
- [32] NCEF Pediatric Dental Center. <http://www.facilities.ufl.edu/leed/projects/docs/final%20Combined%20Edison%20Case%20Study.pdf>.

An Investigation of Injection Parameters of Ti-6Al-7Nb Fabricated by Powder Injection Molding

Mehmet SUBAŞI^{1*}, Asghar SAFARIAN², Çetin KARATAŞ³

¹Technical Sciences Vocational School of Higher Education, Gazi University, Ankara, Turkey

²Young Researchers and Elite Club, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

³Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Turkey

(Received : 12.05.2016 ; Accepted : 09.06.2016)

ABSTRACT

In this study, the optimized injection parameters for a feedstock obtained by mixing the powder of Ti-6Al-7Nb and 31wt% binder system (comprised of high-density polyethylene, Polypropylene, PEG 20000, paraffin wax and stearic acid), were determined. In order to investigate the fabrication of a component, flow rate, injection pressure, holding pressure, injection temperature and mold temperature were studied at three levels to obtain the optimum injection parameters. It was proven that for feedstock comprised of 69wt% Ti-6Al-7Nb powder, the suitable set of injection parameters were as follows: flow rate of 20 cm³/s, injection pressure of 1300 bar, holding pressure of 60%, injection temperature of 140 °C and mold temperature of 60 °C. At the end of the experiments the tensile strength of specimens fabricated with optimum parameters, were as high as 631 MPa.

Keywords: Ti-6Al-7Nb, Powder Injection Molding, Injection, Sintering.

1. INTRODUCTION

Ti and its alloys have high strength and good corrosion resistance as well as excellent biocompatibility. Hence, they are used for various automotive, aerospace and medical applications. Because of high strength and good corrosion resistance, high purity titanium has been utilized as a biomaterial for many years. A big difference between elasticity modulus of this alloy and that of bone (102-105 GPa and 4-30 GPa, respectively) causes bone structure to be destroyed easily. In order to solve this problem, different alloys of Ti have been developed. While the elasticity modulus of α -phase Ti alloys is 100-120 GPa, this value for β -phase alloys is as low as 60-80 GPa. Ti-6Al-4V, Ti-15Mo and Ti-6Al-7Nb are good examples of biocompatible Ti alloys. It was determined that although addition of some elements such as V, Ni and Al increases material strength, it causes bone cells breakage and some health problems. As the findings of some studies indicate, β phase or semi β phase Ti alloys do not exhibit such a property. Niobium (Nb) is an important element acting as a β phase stabilizer and it simultaneously allows obtaining high biocompatibility. In addition, the alloy of Ti-6Al-7Nb is preferred because of good strength, high wear and fatigue resistance and good machinability. As a result, Ti-6Al-7Nb alloy is a very attractive material for implant applications such as dental roots, joint endoprosthesis, and surgical implant components for hip replacement[1-7].

However, the high cost of components made of Ti, limits the areas of its application. The time of production is the main reason for such a high cost[8].

Powder Injection Molding (PIM) could reduce the production costs and improve the structure of components in many areas. PIM is an economical production method for components with small and complex geometry. In addition, PIM application causes unique flexibility in components design which cannot be achieved by other manufacturing techniques[9, 10]. These features of PIM result in higher desirability for production of components made of Ti and its alloys.

Recently, Powder Injection Molding has found an important status in production of components of titanium and its alloys. The principles of PIM production for Ti and its alloys are almost the same as other materials like stainless steel and ceramics. However, the process parameters must be more carefully optimized due to high reactivity of the material. There are many titanium powder and feedstock suppliers in the market whose technical knowledge and data of binder systems, and injection molding and sintering parameters are mostly confidential.

In light of the existing literature, it is known that the production of titanium and titanium alloys components by PIM is increasing. Although some researchers have simulated the injection process of stainless steel feedstock to optimize the parameters[11, 12], there are no efficient optimizations regarding powder and binder system and injection parameters (injection temperature, injection pressure, injection flow rate, mold temperature) for titanium based feedstocks [7, 13-19].

The aim of this study was to determine the required optimum injection parameters of PIM in biomedical applications to produce components of Ti-6Al-7Nb instead of Ti-6Al-4V (the latter is harmful for human body due to vanadium toxic effects).

*Corresponding Author

e-mail: msubasi@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 393-399

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Powder and Binder

In this study, gas-atomized spherical Ti-6Al-7Nb powder with size of $<25 \mu\text{m}$ and repose angle of 58° was supplied by TLS Technik GmbH company. The chemical properties of the powder used in the experiments are given in Table 1.

In PIM, the characteristics of the binder are almost as important as those of the powder. The required binder should shape powders in desired geometry and exhibit

Table 1. The chemical properties of Ti-6Al-7Nb powder

Element	Al	Nb	Fe	O	N	H	Ti
%	5.82	6.58	0.050	0.190	0.006	0.001	balance

properties such as good packing and adequate strength of green and brown part before sintering; it should also be completely extracted out of component after sintering. Powder and binder are mixed to form a homogenous feedstock.

The feedstock should be homogenous and have low viscosity so that it can be injected easily. These properties are provided by the aid of the binder system. The binder should consist of multiple elements which are needed to be gradually and sequentially extracted from the injected components. The binder system should be cheap and also possess some properties such as long shelf life and low thermal expansion coefficient. It should also be chemically neutral toward the powder [20, 21]. Accordingly, high density polyethylene, polypropylene, PEG 20000, paraffin and stearic acid have been used as the binder system in this study.

2.2. Powder Injection Molding

ArburgAllrounder220S injection machine was used to perform the injection process. The standard tensile specimens were injected using a standard mold manufactured based on dimensions presented by Metal Powder Industries Federation [22].

2.3. Debinding Process

Solvent and thermal debinding steps were applied to extract the binder out of injected components. Solvent debinding was carried out by immersing the components inside high purity heptane with temperature of 60°C for almost 20 hours. The specimens were then dried for 12 hours under the atmosphere of 60°C temperature. The thermal debinding process was completed in an atmosphere controlled furnace with high purity (99.999%) argon gas, passing through copper chips to ensure its purity. Figure 1 depicts the sequences of thermal debinding process. The heating ramping of $1^\circ\text{C}/\text{min}$ was selected to be constant for all sequences of thermal debinding.

2.4. Sintering Process

Sintering process was carried out after thermal debinding (pre-sintering step) in the same furnace and atmosphere.

Sintering heating rate, temperature and dwell time were $3^\circ\text{C}/\text{min}$, 1250°C and 60 min, respectively. Argon gas flow rate was constant and was selected to be as high as 5 L/min. After sintering, the specimens were cooled slowly with cooling ramping of $5^\circ\text{C}/\text{min}$.

2.5. Design of Experiment

Based on the literature review and some pervious experiments, the important process parameters, exhibited in Table 2, were selected to be studied. The effect of

injection parameters on sintered components tensile strength was determined.

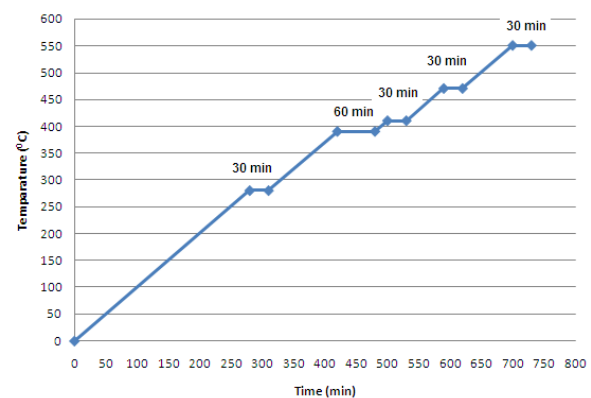


Figure 1. The sequences of thermal debinding

2. 6. Tensile Experiments

The tensile experiments were carried out by 50 kN Instron tensile machine, with cross-head speed of 1 mm/min, according to TS EN ISO 6892-1 standard.

3. RESULTS AND DISCUSSION

As a result of our experiments, specimens made of Ti-6Al-7Nb feedstocks with powder loading of 69% reached the highest tensile strength as high as 590 MPa. As another result of the experiments, the highest tensile strength of 590 MPa was achieved for components made of Ti-6Al-7Nb with powder loading of 69%. The optimum injection parameters leading to the highest tensile strength were determined as listed in Table 3. Using these optimum injection parameters, components were produced and sintered, giving tensile strength of 631MPa. According to Table 4 and Figure 2, the obtained optimum injection parameters were evaluated.

Table 2. The injection parameters

Injection parameters	Injection flow rate (cm ³ /s)	Injection pressure (bar)	Holding pressure (%)	Injection temperature (°C)	Mold temperature (°C)
1	20	1100	50	140	40
2	25	1200	60	150	50
3	30	1300	70	160	60

Table 3. The optimum injection parameters for feedstock Ti-6Al-7Nb

Flow rate (cm ³ /s)	Injection pressure (bar)	Holding pressure (%)	Injection temperature (°C)	Mold temperature (°C)
20	1300	60	140	60

high structural porosity. They have also mentioned that the furnace atmosphere and its control have a noticeable impact on the amount of porosity inside. This is while Limberget al.[16], who have utilized pressurized atmosphere and shot peening, have reported a tensile strength of 630 MPa. In the present study, the specimens were sintered without shot peening by normal

Table 4. The comparison of tensile strength values obtained in different conditions

Feedstock	The average tensile strength obtained for design of experiment (MPa)	The highest tensile strength obtained based on optimized injection parameters (MPa)	Wrought material tensile strength (MPa)
Ti-6Al-7Nb	590	631	900 (ASTM F1295-11)

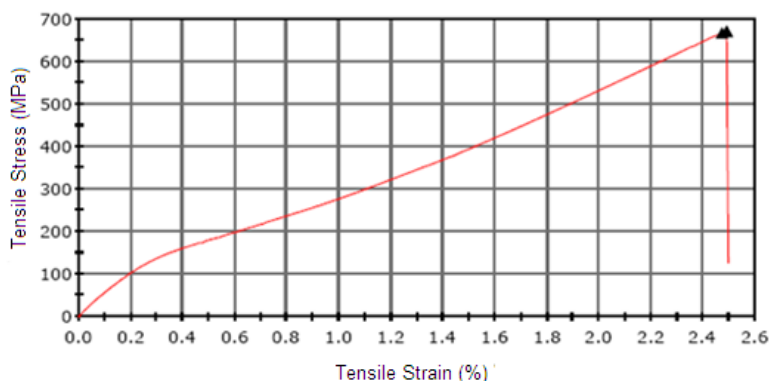


Figure 2. Tensile stress versus strain for the specimen made of Ti-6Al-7Nb feedstock sintered with optimized injection parameters

As it is presented in Figure 2, by applying the tensile strength test, the sintered material behave like cast iron. Components made by powder metallurgy also behave like cast iron[23].

Limberg et al.[16]studied the tensile strength of Ti 45Al 5Nb 0.2B 0.2C made by PIM, and reported the highest value of 630 MPa for specimens sintered and then shot peened under argon gas with pressure of 800kPa.Haoming et al.[24] investigated the mechanical properties of Ti-45Al-8.5Nb-(W, B, Y) specimens which reached the tensile strength of 382MPa. Gerling et al.[25] have reported the tensile strength of Ti-47Al-4 (Nb, Mn, Cr, Si, B) to be as high as 260 MPa for specimens sintered for 2 hours by HIP method.

Haoming[24] and Gerling [25] have pointed out that the main reason for low tensile strength of specimen was

atmosphere controlled furnace. The effect of shot peening on the mechanical properties of specimens is proven[26]. In this study, the tensile strength of 631MPa was developed without shot peening and with lower sintering temperature and dwell time (1250°C, 60 min) than those of other studies.

Zhao et al.[7] compared the mechanical properties of high purity titanium and its alloys consisting of Nb with varying percentages (10, 16 and 22%wt). As a result of their experiment, the Nb effect was determined. Ti-10Nb exhibited the tensile strength of 638MPa, whereas the amount for alloys Ti-16Nb and Ti-22Nb are 687 and 754MPa, respectively. It was concluded that Nb element increases the amount of tensile strength. Bidiaux et al.[19]investigated the mechanical properties of Ti alloy with 17%wt Nb. The sintering process was carried out under the argon atmosphere with applied sintering temperature and dwell time of 1300°C and four hours,

respectively, which resulted in the tensile strength of 749MPa.

Zhao[7] and Bidaux [19] determined the effect of Nb ratio on porosity of micro-structure. In both sintering and HIP processes, the amount of tensile strength increased when Nb ratio increased. In this study, the Ti alloy with 7% Nb was sintered at 1250°C for 60 minutes under argon atmosphere which resulted in a high tensile strength of 631 MPa. The tensile strength is however a little bit lower than the values developed by Zhao and Bidaux. This is due to using lower Nb (7%), and also lower sintering temperature, dwell time and a different atmosphere.

3.1. Evaluation of Molding Parameters

To produce a defect-free component in PIM, it is necessary to prepare a suitable feedstock, and develop optimized molding and sintering conditions. Important molding parameters include injection temperature, injection pressure, flow rate, holding pressure and mold temperature[27].

Injection pressure: In this study, the specimens were injected under the injection pressure of three levels of 1100, 1200 and 1300 bar. In the existing literature, it has been pointed out that utilizing high injection pressures can result in defects such as powder-binder separation, increased mold residual stress, and polymeric chains

(Figure 4). Because there was no powder-binder separation in the specimen injected with flow rate of 20 cm³/s, exhibiting the highest tensile strength, this value was selected as a suitable flow rate.



Figure 4. Specimen injected with pressure of 1100 bar, and flow rate of 30 cm³/s

Injection temperature: The higher the injection temperature is, the better flowability and moldability of feedstock will be. However, high injection temperatures have some disadvantages as the need for higher energy, and increasing the cooling time to eject the injected component from the mold. In addition, high injection temperatures can cause extra thermal stresses which negatively affect the dimensional accuracy of

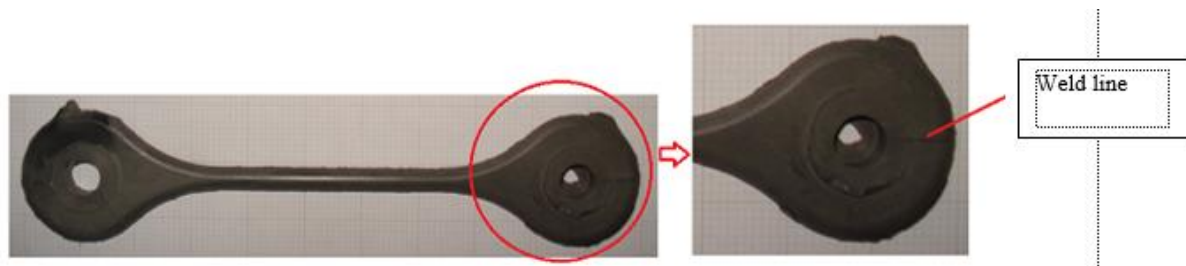


Figure 3. Specimen injected at pressure of 1100 bar and flow rate of 30 cm³/s

breakage[28, 29]. This condition will result in deteriorated mechanical properties of component. It also should be mentioned that the powder loading affects the injection pressure directly[30, 31]. As shown in Figure 3, the weld line was seen in specimens injected at low pressure of 1100 bar. For the feedstock of Ti-6Al-7Nb with powder loading of 69%, the injection pressure of 1300 bar was proven to be the appropriate injection pressure.

Flow rate: While the high flow rate can result in porosity and jetting specially in thick sections, the low flow rate deteriorates the surface quality[32]. In addition, high flow rate and injection pressure may contribute to powder-binder separation. High flow rate also can increase component surface stresses, which results in component warpage [28, 32]. In this study, no warpage, surface defects, and porosity were seen in specimens injected at three levels of flow rates of 20-25-30 cm³/s. However, in specimens injected with high flow rates, there were some signs of color changes which were interpreted to be the result of powder-binder separation

components [29]. In the present study, the dimensional changes of sintered component, known as shrinkage, for specimens injected at temperature of 140°C and 160°C were 11.8 and 13.39%, respectively. Regarding these points, the temperature of 140°C was selected as acceptable injection temperature.

Mold temperature: The other important injection parameter which affects the quality of the component is mold temperature. In PIM, higher mold temperatures result in decreased temperature fluctuations during injection process. It also has a positive effect on feedstock rheological properties[33]. In this study, three levels for mold temperature were selected, as 40, 50 and 60°C, among which the 60°C was the most appropriate value regarding the obtained tensile strength.

Holding pressure: Low holding pressure can cause porosity and slumping. Holding pressure, which guarantees the feedstock flow inside the mold until the end of gate solidification, prevents thermal stresses during the cooling stage[34]. It is also noticeable that holding pressure should not be considered as an

independent parameter. For example, low holding pressure and high mold temperature may result in some defects in injected components. Specimens were injected inside a mold with temperatures of 40, 50, 60°C and holding pressures of 50, 60, 70 % of injection pressure. Under such a condition, no defects related to holding pressure (defects such as porosity and slumping) were seen in specimens. For injection process with mold temperature of 60°C, the optimum holding pressure of 60% was selected.

3.2. Evaluation of The Microstructure of Specimens

The optic-microscopic views, SEM and tensile fracture surface views for sintered specimen with the highest tensile strength of Ti-6Al-7Nb are illustrated in Figures 5, 6 and 7, respectively. In this specimen with the tensile strength of 631 MPa, the phases of $\alpha+\beta$ were present at the structure. As it is graphically shown in the optic, SEM and tensile fracture surface view, the sintering occurred completely in specimen injected at optimum injection conditions.

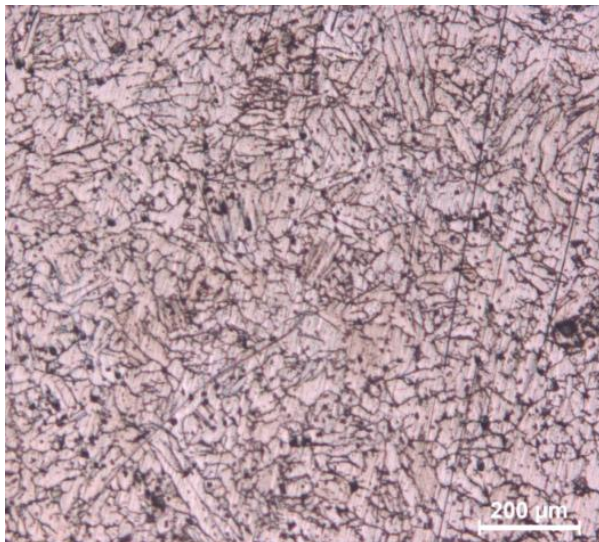
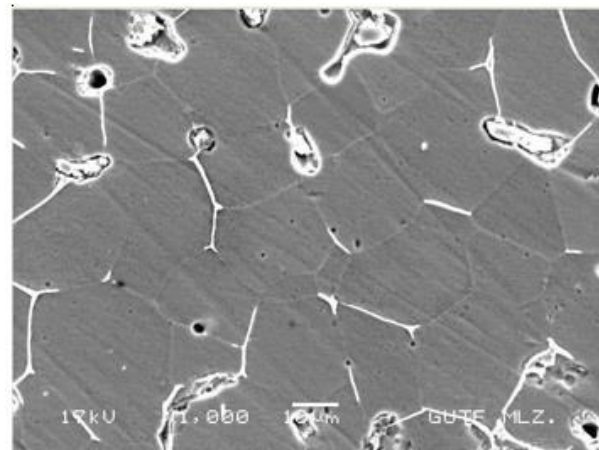


Figure 5. Optic microscopic views of sintered Ti-6Al-7Nb



Incorporation of grain after sintering

Figure 6. SEM view of specimen sintered at 1250°C and dwell time of 60 min, giving the tensile strength of 631MPa

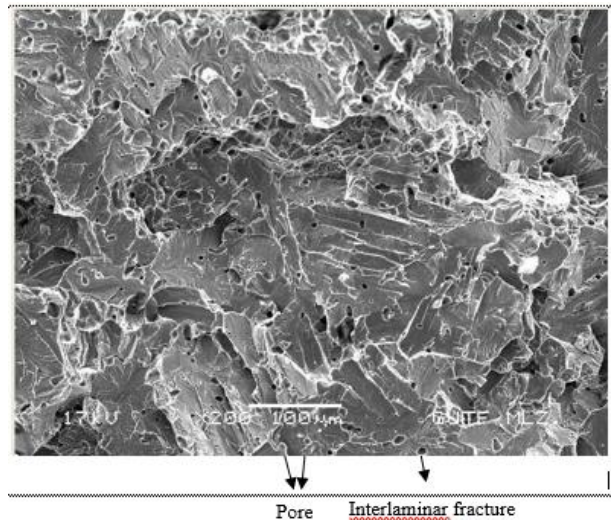


Figure 7. Tensile fracture surface of specimen sintered at 1250°C and dwell time of 60 min, giving the tensile strength of 631MPa

4. CONCLUSION

In this study, a feedstock was prepared using Ti-6Al-7Nb powders with powder loading of 69wt%. Using the prepared feedstock, standard tensile specimens were produced, and then injection parameters were optimized. The results of our experiments can be summarized as:

- By optimizing the injection process of Ti-6Al-7Nb feedstock, tensile strength of sintered specimens reached 631 MPa.
- Argon with high purity as a sintering atmosphere, passing through copper chips leads to sintered Ti specimens with high strength.
- Feedstock powder loading is an essential parameter affecting the injection pressure. For Ti-6Al-7Nb feedstock with powder loading of 69wt%, injection pressure of 1300 bar is a suitable value.
- To have high strength Ti-6Al-7Nb specimens, other injection parameters should also be taken into account. For this study, these parameters are as follow: flow rate of 20 cm³/s, holding pressure of 60%, and mold temperature of 60°C.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was sponsored by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK), Project No: 213M557 and Gazi University Research Funds, Project No: 07/2011-01. The authors would like to express their appreciation to TÜBİTAK organization and Gazi University for their financial supports.

REFERENCES

- Lee W.-S., Chen C.-W., "Dynamic mechanical properties and microstructure of Ti-6Al-7Nb biomedical alloy as function of strain rate", *Materials Science and Technology*, 29(9): 1055-1064, (2013).
- Biesiekierski A., Wang J., Abdel-Hady Gepreel M. and Wen C., "A new look at biomedical Ti-based shape memory alloys", *Acta Biomaterialia*, 8(5): 1661-1669, (2012).
- Niinomi M., "Recent metallic materials for biomedical application", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(3): 477-486, (2002).
- Wei Q., Wang L., Fu Y., Qin J., Lu W. and Zhang D., "Influence of oxygen content on microstructure and mechanical properties of Ti-Nb-Ta-Zr alloy", *Materials & Design*, 32(5): 2934-2939, (2011).
- Ramarolahy A., Castany P., Prima F., Laheurte P., Péron I. and Gloriant T., "Microstructure and mechanical behavior of superelastic Ti-24Nb-0.5O and Ti-24Nb-0.5N biomedical alloys", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 9: 83-90, (2012).
- Tane M., Nakano T., Kuramoto S., Hara M., Niinomi M., Takesue N., Yano T. and Nakajima H., "Low Young's modulus in Ti-Nb-Ta-Zr-O alloys: Cold working and oxygen effects", *Acta Materialia*, 59(18): 6975-6988, (2011).
- Zhao D., Chang K., Ebel T., Qian M., Willumeit R., Yan M. and Pyczak F., "Microstructure and mechanical behavior of metal injection molded Ti-Nb binary alloys as biomedical material", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 28: 171-182, (2013).
- Imam M.A., Froes F.H. and Housley K.L., "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", New York, Wiley, (2010).
- Ni X.-L., Yin H.-Q., Liu L., Yi S.-J. and Qu X.-H., "Injection molding and debinding of micro gears fabricated by micro powder injection molding", *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20(1): 82-87, (2013).
- Yi S.-J., Yin H.-Q., Chen K., Khan D.-F., Zheng Q.-J. and Qu X.-H., "Microstructure and properties of nano-TiN modified Ti(C,N)-based cermets fabricated by powder injection molding and die pressing", *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20(11): 1115-1121, (2013).
- Ahn S., Park S. J., Lee S., Atre S. V. and German R. M., "Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder injection molding process", *Powder Technology*, 193(2): 162-169, (2009).
- Karataş Ç., Sözen A., Arcaklioglu E. and Ergüney S., "Investigation of mouldability for feedstocks used powder injection moulding", *Materials & Design*, 29(9): 1713-1724, (2008).
- Chen L.-J., Li T., Li Y.-M., He H., Hu Y.-H., "Porous titanium implants fabricated by metal injection molding", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(5): 1174-1179, (2009).
- Chen G., Cao P., Wen G. and Edmonds N., "Debinding behaviour of a water soluble PEG/PMMA binder for Ti metal injection moulding", *Materials Chemistry and Physics*, 139(2-3): 557-565, (2013).
- German R., "Progress in Titanium Metal Powder Injection Molding", *Materials*, 6(8): 3641-3662, (2013).
- Limberg W., Ebel T., Pyczak F., Oehring M. and Schimansky F. P., "Influence of the sintering atmosphere on the tensile properties of MIM-processed Ti 45Al 5Nb 0.2B 0.2C", *Materials Science and Engineering: A*, 552: 323-329, (2012).
- Nor N. H. M., Muhamad N., Ihsan A. K. A. M. and Jamaludin K. R., "Sintering Parameter Optimization of Ti-6Al-4V Metal Injection Molding for Highest Strength Using Palm Stearin Binder", *Procedia Engineering*, 68: 359-364, (2013).
- Obasi G. C., Ferri O. M., Ebel T. and Bormann R., "Influence of processing parameters on mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by MIM", *Materials Science and Engineering: A*, 527(16-17): 3929-3935, (2010).
- Bidaux J.-E., Closuit C., Rodriguez-Arbaizar M. and Carreño-Morelli E., "Metal injection moulding of Ti-Nb alloys for implant application", *European Cells and Materials*, 22(4): 32, (2011).
- Setasuwon P., Bunchavimonchet A. and Danchaiwitt S., "The effects of binder components in wax/oil systems for metal injection molding", *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1-3): 94-100, (2008).
- Yang W.-W., Yang K.-Y. and Hon M.-H., "Effects of PEG molecular weights on rheological behavior of alumina injection molding feedstocks", *Materials Chemistry and Physics*, 78(2): 416-424, (2003).
- MPFI standart 50, "Metal Enjeksiyon Kalıplamada Bağlayıcı Giderme Ve Sinterlemede Çekme Testi Specimenleri İçin Metot", *Metal Powder Industries Federation*, (1992).
- Karataş Ç., "Toz Enjeksiyon Kalıplamada Karışımın Reolojisi", *Doktora tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, (1997).
- Zhang H., He X., Qu X. and Zhao L., "Microstructure and mechanical properties of high Nb containing TiAl alloy parts fabricated by metal injection molding", *Materials Science and Engineering: A*, 526(1-2): 31-37, (2009).
- Gerling R., Schimansky F.P., "Prospects for metal injection moulding using a gamma titanium aluminide based alloy powder", *Materials Science and Engineering: A*, 329: 45-49, (2002).
- Ferri O.M., Ebel T. and Bormann R., "Influence of surface quality and porosity on fatigue behaviour of Ti-6Al-4V components processed by MIM", *Materials Science and Engineering: A*, 527(7-8): 1800-1805, (2010).
- Subaşı M., "The Investigation Of Optimum Parameters To Be Used In Production Of Titanium Parts With Powder Injection Molding", *PhD Thesis*, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, (2014).
- Lee S.W., Ahn S., Whang C.J., Park S.J., Atre S.V., Kim J. and German R.M., "Effects of process parameters in plastic, metal, and ceramic injection molding processes", *Korea-Australia Rheology Journal*, 23(3): 127-138, (2011).
- Luo T.G., Qu X. H., Qin M. L. and Ouyang M. L., "Dimension precision of metal injection molded pure tungsten", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27(3): 615-620, (2009).

30. Shibo G., Xuanhui Q., Xinbo H., Ting Z. and Bohua D., "Powder injection molding of Ti-6Al-4V alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 173(3): 310-314, (2006).
31. Sidambe A.T., Figueroa I.A., Hamilton H.G.C. and Todd L., "Taguchi optimization of MIM titanium sintering", *International Journal of Powder Metallurgy*, 47(6): 21-27, (2011).
32. Asghar S., Karataş Ç., "The impact of injection velocity on the defects in thick components fabricated by inserted metal injection molding", *International Journal of Materials Research*, 106(6): 647-650, (2015).
33. Fang W., He X., Zhang R., Yang S. and Qu X., "The effects of filling patterns on the powder-binder separation in powder injection molding", *Powder Technology*, 256: 367-376, (2014).
34. Fu G., Loh N. H., Tor S. B., Murakoshi Y. and Maeda R., "Effects of Injection Molding Parameters on the Production of Microstructures by Micropowder Injection Molding", *Materials and Manufacturing Processes*, 20(6): 977-985, (2005).

Kumyer Mevkii Arkeolojik Seramiklerin ESR Analizi ve ESR Yaş Tayinine Uygunluğunun Belirlenmesi

Gamze BAKKAL^{1*}, Ülkü SAYIN^{1,2}, İlker IŞIK³, Ayhan ÖZMEN^{1,2}, Hamdi Şükür KILIÇ^{1,2}

¹Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Konya, Türkiye

²Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, Konya, Türkiye

³Selçuk Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü, Konya, Türkiye

(Geliş/Received : 14.04.2016 ; Kabul/Accepted : 10.06.2016)

ÖZ

Bu çalışmada Kumyer Mevkii arkeolojik seramik örneklerindeki kuvars minerallerinin yapısında bulunan radikaller Elektron Spin Rezonans (ESR) tekniği ile tespit edildi. ESR spektrumları Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan JEOL JESFA-300 X-band ESR spektrometresi ile farklı mikrodalga güçlerinde ve farklı sıcaklıklarda kaydedildi. Seramik örneklerindeki kuvars minerallerinde doğal ışınlama ile oluşan Al, Ti-Li, Ti-H ve Ge paramanyetik merkezleri olduğu belirlendi ve bu merkezlerin ESR parametreleri hesaplandı. Ayrıca, Kumyer Mevkii arkeolojik seramik örneklerinin ESR yaş tayini için uygun malzemeler olup olmadıklarını belirlemek üzere yapay olarak ışınlanmış örneklerin 300K ve 81K sıcaklığında kaydedilen ESR spektrumları analiz edildi. Laboratuvar ortamında ışınlanmış örnekler için eş süreli ısıtma deneyi yapılarak doğal örneklerde bulunan Al ve Ti merkezlerinin ısı kararlılıkları belirlendi. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Kumyer mevkii arkeolojik seramik örneklerindeki kilden elde edilen kuvars minerallerinin radyasyona duyarlı ve kararlı paramanyetik merkezler içerdiği ve bunun sonucunda bu örneklerin ESR tekniği ile tarihlendirilebileceği anlaşıldı.

Anahtar Kelimeler: Elektron Spin Rezonans (ESR), ESR Yaş Tayini, Paramanyetik Merkez, Kuvars, Arkeolojik Seramik.

ESR Analysis of Kumyer Location Archeological Ceramics and Determination of Suitability for ESR Dating

ABSTRACT

In this study paramagnetic centers in quartz minerals of Kumyer Location archeological samples were identified using Electron Spin Resonance (ESR) technique. ESR spectra were recorded at different microwave powers and various spectrometer temperatures with JEOL JESFa-300 X-band ESR spectrometer located in Selcuk University Advanced Technology Research and Application Center (İLTEK). It was determined that there is Al, Ti-Li, Ti-H and Ge paramagnetic centers which were produced by natural radiation in quartz minerals of ceramic samples and ESR parameters of these centers were measured. In order to determine whereas Kumyer Location archeological ceramics are suitable samples for ESR dating, ESR spectra of artificial irradiated samples recorded at 300K and 81K temperature were analyzed. Thermal stability of Al and Ti centers were determined by isochronal annealing experiment of artificial irradiated samples. As a result of experimental studies, it was determined that quartz minerals of Kumyer location archeological ceramic samples have stable and radiation dependent paramagnetic centers thus, these samples can be used for ESR dating.

Keywords: Electron Spin Resonance (ESR), ESR Dating, Paramagnetic Center, Quartz, Archeological Ceramic.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektron Spin Rezonans (ESR), çeşitli yapılar içinde ortaya çıkan paramanyetik merkezleri doğrudan incelememizi sağlayan spektroskopik bir tekniktir. Bu paramanyetik merkezler doğal olarak olabildiği gibi ısı etkileşme, kimyasal tepkime, mekanik etki ve ışınlama gibi farklı nedenlerden dolayı oluşabilir. ESR spektroskopisi tekniği maddenin yapısındaki paramanyetik merkezlerin sahip olduğu dejenere enerji seviyelerini sabit bir manyetik alanla yarar ve elektron spinlerinin

manyetik alana paralel veya antiparalel yönelmesini sağlar. İki farklı enerji seviyesinde bulunan elektronlar sabit manyetik alan etrafında dönü hareketi yapar. Daha sonra sistem değişken bir manyetik alanla (*mikrodalga*) uyarılır ve mikrodalga frekansı enerji seviyeleri arasındaki farka karşılık geldiğinde rezonans gerçekleşerek bu seviyeler arasında geçiş meydana gelir. ESR tekniği bu geçiş sırasında soğurulan enerjiyi inceleyerek sistemin manyetik özellikleri hakkında bilgi edinmemizi sağlar. ESR; paramanyetik merkezlerin doğrudan tespitinde kullanılan tek ve çok önemli bir tekniktir [1-3].

Radyasyon dozu, radyasyonla uyarılmış örgü kusurları veya paramanyetik merkezlerin ESR sinyal şiddetinden

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: gamzebakal@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 401-408

belirlenebilir. Doğal radyasyonla oluşturulmuş benzer paramanyetik merkezler arkeolojik ve jeolojik materyallerde zaman içinde birikir. ESR tekniğini kullanarak ilk arkeolojik çalışmalar Mc Morris tarafından yapılmıştır [4,5]. Maurer ve arkadaşları seramiklerin ESR ile tarihlenmesinin mümkün olduğunu göstermiştir [6]. Daha sonra Bartoll ve Ikeya'nın çalışmasıyla bu durum kesinlik kazanarak yaklaşık 5.000 yıllık arkeolojik seramiklerde ESR tarihleme yöntemiyle büyük bir başarı sağlanmıştır. Bartoll ve Ikeya arkeolojik seramiklerde doğal radyasyonun oluşturduğu Al ve Ti merkezlerini kullanarak ESR tarihleme çalışması yapmışlardır [7]. Seramik yapısında SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 içeren ve bazen biraz karbonat içerebilen kilden oluşmaktadır [8]. Seramik içerisinde kimyasal yollarla ayırt edilen kuvars içindeki alüminyum hol merkezine $[\text{AlO}_4]^-$ bağlı ESR sinyali ESR yaş tayini için çok kullanışlıdır ve birçok ESR grubu tarafından incelenmiştir [7, 9, 10]. Bu paramanyetik Al merkezi bir Si^{4+} iyonu yerine bir Al^{3+} iyonunun iyonize radyasyon etkisiyle komşu oksijenden koparılan bir elektron ile birlikte geçmesi olarak tanımlanır [11, 12].

Bu çalışmada Kumyer Mevkii'nden alınan arkeolojik seramik örneği ESR tekniği ile analiz edildi, yapılarında doğal radyasyonla oluşan paramanyetik merkezler belirlendi. Ayrıca bu paramanyetik merkezlerin radyasyon dozuna duyarlılığı ve kararlılığı incelenerek ESR yaş tayini için uygunluğu araştırıldı. Örneklerin alındığı Kumyer Mevkii; Muğla ili, Yatağan ilçesi, Yeşilbağcılar Beldesi yakınlarındaki Türkiye Kömür İşletmeleri çalışma sahası içerisinde yer alan Tunç Çağı'na ait olduğu düşünülen (M.Ö.3000-1200) bir Nekropol (mezar) alanıdır. Burada 2009 yılı süresince yapılan kazı çalışmaları sonucunda çok sayıda Pytos mezar bulunmuş ve bu mezarlardan pişmiş toprak eserler çıkarılmıştır.

2. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

İncelenen arkeolojik seramik örnekleri güneş ışığı ve nemden etkilenmeyecek biçimde alındı ve uygun koşullarda laboratuvar ortamına taşındı. Yüzeyindeki safsızlıklardan arındırılmak için saf su ile birkaç kez yıkandı ve etüvde 50°C de kurutuldu. Ardından α -ışınları etkisinden kurtulmak için yaklaşık 1mm kalınlığındaki yüzeyi bisturi ile kazındı [13]. Örnekler dikkatli bir biçimde kırılarak iri parçalara ayrıldı ve mekanik etkiyle radikal oluşturmayacak şekilde yumuşak vurma adımlarıyla agat havanda öğütüldü. Öğütülen örnekler uygun eleklerden geçirildi. Kuvars dışında istenmeyen diğer mineralleri temizlemek ve öğütme sonucu oluşan kusurlardan kurtulmak için örnekler %36'luk HCl çözütüsünde 1 gece bekletildi, saf su ile defalarca yıkandı ve 50°C etüvde kurutuldu. Örneklerin içindeki manyetik maddeleri temizlemek için "manyetik ayırma yöntemi" uygulandı. Önce küçük bir mıknatıs yardımıyla örnekler içerisindeki kuvvetli manyetik maddeler, ardından daha güçlü bir mıknatısa sahip manyetik

separatör yardımıyla daha zayıf manyetik maddeler temizlendi. Örnekler %40'luk HF çözütüsünde 40dk bekletildi ve saf su ile yıkanarak 50°C etüvde kurutuldu. Kimyasal ve fiziksel işlemde sonra örnekler yeniden elekten geçirildi ve ESR spektrumlarında tek kristal etkisinden kurtulmak için bütün örneklerin tane boyutunun $250\mu\text{m} > \text{örnek} > 125\mu\text{m}$ aralığında olması sağlandı.

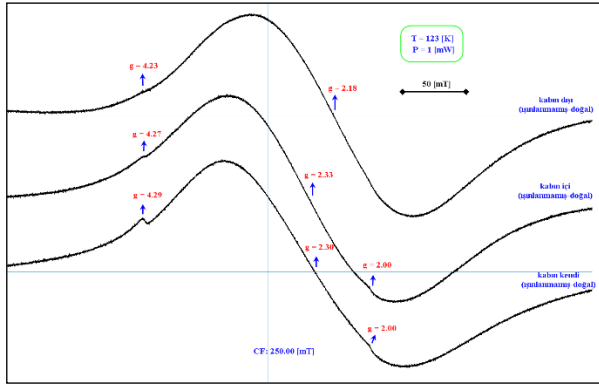
Arkeolojik seramik örneğinin ESR spektrumları 300K, 123K ve 81K sıcaklıklarında, farklı manyetik alan tarama aralıklarında, 0.12mT modülasyon alan genişliğinde, 30 s tarama zamanında, 100 kHz modülasyon ve 9.24 GHz mikrodalga frekansında, farklı mikrodalga güçlerinde kaydedilmiştir. Oda sıcaklığı ve 123 K sıcaklığı ESR ölçümleri için Selçuk Üniversitesi İleri Araştırma Teknoloji ve Uygulama Merkezi (İLTEK) ESR laboratuvarında bulunan JEOL JES-FA300, 81K sıcaklığı için Japonya Okayama Üniversitesinde bulunan JEOL JESPx-2300 X-band CW ESR spektrometresi kullanıldı. Işınlama işlemi için Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Çekmece Nükleer Araştırma Merkezinde bulunan ^{60}Co gama kaynağı kullanıldı.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Işınlanmamış-Doğal Örneklerin ESR Analizi (ESR Analysis of Natural Samples)

Çanak-çömlek veya günümüzdeki adıyla seramik, topraktan yapıldığı için yapısında demir bulundurmaktadır. Üç değerlikli demir, Fe^{3+} , $3d^5$ şeklinde elektron konfügurasyonuna sahiptir ve paramanyettir. Fe^{4+} değerlikli magnetit (Fe_3O_4) güçlü bir ferrimanyetik mineraldir ve ESR spektrumu 100mT dan düşük alan bölgesinde ($g=9.0$) şiddetli bir sinyal verir. Hematit (Fe_2O_3) ise magnetitten daha oksidize formdadır ve -100°C derecenin üzerinde zayıf ferromanyettir. Hematit, $g=2.3$ değerinde geniş bir düşük alan sinyali verir ve büyük ortorombik kristal alanından kaynaklanan, $g=4.3$ değerinde bir başka sinyale daha sahiptir. $g=6.0$ bölgesindeki sinyal ise eksenel alan yarılmasından kaynaklanır [14-16]. Isıtma sonucunda oksidasyonun devam etmesiyle magnetit sinyali sönerken hematit sinyal bileşenini artırır.

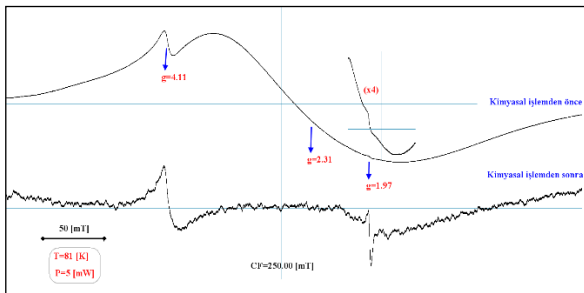
Bu araştırma makalesinde öncelikle Kumyer seramik örneğinin kazınan iç ve dış yüzeylerinin ve orta bölgesinin ESR spektrumları 123K sıcaklığında ve 1mW mikrodalga gücünde kaydedilmiştir. Şekil 1' de verilen bu spektrumlar göz önüne alınarak kabın dışının oksidasyon nedeniyle daha şiddetli hematit pikine sahip olduğunu, bu nedenle kabın diğer kısımlarında gözlenen ve muhtemelen inorganik bir radikale ait olan $g=2.0$ pikinin zarflanma nedeniyle gözlenemediğini söyleyebiliriz.



Şekil 1. Işınlanmamış-doğal Kumyer örneğinin 123K sıcaklığında ESR spektrumları (ESR spectra of natural Kumyer sample at 123K temperature)

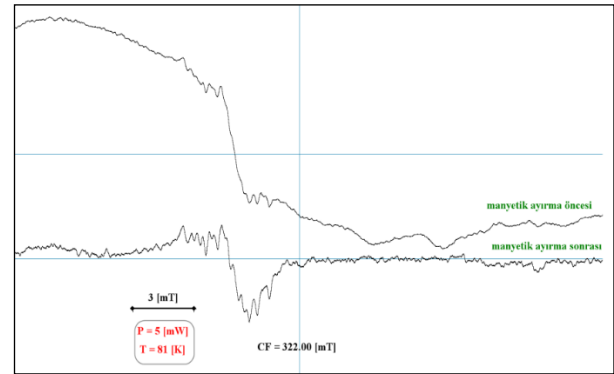
Kabın iç yüzeyinin kazınmasıyla elde ettiğimiz “kabın içi” örneğindeki hematitin ortorombik kristal alanından kaynaklanan $g=4.27$ piki “kabın kendisi” olarak etiklediğimiz iç ve dış yüzeyi kazınmış örnekten elde edilen spektruma göre daha zayıftır. Hematit sinyalinin “kabın dışı” ve “kabın içi” örneklerinde daha şiddetli olması ve magnetit piki gözlenmemesi arkeolojik seramiğin yüksek sıcaklıklarda tavlandığını işaret etmektedir.

Seramik örneklerinin ESR tekniği ile yaşını belirleyebilmek için örnek içinde bulunan kuvars mineralleri ayıklanıp kullanılmalıdır. Kuvars mineralleri içinde yaş tayini için uygun olan ışınlamaya duyarlı paramanyetik merkezler bulunabilir. Bu paramanyetik merkezlerin ESR sinyalleri $g=2.3$ değerine sahip geniş hematit piki bölgesinde yer alır. Bu durum yapısında bol miktarda demir oksit türevleri bulunduran örneklerin ESR ile tarihlendirilmesini zorlaştırabilir hatta imkânsızlaştırabilir. Bu problemi aşmak için örneklerin kimyasal ve fiziksel metotlar kullanılarak demirden temizlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Kumyer seramik örneği HCl ve HF çözücülerine maruz bırakıldı. Şekil 2’de kimyasal işlemden önce ve sonra Kumyer seramik örneğinin 81K sıcaklığında ve 500 mT tarama aralığında kaydedilen ESR spektrumları verildi. Buna göre, kimyasal işlemle seramik örneğinin hematit mineralinin $g=2.31$ değerine sahip sinyal bileşeninden temizlendiği ve bu sayede spektrumda $g=1.97$ pikinin netleştiği görülmektedir.



Şekil 2. Işınlanmamış-doğal Kumyer örneğinin kimyasal işlemden önce ve sonra ESR spektrumları (ESR spectra of natural Kumyer sample before and after chemical treatment)

Hematitin $g=4.11$ piki halen gözlenmektedir fakat bu sinyal ESR yaş tayini çalışmalarında kullanılan $g=2$ bölgesindeki paramanyetik merkezleri etkilememektedir [15,17,18]. Bunun yanı sıra, tarihlendirmede kullanılan paramanyetik merkezlerin sinyal şiddetinin doğru ölçülmesi çok önemlidir, bu sinyallerin altında kalan başka merkezlere ait sinyal bileşenleri örneğin yaşının hatalı ölçülmesine sebep olabilir. Bu amaçla kimyasal işlemden geçirilmiş Kumyer örneğinin ESR spektrumları daha dar tarama aralığında incelendi. Ancak hematitin $g=2.3$ bölgesindeki ESR pikinin zayıf şiddette de olsa gözlendiği ve bu manyetik alan bölgesindeki tarihlendirmede kullanılabilir Al paramanyetik merkezine ait piklerin net gözlenmemesine, böylece Al merkezinin ESR pik şiddetlerinin doğru ölçülmemesine neden olduğu belirlendi. Bu pikleri oluşturan hematit demir oksit mineralleri yüksek manyetik alan oluşturan manyetik ayırma cihazı kullanılarak temizlendi. Kimyasal ve fiziksel işlemlerin ardından kuvars mineralleri elde edildi. Şekil 3’de manyetik ayırma öncesi ve sonrası örneklerin 81K sıcaklığında dar tarama aralığında kaydedilen ESR spektrumları verilmiştir.



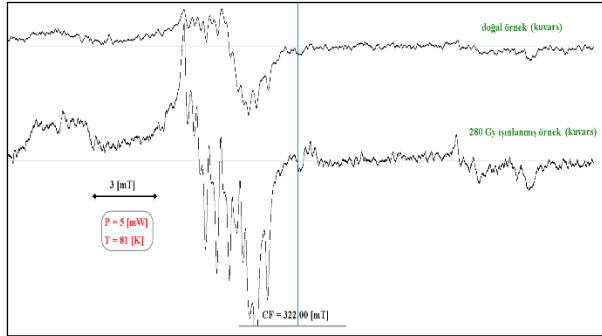
Şekil 3. Doğal Kumyer örneğinin manyetik ayırma öncesi ve sonrası ESR spektrumları (ESR spectra of natural Kumyer sample before and after magnetic separation)

Manyetik ayırma işlemi sonrası kaydedilen ESR spektrumu incelendiğinde Kumyer arkeolojik seramik örneğinden ayıklanan kuvars tanelerinin yapısında kararlı paramanyetik $[AlO_4]^\ominus$, Al merkezi, bulunduğu tespit edildi. Laboratuvarında yapay olarak ışınlanmayan ve doğal örnek olarak etiklediğimiz bu örnekte Al merkezinin gözlenmesi ve bu merkeze ait ESR pik şiddetinin ölçülebilir nitelikte olması bu örneklerin ESR tekniği kullanılarak tarihlendirilebileceğinin önemli bir göstergesidir [7,9, 10,19]. Ayrıca Şekil 3’ de verilen manyetik ayırma sonrası alınan spektrumda yüksek manyetik alan bölgesinde gözlendiği gibi 81 K sıcaklığında doğal Kumyer örneğinden ayıklanan kuvars mineralinde $[TiO_4/Li]^\ominus$, Ti-Li, ve $[TiO_4/H]^\ominus$, Ti-H, merkezlerine ait pikler tespit edildi.

3.2. Işınlanmış Örneklerin ESR Analizi (ESR Analysis of Irradiated Samples)

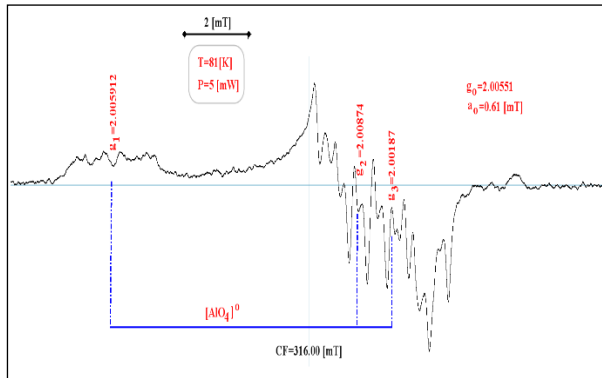
Doğal örnekte gözlenen paramanyetik merkezlerin ışınlamaya duyarlılığını tespit edebilmek için yapay ışınlama öncesi ve sonrası kuvars örneklerinin 81K

sıcaklığında ESR spektrumları alındı. Şekil 4’de verilen bu spektrumlardan Al ve Ti merkezinin ışınlamaya duyarlı olduğu ve ESR pik şiddetlerinin arttığı gözlemlendi. Bu durum her iki paramanyetik merkezinde bu örneklerin ESR yaş tayini çalışmalarında kullanılabilir olmasının ilk ve önemli bir göstergesidir. Fakat spektrumlardan da görüldüğü üzere Ti merkezlerine ait piklerin ayırılması ve ESR pik şiddetlerinin ölçülmesi zordur. Buna rağmen her iki merkeze ait piklerin davranışları ESR yaş tayinine uygunluğunu araştırmak üzere farklı ESR spektrometre parametrelerinde incelendi.



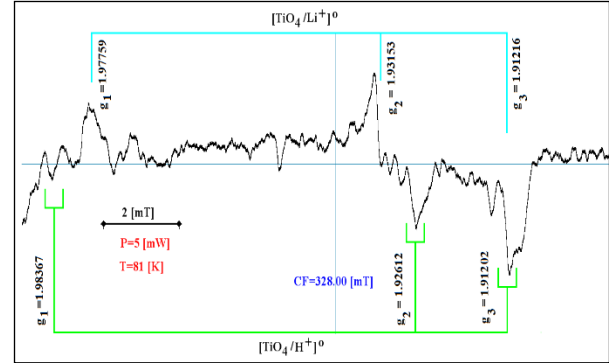
Şekil 4. Doğal ve 280Gy ışınlanmış kuvars örneklerinin 81K sıcaklığında ESR spektrumları (ESR spectra of natural and 280 Gy irradiated quartz samples at 81K temperature)

Kumyer örneğinden ayıklanan kuvars tanelerinde bulunan $[AlO_4]^0$, Al merkezinin ESR parametreleri 280Gy ışınlanmış kuvars tanelerinin 81K sıcaklığında ve 5mW mikrodalga gücünde kaydedilen ESR spektrumu kullanılarak hesaplandı. 280Gy ışınlanmış örnekteki Al merkezine ait ESR spektrumu ve bu merkezin ESR parametreleri Şekil 5’de verilmiştir. Ortorombik simetriye sahip olan paramanyetik merkezin spektroskopik yarılma çarpanının izotropik değeri $g_0=2.0055$ ve çekirdek spini 5/2 olan Al atomu nedeniyle gözlenen aşırı ince yapı yarılmalarının izotropik değeri $a_0=0.61$ mT olarak ölçüldü. Elde edilen sonuçlar literatürde bu merkezler için verilen değerlerle uyumludur [7, 9, 10,20-25].



Şekil 5. Kumyer arkeolojik seramik örneğindeki $[AlO_4]^0$ merkezinin ESR parametreleri (ESR parameters of $[AlO_4]^0$ center in Kumyer archeological ceramic sample)

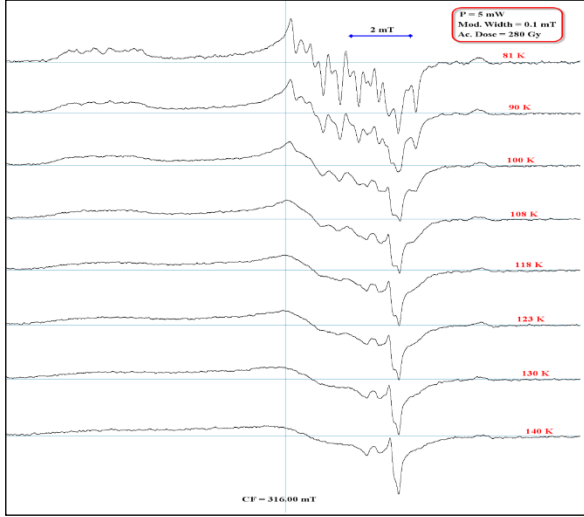
Kumyer örneğinde tespit edilen Ti-Li ve Ti-H merkezlerinin ESR parametreleri ise 200Gy ışınlanmış örneğe ait Şekil 6’da verilen spektrum kullanılarak hesaplandı ve literatürdeki değerleriyle uyumlu bulundu [22, 25-31].



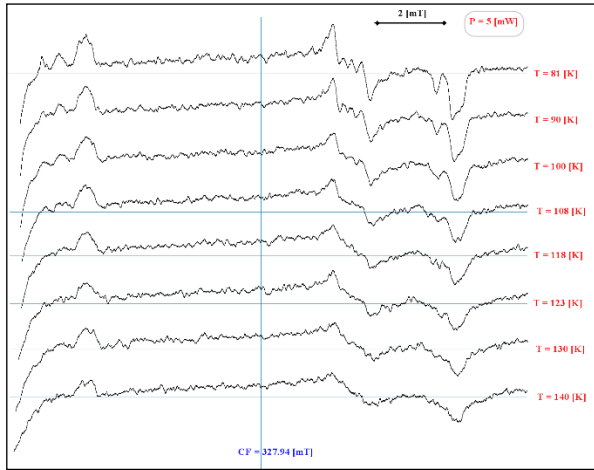
Şekil 6. Kumyer arkeolojik seramik örneğindeki Ti merkezlerinin ESR parametreleri (ESR parameters of Ti centers in Kumyer archeological ceramic sample)

3.3. Paramanyetik Merkez Tayininde ESR Spektrometre Sıcaklığının Önemi (The Importance of ESR Spectrometer Temperature for Identification of Paramagnetic Centers)

İncelenen seramik örneğindeki $[AlO_4]^0$, $[TiO_4/Li]^0$ ve $[TiO_4/H]^0$ paramanyetik merkezlerinin spektrometre sıcaklığına bağlılığını belirleyebilmek için kuvars örneklerinin ESR spektrumları Al merkezi için 316.00mT ve Ti merkezleri için 327.94mT merkez alanında ve 5mW mikrodalga gücünde kaydedildi. Al merkezi için Şekil 7’de Ti merkezleri için Şekil 8’de verilen spektrumlardan Al ve Ti merkezlerine ait piklerin daha net gözlenebilmesi ve bu merkezler kullanılarak tarihlendirme yapılabilmesi için 90K sıcaklığından daha düşük spektrometre sıcaklıklarında çalışılması gerektiği görüldü. Sıcaklık artıktıkça bu paramanyetik merkezlerin sinyal şiddeti zayıfladı ve aşırı ince yapı yarılmalarının tespiti zorlaştı. Hatta 100K sıcaklığından daha yukarı sıcaklıklarda merkezlerin tayin edilmesi imkânsızlaştı. Al merkezinin aşırı ince yapı pikleri 90K sıcaklığında iç içe girerek sinyal şiddetleri doğru ölçülemez hale geldi. Ti-H merkezi 108K sıcaklığında tamamen söndü ve Ti-Li merkezinin sinyal şiddeti oda sıcaklığına yaklaştıkça zayıfladığı için sinyaller gürültüyle karıştı. Böylece ESR yaş tayini çalışmalarında Al ve Ti merkezleri kullanılacaksa uygun spektrometre sıcaklığının 77-81K arasında olması gerektiği belirlendi.

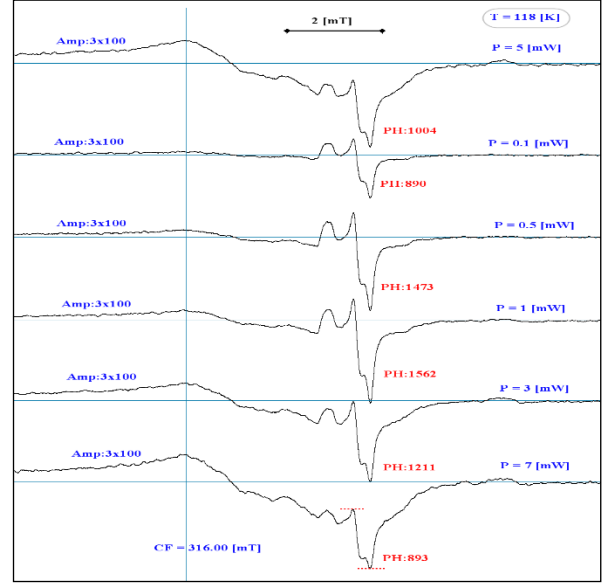


Şekil 7. $[\text{AlO}_4]^0$ paramanyetik merkezinin spektrometre sıcaklığına bağlılığı (Spectrometer temperature dependence of $[\text{AlO}_4]^0$ paramagnetic center)

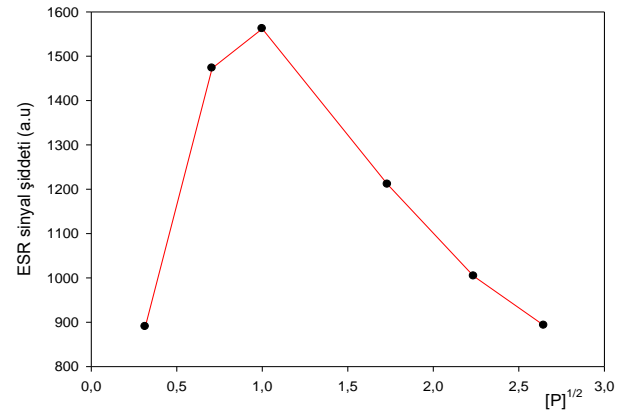


Şekil 8. $[\text{TiO}_4/\text{H}^+]^0$ ve $[\text{TiO}_4/\text{Li}^+]^0$ paramanyetik merkezlerinin spektrometre sıcaklığına bağlılığı (Figure 8. Spectrometer temperature dependence of $[\text{TiO}_4/\text{H}^+]^0$ and $[\text{TiO}_4/\text{Li}^+]^0$ paramagnetic centers)

Şekil 7' deki Al merkezi için farklı sıcaklıklarda kaydedilen spektrumlar incelendiğinde bir başka önemli ayrıntı gözlemlendi. Bu spektrumlarda 108K sıcaklığından sonra Al merkezine ait piklerin artık gözlenmediği fakat oda sıcaklığına doğru yaklaştıkça Al merkezinin manyetik alan bölgesinde başka bir pikin ortaya çıktığı görüldü. 118K spektrometre sıcaklığı ve 5mW mikrodalga gücünde gözlenen bu pikin hangi radikale ait olduğunu belirlemek üzere bu sıcaklıkta güç çalışması yapıldı. Şekil 9' da verilen spektrumların ilki 5mW mikrodalga gücünde diğerleri ise sırasıyla 0.1mW, 0.5mW, 1mW, 3mW, 7mW mikrodalga güçlerinde kaydedilen spektrumlardır. Şekilde sinyallerin pik yükseklikler PH ile gösterildi. Bu radikalın ESR sinyal şiddetinin mikrodalga gücüne bağlı değişim grafiği Şekil 10'da verildi. Grafikten ve spektrumlardan da görüldüğü gibi radikalın gözlemlendiği en uygun mikrodalga gücü 1mW'dır. Daha yukarı güç değerlerinde doyum meydana gelmekte ve sinyal şiddeti zayıflamaktadır.

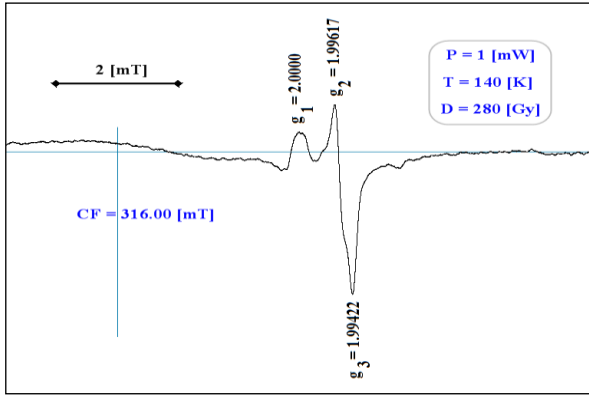


Şekil 9. Kumyer seramiği kuvars örneği 118K sıcaklığında mikrodalga güç çalışması (Microwave power experiment for quartz sample of Kumyer ceramics at 118K temperature)



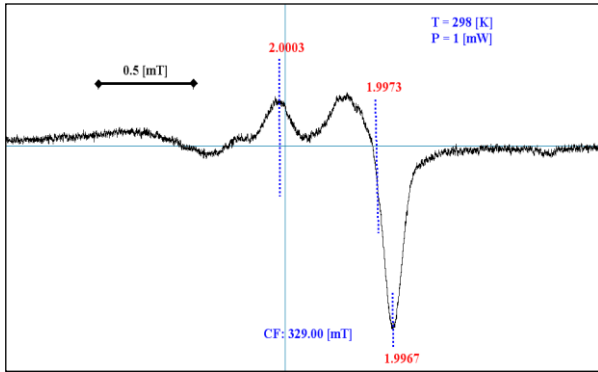
Şekil 10. 118 K sıcaklığında gözlenen $[\text{GeO}_4/\text{Li}^+]^0$ radikalının güç grafiği (Microwave power graphic of $[\text{GeO}_4/\text{Li}^+]^0$ radical which is seen at 118K temperature)

Bu radikalın ESR parametrelerini daha doğru ölçebilmek ve radikali tespit edebilmek amacıyla 280Gy ışınlanmış kuvars örneklerinin ESR spektrumları 140K sıcaklığında ve 1mW mikrodalga gücünde kaydedildi. Ortorombik simetriye sahip olduğu belirlenen bu radikalın 140K de sıcaklığında ölçülen spektroskopik yarımla çarpanı değerleri Şekil 11' de verildi. Düşük sıcaklıktan oda sıcaklığına kadar alınan spektrumlarda Al ve Ti merkezlerinin pikleri sönerken bu radikalın pikleri hala ölçülebilir şiddette spektrumda gözlemlendi. Şekil 12' de Kumyer seramiği kuvars örneğinin oda sıcaklığında kaydedilen ESR spektrumu ve 140K sıcaklığında gözlenmeye başlanan $[\text{GeO}_4/\text{Li}^+]^0$ radikalının oda sıcaklığında ölçülen g değerleri verildi.



Şekil 11. $[\text{GeO}_4/\text{Li}^+]^0$ merkezinin 140K de kaydedilen ESR spektrumu ve ölçülen ESR parametreleri (ESR spectra and measured ESR parameters of $[\text{GeO}_4/\text{Li}^+]^0$ center at 140K temperature)

Bu radikalin her iki sıcaklıkta ölçülen g değerleri, spektrometre sıcaklığına ve mikrodalga gücüne bağlılığı göz önüne alınarak, gözlenen piklerinin safsızlık kaynaklı ve kararlı bir radikal olan Ge merkezine, $[\text{GeO}_4/\text{Li}^+]^0$, ait olduğu belirlendi [15, 18, 32-36].



Şekil 12. 200Gy ışınlanmış Kuyser kuvars örneğinin oda sıcaklığında ESR spektrumu (ESR spectrum of 200 Gy irradiated Kuyser quartz sample at room temperature)

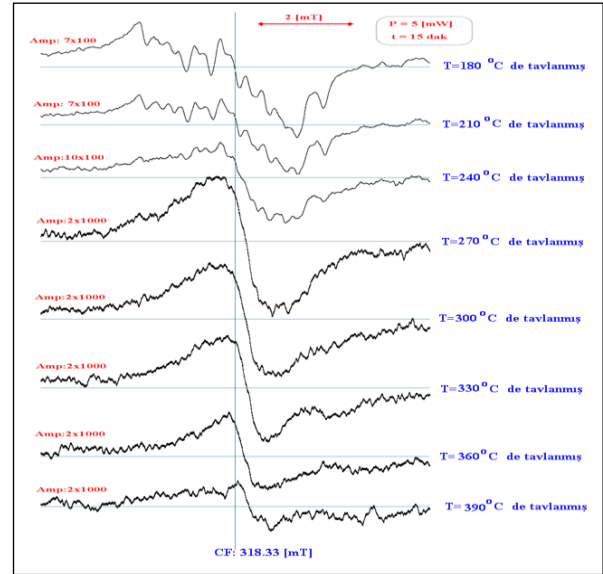
Ge merkezi ışığa oldukça duyarlı bir merkezdir yani güneş ışığı ile kolayca ağartılabilir. Ağartılma ESR yaş tayini çalışmalarında radikalin sönmesi yani sinyal şiddetinin zayıflaması anlamında kullanılmaktadır. Bir başka deyişle güneş ışığı Ge paramanyetik merkezi için sıfırlayıcı bir olaydır [34]. Kuyser seramik örneğinde Ge merkezinin gözlenmesi bu arkeolojik örneğin güneş ışığına maruz kalmadan saklandığının ve ESR yaş tayini için uygun olduğunun önemli göstergelerinden biridir.

3.4. Eş Süreli Isıtma Deneyi (Isochronal Annealing Experiment)

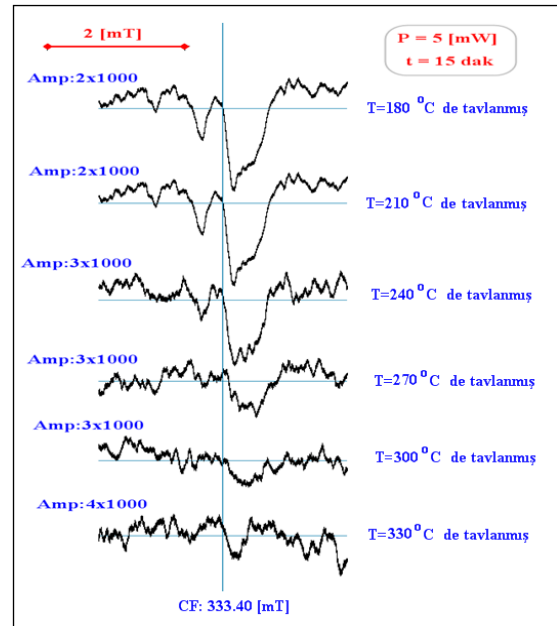
Kuyser arkeolojik seramik örneklerinden ayıklanan kuvars tanelerinde varlığı tespit edilen Al ve Ti paramanyetik merkezlerinin ısıl davranışlarını araştırmak üzere eş süreli ısıtma deneyi yapıldı. Eş süreli ısıtma deneylerinde 100Gy ışınlanmış 189.36gr kuvars toz örneği kullanıldı. Işınlanmış örneğin tavlandıktan sonra ESR spektrumları JEOL JESPX-2300 X-band spektrometresiyle 81K spektrometre sıcaklığında kaydedildi.

Eş süreli ısıtma deneyleri sonucu kaydedilen ESR spektrumları Al ve Ti merkezleri için sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14' de gösterildi. Şekil 13' deki spektrumlarda 270°C sıcaklığında 15 dakika tavlama sonucu Al merkezinin büyük bir kısmının tavlandığı ve aşırı ince yapı yarılımlarının ölçülemediği görüldü.

Şekil 14' deki spektrumlar incelendiğinde ise 240°C sıcaklığında 15 dakika tavlama sonucu Ti-H merkezinin ESR sinyal şiddetinin oldukça zayıfladığı ve 270°C sıcaklığında tamamen söndüğü, Ti-Li merkezinin ise 300°C sıcaklığına kadar ölçülebilir olduğu belirlendi. 330 °C tavlama sıcaklığında her iki Ti merkezinin de tamamen tavlandığı ve spektrumun gürültü piklerinden oluştuğu görüldü. Buradan Ti-Li merkezinin Ti-H merkeze göre daha kararlı olduğu anlaşıldı.

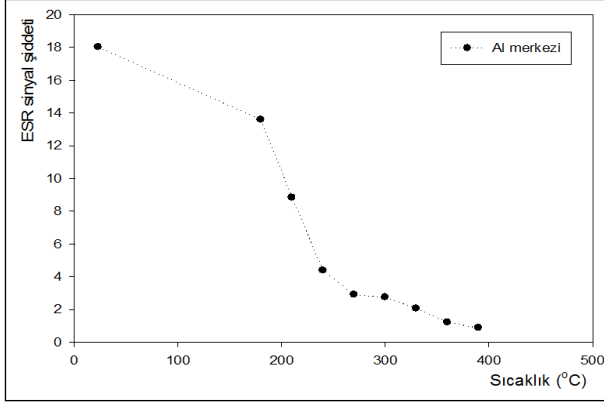


Şekil 13. Al merkezi için eş süreli ısıtma deneyi (Isochronal annealing experiment for Al center)

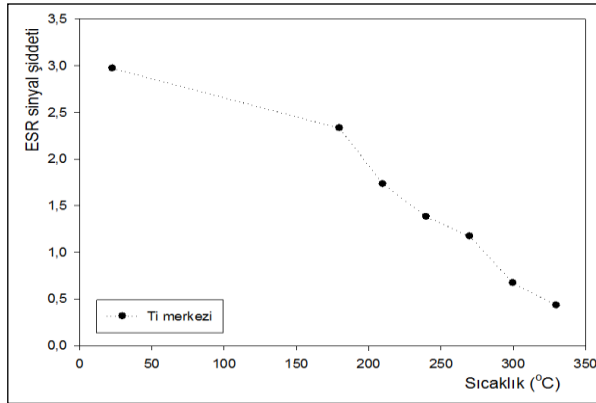


Şekil 14. Ti merkezleri için eş süreli ısıtma deneyi (Isochronal annealing experiment for Ti center)

Eş süreli ısıtma deneyleri sonucu Kumyer arkeolojik seramikten ayıklanan kuvars örneğinde Al ve Ti merkezlerine ait ESR sinyal şiddetlerinin ısıtma sıcaklığına bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 16' da verildiği gibidir.



Şekil 15. Al merkezi ESR sinyal şiddetinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi (ESR signal intensity variation of Al center by annealing temperature)



Şekil 16. Ti-Li merkezi ESR sinyal şiddetinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi (ESR signal intensity variation of Ti-Li center by annealing temperature)

Sonuç olarak yapılan çalışmalarla;

- Kumyer seramik örneğinde hematit demir oksit minerallerine ait ESR sinyalleri, örneklerden ayıklanan kuvars mineralinde ise Al, Ti-H, Ti-Li ve Ge paramanyetik merkezleri olduğu belirlendi. Bu paramanyetik merkezlerin ESR parametrelerinin literatürle uyumlu olduğu tespit edildi [15, 18, 22, 25-37].
- Eş süreli tavlama grafiklerinden de görüldüğü gibi Al ve Ti merkezlerinin arkeolojik seramiğin 350°C ile 400°C sıcaklık aralığında pişirilmesiyle tamamen tavlanaacağı ve hatalı yaşlara sebep olabilecek artık sinyaller kalmayacağı belirlendi. Ayrıca arkeolojik zaman boyunca yangın vs. gibi yüksek sıcaklık etkileri oluşmadıkça bu sinyallerin kararlı kalacağı anlaşıldı.

- Bunun yanı sıra örneklerde Ge merkezinin gözlenmesi ile arkeolojik seramiğin ısı ve/veya ışık gibi etkilere maruz kalmadığı tespit edildi.
- Kumyer seramiğinin yüksek sıcaklıklarda pişirildiği, arkeolojik zaman boyunca iyi korunduğu ve yapısında kararlı ve radyasyona duyarlı paramanyetik merkezler bulundurduğu için ESR yaş tayini metodu ile sağlıklı bir şekilde tarihlendirilebileceği tespit edildi.
- Örneklerin ESR tekniği ile yaş tayininde sinyal şiddeti Ti merkezlerine göre daha büyük olan radyasyona duyarlı ve kararlı Al merkezinin kullanılması gerektiği gösterildi.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK-212T216 ve Selçuk Üniversitesi BAP-12201058 numaralı projeleriyle desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) J.A. Weil, J.R. Bolton, and J.E. Wertz, "Electron paramagnetic resonance elementary theory and practical applications", *John Wiley&Sons Inc.*, New York, (1994).
- 2) C.P. Poole, "Electron spin resonance a comprehensive treatise on experimental techniques", *Wiley Interscience*, New York, (1967).
- 3) N.M. Atherton, "Electron spin resonance theory and applications", *John Wiley&Sons Inc.*, 435p., New York, (1973).
- 4) D.W. Mc Morris, "Trapped electron dating: ESR studies", *Nature*, 222: 870-871, (1969).
- 5) D.W. Mc Morris, "ESR detection of fossil alpha damage in quartz", *Nature*, 226: 146-148, (1970).
- 6) C. Maurer, S. Williams and T. Riley, "ESR dating of archeological ceramics: a progress report", *MASCA J.*, 1: 202, (1981).
- 7) J. Bartoll and M. Ikeya, "ESR dating of pottery: A trial", *Appl. Radiat. Isot.*, 48: 7, 981-984, (1997).
- 8) R. Kaczynski and B. Grabowska-Olszewska, "Soil mechanics of the potentially expansive clays in Poland", *Appl. Clay Sci.*, 11: 337-355, (1997).
- 9) S. Toyoda and C. Falgueres, "The method to represent the ESR signal intensity of the aluminum hole center in quartz for purpose of dating", *Advances in ESR Applications*, 20: 7-10, (2003).
- 10) S. Toyoda, P. Voinchet, C. Falgue'res, J.M. Dolo and M. Laurent, "Bleaching of ESR signals by the sunlight: a laboratory experiment for establishing the ESR dating of sediments", *Appl. Radiat. Isot.*, 52: 1357-1362, (2000).
- 11) J.H.E. Griffith, J. Owen and I.M. Ward, "Defects in crystalline solids, In: Bristol Conference", *Physical Society*, London, 81p., (1955).
- 12) M.C.M. O'Brien, "The structure of the color centers in smoky quartz", *Proc. Roy. Soc. A.*, 231: 404-414, (1955).

- 13) M.J. Aitken, "Thermoluminescence dating", *Academic Press*, London, (1985).
- 14) C.P. Slichter, "Principle of magnetic resonance", *Harper&Row*, New York, (1960).
- 15) M. Ikeya, "New applications of electron spin resonance dating, Dosimetry and Microscopy", *World Scientific Pub. Co. Pte. Ltd.*, (1993).
- 16) M.B. McBride, "Electron spin resonance spectroscopy", *In Instrumental Surface Analysis of Geologic Materials ed. Perry D.L.*, VCH, New York, (1990).
- 17) W.J. Rink, "Electron spin resonance (ESR) dating and ESR applications in quaternary science and archeometry", *Radiation Measurements*, 27: 975-1025, (1997).
- 18) R. Grün, "Electron spin resonance (ESR) dating", *Quat. Intern.*, 1: 65-109, (1989).
- 19) U. Ulusoy, "Kuvars minerallerinin ESR yöntemiyle incelenmesi ve tarihlenmesi", Doktora tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bil. Enst.*, Ankara, (1995).
- 20) S. Toyoda and M. Ikeya, "Thermal stabilities of paramagnetic defect and impurity centers in quartz: Basis for ESR dating of thermal history", *Geochemical Journal*, 25: 437-445, (1991).
- 21) R. Schnadt, and A. Rauber, "Motional effects in the trapped-hole center in smoky quartz", *Solid StateCommun*, 9: 159-161, (1971).
- 22) A. Shimada, "Characteristics of ESR signals and thermoluminescence color images of quartz grains to study the provenance of sediments", Ph.D. Thesis, *Nara Women's University, Japan*, 153 (in Japanese), (2008).
- 23) N. Imai, and K. Shimokowa, "ESR dating of quaternary tephra from Mt. Osore-zan using Al and Ti centers in quartz", *Quaternary Science Review*, 7: 523-527, (1988).
- 24) B. Dobosz, and R. Krzyminiewski, "Characteristic of paramagnetic centres in burnt clay and pottery by the EPR method", *Science Direct Radiation Measurements*, 42: 313-219, (2007).
- 25) M. Asagoe, S. Toyoda, P. Voinchet, C. Falgueres, H. Tissoux, T. Suzuki and D. Banerjee, "ESR dating of tephra with dose recovery test for impurity centers in quartz", *Quaternary International*, 246: 118-123, (2011).
- 26) H. Rinneberg, and J.A. Weil, "EPR studies of Ti^{3+} - H^+ centers in X-irradiated alpha-quartz", *J. Chem. Phys.*, 56: 2019-2028, (1972).
- 27) M. Okada, H. Rinneberg, J.A. Weil and P.M. Wright, "EPR of Ti^{3+} centers in α -quartz", *Chem. Phys. Letters*, 11: 275-276, (1971).
- 28) H. Tissoux, S. Toyoda, C. Falgueres, P. Voinchet, M. Takada, J.J. Bahain and J. Desprée, "ESR dating of sedimentary quartz from two pleistocene deposits using Al and Ti centers", *Geochronometria*, 30: 23-31, (2008).
- 29) S. Toyoda, H. Miura and H. Tissoux, "Signal regeneration in ESR dating of tephra with quartz", *Radiation Measurements*, 44: 483-487, (2009).
- 30) T. Yokoyama, A. Shimada, T. Umemura and S. Toyoda, "ESR ages of rhyolitic monogenetic volcanoes in Kozushima", Japan, *Bulletin of the Volcanoogical Society of Japan*, 49: 23-32, (2004).
- 31) J. Isoya and J.A. Weil, "Uncompensated Titanium (3+) center in alpha-quartz", *Phys. Status Solidi A*, 52: K193, (1979).
- 32) J.H. Anderson and J.A. Weil, "Paramagnetic resonance absorption of color centers in germanium-doped quartz", *J. Chem. Phys.*, 31: 427-434, (1959).
- 33) J.H.Jr. Mackey, "EPR study of impurity-related color centers in germanium-doped quartz", *J. Chem. Phys.*, 39: 74-83, (1963).
- 34) T. Tanaka, S. Sawada and T. Ito, "ESR dating of late Pleistocene near shore and terracesands", in southern Kanto Japan, *ESR Dating and Dosimetry*, 275-280, (1985).
- 35) J.A. Weil, "A review of electron spin spectroscopy and its applications to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz", *Phys. Chem. Minerals*, 10: 149-165, (1984).
- 36) J.A. Weil and J.H. Anderson, "Direct field effects in electron paramagnetic resonance hyperfine spectra", *J. Chem. Phys.*, 35: 14510-1417, (1961).
- 37) J. Isoya, W.C. Tennant and J.A. Weil, "EPR of the TiO_4/Li center in crystalline quartz", *J. Mag. Res.*, 70: 90-98, (1988).

AISI 52100 Rulman Çeliğinin İşlenebilirliğinin Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Ömrü ve Sıcaklık Kriterlerine Göre Araştırılması

Ulaş ÇAYDAŞ^{1*}, Osman KUNCAN², Mahmut ÇELİK¹

¹Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 23119 Elazığ

²Siirt Üniversitesi Siirt Meslek Yüksekokulu Makine Teknolojileri Bölümü Siirt

(Geliş/Received : 10.04.2016 ; Kabul/Accepted : 18.05.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, AISI 52100 rulman çeliği, küreselleştirme ısı işlemi uygulanarak kuru ve minimum miktarda yağlama (MMY) ortamlarında tornalanmıştır. Deneysel sonuçlarında numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a), kesici takımlarda meydana gelen yanak aşınma değerleri (V_B) ve kesici takımındaki sıcaklık değerleri (T) ölçülmüştür. Deneysel sonuçlarda, DNMG 150408 – TF ve DNGA 150408T IN 23 ISO standart numaralı karbür ve seramik takımlar kullanılarak, talaş derinliği (a) ve ilerleme miktarı (f) sabit tutulmuş, kesme hızı (V), belirli sınırlar içerisinde değiştirilerek kesme hızı, iş parçasının mikroyapısı ve kesici takım cinsinin işlenebilirlik üzerindeki izafi etkileri deneysel olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak AISI 52100 malzemesinin ekonomik işlenebilirliği için en uygun şartlar araştırılarak sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 52100 Çeliği, Küreselleştirme Isıl İşlemi, Takım Ömrü, Yüzey Pürüzlülüğü.

Investigation of The Machinability of AISI 52100 Bearing Steel for Surface Roughness, Tool Life and Temperature Criteria

ABSTRACT

In this study, spheroidized AISI 52100 bearing steel was machined in dry and minimum quantity of lubrication (MQL) conditions. After experiments, the average surface roughness (R_a) of samples, tool flank wears (V_B) and tool – chip interface temperature (T) values were measured. The ISO DNMG 150408 – TF and DNGA 150408T IN 23 carbide and ceramic cutting tool materials were used. In the experiments, the depth of cut (a) and tool feed rate (f) factors were fixed, while the cutting speed (V), cutting tool and workpiece materials and machining conditions factors were changed in certain intervals to experimentally explore their relatively effects on the machining responses. Consequently, optimum parameter conditions were determined and evaluated for the economic machining of AISI 52100 bearing steel.

Keywords: AISI 52100 Steel, Spheroidization Heat Treatment, Tool Life, Surface Roughness.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AISI 52100 (DIN 100Cr6) çeliği, %1,3 – 1,6 krom içerikli, yüksek karbonlu (%0.98-1.10) ve düşük alaşımlı ötektoid üstü bir çeliktir. Bu çelikler, ısı işlemi yoluyla derinlemesine sertleştirilebilirler. Farklı ısı işlemler neticesinde mikroyapıları değiştirilerek sertlik kazandırılan bu çelikler; otomotiv, dişli, rulman, takım ve kalıp endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. AISI 52100 çeliği genellikle talaşlı imalat yoluyla şekillendirilmektedir. Ancak, tavllanmış durumdaki ötektoid üstü çelikler, içyapılarında yer alan sert ve gevrek sementit lamelleri nedeniyle talaşlı işlenmeye elverişli değildir. Küreselleştirme ısı işlemi, çelikleri AC₁ sıcaklığı civarında uzun süre tuttukten ve bu bölgede salımlı olarak tavladıktan sonra, yavaş soğutma ile

karbürlerin küresel şekle dönüştürülmesi işlemidir. Bu işlem sonrasında malzemenin içyapısındaki lamelli yapı, taneli sementite dönüştürülerek süneklik ve talaşlı işlenebilirlik özelliklerinde iyileşme sağlanmaktadır.

Talaş kaldırma esnasında kesici takım ile iş parçası ara yüzeyinde meydana gelen sürtünme ve iş parçası malzemesinin plastik deformasyonu sonucu oldukça yüksek bir ısı açığa çıkmaktadır. Oluşan yüksek ısı, kesme bölgesinde sıcaklık artışına yol açarak kesici takım malzemesinin sertliğinin azalmasına ve hızla aşınmasına sebep olmaktadır. Takım aşınmasıyla birlikte, takım ömrü azalmakta ve işlenmiş yüzeyin kalitesi kötüleşmektedir. Kesme bölgesinde oluşan ısıyı ve takım-talaş temas ara yüzeyindeki sürtünmeyi azaltmak (yağlama yapmak) amacıyla endüstride malzeme cinsine bağlı olarak, basınçlı hava, çeşitli kesme yağları ve emülsiyonlar kullanılmaktadır.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: ucaydas@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 409-417

AISI 52100 çeliğinin talaşlı işlenebilirliği üzerine birçok çalışma yapılmıştır. J.Guddat vd. çalışmalarında sertleştirilmiş AISI 52100 (58-62 HRC) çeliğinin kübik bor nitrür kesici takım ile işlenmesinde oluşan yüzey kalitesi ve kesme kuvvetlerinin değişimlerini incelemişlerdir. Kullanılan deney şartlarında kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin eden istatistiksel bir deneysel tasarım modeli kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda, silici geometri uçların geleneksel uç geometrisine nazaran daha kaliteli yüzeyler oluşturdukları ve daha yüksek artık gerilmelere yol açtıkları tespit edilmiştir [1]. Galoppi vd. çalışmalarında, sertleştirilmiş ve temperlenmiş (62 HRC) DIN 1006 (AISI 52100) çeliğini silici geometri, TiAlN kaplamalı, TiN kaplamalı ve kaplamasız olmak üzere farklı CBN uçlar (ISO CNGA120408SO1020 geometrisinde) kullanarak işlemişlerdir. Çalışmada, en büyük yanak aşınma miktarı, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), talaş kaldırma oranı ve takım ömrü değerleri Taylor'un modeline göre deneysel ve teorik olarak belirlenmiştir [2]. Poulachon vd. çalışmalarında, AISI D2 soğuk iş takım çeliği, AISI H11 ve 35NiCrMo16 sıcak iş takım çelikleri ve 100Cr6 rulman çeliği (AISI 52100) malzemelerinin CBN kesici takımlarla kuru işlenmesinde takım aşınma oranlarını ölçmüşlerdir. Takım yanak aşınma izlerinin çeliklerin içyapılarında yer alan farklı karbür parçalarıyla ilişkili olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Talaş kesitleri incelenmiş ve bu çeliklerin işlenmesinde farklı miktarlarda beyaz tabakaların oluştuğu belirlenmiştir [3]. Paiva vd. çalışmalarında, AISI 52100 çeliğinin farklı kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği şartlarında işlenmesinde takım ömrü, işleme süresi, maliyet, talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü gibi çıktılar üzerinde çoklu performans analizleri yapmışlardır. Çalışmada yüzey yanıt metodolojisi (RSM) ve temel bileşen analizi (PCA) yöntemleri kullanılmış ve deneysel ölçümler ile teorik sonuçların uyum içerisinde oldukları tespit edilmiştir [4]. Singh ve Rao çalışmalarında, AISI 52100 rulman çeliğinin sert tormalanmasında (58 HRC sertliğinde) kesme koşullarının ve takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada, farklı uç yarıçapları ve efektif talaş açılarında sahip alüminyum oksit ve titanyum karbonitrür karışık seramik uçlar kullanılmıştır. Çalışmada, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkin faktörün ilerleme miktarı olduğu, bunu sırasıyla burun yarıçapı ve kesme hızı faktörlerinin takip ettiği belirtilmiştir. Efektif talaş açısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin az olmasına karşın, bu faktörün burun yarıçapıyla birlikte etkilerinin önemli derecede yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, RSM yöntemi ile yüzey pürüzlülüğü için tahminsel matematiksel modeller geliştirilmiştir [5]. Umbrello yaptığı çalışmada, AISI 52100 rulman çeliğinin kriyojenik soğutma uygulaması (sıvı azot) ile işlenmesinde işlenmiş yüzeyde meydana gelen metalurjik değişimleri araştırmıştır. Çalışmada kuru işleme ve kriyojenik şartlarda farklı sertlik değerlerine ve geometrilere sahip CBN uçlar kullanılmıştır. Yüzey

topografyası, optik ve taramalı elektron mikroskopları (SEM) yardımıyla incelenirken, yüzeyde meydana gelen mikroyapısal faz değişimleri X ışınları yardımıyla belirlenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, uygun kriyojenik şartlarda yüzeyde oluşan beyaz tabakanın kısmen veya tamamen elemine edilebileceği vurgulanmıştır [6]. Ambrogio vd. çalışmalarında, AISI 52100 çeliğinin sert tormalanmasında (62 HRC sertliğinde) oluşan artık gerilmeleri tahmin etmek amacıyla sonlu elemanlar (FEM) ve yapay sinir ağları (ANN) modelleri sunmuşlardır. Çalışmalarında takım geometrisi, iş parçasının sertlik değeri, takım burun yarıçapı ve köre pah ölçüleri, ilerleme miktarı, devir sayısı, talaş açısı faktörleri sinir ağının giriş katmanlarını; yüzeyde ekstenel ve radyal doğrultularda oluşan artık gerilmeler ise çıkışları oluşturmuştur [7]. Manco vd. çalışmalarında, AISI 52100 çeliğinin sert tormalanmasında mikroyapıda meydana gelen değişimleri sonlu elemanlar yöntemi ile modellemişlerdir. Malzemenin sertlik ölçümlerine bağlı olarak değişen akma mukavemet değerleri, yüze ve yüzey altında oluşan beyaz ve siyah tabaka formları; kesme parametreleri ile istatistiksel olarak ilişkilendirilmiştir [8]. Escalona vd. çalışmalarında, 62 HRC sertliğindeki AISI 52100 çeliğini çok kristalli kübik bor nitrür takım ile işlemişlerdir. Çalışmada DEFORM-2D paket programı yardımıyla kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri modellenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır [9]. Huang ve Liang çalışmalarında, AISI 52100 çeliğinin CBN takımlarla işlenmesinde abrazyon, adhezyon ve difüzyon mekanizmaları sonucu meydana gelen krater aşınması değerleri hacim yöntemiyle ölçerek belirlemişlerdir. Ayrıca işleme faktörlerinin parametrik optimizasyonu yapılmıştır. Kesme parametreleri ile krater aşınması arasındaki ilişki, ampirik modellerle ifade edilmiştir. Deneysel sonuçlar, model tahminleri ile karşılaştırılmış ve geliştirilen modellerin uygun oldukları tespit edilmiştir [10]. Azizi vd. AISI 52100 çeliğinin sert tormalanmasında, kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve iş parçası malzemesinin sertlik değerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada, Al₂O₃ + TiC karışımı seramik uçlar kullanılmıştır. Taguchi deneysel tasarım yöntemine göre toplam 27 deneylik ortogonal dizin seçilmiştir. Lineer regresyon ve varyans analizi (ANOVA) yardımlarıyla parametrelerin etkinlik dereceleri belirlenmiştir. İstatistiksel sonuçlar; ilerleme miktarı, iş malzemesi sertliği ve kesme hızlarının artması ile yüzey pürüzlülüğünün önemli derecede iyileştiğini; diğer yandan talaş derinliği, ilerleme oranı ve malzeme sertliğinin kesme kuvvetleri üzerinde kesme hızından daha büyük bir etkiye sahip olduklarını göstermiştir [11].

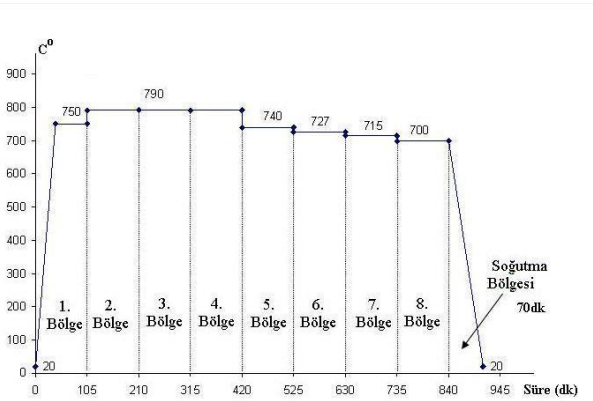
Konuyla ilgili çalışmalar incelendiğinde, AISI 52100 çeliğinin CBN, seramik ve karbür kesici takımlarla farklı sertliklerdeki işlenebilirliklerinin araştırıldığı görülmektedir. Literatürden ayrıca işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin ölçüldüğü ve işlenen yüzeylerde meydana gelen metalurjik değişimlerin de araştırıldığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ise, mevcut literatürden farklı olarak, AISI 52100 rulman çeliğine küreselleştirme ısıl işlemi uygulanarak seramik ve karbür kesici takımlar yardımıyla kuru ve MMY koşullarında, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım – talaş ara yüzey sıcaklığı ve takım ömrü üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma sonrasında, işleme parametrelerinin ölçülen değerler üzerindeki anlamlılık düzeyleri istatistiksel olarak varyans analizi yöntemi (ANOVA) ile incelenmiştir.

2. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Deneylerde 30 mm çapında ve 300 mm uzunluğunda AISI 52100 rulman çeliği kullanılmıştır. Bu çelik, sahip olduğu yüksek aşınma dayanımı nedeniyle çeşitli kalıplar, hadde merdaneleri, rulman kafesleri ve soğuk iş kalıp matrisleri gibi birçok imalat alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çeliğe ait kimyasal bileşim Çizelge 1’de verilmiştir.

Küreselleştirme ısıl işlemleri, Ortadoğu Rulman Sanayi A. Ş.’de yaptırılmıştır. Küreselleştirme ısıl işlemine ait şematik diyagram Şekil 1’de görülmektedir.

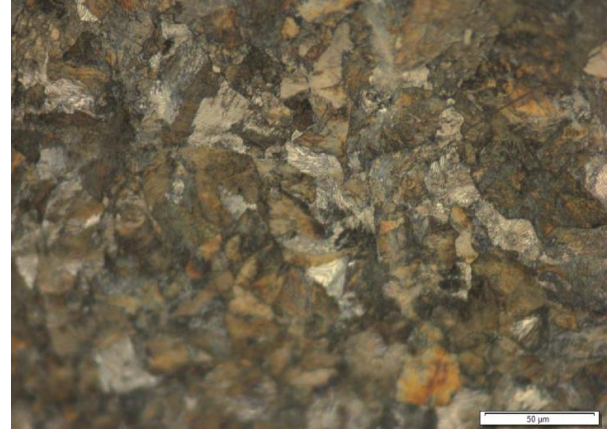


Şekil 1. AISI 52100 çeliğine uygulanan küreselleştirme ısıl işleminin şematik diyagramı. (Schematic diagram of spheroidization heat treatment)

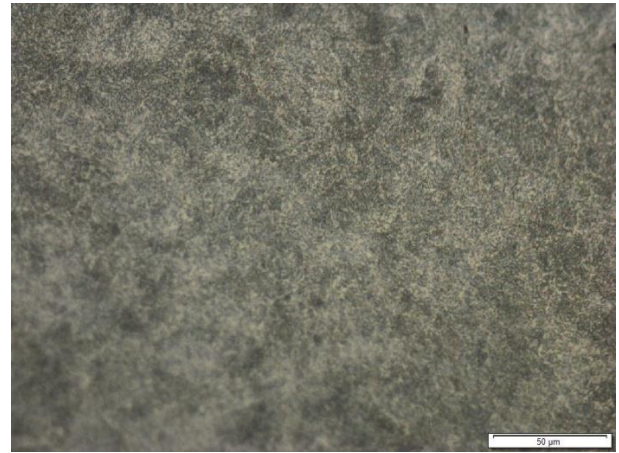
Çizelge 1. AISI 52100 çeliğinin kimyasal bileşimi. (Chemical composition of AISI 52100 steel)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Fe
0.99	0.24	0.37	0.008	0.005	1.41	0.07	0.02	0.016	Kalan

Numunelerin ısıl işlemsiz ve küreselleştirme ısıl işlemi sonrasındaki sertlik değerleri sırasıyla 352 HRC ve 190 HRC olarak ölçülmüştür. Isıl işlemsiz ve küreselleştirilmiş numunelere ait mikroyapı fotoğrafları Şekil 2’de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, işlem öncesi ferrit ve perlitten oluşan mikroyapı, ısıl işlem sonrasında ferrit ve yapı içerisinde homojen bir şekilde dağılmış küresel sementitlerden meydana gelmektedir



a)



b)

Şekil 2. Numunelere ait mikroyapı fotoğrafları (a: ısı işlemsiz, b: küreselleştirilmiş). (Microstructure pictures of specimens (a: without heat treatment, b: spheroidized))

Deneyler, 6kW gücünde ve dakikadaki maksimum devir sayısı 3500 olan, Johnford TC35 torna tezgahında kuru ve MMY işleme koşullarında yapılmıştır. Kesici takım olarak Iscar takım imalatçı firması tarafından üretilen ve DNMG 432 – TF (IC907) ve DNGA 150408T IN 23

standart numaralı karbür ve seramik uçlar kullanılmıştır. MMY uygulaması, UNIST GRAND RAPID M1 marka mikro sıvı uygulama sistemi yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Uygulamada Accu Lube firması tarafından üretilmiş bitkisel esaslı LB-200 numaralı yağ kullanılmıştır. Bu kesme yağı, geri dönüşümü olan, toksin içermeyen, suyla inceltilebilen bir yapıda olup, oldukça yüksek bir korozyon dayanımına sahiptir. Kesme yağı/su oranı 1/5 olacak şekilde karışım hazırlanmış ve bu karışım kesme bölgesine tek bir nozul yardımıyla, 200 atım/dakika sıklığında, 0.8 MPa basınç

değerinde ve uygun bir pozisyonunda konumlandırılarak gönderilmiştir. Nozul ile iş parçası arasındaki mesafe 30mm olarak ayarlanmıştır. Deneylede, talaş derinliği ve ilerleme miktarı sabit tutulurken, kesme hızı, kesici takım ve malzeme cinsi ve işleme ortamı gibi faktörler değişken olarak alınmıştır. Deneylede kullanılan kesme parametreleri ve faktör seviyeleri Çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge 2’de yer alan faktör ve seviyelerine bağlı olarak tam faktöriyel deneysel tasarım metodu

ölçümlerin aritmetik ortalamaları ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak kabul edilmiştir. Takım – talaş ara yüzey sıcaklık değerleri, 400 mm mesafeye konumlandırılmış ve sürekli olarak ara yüzeye odaklanmış bir IMPAC Portawin 1.11 kızılötesi pirometre yardımıyla ölçülmüştür. Bu cihazın ölçüm aralığı 250 – 1800 °C’dir. Sıcaklık ölçümleri zamana bağlı olarak cihaza kaydedilmiş ve maksimum sıcaklık değeri esas alınmıştır.

Çizelge 2. İşleme parametreleri ve seviyeleri. (Working parameters and levels.)

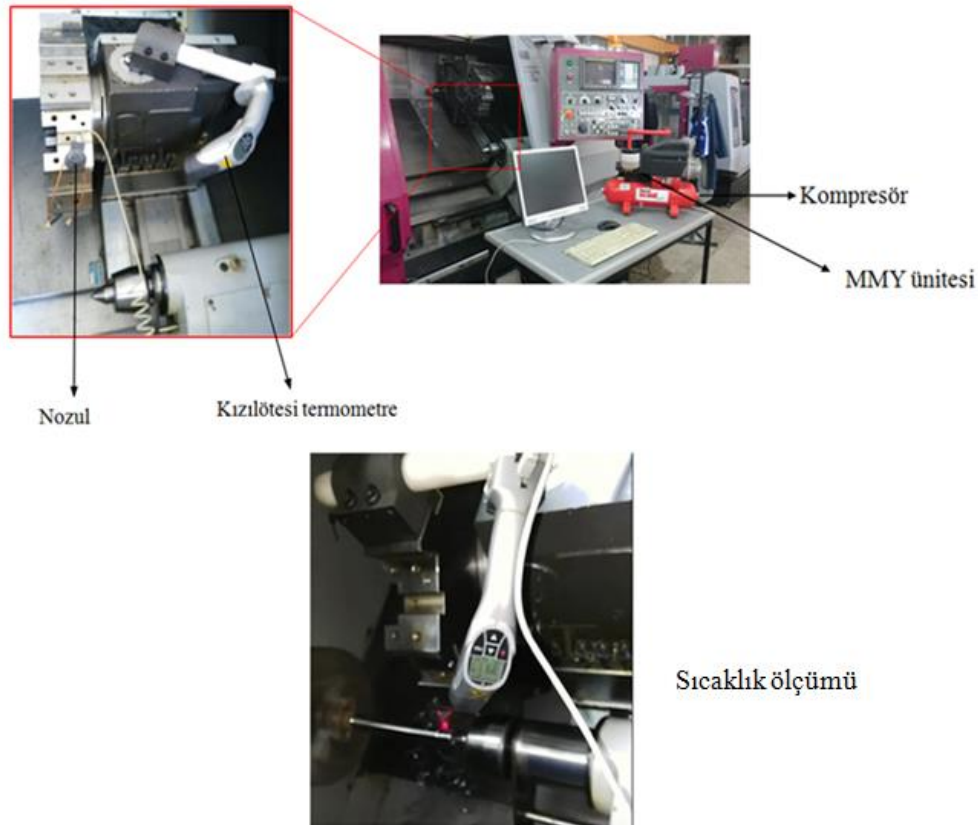
Parametre	Seviye 1	Seviye 2
Kesme hızı (m/dak)	150	200
Kesici takım	Karbür	Seramik
Malzeme	Isıl işlemsiz	Küreselleştirilmiş
İşleme koşulu	Kuru işleme	Minimum miktarda yağlama (MMY)
Talaş derinliği (mm)	1 (sabit)	
İlerleme miktarı (mm/devir)	0.25 (sabit)	

kullanılmıştır.

Takımlarda oluşan serbest yüzey aşınma değerleri, Olympos optik mikroskop yardımıyla 5 dakika aralıklarla ölçülmüş ve takım ömrü kriteri olan $V_B=0.3\text{mm}$ sınır değerine ulaşıncaya kadar geçen süre takım ömrü olarak kaydedilmiştir. Numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a), farklı noktalardan ölçülerek kaydedilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri, Mitutoyo SurfTest SJ-201 taşınabilir bir ölçüm cihazı yardımıyla 0.8mm örnekleme uzunluğu aralığında ölçülmüştür. Her noktadan 5 farklı ölçüm alınmış ve bu

3. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS and DISCUSSION)

İşlenebilirlik deneylede sonrasında alınan yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve takım – talaş ara yüzey sıcaklığı ölçüm sonuçları Çizelge 3’te verilmiştir. Sıcaklık ölçümleri sadece kuru işleme koşullarında gerçekleştirilen deneylede alınmıştır. Bu Çizelgede yer alan kuru işleme değerleri için etki grafikleri ise Şekil 4’te görülmektedir. Şekil 4 (a)’dan da görüldüğü gibi,



Şekil 3. Deneylede düzeneği. (Experimental Setup)

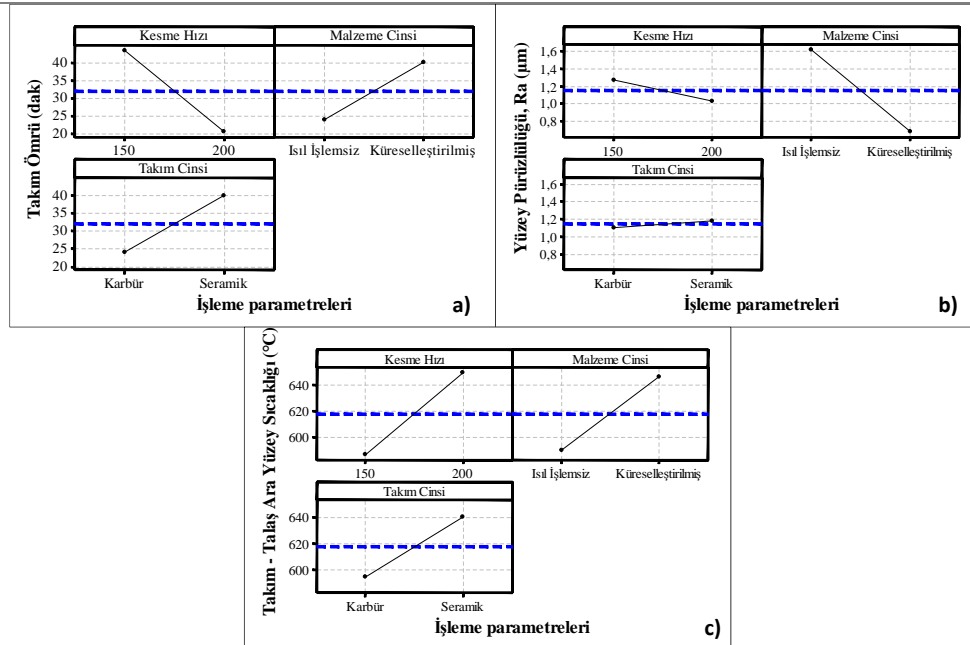
küreselleştirme ısıl işlemleri görmüş numunelerin düşük kesme hızı değerlerinde (150 m/dak) seramik takımlarla işlenmeleri durumunda takım ömrü artmaktadır.

Küreselleştirme ısıl işlemi sonrasında malzemenin sertlik değerinde yaklaşık olarak % 46 oranında bir azalma (352 HRC' den 192 HRC ye) meydana gelmektedir. Dolayısıyla malzemenin akma mukavemeti ve çekme dayanımı değerleri de azalmakta, kopma uzaması artmakta ve işlenebilirliği ve kesici takım ömrü artmaktadır [12].

Grafik yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde, kesici takım malzemesinin çok önemli bir etkisinin olmadığı ancak karbür takımlarla nispeten daha kaliteli yüzeylerin elde edildiği görülmektedir (Şekil 4 b). Ayrıca kesme hızının artmasıyla, ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin de azaldığı tespit edilmiştir. Küreselleştirilmiş numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ise ısıl işlemsiz numunelere nazaran oldukça düşüktür.

Çizelge 3. Deneysel koşulları ve ölçüm sonuçları. (Experimental conditions and measurement results)

Deneysel No	Kesme hızı (m/dak)	Kesici takım	Malzeme	İşleme ortamı	Ortalama yüzey pürüzlülüğü, Ra (µm)	Maksimum sıcaklık (°C)	Takım ömrü (dak)
1	200	Karbür	Isıl işlemsiz	Kuru işleme	0.564	657	10
2	150	Karbür	Isıl işlemsiz	Kuru işleme	0.656	671	22
3	200	Karbür	Küreselleştirilmiş	Kuru işleme	1.408	585	16
4	150	Karbür	Küreselleştirilmiş	Kuru işleme	1.807	530	48
5	200	Seramik	Küreselleştirilmiş	Kuru işleme	1.506	640	42
6	150	Seramik	Küreselleştirilmiş	Kuru işleme	1.757	605	80
7	200	Seramik	Isıl işlemsiz	Kuru işleme	0.624	626	24
8	150	Seramik	Isıl işlemsiz	Kuru işleme	0.865	694	40
9	200	Karbür	Isıl işlemsiz	MMY	0.461	-	24
10	150	Karbür	Isıl işlemsiz	MMY	0.545	-	108
11	200	Karbür	Küreselleştirilmiş	MMY	1.202	-	74
12	150	Karbür	Küreselleştirilmiş	MMY	1.508	-	126
13	200	Seramik	Küreselleştirilmiş	MMY	1.186	-	82
14	150	Seramik	Küreselleştirilmiş	MMY	1.319	-	172
15	200	Seramik	Isıl işlemsiz	MMY	0.598	-	81
16	150	Seramik	Isıl işlemsiz	MMY	0.743	-	142



Şekil 4. İşleme parametrelerinin ölçülen değerler üzerindeki etki grafikleri (a: Takım ömrü, b: yüzey pürüzlülüğü, c: takım-takıy ara yüzey sıcaklığı). (Main effect graphs of working parameters on measured results (a: tool life, b: surface roughness, c: tool-chip interface temperature))

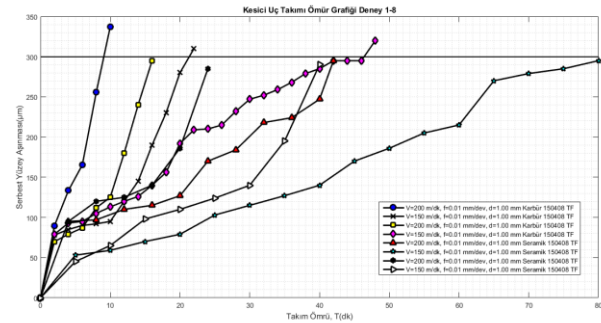
Diğer yandan, Şekil 4 (c)'de işleme parametrelerinin takım – talaş ara yüzey sıcaklığı üzerindeki etkileri görülmektedir. Kesme hızının artmasıyla ara yüzey sıcaklığı da artma eğilimindedir. Yüksek kesme hızlarında, birim zamanda takım – talaş temas süresi artacağından, sürtünmelerin şiddeti ve dolayısıyla ara bölgedeki ısı ve sıcaklık değerlerinin artması beklenen bir sonuçtur. Ancak seramik takımların daha yüksek sıcaklıklara rağmen, ömürlerinin daha yüksek olduğu ve daha kaliteli yüzeyler sağladığı görülmektedir. Bu durum, takım ömrünün yüksek olması nedeniyle, işleme süresinin artması ve takım – iş parçası ve takım – talaş arasındaki sürtünmelerin bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Benzer etki, küreselleştirme ısıl işleminin sıcaklık üzerindeki etkisi için de düşünülebilir. Şekil 5'te işleme sürecine bağlı olarak, seramik takımlarda $V=150$ m/dak ve $V=200$ m/dak kesme hızı değerlerinde meydana gelen serbest yüzey aşınmasının değişimi görülmektedir. SEM fotoğraflarından da görüldüğü gibi kuru işleme şartlarında, yanak aşınması değerleri kesme hızı ve zamana bağlı olarak artmaktadır. Kesme hızının 200 m/dak değerine çıkmasıyla, aşınma oranının göreceli olarak önemli derecede arttığı görülmektedir.

Takım ömrünü belirleyen kriter ($V_B=0.3\text{mm}$) için aşınma ve işleme süresi arasındaki ilişki ise Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6 ve Çizelge 4 birlikte incelendiğinde, karbür takımlarla ısıl işlemsiz numunelerdeki takım ömrü T_{150}/T_{200} oranının 2.2 (22:10); küreselleştirilmiş numunelerde ise 3 (48:16) olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, kesme hızıyla birlikte küreselleştirme ısıl işleminin takım ömrünü önemli derecede etkilediği söylenebilir. Bu değerler seramik takımlarla yapılan işlemlerde ısıl işlemsiz ve küreselleştirilmiş numuneler

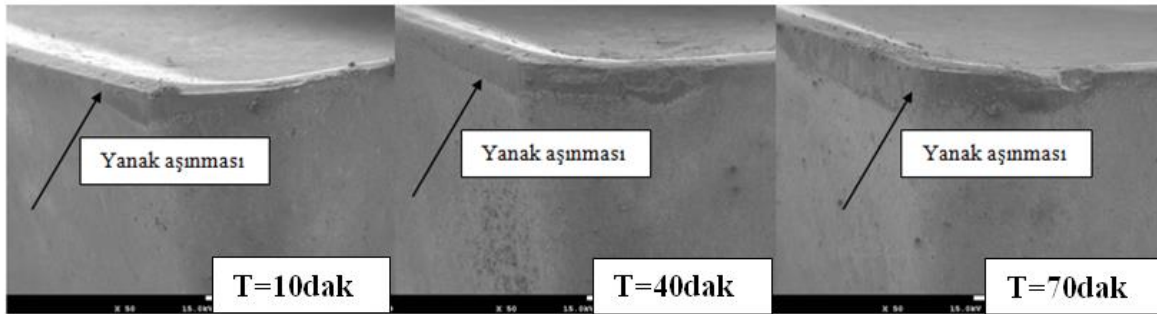
için sırasıyla 1.66 (40:24) ve 1.904 (80:42) olmaktadır. Kesici takım malzemeleri karşılaştırıldığında, seramik takımların daha uzun ömürlü olmalarına karşın, karbür takımlardaki ömür oranlarının daha yüksek oldukları görülmektedir. Her iki kesici takım malzemesi için kesme hızı ve takım ömrü arasındaki ilişki Taylor Takım Ömrü modeliyle hesaplanmıştır. Bu model;

$$V \cdot T^n = C \quad (1)$$

şeklinindedir. Burada V kesme hızını, T takım ömrünü, n ise ikisi arasındaki ilişkiyi gösteren logaritmik doğrunun eğimini vermektedir. Ömür deneylerinde, deneysel plandan farklı olarak 3. bir kesme hızı seviyesi ($V=250\text{m/dak}$) kullanılmıştır. Deneysel sonuçların onluk tabana göre logaritmaları alınmış ve $\text{Log } V - \text{Log } T$ grafiği çizilerek takımlar için ömür denklemleri bulunmuştur. Takımlar için elde edilen ömür denklemleri Çizelge 5'de verilmiştir.



Şekil 6. Kuru işleme koşullarında yanak aşınmasının zamanla gelişimi. (Progression of flank wear in dry working condition)



Şekil 5. Yanak aşınmasının zamanla gelişimi ($V=150\text{m/dak}$, küreselleştirilmiş numune). (Flank wear progression over time ($V=150\text{m/min}$, spheroidized specimen))

Çizelge 4. İşleme parametreleri ve seviyeleri. (Working parameters and levels.)

Takım malzemesi	İş parçası Malzemesi	Kesme hızı (m/dak)	Takım ömrü (dak)	Log V	Log T	Denklem	R ²
Karbür	Isıl işlemsiz	150	22	2.176	1.342	$y = -9,5 \cdot x + 30,667$	0,977 4
Karbür	Isıl işlemsiz	200	10	2.301	1.000		
Karbür	Isıl işlemsiz	250	3	2.397	0.477		
Seramik	Küreselleştirilmiş	150	80	2.176	1.903	$y = -31 \cdot x + 108,67$	0,983 3
Seramik	Küreselleştirilmiş	200	42	2.301	1.623		
Seramik	Küreselleştirilmiş	250	18	2.397	1.255		

Çizelge 4’de yer alan herhangi 2 farklı LogV ve bu değerlere karşılık gelen LogT değerleri alınarak aşağıdaki eşitlikte yerlerine konulmuş ve ömür denklemindeki “n” üstel değerleri hesaplanmıştır [13].

$$n = \frac{\log V_2 - \log V_1}{\log T_1 - \log T_2} \quad (2)$$

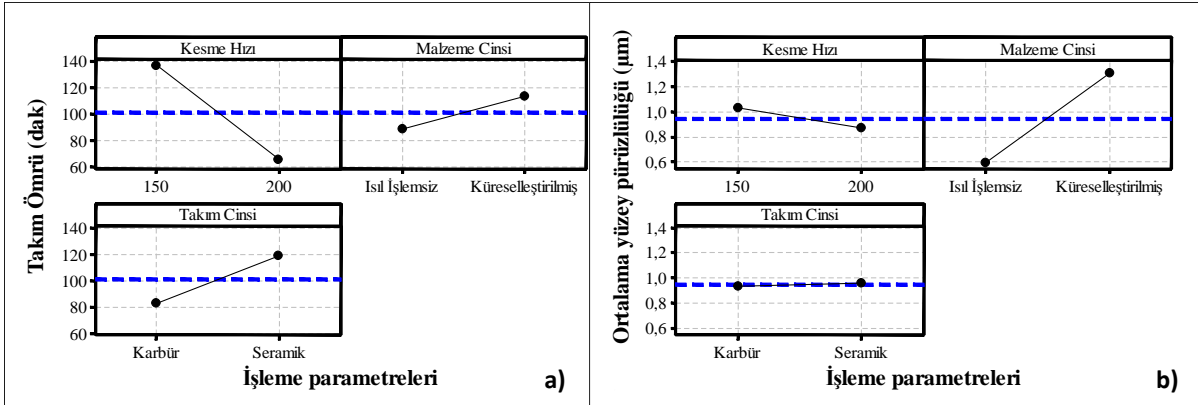
Bu formül yardımıyla karbür ve seramik takımlar için n değerleri aşağıdaki şekildedir.

$$n_{\text{karbür}} = \frac{2.397 - 2.301}{1 - 0.477} = 0.183 \text{ ve } n_{\text{seramik}} = \frac{2.397 - 2.301}{1.625 - 1.255} = 0.259$$

n değerleri karşılaştırıldığında, kuru işleme koşullarında seramik takımlar için n üstel değerinin karbür takımlara nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir.

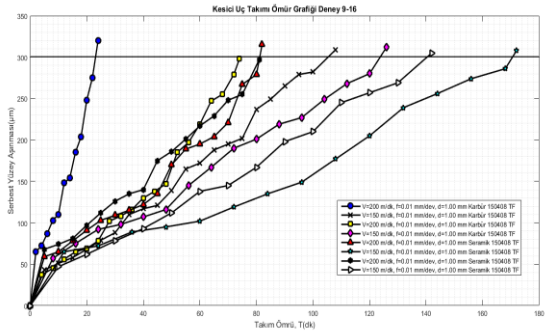
MMY koşullarında yapılan deneylere ait seramik takımlardan alınan SEM mikroskop fotoğrafları incelendiğinde (Şekil 8), serbest yüzey aşınmasının zamanla değişiminin, kuru işleme koşullarına nazaran daha yavaş olduğu görülmektedir. 10. dakika itibarıyla takımların kesme kenarı hattında herhangi bir aşınma, bozulma ve kırılma gözlemlenmezken, 30 dak işleme süresi sonrasında yanak aşınmasının başladığı ve ilerleyen kesme süresiyle birlikte aşınmanın şiddetlenerek takımın burun kısmında küçük çaplı kenar kopmalarına dönüştüğü görülmektedir.

Diğer takımlar için, serbest yüzey aşınmasının zamana bağlı değişimi Şekil 9’da görülmektedir.

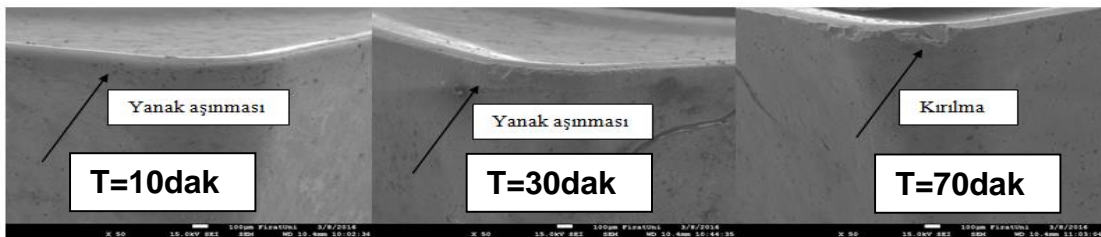


Şekil 7. MMY koşullarında işleme parametrelerinin ölçülen değerler üzerindeki etki grafikleri (a: Takım ömrü, b: yüzey pürüzlülüğü). (Main effect graphs of working parameters on measured results in MQL conditions (a: tool life, b: surface roughness).)

Benzer şekilde, MMY uygulamasıyla elde edilen sonuçlar için etki grafiği ise Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7 ve Çizelge 3 birlikte değerlendirildiğinde, MMY uygulamasıyla takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kuru işleme koşullarına nazaran daha iyi olduğu görülmektedir. İşleme parametrelerinin performans üzerindeki etkileri, kuru işleme koşullarına benzer şekildedir. Ancak küreselleştirilmiş numunelerin yüzey pürüzlülükleri, kuru işleme koşullarındaki sonuçlardan farklı olarak artmıştır. Dolayısıyla MMY yönteminin uygulanmasının, takım ömrü ve yüzey kalitesi bakımından avantajlı olduğu, ancak küreselleştirme ısıl işlemi ile birlikte uygulanmasının yüzey kalitesine katkısının olmadığı görülmüştür.



Şekil 9. MMY işleme koşullarında yanak aşınmasının zamanla gelişimi. (Progression of flank wear in MQL working condition)



Şekil 8. Yanak aşınmasının zamanla gelişimi (V=150m/dak, küreselleştirilmiş numune). (Flank wear progression over time (V=150m/min, spheroidized specimen))

MMY yönteminin uygulanmasıyla takım ömründe ve yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen iyileşme oranları, her bir deney için aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 5’de verilmiştir.

$$\%R_a = \frac{R_{akuru\ işleme} - R_{akuru\ işleme}}{R_{akuru\ işleme}} \times 100 \quad (3)$$

$$\%T = \frac{T_{MMY} - T_{akuru\ işleme}}{T_{MMY}} \times 100 \quad (4)$$

alan % katkı sütunları, o parametrenin işlemin verimliliği üzerindeki etkilerini, p değeri ise anlamlılık düzeyini göstermektedir. Bu yöntemde, bir parametrenin anlamlı sayılabilmesi için, p değerinin 0.05 değerinden küçük olması gerekmektedir. Çizelge 6 incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün iş parçası malzemesi olduğu (%84,97); bunu sırasıyla kesme hızı (%5,26), işleme ortamı (%5,09) ve kesici takım

Çizelge 5. MMY yönteminin yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrüne katkı oranları. (Contents of MQL technique on surface roughness and tool life)

Sıralama	Kesme hızı (m/dak)	Kesici takım	Malzeme	%Ra	%T
1	200	Karbür	Isıl işlemsiz	18.26	58.33
2	150	Karbür	Isıl işlemsiz	16.92	79.62
3	200	Karbür	Küreselleştirilmiş	14.63	78.37
4	150	Karbür	Küreselleştirilmiş	16.54	61.90
5	200	Seramik	Küreselleştirilmiş	21.24	48.78
6	150	Seramik	Küreselleştirilmiş	24.92	53.48
7	200	Seramik	Isıl işlemsiz	4.16	70.37
8	150	Seramik	Isıl işlemsiz	14.10	71.83

Çizelge 5 incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü bakımından, MMY yönteminde en etkili şartların % 24.92 oranla 150 m/dak kesme hızı değerinde seramik takımlarla küreselleştirilmiş numunelerin işlenmesinde olduğu görülmektedir. Diğer yandan, ısıl işlemsiz numunelerin 150 m/dak kesme hızı değerinde karbür takımlarla işlenmesinde takım ömrünün %79.62 oranında arttığı belirlenmiştir.

5. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Çalışmanın bu bölümünde, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkileri ve anlamlılık düzeyleri istatistiksel olarak belirlenmiştir. Bunun için varyans analizi yöntemi (ANOVA) kullanılmıştır. Bu yöntem sonrasında yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü için elde edilen analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 6 ve Çizelge 7’de verilmiştir. Çizelgelarda yer

malzemesi (%0,39) faktörlerinin takip ettikleri görülmektedir. Aynı Çizelgedeki p değerlerine bakıldığında, yüzey pürüzlülüğü açısından iş parçası malzemesinin anlamlı bir etkisinin olduğu ($p < 0,05$), diğer faktörlerin anlamlı olmadıkları görülmektedir. Dolayısıyla, istatistiksel olarak, küreselleştirme ısıl işlemi ile yüzey pürüzlülüğü arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu söylenebilir.

Benzer şekilde Çizelge 7 incelendiğinde, takım ömrü üzerinde en etkili parametrenin işleme ortamı (%49,33) olduğu, bunu sırasıyla kesme hızı (%24,94), kesici takım malzemesi (%10,09) ve iş parçası malzemesi (%5,82) faktörlerinin takip ettikleri görülmektedir. Takım ömrü ile kesme hızı ($p = 0,049$) ve işleme koşulu ($p = 0,02$) arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu, diğer faktörlerin takım ömrü üzerinde anlamlı bir etkilerinin olmadığı ($p > 0,05$) tespit edilmiştir.

Çizelge 6. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları. (ANOVA results for surface roughness)

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F oranı	% katkı	P değeri
Kesme hızı	1	0,170	0,78	5,26	0,393
Kesici takım malzemesi	1	0,012	0,05	0,39	0,819
İş parçası malzemesi	1	2,7531	79,13	84,97	0,000
İşleme koşulu	1	0,165	0,75	5,09	0,401
Hata	14	2,4650		4,29	
Toplam	18	5,5651		100	

Çizelge 7. Takım ömrü için ANOVA sonuçları. (ANOVA results for tool life)

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F oranı	% katkı	P değeri
Kesme hızı	1	8978	4,65	24,94	0,049
Kesici takım malzemesi	1	3630	1,57	10,09	0,231
İş parçası malzemesi	1	2093	0,86	5,82	0,368
İşleme koşulu	1	17756	13,63	49,33	0,02
Hata	14	27878,25		9,82	
Toplam	18	60335,25		100	

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, AISI 52100 rulman çeliği ısıtılmış ve küreselleştirme ısıtılmış işlemi sonrasında karbür ve seramik takımlarla farklı kesme hızlarında tormalanmıştır. Çalışma sonrasında elde edilen veriler aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Kuru işleme koşullarında, kesme hızının artmasıyla, her iki takım malzemesi için de takım ömrü azalmıştır. Küreselleştirme ısıtılmış işlemi uygulanmış numunelerin seramik takımlarla daha uzun süre işlendikleri gözlemlenmiştir. En yüksek takım ömrü değeri, seramik takım için $V=150$ m/dak hızı değerinde küreselleştirilmiş numunenin işlenmesinde durumunda 80 dak. olarak ölçülmüştür.
- Kuru işleme koşullarında, kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerleri azalmıştır. Küreselleştirilmiş numunelerde daha kaliteli yüzeyler elde edilirken, kesici takım cinsinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Seramik takım malzemesi için LogV ve LogT ilişkisi yardımıyla belirlenen Taylor modelindeki n üstel değerinin karbür takımından daha yüksek olduğu görülmüştür.
- MMY işleme koşullarında, kuru işleme şartlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu tekniğin uygulanmasıyla takım ömrünün ısıtılmış işleme birlikte %79.62 oranında; yüzey kalitesinin ise %24.92 oranında iyileştirilebileceği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar bu çalışmaya mali destek sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: TKF.14.01) teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J. Guddat, R. M'Saoubi, P. Alm, D. Meyer, "Hard turning of AISI 52100 using PCBN wiper geometry inserts and the resulting surface integrity", *Procedia Engineering*, 19: 118- 124, (2011).
- [2] G. S. Galoppi, M. S. Filho, G. F. Batalha, "Hard turning of tempered DIN 100Cr6 steel with coated and

no coated CBN inserts", *Journal of Materials Processing Technology*, 179: 146-153, (2006) .

- [3] Gérard Poulachon, B.P. Bandyopadhyay, I.S. Jawahir, Sébastien Pheulpin, Emmanuel Seguin, "Wear behaviour of CBN tools while turning various hardened steels ", *Wear*, 256: 302-310, (2004).
- [4] Anderson P. Paiva, João Roberto Ferreira, Pedro P. Balestrassi, "A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization", *Journal of Materials Processing Technology*, 189: 26-35, (2007).
- [5] D. Singh, P. V. Rao, "A surface roughness prediction model for hard turning process" *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 32: 1115-1124, (2007).
- [6] D. Umbrello, F. Micari, I.S. Jawahir, "The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining: A comparison with dry machining" *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61: 103-106, (2012).
- [7] G. Ambrogio, L. Filice, R. Shivpuri, D. Umbrello, "Application of NN technique for predicting the in-depth residual stresses during hard machining of AISI 52100 steel" *Int J Mater Form* 1: 39-45, (2008).
- [8] G.L. Manco, S. Caruso, G. Rotella, "FE modeling of microstructural changes in hard turning of AISI 52100 steel" *International Journal of Material Forming* 3: 447-450, (2010).
- [9] P. M. Escalona, S. Melkote, K. Liu, "Influence of the Stress, Strain, and Temperature on the Surface Roughness of an AISI 52100 Steel Due to an Orthogonal Cut" *JMEPEG* 14: 582-590, (2005).
- [10] Huang, Y., & Liang, S. Y. "Effect of cutting conditions on tool performance in CBN hard turning. *Journal of manufacturing processes*", 7(1): 10-16, (2005).
- [11] Azizi, M. W., Belhadi, S., Yallose, M. A., Mabrouki, T., & Rigal, J. F. "Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel" *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (12): 4105-4114, (2012).
- [12] Motorcu, A. R., "Isıl İşlemsiz ve Küreselleştirilmiş Ç52100 Rulman Çeliğinin Farklı Takımlarla İşlenmesinde Takım Ömrü Ve Aşınmasının İncelenmesi." *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 25(1): 65 – 75, (2010).
- [13] Uluğ, D., "Kaplama ve Kaplamasız Sementit Karbür Takımlar İçin Taylor Takım Ömrü Modeli'ndeki "n" Üstel Değerinin Deneysel Olarak Araştırılması", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).

AA 7075-T6 Alaşımının Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Sıcaklığı Ve İlerleme Kuvvetine Etkilerinin Araştırılması

Ulaş ÇAYDAŞ*, Mahmut ÇELİK

Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 23119 Elazığ

(Geliş/Received : 26.04.2016 ; Kabul/Accepted : 31.05.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, AA 7075 – T6 alüminyum alaşımı kuru delme koşullarında K 20 kalitesindeki karbür takımlarla sürekli delme deneylerine tabi tutulmuştur. Deneylerde kesme hızı (V) sabit tutulurken, ilerleme miktarı (f) ve matkap uç açısı (θ) parametreleri, belirli sınırlar içerisinde değiştirilmiş ve bu faktörlerin yüzey pürüzlülüğü, ilerleme kuvveti ve takım uç sıcaklığı üzerindeki etkileri deneysel olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, AA 7075 – T6 alaşımının delinmesinde en uygun şartlar araştırılarak sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA 7075 – T6, Takım Sıcaklığı, Yüzey Pürüzlülüğü, Delme, İlerleme Kuvveti.

Investigation of the Effects of Cutting Parameters on The Surface Roughness, Tool Temperature and Thrust Force in Drilling of AA 7075-T6 Alloy

ABSTRACT

In this study, the AA 7075 – T6 aluminum alloy was subjected to continuous drilling process with K 20 grade carbide tools under dry machining conditions. In the experiments, the cutting speed (V) was fixed, while tool feed rate (f) and tool point angle (θ) were changed in certain intervals to experimentally explore their effects on the surface roughness, thrust force and tool bit temperature. Consequently, optimum parameter conditions were determined and evaluated for the best drilling of AA 7075 – T6 alloy.

Keywords: AA 7075 – T6, Tool Temperature, Surface Roughness, Drilling, Thrust Force.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hafif metaller grubu içerisinde yer alan AA 7075 –T6 alüminyum alaşımı, sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek sertlik, mukavemet ve termal özellikler nedeniyle, özellikle havacılık, otomotiv ve savunma sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımın işlenebilirliği, aynı grup içerisinde yer alan titanyum ve magnezyum alaşımlarına nazaran daha kolaydır [1 – 3]. Delme yöntemi, bu malzemenin işlenmesinde, tornalama, frezeleme ve taşlama gibi diğer talaşlı imalat yöntemlerine nazaran daha çok kullanılmaktadır. Ancak delme esnasında, matkap takımı malzeme içerisine doğru ilerleme hareketi yaptığından ve talaş kaldırma işlemi kapalı bir alanda gerçekleştiğinden dolayı oluşan ısı, delik içerisindeki kesme alanında yoğunlaşmaktadır. Talaş kaldırma için gerekli olan mekanik enerjinin önemli bir bölümü ısı enerjisine dönüşmekte ve ara bölgede sıcaklık artışı yaşanmaktadır. Sıcaklıktaki bu artışlar, kesici takım ve iş parçasının her ikisinde de termal hasarlara yol

açarak takım aşınmasını hızlandırmakta ve delikte boyutsal tolerans hatalarına neden olmaktadır [4]. Dolayısıyla delme işlemindeki sıcaklık değerlerinin ölçülmesi büyük önem arz etmektedir. Sıcaklığın ölçülmesiyle ilgili çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Beno ve Hulling [5] takım çeliği, Inconel 718 nikel alaşımı ve Ti-6Al-4V olmak üzere üç farklı malzemenin delinmesinde takımın kesme kenarındaki ve serbest yüzeydeki sıcaklıkları fiber optik kızılötesi pirometre yardımıyla ölçmüşlerdir. Dörr vd. [6] çelik malzemelerin delinmesinde farklı kaplama malzemelerinin sıcaklık üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Sıcaklık ölçümleri, yüksek çözünürlüklü bir termal kamera yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Agapiou vd. [7] takım sıcaklığını, içten soğutmalı matkap takımların iç delikleri (iki adet) içerinden geçirilen ve kesme kenarına konumlandırılan bir ısı çifti yardımıyla ölçmüşlerdir. Takım sıcaklığının, matkap uç açısının ve işleme zamanının artmasına bağlı olarak arttığı, helis açısının artmasıyla ise azaldığı tespit edilmiştir. Bağcı ve Özçelik [8] AISI 1040 çeliği ve AA 7075-T651 alüminyum alaşımının TiN/TiAlN kaplamalı karbür takımlarla sürekli ve gagalayarak delinmesinde; delme derinliği,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: ucaydas@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 419-425

devir sayısı ve ilerleme oranının matkap uç sıcaklığı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Sıcaklık ölçümleri, matkapların içinden geçen soğutma deliklerine yerleştirilen K tipi krom nikelli ısı çiftler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Li ve Shih [9] kesme kenarından çapa doğru dört farklı noktadan takım soğutma deliklerine yerleştirilen ısı çiftler yardımıyla takım sıcaklığını ölçmüşlerdir. Takım sıcaklığını tahmin eden bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve deneysel

2. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Deneylerde ticari olarak temin edilmiş AA 7075 –T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşım; yüksek mukavemet gerektiren yerlerde, termoform kalıplarında, vida, cıvata, somun yapımında ve çeşitli makine sanayisinde kullanılmaktadır. Bu alaşıma ait kimyasal bileşim ve mekanik özellikler Çizelge 1 ve Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 1. AA 7075 – T6 alaşımının kimyasal bileşimi. (Chemical composition of AA 7075-T6 alloy)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Zi+Ti	Diğer	Al
0.5	0.5	1.6	0.3	2.5	5.7	0.25	0.25	0.16	Kalan

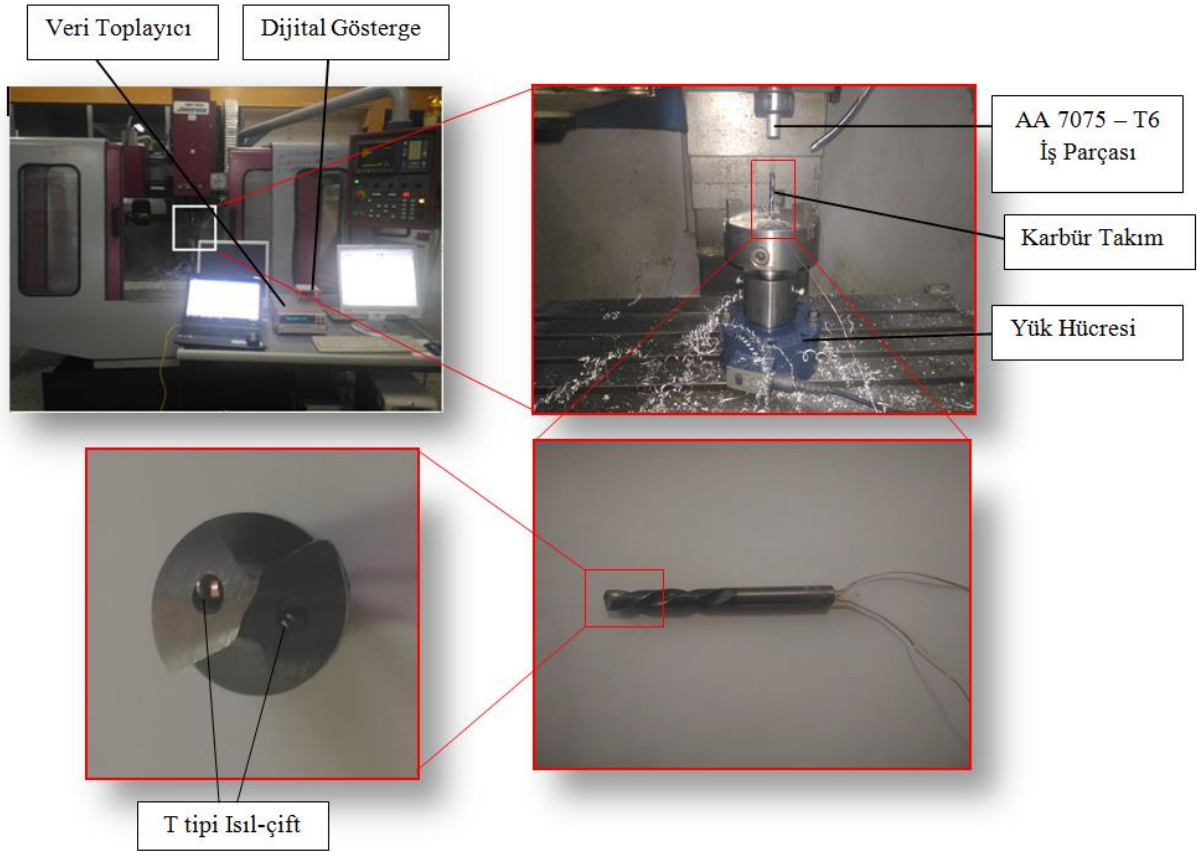
sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kesme hızının artmasıyla takım kenarındaki sıcaklıkların merkeze yakın bölgelere nazaran daha yüksek değerlere çıktığı belirlenmiştir. Çakıroğlu ve Acır [10] AA 7075 alüminyum alaşımının kaplamalı karbür takımlarla delinmesinde kesme hızı, ilerleme oranı ve takım malzemesinin takım uç sıcaklığı üzerindeki etkilerini Taguchi yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışmada sıcaklığın tahmin edilmesi için regresyon analizi kullanılmış ve geliştirilen model sonuçları ile deney sonuçlarının tutarlı oldukları belirtilmiştir. Sıcaklık üzerinde en etkili faktörün %56.15 oranıyla ilerleme miktarı olduğu, bunu sırasıyla kesme hızı ve takım malzemesi faktörlerinin takip ettiği elde edilmiştir. M.Tolga Özkan [11] AA 7075 – T6 alüminyum alaşımının delinmesinde, kesme hızı, ilerleme miktarı ve devir sayısı faktörlerinin iş parçasında oluşan ısı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada, oluşan ısı miktarını tahmin etmek için bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Faktörlerin istatistiksel etkileri varyans analizi yöntemi (ANOVA) yardımıyla incelenmiştir. Sonuç olarak deney sonuçları ile model tahmin sonuçlarının tutarlı oldukları (%0.015 kadar küçük bir hata oranıyla) tespit edilmiştir.

Konuyla ilgili yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, delme yönteminde oluşan takım sıcaklığının farklı yöntemlerde ölçüldüğü görülmektedir. Bu yöntemler içerisinde ısı çiftler yardımıyla sıcaklığın ölçülmesi, literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Diğer yandan AA 7075 –T6 alaşımının delinmesinde sıcaklık ölçümü ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Ancak, bu alaşımın farklı uç açılara sahip takımlarla delinmesinde sıcaklıkla birlikte ilerleme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğündeki değişiminin yeterince araştırılmadığı görülmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, mevcut literatürden farklı olarak, AA 7075 –T6 alaşımının delinmesinde kesme parametreleri ve takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğü, ilerleme kuvveti ve takım sıcaklığı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

Çizelge 2. AA 7075 – T6 alaşımının mekanik özellikleri. (Mechanical Properties of AA 7075-T6 alloy)

Mekanik Özellik	
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	600
Akma Mukavemeti (MPa)	550
Uzama (%)	11
Sertlik (HB)	150

Deneylerde 20 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda numuneler kullanılmıştır. Deneyler, dik işlem merkezli Johnford CNC freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Delme takımları olarak, içten soğutmalı K 20 kalitesinde ve farklı uç açılara sahip 8 mm çapında matkaplar kullanılmıştır. Takım uç sıcaklıkları, matkapın iç soğutma deliklerinden geçirilen, kesme kenarına yakın bir noktaya konumlandırılan ve ölçüm aralığı -100 – 390 °C olan T tipi ısı çiftler yardımıyla ölçülmüştür. İlerleme kuvvetleri, 20 ton kapasiteli ve tek eksende ölçüm yapabilen CAS LS – 20T bir yük hücresi yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ve kuvvet değerleri zamana bağlı olarak bir bilgi toplayıcıya kaydedilmiştir. Deney düzeneği ve detaylar Şekil 1’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek amacıyla numuneler kesilmiştir (Şekil 2). Yüzey pürüzlülük değerleri, Mitutoyo SurfTest SJ-201 taşınabilir bir ölçüm cihazı yardımıyla 0.8mm örneklem uzunluğu aralığında ölçülmüştür. Her delikten 3 farklı ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalamaları ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) olarak kabul edilmiştir. Deneylerde, ilerleme kuvvetini ve takım aşınmasını azaltmak amacıyla numunelere 5 mm çapında ön delikler delinmiştir. Matkap uç açısı ve ilerleme miktarı faktörlerine bağlı olarak sürekli delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeleri Çizelge 3’te verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği. (Experimental setup)



Şekil 2. Deney numunesi ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü. (Specimen and surface roughness measurement)

Çizelge 3. Delme parametreleri ve seviyeleri. (Drilling parameters and levels)

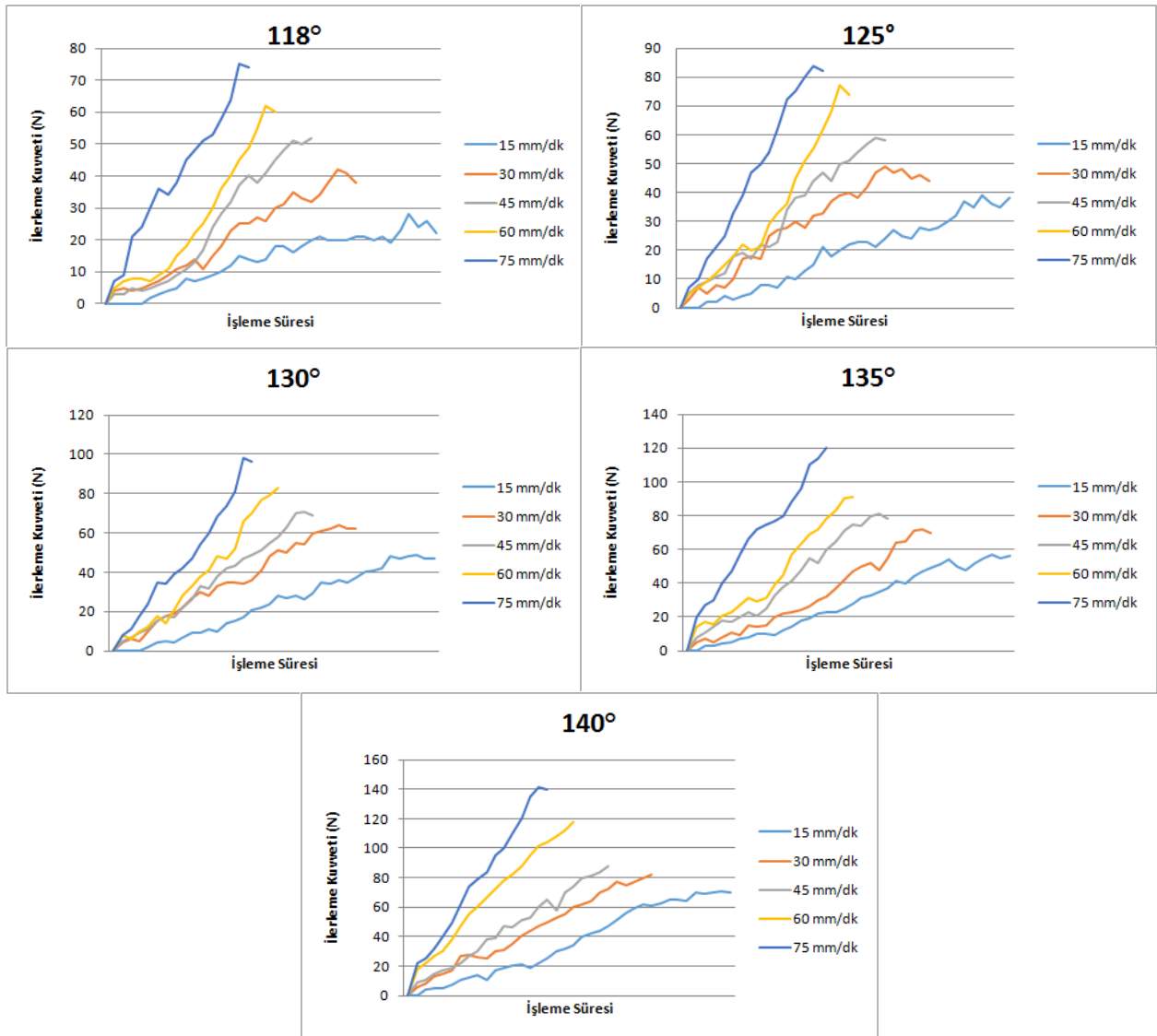
Parametre	Seviye1	Seviye 2	Seviye3	Seviye 4	Seviye 5
İlerleme miktarı (mm/dak)	5	10	15	20	25
Kesici takım uç açısı (°)	118	125	130	135	140
İşleme koşulu	Kuru işleme				
Devir sayısı (dev/dak)	1500 (sabit)				

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Eksenel ilerleme kuvveti ölçüm sonuçları (Thrust Force Measurement Results)

Şekil 3'de AA 7075 – T6 alüminyum alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin eksenel ilerleme

kuvveti üzerindeki etkileri verilmiştir. Şekil incelendiğinde, tüm takımlarda ilerleme hızının artmasıyla birlikte ilerleme kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Bu durum, artan ilerleme hızının talaş kesitini de arttırması sonucunda talaş kaldırma işlemi için daha büyük kuvvetlere ihtiyaç duyulması olarak değerlendirilebilir [10].

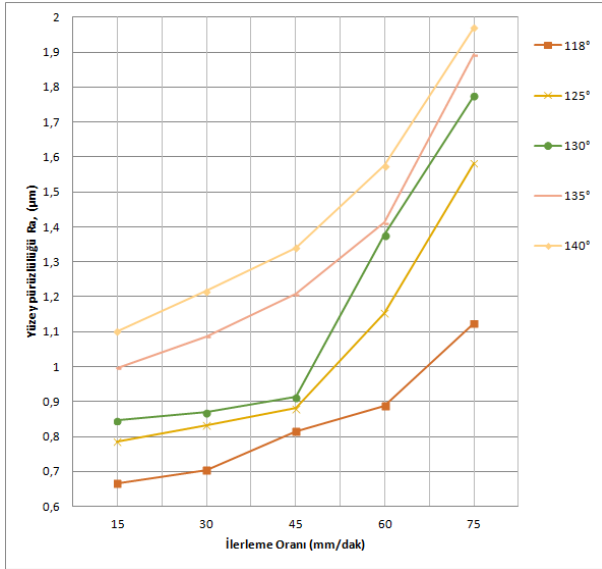


Şekil 3. Matkap uç açısının ve ilerleme hızının eksenel ilerleme kuvvetine etkisi. (Effect of drill bit angle and feed rate on thrust force.)

Uç açısının 118° olduğu durumda en yüksek ilerleme kuvveti, ilerleme hızının 75 mm/dak değerinde 75N, en düşük ilerleme kuvveti ise ilerleme hızının 15 mm/dak değerinde 28N olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla ilerleme hızındaki bu artış, eksenel ilerleme kuvvetinde %167 oranında bir artışa neden olmaktadır. İlerleme hızına bağlı olarak eksenel ilerleme kuvvetindeki bu artış oranı, matkap uç açısının artmasıyla daha da artmaktadır. Matkap uç açısının 140° 'ye çıkmasıyla, 118° uç açısına sahip matkaba nazaran ilerleme kuvveti yaklaşık %200 oranında artarak 70N değerinden 141N değerine yükselmektedir. Bu durum, matkap takımının kesme kenarı uzunluğu ile ilişkilendirilebilir. Benzer sonuçlar, literatürde de ifade edilmektedir [12-15].

3.2. YüzeY Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları (Surface Roughness Measurement Results)

Şekil 4'te ilerleme hızı ve matkap uç açısının yüzeY pürüzlülüğü üzerindeki etkileri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, ilerleme hızının artmasıyla numunelerin yüzeY pürüzlülük değerleri de artmaktadır. Tüm matkaplar için, yüzeY pürüzlülüğündeki bu artış eğilimi, ilerleme hızının 45 mm/dak değerinin üzerine çıkmasıyla daha da yükselmektedir. Bilindiği gibi delme işleminde, talaş genişliği ve derinliğinin sabit olduğu durumda, takım – talaş arasındaki temas alanının büyüklüğü, ilerleme hızıyla orantılı bir şekilde değişmektedir. Dolayısıyla ilerleme hızının artmasıyla, birim zamanda alınan yol artmakta ve yüzeYde daha geniş adımlı oluşan helisel izler daha kaba yüzeYlerin oluşmasına neden olmaktadır [16].

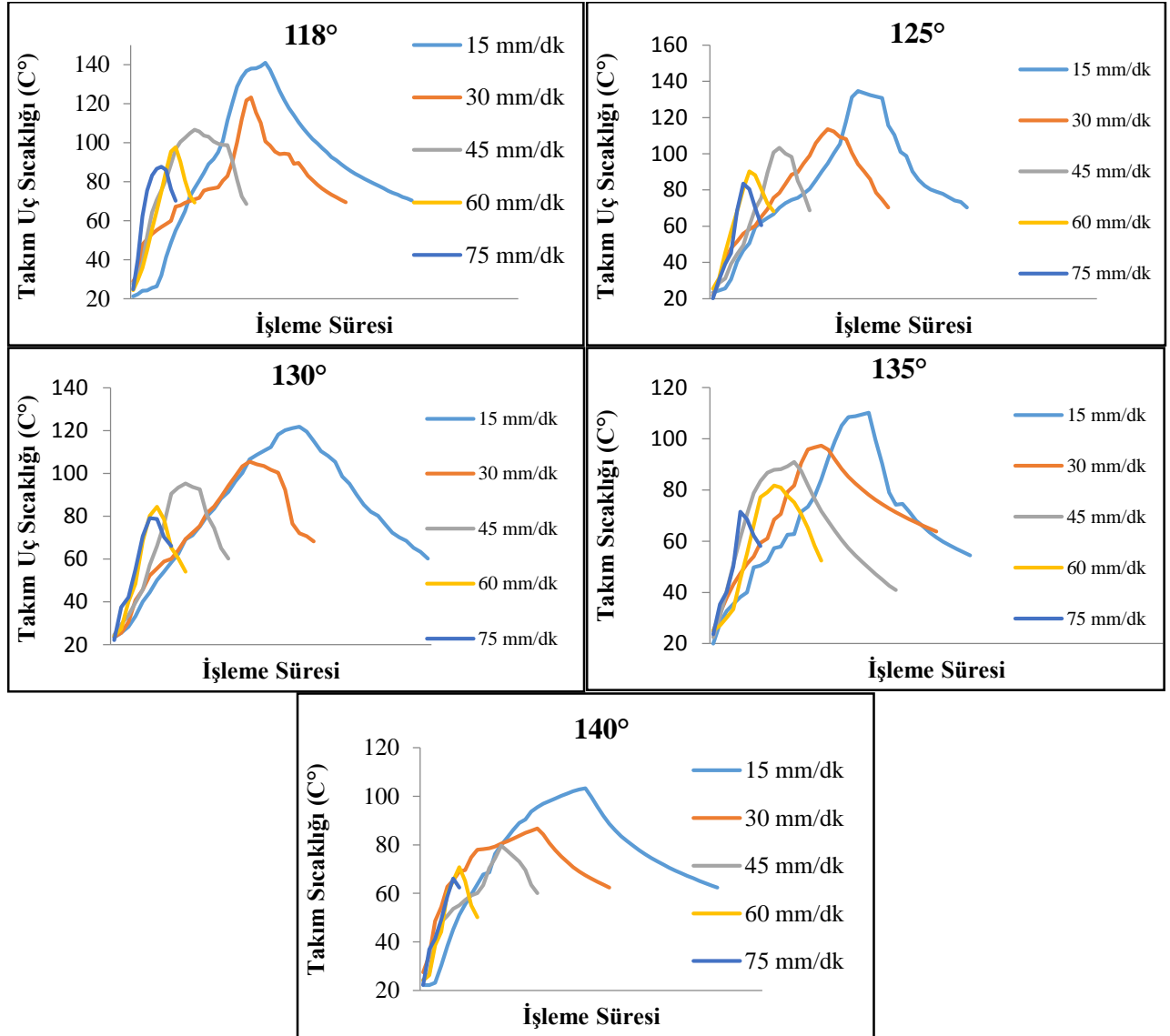


Şekil 4. Matkap uç açısının ve ilerleme hızının yüzeY pürüzlülüğüne etkisi. (Effect of drill bit angle and feed rate on surface roughness.)

Grafikten ayrıca, matkap uç açısının artmasıyla yüzeY pürüzlülüğünün kötüleştiği görülmektedir. En düşük yüzeY pürüzlülüğü, 118° uç açılı matkapla 15mm/dak ilerleme hızında 0.667 μm olarak ölçülmüştür. Aynı matkapla yapılan deneylerde ilerleme miktarının 75 mm/dak değerine çıkarılmasıyla, yüzeY pürüzlülüğü %68.5 artarak 1.124 μm olmaktadır. Matkap uç açısının 140° olduğu durumlarda yüzeY pürüzlülüğü %78.76 oranında artarak 1.102 μm değerinden 1.970 μm değerine yükselmektedir. Dolayısıyla ilerleme hızı ile birlikte matkap uç açısının da yüzeY pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisinin olduğu söylenebilir. Bu durum, uç açısının ve dolayısıyla temas alanının artması ve buna bağlı olarak sürtünmelerin ve matkapta oluşan aşınma miktarlarının artmasıyla ilişkilendirilebilir.

3.3. Takım Sıcaklığı Ölçüm Sonuçları (Tool Temperature Measurement Results)

Şekil 5'de zamana bağlı olarak matkap uçlarından alınan sıcaklık ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, tüm matkaplarda sabit devir sayısı değerinde ($n=1500$ dev/dak) ilerleme hızının artmasıyla takım uç sıcaklık değerleri azalmaktadır. 118° uç açılı matkapla yapılan deneylerde ilerleme hızının %100 arttırılmasıyla takım ucundan ölçülen en yüksek sıcaklık değeri %61.62 oranla 139°C 'den 86°C 'ye düşmektedir. İlerleme hızının artmasıyla sıcaklık değerlerindeki bu azalma oranları, uç açılara bağlı olarak sırasıyla 125° için %61.44, 130° için %53.16, 135° için %54.92 ve 140° için % 56.06 olmaktadır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, tüm matkaplar için ilerleme hızının artmasıyla sıcaklık değerlerinde önemli azalmaların gerçekleştiği görülmektedir. İlerleme hızının artmasıyla birim zamanda daha fazla talaş kaldırılmaktadır. Dolayısıyla, takım talaş ara yüzeYindeki sürtünmelerden kaynaklanan ısı enerjisinin ve bunun bir sonucu olan sıcaklıkların ara bölgeden talaşla birlikte daha etkin bir şekilde tahliye edildiği söylenebilir. Benzer sonuçlar Çakıroğlu ve Acır [17] tarafından da ifade edilmiştir. Çakıroğlu ve Acır, AA 7075 – T6 alaşımının delinmesinde takım sıcaklığının işleme koşullarına bağlı olarak 112°C – 247°C aralığında değiştiğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmada ise aynı malzeme için takım uç sıcaklık değerleri 66°C – 140°C aralığında ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar literatürle karşılaştırıldığında, numunelerdeki ön deliklerin sıcaklık değerlerinde önemli azalmalara yol açtığı görülmektedir. Şekil 5'te ayrıca matkap uç açısının artmasıyla sıcaklık değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, uç açısının artmasıyla kesme kenarı uzunluğunun ve dolayısıyla takım – talaş temas uzunluğunun azalmasıyla ilişkilendirilebilir. Matkap uç açısının yüksek olduğu durumlarda, sürtünme temas uzunluğunun azalmasına bağlı olarak daha düşük sıcaklık değerleri meydana gelmektedir.

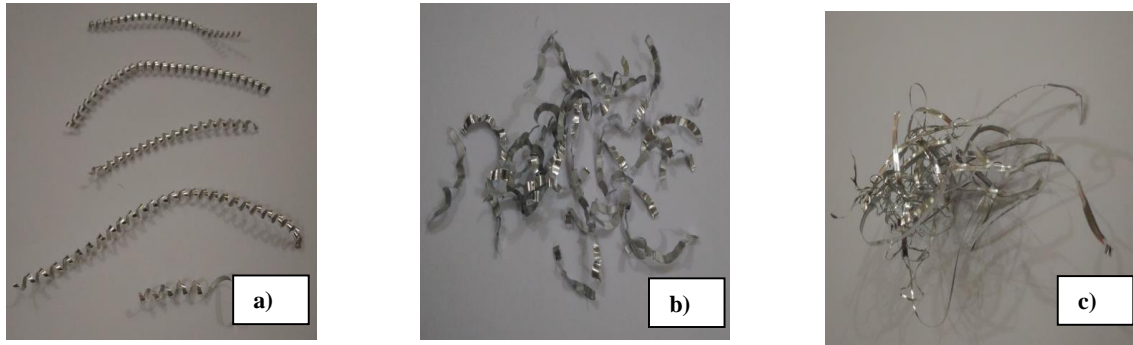


Şekil 5. Matkap uç açısının ve ilerleme hızının takım sıcaklığına etkisi. (Effect of drill bit angle and feed rate on tool temperature.)

4. TALAŞ YAPISI (CHIP MORPHOLOGY)

Alüminyum alaşımlarının talaş yapıları diğer metallere nazaran oldukça farklıdır. Bu çalışmada, işleme koşullarına bağlı olarak 3 farklı talaş tipi elde edilmiştir. Bunlar sürekli helisel talaş, dolaşık bant talaş ve kısa

kesikli talaş olarak gruplandırılabilir. İlerleme hızının ve takım uç açısının düşük olduğu deneylerde, sürekli, sünek ve uzun talaşlar elde edilirken (Şekil 6a), ilerleme hızının ve matkap uç açısının artmasıyla malzemedeki nispi sertlik artışına bağlı olarak kısa ve kesikli talaşlar oluşmaktadır (Şekil 6b). İlerleme hızının ve matkap uç



Şekil 6. Talaş tipleri (a: sürekli uzun talaş, b:kısa kesikli talaş, c:dolaşık bant talaş) . (Chip types (a: continous chip, b:short chip, c:involute chip)

açısının ve dolayısıyla ilerleme kuvvetlerinin yüksek olduğu deneylerde, düzensiz dolaşık bant talaşlar meydana gelmiştir (Şekil 6c). Talaş renklerinde sıcaklıktan kaynaklanan herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, AA 7075 – T6 alüminyum alaşımı, farklı uç açılara sahip K20 kalitesindeki karbür matkaplarla farklı ilerleme hızı değerlerinde delinmiştir. İşleme parametrelerinin takım sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve ilerleme kuvveti üzerindeki etkileri deneysel olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonrasında elde edilen veriler aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- İlerleme hızının ve matkap uç açısının artmasıyla, tüm deneylerde aksel ilerleme kuvveti de artmıştır.
- Numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri, ilerleme miktarı ve matkap uç açısıyla artmıştır.
- Takım uç sıcaklıkları artan ilerleme hızı ve matkap uç açısı değerlerine bağlı olarak azalmıştır.
- Ön delik açılmış numunelerden ölçülen sıcaklık değerleri, mevcut literatürde yer alan aynı malzeme için ön deliksiz koşullara nazaran önemli derecede azalmaktadır.
- Sürekli helisel talaş, dolaşık bant talaş ve kısa kesikli talaş olmak üzere 3 farklı tip talaş elde edilmiştir. İlerleme miktarının artmasıyla talaş tipi, uzun sürekli yapıdan dolaşık bant yapıya dönüşmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Rotella, G., O. W. Dillon, D. Umbrello, L. Settineri, and I. S. Jawahir. "Finite element modeling of microstructural changes in turning of AA7075-T651 alloy." *Journal of Manufacturing Processes*, 15(1): 87-95, (2013).
- [2] Paturi, Uma Maheshwera Reddy, Suresh Kumar Reddy Narala, and Rajdeep Singh Pundir. "Constitutive flow stress formulation, model validation and FE cutting simulation for AA7075-T6 aluminum alloy." *Materials Science and Engineering: A*, 605: 176-185, (2014).
- [3] Songmene, V., A. Djebara, I. Zaghbani, J. Kouam, and R. Khettabi, "Machining and machinability of aluminum alloys", *INTECH Open Access Publisher*, (2011).
- [4] Sato, Masahiko, Tomoyuki Aoki, Hisataka Tanaka, and Satoshi Takeda. "Variation of temperature at the bottom surface of a hole during drilling and its effect on tool wear." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 68: 40-47, (2013).
- [5] Beno, Tomas, and U. Hulling, "Measurement of cutting edge temperature in drilling." *Procedia CIRP*, 3: 531-536, (2012).
- [6] Dörr, J., Th Mertens, G. Engering, and M. Lahres, "In-situ temperature measurement to determine the machining potential of different tool coatings." *Surface and Coatings Technology*, 174: 389-392, (2003).
- [7] Agapiou, J. S., and D. A. Stephenson, "Analytical and experimental studies of drill temperatures." *Journal of Engineering for Industry*, 116(1): 54-60, (1994).
- [8] Bağcı, E., Ozcelik, B., "Investigation of the effect of drilling conditions on the twist drill temperature during step-by-step and continuous dry drilling." *Materials & design*, 27(6): 446-454, (2006).
- [9] R. Li, A.J. Shih, "Tool temperature in titanium drilling", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129 (4):740-749, (2007).
- [10] Uçun, İ., "3D finite element modelling of drilling process of Al7075-T6 alloy and experimental validation", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(4): 1843-1850, (2016).
- [11] Özkan, M.T., "Experimental and artificial neural network study of heat formation values of drilling and boring operations on Al 7075-T6 workpiece", *Indian Journal of Engineering&Materials Sciences*, 20: 259-268, (2013).
- [12] A. Paul, S. G. Kapoor and R. E. Devor, "A chisel edge model for arbitrary drill point geometry", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127(1): 23-32, (2005).
- [13] M. S. Won and C. K. H. Dharan, "Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124 (2): 242-247, (2002).
- [14] D. A. Stephenson and J. S. Agapiou, Metal cutting theory and practice, *CRC press*, London (2005).
- [15] C. C. Tsao and H. Hocheng, "The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (11): 1087-1092, (2003).
- [16] Çelik, Y.H., "Investigating the Effects of Cutting Parameters on the Hole Quality in Drilling The Ti-6Al-4V Alloy", *Materiali in Tehnologije*, 48(5): 653-659, (2014).
- [17] Çakıroğlu, R. and Acır, A., "Optimization of cutting parameters on drill bit temperature in drilling by Taguchi method", *Measurement*, 46(9): 3525-3531, (2013).

The Need for the Integration of Land Use Planning and Water Quality Modeling in the Case of Fethiye Bay

Nihal YILMAZ^{1*}, Kağan CEBE², Pelin FIDANOĞLU YILDIRIM², Asu İNAN², Lale BALAS²

¹Gazi University, Marine and Water Sciences Research and Application Center, Ankara, Turkey

²Gazi University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey

(Received : 18.08.2016 ; Accepted : 22.09.2016)

ABSTRACT

Different forms of land uses (e.g. agriculture, tourism, recreational, industrial, housing) have detrimental impacts on water bodies (e.g. rivers, lakes, coastal waters). Thus, comprehensive land use plans developed integrating water quality models would certainly provide better solutions for the sustainability of natural water resources. In this study, the inner bay of Fethiye, located along the south-west coast of Turkey, is selected as a case to identify the land use and water quality relationship. At six locations in the Bay, various physical and chemical parameters (e.g. temperature, density, salinity, pH, concentrations of dissolved oxygen, nitrite, nitrate and total dissolved solid) were monitored by monthly field and laboratory measurements for four months during summer and autumn seasons. The measured nitrite, nitrate and dissolved oxygen concentrations were then compared with the estimations of the water quality sub model of HYDROTAM-3D, which is an implicit baroclinic 3D numerical model developed to simulate hydrodynamics, transport processes and basic water quality parameters in coastal waters. The paper presents results on monitored water quality parameters and model estimations, and discusses the sea water quality of the inner bay of Fethiye emphasizing the impacts of land use patterns in the town.

Keywords: Water Quality, Ecological Model, Land Use, Fethiye Bay.

Kara Kullanımı Etkileşimli Su Kalitesi Modellemesine Gereksinim:Fethiye Körfezi Örneği

ÖZ

Arazi kullanım şekillerinin (tarım, turizm, rekreasyonel, endüstriyel, konut gibi) su kütleleri (akarsular, göller, kıyı suları gibi) üzerinde zararlı etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, su kalitesi modelleri ile bütünleştirilmiş kapsamlı arazi kullanım planlarının geliştirilmesi, doğal su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından çok daha iyi çözümler sağlayacaktır. Bu çalışmada, arazi kullanımı ve su kalitesi arasındaki ilişkiyi gösterir bir örnek olarak Fethiye iç körfezi seçilmiştir. Körfez içinde altı noktada, çeşitli fiziksel ve kimyasal parametreler (sıcaklık, yoğunluk, tuzluluk, pH, çözülmüş oksijen, nitrit, nitrat, toplam askıda katı madde gibi) yaz ve sonbahar mevsimlerinde dört ay için aylık olarak gerçekleştirilen saha ve laboratuvar ölçümleri ile izlenmiştir. Ölçülen nitrit, nitrat ve çözülmüş oksijen konsantrasyonları, daha sonra, baroklinik sayısal bir kıyasal su hidrodinamik, taşınım ve su kalitesi modeli olan HYDROTAM-3D altındaki su kalitesi modeli ile gerçekleştirilen tahminler ile karşılaştırılmıştır. Makalede, izlenen bazı su kalitesi parametreleri ve model tahminleri sunulmakta, ve Fethiye iç körfezi deniz suyu kalitesi, ilçedeki arazi kullanım özellikleri vurgulanarak tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Su Kalitesi, Ekolojik Model, Arazi Kullanımı, Fethiye Körfezi.

1. INTRODUCTION

People depend on water resources for several aspects in daily life; agriculture, industry, well-being, etc. The protection of the long-term water quality and ecological integrity is, therefore, one of the long-term priorities. However, the quality of water all over the world is under continuous degradation due to various anthropogenic activities. Different forms of land uses (e.g. agriculture, tourism, recreational uses, industrial, housing) have detrimental impacts on quality of water bodies. The central concern for the protection of water quality is to reduce the flow of pollutants, and reverse some of the

adverse environmental degradations of the past. This might be achieved by proper and applicable land use planning and management. Once the land-water relationship is identified, it leads to the need of protecting water quality through proper land-use planning by identifying cost-effective pollution prevention and pollution correction approaches that can address all the sources of pollution in a comprehensive way. Most planning agencies and local authorities do not have resources to collect extensive water quality data in developing the plans. However, a holistic approach to land-water relationship is certainly required. In this context, today, water quality models come out as a crucial tool. Integrating water quality models into land use planning would provide the development of comprehensive land use plans with better solutions to the

*Corresponding Author

e-mail: ynihal@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 427-435

conflicts between the economic and ecological interests, thus the sustainability of natural resources such as the water.

The ecosystems in coastal waters, especially in closed or semi-closed waters rely upon the complex interaction between the chemical and physical environment and the existing organisms. These ecosystems have very complicated dynamics due to the spatial and temporal variability of the parameters within the water body. Most of the marine ecological models aim to simulate the biological and chemical processes in marine environment to predict the water quality parameters, through which it is possible to define the ambient conditions. Beginning with the early marine ecosystem models, ecological processes are represented as a series of formulas driven from data assembled from field observations, e.g. [1-4].

There are several water quality models in literature developed for surface aquatic systems for different topography, water bodies, and pollutants at different space and time scales utilizing various model algorithms [5]. For instance, WASP models [6], QUAL models [7] and MIKE models [8] are among the widely used water quality models [5].

The water quality model utilized in this study is a component of HYDROTAM 3D, which is a three dimensional numerical hydrodynamic and transport model for coastal waters. Since 1990s, HYDROTAM 3D has been applied to many coastal areas in Turkey and has been verified by comparing the analytical and experimental results with the field studies [9-12]. The water quality sub model of HYDROTAM 3D is based on fundamental biological and chemical cycles of the organic matter and their relationship with the lower trophic levels in marine environment [13,14].

In this research study, inner bay of Fethiye has been selected as the coastal area to identify the land use and water quality relationship. Fethiye is one of the largest settlements and tourism destinations in Muğla Province. However, as pointed out by [15-17], the natural ecosystem of the bay in Fethiye has been damaged and its long-term sustainability is at risk. Pollution due to marina activities, yacht tourism, fisheries and houses, and also the irrigation canals and streams are observed to be the main sources affecting the biodiversity and ecological integrity and the siltation of Fethiye Bay. In the research, a monitoring study was carried out for the inner Fethiye Bay, to understand the water quality and dynamics of the Bay. At six locations determined in accordance with the aim of the study, various physical and chemical parameters (e.g. temperature, density, salinity, pH, concentrations of dissolved oxygen (DO), nitrite (NO_2^-), nitrate (NO_3^-) and total dissolved solid TDS) were measured by monthly field and laboratory measurements during summer and autumn seasons. Besides, utilizing HYDROTAM 3D, a water quality model has been prepared for the inner bay, and the measured nitrite, nitrate and dissolved oxygen concentrations have been compared with the model estimations.

2. MATERIAL AND METHOD

Water quality of the inner bay of Fethiye has been observed both through the field and laboratory measurements and also through the numerical model estimates as described in the following sub sections.

2.1. Study Area and the Main Sources of Pollution

The study area is the inner bay of Fethiye located at the south-eastern corner of Fethiye Bay, which is in the Eastern Mediterranean at the south-west coast of Turkey (Figure 1). While the Bay in general is at a location open to waves and currents from westerly directions, especially the south-west direction, the inner bay of Fethiye, where the town center is also located, is rather enclosed. The inner bay is connected to the open sea through the two openings between the mainland and Şövalye (Zeytin) island. The only possible water exchange for the inner bay is due to these two narrow openings. Therefore, being in such a protected location, the inner bay is not affected by the offshore currents, and, thus, it is quite vulnerable to pollution.

According to 2010 population census, the population of town center of Fethiye is 77237. With a population surpassing 100000 in the summer, the town is one of the biggest of Muğla Province [18]. Including the surrounding villages, total population reaches to 188259. In Fethiye, one of the main economic activities is tourism. There are around 180 bays along its 167 km coastline and 18 islands in the gulf. Besides the tourism, town economy also prominently depends on agriculture and animal husbandry activities. 55% of the population is involved in agriculture. Total agricultural area covers more than 64000 hectares where 60% of the area has irrigation farming features while 40% has dryland farming [19].

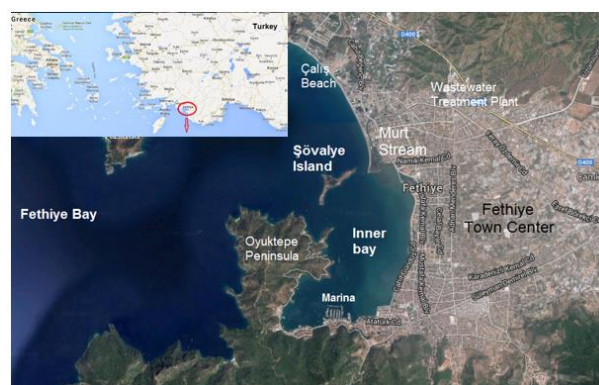


Figure 1. The study area (i.e. the inner bay of Fethiye). [20]

In the region, since the climate and physical features are suitable, mostly irrigation farming is practiced. Drainage water of the agricultural land is carried directly to the inner bay of Fethiye through Murt (Mersinli) stream and several other canals without any treatment. Thus, saline water rich in nitrate and phosphate directly flows into the inner bay of Fethiye through Murt stream and the canals. Since 2003, Fethiye town has a wastewater treatment plant in operation. Wastewater collection network of the

town center transmits the wastewater to this treatment plant which is at Çiftlik village site located east of Çalış Beach. After the treatment process, the treated water is discharged to Murt stream and together with the stream flows into sea at southeast of Şövalye Island. The settlements at western side of the bay and Şövalye Island, however, are not connected to the wastewater collection system of the town yet, and contribute to the pollution of the bay. Besides, waste discharged from the boats at Fethiye Marina and the other berthing locations inside the bay form the other pollution sources in the inner bay.

Consequently, the main sources of pollution for the inner bay of Fethiye can be listed as:

- Discharge through Murt stream which carries the discharged water from the wastewater treatment facility and the drainage water from agricultural activities in the plain,
- Discharge through other canals which carry the drainage water from agricultural activities in the plain,
- Domestic waste of settlements and tourism facilities which are not connected to the wastewater collection system,
- Wastewater due to the boats at Fethiye Marina and other berthing locations.

2.2. Field Measurements

In order to investigate the water quality parameters in the inner bay of Fethiye, firstly, six measurement locations to best represent the characteristics of the marine environment were selected (Figure 2). The measurement points of 1 and 2 were selected to represent the input water from the open sea to the inner bay. Point 4 is a measurement location selected to monitor the coastal water along the eastern coast of Oyuktepe peninsula which is relatively unsettled.

On the other hand, selecting the points 5 and 6, it was aimed to monitor the sea water quality of, respectively, the marina entrance and the outlet of the largest canal of the town center. Besides, selected at the mouth of Murt stream, point 3 was utilized to observe the effects of pollutants reaching to the sea by Murt stream due to wastewater discharged from the wastewater treatment plant and also the drainage water of agricultural activities.

At each measurement location, the physical and chemical water quality parameters (i.e. temperature, salinity, density, pH, concentration of the dissolved oxygen (DO), nitrite (NO_2^-), nitrate (NO_3^-) and total dissolved solid (TDS)) were monitored by monthly field and laboratory measurements at 0.5 m and 10 m depths from the surface for various months in summer and autumn seasons of the year 2014. The only difference related to the measurements exists for the points 3 and 6, where the measurements were carried out at 0.5 m and 3 m depths below the sea surface due to their shallower water depths.



Figure 2. Measurement locations inside the inner bay. [20]

2.3. Modelling the Water Quality Parameters

In the study, besides the field measurements, a water quality model has been prepared and calibrated for the inner bay of Fethiye. The water quality model is a component of HYDROTAM 3D, which is a three dimensional numerical hydrodynamic and transport model for coastal waters. The model includes hydrodynamics, transport, turbulence, wind and wave climate, wave propagation and water quality sub-models, thus simulates circulation patterns due to wind and wave actions, pollutant transport, wave propagation over mild slopes, longshore sediment transport rates and water quality parameters. Since 1990s, HYDROTAM 3D has been applied to many coastal areas in Turkey and has been verified by comparing the analytical and experimental results with the field studies [9-14].

The water quality component of HYDROTAM 3D is an ecological model, based on fundamental biological and chemical cycles of the organic matter and their relationship with the lower trophic levels in marine environment. Model solves the conservation equations and formulations proposed by the United States Environmental Protection Agency [21]. It predicts the water quality parameters by using the formulations representing physical and biochemical mechanisms that also determine the position and momentum of contaminants in a water body and thus imitate the complex interrelations between the water quality parameters and the ecosystem. [13,14]

The rate of change of the water quality parameters are developed by assuming a homogenous distribution of all properties throughout the computational cell and can be generalized as:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (aC) = \sigma \quad (1)$$

where, σ is the sum of the internal sink and sources of the water quality parameter in mg/l/day.

For n number of neighboring computational cells, the formula can be extended as:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = a_1 \cdot \frac{\partial C}{\partial x_1} + a_2 \cdot \frac{\partial C}{\partial x_2} \dots + a_n \cdot \frac{\partial C}{\partial x_n} + S_i - [K]C \quad (2)$$

where, C is the concentration of the water quality parameter in mg/l, a_i is the rate of exchange with neighboring computational cell in m/day, S_i is the source of pollution for cell "i" in mg/l/day, K is the internal rate of change of the water quality parameter [13,14].

Biochemical cycles simulated in the model are the cycles of nitrogen, phosphorus and oxygen. Organisms

simulated in the model are the low trophic levels in aquatic environments i.e. phytoplankton, zooplankton and pelagic bacteria. A basic set of 14 parameters and organic pollutant types, listed in Table 1, are used to simulate closed or semi-closed water bodies [13,14].

Thus, in order to simulate the water quality properties of the study area, the water quality model has been adapted to the inner bay of Fethiye with the computational cell shown in Figure 3. The simulated water body is rather enclosed with a surface area of around 7649197 m² and a water volume of 85823990 m³. The water exchange of this semi-enclosed region with the main bay is only possible through two openings, the sections 1-1 and 2-2, which have a total length of around 754 m. The cross-sectional area at 1-1 section is around 6258 m², and at 2-2 section, 2244 m².

Table 1. Parameters Simulated in the Model.

No	Parameters	Unit
1	Phytoplankton concentration	mgC/l
2	Zooplankton concentration	mgC/l
3	Bacteria concentration	mgC/l
4	Ammonia concentration	mgN/l
5	Nitrite concentration	mgN/l
6	Nitrate concentration	mgN/l
7	Particulate organic nitrogen concentration	mgN/l
8	Nonrefractory dissolved organic nitrogen concentration	mgN/l
9	Refractory dissolved organic nitrogen concentration	mgN/l
10	Inorganic phosphorus concentration	mgP/l
11	Particulate organic phosphorus concentration	mgP/l
12	Nonrefractory dissolved organic phosphorus concentration	mgP/l
13	Refractory dissolved organic phosphorus concentration	mgP/l
14	Oxygen concentration	mgO/l



Figure 3. Computational cell utilized for the inner bay of Fethiye to simulate the mean water quality parameters. [20]

Table 2. Wastewater budget and water exchange discharges utilized in the water quality model for the inner bay of Fethiye (m³/day).

	June	July	August	September	October	November
Discharge through Murt (Mersinli) stream which carries the discharged water from the wastewater treatment facility and the drainage water from agricultural activities	27280	27280	27280	27280	27280	43200
Discharge through seven canals which carry the drainage water from agricultural activities in the plain	30240	30240	30240	30240	30240	60480
Domestic waste of settlements and tourism facilities which are not connected to the wastewater collection system	1050	1050	1050	1050	1050	2150
Wastewater due to Fethiye Marina and the boats berthing at other berthing locations	750	750	750	750	750	450
Water exchange with the open sea	476112	476112	476112	476112	476112	1326312

The required initial values of the water quality parameters to run the model were determined evaluating the results of the measurements. For instance, observations obtained at measurement point 1 were utilized as the initial values of the parameters for the offshore water entering the inner bay. However, the results of measurement point 2 were disregarded since it was too close to the mouth of Murt stream. Similarly, the results obtained at measurement point 3 were utilized as the initial values of the water quality parameters for the water entering the system through Murt stream.

The wastewater budget and the mean water exchange discharges utilized in the model runs for each month are presented in Table 2.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 3 gives the averages of the measured water quality parameters; water temperature, dissolved oxygen, pH, salinity, total dissolved solid, nitrite and nitrate, obtained at points 2, 3, 4, 5 and 6 at a depth of 0.5 m below the sea surface. In Table 3, some of the parameters are missing, since they are found to be not reliable due to problems

occurred in sampling and measurements, therefore they are not considered in this study. The given mean values of the parameters have been assumed to represent the inner bay of Fethiye in general for each of the corresponding measurement period of the study. However, the measurements of point 1 were assumed to represent the offshore water entering into the bay. Therefore, they were not included in the computation of the averages. Observing the parameters in the table, it is seen that the pH, salinity and sea water temperature values were in general in the standard ranges of the Mediterranean. For highly productive coastal and estuarine areas where naturally occurring pH variations approach the lethal limits of some species, changes in pH should be avoided but in any case should not exceed the limits established for fresh water, i.e., 6.5-9.0 [22].

The DO level represents one of the most important measurements of water quality and is a critical indicator of a water body's ability to support healthy ecosystems. Levels above 5 mgO/l are considered optimal, and most fish cannot survive for prolonged periods at levels below 3 mgO/l. In coastal waters, acute oxygen deficiency occurs when dissolved oxygen levels fall below 2.0 mgO/l. Anoxic or 'no-oxygen' conditions occur when levels fall below 0.2 mgO/l [23-25]. The dissolved

Table 3. Average water quality parameters measured in the inner bay of Fethiye at a depth of 0.5 m below the sea surface.

Date of Measurement	Sea Water Temperature (°C)	Dissolved Oxygen (mgO/l)	pH	Salinity (ppt)	Total Dissolved Solid (g/l)	Nitrite (mgN/l)	Nitrate (mgN/l)
06.06.2013	25.02	5.49	8.04	-	-	-	-
23.08.2013	30.10	5.53	8.24	38.95	38.064	-	-
28.10.2013	23.28	8.02	8.24	34.35	33.881	0.0704	2.2217
28.11.2013	19.66	7.70	8.06	37.00	36.147	0.0949	1.0665

oxygen concentrations are, as well, observed to be at normal levels and the concentrations of nitrite and nitrate are below pollution limits. In fact, similar results were also observed when all measurement points were evaluated separately.

Nitrites occur in water as an intermediate product in the biological breakdown of organic nitrogen, being produced either through the oxidation of ammonia or the reduction of nitrate. The presence of large quantities of nitrites is indicative of waste water pollution. Nitrates occur in water as the end product in the biological breakdown of organic nitrogen, being produced through the oxidation of ammonia. Excess nitrates in the surface water is often used as an indicator of poor water quality. Sewage is rich in nitrogenous matter which through bacterial action may ultimately appear in the marine environment as nitrate. Nitrite is much more toxic than nitrate. Levels exceeding 10 mgN/l and 1 mgN/l nitrate and nitrite nitrogen, respectively, are considered unhealthy for marine environments [22,25]. Figure 4, shows the variation of the nitrite and nitrate concentrations measured in the laboratory by analyzing the water samples taken at 0.5 m depth from the sea surface at the end of November. As observed in the figure, during the corresponding measurement period, although the nitrite and nitrate concentrations in the bay are in general below the critical values of pollution, relatively higher nitrite and nitrate concentrations are found at point 6 which is the mouth of the largest canal in the town center and at point 3 which is the mouth of Murt stream, respectively.

The nitrite and nitrate concentrations are the parameters representing the amount of nitrogen nutrient in water. Although the formation of nitrate is an integral part of the nitrogen cycle, thus naturally occurring in our environment, in most cases higher levels are thought to

result from human activities. Because, the reasons of having nitrate in water are mainly the breakdown of fertilizers, manures, plants, animals or other organic residues by microorganisms. Thus, it can be concluded that the relatively higher concentrations of nitrite at points 6 and 3, and of nitrate at point 3 are due to the discharge water of wastewater treatment plant and the drainage water of agricultural activities carried to the sea by Murt stream and the canal.

The measurements for nitrite, nitrate and dissolved oxygen concentrations were also compared with the output of the water quality sub model of HYDROTAM-3D.

Figure 5 displays the comparison of the mean nitrite concentrations obtained through the water quality model and the field measurements. According to the model estimations, for the inner bay, the mean nitrite concentration is around 0.170 mgN/l at the beginning of the summer season and after increasing to higher values (i.e. greater than 0.250 mgN/l) decreases to the levels of around 0.110 mgN/l in the autumn months of October and November. Comparing the estimations with the averages of the nitrite concentrations at all points measured in October and November, an overestimation of around 0.16 mgN/l and a slight overestimation of around 0.01 mgN/l are observed, respectively.

The comparison of the mean nitrate concentrations obtained through the water quality model and the field measurements is also given in Figure 6. According to the model estimates, the mean nitrate concentration which is around 0.168 mgN/l at the beginning of summer season remains almost at the same levels during the whole period of the study. However, comparing with the averages of the nitrate concentrations from the field measurements, it is observed that the model estimation underestimates the measured value in October while

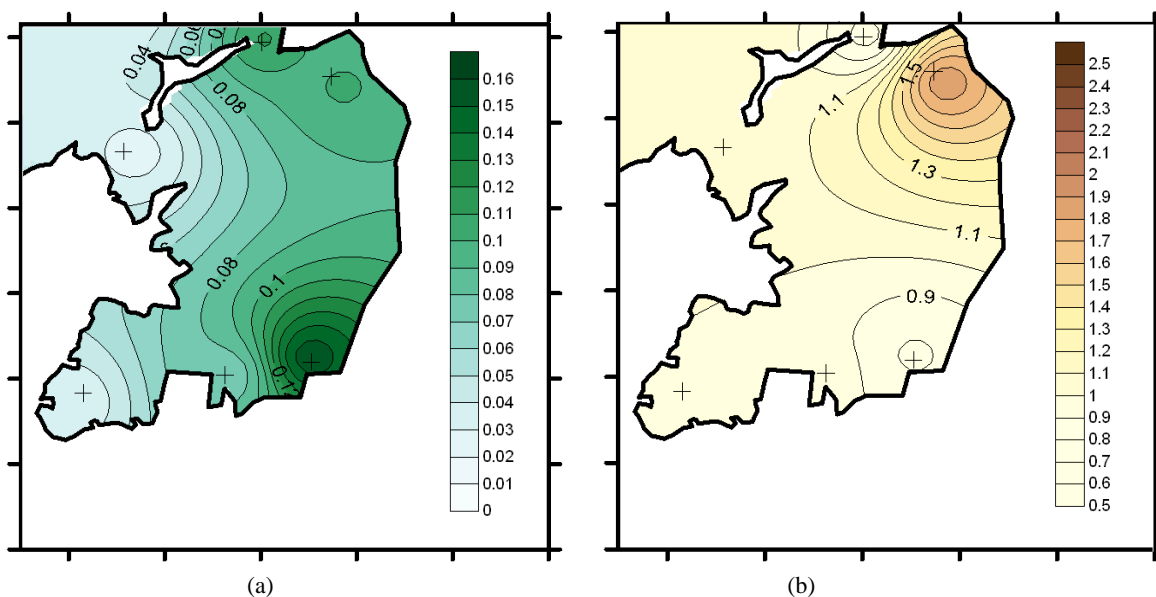


Figure 4. Variation of the (a) nitrite and (b) nitrate concentrations obtained from the measurements at a depth of 0.5 m below the sea surface in November (mgN/l).

overestimating in November. Still, the model is able to estimate the decreasing trend in the nitrate concentration from October to November.

The comparison of the results for the mean dissolved oxygen concentration is given in Figure 7. It is observed that, at the beginning of summer season, the estimated concentration of the mean dissolved oxygen is around 6.3 mgO/l, and it is overestimating slightly the measured average value of 5.5 mgO/l. For the following months,

with the increase in sea water temperature, the estimations decrease to even lower values till the level of around 5.0 mgO/l. However, then, with the decrease in the temperature of the sea water in October and November, the estimated concentrations of dissolved oxygen increase to higher values till the level of around 8.0 mgO/l. The model estimations for dissolved oxygen are in general quite consistent with the measurements in

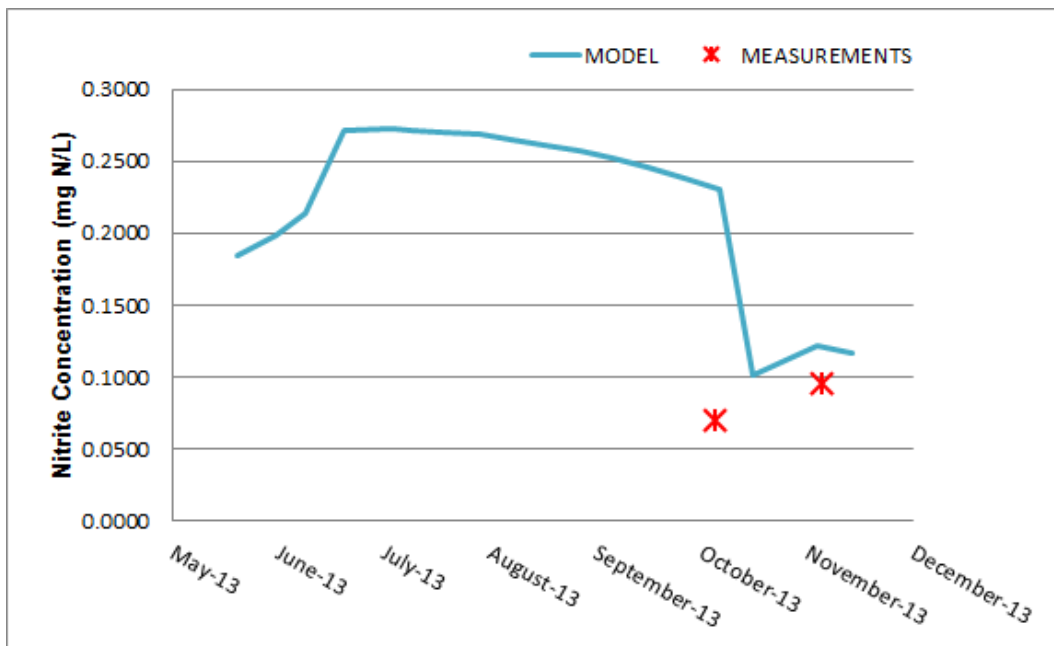


Figure 5. Mean nitrite concentrations (mg N/l) obtained through the water quality model and the measurements for the inner bay of Fethiye.

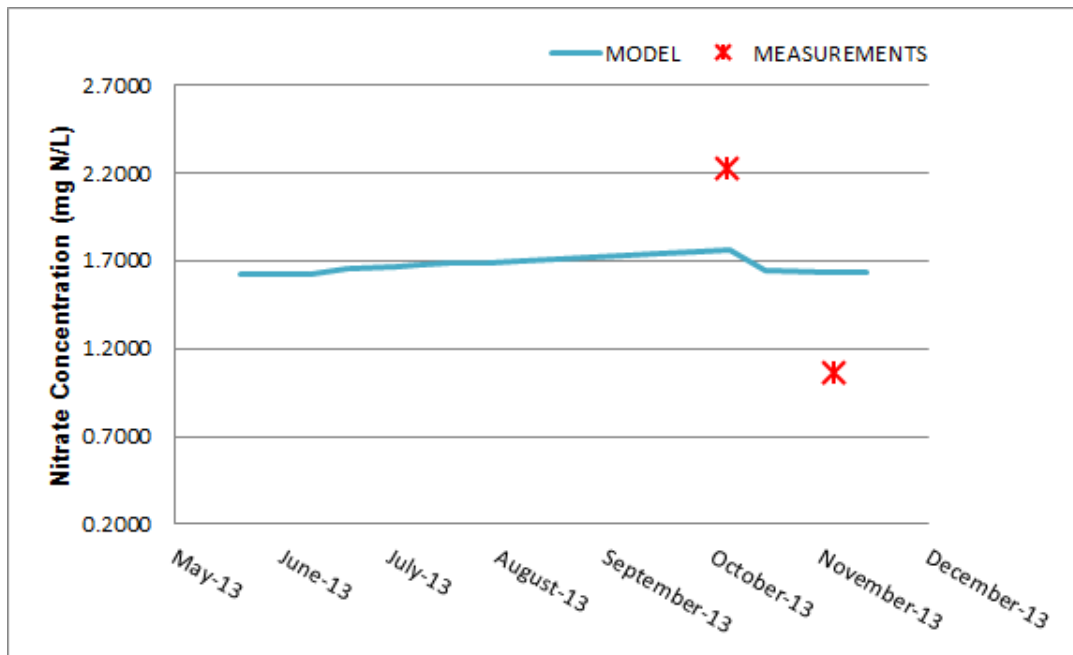


Figure 6. Mean nitrate concentrations (mg N/l) obtained through the water quality model and the measurements for the inner bay of Fethiye.

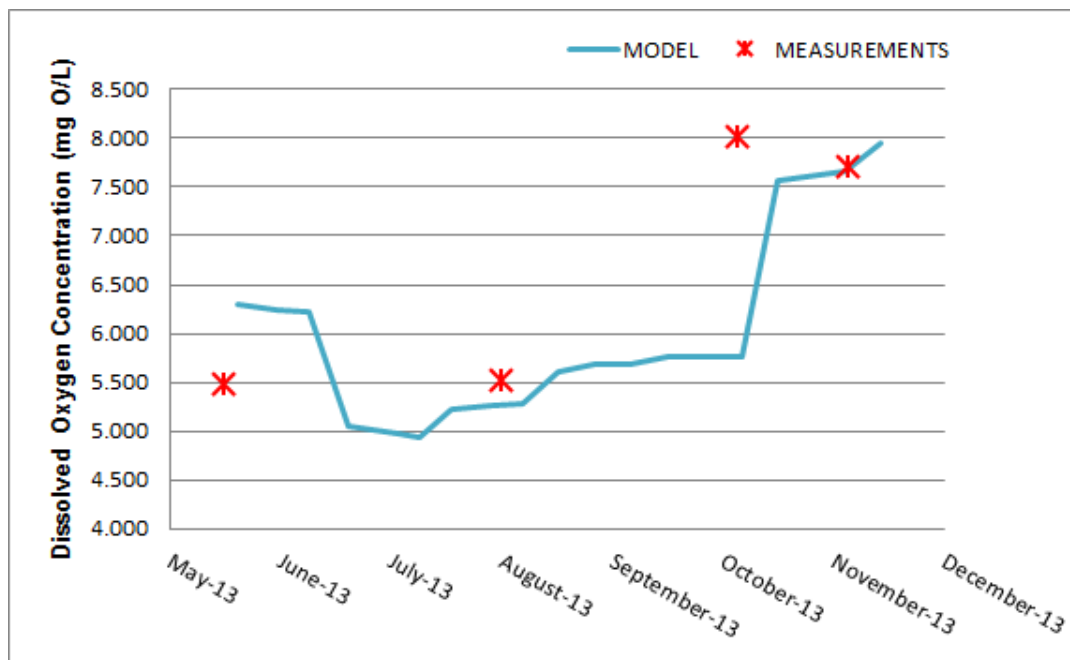


Figure 7. Mean dissolved oxygen concentrations (mg O/L) obtained through the water quality model and the measurements for the inner bay of Fethiye.

terms of both the level of concentrations and the temporal variation.

4. CONCLUSIONS

In this study, sea water quality for the inner bay of Fethiye has been studied, and discussed in relation to land use practices of the town. From six measurement locations determined in the bay, various water quality parameters were monitored by monthly field and laboratory measurements during summer and autumn seasons. Besides the measurements, a water quality model has been prepared and calibrated utilizing the physical features and the data related to the pollution sources of the bay.

At all measurement points, it was observed that, during the measurement periods, the pH, salinity and sea water temperature values were in general in the standard ranges of the Mediterranean. The dissolved oxygen concentrations were observed to be at normal levels, as well, and the concentrations of nitrite and nitrate were below pollution limits.

On the other hand, although the nitrite and nitrate concentrations were in general below the pollution levels, the effects of human activities could still be observed with the relatively higher nitrite values measured at points 6 and 3, and nitrate values measured at point 3. This is thought to be due to the source effects of Murt Stream mouth (point 3) which carries the discharge water from the wastewater treatment plant and the drainage water from agricultural activities, and of the largest canal outlet (point 6) which is close to the marina and exposed to very low currents.

The measurements for nitrite, nitrate and dissolved oxygen concentrations were also compared with the

output of the water quality model component of HYDROTAM-3D. The results show that the model displays close results to the field measurements of nitrite, nitrate and dissolved oxygen concentrations, and also, successfully represents their temporal variation.

The inner bay of Fethiye is an enclosed area having weak water circulation. Therefore, it is quite vulnerable to pollution. As observed during the measurement periods also, Murt stream and the canals are very critical sources of pollution for the bay, carrying the land-based pollutants to the sea water.

REFERENCES

1. Chen, C.W. and Orlob, G.T., "Ecologic Simulation for Aquatic Environments", System Analysis and Simulation in Ecology, *Academic Press*, 3: 476-588, New York, U.S., (1975).
2. Baca, R.G. and Arnett, R.C., "A Limnological Model for Eutrophic Lakes and Impoundments", *Batelle, Pacific Northwest Laboratories*, Richland, Washington, U.S., (1976).
3. Brandes, R.J., "An Aquatic Ecologic Model for Texas Bays and Estuaries", *Water Resources Engineers*, Austin, Texas, U.S., (1976).
4. Di Toro, D.M., Thomann, R.V., O'Connor, D.J. and Mancini, J.L., "Estuarine Phytoplankton Biomass Models - Verification Analyses and Preliminary Applications", *The Sea, Marine Modelling*, Vol. 6, *Wiley-Interscience Publications*, New York, U.S., (1977).
5. Wang, Q., Li, S., Jia, P., Qi, C. and Ding, F., "A Review of Surface Water Quality Models", *The Scientific World Journal*, 2013(7), (2013).
6. Ambrose, R.B., Wool, T.A. and Martin, J.L., "The Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5", *U.S.*

- Environmental Protection Agency*, Athens, Georgia, U.S., (1993).
7. Brown, L.C. and Barnwell, T.O., "The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS (EPA/600/3-87-007)", *U.S. Environmental Protection Agency*, Athens, Georgia, U.S., (1987).
 8. Danish Hydraulic Institute, "MIKE 3 Eutrophication Module, User Guide and Reference Manual, Release 2", *Danish Hydraulic Institute*, Horsholm, Denmark, (1996).
 9. Balas, L. and Özhan, E., "An Implicit Three Dimensional Numerical Model to Simulate Transport Processes in Coastal Water Bodies", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 34: 307-339, (2000).
 10. Balas, L. and Özhan, E., "Three Dimensional Modelling of Stratified Coastal Waters", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56: 75-87, (2002).
 11. Balas, L., İnan, A. and Yılmaz, E., "Modelling of sediment transport of Akyaka Beach", *Journal of Coastal Research*, 64: 460-463, (2011).
 12. Balas, L., Numanoğlu Genç, A. and İnan, A., "HYDROTAM: 3D Model for Hydrodynamic and Transport Processes in Coastal Waters", *International Environmental Modelling and Software Society (IEMSS) International Congress on Environmental Modelling and Software*, Leipzig, Germany, (2012).
 13. Cebe, K. and Balas, L., "Water Quality Modelling with HYDROTAM-3D", *Proc. 9th. Nat. Conf. on the Coastal and Marine Zones of Turkey*, Antakya-Hatay, 2: 997-1004, (2012).
 14. Cebe, K. and Balas, L., "Water quality modelling in Kaş Bay", *Applied Mathematical Modelling*, 40: 1887-1913, (2016).
 15. Okuş, E., Hüsne, A., Yüksek, A., Yılmaz, N., Yılmaz, A. A., Karhan, S. Ü., Demirel, N., Müftüoğlu, E., Demir, V., Zeki, S., Kalkan, E. and Taş, S., "Biodiversity in western part of the Fethiye Bay", *Journal of the Black Sea/Mediterranean Environment*, 13: 19-34, (2007).
 16. Yılmaz, A., Ergev, B. and Taktak, O., "Does pollution threaten Fethiye-Gocek bay (Turkey) Specially Protected Area marine ecosystem and its functioning?", *39th CIESM Congress*, Venice, 322, (2010).
 17. Koç, C., "A study on sediment accumulation and environmental pollution of Fethiye Gulf in Turkey", *Clean Technology Environment Policy*, 14: 97-106, (2012).
 18. Bann, C. and Başak, E., "Economic Analysis of Fethiye-Göcek Special Environmental Protection Area", *Project PIMS 3697: The Strengthening the System of Marine and Coastal Protected Areas of Turkey*, Technical Report Series 11: 56, (2013).
 19. http://www.fethiye.gov.tr/default_B0.aspx?content=193, (February, 2015).
 20. <https://www.google.com/maps>, (February, 2015).
 21. Bowie, G.L., Mills, W.B., Porcella, D.B., Campbell, C.L., Pagenkopf, J.R., Rupp, G.L., Johnson, K.M., Chan, P.W.H., Gherini, S.A. and Chamberlin, C.E., "Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling (second edition)", *U.S. Environmental Protection Agency*, Report EPA/600/3-85/040, (1985).
 22. USEPA, "Quality Criteria for Water", *U.S. Environmental Protection Agency*, Report EPA/440/5-86/001, (1986).
 23. OSPAR, "Common Procedure for the Identification of the Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area", *OSPAR Commission*, Agreement 3: (2005).
 24. O'Boyle, S., McDermott, G. and Wilkes, R., "Dissolved oxygen levels in estuarine and coastal waters around Ireland", *Marine Pollution Bulletin*, 58-11: 1657-1663, (2009).
 25. EPA, "Parameters of Water Quality: Interpretation and Standards", *Environmental Protection Agency*, Ireland, 133, (2001).

Enhancement of Conversion using Ceramic Membrane in Esterification of Acrylic Acid with Butanol

Emine SERT*, Ferhan S. ATALAY

Ege University, Chemical Engineering Department, Bornova, Izmir, Turkey

(Received : 13.04.2016 ; Accepted : 16.05.2016)

ABSTRACT

The esterification reaction between butanol and acrylic acid was performed in a batch reactor coupled with ceramic membrane. The tubular ceramic membrane was used to selectively remove water which coursed during the reaction. Due to water removal, equilibrium shifted to the product side and conversion of acrylic acid increased. The effects of some process parameters such as temperature, catalyst loading, molar ratio of reactants on conversion of acrylic acid and flux of water were investigated. Especially, the increases in temperature facilities increase in conversion of acrylic acid markedly.

Keywords: Esterification, Acrylic Acid, Ceramic Membrane, Pervaporation, Butyl Acrylate.

ÖZ

Bütanol ve akrilik arasındaki esterleşme reaksiyonu seramik membran modülü ile birleştirilmiş kesikli reaktörde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan seramik membran reaksiyon sırasında oluşan suyu seçimli olarak reaksiyon karışımından uzaklaştırmıştır. Suyun uzaklaştırılması sebebiyle, denge ürünler yönüne kaymakta ve akrilik asit dönüşümü artmaktadır. Deneyleerde katalizör olarak iyon değişim reçinesi kullanılmıştır. Sıcaklık, katalizör miktarı ve reaktantların mol oranlarının akrilik asit dönüşümü ve suyun uzaklaşma akısı üzerine etkileri incelenmiştir.

1. INTRODUCTION

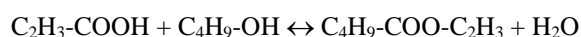
Esterification of alcohols and carboxylic acids is one of the most significant reactions in organic synthesis [1]. The reaction is limited by the thermodynamic equilibrium. In order to overcome the equilibrium, an excess of one reactant or removing water can be used to shift the equilibrium [2]. While the use of excess alcohol may increase the operation costs on the downstream reagent recovery and result in unwanted ether formation [3]. The integration of reaction and separation processes such as distillation, adsorption or pervaporation becomes very attractive. Integration may lead to substantial savings in capital as well as operating costs, which can come as a result of higher conversion and selectivity, smaller equipment size, energy integration etc. [4]. Among these hybrid processes reactive distillation is only useful when the products and reactants are not close boiling points [5].

Pervaporation, a membrane process, is one of the most promising approaches to perform this task because it allows a very selective water removal from the reaction medium combined with lower energy requirements [6]. In pervaporation processes, the transport of the components from the feed liquid mixture to the vapor phase involves the following steps; i) mass transfer from the feed bulk to the feed membrane interface, ii) partition of penetrants between the feed and the membrane, iii) selective diffusion through the membrane, iv) desorption into the vapor phase on the permeate side [7]. Generally, polymeric membranes are used to separate gas and liquid specifications. Polymers, like polyvinyl alcohol (PVA),

polyimide and Nafion have a high permselectivity to a number of chemical compounds [8].

Several studies show that the equilibrium shifting could be occurred when a polymeric membrane is used [9-12]. However, organic polymer membranes typically work in a temperature range from ambient to 130°C, operation at higher temperatures is difficult with the current polymeric membranes [13]. Inorganic membranes or ceramic mebranes are resistant to relatively harsh chemical environment. Also, esterification reactions are usually catalyzed by homogeneous catalyst, which are strong acids such as sulfuric acid. These have been found to attack the ceramic membranes which as a result quickly lose their performance [4]. Generally heterogeneous catalysts such as ion exchange resins are used as catalysts to prevent the degradation of ceramic membrane. Other than prevention of membrane, there are several advantages of solid catalysts; easy separation from the reaction mixture, high selectivity, reusability etc.

Generally, acrylic acid esters are clear colorless liquid with a characteristic fruity odor. Acrylates were produced from catalytic esterification of acrylic acid with an alcohol catalyzed by acidic catalysts;



In the previous study, the kinetic study of catalytic esterification of acrylic acid with n-butanol was investigated [14]. The kinetic expression was obtained in the presence of Amberlyst 131 according to Langmuir-Hinshelwood-Haugen-Watson mechanism which correlates the experimental data with minimum error. In another study, n-butyl acrylate was synthesized by pervaporation assisted esterification process and

*Corresponding Author

e-mail: emine.sert@ege.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 437-440

polymeric membrane, Pervap 2201, was used to remove water from the reaction mixture. Conversion of acrylic acid increased from 70% to 92% at a temperature of 358 K due to the water removal [15]. However, polymeric membrane cannot be used at high temperatures and also it may be damaged due to the acidity of the reaction mixture.

In this study, the synthesis of n-butyl acrylate was investigated by using ceramic-tubular membrane. The effects of temperature, catalyst loading, molar ratio of n-butanol to acrylic acid and feed flow rate to membrane module on the conversion of acrylic acid and the fluxes of components were studied.

2. MATERIALS AND METHODS

Catalyst; the esterification reaction was carried out using ion exchange resin, Amberlyst 131. The main properties of Amberlyst 131 were given in our previous study [15]. Used ion exchange resin as catalyst is a macroreticular polymer type; its matrix type and functional group are styrene divinyl benzene and sulfonic acid, respectively.

Ceramic Membrane; water selective membrane with hydrophilic characteristics, was provided from Pervatech BV. It consists of an γ alumina tubular membrane which has a length of 25 cm and inside diameter of 7 mm. The membrane can withstand up to 150°C and 10 bars.

Reactants; Acrylic acid (Merck, purity>99%) and n-butanol (Merck, purity>99%) were used as reactants and phenothiazine was used as inhibitor to prevent possible polymerization reactions.

Procedure; the pervaporation aided esterification process was studied in a batch reactor and membrane module given in Figure 1. Experiments were performed in the liquid phase in a 2 L reactor. The stirrer speed was maintained at 1000 rpm. Alcohol, Amberlyst 131 and phenothiazine were charged to the reactor and heated up to the reaction temperature. The preheated acrylic acid was added to the reactor and temperature was kept constant at desired temperature. After half an hour, the reaction mixture was pumped using a peristaltic pump (Masterflex) to the membrane module. The pressure in the membrane module was maintained at 4 mbar by Vacuubrand RZ 2.5 vacuum pump. The permeate was collected using cold traps and the reaction mixture was recycled to the reactor.

The samples taken from reactor were analyzed by Gas Chromatograph (Agilent 7890). The conditions of the GC analysis were given in our previous study [14]. The temperature program of gas chromatographic analysis was given as follows: waiting 3 min at 60°C; heating from 60 to 180°C at a rate of 5°C/min; waiting for 3 min at 180°C. The water content in the reaction mixture was measured using a Karl Fisher titrator (Mettler Toledo v20).

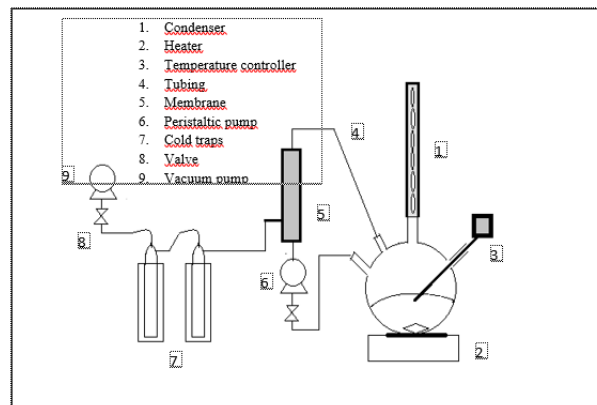


Figure 1. The experimental setup for esterification-pervaporation module

3. RESULTS AND DISCUSSION

The preliminary experiments were performed without membrane module at a molar ratio of n-butanol to acrylic acid of 4 and a catalyst loading of 10 g/L. The results were given in our previous study [15]. These results are useful to understand the effect of pervaporation on conversion of acrylic acid.

Figure 2 shows the effect of temperature on the conversion of acrylic acid for esterification-pervaporation hybrid process which utilizes by ceramic membrane. Conversion of acrylic acid increased from 36% to 48.6%, from 53% to 63.5%, and from 70% to 85.1% at temperatures of 338, 348 and 358 K, respectively.

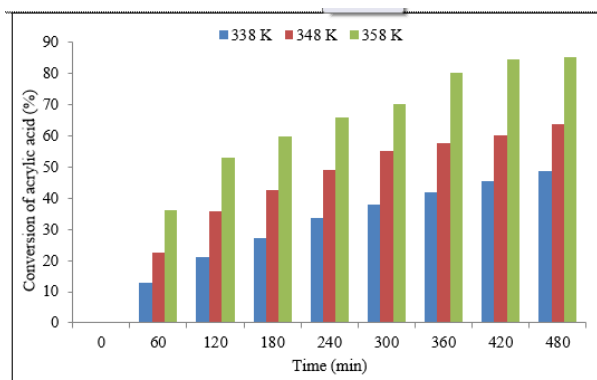


Figure 2. Effect of temperature on conversion of acrylic acid for pervaporation assisted esterification process using ceramic membrane

Pervaporation increases the conversion of acrylic acid as a result of water removal. The collected permeate was analyzed and found to be as pure water. The fluxes of water at different temperatures were given in Figure 3. As temperature was increased, the flux of water increased because of decreasing driving force. As might be expected, the conversion of acrylic acid increased as the flux of water that permeates through the membrane increased. Upon temperature increase the diffusion of water is becoming faster [13].

In our previous work, the esterification of acrylic acid with n-butanol was studied by polymeric membrane, Pervap 2201 [15]. The higher conversions were achieved but the surface area of polymeric membrane is four times larger than that of ceramic membrane. The ceramic membrane also shows a good stability under the same reaction conditions. The flux through the ceramic membrane remained as pure water as the reaction proceed; no traces of acrylic acid, n-butanol, n-butyl acrylate were detected at the permeate side.

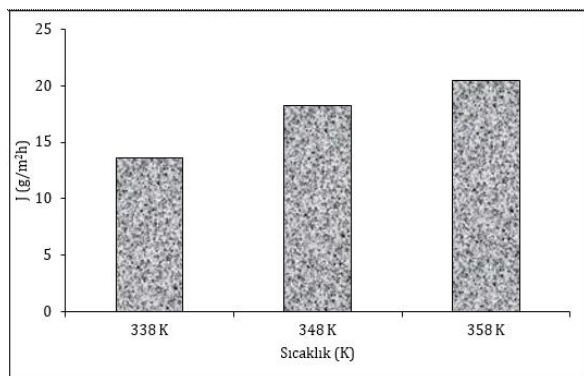


Figure 3. Effect of temperature on flux of water for pervaporation assisted esterification process using ceramic membrane

As an operation parameter, the amount of catalyst plays an important role for all catalytic processes. In the production of butyl acrylate by pervaporation-esterification hybrid process, the effect of catalyst loading was studied at the catalyst loadings of 10, 15 and 20 g/L. The conversion of acrylic acid values of 87.8%, 85.6% and 85.0% at catalyst loadings of 20, 15 and 10 g/L.

Figure 4 indicates the effect of catalyst loading on flux of water passing through the ceramic membrane. It can be concluded that, the yield of butyl acrylate improved with the increase of catalyst loading as expected, because of the increasing catalyst active sites and decreasing of reaction activation energy which can speed up the reaction rate. According to Figure 4, catalyst loading increases rate of flux passing as increasing water formation which resulted in higher water concentration in reaction mixture and rendered faster removal rate of water by pervaporation.

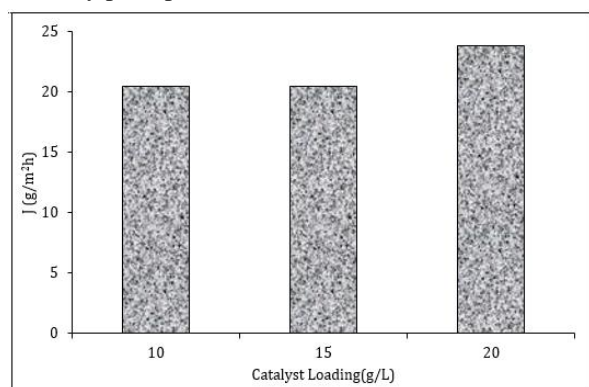


Figure 4. Effect of catalyst loading on the flux of water for pervaporation assisted esterification process using ceramic membrane

Initial molar ratio of butanol to acrylic acid was investigated at temperature of 358 K and catalyst loading of 10 g/L by using ceramic membrane unit. Molar ratios of butanol to acrylic acid were selected as 4, 6 and 8 to decrease pH of mixture and prevent the membrane unit from acidic effect of acrylic acid. As it seen from Figure 5, the yield of butyl acrylate did not remarkably increase with the initial molar ratio of butanol to acrylic acid.

This result may be explained by the flux of water for each molar ratio of butanol to acrylic acid (Figure 6).

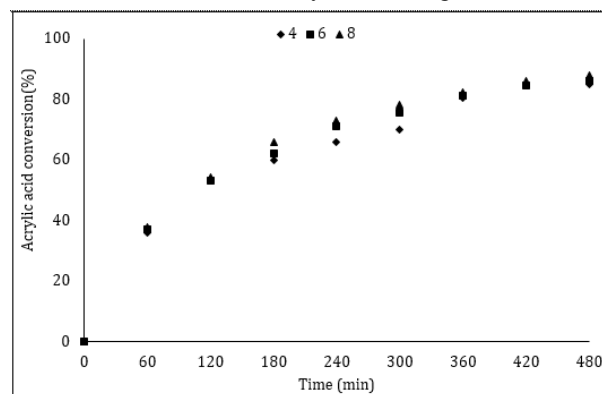


Figure 5. Effect of molar ratio of butanol to acrylic acid on conversion of acrylic acid for pervaporation assisted esterification process using ceramic membrane

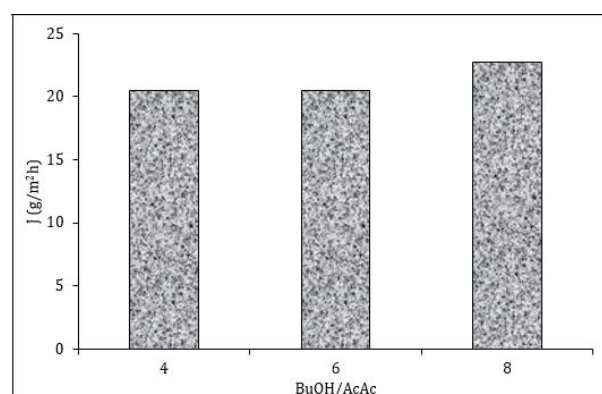


Figure 6. Effect of molar ratio of butanol to acrylic acid on flux of water for pervaporation assisted esterification process

The comparison of conversion of acrylic acid obtained from conventional batch reactor without membrane [14], polymeric membrane, Pervap 2201 [15] and ceramic membrane (PVM 035, Pervatech) is shown in Figure 7. As seen in Figure 7, pervaporation process increases conversion of acrylic acid for both polymeric and ceramic membrane. When polymeric and ceramic membranes are compared, polymeric membrane is more efficient according to acrylic acid conversion rate. But the selectivity of ceramic membrane was found to be higher than that of polymeric membrane. In the case of ceramic membrane, permeate contains pure water.

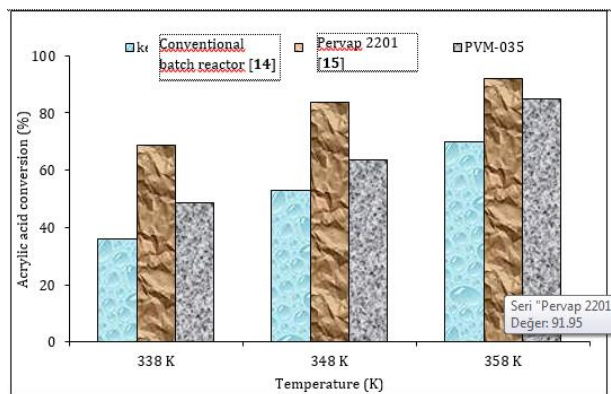


Figure 7. Comparison of the conversion values of acrylic acid obtained from different processes

An important aspect of pervaporation process is the pervaporation membrane with high permeate flux, in the case of pervaporation assisted chemical reaction, the most important point is the selectivity. The selective removal of one of the products, in this work water, is performed successfully. High conversion of acrylic acid and the absence of other components prove the success of the operation. Other than selectivity, other crucial point is the stability of membrane. As stated before, ceramic inorganic membranes withstood harsh chemical environments especially acidic nature of reaction mixture better than polymeric membranes and also give longer life.

4. CONCLUSION

Pervaporation-coupled esterification of acrylic acid with butanol was performed in a batch reactor coupled with membrane using ion exchange resin as catalyst. The tubular ceramic membrane was used to remove water selectively. As a result of water removal, conversion of acrylic acid increased markedly. The conversion of acrylic acid was increased from 69.9% to 85.09% in the presence of ceramic membrane at 358 K. As a result, pervaporation was used to overcome the reversible chemical equilibrium limitation by removal of water as soon as produced successfully.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge the financial supports from TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) under project no. 110 M 462, from EBILTEM (Research and Application Center of Science and Technology) under project no. 2012 BIL 022.

REFERENCES

- Li W., Liu W., Xing W., Xu N., "Esterification of Acetic Acid and n-Propanol with Vapor Permeation Using NaA Zeolite Membrane", *Ind. & Eng. Chem. Res.*, 52(19): 6336-6342, (2013).
- Shanmugam, S.; Viswanathan, B.; Varadarajan, T. K. "Esterification by solid acid catalysts - a comparison". *J. Mol. Catal. A: Chem.*, 223(1-2): 143-147, (2004).
- Khajavi S.; Jansen J.C.; Kapteijn, F.; "Application of a sodalite membrane reactor in esterification—Coupling reaction and separation", *Cat.Today*, 156(3-4): 132, (2010).
- Nemec, D.; Gemert, R.; "Performing Esterification Reactions by Combining Heterogeneous Catalysis and Pervaporation in a Batch Process", *Ind. & Eng. Chem. Res.* 44(25): 9718-9726, (2005).
- Iglesia, O.; Mallada, R.; Menendez, M.; Coronas, J.; "Continuous zeolite membrane reactor for esterification of ethanol and acetic acid", *Chem Eng J*, 131(1-3): 35-36, (2007).
- Figueiredo, C.S.; Salim, V.M.M.; Borges, C.P.; "Ethyl oleate production by means of pervaporation-assisted esterification using heterogeneous catalysis", *Braz. J. Chem. Eng.*, 27(4): 609-617, (2010).
- Pereira, C.S.M.; Silva, V.M.T.M.; Pinho, S.P.; Rodrigues, A.E.; "Batch and continuous studies for ethyl lactate synthesis in a pervaporation membrane reactor", *J of Mem. Sci.*, 361(1-2): 43-55, (2010).
- Figueiredo, K.C.; Salim, V.M.M.; Borges, C.P.; "Synthesis and characterization of a catalytic membrane for pervaporation-assisted esterification reactors", *Cat.Today*, 133-135: 809-814, (2008).
- Sanz, M.T.; Gmehling, J.; "Esterification of acetic acid with isopropanol coupled with pervaporation Part II. Study of a pervaporation reactor", *Chem. Eng. J.*, 123(1-2): 9-14, (2006).
- Ma, J.; , Zhang, M.; Lu, L.; Yin, X.; Chen, J.; Jiang, Z.; "Intensifying esterification reaction between lactic acid and ethanol by pervaporation dehydration using chitosan-TEOS hybrid membranes", *Chem. Eng. J.*, 155: 800-809, (2009).
- Delgado, P.; Sanz, M.T.; Beltran, S.; Nunez, L.A.; "Ethyl lactate production via esterification of lactic acid with ethanol combined with pervaporation", *Chem.Eng.J.*, 165: 693-700, (2010).
- Korkmaz, S.; Salt, Y.; Hasanoglu, A.; Ozkan, S.; Salt, İ.; Dinçer, S.; "Pervaporation membrane reactor study for the esterification of acetic acid and isobutanol using polydimethylsiloxane membrane", *App. Cat.A.*, 366(1): 102-107, (2009).
- Cuperus, F.P.; van Gemert, R.W.; "Dehydration using ceramic silica pervaporation membranes—the influence of hydrodynamic conditions", *Sep. and Pur. Tech.*, 27(3): 225-229, (2002).
- Sert, E.; Buluklu, A.D.; Karakus, S.; Atalay, F.S.; "Kinetic study of catalytic esterification of acrylic acid with butanol catalyzed by different ion exchange resins", *Chem. Eng & Proc.*, 73: 23-28, (2013).
- Sert, E.; Atalay, F.S.; "n-Butyl acrylate production by esterification of acrylic acid with n-butanol combined with pervaporation", *Chem. Eng & Proc.*, 81: 41-47, (2014).

Farklı Soğurucu Yüzey Tiplerine Sahip Düzlemsel Kolektörlerin Deneysel Analizi

Mustafa Bahadır ÖZDEMİR¹, Mehmet Mustafa YATARKALKMAZ², Gökay DAĞLI^{2*}

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, ANKARA

²Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA

(Geliş/Received : 17.08.2016 ; Kabul/Accepted : 22.10.2016)

ÖZ

Bu çalışmada alüminyum ve bakır soğurucu yüzey tiplerine sahip, diğer özellikleri birbirinin aynı olan iki adet düz plaka kolektör, TS EN 12975-2 standardına uygun ve güneş takip sistemi olan deney düzeneğinde test edilmiştir. Güneş ışınım şiddeti ve suyun giriş-çıkış sıcaklıkları kullanılarak TS EN 12975-2 standardında belirtilen şekilde kolektörlerin enerji verimleri hesap edilerek karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma neticesinde 40°C'ye kadar alüminyum soğurucu yüzeyli kolektörün veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmişken, 40°C'den daha fazla sıcaklıklarda bakır soğurucu yüzeyli kolektörün veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kolektörlerin ekserji verimleri hesaplanarak mukayese edilmiştir. Yaklaşık 55 °C'ye kadar kolektörlerin ekserji verimlerinin 0,037 olduğu, sıcaklığın yaklaşık 70°C'ye çıkarıldığında ise bakır yüzeyli soğurucu alana sahip kolektörün ekserji veriminin 0,064 iken alüminyum soğurucu yüzeyli kolektörün ekserji veriminin 0,059 olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık yaklaşık 80°C'ye çıkarıldığında ise her iki kolektörün de ekserji verimlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bakır yüzeyli kolektörün ekserji verimi 0,056'ya düşerken, alüminyum yüzeyli kolektörün ekserji verimi 0,051'e düşmüştür.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, Düz Plaka Kolektör, Alüminyum Soğurucu Yüzey, Bakır Soğurucu Yüzey, Enerji, Verim, Ekserji.

Experimental Analysis of the Flat Plate Collectors Having Different Types of Absorber Surface

ABSTRACT

In this study, the two flat plate collectors, which have aluminum and copper absorber surface type, and other features of which are identical, were tested in the experimental setup having the sun seeker system and conforming to TS EN 12975-2. Energy efficiencies of solar collectors were calculated and compared as specified in TS EN 12975-2 by using solar radiation and water inlet-outlet temperatures. As a result of the comparison, it was determined that the efficiency of the collector having aluminum absorber surface is higher up to 40°C, while the efficiency of the collector having copper absorber surface was found to be higher at temperatures higher than 40°C. Exergy efficiency of collectors were also calculated and compared. It was observed that the exergy efficiencies of collectors are the 0,037 up to about 55°C, while the exergy efficiency of the collector with the copper surface absorbent area was 0.064 while the exergy efficiency of the aluminum absorbent surface collector was 0.059 when the temperature was increased to about 70°C. When the temperature was increased to about 80°C, the efficiency of exergy was observed to decrease in both collectors. The exergy efficiency of the copper surface collector decreased to 0.056, while the exergy efficiency of the aluminum surface collector decreased to 0.051.

Keywords: Solar Energy, Flat Plate Collector, Aluminum Absorber Surface, Cooper Absorber Surface, Energy, Efficiency, Exergy.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan enerji talebi ve fosil kaynakların kısıtlı rezervleri, insanlığı farklı enerji kaynakları arayışına yıllar önce yöneltmiştir. Yapılan çalışmalar, araştırmalar neticesinde yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak enerji üretilmeye başlatılmıştır. Bu durum, kısıtlı kaynaklar ve enerjide dışa bağımlılık göz önünde bulundurulduğunda Türkiye için önem arz etmektedir. Ülkemizin potansiyeli yenilenebilir enerji kaynakları açısından yüksektir. Yenilenebilir enerji kaynak potansiyeli olarak 2014 yılı verilerine göre 23640,9 MW hidrolik enerji, 3629,7 MW

rüzgâr enerjisi, 40,2 MW güneş enerjisi, 288,2 MW biokütle enerjisi, 404,9 MW jeotermal enerji kurulu gücü bulunmaktadır [1]. Bu enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerji miktarları ise hidrolikten 40396,1 GWh, rüzgârdan 8385,4 GWh, biokütleden 1171,2 GWh, jeotermalden 2249,9 GWh'dir [1]. 2014 yılı verilerine göre güneş enerjisinin elektrik üretimine katkısı %0 (17,4 GWh) olmuştur. Bu durumun aksine ısı üretiminde güneş enerjisinden faydalanma oranı daha yüksektir. Güneş enerjisinden faydalanılarak 2003 yılında 350 bin TEP ısı üretilmişken bu rakam 2010 yılında 432 bin TEP'dir. 2014 yılında ise üretilen ısı miktarı 795 bin TEP'tir [1].

Teknolojide yaşanan gelişmeler ve azalan maliyetler sayesinde ısı üretme amacıyla güneş enerjisinden faydalanma oranları ülkemiz şartlarında artmıştır.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: gokaydagli01@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 441-449

Türkiye güneş enerji potansiyel atlası [2] incelendiğinde Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri toplam güneş radyasyonu açısından diğer bölgelere nazaran daha yüksek bir potansiyele sahiptir. Bu bölgeler yüksek sıcaklık uygulamaları ve elektrik üretimi açısından yüksek potansiyele sahiptir. İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgeleri orta sıcaklık uygulamaları açısından daha uygundur. Bu bölgeler elektrik üretilmesi açısından uygun güneş radyasyonuna sahip değildir. Karadeniz ve Marmara bölgeleri ise düşük sıcaklık uygulamaları için daha uygundur.

Yapılan literatür incelemesinde konuyla ilgili benzer çalışmalar yapıldığı tespit edilmiştir. Benzer bir çalışmada düzlemsel kolektörlerde su dolaşım miktarının, depo suyu sıcaklıklarına ve verime olan etkisi Değirmenci tarafından yapılan deneylerde incelenmiştir. Deneyler esnasında kolektördeki su debisi artırıldığında, verimin teorik olarak artmasına rağmen suyun depolanma sıcaklıkları düşmüştür. Deneylerde su dolaşım miktarı, 28,88 kg/h ile 90 kg/h aralığında değiştirilmiştir. Deneylerde 8 mm bakır borulu ve 3,6 L kapasiteli düzlemsel kolektör kullanılmıştır. Yapılan deneylerde en uygun su dolaşım miktarı 28,88 kg/h ile 39,6 kg/h aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu aralıktaki su dolaşım miktarına göre verim aralığı %76-%88, depolanan suyun sıcaklığı 44°C-38°C olarak tespit edilmiştir [3].

Dağ tarafından yapılan çalışmada düzlem yüzeyli kolektörlerde kullanılan boruların şekilleri değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında diğer parametreler sabit tutularak sadece boru şekilleri farklı iki sistem üzerinden deneyler yapılmıştır. Boru şekilleri olarak, klasik dairesel kesitli boru ve oval kesitli borular kullanılmıştır. On gün süren deneyler sonucundan, verim değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Oval borulu kolektörlerde verim %46,34 çıkarken dairesel borulu kolektörlerde verim %43,84 çıkmıştır [4].

Çakır tarafından yapılan çalışmada güneş enerjisinin önemi vurgulanmıştır. Çalışmada güneş enerjisi sistemine bir ısı üreticisi eklenerek 198 m² kapalı bir alan ısıtılmaya çalışılmıştır. Vakum borulu kolektör sistemine ek bir ısıtıcı eklenerek ısı analizi gerçekleştirmek için iki farklı sistem kullanılmıştır. Sistemlerin ilkinde kolektör yatak eksenle 40° açı yapmak kaydıyla konumlandırılmıştır ve sistemdeki boylere elektrikle çalışan direnç eklenmiştir. Diğer sistemde ise kolektör yatay zemine dik olarak konumlandırılmıştır. Deneyler 2008 yılının Ekim ve Kasım aylarında ve 2009 yılının Ocak ve Mayıs aylarında yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kolektörlerin verimleri hesaplanarak mukayese yapılmıştır [5].

Aktaş tarafından yapılan benzer bir çalışmada güneş enerjili doğal dolaşım ve endirekt kullanma sıcak suyu hazırlama sistemlerinde ısı değiştiricilerde genişletilmiş yüzeyin ısı verim bakımından etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney düzeneği olarak iki ayrı sistem tasarlanıp üretilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde genişletilmiş yüzeyli sistemin klasik sisteme göre

ortalama olarak %4 daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber akış hızının artırıldığı zamanlarda ısı veriminin arttığı tespit edilmiştir [6].

Taze tarafından yapılan çalışmada düzlemsel kolektör verimine etki eden üç parametrenin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Boru geçiş sayısı, boru malzemesi ve boru-yutucu plaka birleşim yönteminin verim üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için dış ortam şartlarına uygun bir deney düzeneği kurulmuştur. Yapılan deneylerde beş farklı kolektör kullanılmış ve verime etkileri kayıt altına alınmıştır. Deneyler sonucunda boru geçiş sayısı artırıldığı zaman verimin %20 arttığı belirlenmiştir. Boru malzemesinde alüminyum yerine ısı iletim katsayısı daha yüksek bir malzeme kullanıldığında verimdeki değişimin %2'den fazla olmadığı görülmüştür. Kenetleme birleşimine sahip kolektörlerin veriminin, lazer kaynaklı birleşimli olanlara göre % 10 daha az olduğu belirlenmiştir [7].

Furbo ve diğerleri, Arcon Solvarme A / S güneş ısıtma tesisleri için iki düz plaka güneş kolektörünü Danimarka Teknik Üniversitesi'nde güneş kolektörleri için yapılan test laboratuvarında test etmişlerdir. Test edilen iki kolektör de aynı şekilde tasarlanmıştır. Kolektörlerin birinde soğurucu ile cam yüzey arasında ETFE folyo koyulurken, diğer kolektörde soğurucu ile cam yüzey arasına herhangi bir madde koyulmamıştır. Kolektörlerin verimleri farklı akış hızlarında test edilmiştir. Ölçülen verimler neticesinde, kolektörlerin verimleri akışın bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Yapılan testler sonucunda hesap edilen verim ile ölçülen verim arasında çok büyük farklar ortaya çıkmamıştır [8].

Furbo ve diğerleri, yaptıkları bir başka çalışmada ise yeni bir dinamik test modeli kullanmışlardır. Bu transfer fonksiyon metodu iki yeni kolektör parametresi üzerinde test edilmiştir. Parametrelerin biri kolektörün iç ısı transferi yeteneğinin gösterirken, diğeri ise veri işlemede akışkanın termal kapasitesini elde edebilen ortalama akışkan sıcaklığına bağlı kolektör terimini ifade etmiştir. Doğru ve istikrarlı ikinci dereceden elde edilen etki faktörlerini araştırmak için teorik analiz ve deneysel doğrulama uygulanmıştır. Deneylerde, bir adet düzlemsel kolektör ve bir adet vakum tüp kolektör kullanılmıştır. Bu iki tip kolektör hem yeni dinamik modelde hem de klasik metot da test edilerek karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında, gelişmiş fonksiyon metodunun bu iki tip kolektör için doğru ve sağlam sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [9].

Maldonado ve diğerleri, güneş enerjili su ısıtıcıların tasarımını, yapısını ve anlık verimini incelemişlerdir. Çalışmada, kolektörün enerji dengesine dayalı bir termal analiz geliştirmişlerdir. Kolektörün geometrisi ve boyutları termal analiz sonuçları ve kolektörün yapımında kullanılan malzemelerin termik özellikleri tarafından belirlenmiştir. Güneş kolektörü boyutu 100 litrelik bir depolama tankı ile beraber 1,4 m² olarak bulunmuştur. Kolektörün ulaştığı en yüksek sıcaklık 55°C olarak ölçülürken, bu sıcaklık geceleri 47,6 °C'ye düşmüştür. Deneyler sonucunda kolektörün debisi

0,0038 ile 0,04 kg/s aralığında, ortalama verimi ise %30,2 olarak ölçülmüştür [10].

Dragsted ve diğerleri yazdıkları makalede, meteorolojik referans yılları girdi olarak kullanıldığı zaman ve çok yıllık hava verileri girdi olarak kullanıldığı zaman güneş kolektörlerinin modellenmiş termal performanslarındaki değişikliklerin bir incelemesini sunmuşlardır. İnceleme, 1975-1990 arasındaki periyoda dayanan Danimarka referans yılının kullanmanın, çok yıllık ölçülmüş hava girdilerine nispeten %39'a kadar sapmayla sonuçlanacağını göstermiştir. 2001-2010 arasındaki periyoda dayanan daha yeni yerel referans yılları için azami sapma %25 olmuştur. Yapılan çalışmada, ayrıca küresel radyasyonda bir artışla birlikte kullanım oranında bir artış göstermiştir. Bu, güneş radyasyonunu artırmayla birlikte termal performansı artırmaya ek olarak, güneş radyasyonu kullanımının ayrıca daha iyi olduğu sonucu elde edilmiştir [11].

Kaan düzlemsel kolektörlerin performansını artırmaya yönelik bir çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmada düzlemsel bir kolektör sistemine motorlar eklemiştir. Eklenen motorlar yardımıyla sistemin güneşi takip etmesi sağlanmıştır. Deneyler farklı çalışma ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre performans analizleri yapılmıştır [12].

Şahin çalışmasında güneş açılarından faydalanarak düzlemsel kolektörlerde sıcaklığın artırılması yönünde iki farklı sistem kurmuştur. Yapılan çalışma sonucunda düzlemsel kolektöre verilen eğimin sıcaklık artmasına bir etkisi olmadığı sonucu tespit edilmiştir [13].

Çaylıoğlu yaptığı çalışmada ısı borularının öneminden bahsetmiştir. Farklı özellikteki ısı borularının güneş kolektörlerindeki kullanımından ve verime katkılarında bahsedilmiştir. Isı borularında R134a, R22 ve metanol akışkanları kullanılmış ve farklı tipteki fitil yapıları kullanılmıştır. TS EN 12795-1 standardına uygun olarak deney düzeneğinde gerçekleştirilen verim deneyi sonuçları ve performans değerlendirmeleri yapılmıştır [14].

Makhanlall ve Jiang yaptıkları çalışmada yeni geliştirilen bir tekniği termodinamik analize dayanarak incelemişlerdir. İnceleme, nasıl termodinamik 2. kanunu analizinin, soğurucu ve cam kapak arasındaki mesafede sıkıştırılmış havanın su buharı tarafından ikame edildiği FPSC (düz plaka güneş kolektörü) için 1. analiz yaklaşımını tamamlamak için kullanılabileceğini göstermiştir. Analizde, güneş ışınması, eğim açısı ve farklı yayma değerleriyle soğurucuların kullanımı incelenmiştir [15].

Wang ve diğerleri, yaptıkları çalışmada orta sıcaklık kolektörler olarak vakum tüp güneş kolektörleri kullanmışlardır. Yapılan çalışmayla beraber tüplerin güneş geçirgenliği, sol-jel yöntemi ile biriktirebilecek gözenekli SiO₂ yansıma önleyici kaplama ile 0,94 yükseltilmiştir. Deneydeki vakum tüplerin vakumlanma işlemi 450 °C'de gaz çıkartılması ile yapılmıştır ve buharlaşabilen ve buharlaşamayan gaz gidericilerin kombinasyonlu kullanımı ile muhafaza edilmiştir.

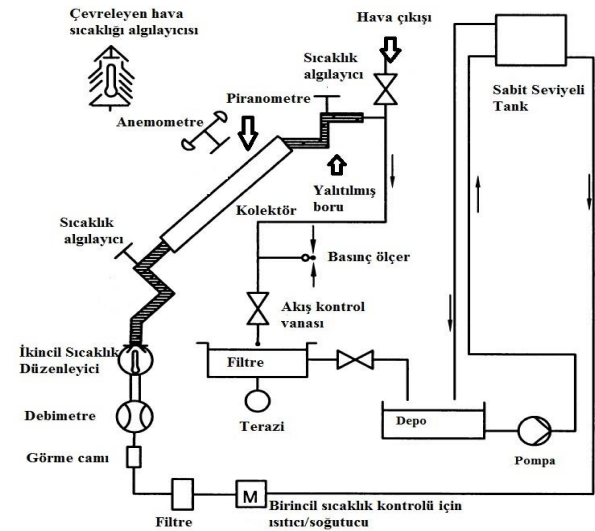
Yüzeyleri anti-oksidan ile temizlenen bakır U tüplere güneş ayırıcı tabakadan çalışma sıvısına ısı transfer edebilmek için alüminyum kanatlar kaynatılmıştır. Pürüzsüz alüminyum sacdan imal edilmiş, yüzeyinin güneş yansıtma oranı 0,91 olan bileşik parabolik yoğunlaştırıcı, güneş radyasyonunu yoğunlaştırmak için uygulanmıştır. Yapılan deneylerde, anlık verimlilik 25°C ile 150°C arasında ölçülmüştür ve 150°C'de ve %50,2 termal verimliliğe tekabül eden verimin denklemi $\eta = 0,691 - 0,83T_m - 0,0035GT_m^2$ olarak edilmiştir [16].

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de uzun zamandır kullanılan düz plaka kolektörlerin enerji ve ekserji verimlerinin analizi yapılarak, alüminyum veya bakır soğurucu yüzeylere sahip kolektörler mukayese edilmiştir. Bu amaçla TS EN 12795-2 standardına uygun olarak kolektörler, test düzeneğinde ölçümler yapılarak karşılaştırma yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Deneyler, TS EN 12795-2 standardına uygun olarak kurulmuş deney standında gerçekleştirilmiştir. Deney standı iki eksenli güneş takip sistemine sahiptir. Güneşten gelen ışınımı daha verimli kullanmak amacıyla geliştirilmiş bu sistemlerde yer alan iki motor sayesinde takip sistemi iki eksenli hareketle güneşin konumuna göre pozisyonunu ayarlayabilmektedir. Bu sayede sistem güneş ışınlarını sürekli 90° açıyla alabilmektedir.



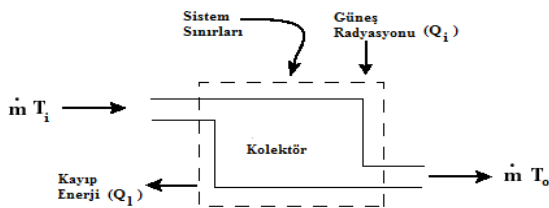
Şekil 1. Deney düzeneği devresinin şematik gösterimi (Schematic view of the test rig) [17]

Kolektörlerin anlık verim deneylerine başlanmadan önce deney düzeneğine bağlanan kolektörler ön şartlandırma işlemine tabii tutulur. Deneyde kullanılacak kolektörler gözle muayene edilir. Muayene edilen kolektörlerde herhangi bir hasar bulunmamalıdır. Kolektörlerin açıklık örtüsünün temiz olup olmadığı kontrol edildikten sonra eğer kolektör bileşenlerinde rutubet varsa kolektörü

kurutmak için 80°C'deki su rutubet kuruyana kadar sistemde dolaştırılır. Deneye başlanmadan önce boş kolektör en az 700 W/m² ışınlanma altında 5 saat bekletilir. Deneye başlanabilmesi için ışınlanma yoğunluğu en az 700 W/m² olması gerekmektedir. Kolektör açıklığındaki doğrudan güneş ışınması gelme açısı, kolektör için gelme açısı değiştiricinin dik gelmedeki değerinden ± % 2'den daha fazla değişme olmayacak aralıkta olmalıdır. Tek camlı düz plaka kolektörler için, kolektör açıklığındaki doğrudan güneş ışınması gelme açısı 20° den daha azsa, bu şart genel olarak yeterlidir. Dağılan ışınlanma yoğunluğu %30'dan daha fazla olduğunda kolektör deneye tabi tutulmaz. Deney ortamındaki rüzgâr hızı 3 m/s ±1 m/s olması gerekmektedir. Deneyde kolektör açıklık alanının metre kare başına 0,02 kg/s akışkan kullanılır [17].

Deney başlangıcında piranometre yardımıyla güneş ışınımı ölçülür. Anemometre yardımıyla rüzgâr hızı ölçülür ve termometre yardımıyla ortam sıcaklığı ölçülür. Deney düzeneği sensörler yardımıyla güneşin gelme açısına göre güneşi takip etmektedir. Sistem çalıştırıldıktan sonra depodan alınan su, deney şartına göre direkt ya da ön ısıtıcı tarafından ısıtılarak kolektöre iletilir. Kolektörün giriş kısmında suyun sıcaklığı ve debisi ölçülür. Daha sonra kolektör içinde ısınan su sıcaklığı ve debisi ölçülerek tekrar depoya gönderilir. Kolektörün su girişinde bulunan ölçüm aletleri yardımıyla, suyun sıcaklığı ve debisi ölçülür. Kolektörde ısınan suyun çıkış bölümünde tekrar sıcaklığı ve debisi ölçülür. Sisteme bağlı olan bilgisayar yardımıyla üç saniyelik aralıklarla sonuçlar alınır ve kaydedilir. Verim formülü yardımıyla kolektörün anlık verisi hesaplanır. Deneilerin standarda uygun olarak gerçekleştirilebilmesi için giriş sıcaklığı azami sıcaklık en az 80°C civarında olana kadar deneye devam edilir. Toplam 16 veri noktası elde edebilmek için, akışkan giriş sıcaklıkları için en az dört bağımsız veri elde edilir. Anlık verimliliğin modellenebilmesi için en küçük kareler regresyonuyla beraber ikinci dereceden bir eğri kullanılır [17].

2.2. Metot (Method)



Şekil 2. Kolektör kontrol hacmi

Kontrol hacmi (Şekil 2) belirtilen kolektör için termodinamiğin birinci kanunu olan enerji denklemini yazabiliriz.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * \Delta T \quad (1)$$

Eş. 1'de verilen Q akışkanın gerçek faydalı enerjisini ifade etmektedir. c_p değeri ortalama akışkan sıcaklığına bağlı olarak Eş. 2'de görüldüğü gibi hesaplanır [17].

$$c_p(T) = 4,217 - 3,358 * 10^{-3} * T_m + 1,089 * 10^{-4} * T_m^2 - 1,675 * 10^{-6} * T_m^3 + 1,309 * 10^{-8} * T_m^4 - 3,884 * 10^{-11} * T_m^5 \quad (\text{kJ/kgK}) \quad (2)$$

$$T_m = \frac{T_o - T_i}{2} \quad (3)$$

Kolektöre gelen enerjinin bir kısmı akışkana aktarılırken bir kısmı da kaybolmaktadır. Enerjinin tamamının kolektör akışkan sıvısına aktarılamamasından dolayı kolektör verimliliği ortaya çıkmaktadır. Kolektör verimliliğine, faydalı gücün dâhil edilmesiyle beraber kolektörde tutulan güneş enerjisi Eş. 4'teki gibi hesaplanır.

$$\dot{Q} = A_c * G * \eta \quad (4)$$

Uygulamada verim hesabı Eş. 5'te ifade edildiği şekilde hesaplanır [17]. Yapılan ölçümler neticesinde η_0, a_1 ve a_2 değerleri kolektörün karakteristik parametreleri olarak program tarafından hesaplanmaktadır.

$$\eta = \eta_0 - \frac{a_1(T_m - T_a)}{G} - \frac{a_2(T_m - T_a)^2}{G} \quad (5)$$

Düşürülmüş sıcaklık farkı, ışınım altındaki ısı transfer akışkanının ortalama sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farktır. Eş. 6'daki gibi ifade edilir.

$$T_m^* = \frac{T_m - T_a}{G} \quad (6)$$

TS EN 12975-2 standardına göre en küçük kareler metodu kullanılarak, enerji verimliliği η , aşağıdaki şekilde bir verimlilik eğrisi elde etmek için istatistiksel eğri uydurularak hesaplanması için kolektörlerin enerji verimi Eş. 5 ve 6'ya göre yeniden düzenlendiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir. Standarda göre normal olarak, en küçük kareler regresyonuyla ulaşılabilen, bir ikinci-derece eğri grafiklerde kullanılmalıdır [17].

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_m^* - a_2 G (T_m^*)^2 \quad (7)$$

Ekserji, enerjinin iş yapabilme yeteneği olarak ifade edilir. Ekserji analizi yardımıyla sistemlerin ısı kayıplarının miktarının ve niteliğinin belirlenmesine yardımcı olur. Kolektörün ekserjisi aşağıda ifade edildiği gibi hesaplanır.

$$E_{xc} = G * A_c * \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) \quad (8)$$

Kolektörde dolaşan akışkanın ekserjisi ise Eş. 8'deki gibi hesaplanır.

$$E_{xf} = \dot{m} * [(h_o - h_i) - T_a * (s_o - s_i)] \quad (9)$$

$$(h_o - h_i) = c_p * (T_o - T_i) \quad (10)$$

$$(s_o - s_i) = c_p * \ln\left(\frac{T_o}{T_i}\right) \quad (11)$$

Eş. 9, 10 ve 11'i tekrar düzenlendiğinde Eş. 12 elde edilir.

$$\psi = \dot{m} * c_p * (T_o - T_i - T_a * \ln\left(\frac{T_o}{T_i}\right)) \quad (12)$$

Sistemin ekserji verimliliğini hesaplayabilmek için akışkanın çıkan ve giren ekserjisi arasındaki fark ile güneşten gelen ekserjiden faydalanılır [18].

$$\eta_{2nd} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_o - T_i - T_a \cdot \ln(\frac{T_o}{T_i}))}{G \cdot A_c \cdot (1 - \frac{T_a}{T_s})} \quad (13)$$

3. DENEY VE ANALİZ SONUÇLARI (EXPERIMENT AND ANALYSIS RESULTS)

Yapılan deneylerde soğurucu yüzey alan ölçüleri birbiriyle aynı iki adet düz plaka kolektör kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kolektörlerin ikisinde de 10 mm çapında 12 adet bakır boru kullanılmıştır. Kolektörlerin

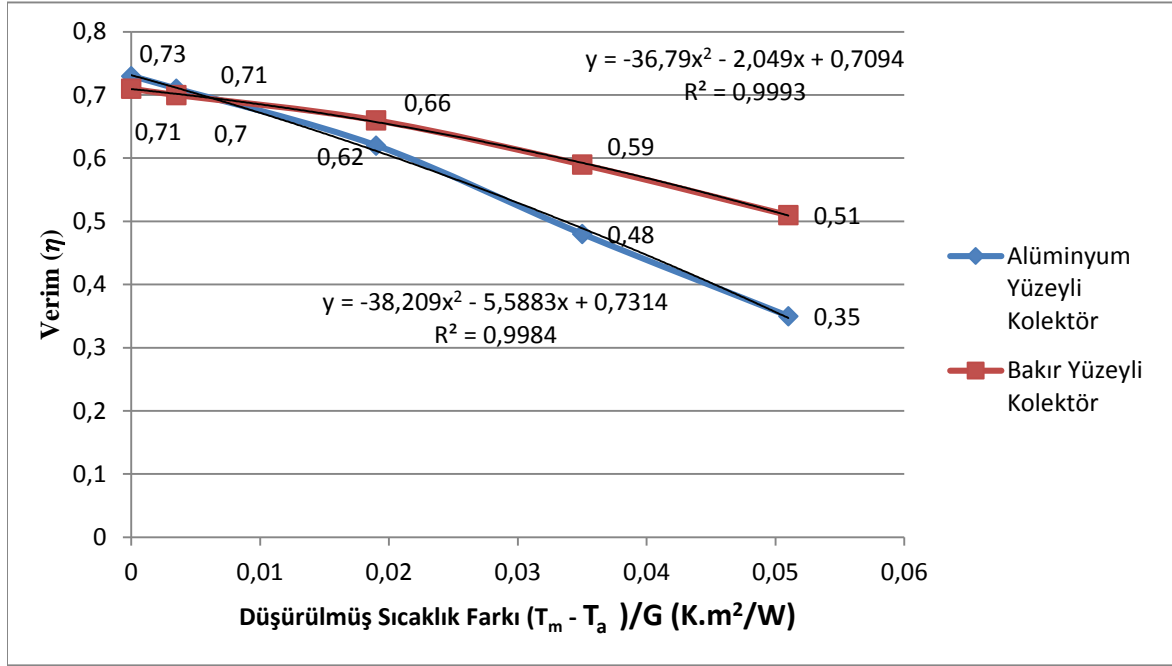
kasası alüminyum eloksallı kaplamalıdır. Ayrıca her iki kolektörde de düşük demirli 4 mm kalınlığında temperli düz cam kullanılmıştır. Yalıtım malzemesi olarak taş yünü kullanılmıştır. 1 numaralı kolektörde soğurucu yüzey alüminyum iken, 2 numaralı numunede ise soğurucu yüzey tipi bakırdır. Çizelge 1'de alüminyum soğurucu yüzey tipine ait kolektörün anlık ve ikinci dereceden verimi değerleri verilmiştir. Çizelge 2'de ise bakır soğurucu yüzeyli olan kolektörün anlık ve ikinci dereceden verim değerleri verilmiştir. Alüminyum soğurucu yüzeyli kolektör için a_1 değeri 3,601,

Çizelge 1. Alüminyum soğurucu yüzeyli düz plaka kolektör deney ve analiz sonuçları (Experiment and analysis results for aluminium absorber surface flat plane collector)

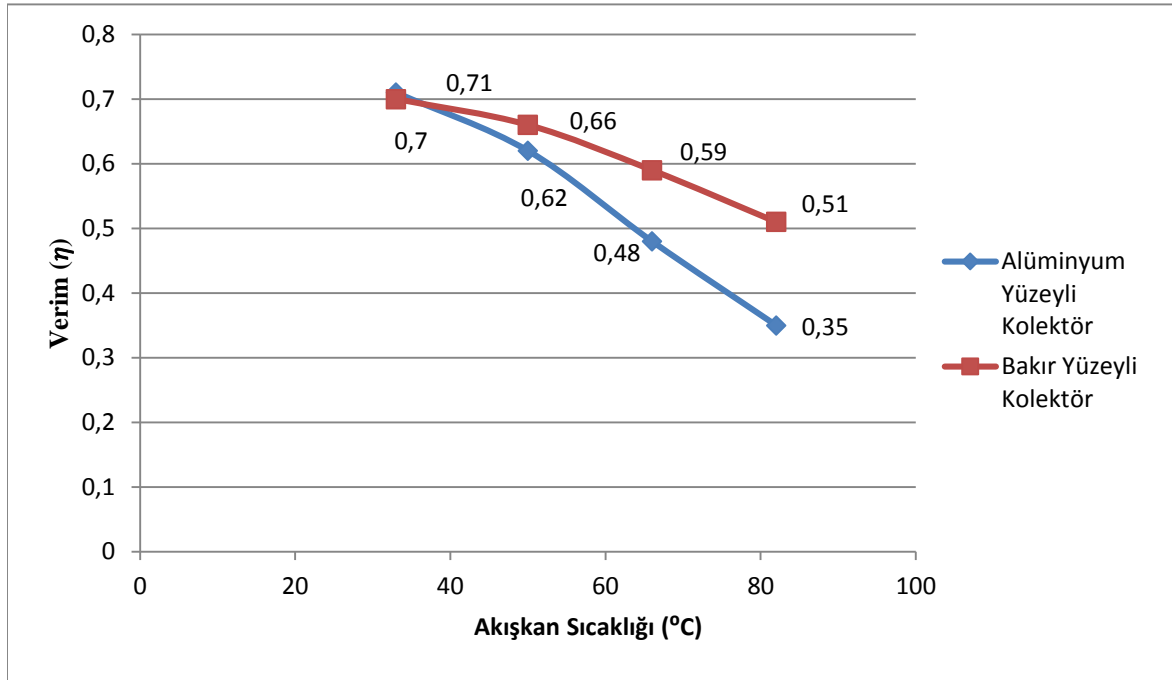
İŞİNİM ŞİDDETİ (W/m ²)	DEBİ (kg/dk)	GİRİŞ SICAKLIĞI (T _i) (°C)	ÇIKIŞ SICAKLIĞI (T _e) (°C)	ÇEVRE SICAKLIĞI (T _a) (°C)	ORTALAMA SICAKLIK (T _m) (°C)	VERİM (η)	EKSERJİ VERİMİ (η _{2nd})
1045	1,98	28,93	38,2	31	33,57	0,713	0,006
1045	1,98	28,84	38,15	31,5	33,50	0,715	0,005
1042	1,98	28,9	38,12	31	33,51	0,713	0,006
1037	1,98	28,87	37,94	30,5	33,41	0,711	0,007
1032	1,97	46,87	54,45	31	50,66	0,622	0,035
1027	1,97	47,01	54,55	30,5	50,78	0,617	0,037
1015	1,97	47,04	54,47	31,5	50,76	0,623	0,035
1019	1,97	46,98	55,1	30,7	51,04	0,616	0,040
1011	1,98	63,35	70,24	30,5	66,80	0,482	0,058
1005	1,98	63,32	70,32	30,9	66,82	0,484	0,059
1004	1,98	63,35	70,3	30,6	66,83	0,481	0,059
1017	1,98	63,3	70,5	31	66,90	0,487	0,060
1022	1,98	78,15	83,05	30	80,60	0,331	0,055
1020	1,98	78,32	83,01	31,5	80,67	0,347	0,051
1017	1,98	78,4	82,95	32	80,68	0,352	0,049
1019	1,98	78,45	82,97	32,2	80,71	0,354	0,049

Çizelge 2. Bakır soğurucu yüzeyli düz plaka kolektör deney ve analiz sonuçları (Experiment and analysis results for copper absorber surface flat plane collector)

İŞİNİM ŞİDDETİ (W/m ²)	DEBİ (kg/dk)	GİRİŞ SICAKLIĞI (T _i) (°C)	ÇIKIŞ SICAKLIĞI (T _e) (°C)	ÇEVRE SICAKLIĞI (T _a) (°C)	ORTALAMA SICAKLIK (T _m) (°C)	VERİM (η)	EKSERJİ VERİMİ (η _{2nd})
1038	2,25	27,51	36,2	29,1	31,86	0,704	0,007
1038	2,25	27,55	36,4	28,9	31,98	0,703	0,008
1039	2,25	27,57	36,41	28,7	31,99	0,702	0,008
1045	2,25	27,61	36,52	29,4	32,07	0,704	0,007
1035	2,2	44,42	52,45	31,4	48,44	0,658	0,036
1035	2,2	44,41	52,44	30,4	48,43	0,654	0,039
1041	2,2	44,43	52,5	31,1	48,47	0,657	0,037
1038	2,2	44,5	52,53	31	48,52	0,656	0,037
1001	2,2	62,5	69,6	32,2	66,05	0,589	0,063
1009	2,2	62,5	69,61	31,9	66,06	0,589	0,063
1015	2,2	62,51	69,71	31	66,11	0,586	0,065
1005	2,2	62,54	69,73	32	66,14	0,589	0,064
1049	2,2	81,07	85,7	30,8	83,39	0,512	0,058
1050	2,2	81,1	85,49	30	83,30	0,509	0,055
1052	2,2	81,05	85,59	31	83,32	0,514	0,056
1051	2,2	81,09	85,54	32	83,32	0,519	0,054



Şekil 3. Kolektörlerin enerji verimlerinin düşürülmüş sıcaklık farkına oranının karşılaştırılması (Comparison of the efficiency of the collectors to decreased temperature difference rate)



Şekil 4. Kolektörlerin enerji verimlerinin akışkan sıcaklığına göre karşılaştırılması (Comporasion of efficiency of the collectors to fluid temperature)

a_2 değeri ise 0,085 olarak bulunmuştur. Bakır yüzeyle kolektör için ise a_1 değeri 2,971, a_2 değeri ise 0,019 olarak bulunmuştur.

Eş. 5'te ifade edilen formül kullanılarak iki farklı tipteki kolektörün enerji verimleri hesap edilerek, sonuçlar Çizelge 1 ve Çizelge 2'de belirtilmiştir. Eş. 13'deki formül yardımıyla ise kolektörlerin ekserji verimleri hesap edilerek Çizelge 1 ve Çizelge 2'de belirtilmiştir. Yapılan enerji analizi sonucunda, kolektörlerin enerji

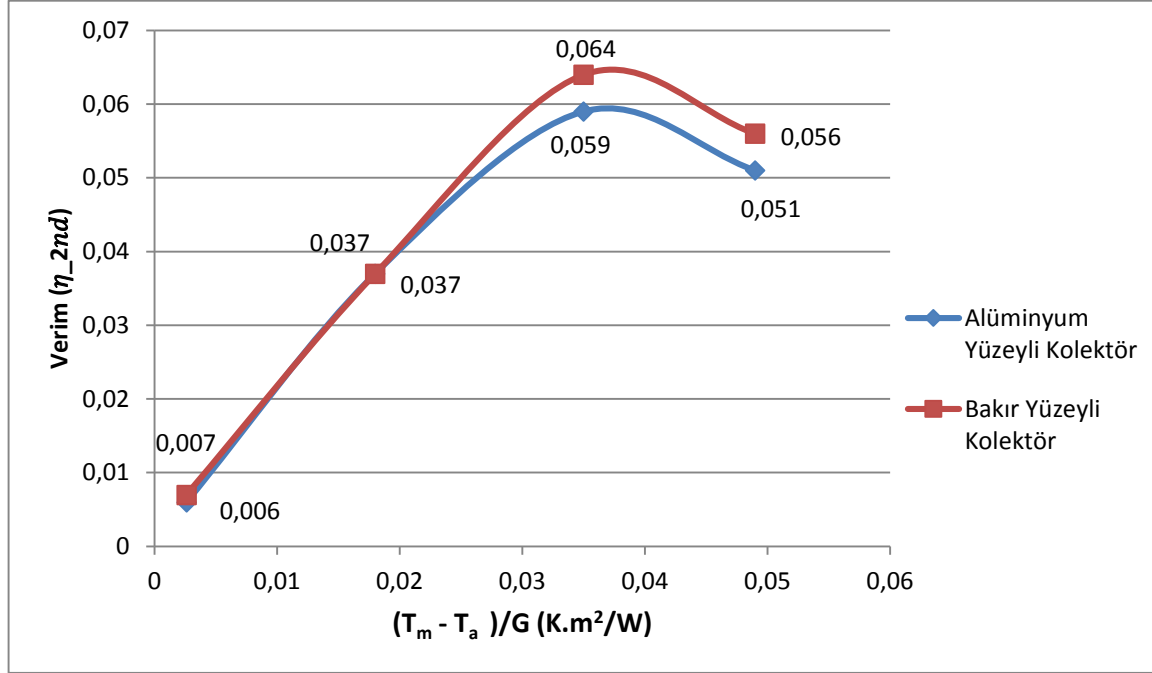
verimlerinin düşürülmüş sıcaklık farkına oranı karşılaştırılarak Şekil 3, Şekil 5'de gösterilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda Şekil 3'te farklı tipteki iki düz plaka kolektörün verim sonuçlarının kıyaslaması verilmiştir. Düşürülmüş sıcaklık farkı sıfır olduğunda alüminyum soğurucu yüzeyle olan kolektörün verimi %73,14 iken, bakır soğurucu yüzeyle düz plaka kolektörün verimi %70,94 elde edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde alüminyum soğurucu yüzeyle kolektörün

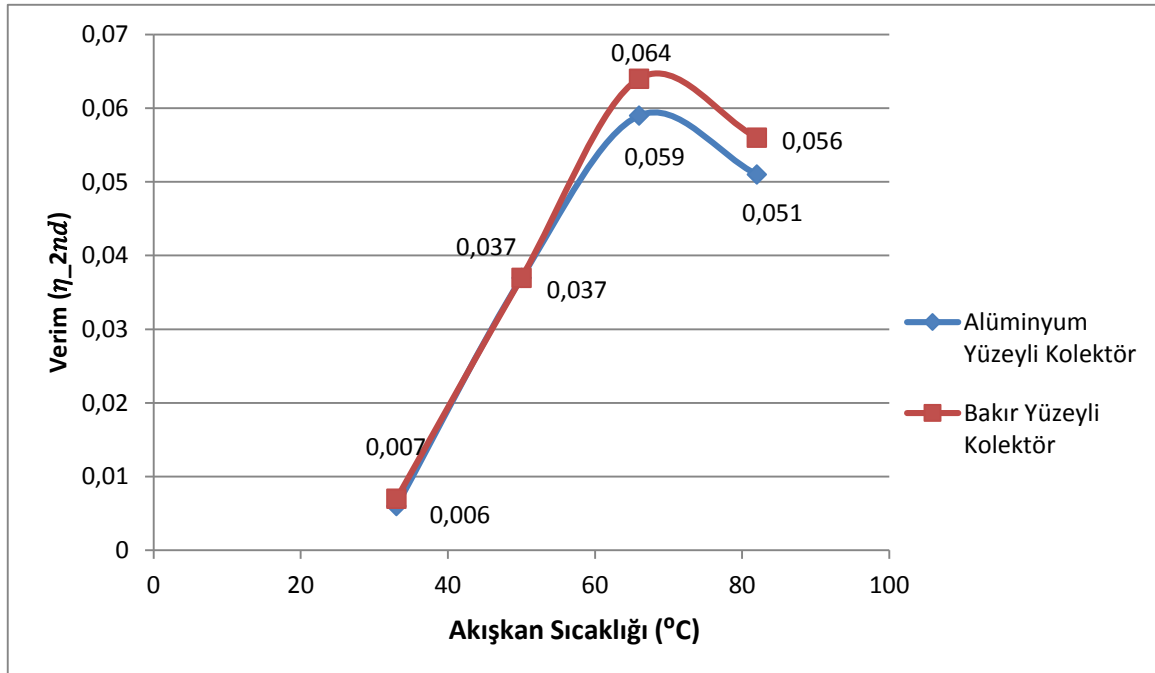
verimi bakır yüzeyli düz plaka kolektöründen % 3,11 daha fazladır. Deney düzeneği güneş takip eden bir sistem olduğu için deneylerin farklı zamanlarda olmasına rağmen kolektörlerin aldığı güneş ışınımları yaklaşık aynıdır. İki kolektör üzerinde yapılan deney sonucunda artan akışkan çalışma sıcaklığı ile beraber kolektörlerin veriminin düştüğü gözlenmiştir. Yapılan deneylerde

rüzgâr hızı az olduğu için rüzgârdan kaynaklı kayıplar göz ardı edilmiştir. Alüminyum soğurucu yüzeyli kolektördeki enerji veriminin düşüşü, bakır yüzeyli kolektöre göre daha fazladır.

Verim sonuçları dikkate alındığında Şekil 4'te 30-35 °C gibi düşük sıcaklıklarda iki kolektöründe verimleri yaklaşık birbirine yakındır. Bakır yüzeyli kolektörün



Şekil 5. Kolektörlerin ekserji verimlerinin düşürülmüş sıcaklık farkına oranının karşılaştırılması (Comparison of exergy efficiency of the collectors to decreased temperature difference rate)



Şekil 6. Kolektörlerin ekserji verimlerinin akışkan sıcaklığına göre karşılaştırılması (Comparison of exergy efficiency of the collectors to fluid temperature)

verimi ortalama 0,70 iken, alüminyum yüzeylininki ortalama 0,71'dir. Ama artan çalışma sıcaklığıyla beraber bakır yüzeyli kolektörün verimindeki düşüş alüminyum yüzeyliden daha düşüktür. Deneylerde artırılan çalışma sıcaklığıyla beraber kolektör verimleri arasındaki fark gittikçe artmıştır. 50 °C'de gerçekleştirilen deneylerde kolektör verimleri arasındaki fark çok azdır. Bu çalışma sıcaklığında bakır yüzeyli kolektörün enerji verimi 0,66'ya düşmüşken, alüminyum soğurucu yüzeyli kolektörünki 0,62'ye düşmüştür. Bu sıcaklık değerinde bakır yüzeyli kolektörün verimi %6,45 daha fazladır. Yaklaşık 66°C'de ise bakır yüzeylininki 0,59 düşmüşken, alüminyum yüzeylinin enerji verimi 0,48'e düşmüştür. 82 °C'de gerçekleştirilen deneyler sonucunda ortaya çıkan verim sonuçları arasındaki fark çok fazladır. 82 °C'de bakır soğurucu yüzeyli kolektörün verimi 0,51 iken, alüminyum yüzeyli kolektörün verimi 0,35'tir. Bu sıcaklıkta bakır yüzeyli kolektörün verimi, alüminyum yüzeyli kolektörün enerji veriminden %45,7 daha fazladır.

Şekil 5 ve Şekil 6'da kolektörlerin ekserji verimleri kıyaslanmıştır. Her iki kolektöründe ekserji verimi 60-65 °C çalışma sıcaklığına kadar artış göstermektedir. Bu sıcaklıkta bakır yüzeyli kolektörün ekserji verimi % 6,4 iken alüminyum yüzeyli kolektörün ekserji verimi % 5,9 olmuştur. Bu sıcaklıktan sonra sistemin ekserjisi düşmektedir. 50 °C'de iki tipteki kolektörün ekserji verimleri aynı değerdedir. Düşük sıcaklıklarda bakır yüzeyli kolektörün ekserji verimi % 0,7 iken, alüminyum yüzeylininki %0,6'dır. 60-65 ° C'ye kadar kolektörlerin ekserji verimleri yaklaşık olarak aynı değerdedir. Sistemlerin maksimum ekserji veriminde bakır yüzeyli kolektörün verimi diğerinden % 8,5 daha fazladır. En yüksek çalışma sıcaklığında ise bakır yüzeylinin verimi % 9,8 daha fazladır.

Bu sonuçların elde edilmesinde en büyük pay soğurucu yüzeylerin ısı iletkenlik katsayılarıdır. Bakırın ısı iletkenlik katsayısı alüminyumunkinden yüksektir. Isıl iletkenliğin fazla olmasından dolayı bakır soğurucu yüzey güneşten aldığı ışınımı taşıyıcı borulara ve dolayısıyla akışkan sıvıya daha fazla aktarabilmektedir. Bu da yüksek çalışma sıcaklıklarında daha fazla enerjiyi akışkana aktarabilmesini sağlamaktadır. Dolaylı olarak da bakır soğurucu yüzeyin ekserji verimliliği daha yüksektir. Alüminyum soğurucu yüzeyin ısı iletkenlik katsayısının daha düşük olmasından dolayı güneşten gelen ışımdan yüksek sıcaklıklarda faydalanma oranı daha düşüktür. Bu durumda ısı kayıpların daha çok olmasına ve sistemin ekserjisinin düşük olmasına neden olmaktadır.

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER (DISCUSSION AND SUGESSTIONS)

Deney sonuçları kullanılarak önce sistemin enerji analizi yapılmıştır. Enerji analizinden sonra sistemin birinci verimi hesaplanmıştır.Yapılan analiz neticesinde düşük sıcaklıklarda verim farkı %3,11 iken uygulama sıcaklığı 80° C'ye çıkarıldığında iki kolektör arasındaki verim

farkı %45,7'ye ulaşmıştır. Artan sıcaklıkla beraber bakır yüzeyli kolektörün verimi %70'den %51'e düşerken, alüminyum yüzeyli kolektörün verimi %71'den %35'e düşmüştür. Daha sonra sistemin ekserji analizi yapılmış ve kolektör tipleri için sistem ekserji verimleri kıyaslanmıştır. Yaklaşık 30-35° C arasında kolektörlerin ekserji verimleri aynıdır ve %0,7'dir. Sıcaklık 70 ° C'ye yükseldikçe kolektörlerin ekserji verimleri yükselmiştir. Bakır soğurucu yüzeyli kolektörün ekserji verimi %6,4'e yükselmişken, alüminyum yüzeyli kolektörün verimi ise %5,9'a yükselmiştir. Bu sıcaklıklardan sonra her iki kolektöründe ekserji verimlerinde düşüş gözlenmiştir. Bakır yüzeyli kolektörün ekserji verimi %5,6'ya düşmüşken, alüminyum yüzeylininki ise %5,1'e düşmüştür. Yapılan analizler ve karşılaştırmalar neticesinde bakır soğurucu yüzey tipli düz plaka kolektörün veriminin daha iyi olduğu ve daha uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışma neticesinde güneş kolektörlerinde kullanılan soğurucu yüzeyin hangi maddeden yapıldığının önemi vurgulanmıştır. Bakırın ısı iletkenlik katsayısının alüminyumdan daha fazla olması kolektörün verimini olumlu yönde etkilemektedir. Kolektörlerde soğurucu yüzey olarak daha iletken bir metalin kullanılması kolektörün verimini daha da artıracaktır.

Sıcak su elde etmek için doğalgazdan, elektrikli şofbenlerden ya da kazanlardan yararlanılmaktadır. Doğalgazda dışarı olan bağımlılığımız, elektrik üretiminde kullanılan kaynakları ithal etmemiz ve kazan sistemleriyle sıcak su elde etmenin zahmetli olduğu düşünüldüğünde güneş kolektörleri ile sıcak su elde etmek hem ekonomik yönden hem de pratiklik yönünden avantajlar sağlamaktadır. Su ve elektrik kesintilerinin çok sık yaşandığı yerlerde su ısıtma ve depolama amacıyla kullanılan bu sistemler, çevre dostu olma özelliğiyle de ön plana çıkmaktadır. Enerjide dışa bağımlılık ve artan enerji ücretleri düşünüldüğünde sıcak su elde etme amaçlı kolektör sistemleri önem kazanmaktadır. Sistemlerin uzun ömürlü olması, bakımlarının olmaması ve işletme kolaylığı gibi avantajları bulunan bu sistemlerin yaygınlaşması enerjide dışa bağımlılığı azaltmaya yardımcı olacaktır. Yaklaşık 20 yıl ömre sahip bu kolektörlerin verimleri göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma hangi tip soğurucu yüzeye sahip kolektörün kullanılması gerektiğine yardımcı olacaktır.

SİMGELER (SYMBOLS)

G	Işınım Şiddeti (W/m ²)
Q̇	Transfer edilen ısı miktarı (W)
m	Suyun kütlesi (kg)
ṁ	Kütleli debi (kg/s)
c _p	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kg.K)
T	Sıcaklık (°C)

T_m^*	Düşürülmüş sıcaklık farkı (K.m ² /W)
η	Enerji verimi
η_0	Sıfır ısı kaybı katsayısı
η_{2nd}	İkinci dereceden verim
a_1	Isı kaybı katsayısı
a_2	Sıcaklığa bağlı ısı kaybı katsayısı
ψ	Ekserji (W)
A_c	Kolektör yüzey alanı (m ²)
H	Entalpi (kJ/kg)
S	Entropi (kJ/kg.K)
E	Enerji (J)

Alt indisler (Sub Indices)

o	Çıkış
i	Giriş
m	Ortalama
a	Çevre
s	Güneş
xc	Kolektör ekserjisi
xf	Akışkan ekserjisi

Kısaltmalar (Abbreviations)

EN	Avrupa Normu
Eş	Eşitlik
TS	Türk Standardı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Mavi Kitap - Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Bağlı, İlgili ve İlişkili Kuruluşlarının Amaç ve Faaliyetleri, *ETKB*, Ankara, 2-11, (2015).
2. İnternet: Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (2010), URL:<http://www.webcitation.org/quer?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr%2FMyCalculator%2FDefault.aspx&date=2016-02-24>, Son Erişim Tarihi: 24.02.2016.
3. Değirmenci, H. Düzlemsel Güneş Kolektörlerinde Su Dolaşım Miktarının Kolektör Verimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 20-68, (2006).
4. Dağ, H. Güneş Enerji Sistemlerinde Kullanılan Dairesel Borulu Kolektör ile Oval Borulu Kolektörlerin Deneysel İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 44-69, (2005).
5. Çakır, G. Vakum Borulu Kolektör ve Ek Isıtıcı Kullanarak Kapalı Bir Alanın Isıtılmasının Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 55-122, (2009).
6. Aktaş, M. Güneş enerjili sistemlerde ısı değiştirici yüzeyin ve akışın ısı performans üzerindeki etkileri. *Politeknik Dergisi*, 12(4): 243-246, (2009).
7. Taze, G. Düz Güneş Kolektörü Verimini Etkileyen Bazı Parametrelerin Deneysel İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 35-110, (2010).
8. Furbo, S. , Chen, Z. , Perers, B. , Fan, J. and Andersen, E. Efficiencies of flat plate solar collectors at different flow rates. *Energy Procedia*, 30(30): 65-72, (2012).
9. Furbo, S. , Chen, Z. , Perers, B. , Fan, J. , Andersen, E. , Wang, Z. and Kong, W. Investigation of thermal performance of flat plate and evacuated tubular solar collectors according to a new dynamic test method. *Energy Procedia*, 30(30): 152-161, (2012).
10. Maldonado, R. D. , Huerta, E. , Corona, J.E. , Ceh, O. , Leon, A. I. and Henandez, I. Design and construction of a solar flat collector for social housing in Mexico. *Energy Procedia*, 60(57): 2159-2166, (2014).
11. Dragsted, J. , Furbo, S. , Andersen, E. , Perers, B. and Nielsen, K. P. Calculated thermal performance of solar collectors based on measured weather data from 2001-2010. *Energy Procedia*, 70(70): 49-56, (2015).
12. Kaan, Ö. Düzlemsel Kolektörlerde Performans Artırma Yöntemlerinin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Maliyet Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 13-71, (2006).
13. Şahin, T. Düzlemsel ve Bükülmüş Kolektörlerin Deneysel İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 32-50, (2010).
14. Çaylıoğlu, E. Farklı Tipteki Isı Borularının Güneş Kolektöründe Kullanımı ve Isıl Verimlerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 37-70, (2011).
15. Makhanlall, D. , Jiang, P. Performance analysis and optimization of a vapor filled flat plate solar collector. *Energy Procedia*, 70(70): 95-102, (2015).
16. Wang, J. , Yin, Z. , Qi, J. , Ma, G. and Liu X. Medium temperature solar collectors with all glass solar evacuated tubes. *Energy Procedia*, 70(70): 126-129, (2015).
17. Türk Standardları Enstitüsü TS EN 12975-2: Isıl güneş enerji sistemleri ve bileşenleri - Güneş enerjisi kolektörleri-Bölüm 2: Deneysel metodları, *TSE*, Ankara, 26-107, (2006).
18. Ge, Z. , Wang, H. , Zhang, S. and Guan, X. Exergy Analysis of Flat Plate Solar Collectors. *Entropy*, 2(16): 2549-2567, (2014).

Analysis of Usability of Waste Erosion Wires as Fiber in Reactive Powder Concrete

Metin İPEK*

Sakarya University, Technology Faculty, Civil Engineering Department, 54187 Sakarya, TURKEY

(Received : 13.04.2016 ; Accepted : 25.07.2016)

ABSTRACT

In this study, waste erosion wires' usability, which are being used in metal processing industry, as fiber in Reactive Powder Concrete (RPC). Waste erosion wire resembles to micro steel fibers used in RPC. In the study, comparison was done by using waste erosion wires and micro steel fibers in the same amount in RPC. In this sense, 2% and 4% non-fibrous waste erosion wire and steel fiber included RPC samples were used. Mechanical features of samples were determined by doing compressive and flexural tests on these samples. Moreover, cost analysis of samples was done and unit cost strength was determined. Finally, compressive strength of samples including 4% waste erosion wire and steel fiber were 230 MPa and 260 MPa while they reached the values of 40.50 MPa and 22.06 MPa as a result of flexural test. It was seen that it would be beneficial to use waste erosion wires as fiber in RPC both in the sense of recycling and cost.

Keywords: Erosion Wires, Recycling, Mechanical Properties.

Atık Erozyon Tellerinin Reaktif Pudra Betonunda Lif Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

ÖZ

Bu çalışmada, metal işleme endüstrisinde kullanılan erozyon teli atıklarının RPB'de lif olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atık erozyon teli, Reaktif Pudra Betonunda (RPB) kullanılan mikro çelik liflere çok benzemektedir. Çalışmada, Atık erozyon telleri ile mikro çelik lifler RPC'de aynı oranlarda kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Bunun için lifsiz, %2 ve %4 oranlarında atık erozyon teli ve çelik lif içerikli RPC numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde basınç ve eğilme deneyleri yapılarak numunelerin mekanik özellikler belirlenmiştir. Ayrıca maliyet analizleri yapılarak numunelerin birim dayanım maliyetleri belirlenmiştir. Sonuç olarak %4 atık erozyon teli ve çelik lif içeren numunelerin basınç dayanımı sırasıyla 230 MPa ve 260 MPa ulaşırken eğilme deneyi sonucunda 40.50 MPa ve 22.06 MPa değerlerine ulaşılmıştır. Atık erozyon tellerinin, hem geri dönüşüm hem de maliyet açısından RPC'de lif olarak kullanılmasının yararlı olabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Erezyon Teli, Geri Dönüşüm, Mekanik Özellikler.

1. INTRODUCTION

Metal cutting operation with erosion wire in an electro-thermal method in which material is removed with sequent sparks which occurred between wire electrode and the workpiece in dielectric liquid media [1]. Different from conventional methods which involves physical contact and relative motion; unconventional custom manufacturing techniques are those which process, etch and shape material by using various energy types (chemical, electro-chemical, thermal energy etc ...) without applying mechanical force [2]. Wire erosion which is one of these techniques and does cutting with electro-thermal energy has been used commonly in metal working industry, aerospace industry, nuclear and automotive industry [3]. In these cutting processes, brass, molybdenum, tungsten and copper wires which usually have the diameter of 0.76 – 0.4 mm were used [4]. The wire which is electrode set is fed from a roller and moves along workpiece. Depending on application voltage

during process, serial sparks are formed between workpiece and wire within insulating liquid (water, kerosene or other hydrocarbons), feed rate changes according to the amount of energy at each sparkle (Fig. 1) [5,6].

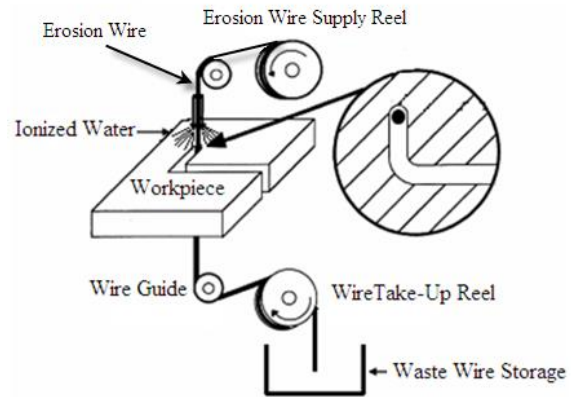


Figure 1. The Wire-Cut Electrical Discharge Machining (EDM) Process [6,7].

*Corresponding Author

e-mail: metini@sakarya.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 451-457

Wire used in metal processing industry, wires which are generally brass or copper and do the cutting in eroding machine are thrown off after cutting. These waste wires are cropped at will from the cutting machine for ease of storage and brought to re-cycle in this way. As a result of cutting erosion occurs on both workpiece and partly on the surface of wire and the diameter of wire gets thin and craters occur. Erosion waste wires erode very little since they do not physically contact with the material being cut during cutting process and erosion as a result of cutting makes the surface of wire rough. As a result of deformation on wire, the wire cannot be used for the second time and is collected in waste wire store. Erosion wires can be reutilized after long recycling processes and high costs.

RPC is a cement-based ultra high performance concrete which has superior mechanical and physical properties, exhibiting excellent ductility and durability characteristics. RPC has compressive strength of 150-800 MPa, while its tensile strength changes between 25 and 150 MPa. Moreover, its fracture energy changes between 1200-40000 J/m². The durability properties of RPC are better than current high performance concrete in orders of magnitudes [8-12].

At the first glance, waste erosion wires resembles to micro brassy fibres used in RPC. Different from this the surface of wire is rough and this toughness will cause the adherence between fibre and paste. Moreover, study of waste wire being economic (4 times cheaper than steel wire) and its usability instead of steel wires which makes up nearly half of the cost of RPC was the main subject of this study. There has not been any study on literature about RPC usage of erosion wires yet. Therefore, in this study it was aimed to use erosion wires which resembles to micro fibre in RPC doing any recycling process.

In the studies in literature, brassy steel fibres which are generally in micro dimensions, 0.2 mm diameter and 13 mm long were used in RPC. Diameters of waste erosion wire are similar to steel fibre and generally vary between 0.05 – 0.4 mm [8,10-18]. Since the diameter of waste erosion wire used in the study is 0.25 mm it was used in the same amount with steel fibre. Waste erosion wire and steel fibre was substituted to RPC in the rate of 2% and 4% in volume. Mechanical features of samples were determined by doing pressure and flexural tests on these samples. Moreover, cost analysis of samples was done and unit cost strength was determined.

2. EXPERIMENTAL STUDY

2.1. Materials

High performance cement, PC 52.5 CEM I R type, was preferred for this study. RPC needs a pozzolanic material that will fill voids of micro particulates in binder paste and will contribute strength by producing secondary hydrates by pozzolanic reaction with the lime resulting

from primary hydration [8-12]. In this study undensified silica fume (SF) provided from Elkem Company in Norway was used. Two different quartz sands and powder used as aggregate with maximum particle size of 0.6 mm, 0.3 mm and 0.100 mm, respectively. Figure 2 and 3 show the granule structure of the quartz powder and particle size analysis of granule materials, respectively. A polycarboxylate based superplasticizer was used to fluidify the mixture. Effect of this superplasticizer is to maintain fluidity within time of fresh concrete and to attain high strength in a short time.

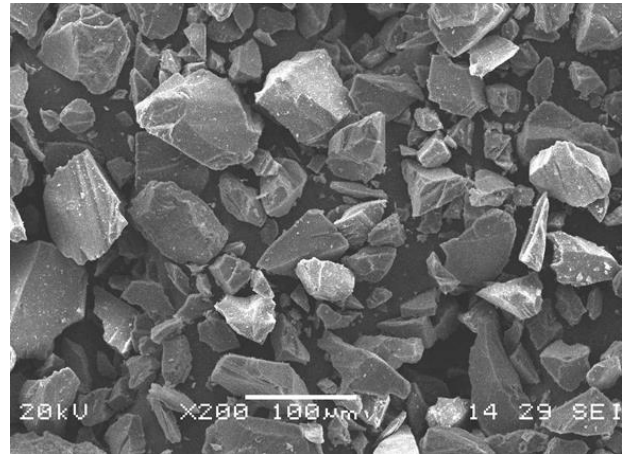


Figure 2. Granule structure of the quartz powder

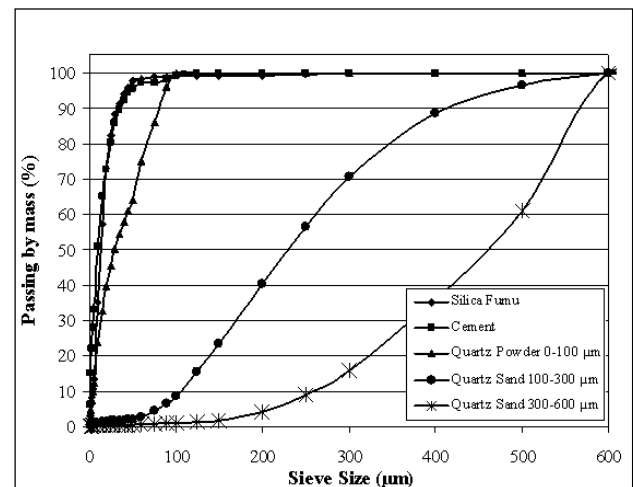


Figure 3. Particle size analysis of granule materials

In the study, brassy hookless micro fibre which has the diameter of 0.16 mm and 13 mm long was used. As waste erosion wire brass wire which has the diameter of 0.25 mm, 13 mm long, has 900 MPa tensile strength and named as CuZn37 Master Brass was used (Fig. 4). The physical and mechanical properties of steel fiber and erosion wire presented in Table 1. Erosion wires roughen forming shapes of crater on the upper surface after metal processing (Fig. 5) [19].



Figure 4. Erosion wire

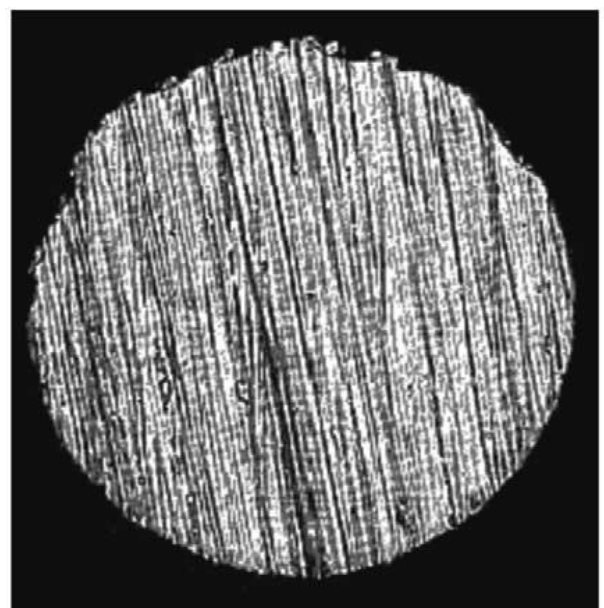


Figure 5. Craters formed after machining on the wire electrode [19]

2.2. Experimental Procedures

Mixture rates were taken from mixing process procedure Ref. 9 (Table 2). All samples were cured during three days at 90 °C water steam and in remaining days it was hold in water at 20°C after demoulding. Compressive strength and young's modulus and poisson ratio of RPC

were determined using cylinder samples had a length of 200 mm and a diameter of 100 mm. Young's modulus and poisson ratio tests were made by computer-aided system was able to measure load, axial and lateral deformation at the same time as stated in Ref. 9.

The flexural strength and toughness of the concrete were determined using samples having dimensions of 50x50x300 mm. The testing of all specimens was conducted in the four points loading flexural test. The loading speed of the experimental device was adjusted such that it was 0.05-0.10 mm/min at the midpoint of the beam [12,21-25]. The samples were loaded until they were completely fractured and the load-deflection plots were obtained. Using these graphs, the crack strength, flexural strength, equivalent flexural strength and fracture toughness were calculated. Toughness equivalent to the area under the load-deflection curves up to 10 mm deflection. The area under the load-deflection curve was calculated by a Matlab 7.5.0 software program.

In the study, five samples were produced for each test. Samples which were substituted with 2% and 4% waste erosion wire were coded as RPC-EW2 and RPC-EW4 respectively, samples which were substituted with steel fibre were coded as RPC-SF2 and RPC-SF4 respectively.

Table 2. Components of mixture, compressive strength and elasticity modules

Material	Fiber Ratio (%)		
	Ctrl	2	4
Cement	900	882	864
Silica Fume	270	265	259
Q. Powder	360	353	346
Q. Sand (100-300)	258	253	248
Q. Sand (300-600)	258	253	248
Water	225	221	216
SP	27	27	26
Air %	2	1,8	1,8
Steel Fiber (Erosion wire)	0	144 (170)	287 (340)
7 days Comp. Strength (MPa) (RPC-EW)	140	197 (173)	235 (202)
28 days Comp. Strength (MPa) (RPC-EW)	170	220 (190)	260 (230)
Young's Modulus (GPa) (RPC-EW)	58, 88	62,34 (60,05)	60,97 (59,74)

Table 1. Physical and mechanical properties of steel fiber and erosion wire [9,12,20]

Fiber Type	Diameter (mm)	Lenght (mm)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Unit weight (g/cm ³)
Steel fiber	0,16	13	2250	2100	7.181
Erosion wire	0,25	13	900	117	8.50

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Mechanical Properties

The compressive strength of RPC which were substituted steel and erosion wire fiber increased with increasing of the fiber ratio (Fig. 6). Compared to non-fibrous RPC; compressive strength has increased in the rate of 29.4% in RPC-SF2, 11.8% in RPC-EW in 2% fibre content (Table 3 and Fig. 6). This rate of increase has reached up to 52.9% in RPC-SF, 35.3% in RPC-EW with 4% fibre content. The effect of steel fibre on compressive strength in RPC is distinctly more than erosion wire. The main reason of this can be that tensile strength of erosion wire is lower than that of steel fibre. Steel fibres serve as strong aggregate in concrete [9]. Likewise, erosion wires which serve as aggregate cannot resist internal tension of concrete as well as steel fibres. While samples were broken, it was seen that steel fibres peel through RPC paste whereas erosion wires rupture.

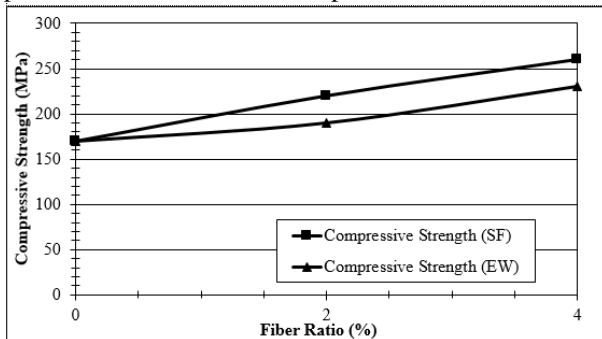


Figure 6. The effect of steel fibre and erosion wire on compressive strength

As the compressive strength increase so does the modulus of elasticity in RPC, such in normal concrete (Fig. 7). Increase of fibre amount in RPC causes increase of compressive strength as well as ductility. With the increase of fibre amount from 2% to 4%; ductility of fibre on concrete has increased and modulus of elasticity has decreased parallel to this. Modulus of elasticity of erosion wires is 117 GPa. Modulus of elasticity of steel fibre is 2100 GPa. That the modulus of elasticity of erosion wires is lower than steel fibre caused modulus of elasticity of RPC-EW samples to be low (Table 2). There has not been any significant change in poisson rates according to fibre content. Poisson rate varies between 0.20 – 0.22.

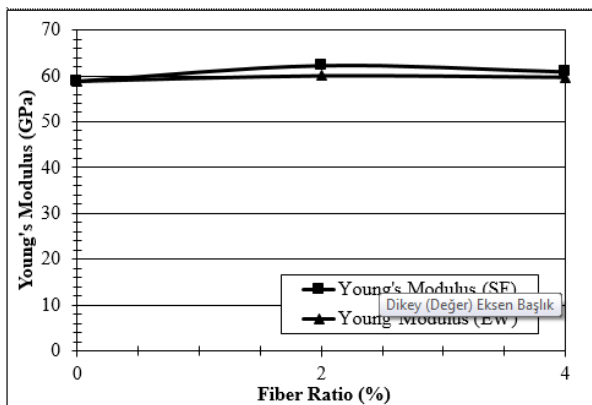


Figure 7. The effect of steel fibre and erosion wire on elasticity module

The specimens taken from the beam samples were examined also under the microscope. As can be seen in Fig. 8 and 9, during crack and crack mouth opening of test samples that waste erosion wires ruptured and steel fibres pulled-out through RPC paste. Rupture of erosion wires after the formation of crack caused sudden decrease of load-deflection curve after maximum load and rupture without doing too much deflection. Interface of waste erosion wire and steel fiber with RPC paste investigated (Fig. 10,11). Due to surface of waste erosion wire is rough that RPC paste with adherence is better than steel fiber.



Figure 8. Pulled-out steel fibers



Figure 9. Ruptured waste erosion wires

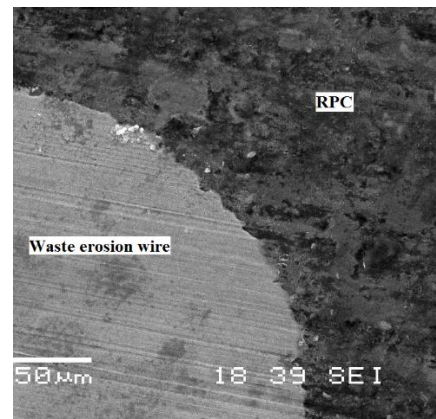


Figure 10. Interface of waste erosion wire with RPC paste

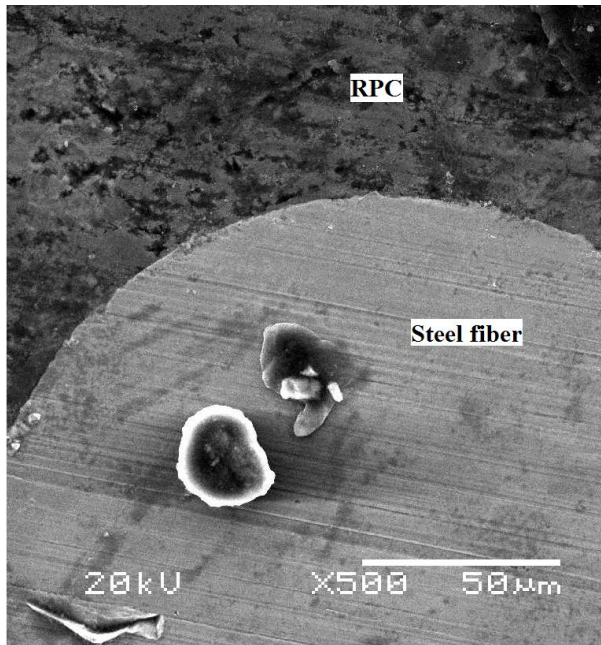


Figure 11. Interface of steel fiber with RPC paste.

Interface of waste erosion wire with RPC paste has a strong structure and very strong adhesive. Therefore waste erosion wires ruptured during the flexural test. On the other hand, strength of steel fibers is bigger than that of waste erosion wire. Thus, steel fibers pulled out in paste without rupture. Results of flexural test were given in Table 3 and Fig. 12.

When the results were observed; it was seen that crack, flexural strength and fracture toughness of waste erosion wires are distinctly lower than samples including steel fibre. That the tensile strength of erosion wires are lower than steel fibre and moreover its surface being rough after cutting process made it difficult to peel through RPC paste and caused rupture. As a result of such rupture, fracture toughness of erosion wire samples had quite low values. When control sample is compared with RPC-EW2 and RPC-EW4, flexural strength has increased 121% and 125%, fracture toughness has increased 368% and 586% respectively. In RPC-SF2 and RPC-SF4; flexural strength has increased 200% and 352%, fracture toughness has increase 574% and 788% respectively. When RPC-SF2 and RPC-EW2 samples are compared with RPC-SF4 and RPC-EW4 samples, flexural strength values are more in the rate of 40.7% and 83.6%; while this difference in fracture toughness is about 14 and 13 times more respectively due to low tensile strength of erosion wires.

3.2. Unit Cost

In Table 5, unit price of steel fibre and erosion wire content RPC were given in terms of TL (Turkish Liras). Unit cost is calculated considering market conditions. Micro steel fibre is the material which forms the greatest cost in RPC mixture. Unit price of RPC with 2% steel fibre content is 2 times more than non-fibrous RPC. Therefore, the cost of fibre comes up to the total cost of other materials in the mixture and this time, the usage of RPC makes a significant restrictive effect. Since waste

Table 3. Results of flexural strength and toughness

Sample Code	Crack Strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Total Deflection (mm)	Toughness (Nm)
Ctrl	8.96	8.96	1	1.27
RPC-SF2 (RPC-EW2)	21.95 (18.03)	26.81 (19.06)	10.97 (1.48)	85.64 (5.94)
RPC-SF4 (RPC-EW4)	35.84 (21.17)	40.50 (22.06)	10 (1.63)	112.75 (8.71)

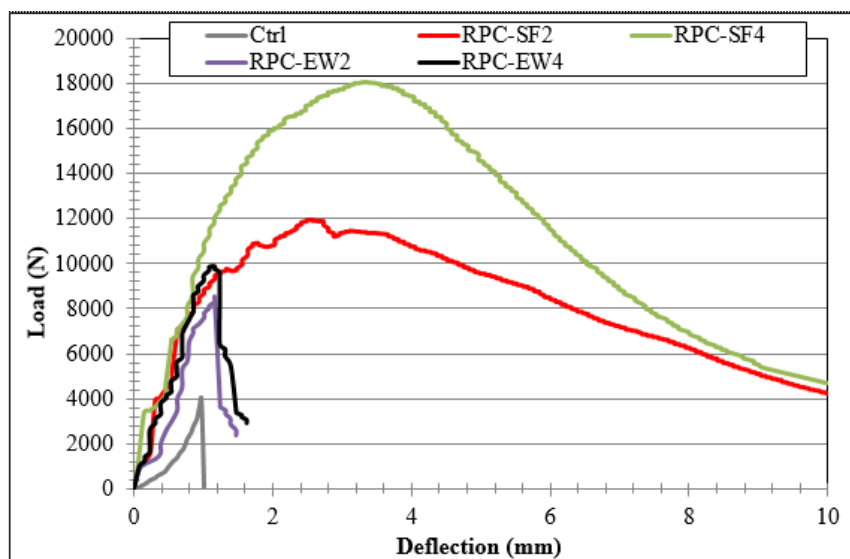


Figure 12. Load-deflection curve on the ratio of fiber

erosion wire is a waste material, it increases the cost of RPC with 2% wire content in the rate of 25%. In order to compare waste erosion wire with steel fibre economically unit strength costs were calculated and they were given in Table 4 and Figure 13-15. While unit strength costs of samples with steel fibre and erosion wire are close to each other, it was seen that waste erosion wire is more economic in unit costs of compressive strength (Fig. 13). It was seen that unit cost of fracture toughness of erosion wire is not highly economic compared to steel fibre (Fig. 15). As a result, although waste erosion wire is disadvantageous in terms of fracture toughness, it is economical in the sense of unit costs of flexural and compressive strengths (Fig. 13,14). Unit costs of flexural, compressive strengths and toughness were calculated using the ratio among strengths and unit cubic RPC cost.

Table 4. Unit cost of RPC with steel fibre and erosion wire content

Fiber Ratio (%)	RPC-SF Cost (TL/m ³)	RPC-EW Cost (TL/m ³)	RPC-SF Unit Cost			RPC-EW Unit Cost		
			Flexure Strength (TL/MPa)	Comp. Strength (TL/MPa)	Fracture Toughness (TL/Nm)	Flexure Strength (TL/MPa)	Comp. Strength (TL/MPa)	Fracture Toughness (TL/Nm)
Ctrl	559.06	559.06	62.39	3.29	440.20	62.39	3.29	440.20
2	1063.06	695.06	39.65	4.83	12.41	36.47	3.66	117.01
4	1563.56	831.06	38.61	6.01	13.87	37.67	3.61	95.41

4. CONCLUSIONS

Steel fibre has better values than erosion wire in terms of mechanical features. The biggest disadvantage of erosion wire against steel fibre is its low tensile strength. Rough surface of erosion wire causes false adherence with RPC paste. Due to inadequate adherence as a result of tensions during experiments, they cannot peel through and rupture. On the other hand, usage of waste wire enhances compressive and flexural mechanical features distinctively compared to non-fibrous RPC and is more economic than steel fibre in the sense of compressive strength cost. Although usage of waste erosion wire give lower values than steel fibre in the sense of flexural strength and fracture toughness, its unit cost of flexural strength is nearly the same as steel fibre. Waste erosion wire which is an industrial waste can be used as fibre in RPC without any additional processing. Usage of RPC which is obtained by erosion wire in construction elements for which compressive and flexural strengths are sufficient will be beneficial both for recycling and in the sense of cost.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Sakarya University Scientific Research Foundation (Project number: 2007-01-04-003. 2006-50-02-055. 2012-05-08-008). The authors would like to thank Sakarya University and Turkish Cement Manufacturers' Association (TCMB) due to its financial support for this study.

REFERENCES

- [1] Takeuchi. L., Jianxin. D. "Mechanical surface treatments of the (EDMed) ceramic composite for improved strength and reliability". *J. of the Eur. Ceram. Soc.*, 22: 545-550,(2002).
- [2] idea.metu.edu.tr/program/aiy (24.08.2011).
- [3] Shajan. K., Kamal. M., Shunmugam M.S.. "Data mining applied to wire – EDM process" *J. of Mater. Process. Technol.*, 142: 182-189, (2003).
- [4] Boyer. E.H. Gall. L.T.. "Nontraditional machining processes". Metals Handbook. Desk Edition. *American Society for Metals Park*. Ohio. (1992).
- [5] Çaydaş. U., Haşçalık. A.. "CNC tel erozyon tezgahlarında farklı malzemelerin işlenebilirliğinin araştırılması". *DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6: 201-214, (2004).
- [6] Aktaş. M., Okumuş. H.I.. "Doğrudan moment kontrollü asenkron motorun stator direncinin yapay sinir ağı ile kestirimi". *International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks*. July 02-04, 189-191, (2003).
- [7] Lok. Y.K. Lee. T.C.. "Processing of advanced ceramics using the wire-cut EDM process." *J. of Mater. Process. Technol.*, 63: 839-43, (1997).
- [8] Dugat. J., Roux. N., Bernier. G.. "Mechanical properties of reactive powder concretes". *Mater. Struct.*, 29: 233-40, (1996).
- [9] İpek. M., Yılmaz. K., Sümer. M., Sarıbıyık. M.. "Effect of pre-setting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase". *Constr. Build. Mater.*, 25: 61-68, (2011).
- [10] Richard. P., Cheyrezy. M.H.. "Composition of reactive powder concrete". *Cem. Concr. Res.*, 25: 1501-1511, (1995).
- [11] Yazıcı. H.. "The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures". *Build. Environ.*, 42: 2083-2089, (2007).
- [12] İpek. M., Yılmaz. K., Uysal. M.. "The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase". *Constr. Build. Mater.*, 26: 459-465, (2012).
- [13] Özek. C., Cebeli. C.. "Tel erozyon tezgahında Ç8620 dişli çeliğinin kesilme davranışlarının araştırılması". *DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5: 47-52, (2003).
- [14] Fengguo. C., Yansheng. M., Yuanfang. W., Jinjuan. F.A.. "Machining technique of superhard materials PCD and

- CBN using wire EDM". *Proc. Int. Symp. For Electromachining (ISEM-10)*, 359-363, (1992).
- [15] Kozak, J., Rajurkar, K.P., Wang, S.Z.. "Material removal in WEDM of PCD blanks". *ASME Winter Meeting. PED.* 64: 823-833, (1993).
- [16] Luo, Y.F., Chen, C.G., Tong, Z.F... "Investigation of silikon wafering by wire EDM". *J. Mat. Sci.*, 27: 5805-5810, (1992).
- [17] Tosun, N., Coğun, C., Tosun, G.. "A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on taguchi method". *J. of Mater. Process. Technol.*, 152: 316-322, (2004).
- [18] James, E.C., Robert, E.C.. "What happens in EDM. in: E.C. Jameson (Ed.), *Elektrical discharge machining tooling, methods and aplications*". *Society of Manufacturing Engineers*. Dearbern, Michigan. (1983).
- [19] Tosun, N., Coğun, C.. "An investigation on wire wear in WEDM". *J. of Mater. Process. Technol.*, 134: 273-278, (2003).
- [20] <http://www.matbase.com/material/non-ferrous-metals/wrought-copper/cuzn-37/properties> (24.08.2011).
- [21] TS 10513. "Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan". (1992).
- [22] TS 10514. "Beton-Çelik Tel Takviyeli-Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları". (1992).
- [23] JSCE Standard SF-4. "Method of test for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete". (1984).
- [24] TS 10515. "Çelik Tel Takviyeli Betonun Eğilme Mukavemeti Deney Metodu". (1992).
- [25] ASTM C 1018. "Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (Using beam with third-point loading)". (1989).

Mermer Ocaklarında Elmas Tel Kesme ve Zincirli Kollu Kesme Makinelerinin Birlikte Kullanımının İncelenmesi

Mustafa Yavuz ÇELİK^{1*}, Metin ERSOY¹, Liyaddin YEŞİLKAYA¹, Zehra KAYI²

¹Afyon Kocatepe Üniv. Afyon Meslek Yüksek Okulu, Doğal Yapıtaşları Teknolojisi Programı, Ali Çetinkaya Kampüsü, 03100, Afyonkarahisar

²Maden Mühendisi, Büyükkabaca Yolu Üzeri Kaldırım Mevkii, Senirkent, Isparta

(Geliş/Received : 03.05.2016 ; Kabul/Accepted : 08.07.2016)

ÖZ

Mermer ocaklarında, elmas tel kesme ve zincirli kollu kesme makineleri, blok üretiminde değişik yöntemlerle kullanılmaktadır. İnceleme yapılan ocakta temel olarak üç farklı üretim şekli uygulanmaktadır. Birincisi Yöntem A olarak adlandırılmış olup standart elmas tel kesme yöntemidir. Bu yöntemde alt, yan ve arka kesimlerin tamamı birbirine dik açılmış deliklerden geçirilen elmas tel yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Yöntem B olarak adlandırılan çalışma şeklinde ise arka kesim 7.40 m kol boyuna sahip zincirli kollu kesme makinesi ile kesilirken alt ve yan kesimler elmas teller yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Yöntem C yönteminde ise; alt kesim 3.40 m kol boyuna sahip zincirli kollu kesici ile yapılırken yan ve arka kesimler elmas teller yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Ocakta uygulanan her üç üretim yöntemi, yaklaşık 4 ay boyunca anlık veriler alınarak değerlendirilmiş olup bu süre zarfında 3848.68 m³ lük bir hacmin kazanılması için toplam 159.60 m delme, 3357.55 m² kesme işi yapılmıştır. Operasyonlar sırasında makinelerin kullanım şekli, delme/kesme hızları, sarf malzemesi tüketimleri, harcanan iş gücü gibi veriler takip edilmiştir. Sonuç olarak en hızlı yöntemin B yöntemi olduğu, en hızlı kesme makinesinin 7.40 m kol boyuna sahip zincirli kollu kesici olduğu, verimi artırmak için bir defada kesilen alanın en büyük olması gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zincirli Kollu Kesici, Elmas Tel Kesme, Bej Mermer, Blok Kesim Verimi.

Investigation of Using Diamond Wire Cutting and Chain Saw Machines Combination in Quarries

ABSTRACT

In marble quarries, diamond wire cutting and chain saw machines are used in the process of creating blocks in several ways. Three different cutting techniques were used in the studied quarry. The first one is called Method A which is the standard diamond wire cutting method. In this method; bottom, side and rear cuttings are carried out by diamond wires passing through drilled holes perpendicular to each other. Secondly, the rear is cut with chain saw machine with the length of 7.40m while the bottom and side cuttings are achieved through diamond wires. This is called Method B. The third method, Method C, operates by cutting the bottom with chain saw machine with the length of 3.40m. The side and rear are cut with diamond wire in this method. All three methods operated in the quarry are evaluated with the data taken for approximately 4 months. During this period, 159.60 m drilling and 3357.55 m² cutting have been done in order to achieve the volume increase of 3848.68 m³. During the operations; the usage of machines, drilling / cutting speed, supplies consumption and labour force are observed and this data is evaluated in terms of production method and type of machinery. As a result of this research, the fastest method was discovered as Method B while the fastest cutting machine was determined as chain saw machine with the length of 7.40m. Moreover; it is found that in order to increase efficiency, areas that are cut must be as large as it can get.

Keywords: Chain Saw Machines, Beige Marble, Block Cutting Performance.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde mermer ve doğaltaşların kullanım alanlarının artmasına paralel olarak mermere olan talep artmış ve mermer sektörü madencilik faaliyetleri içinde önemli bir yere sahip olmuştur. Mermer ocak işletmeciliğinde amaç, mermer fabrikaları ve piyasanın istediği boyutlarda kırksız ve çatlaksız blok çıkartmaktır. Buna paralel olarak insan gücünün yerini

makine ve pratik usuller almakta ve pahalı olan ağır işçilik yerine bilimsel sistemler getirilmektedir. Son yıllarda bu amaca hizmet edecek yeni teknolojik gelişmeler ortaya çıkmaya başlamıştır. Dünya, yeni usuller ve yeni makineler icat etmek sureti ile mermer cinsine göre blok mermer üretimini, ihtiyaca göre düzenlemektedir. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak modern ocak üretim yöntemi ve ekipmanlarının kullanılmaya başlanmasıyla blok üretim miktarlarında da önemli artışlar meydana gelmiştir. Bunun bir sonucu olarak da Türkiye, dünyada önemli mermer üreticisi ülkeler arasındaki yerini almıştır. İstanbul Maden

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: mycelik@aku.edu.tr.

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 459-473

İhracatçıları Birliği verilerine göre 1996 yılında 319.646 ton blok mermer ve işlenmiş mermer ihraç ederek 93.9 milyon \$ ihraç geliri elde eden Türkiye, 2003 yılında 2.113.303 ton ihracat yaparak 431.1 milyon \$ ihracat geliri elde etmiştir. 2015 yılında ise bu rakamlar mermer ve traverten blok ihracatında 3.945.820 ton ve 796.992.134 milyon \$ seviyelerine ulaşmıştır [1].

Günümüzde açık mermer ocaklarında en çok uygulanan yöntemler, elmas tel kesme ve kollu kesicilerle kesme yöntemleridir. Elmas tel kesme yönteminde kullanılan makine, raylar üzerinde hareket eden bir güç ünitesi ve buna bağlı yatay, düşey, eğimli konumlandırılabilen volandan ibarettir. Kollu kesme makinesi ise yeraltı maden ocaklarında potkabaç makinesi olarak kullanılan makinelerin bir versiyonu olup kesme prensibine göre zincirli ya da kayışlı (bantlı) kollu kesme makinesi olarak tanımlanır. Bu makine de raylar üzerinde hareket eden bir güç ünitesi ve buna bağlı kesici koldan ibarettir. Kesici kol yatayda 180° ve düşeyde 360° konumlandırılabilir [2].

Kollu kesiciler raylar, güç ünitesi, kol ve kesiciler olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır. Makine ray üzerinde hareket ederken, kol üzerindeki kesiciler de döner ve mermer yüzeyini kesmektedir. Kollu kesicilerde kol üzerinde dönen sonsuz zincir ve onun üzerinde farklı açılarla yerleştirilmiş olan sertleştirilmiş ısıya dayanıklı metal karbür bulunmaktadır ve esas kesme işi metal karbür tarafından yapılmaktadır. Kesim sırasında zincirin kolay dönmesi için mekanizmaya bir miktar yağ ve kesicilerin soğuması için su verilir. Kesme yarığında makinenin önüne biriken şlam, kürekle işçiler tarafından atılarak uzaklaştırılmaktadır. Kollu kesiciler ile kesme yönteminde alt kesim için, basamak önünde aynaya paralel raylar döşenmekte ve yere sabitlenmektedir. Kollu kesme makinesi ray üzerine oturtulmakta, kesici kol yatay konuma getirilmekte ve makine çalıştırılmaktadır. Kol üzerindeki kayış ya da zincirin dönmesi ve kolun kütleye batırılmasıyla kesime başlanır. Kayacın sertliğine ve ortamın nemliliğine göre sulu ya da kuru kesim yapılmaktadır. Makinenin ray boyunca hareket ettirilmesiyle kesim gerçekleşir. Düşey kesimler ise makine ve ray grubu basamak üzerine taşınarak kesici kolun düşey konumlandırılması şeklinde yapılmaktadır [2].

Blok üretiminde kullanılan elmas tel kesme yöntemi hakkında, literatürde çok sayıda çalışmaya rastlanmaktadır. Bu çalışmalar mermer, granit, andezit, kireçtaşı, traverten gibi değişik doğaltaşlar hakkındadır. Mikaeil vd. [3], İran'da bulunan 14 farklı karbonat kökenli mermerin, elmas tel testere ile kesme performanslarının tahmin edilmesini istatistiksel analiz yöntemiyle incelemişlerdir. Jain vd. [4], yumuşak, orta sert ve sert dolomitik mermerlerde, elmas tel kesme makinelerinin kesim alanı boyutunun, kesme performansı üzerinde etkilerini araştırmışlardır. Ataei vd. [5], 14 farklı karbonat kökenli mermerin, elmas tel testere ile kesme performanslarının tek eksenli basınç dayanımı, Brazilian dayanımı, Schmidt çekici ve Los Angeles aşınma dayanımı ile ilişkisini regresyon analiz yöntemi

ile incelemişlerdir. Jain ve Rathore [6], dolomitik mermerlerde elmas tel kesme makinelerinin kesim performanslarını yapay sinir ağları yardımıyla değerlendirmişlerdir. Özçelik ve Yılmazkaya [7], elmas tel kesme makinelerinin travertenlerde tabakalanma düzlemlerinin kesme verimliliğine etkisini araştırmışlar ve aynı zamanda kesme makinesinin kesme verimliliğini araştırırken, birim hızı ve spesifik enerjiyi de dikkate almışlardır. Biasco [8], sert taş ocaklarında elmas tel kesme çalışmalarında, plastik kaplı elmas teli güvenlik açısından incelemiş ve güvenlik standartlarıyla ilgili yapılması gerekenler olduğunu belirtmiştir. Andrissi vd. [9], granit ocaklarında elmas tel kesme verimlerinin iyileştirilmesi hakkında inceleme yapmışlardır. Demirdağ ve Gündüz [10], Burdur bej mermerlerinde elmas tel kesme ünitelerinin kesim performanslarının belirlenmesine yönelik, pratik olarak kullanılabilir olacak yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Özçelik ve Kulaksız [11], elmas tel kesme yönteminde kesme açıları ve boncuk aşınması arasındaki ilişkiyi deneysel olarak araştırmışlardır. Özçelik ve Bayram [12], Elmas tel kesme işleminde farklı mineralojik bileşimli mermerlerde kesme işlemi yaparak, meydana gelen boncuk aşınmalarını optik yöntemlerle incelemişlerdir. Özçelik [13], elmas tel yönteminde mermerlerin mineralojik ve petrografik özelliklerinin kesme işlemine etkisini araştırmışlardır. Özçelik [14], mermer sektöründe elmas tel kesme makinelerinin optimum çalışma koşullarını elde etmek için deneysel çalışmalar yapmıştır.

Literatürde blok elde etmek amacıyla kullanılan zincirli kollu kesme makineleri hakkında yapılmış çalışmalara daha az rastlanmaktadır. Bu çalışmalarda zincirli kollu kesme makinelerinin çalışma özelliklerinin yanı sıra zincir ve soket tasarımları da incelenmiştir. Zincirli kollu kesme makineleri hakkında yapılan bazı çalışmalar şu şekilde özetlenebilir: Dagrain vd. [15], zincirli kollu kesme makinelerinde zincir tasarımı ve testere performans ile operasyonel parametreler arasındaki ilişkiyi analiz etmişlerdir. Tumac vd. [16], farklı doğal taş örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini, Schmidt ve Shore sertlik değerlerini tanımlayarak, bunları zincirli kollu kesme makinelerinin performansını tahmin etmek için kullanmışlardır. Avunduk vd. [17], zincirli kollu kesme makinelerinin testere zincirinde, soketlerin tek ve çift sarmal (kaydırma) desenlerin performanslarını incelemişlerdir. Tumac [18], zincirli kollu kesme makinelerinde kesilen doğal taş örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri ile Shore sertlik değerlerinin korelasyonu yapılarak, doğrusal kesme parametrelerini (normal kuvvet, kesme kuvveti ve özgül enerji) tahmin etmeye çalışmışlardır. Hekimoğlu [19], zincirli kollu kesme makinelerinde kullanılan zincirin ve soket dizilimindeki değişikliklerin kesme performans oranına etkisini araştırmıştır. Korman vd. [20], zincirli kollu kesicilerin kesme işleminin laboratuvar ortamında simülasyonunu yapmışlardır. Çopur [21], değişik doğal taşların zincirli kollu kesme makinelerinde kesilebilirliğini belirlemek amacıyla yaptıkları deneysel

çalışmalarda, değişik açılarda ve kesme uç açıklıklarında ve farklı derinliklerdeki soket performanslarını incelemişlerdir. Mancini vd, [22], zincirli kesme makinelerinin verimlerini etkileyen makine, kayaç ve işletme parametrelerini inceleyerek, makinenin çalışmasını jeostatistiksel olarak simüle etmişlerdir. Modelden elde edilen çıktılar, arazide ölçülen makine verimleri ile kıyaslamışlardır. Mancini vd, [23], zincirli kesme makineleri teknolojisinin uygulamaları ve gelişimi, makine kazı hızları, uç aşınmaları, kazı hızı ve uç aşınmalarını etkileyen kaya parametreleri konularında araziden toplanan verilere dayanarak bir inceleme yapmışlardır. Önenç ve Demirocak [24], tabaka duruşlarına göre blok kesim yöntemlerini inceleyerek, tabaka kalınlıkları fazla olmayan, sertlikleri 3-4 Mohs arasında bulunan, yaygın olarak kullanılan kayaçların kesimlerinde zincirli kesiciyi kullanmanın iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Çopur vd [25], Denizli'de bir traverten ocağında blokların düşey ve arka kesimlerinin elmas tel kesme makinesi ile yatay dip kesiminin ise zincirli kollu kesme makinesi ile yapıldığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, zincirli kollu kesme makinesinin verimini bir yıllık periyotta değerlendirerek, blok üretim kayıplarının en aza indirildiği bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır. Demirel [26], mermer ocaklarında kollu zincirli kesme makinesi ile elmas tel kesme makinesini iş sağlığı ve güvenliği, blok verimi, makine montaj ve demontajı, üretim hızı bakımından karşılaştırmıştır. Yeşilkaya vd, [27], Denizli havzasında Denizli Çimento Fabrikası çevresi -Kaklık dolaylarındaki- traverten ocaklarında, blok üretiminde kullanılan zincirli kollu kesme makinelerinin kesme verimleri incelemişler, metrekare bazında kesme maliyetini hesaplamışlardır. Çopur, vd, [28], 30x30x30 cm boyutlu blokları kullanarak, zincirli kollu kesme makinelerinin laboratuvar ortamında kesme verimlerini incelemişlerdir.

Zincirli kollu kesme makineleri düşük veya orta dereceli aşındırıcı olan mermer ve traverten gibi yumuşak ve orta sert doğal taşların, hem açık ocaklarda hem de yeraltı ocaklarında blok olarak çıkarılmasında ve sayalama amacı ile düşey veya yatay kesme işlemlerinde kullanılabilirlerdir. Elmas boncuklu tel kesme makineleri ile birlikte kullanıldıklarında (bu yaygın kullanım şeklidir) ocak verimini artırırlar. Bir traverten açık ocağında kullanılan elmas boncuklu tel kesme makinelerinin yanına sadece bir adet zincirli kesme makinesi ilave edilerek, ocağın genel veriminin %20 arttığı görülmüştür [25].

Mermer blok üretiminde elmas tel kesme makineleri çok yaygın olarak kullanılırken zincirli kollu kesici makineleri henüz tam anlamıyla yaygınlaşmamıştır. Dolayısıyla gerek bireysel gerekse kombine olarak kullanılan zincirli kollu kesici makinelerinin verimleri ve kesme özellikleri hakkında literatürde çok fazla veriye rastlanmamaktadır. Kullanımı henüz elmas tel kesme makineleri kadar yaygınlaşmamış olan zincirli kollu kesici makinelerinin mermer blok üretiminde kullanım verimlerinin belirlenmesi, bu tür makinelerin kullanım

olanağı bakımından mermer işletmecilerine bir ışık tutacaktır.

Bu çalışmada Isparta-Senirkent civarındaki bir kireçtaşı (bej mermer) ocağında, blok üretiminde elmas tel kesme ile kombine olarak kullanılan zincirli kollu kesme makinelerinin çalışma hızları, uygulama koşulları, malzeme gereksinimleri ve kesme performansları incelenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

2.1. Malzeme (Material)

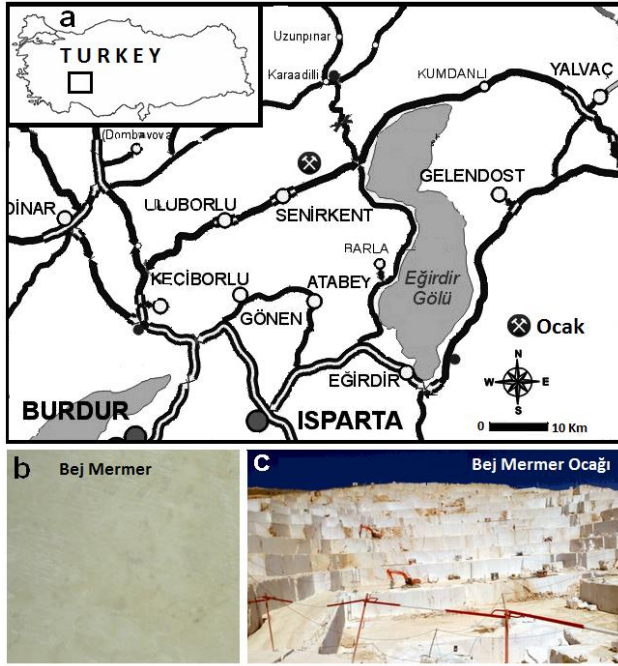
Çalışma alanı, Isparta il sınırları içerisinde yer alıp Senirkent ilçesine yaklaşık 8 km mesafede, Senirkent-Yalvaç karayolunun kuzeyindedir. Çalışmanın yapıldığı ocak, 12 kademededen oluşmakta ve bej mermer olarak nitelendirilen kireçtaşı türünde blok mermer üretimi yapılmaktadır. Üretimi yapılan bej mermer, açık ve koyu bej renklerinin homojen bir renk karışımına sahiptir. Bu renklerin yanı sıra açık kırmızı ve açık yeşil renkli stilolitleri de içermektedir. Ocak lokasyonu, bej mermerin yüzey görünümü ve ocağın genel görünümü Şekil 1'de verilmiştir.

Mermer blok kesimlerinde, deliklerin delinmesi için Kaptanlar marka (rock) delme makinesi, kesim işleminin yapılmasında ise Kaptanlar marka elmas tel kesme makineleri ve Fantini marka zincirli kollu kesme makineleri kullanılmıştır (Şekil 2).

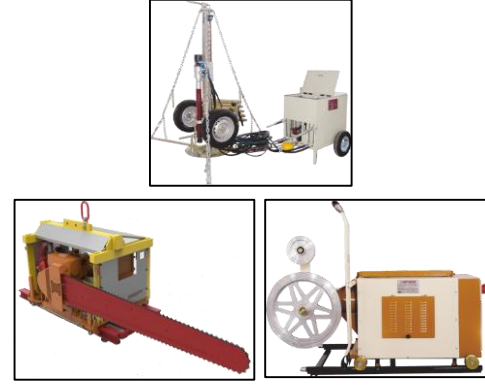
Ocakta kullanılan delme makinesi, 7,5 kw gücünde elektrikli bir motora sahip olup yukarı-aşağı hareketleri hidrolik kumanda sistemleri aracılığıyla yapılmaktadır. Makine, 6 bar basınçta 2,1 m³/dk hava tüketmekte ve dakikada 1500 devirle kayaç cinsine göre 0,2 m/dk hıza kadar delme yapabilmektedir. Makinenin efektif kapasitesi, 1 m boyundaki tijlerle 15 m olup en çok 30 m derinliğe kadar delme yapabilmektedir [29].

Ocakta 60 ve 80 cm kasnak çaplarına sahip iki çeşit elmas tel kesme makinesi kullanılmakta olup aynaya dik kesimlerde 60 cm kasnak çapına sahip olan aynaya paralel arka ve yatay alt kesimlerde 80 cm kasnak çapına sahip olan versiyonlar tercih edilmektedir. Elmas tel kesme makinelerine ait bazı teknik veriler Çizelge 1'de verilmiştir.

Ocakta kullanılan, zincirli kollu kesme makinelerinin üçü 7,40 m ve biri 3.40 m kol uzunluğuna sahiptir. Tüm zincirli kollu kesiciler ocak içerisinde elmas tel kesme makineleri ile birlikte karma olarak kullanılmaktadır. 7.40 m lik zincirli kollu kesici ile düşey kesimler yapılmakta, 3.40 m lik zincirli kollu kesici ile yatay-alt kesimler yapılmaktadır. Makinelerin bakımları yaklaşık 40 metrede veya gerektiğinde her kesim öncesi yapılmaktadır. Bakımlar sırasında rutin kontrol olarak, talaş temizliği, makine genel temizliği, zincir pim ve bakla bakımı, pabuç ve civata bakımı, soket çevirimi ve değişimi, ray temizliği gibi işlemler yapılmaktadır.



Şekil 1. Bej mermer ocağı lokasyon haritası (a), üretilen mermerin (b) ve ocağın görünümü (c). (The location map of Senirkent limestone quarry(a) (Beige marble), view of marbles (b) and quarry (c))



Şekil 2. Delme makinesi (Kaptanlar), Elmas tel kesme makinesi (Kaptanlar) ve Zincirli kollar kesme makinesi (Fantini). (Drilling machine (Kaptanlar), diamond wire cutting machine (Kaptanlar) and chain saw machine (Fantini).)

Zincirli kollar kesicilere ait, motor gücü, ağırlık, kol uzunluğu, kesme genişliği, maksimum kesim genişliği, malzeme tedarik firması, ray uzunluğu ve adedi gibi başlıca özellikler ve bu özelliklerin yanı sıra ölçümler sırasında tespit edilen gres kullanımı, çalışan kişi sayısı, pabuç ve soket sayısı, rayda yürüyüş ve kesim hızları, dalış süreleri, pabuç ve ek sayıları, soket sayıları gibi değerler Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 1. Elmas tel kesme makinesinin özellikleri* (Specifications of the diamond wire cutting machine).

Üretici Markası	Kaptanlar (ETK ⁸⁰)	Kaptanlar (ETK ⁶⁰)
Motor gücü	55 kw	45 kw
Ağırlığı	1800 kg	1415 kg
Motor devri	1500 dv/dk	1500 dv/dk
Kesim Tipi	Elmas tel	Elmas tel
Çalışma açısı	360° Her Pozisyonda	360° Her Pozisyonda
Maksimum kesme hızı	15 m ² /sa	8 m ² /sa
Kapasite (kesme alanı)	100-150 m ²	80-120 m ²
Su tüketimi	500 lt/sa	500 lt/sa
Çalışan Kişi Sayısı	2	2
Ray Uzunluğu ve Adedi	3x2=6 m	3x2=6 m

* Üretici firma verileri [29]

Çizelge 2. Zincirli kollar kesme makinesi özellikleri* (Specifications of the chain saw machine).

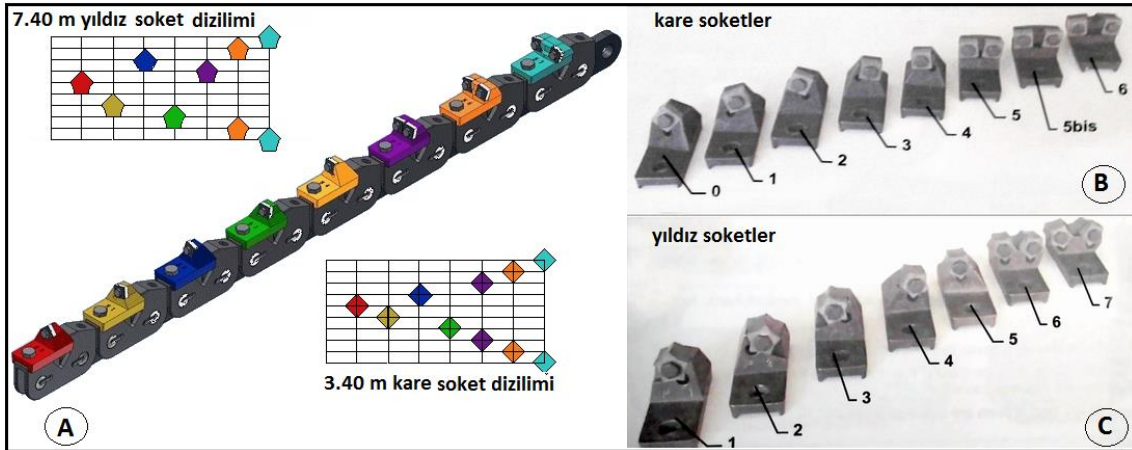
Üretici Markası	Fantini (ZKK ⁷⁴⁰)	Fantini (ZKK ³⁴⁰)
Motor gücü	61 KW	50 KW
Ağırlığı	9600 kg	5700 kg
Kol Uzunluğu	8 m	3.40 m
Kesme Genişliği	3.8 mm	3.8 mm
Efektif Kesme Derinliği	7.20 m	3.20 m
Kesim Tipi	Dikey	Yatay
Pabuç (Zincir Eki) Sayısı	135	77
Soket Sayısı	180	99
Gres Yağı Tüketimi	1.4 lt/sa	1 lt/sa
Ortalama 70° Dalış Süresi	145 dk	100 dk
Ray İlerleme hızı	0-15 cm/dk	0-13 cm/dk
Zincir dönüş hızı	0-0.7 cm/sn	0-0.7 cm/sn
Çalışan Kişi Sayısı	1	1
Ray Uzunluğu ve Adedi	4x4 = 16 m	3x3 = 9 m

Makinelerde iki farklı pabuç ve soket türü kullanılmaktadır. Bunlar, geometrik şekillerine göre kare ve yıldız olarak birbirinden ayrılır. Kare soketler 8 köşeli olup bir köşe yıprandığı zaman çevrilerek maksimum 8 defa kullanılabilir. Yıldız soketin avantajı ise 10 köşeye sahip olmasıdır bu sayede kareye göre daha fazla kullanılabilir. Ancak aşırı yıpranmış soketlerin arka köşeleri kullanılmadığından kullanım sayısı yarıya düşebilmekte ya da tek kullanım sonunda yenisiyle değiştirilmektedir.

Zincirli kollu kesicilerde pabuçlar zincir üzerinde belli bir dizilime sahiptir. Kare soket kullanılan pabuçlar ve yıldız soket kullanılan pabuçlar ayrı bir takım oluşturarak dizilmektedir. Bej mermer ocağında zincirli kollu kesicilerde kare sokete sahip pabuçlar 0 numara ile başlayarak 1, 2, 3, 4, 5, 5 bis ve 6 numara olarak dizilmektedir. Yıldız sokete sahip pabuçlar ise 1 numara ile başlayarak 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 numara şeklinde dizilmektedir (Şekil 3). Bej mermer ocağında, Zincirli kollu kesicilerde bir boyda, kare ve yıldız soket dizilim paternleri ile kullanılan kare ve yıldız pabuç ve soketlerin görünümü Şekil 3'de, yeni ve yıpranmış soketlerin görünümü ise Şekil 4'de verilmiştir.

Zincirli kollu kesicilerde, üreticisine bağlı olarak farklı kesme düzenleri bulunmaktadır. Aynı kesme düzenine sahip olan kesme setleri, arka arkaya gelerek zincirin tamamını oluşturur. Bir kesme seti genellikle 8-10 pabuç/bakla içerir. Genellikle setteki son 2 veya 3 pabuç üzerinde 2'şer ve diğerlerinde 1'er adet keski (soket) bulunur. Bu keski köşe kesme yaptıkları için daha zor koşullarda kazı yaparlar ve aşınmaları diğer keskilere göre daha fazladır. Benzer şekilde, setteki ilk keski de yardımsız kazı yaptığı için zor koşullarda çalışır. Bir setteki keski, keskilere gelen kuvvetleri dengelemek ve keski ve kol plakasının dengeli aşınmasını sağlamak amacıyla genellikle simetrik olarak yerleştirilir (Şekil 5) [17, 31].

Bir setteki keski kesme hareketi kendisini takip eden keski setleri tarafından tekrarlanır. Her bir keskinin açılma konumu (yanal açısı) set üzerindeki konumuna göre değişiklik gösterir. Yanal açılar genellikle 45° ile -5° arasında değişir ve bu açı en öndeki keski maksimumdan başlar ve arkadaki keskilere ve yanlara doğru azalır. Optimum kesme koşulları için tasarlanılmamış kesme düzenlerinde kazı hızları beklenenden düşük olmakta keski tüketimleri ise oldukça



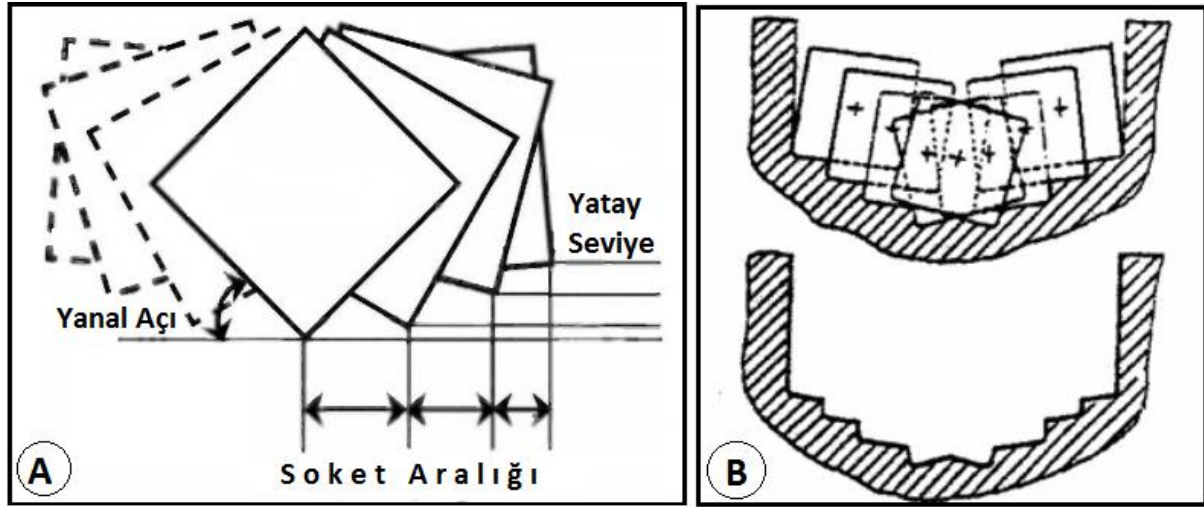
Şekil 3. Zincirli kollu kesicilerde bir boyda, kare ve yıldız soket dizilim paternleri (A), kullanılan kare (B) ve yıldız (C) pabuç ve soketlerin görünümü. (An example of square (B) and star (C) tool layout of a sequence in single scroll cutting pattern (A)).



Şekil 4. Zincirli kollu kesici soketlerinin kırılma şekilleri, eski ve yeni soketlerin görünümü. (Breaking patterns of the chain saw machine's sockets and some view of new and used sockets).

yüksek olmaktadır. Bu nedenle, karmaşık bir problem olan kesme düzeni tasarımları kazı mekaniği bilimi çerçevesinde çözümlenmelidir [17, 31].

aynaya paralel dikey ve/veya yatay alt kesim zincirli kolları kesici makineleri ile kesilirken aynaya dik yönde dikey kesimler elmas tel kesme makineleri ile



Şekil 5. Kesme profilini oluşturan parametreler (A) ve örnek bir kesme profili (B) [31]. (Cutting profile parameters (A) and an example cutting profile (B))

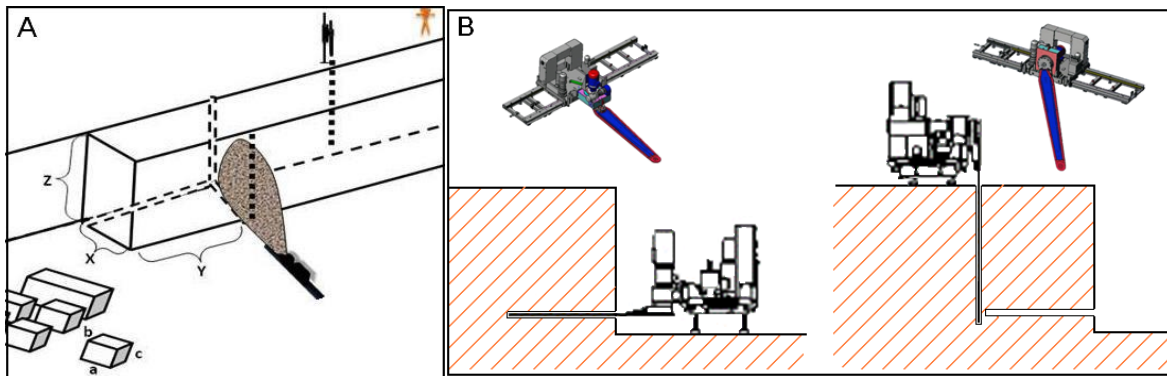
2.2. Yöntem (Method)

Bej mermerlerin petrografik ve mineralojik özellikleri, hazırlanan ince kesitler üzerinde, Nikon E200POL marka polarizan mikroskop kullanılarak belirlenmiştir. Kimyasal analizler ise, Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümü Doğaltaş analiz Laboratuvarı'nda RİGAKU marka XRF cihazında yapılmıştır.

Mermer ocak işletmeciliğinde 1980'li yıllardan beri elmas tel kesme makineleri başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Günümüz traverten ve kireçtaşı (bej mermer) ocaklarında da çoğunlukla elmas tel kesme makineleri kullanılmakla beraber daha yeni bir teknoloji olan zincirli kolları kesici makinelerinin de kullanılması gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Mermer ocaklarında zincirli kolları kesici makineleri daha çok elmas tel kesme makineleri ile kombine olarak çalıştırılmaktadır. Örneğin

kesilmektedir. Bu tarz çalışma şeklinin en önemli avantajı, elmas tel kesme yönteminde yapılması gereken üç adet delme işlemini bire indirmesidir. Böylece iki adet delme işi ortadan kaldırılarak hem zaman hem de delme maliyetinden tasarruf edilmektedir.

Zincirli kolları kesme makinesi odaklı üretim yönteminde, birbirine paralel ve birbirini kesen düşey kesme düzlemleri oluşturulur. Alt kesim ise yine zincirli kolları kesme makinesi ile kesilerek kütle serbestleştirilir. Bloğun ana kütlede ayrılması iş makineleriyle yapılır. Bu şekil çalışmada düşey kesimler kol boyu ile sınırlı olduğundan devrilme işlemi yapılmayabilir, dolayısıyla bloğun çatlaması sonucu ortaya çıkan üretim kayıpları daha az gerçekleşir. Çalışma, elmas tel kesme yöntemindeki delme işlemlerine gerek duyulmadığı için daha seridir. Söz konusu makinelerin kesme pozisyonları Şekil 6'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Elmas telle kesme makinesinin düşey kesim pozisyonu (A), Zincirli kolları kesicinin yatay ve düşey kesim pozisyonları (B) [27] (Vertical running position of diamond wire cutting machine (A), Vertical and horizontal running position of chain saw machine)

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ (EXPERIMENTAL STUDIES AND ASSEMET OF FINDINGS)

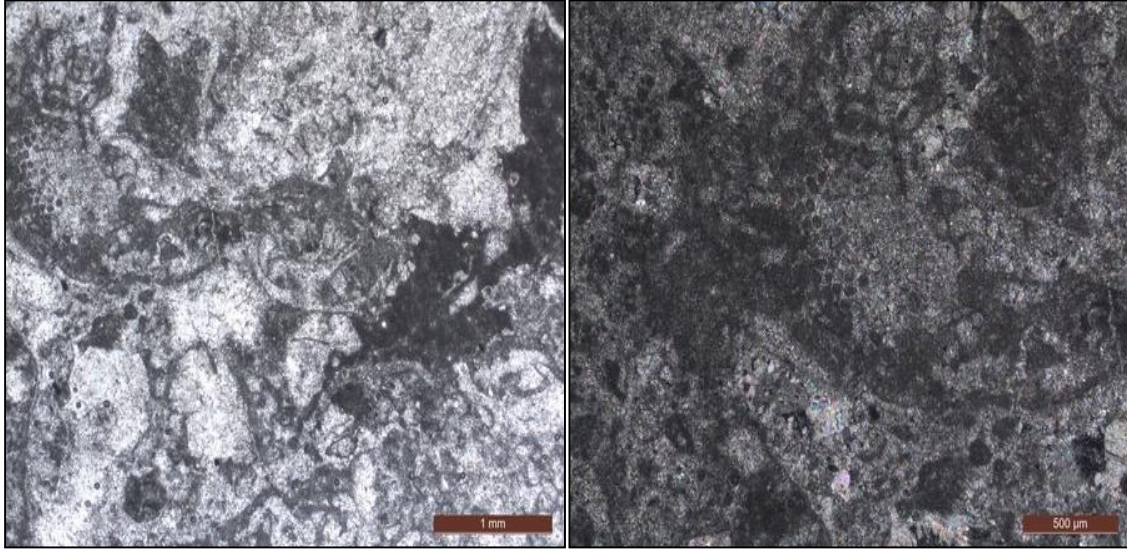
3.1. Mineralojik ve Petrografik Analizle

(Mineralogical and Petrographic Analysis)

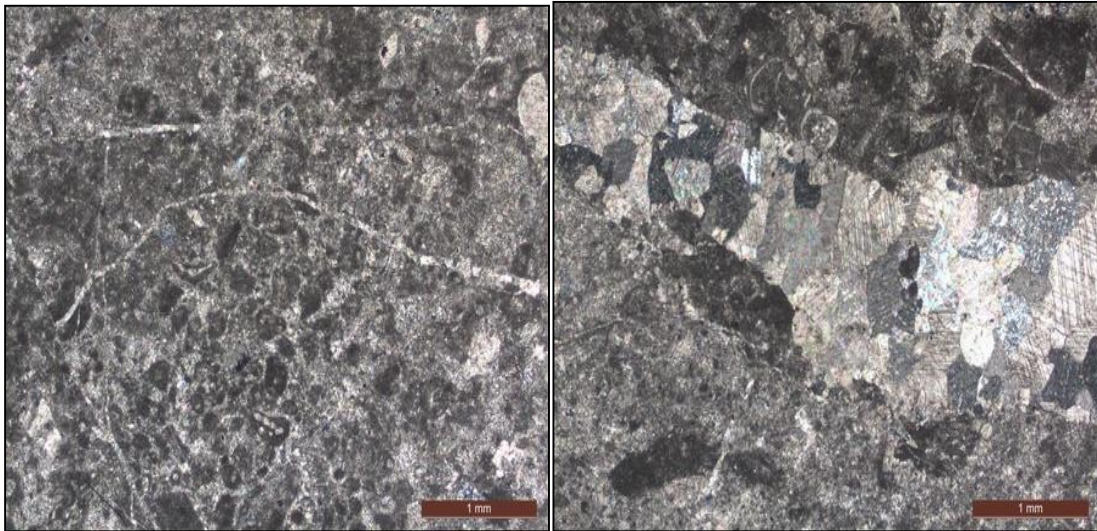
Doğal taşların gerek blok gerekse levha şeklinde kesilmesinde önemli olan parametreler, kayacın matriks yapısı ve sertlik değerleridir. Sertlik değeri kayacın mineral bileşimine bağlı olup genellikle kalsitten oluşan doğal taşlarda 3-3.5 civarındadır. Kuvars ve silikat minerallerinin bileşime girmesi durumunda sertlik değeri artmaya başlar. Genellikle bir kayacın sertlik değeri arttıkça, kayacın basınç dayanımı da artmaktadır. Bu durum kayacın kesilebilirliğini güçleştirmektedir.

Mineralojik ve petrografik özelliklerinin makine performansına etkisinin olup olmadığının belirlenmesi

amacıyla çalışma alanından alınan numuneler üzerinde mineralojik ve petrografik analizler yapılmıştır. Bej mermerinin mikroskopik inceleme sonucunda ana mineralinin kalsit olduğu görülmüştür. Şekil 7'de de görüldüğü gibi kriptokristalin kalsit kristalleri içerisinde sparitleşmiş mikrofossil kavkı izleri, kriptokristalin kalsitten oluşmuş pellet ve intraklast içermektedir. Çatlak ve boşluklarda mikro ve mesokristalin kalsit kristalleri izlenmiştir. Şekil 8'de mikro çatlaklar içinde kalsit kristalleri görülmekte ve mikrofossil kavkuları bileşende yer almaktadır. Kalsitin, basınç sonucu gelişmiş ikiz düzlemleri de izlenmektedir. Çalışma alanındaki bej mermerlerin, gerek çatlak dolgularında gerekse bileşiminde, kuvars ve silikat minerallerine rastlanmaması ve esas mineralin kalsit olmasından dolayı kesme performansında herhangi bir olumsuz etkinin olmadığı söylenebilir.



Şekil 7. Bej mermerin ince kesit görüntüsü, kalsit kristalleri içerisinde sparitleşmiş mikrofossil kavkı izleri. (Thin section of Beige marble, sparitic micro fossil shells indications in calcite crystals)



Şekil 8. Bej mermerlerde mikro çatlakların ve sparitik kalsit kristallerinin görünümü. (View of micro cracks and sparitic calcite crystals in Beige marbles)

3.2. Kimyasal Analizler (Chemical Analysis)

Bej mermerinin kimyasal özelliklerini belirleyebilmek için yapılan deneylerin sonuçları Çizelge.3'de verilmiştir. Çizelge 3 de görüldüğü gibi CaO bileşiği haricinde diğer tüm bileşiklerin oranı %1'in altında olduğundan bej mermerinin saf kireçtaşı olduğu söylenebilir. Aynı zamanda Fe₂O₃ değerinin %0.03 olması, bej mermerinin renginin koyu olmadığı ve atmosfer şartlarında ise paslanmanın en az düzeyde olacağı ve SiO₂ değerinin de %0.18 olması nedeniyle; kesiminde zorluk çıkmayacağı ve kolay kesileceği düşünülebilir. MgO miktarının %0.25 olması dolomit mineralinin ince kesitlerde görülmemesi ile de örtüşmektedir.

Çizelge 3. Bej mermerinin kimyasal analiz sonuçları. (Results of chemical analysis of Beige marble)

Bileşim	%
SiO ₂	0.18
Al ₂ O ₃	0.06
Fe ₂ O ₃	0.03
CaO	56.39
MgO	0.25
Na ₂ O	0.01
SO ₃	0.02
P ₂ O ₅	0.01
K ₂ O	0.01
A.Z.	43.01

3.3. Ocakta Uygulanan Kesim Yöntemleri (Cutting Methods in the Quarry)

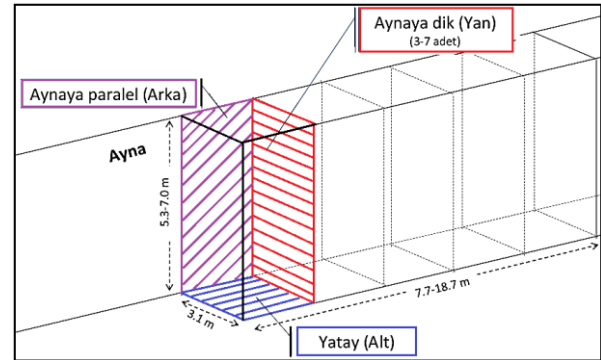
Çalışma alanında üretim, kesimi planlanan kütle için önce alt, sonra arka (aynaya paralel) ve en son belli aralıklarla aynaya dik yönde düşey kesimler yapılması şeklinde özetlenebilir. Kesme derinliği tüm basamaklarda 3.1 m kesme yüksekliği ise basamak ve tabakalanma durumuna göre 5.3, 6.8 ve 7 m olarak planlanmaktadır. Kesilecek kütle için kullanılan makinelerin kapasitesine göre 7.7 m ile 18.7 m arasında değişmektedir. Aynaya dik yan kesimlerin sayısı ve sıklığı, kesilen kütle üzerindeki süreksizliklere ve mermer işleme tesislerindeki blok kesici makinelerin (ST, Katrak) kesme parametrelerine göre belirlenmekte ve her bir kütle kesimi için 3-7 kez tekrarlanmaktadır (Şekil 9).



Şekil 10. Yatay delik delme ve düşey delik delme işlemleri (Horizontal and vertical drilling operations)

Deneyisel çalışmaların yapıldığı Bej mermer ocağında “dağ kesimi” olarak da adlandırılan büyük boyutlu kütle kesimlerinde elmas tel kesme makineleri ve zincirli kollu kesme makineleri, 3 farklı kombinasyonda uygulanmakta olup her bir kullanım şekli A, B ve C yöntemleri olarak adlandırılmıştır. Bu yöntemler;

- Yöntem A: Delik delme ve elmas tel kesme makinelerinin beraber kullanıldığı yöntem (ETK^{80/60}),
- Yöntem B: Aynaya paralel kesimde zincirli kollu kesici makinenin (7,40), yatay ve aynaya dik kesimlerde delik delme ve elmas tel kesme makinelerinin beraber kullanıldığı yöntem (ZKK⁷⁴⁰+ETK^{80/60}) ve
- Yöntem C: Yatay kesimde zincirli kollu kesici makinenin (3,40), dikey kesimlerde delik delme ve elmas tel kesme makinelerinin beraber kullanıldığı yöntem (ZKK³⁴⁰+ETK^{80/60}) olarak özetlenebilir.



Şekil 9. Kütle kesme parametreleri (Block cutting parameters)

3.3.1. Yöntem A: Delik delme ve elmas tel kesme makinelerinin beraber kullanıldığı yöntem (ETK^{60/80}). (Method A: The method that Drilling and diamond wire cutting machines are used together (DWC^{60/80}))

Bu üretim yönteminde önce 5 adet dikey 2 adet yatay olmak üzere birbirine dik ve birbirleriyle irtibatlı delikler açılır, sonra yatay iki delikten geçirilen elmas tel yardımıyla alt kesim, düşey deliklerden geçirilen elmas tel yardımıyla da aynaya dik düşey kesimler gerçekleştirilir. En son aynaya paralel arka kesim

yapılarak kütlelerin tamamen serbestleşmesi sağlanır. Arka kesim genellikle bir defada yapılmasına rağmen süreksizliklerin sık olduğu kütlelerde, bloğun kayması veya parça düşmesi riskine karşı kademeli olarak gerçekleştirilebilmektedir. Yatay (alt) ve aynaya paralel (arka) kesimler için 80 cm kasnak çaplı, aynaya dik yöndeki kesimler için ise 60 cm kasnak çaplı elmas tel kesme makineleri kullanılmaktadır. Yöntem A ile gerçekleştirilen 3.1x6.8x13 m boyutlarındaki 5 adet kütlelerin üretim süreci incelenmiş olup kesimlerin hazırlanma sırasındaki delik delme sırasında alınan fotoğraflar Şekil 10'da verilmiştir.

Delik delme ve elmas tel kesme makinelerinin beraber kullanıldığı yöntemde ait veriler Çizelge 4'de verilmiştir. Delik delme işleminde ilk olarak 7 metre derinliğinde, kütle üzerindeki süreksizlik düzlemlerine göre belli aralıklarla 5 adet düşey delik delinmiştir. Sonra en son deliği dik açıyla kesecek şekilde, aynaya dik doğrultuda, 3.1 m derinliğinde bir adet yatay delik delinmiştir. En son dik açılan delikleri kesecek ve yatay açılan delikle birleşecek şekilde, aynaya paralel doğrultuda yaklaşık 13 m uzunluğunda bir yatay delik daha açılarak delme işlemi tamamlanmıştır. İncelenen 5 kesim sonunda 1370.2 m³ lük hacim için toplam 256.6 m delme işi yapılmış olup ortalama delme hızı 0,1 m/dk olarak hesaplanmıştır.

Delme operasyonu için harcanan toplam süre, çalışan işçi sayısı ve faaliyetin tekrar sayısı çarpılarak, bu faaliyet

için sarf edilen iş gücü miktarı hesaplanabilir. Buna göre operasyonlar sırasında bir işçi ile 607.5 adam-saat lik iş yapılmıştır.

Delik delme işleminden bir sonraki adım ise deliklerden elmas telin geçirilerek elmas tel kesme makinesinin kurulması ve kesim işlemidir. Kesim işleminde ilk olarak ortak alt kesim yapılmıştır. Bu aşamada, elmas tel yatay deliklerden geçirilmiş ve 80 cm çapında kasnağa sahip elmas tel kesme makinesi ile kesim gerçekleştirilmiştir. Kesme işleminin ikinci aşamasında düşey kesimler yapılmıştır. Bu işlem, 60 cm kasnak çapına sahip olan elmas tel kesme makinesi ile kütle uzunluğu boyunca 5 kez tekrarlanmıştır. Aynaya paralel arka kesim, kütle uzunluğu boyunca bir defada 80 cm kasnak çapına sahip elmas tel kesme makinesi ile yapılmıştır. İncelenen 5 kesim sonucunda toplam 1199 m² lik alanın ortalama 4.25 m²/sa hızla kesildiği hesaplanmıştır. Bu işlem 2 işçi tarafından yapılmış olup toplam 8457.5 adam-saat lik iş yapılmıştır.

Kesim işleminden sonraki adım, yıkım (devirme) işlemidir (Şekil 11). Yıkım işlemini, kesilen bölümün altına beslenme, kütleli aynadan ayırmak için hava yastığı ile öteleme ve ekskavatöre bağlı panter yardımıyla devirme işlemi oluşturmaktadır. Bu işlemler için 5 kütle kesiminde toplam 7.33 saat harcanmıştır. A yöntemi ile yapılan beş adet kesime ait ölçüm sonuçları Çizelge 4'de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 11. Hazırlanan kesimin yıkım işleminden önce altına hafriyat ile beslenmesi, yıkılma ve yıkıldıktan sonraki görünümü. (View of the before and after turnover of the block)

Çizelge 4. Yöntem A, Delme ve kesme verileri. (Method A: Drilling and cutting data)

YÖNTEM_A	A1			A2			A3			A4			A5		
Kesme Parametreleri (m)	3,1	6,8	13	3,1	6,8	13	3,1	6,8	13	3,1	6,8	13	3,1	6,8	13
DELME_A	Yd1	Yd2	Dd	Yd1	Yd2	Dd	Yd1	Yd2	Dd	Yd1	Yd2	Dd	Yd1	Yd2	Dd
Makine Tipi	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock
İşlem Sayısı	1	1	5	1	1	5	1	1	5	1	1	5	1	1	5
Delik Boyu (m)	13,2	3,2	7	13	3,2	7	13,2	3,2	7	13,2	3,2	7	13	3,2	7
Toplam Delme (m)	13,2	3,2	35	13	3,2	35	13,2	3,2	35	13,2	3,2	35	13	3,2	35
Hazırlık Süresi (dk)	20	6	5	20	6	5	20	6	5	20	6	5	20	6	5
Toplam Hazırlık Süresi (dk)	20	6	25	20	6	25	20	6	25	20	6	25	20	6	25
Delme Süresi (dk)	155	34	65	140	34	60	140	34	60	150	34	65	150	34	55
Toplam Delme Süresi (dk)	155	34	325	140	34	300	140	34	300	150	34	325	150	34	275
Delme Hızı (m/dk)	0,09	0,09	0,11	0,09	0,09	0,12	0,09	0,09	0,12	0,09	0,09	0,11	0,09	0,09	0,13
Çalışan Kişi Sayısı	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
KESME_A	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk
Makine Tipi	ETK80	ETK80	ETK60	ETK80	ETK80	ETK60	ETK80	ETK80	ETK60	ETK80	ETK80	ETK60	ETK80	ETK80	ETK60
İşlem sayısı	1	1	5	1	1	5	1	1	5	1	1	5	1	1	5
Kesme Derinliği (m)	3,1	7	7	3,1	7	7	3,1	7	7	3,1	7	7	3,1	7	7
Kesme Uzunluğu (m)	13	13	3,1	13	13	3,1	13	13	3,1	13	13	3,1	13	13	3,1
Kesim Alanı (m ²)	40,3	91	21,7	40,3	91	21,7	40,3	91	21,7	40,3	91	21,7	40,3	91	21,7
Toplam Kesilen Alan (m ²)	40,3	91	108,5	40,3	91	108,5	40,3	91	108,5	40,3	91	108,5	40,3	91	108,5
Hazırlık Süresi (dk)	7	35	7	7	35	7	7	35	7	7	35	7	7	35	7
Toplam Hazırlık Süresi (dk)	7	35	35	7	35	35	7	35	35	7	35	35	7	35	35
Kesme Süresi (dk)	497	1035	370	497	1095	370	497	985	370	497	1015	370	497	1050	370
Toplam Kesme Süresi (dk)	497	1035	1850	497	1095	1850	497	985	1850	497	1015	1850	497	1050	1850
Kesim Hızı (m ² /s)	4,87	5,28	3,52	4,87	4,99	3,52	4,87	5,54	3,52	4,87	5,38	3,52	4,87	5,2	3,52
Çalışan Kişi Sayısı	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Elmas Tel Uzunluğu (m)	75	50	50	75	50	50	75	50	50	75	50	50	75	50	50
Boncuk Ağırlık Farkı (g/ad)	0,063	0,067	0,107	0,063	0,051	0,107	0,063	0,055	0,107	0,063	0,099	0,107	0,063	0,034	0,107
Boncuk Çap Farkı (mm/ad)	0,11	0,125	0,81	0,11	0,043	0,81	0,11	0,073	0,81	0,11	0,058	0,81	0,11	0,134	0,81
DEVİRME (dk)	100			85			80			80			95		

* Yd1: Yatay delme (aynaya paralel), Yd2: Yatay delme (aynaya dik), Dd: Düşey delme, Yk: Yatay kesme (alt), Pk: Düşey kesme (aynaya paralel, arka), Dk: Düşey kesme (aynaya dik), ETK80: Elmas tel kesme makinası (Kasnak çapı 80 cm), ETK60: Elmas tel kesme makinası (Kasnak çapı 60 cm)

3.3.2. Yöntem B: Arka kesimde zincirli kollu kesici makinesinin (7,40), alt ve yan kesimlerde delik delme ve elmas tel kesme makinelerinin beraber kullanıldığı yöntem (ZKK⁷⁴⁰+ETK^{60/80}) (Method B: The method that is used the chain saw machine (7.40) for the cutting of back and drilling and diamond wire cutting machine for the underside and sidelong cuts together).

Bu üretim metodunda önce aynaya paralel olan arka kesim zincirli kollu kesici ile kesilmiş, sonra bu kesige 90° açı ile delinen ve kesikle ilişkilendirilen yatay deliklerden elmas tel geçirilip yatay (alt) kesim bir defada (süreksizliklerin sık olduğu durumda kademeli olarak) kesilmiştir. En son kollu kesicinin kesme yarığında ve buna dik açılan yatay deliklerden elmas tel geçirilerek dikey (yan) kesimler gerçekleştirilmiştir. Yatay kesimler için 80 cm çaplı, dikey kesimler için ise 60 cm kasnak çaplı Kaptanlar marka elmas tel kesme makinesi kullanılmıştır. Aynaya paralel kesimlerde (arka kesim) Fantini firmasına ait zincirli kollu kesici kullanılmış olup deliklerin delinmesi, Kaptanlar marka delik delme makinesi ile yapılmıştır. Şekil 12’de 7.40 zincirli kollu kesicinin dalış sırasındaki ve elmas tel kesme makinesinin alt kesim sırasındaki görüntüleri verilmiştir.

Bu çalışma şeklinde incelenen 5 kesim sonunda 1464.8 m³ lük hacim için toplam 80.6 m delme işi yapılmış olup

ortalama delme hızı 0.08 m/dk olarak ölçülmüştür. Operasyonlar sırasında bir işçi ile 87.1 adam-saat lik iş yapılmıştır. Kesme faaliyeti için ise toplam 1246 m² lik alanın ortalama 9.69 m²/sa hızla kesildiği hesaplanmıştır. Bu işlem zaman zaman 1 veya 2 işçi tarafından yapılmış olup toplam 7715.97 adam-saat lik iş yapılmıştır. Kesimden sonra yapılan yıkım işlemi de toplam 6.7 saat süre almıştır. B yöntemi ile ilgili olarak incelenen 3.1x7x9.2-18.7 boyutlarındaki beş adet kütle için kesime ait veriler Çizelge 5 te verilmiştir.



Şekil 12. Arka kesimde zincirli kollu kesici makinesinin ve alt kesimde elmas tel kesme makinesinin kullanımı (The use of chain saw machine for the back cutting and diamond wire cutting machine for the underside cuts)

Çizelge 5. Yöntem B: Arka kesimde zincirli kollu kesici makinesinin (7,40), alt ve yan kesimlerde delik delme ve elmas tel kesme makinelerinin beraber kullanıldığı yöntemle ait blok kesim verileri (ZKK_p⁷⁴⁰+ETK_{ya}). (Method B: Cutting data of the method that is used the chain saw machine (7.40) for the cutting of back and drilling and diamond wire cutting machine for the underside and sidelong cuts together).

YÖNTEM_B	B1			B2			B3			B4			B5		
Kesme Parametreleri (m)	3,1	7	13	3,1	7	9,2	3,1	7	10,5	3,1	7	18,7	3,1	7	16,1
DELME_B	Yd			Yd			Yd			Yd			Yd		
Makine Tipi	Rock			Rock			Rock			Rock			Rock		
İşlem Sayısı	5			4			4			7			6		
Delik Boyu (m)	3,1			3,1			3,1			3,1			3,1		
Toplam Delme (m)	15,5			12,4			12,4			21,7			18,6		
Hazırlık Süresi (dk)	5			5			5			5			5		
Toplam Hazırlık Süresi (dk)	25			20			20			35			30		
Delme Süresi (dk)	45			35			40			40			40		
Toplam Delme Süresi (dk)	225			140			160			280			240		
Delme Hızı (m/dk)	0,07			0,09			0,08			0,08			0,08		
Çalışan Kişi Sayısı	1			1			1			1			1		
KESME_B	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk
Makine Tipi	ETK80	ZKK740	ETK60	ETK80	ZKK740	ETK60	ETK80	ZKK740	ETK60	ETK80	ZKK740	ETK60	ETK80	ZKK740	ETK60
İşlem sayısı	1	1	5	1	1	4	1	1	4	1	1	7	1	1	6
Kesme Derinliği (m)	3,1	7	7	3,1	7	7	3,1	7	7	3,1	7	7	3,1	7	7
Kesme Uzunluğu (m)	13	13	3,1	9,2	9,2	3,1	10,5	10,5	3,1	18,7	18,7	3,1	16,1	16,1	3,1
Kesim Alanı (m ²)	40,3	91	21,7	28,52	64,4	21,7	32,55	73,5	21,7	57,97	130,9	21,7	49,91	112,7	21,7
Toplam Kesilen Alan (m2)	40,3	91	108,5	28,52	64,4	86,8	32,55	73,5	86,8	57,97	130,9	151,9	49,91	112,7	130,2
Hazırlık Süresi (dk)	25	80	20	20	80	15	20	80	15	15	80	15	30	80	15
Toplam Hazırlık Süresi (dk)	25	0	100	20	0	60	20	0	60	15	0	105	30	0	90
Kesme Süresi (dk)	520	816,67	525	390	403,33	450	370	440	465	660	866,67	490	620	806,67	485
Toplam Kesme Süresi (dk)	520	816,67	2625	390	403,33	1800	370	440	1860	660	866,67	3430	620	806,67	2910
Kesim Hızı (m ² /s)	4,65	6,69	2,48	4,39	9,58	2,89	5,28	10,02	2,80	5,27	9,06	2,66	4,83	8,38	2,68
Çalışan Kişi Sayısı	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2
Elmas Tel Uzunluğu (m)	40		27	40		27	40		27	40		27	40		27
Değişen Soket Sayısı (ad)		24			24			24			24			24	
Soket Ağırlık Farkı (g/ad)		0,216			0,22			0,043			0,088			0,192	
Boncuk Ağırlık Farkı (g/ad)	0,053		0,103	0,101		0,064	0,045		0,085	0,065		0,061	0,033		0,043
Boncuk Çap Farkı (mm/ad)	0,13		0,074	0,13		0,1	0,13		0,091	0,13		0,08	0,13		0,035
Değişen Pabuç Sayısı		5			5			5			5			5	
Yağ Tüketimi (kg)		50			40			45			70			60	
DEVİRME (dk)		85			75			80			90			70	

* Yd: Yatay delme (aynaya dik), Yk: Yatay kesme (alt), Pk: Dikey kesme (aynaya paralel, arka), Dk: Dikey kesme (aynaya dik), ETK80: Elmas tel kesme makinesi (Kasnak çapı 80 cm), ETK60: Elmas tel kesme makinesi (Kasnak çapı 60 cm), ZKK740: Zincirli kollu kesici (Kol boyu 7.40 m)

3.3.3. Yöntem C: Yatay kesimde zincirli kollu kesici makinesinin (3,40), dikey kesimlerde delik delme ve elmas tel kesme makinelerinin beraber kullanıldığı yöntem (ZKK³⁴⁰+ETK^{60/80}). (Method C: The method that is used chain saw machine for underside cuts and drilling and diamond wire cutting machine for vertical cuts)

Bu üretim metodunda önce yatay kesim (alt) zincirli kollu kesici ile kesilmiş sonra bu kesige dik olarak delinen ve kesikle ilişkilendirilen dikey deliklerden elmas telin geçirilmesiyle, aynaya paralel (arka) ve aynaya dik (yan) kesimler gerçekleştirilmiştir. Aynaya paralel arka kesimlerde 80 cm çaplı elmas tel kesme makinesi, alt kesimlerde 3.40 m lik zincirli kollu kesici kullanılırken dikey kesimlerde 60 cm kasnak çapına

sahip elmas tel kesme makinesi kullanılmıştır. Şekil 13’de bu üretim metoduna ait bazı fotoğraflar verilmiştir.

C yöntemi ile yapılan 3.1x5.3x7.7-16.7 boyutlarındaki beş kütleli üretiminde 1013.73 m³ lük hacim için toplam 132 m delme işi yapılmış olup ortalama delme hızı 0.13 m/dk olarak ölçülmüştür. Operasyonlar sırasında bir işçi ile 83.3 adam-saat lik iş yapılmıştır. Kesme faaliyeti için ise toplam 912.6 m² lik alanın ortalama 3.64 m²/sa hızla kesildiği hesaplanmıştır. Bu işlem zaman zaman 1 veya 2 işçi tarafından yapılmış olup toplam 5774.28 adam-saat lik iş yapılmıştır. Kesimden sonra yapılan yıkım işlemi de toplam 8.42 saat süre almıştır. C yöntemi ile yapılan beş adet kesime ait ölçüm sonuçları Çizelge 6’da detaylı olarak verilmiştir



Şekil 13. Alt kesimde zincirli kollu kesicinin ve dikey kesimde elmas tel kesme kullanımı (The use of chain saw machine for underside cut and diamond wire cutting machine for the vertical cuts)

Çizelge 6. Yöntem C: Alt kesimde zincirli kollu kesici makinesinin (3,40), dikey kesimlerde delik delme ve elmas tel kesme makinelerinin beraber kullanıldığı yöntemde ait blok kesim verileri (ZKK³⁴⁰+ETK^{60/80}). (Method C: Cutting data of the method that is used chain saw machine for underside cuts and drilling and diamond wire cutting machine for vertical cuts)

YÖNTEM_C	C1			C2			C3			C4			C5		
Kesme Parametreleri (m)	3,1	5,3	7,7	3,1	5,3	10	3,1	5,3	12,1	3,1	5,3	15,2	3,1	5,3	16,7
DELME_C	Dd			Dd			Dd			Dd			Dd		
Makine Tipi	Rock			Rock			Rock			Rock			Rock		
İşlem Sayısı	3			4			5			6			6		
Delik Boyu (m)	5,5			5,5			5,5			5,5			5,5		
Toplam Delme (m)	16,5			22			27,5			33			33		
Hazırlık Süresi (dk)	20			10			10			10			20		
Toplam Hazırlık Süresi (dk)	60			40			50			60			120		
Delme Süresi (dk)	40			35			40			40			45		
Toplam Delme Süresi (dk)	200			175			200			200			225		
Delme Hızı (m/dk)	0,08			0,13			0,14			0,17			0,15		
Çalışan Kişi Sayısı	1			1			1			1			1		
KESME_C	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk	Yk	Pk	Dk
Makine Tipi	ZKK340	ETK80	ETK60	ZKK340	ETK80	ETK60	ZKK340	ETK80	ETK60	ZKK340	ETK80	ETK60	ZKK340	ETK80	ETK60
İşlem sayısı	1	1	3	1	1	4	1	1	5	1	1	6	1	1	6
Kesme Derinliği (m)	3,1	5,3	5,3	3,1	5,3	5,3	3,1	5,3	5,3	3,1	5,3	5,3	3,1	5,3	5,3
Kesme Uzunluğu (m)	7,7	7,7	3,1	10	10	3,1	12,1	12,1	3,1	15,2	15,2	3,1	16,7	16,7	3,1
Kesim Alanı (m2)	23,87	40,81	16,43	31	53	16,43	37,51	64,13	16,43	47,12	80,56	16,43	51,77	88,51	16,43
Toplam Kesilen Alan (m2)	23,87	40,81	49,29	31	53	65,72	37,51	64,13	82,15	47,12	80,56	98,58	51,77	88,51	98,58
Hazırlık Süresi (dk)	75	40	20	75	35	20	75	65	25	75	55	25	75	35	20
Toplam Hazırlık Süresi (dk)	0	40	60	0	35	80	0	65	125	0	55	150	0	35	120
Kesme Süresi (dk)	226,67	490	400	320	660	410	406,67	700	440	426,67	775	420	443,33	805	375
Toplam Kesme Süresi (dk)	226,67	490	1200	320	660	1640	406,67	700	2200	426,67	775	2520	443,33	805	2250
Kesim Hızı (m2/s)	6,32	5,00	2,46	5,81	4,82	2,40	5,53	5,50	2,24	6,63	6,24	2,35	7,01	6,60	2,63
Çalışan Kişi Sayısı	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	2
Elmas Tel Uzunluğu (m)		30	27		37	27		44	27		50	27		54	27
Değişen Soket Sayısı (ad)	18			18			18			18			18		
Soket Ağırlık Farkı (g/ad)	0,184			0,141			0,103			0,058			0,132		
Boncuk Ağırlık Farkı (g/ad)		0,053	0,05		0,036	0,067		0,047	0,029		0,051	0,05		0,049	0,089
Boncuk Çap Farkı (mm/ad)		0,107	0,107		0,083	0,163		0,056	0,136		0,09	0,079		0,095	0,046
Değişen Pabuç Sayısı	2			2			2			2			2		
Yağ Tüketimi (kg)	25			35			45			60			60		
DEVİRME (dk)		81			112			93			104			115	

* Dd: Düşey delme, Yk: Yatay kesme (alt), Pk: Düşey kesme (aynaya paralel, arka), Dk: Düşey kesme (aynaya dik), ETK80: Elmas tel kesme makinesi (Kasnak çapı 80 cm), ETK60: Elmas tel kesme makinesi (Kasnak çapı 60 cm), ZKK340: Zincirli kollu kesici (Kol boyu 3.40 m)

3.4. Bulguların Değerlendirilmesi (Results and Discussions)

İnceleme süresince toplam 3848.68 m³ lük bir hacmin kazısı yapılmış olup bunun %35.6 sında Yöntem A, %38.1 inde Yöntem B ve %26.3 ünde Yöntem C uygulanmıştır. Yöntem A da alt ve arka kesimler için ETK⁸⁰, yan kesimlerde ETK⁶⁰ makineleri kullanılmıştır. Yöntem B de ise alt kesimlerde ETK⁸⁰ ve arka kesimlerde ZKK⁷⁴⁰ makineleri kullanılırken yan kesimlerde ETK⁶⁰ kullanılmıştır. Yöntem C de de alt kesimlerde ZKK³⁴⁰, arka kesimlerde ETK⁸⁰ ve yan kesimlerde ETK⁶⁰ makineleri kullanılmıştır. Böylece mermer ve doğaltaş ocaklarında yaygın olarak kullanılan elmas tel kesme ve zincirli kollu kesme makinelerinin farklı versiyonlarının değişik kombinasyonları denenmiştir. İncelemede her bir yöntem için 5 olmak üzere 15 kütlenin kesimi takip edilmiş olup toplam 85 kez delme (159.6 m), 105 kez kesme (3357.55 m²) işlemi yapılmıştır. Bu işlemler sırasında hazırlık süreleri dâhil toplam 760.27 saat (yaklaşık 6 ay) gözlem yapılmıştır.

İnceleme sırasında ölçülen parametreler, makinelerin kurulumu sırasında harcanan zaman, makinelerin çalışma süreleri, delme parametreleri ve delinen derinlik, kesme parametreleri ve kesilen alan, delme ve kesme

hızları, kesme faaliyeti sırasında harcanan aşındırıcı ve diğer sarf malzemeleri ve çalışan iş gücü (işçilik) dır. Değerlendirme, A, B ve C yöntemlerinin karşılaştırılmasının yanı sıra elmas tel kesme ve zincirli kollu kesme makinelerinin karşılaştırılması şeklinde iki yönlü yapılmıştır.

3.4.1. Çalışma Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Comparing of the Operation Methods)

Her üç yöntemde yapılan toplam 15 adet kesme faaliyetlerinden elde edilen sonuçlar yöntemler bazında gruplandırılarak Çizelge 7 de verilmiştir. Çizelge 7 incelendiğinde, A yönteminde açılan toplam delik boyunun (116.60 m) ile diğer yöntemlere (15.5 m, 27.5 m) göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. Dolayısıyla her üç yöntemde delme hızları birbirine yakın olsa da (0.10, 0.08, 0.13 m/dk) A yönteminde delme için 40.5 saat gibi uzun bir süre harcanmıştır. Bunun nedeni kütlenin tüm kenarlarının elmas telle kesilebilmesi için çeşitli yerlerinden delikler açılması zorunluluğudur.

A, B ve C yöntemlerinde sırasıyla 765.00, 790.25 ve 600.43 m² lik kesimler yapılmış, makinelerin kesme hızları 4.25, 9.69 ve 3.64 m²/s olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 7. A, B ve C yöntemlerine ait veriler (The data of the methods A, B and C)

	Yöntem A	Yöntem B	Yöntem C
Kesilen Kütle (m ³)	1370.20	1464.75	1013.73
DELME	Rock	Rock	Rock
İşlem Sayısı	35.00	26.00	24.00
Delik Boyu (m)	116.60	15.50	27.50
Toplam Delme (m)	256.60	80.60	132.00
Hazırlık Süresi (dk)	155.00	25.00	70.00
Toplam Hazırlık Süresi (dk)	255.00	130.00	330.00
Delme Süresi (dk)	1210.00	200.00	200.00
Toplam Delme Süresi (dk)	2430.00	87.08	1000.00
Delme Hızı (m/dk)	0.10	0.08	0.13
İş Gücü (adam-saat)	607.50	87.08	83.33
KESME	ETK80/60	ZKK740+ETK	ZKK340+ETK
İşlem sayısı	35.00	36.00	34.00
Kesme Derinliği (m)	85.50	85.50	68.50
Kesme Uzunluğu (m)	145.50	150.50	138.90
Kesim Alanı (m ²)	765.00	790.25	600.43
Toplam Kesilen Alan (m ²)	1199.00	1245.95	912.60
Hazırlık Süresi (dk)	260.00	590.00	715.00
Toplam Hazırlık Süresi (dk)	400.00	525.00	765.00
Kesme Süresi (dk)	9515.00	8308.33	7298.33
Toplam Kesme Süresi (dk)	16915.00	7715.97	15063.33
Kesim Hızı (m ² /s)	4.25	9.69	3.64
İş Gücü (adam-saat)	8457.50	7715.97	5774.28
Elmas Tel Uzunluğu (m)	875.00	335.00	350.00
Değişen Soket Sayısı (ad)		120.00	90.00
Soket Ağırlık Farkı (g/ad)		0.76	0.62
Boncuk Ağırlık Farkı (g/ad)	1.16	0.65	0.52
Boncuk Çap Farkı (mm/ad)	5.03	1.03	0.96
Değişen Pabuç Sayısı		25.00	10.00
Yağ Tüketimi (kg)		265.00	225.00
DEVİRME (sa)	7.33	6.67	8.42

Burada Yöntem B nin, kesme hızı bakımından bariz üstünlüğü görülmektedir. Bu durumun, bir defada kesilen alanın büyüklüğü ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Çünkü B yönteminde, bir defada kesilen araka kesim ile alt kesimler ZKK⁷⁴⁰ ve ETK⁸⁰ makineleri ile alınmıştır. C yönteminde ise basamak yüksekliğinin diğerlerinden düşük olması (5.3 m) toplam kesilen alanı azaltılmış olup eşdeğer metrekare alanlar için yapılan makinenin taşınması ve kurulması gibi işlemlerin sayısını artırmıştır. Ayrıca kesme hızının düşüklüğü, bu yöntemde çok tekrar eden yan kesimlerde ETK⁶⁰ gibi düşük kapasiteli bir makinenin kullanılması gösterilebilir.

Bunlara paralel olarak A yönteminde ETK makinelerinin yoğun kullanımından dolayı ortalama elmas tel kullanımının (875 m) ve boncuk tüketiminin (1.16 g/ad) B ve C yöntemlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna karşın B ve C yöntemlerinde de ZKK kullanımından dolayı soket, pabuç ve yağ tüketimleri olduğu ve B yönteminde bu tüketimlerin C ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu, C yönteminde kol boyu 3.40 m olan ZKK makinesinin kullanılmasından ve ZKK makinesinin kullanım oranının B yöntemine göre daha düşük olmasından dolayı beklenen bir durumdur.

3.4.2. Kesme Makinelerinin Karşılaştırılması (Comparing of the cutting machines)

Her üç yöntemde yapılan toplam 15 adet kesme faaliyetlerinden elde edilen sonuçlar kesme makineleri bazında gruplandırılarak Çizelge 8 de sunulmaktadır. Çizelge 8 e göre en fazla kesimin 1192.76 m² ile ETK⁸⁰ makinesi ile yapıldığı ve bunu 958.52 m² ile ETK⁶⁰, 472.5 m² ile ZKK⁷⁴⁰ ve 191.27 m² ile ZKK³⁴⁰ makinelerinin izlediği görülmektedir. Operasyonların tamamında ETK⁸⁰ makinesi 20 ve ETK⁶⁰ makinesi 50 kez kullanılırken ZKK⁷⁴⁰ ve ZKK³⁴⁰ makineleri sadece 5 er kez kullanılmıştır. Kullanım sayısı, kesilen birim metrekare bazında değerlendirildiğinde bir m² kesim için ETK⁸⁰ makinesinin 0.02 kez, ETK⁶⁰ makinesinin 0.05 kez, ZKK⁷⁴⁰ makinesinin 0.01 kez ve ZKK³⁴⁰

makinesinin 0.03 kez kurulup söküldüğü ortaya çıkmaktadır. Burada hem elmas tel kesme hem de zincirli kollu kesme makineleri için daha güçlü olan makinede taşıma, sökme ve kurma gibi işlemlerin daha az yapıldığı sonucuna varılabilmektedir.

İnceleme sırasında ortalama kesme hızları, ETK⁸⁰ makinesi için 5.24 m²/s, ETK⁶⁰ makinesi için 2.56 m²/s, ZKK⁷⁴⁰ makinesi için 8.51 m²/s ve ZKK³⁴⁰ makinesi için 6.29 m²/s olarak hesaplanmıştır. Makineler birlikte değerlendirildiğinde ZKK makinelerinin daha hızlı olduğu, her iki makine grubu birlikte değerlendirildiğinde de kol boyu ve/veya kasnak çapı büyük olan, dolayısıyla motor gücü de yüksek olan makinenin daha hızlı kesim yaptığı söylenebilir.

Her bir makine için çalışan işçi sayısı ile yapılan kesim süresi çarpılarak ve kesilen alana bölünerek bir m² için yapılan iş miktarı hesaplanmıştır. Metrekare bazında kullanılan iş gücü, ETK⁸⁰ için 7.25 adam-saat/m² ve ETK⁶⁰ için 7.80 adam-saat/m² olarak gerçekleşirken ZKK⁷⁴⁰ ve ZKK³⁴⁰ için 0.59 ve 0.79 adam-saat/m² gibi çok küçük değerler elde edilmiştir. Buna göre zincirli kollu kesme makinelerinin daha az iş gücü gerektirdiği sonucuna varılmıştır. Yine makineler kendi grupları içinde değerlendirildiğinde, daha yüksek motor gücüne sahip olanların daha az iş gücüne ihtiyaç duyduğu görülmektedir.

Elmas tel kesme makinelerindeki tel ve elmas boncuk tüketimine karşın zincirli kollu kesme makinelerinde soket, pabuç ve yağ tüketimleri görülmektedir. Elmas boncuk tüketimi ETK⁸⁰ makinesinde 0,0037 mm-boncuk/m² iken ETK⁶⁰ makinesinde 0,0054 mm-boncuk/m² dir. ETK⁸⁰ makinesinin hem kasnak çapının hem de çevirdiği elmas tel uzunluğunun daha fazla olmasının boncuklardaki aşınma miktarını düşürdüğü düşünülmektedir. Benzer durum ZKK makinelerinde de görülmektedir. Kol boyu daha uzun olan ZKK⁷⁴⁰ makinesinde soket tüketimi 0.25 ad/m² iken ZKK³⁴⁰ makinesinde 0.47 ad/m² olarak gerçekleşmiştir. Burada da kapasitesi ve kullanım oranı yüksek olan makinelerde

Çizelge 8. Kesme makinelerine ait veriler (The data of the cutting machines)

	ETK ⁸⁰	ETK ⁶⁰	ZKK ⁷⁴⁰	ZKK ³⁴⁰
İşlem sayısı	20	50	5	5
Kesme Derinliği (m)	92,5	61,5	35	15,5
Kesme Uzunluğu (m)	259,2	31	67,5	61,7
Kesim Alanı (m ²)	1192,76	190,65	472,5	191,27
Toplam Kesilen Alan (m ²)	1192,76	958,52	472,5	191,27
Hazırlık Süresi (dk)	565	190	400	375
Toplam Hazırlık Süresi (dk)	565	950		
Kesme Süresi (dk)	13655	4460	3333,333	1823,333
Toplam Kesme Süresi (dk)	13655	22435	3333,333	1823,333
Kesme Hızı (m ² /s)	5,24	2,56	8,51	6,29
İş Gücü (adam-saat/m ²)	7,25	7,80	0,59	0,79
Elmas Tel Uzunluğu (m)	1040	270		
Değişen Soket Sayısı (soket/m ²)			0,25	0,47
Boncuk Çap Farkı (mm-boncuk/m ²)	0,0037	0,0054		
Değişen Pabuç Sayısı (ad/m ²)			0,0529	0,0523
Yağ Tüketimi (kg/m ²)			0,56	1,18

bu tüketimlerin yüksek olmasına rağmen metrekafe bazında sarfiyatın daha düşük olduğu göze çarpmaktadır. Gerek daha kısa tel kullanılan ETK⁶⁰ gerekse kol boyu daha kısa olan ZKK³⁴⁰ makinelerinde aşındırıcı elemanların (boncuk-soket) kesme ortamına giriş ve çıkışları (kaya içine batma-çıkma) daha sık gerçekleştiği için yıpranma ve aşınmanın daha fazla olması kaçınılmazdır. Ayrıca ZKK makinelerinin yağ tüketiminden dolayı çevre için olumsuz etkileri olduğu ve ETK makinelerinin daha çevreci olduğu söylenebilir.

Ayrıca literatürde zincirli kollu kesme makineleri ile ilgili yaşanan ciddi bir iş kazasına rastlanmamasına rağmen elmas tel kesme makinelerinde sıklıkla tel kopması nedeniyle yaralanmalı kazaları olması nedeniyle zincirli kollu kesme makinelerinin daha güvenli olduğu düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Elmas tel kesme ve zincirli kollu kesme makinelerinin üç farklı şekilde kullanımının incelenmesi için toplam 15 adet kütle kesilerek 75 adet bloğun üretimi gözlemlenmiştir. Gözlem sırasında kesme işleminde en fazla 1192.76 m² ile ETK⁸⁰ makinesi kullanıldığı ve bunu 958.52 m² ile ETK⁶⁰, 472.5 m² ile ZKK⁷⁴⁰ ve 191.27 m² ile ZKK³⁴⁰ makinelerinin izlediği görülmektedir.

İnceleme sonucu elde edilen diğer sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Mermer ocaklarında zincirli kollu kesme makinelerinin kullanımı, elmas tel kesme yönteminin vaz geçilmez faaliyetlerinden olan delme işleminin sayısını azaltmaktadır. Bu hem zaman hem de iş gücü bakımından tasarruf sağlamaktadır.
- Zincirli kollu kesme makineleri, elmas tel kesme makinelerine göre daha hızlı kesim yapmaktadır. Veriler incelendiğinde ETK⁸⁰ makinesi kesme hızının 5.24 m²/s, ETK⁶⁰ makinesinin 2.56 m²/s, ZKK⁷⁴⁰ makinesinin 8.51 m²/s ve ZKK³⁴⁰ makinesinin 6.29 m²/s olduğu görülmektedir. Buna göre, motor gücü ve kapasitesi yüksek olan makineler daha hızlı ve verimli kesim yapmaktadır.
- A, B ve C yöntemlerinde sırasıyla 765.00, 790.25 ve 600.43 m² lik kesimler yapılmış, makinelerin kesme hızları 4.25, 9.69 ve 3.64 m²/s olarak hesaplanmıştır. Alt kesimlerin 3.40 m kol boyuna sahip ZKK makinesi ile diğer kesimlerin ETK makineleri ile yapıldığı Yöntem C de, gerek kesme hızı gerek se kesilen alan diğer yöntemlere göre bariz şekilde düşüktür. Bunun nedeni basamak yüksekliklerinin A ve B yöntemlerine göre yaklaşık 2 m daha düşük seçilmesidir. Dolayısıyla yapılan bir birimlik iş bazında daha az alan kesilebilmiştir. Buna göre, mermer ocaklarında basamak yüksekliğinin artırılması verimi de artıracaktır.
- ETK makinelerinde tel ve boncuk tüketimi, ZKK makinelerinde da soket, pabuç ve yağ tüketimi, kullanılan makinenin kapasitesine ve kullanım oranına göre doğru orantılı olarak artmaktadır. Yağ,

çevre bakımından zararlı atıklardır. Dolayısıyla ZKK makinesinin kullanımı sırasında bozulan yağın toplanarak uygun koşullarda depolanması gerekir. Burada ETK makinelerinin daha çevreci olduğu ortaya çıkmaktadır.

- ETK makinelerinin çalışması sırasında çok kereler özellikle tel kopması nedeniyle iş kazaları olduğu duyulmaktadır, bu konuyla ilgili bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. ZKK makineleri ile ilgili ciddi bir kaza bugüne kadar literatüre girmemiştir. Dolayısıyla ZKK makineleri iş sağlığı ve güvenliği bakımında daha uygun makinelerdir.
- ZKK makinelerinin motor güçleri ETK makinelerinden 10-20 kw daha fazla olmasına karşın kesim hızları da daha fazladır. Buna göre, motor gücünden kaynaklı enerji tüketimi ZKK makinelerinde daha fazla olmasına rağmen yüksek kesim hızı nedeniyle m² bazında daha ekonomik olacaktır.

Sonuç olarak zincirli kollu kesme makinelerinin tek başına ya da elmas tel kesme makineleri ile birlikte kullanımı, yukarıda özetlenen delme faaliyetleri azaltması, yüksek kesme hızı, iş güvenliği, ekonomisi, gerekli iş gücünü azaltması gibi avantajlarından dolayı blok çıkartma faaliyetlerinin verimini artırmaktadır. İleriki dönemlerde araştırmanın genişletilerek optimum ZKK ve ETK kombinasyonun belirlenmesi ve farklı mermer türlerinin üretildiği ocaklarda denenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince 15.MYO.02 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Anon 1 <http://www.immib.org.tr/tr/ihracat-ihracat-rakamlari-istatistikler.html>
2. Eleren A., ve Ersoy M., "Mermer ocaklarında elmas telle ve kollu kesiciyle kesme teknolojilerinin iş güvenliği bakımından karşılaştırılmasında hata türü etki analizi yönteminin uygulanması", *TÜBAV Bilim Dergisi*, 4(1): 9-19, (2011).
3. Mikaeil R., Ataei M., Hoseinie SH. "Predicting the production rate of diamond wire saws in carbonate rock cutting". *Industrial Diamond Review*, 68(3): 28 – 34, (2008).
4. Jain SC., Rathore SS. "Role of cut size area on the performance of diamond wire saw machine in quarrying of marble". *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 23(2): 79– 91, (2009).
5. Ataei M., Mikaeil R., Sereshki F., Ghaysari N. "Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis". *Arabian Journal of Geosciences*, 5(6): 1289-1295, (2011).
6. Jain SC, Rathore SS. "Prediction of Cutting Performance of Diamond Wire Saw Machine in Quarrying of Marble: A

- Neural Network Approach”, *Rock Mech Rock Eng.*, 44(3): 67–371, (2011).
7. Özçelik Y, Yılmazkaya E. “The effect of the rock anisotropy on the efficiency of diamond wire cutting machines”. *Int J Rock Mech Min.*, 48: 626–636, (2011).
 8. Biasco G. “Diamond wire for quarrying hard rocks”. *Ind Diamond Rev.*, 5: 252–255, (1993).
 9. Andrissi GS, Loi G, Trois P, Rossi G. “Combining mechanochemistry and innovative diamond wire saws for improving productivity in granite quarries”. *Min Eng.*, Oct: 46–52, (2005).
 10. Demirdağ S, Gündüz L. “Blok İşletmeciliğinde Elmas Tel ve Boncuk Performans Analizi”. *Türkiye III. Mermer Sempozyumu*, 3-5 Mayıs 2001, Afyon. (2001).
 11. Özçelik Y, Kulaksız S. “Investigation of the relationship between cutting angles and wear on beads in diamond wire cutting method”, In: Panagiotou G.N. & Michalakopoulos T.N. (eds), *Mine Planning and Equipment Selection Symposium*, Athens, Greece, 6–9 Nov, 661–666, (2000).
 12. Özçelik Y, Bayram F. “Optical investigations of bead wear in diamond wire cutting”. *Ind Diamond Rev* 64: 60–65, (2004).
 13. Özçelik Y. “Optimum working conditions of diamond wire cutting machines in the marble industry”. *Ind Diamond Rev.*, 1: 58–64, (2005a).
 14. Özçelik Y. “Effect of mineralogical and petrographical properties of marble on cutting by diamond wire”. *CIM Bulletin* 98(1085):1–6, (2005b).
 15. Dagrain F, Marchandise P, Brux P. “Monitoring of chain saw machines to follow their performances in quarries”. *Diam Appl Technol.* 69:43–49, (2012).
 16. Tumac D, Avunduk E, Çopur H, Bilgin N, Balci C. “Estimation of the performance of chain saw machines from shore hardness and the other mechanical properties”. In: Tan Fei, editor. *Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods*; 261-265, (2013).
 17. Avunduk E, Tumac D, Çopur H, Balci C, Bilgin N. “Experimental comparison of single and double scroll cutting patterns by using chisel cutting tools of chain saw machines”. In: Tan Fei, editor. *Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods*, 729-734, (2013).
 18. Tumac D. “Predicting the performance of chain saw machines based on shore scleroscope hardness”. *Rock Mech Rock Eng.* 47(2): 703–715, (2014).
 19. Hekimoğlu OZ. “Studies on increasing the performance of chain saw machines for mechanical excavation of marbles and natural Stones”. *Int J Rock Mech Min Sci.* 72: 230–241, (2014).
 20. Korman T, Kujundžić T, Kuhinek D. “Simulation of the chain saw cutting process with a linear cutting Machine”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 78: 283–289, (2015).
 21. Çopur H. “Linear stone cutting tests with chisel tools for identification of cutting principles and predicting performance of chain saw machines”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47: 104–120, (2010).
 22. Mancini R, Linares M, Cardu M, Fornaro M. and Bobbio M, “Simulation of the operation of a rock chain cutter on statistical models of inhomogenous rocks.” *Proc. Mine Planning and Equipment Selection*, 461-468, (1994).
 23. Mancini R, Cardu M, Fornaro M. and Toma CM. “The current status of marble chain cutting.” *Proc. Mine Planning and Equipment Selection*, 151-158, (2001).
 24. Önenç Dİ. ve Demirocak Y. “Tabaka Duruşlarına Göre Blok Kesim Yöntemlerinin Ocak Mermer İşletmeciliğinde Planlanması ve Ayna Pozisyonlarının Dizaynları”, *Mersem 2003 Türkiye IV. Mermer Sempozyumu*, 277-290, Afyon. (2003).
 25. Çopur H, Balci C, Bilgin N, Tumac D, Feridunoglu C, Dincer T. and Serter A. “Cutting performance of chain saws in quarries and laboratory”. *Proc. 15th Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection*, Torino-Italy, Sep.20-22, 1324-1329, (2006).
 26. Demirel Ş. “Mermer ocaklarında kollu zincirli kesme makinesinin uygulanabilirliği”, *I. Ulusal Mermer ve Doğal Taşlar Kongresi*, 1-2 Şubat 2008, 187-196, İzmir. (2008).
 27. Yeşilkaya L, Ersoy M, Çelik MY, Çatalpınar, A “Kaklık-Denizli Traverten Ocağında Zincirli Kollu Kesicinin Kullanımının Araştırılması”. *Madencilik Dergisi*, 48(3): 33-44, (2009).
 28. Çopur H, Balci C, Tumac D, Bilgin N. “Field and laboratory studies on natural stones leading to empirical performance prediction of chain saw machines”. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48: 269–282, (2011).
 29. Kaptanlar, 2014, “*Ürün Tanıtım Kataloğu*”, Afyonkarahisar.
 30. Fantini, 2014, Tataroğlu A.Ş. “*Fantini Zincir Kollu Kesici Ürün Tanıtım Kataloğu*”, Ankara.
 31. Çopur H, Bilgin N, Balci C, Tümaç D. “Doğal taş madenciliğinde kullanılan zincirli kesme makinelerinin kazı performanslarının optimizasyonu”. *TUBİTAK Proje No: 105M017*. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, (2008).

Performance Analysis of A Spark Ignition (SI) Otto Cycle (OC) Gasoline Engine Under Realistic Power (RP) And Realistic Power Density (RPD) Conditions

Guven GONCA *

Yildiz Technical University, Naval Arch. and Marine Eng. Depart, Besiktas, Istanbul

(Received : 13.04.2016 ; Accepted : 12.06.2016)

ABSTRACT

This study presents performance optimization of an Otto cycle (OC) gasoline engine using new criteria named as realistic power (RP) and realistic power density (RPD) conditions based on finite-time thermodynamics (FTT). The effects of design and operating parameters such as cycle temperature ratio, cycle pressure ratio, friction coefficient, engine speed, mean piston speed, stroke length, inlet temperature, inlet pressure, equivalence ratio, compression ratio and bore-stroke length ratio on the performance parameters such as effective efficiency, effective power and power density have been examined. Moreover, the energy losses have been determined as fuel's energy and they have been illustrated based on incomplete combustion, friction, heat transfer and exhaust output by using figures. Realistic values of specific heats have been used depend on temperature of working fluid. The results obtained demonstrated that the engine performance increases with increasing some parameters such as cycle temperature ratio, cycle pressure ratio, inlet pressure; with decreasing some parameters such as friction coefficient, inlet temperature. However, the engine performance could increase or decrease with respect to different conditions for some parameters such as engine speed, mean piston speed, stroke length, equivalence ratio and compression ratio. The results of this study could be used an engineering tool by Otto cycle engine designers.

Keywords: Otto Cycle, Spark Ignition Engine, Engine Performance, Power Density, Finite-Time Thermodynamics.

Buji Ateşlemeli Otto Çevrimli Benzinli Bir Motorun Gerçek Güç ve Gerçek Güç Yoğunluğu Koşullarında Performans Analizi

ÖZ

Bu çalışma Sonlu-Zaman Termodinamiğine dayalı olarak geliştirilen, gerçek güç ve gerçek güç yoğunluğu koşulları olarak adlandırılan yeni kriterler kullanıldığı Otto çevrimli benzinli bir motorun performans optimizasyonunu sunar. Çevrim sıcaklık oranı, çevrim basınç oranı, sürtünme katsayısı, motor hızı, ortalama piston hızı, strok uzunluğu, giriş sıcaklığı, giriş basıncı, eşdeğerlik oranı, sıkıştırma oranı ve silindir delik çapı-strok uzunluğu oranı gibi tasarım ve işletme parametrelerinin, efektif verim, efektif güç ve güç yoğunluğu üzerine etkileri incelenmiştir. Enerji kayıpları yakıt enerjisi cinsinden tanımlanmıştır ve eksik yanma, sürtünme, ısı transferi ve egzoz çıkışına dayalı olarak grafiklerle ifade edilmiştir. İş akışkanının sıcaklığına bağlı özgül ısılar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar motor performansının çevrim sıcaklık oranı, çevrim basınç oranı, giriş basıncı gibi parametrelerin artışıyla arttığını; sürtünme katsayısı, giriş sıcaklığı gibi parametrelerin artışıyla azaldığını göstermiştir. Bununla birlikte, motor hızı, ortalama piston hızı, strok uzunluğu, eşdeğerlik oranı ve sıkıştırma oranı gibi parametrelerin değişimi diğer koşullara bağlı olarak performansı etkilemiştir. Bu çalışmanın sonuçları, Otto çevrimli motor tasarımı yapan tasarımcılar tarafından mühendislik aracı olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Otto Çevrimi, Buji Ateşlemeli Motor, Motor Performansı; Güç Yoğunluğu; Sonlu-Zaman Termodinamiği.

1. INTRODUCTION

Internal combustion engines (ICE) particularly, gasoline engines are commonly used by people. Due to environmental and economical restrictions, so many optimization studies have been carried out by engine designers. Mozurkewich and Berry [1] optimized the performance of an air-standard Otto cycle (ASOC) with

considerations of incomplete combustion, friction loss and heat leak. Wu and Blank [2] examined the combustion effects of the OC on the work optimization and they [3] performed an optimization study with respect to engine power and mean effective pressure for the OC engine. Chen et al.[4] carried out an investigation to understand the relationship between the net work output and thermal efficiency of the ASOC taking the heat transfer losses into consideration. Wu et al. [5] applied the Miller cycle into a supercharged Otto engine to increase the net work output. Durmayaz et al. [6]

*Corresponding Author

e-mail: ggonca@yildiz.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 475-486

performed a review study on thermal systems based on FTT and thermo economics. Ge et al. [7, 8] carried out an examination on the performance of reversible [7] and irreversible [8] OC engines with consideration of variable specific heats. Chen et al. [9] determined power output and efficiency of the irreversible Otto cycle (IOC) with considerations of heat transfer losses, finite-time processes and non-isentropic processes. Ozsoysal [10] defined the heat loss as a percentage of the fuel's energy for ASOC and diesel cycle. Ge et al. [11] performed an analysis to investigate the effects of temperature-dependent specific heats and energy losses arising from friction, internal irreversibilities and heat transfer on the performance of the IOC. Hou [12] carried out a comparison about the performances of ASOC and Atkinson cycle by taking heat transfer losses into account. Abu-Nada et al. [13] conducted a thermodynamical analysis for a SI Otto engine using a new gas mixture model. Lin and Hou [14] computationally investigated the influences of variable specific heats of working fluid, heat loss and friction losses on the performance of ASOC under maximum cycle temperature conditions. Lin and Hou [15] compared the performance of ASOC and Miller cycle under the maximum temperature conditions. Wang et al. [16] examined the influences of quantum degeneracy and heat transfer between the working fluid and the cylinder wall on the optimal engine power and efficiency of an OC engine. Ust et al. [17] investigated the influences of cycle pressure and cycle temperature ratios on the performance of the IOC. Cesur et al. [18] carried out a study on a SI gasoline engine with steam injection method to examine the engine performance and exhaust emissions. Shu et al. [19] investigated the onset and severity of knocks using knock metrics in SI engine operating at various engine speeds. Gharehghani et al. [20] performed an experimental investigation on the thermal balance and performance of a turbocharged SI engine running with natural gas and they developed an empirical correlation for computing the energy of exhaust gases. Irimescu et al. [21] suggested a new procedure for estimation of blow-by rate and compression ratios based on the motored in-cylinder pressure trace for an optical SI engine. Boretti [22] examined the influences of water injection on charge efficiency, tendency to knock and temperature of exhaust gases used to operate turbo charge turbine for a turbocharged, direct injection SI engine fuelled with ethanol. Xie et al. [23] experimentally studied load controlling using EGR and spark timing for a SI engine fueled with methanol. Pan et al. [24] experimentally and theoretically examined the effects of EGR, compression ratio and boost pressure on cyclic variation of a port fuel injection (PFI) gasoline engine. Li et al. [25] carried out a study on a new hybrid breakup model to simulate the fuel injection processes of multi-hole injectors in a direct injection SI gasoline engines. Mendiburu et al. [26] investigated the performances of downdraft gasifiers integrated with gas turbine, spark and compression

ignition engines for distributed power generation. Merola et al. [27] researched the influences of plasma-assisted ignition system with different plasma configurations and spark plug geometry on combustion characteristics of an optical SI engine. Pradeep et al. [28] used a compressed air injection system with LPG induction through the manifold to reduce short-circuiting losses of a two-stroke SI engine by using two different methods. Najjar et al. [29] examined the influence of variable valve lift and throat diameter on the performance and pollutant emissions of a SI engine using a computer program called Lotus which predicts gas flow, combustion and engine performance. Gurbuz et al. [30] carried out an investigation to show the effects of swirl flow on combustion parameters, cyclic variations and engine performance in a SI engine fuelled with hydrogen. Hanipah et al. [31] reviewed some of the recently reported commercial developments in free-piston engine systems particularly aimed for use in hybrid electric vehicle power trains. Wang et al. [32] placed a tumble flap into the intake port and determined the effects of it on in-cylinder aerodynamics and cycle-to-cycle variations (CCV) of direct injection SI engine using multi-cycle large-eddy simulation (LES) and proper orthogonal decomposition (POD) methods. Cucchi and Samuel [33] examined the influences of an exhaust gas turbocharger on particulate matter emissions produced by a gasoline direct injection engine. Calam et al. [34] performed a study on utilization of fusel oil in a single cylinder, SI engine and they examined the influences of the blends of gasoline and fusel oil on engine torque, specific fuel consumption and pollutant emissions at various engine speeds and loads. Wu et al. [35] simulated combustion processes of a SI natural gas engine with three kinds of different combustion chambers by using multi-dimensional computational fluid dynamics (CFD) code. Beccari et al. [36] developed two different model to predict knock onset of liquefied petroleum gas (LPG), natural gas (NG), gasoline and their mixtures in SI engines by using collected data from experiments. Gonca et al [37] carried out performance analyses and optimizations for the irreversible thermodynamic cycle engines. Bagirov et al. [38] investigated the effects of the number of injector holes on engine performance, specific fuel consumption and pollutant emissions of a gasoline engine with pre-combustion chamber. Najjar and Amer [39] used a smart device and neuro-fuzzy controller model for improving the engine volumetric efficiency, power and fuel economy of a SI engine. The results showed that the smart device improved engine power up to 21% and brake specific fuel consumption up to 21% between 25% and 75% of engine load. However, the neuro-fuzzy controller increases engine power up to 60% and decreases the brake specific fuel consumption up to 35%.

In this study, the effects of the engine design and operating parameters on the effective efficiency, effective power and power density of an OC gasoline engine have been investigated by using a realistic

simulation model based on finite-time thermodynamics (FTT). In the literature, there is no parametrical study like this for OC gasoline engines. Apart from previous studies, a comprehensive comparison for the engine design and operating parameters has been presented. Also, energy losses with respect to exhaust output, heat transfer, friction and incomplete combustion are demonstrated as percentage of the fuel's energy. In this comprehensive report, new performance conditions have been described named as realistic power (RP) and realistic power density (RPD). Presented results could be used by real engine designer to optimize the performance of OC gasoline engines in terms of effective efficiency, effective power and power density.

2. THEORETICAL MODEL

In this study, Otto cycle (OC) engine is analyzed by using FTT model. The OC is shown in Fig. 1.

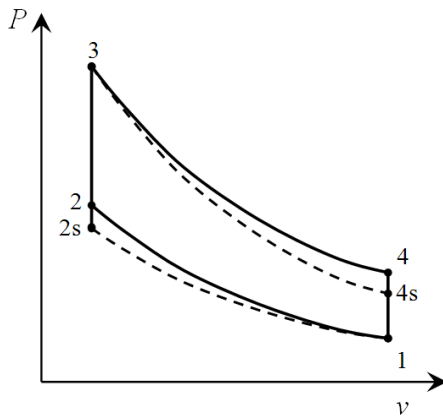


Figure 1. P - v diagram for the irreversible Otto cycle [48].

The parameters, constants and engine properties used in the analysis are cycle temperature ratio (α), friction coefficient (μ), residual gas fraction (RGF), engine speed (N), inlet temperature (T_1), inlet pressure (P_1), cylinder wall temperature (T_w), cylinder bore (d), stroke (L) and their standard values are given as follows: 8, 12.9 Ns/m, 0.05, 3600 rpm, 300 K, 100 kPa, 400 K, 0.072 m, 0.062 m respectively.

In the present model, the effective power, power density and efficiency are given as below:

$$P_{ef} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} - P_l, P_d = \frac{P_{ef}}{V_T}, \eta_{ef} = \frac{P_{ef}}{\dot{Q}_f} \quad (1)$$

Where, the total heat addition (\dot{Q}_{in}) at constant volume (2-3), the total heat rejection (\dot{Q}_{out}) at constant volume (4-1) and loss power by friction (P_l) [11,40] could be written as below:

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_{f,c} - \dot{Q}_m = \dot{m}_r \int_{T_2}^{T_3} C_v dT = \left[\begin{array}{l} \left(2.506 \cdot 10^{-11} \frac{T^3}{3} + 1.454 \cdot 10^{-7} \frac{T^{2.5}}{2.5} - 4.246 \cdot 10^{-7} \frac{T^2}{2} + 3.162 \cdot 10^{-5} \frac{T^{1.5}}{1.5} + \right. \\ \left. 1.0433T - 1.512 \cdot 10^4 \left(-\frac{T^{-0.5}}{0.5} \right) + 3.063 \cdot 10^5 (-T^{-1}) - 2.212 \cdot 10^7 \left(-\frac{T^{-2}}{2} \right) \right) \Bigg]_{T_2}^{T_3} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_r \int_{T_4}^{T_1} C_v dT = \left[\begin{array}{l} \left(2.506 \cdot 10^{-11} \frac{T^3}{3} + 1.454 \cdot 10^{-7} \frac{T^{2.5}}{2.5} - 4.246 \cdot 10^{-7} \frac{T^2}{2} + 3.162 \cdot 10^{-5} \frac{T^{1.5}}{1.5} + \right. \\ \left. 1.0433T - 1.512 \cdot 10^4 \left(-\frac{T^{-0.5}}{0.5} \right) + 3.063 \cdot 10^5 (-T^{-1}) - 2.212 \cdot 10^7 \left(-\frac{T^{-2}}{2} \right) \right) \Bigg]_{T_4}^{T_1} \quad (3)$$

$$P_l = \mu \bar{S}_p^2 = \frac{\left[Z + 48 \left(\frac{N}{1000} \right) + 0.4 \bar{S}_p^2 \right] V_s N}{1200} \quad (4)$$

where Z is a constant relation to friction [40] and its minimum value is taken as 75, where μ is a coefficient of friction which considers the global losses, \bar{S}_p is mean piston velocity which is given as:

$$\bar{S}_p = \frac{L \cdot N}{30} \quad (5)$$

Where L and N are stroke length (m) and engine speed (rpm). \dot{Q}_f is the total heat potential of the injected fuel and it is given as below:

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f H_u \quad (6)$$

Where H_u is lower heat value (LHV). \dot{m}_f is time-dependent fuel mass and it can be expressed as follows:

$$\dot{m}_f = \frac{m_f N}{120} \quad (7)$$

Where m_f is fuel mass per cycle (kg). $\dot{Q}_{f,c}$ is heat released by combustion; \dot{Q}_{ht} is the heat loss by heat transfer into cylinder wall and they are given as below:

$$\dot{Q}_{f,c} = \eta_c \dot{m}_f H_u \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{ht} = h_{tr} A_{cyl} (T_{me} - T_w) = h_{tr} A_{cyl} \left(\frac{T_2 + T_3}{2} - T_w \right) \quad (9)$$

Where, η_c is combustion efficiency. It can be written as below [41-43]:

$$\eta_c = -1,44738 + 4,18581 / \phi - 1,86876 / \phi^2 \quad (10)$$

ϕ is equivalence ratio and it can be written as below:

$$\phi = \frac{(m_f / m_a)}{F_{st}} \quad (11)$$

Where, m_a is air mass per cycle (kg). F_{st} is stoichiometric fuel-air ratio and they are given as follows:

$$m_a = \rho_a V_a = \rho_a (V_T - V_{rg}) \quad (12)$$

$$V_T = V_s + V_c = \frac{(V_s r)}{r-1} \quad (13)$$

$$V_c = \frac{V_T}{r} = \frac{\pi d^2 L}{4} \frac{1}{r-1} \quad (14)$$

$$F_{st} = \frac{\varepsilon \cdot (12.01 \cdot \alpha + 1.008 \cdot \beta + 16 \cdot \gamma + 14.01 \cdot \delta)}{28.85} \quad (15)$$

$$\rho_a = f(T_1, P_1) \quad (16)$$

Where V_T , V_a , V_{rg} , V_s , and V_c are volume of total cylinder, air, residual gas, stroke and clearance.

ρ_{rg} is density of residual gas which is given as below:

$$\rho_{rg} = f(T_{mix}, P_1) \quad (18)$$

T_{mix} is average temperature of air-steam mixture. They are given as below:

$$T_{mix} = \frac{\dot{m}_a T_1 R_a + \dot{m}_{rg} T_1 R_{rg}}{\dot{m}_a R_a + \dot{m}_{rg} R_{rg}} \quad (20)$$

R_a and R_{rg} are gas constants of air and residual gas. Their values are taken as 0.287kJ/kg.K

The compression ratio (r) is given as:

$$r = V_1 / V_2 \quad (21)$$

Where f stands for function. The functional expressions are obtained by using EES software [44] Where subscript "1" stands for the condition before the compression process. T_1 and P_1 are in-cylinder temperature and pressure at the beginning of compression process. T_s is the temperature of the steam injected into cylinder. Fuel used in the model is gasoline and its chemical formula is given as C_7H_{17} [45].

Where $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ are atomic numbers of carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen in fuel, respectively. ε is molar fuel-air ratio [45]:

$$\varepsilon = \frac{0,21}{\left(\alpha - \frac{\gamma}{2} + \frac{\beta}{4}\right)} \quad (22)$$

Where, h_{tr} is heat transfer coefficient and it is stated as [46]:

$$h_{tr} = 130 V_T^{-0.06} P_1^{0.8} T_{mix}^{0.4} (\bar{S}_p + 1.4)^{0.8} \quad (23)$$

$\dot{m}_T, \dot{m}_a, \dot{m}_{rg}$ and A_{cyl} are flow rate of total charge (kg/s), air (kg/s), residual gas (kg/s) and total heat transfer area (m²), respectively, they are given as:

$$\dot{m}_T = \dot{m}_a + \dot{m}_f + \dot{m}_{rg}, \quad (24)$$

$$\dot{m}_a = \frac{m_a N}{120} = \frac{\dot{m}_f F_{st}}{\phi}, \quad (25)$$

$$\dot{m}_{rg} = \frac{m_{rg} N}{120} = \dot{m}_a RGF \quad (27)$$

$$A_{cyl} = \pi d L \frac{r}{r-1} + \frac{\pi d^2}{2} \quad (28)$$

Where m_s and m_{rg} are air masses per cycle (kg). RGF is the residual gas fraction. d and r are cylinder bore (m) and compression ratio, respectively. T_{me} and T_w are mean combustion temperature and cylinder wall temperature. C_p and C_v are constant pressure and constant volume specific heats, they could be written for the temperature range of 300-3500 K as below [11]:

$$C_p = 2.506 \cdot 10^{-11} T^2 + 1.454 \cdot 10^{-7} T^{1.5} - 4.246 \cdot 10^{-7} T + 3.162 \cdot 10^{-5} T^{0.5} + 1.3301 - 1.512 \cdot 10^4 T^{-1.5} + 3.063 \cdot 10^5 T^{-2} - 2.212 \cdot 10^7 T^{-3} \quad (29)$$

$$C_v = C_p - R \quad (30)$$

The equations for reversible adiabatic processes (1-2s) and (3-4s) are respectively as follows [47]:

$$C_{V_1} \cdot \ln \left| \frac{T_{2s}}{T_1} \right| = R \ln |r| \quad C_{V_2} \cdot \ln \left| \frac{T_{4s}}{T_3} \right| = R \cdot \ln \left| \frac{1}{r} \right| \quad (31)$$

Where,

$$C_{V_1} = 2.506 \cdot 10^{-11} T_{2s1}^2 + 1.454 \cdot 10^{-7} T_{2s1}^{1.5} - 4.246 \cdot 10^{-7} T_{2s1} + 3.162 \cdot 10^{-5} T_{2s1}^{0.5} + 1.0433 - 1.512 \cdot 10^4 T_{2s1}^{-1.5} + 3.063 \cdot 10^5 T_{2s1}^{-2} - 2.212 \cdot 10^7 T_{2s1}^{-3} \quad (32)$$

$$C_{V_2} = 2.506 \cdot 10^{-11} T_{4s3}^2 + 1.454 \cdot 10^{-7} T_{4s3}^{1.5} - 4.246 \cdot 10^{-7} T_{4s3} + 3.162 \cdot 10^{-5} T_{4s3}^{0.5} + 1.0433 - 1.512 \cdot 10^4 T_{4s3}^{-1.5} + 3.063 \cdot 10^5 T_{4s3}^{-2} - 2.212 \cdot 10^7 T_{4s3}^{-3} \quad (33)$$

$$T_{2s1} = \frac{T_{2s} - T_1}{\ln \frac{T_{2s}}{T_1}} \quad T_{4s3} = \frac{T_{4s} - T_3}{\ln \frac{T_{4s}}{T_3}}, \quad (34)$$

$$\beta = P_3 / P_2 = T_3 / T_2 \quad (35)$$

β is named as pressure ratio. For irreversible conditions, T_2 and T_4 could be written as below:

$$T_2 = \frac{T_{2S} + T_1(\eta_C - 1)}{\eta_C} \quad (36)$$

$$T_4 = T_3 + \eta_E (T_{4S} - T_3) \quad (37)$$

Where η_C and η_E are isentropic efficiencies for the compression and expansion processes, respectively. In this study, the other dimensionless engine design parameters used in the analysis are cycle temperature ratio (α) and cycle pressure ratio (λ). They may be expressed respectively as:

$$\alpha = \frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{T_3}{T_1} = \frac{\lambda}{r} = 1 + \frac{r^{k-1} - 1}{\eta_C} \quad (38)$$

$$\lambda = P_{max} / P_{min} = P_3 / P_1 \quad (39)$$

In the literature, energy losses could be stated as percentage of fuel's energy [14]. In this study, similar approach is used to obtain the energy losses depend on heat transfer to cylinder wall, exhaust, friction and incomplete combustion as below:

$$L_{ht} = \frac{\dot{Q}_{ht}}{\dot{Q}_{fuel}} \times 100, \quad L_{ex} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{fuel}} \times 100,$$

$$L_{fr} = \frac{P_u}{\dot{Q}_{fuel}} \times 100, \quad L_{ic} = (1 - \eta_c) \times 100 \quad (40)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, a new finite time thermodynamic model has been developed to evaluate effective efficiency, effective power and power density of an Otto cycle engine. Parametrical studies have been carried out to investigate the engine design and operating parameters on the performance of OC gasoline engine. The engine properties are given in Table1.

Table1. Engine properties

Engine type	Lambordini
Bore [mm]	72
Stroke [mm]	62
Cylinder Number	2
Stroke Volume [dm ³]	0.54
Maximum Power, [kW]	15
Compression ratio	10.7
Maximum speed [rpm]	3600
Cooling	Water

The variation of effective efficiency, effective power and power density are demonstrated with respect to compression ratio (r) in Figs. 2-6 and 8-13. Fig. 2 shows the effects of cycle temperature ratio on the performance parameters. The maximum effective efficiency, effective power and power density increase with increasing cycle temperature ratio owing to more energy input into cylinder. It is clear from the figure that the amplitude of power density is lower than that of effective power.

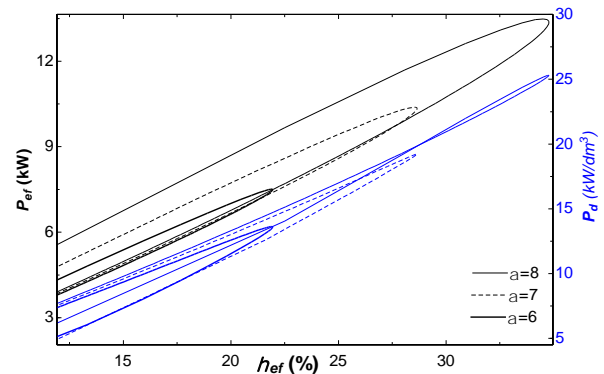


Figure 2. The variation of $P_{ef} - P_d - \eta_{ef}$ with respect to α

Fig. 3 demonstrates the effects of friction coefficient on the engine performance. The friction coefficient is directly related to lubrication oil and friction surfaces. Friction losses increase with increasing the friction coefficient, hence maximum effective efficiency, effective power and power density decrease.

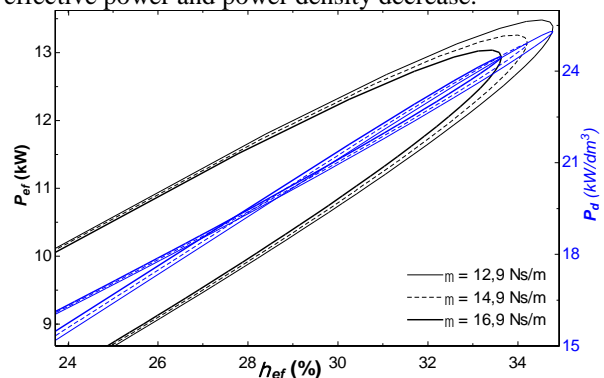


Figure 3. The variation of $P_{ef} - P_d - \eta_{ef}$ with respect to μ

Fig. 4 illustrates the effects of engine speed on the engine performance. As expected, the effective power and power density increase with increasing engine speed. However, the effective efficiency is lower at low engine speeds compared to that at high engine speeds. At high engine speeds, there are no considerable differences between maximum effective efficiencies as the friction losses increase with increasing engine speeds. It is understood that increase ratio of fuel energy given into cylinder slightly is higher compared to that of effective power and power density.

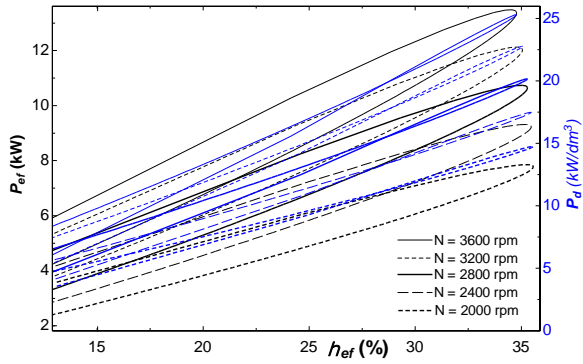


Figure 4. The variation of $P_{ef} - P_d - \eta_{ef}$ with respect to N .

Fig. 5a and 5b illustrate the effects of mean piston speed on the engine performance. In these figures, two conditions are determined as constant engine speed condition (the 1. condition) and constant stroke length condition (the 2. condition). It is clear that the effective power, power density and effective efficiency increase together with increasing mean piston speed at the 1. condition since engine dimensions (stroke length and bore) enhance. However, while the effective efficiency decreases, the effective power and power density increase with increasing mean piston speed at the 2. condition as engine speed increases. It is obvious that power density change of the 2. condition is grater compared to that of 1. condition since engine dimensions increase with increasing effective power.

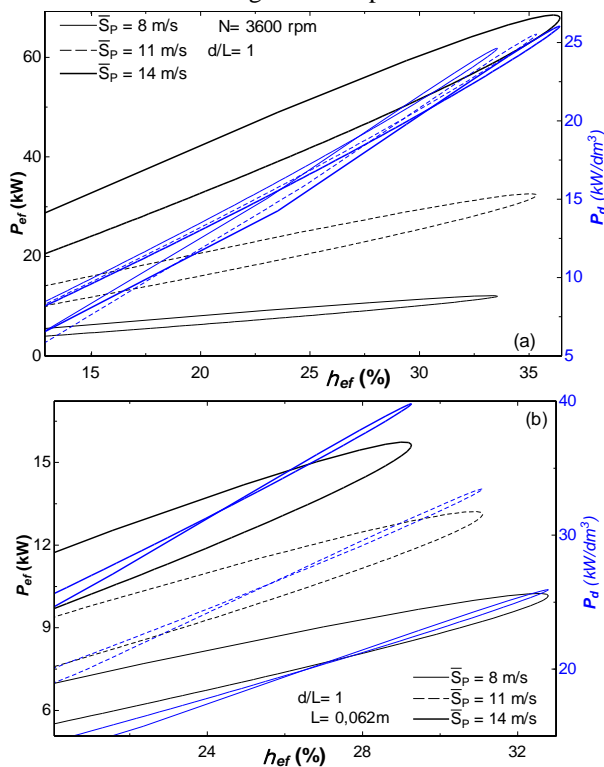


Figure 5. The variation of $P_{ef} - P_d - \eta_{ef}$ with respect to \bar{S}_p at constant a) N , b) L .

Fig. 6 shows the effects of stroke length on the engine performance. It is clear from the figure that the effective

power increases while the effective efficiency and power density decrease with increasing stroke length. The main reason of this result is that the friction losses and engine dimensions increase with respect to stroke length. Although engine power increases, engine dimensions more increase. Also, we can see that the ratio of power change is higher than that of power density.

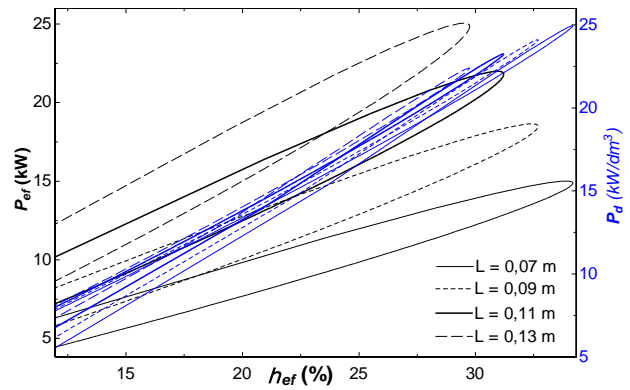


Figure 6. The variation of $P_{ef} - P_d - \eta_{ef}$ with respect to L .

Figs. 7a and 7b demonstrate the effects of cycle pressure ratio and engine speed on the engine performance for constant compression ratio condition. Cycle pressure ratio has positive effect on the engine performance parameters. They increase with increasing cycle pressure ratio. The engine power and power density increase with increasing engine speed. However, the effective efficiency increases to a specified value of engine speed and then decreases. It is clear that optimum engine speed which provides the maximum effective efficiency increases with increasing cycle pressure ratio.

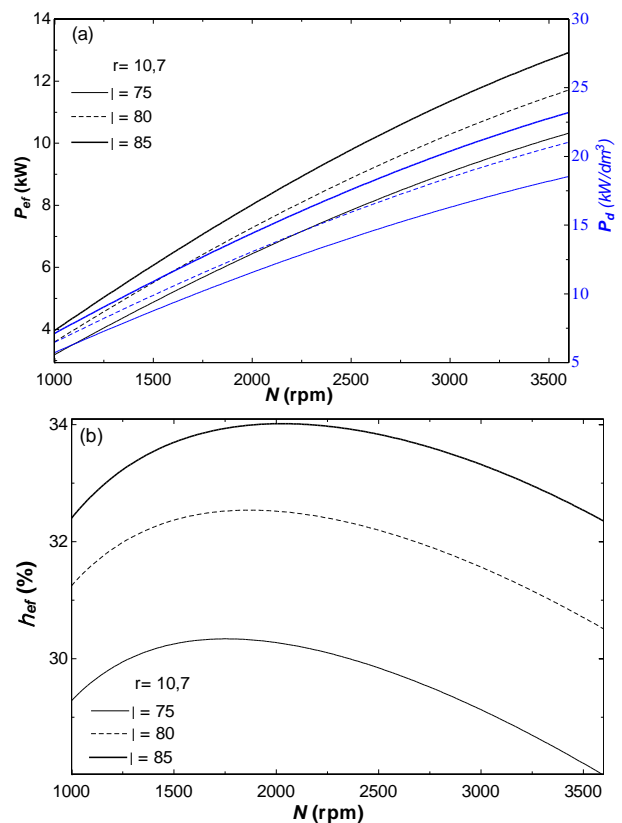


Figure 7. The variation of a) $P_{ef} - P_d$ and b) η_{ef} with respect to N and λ .

Fig. 8a and 8b show the effects of intake temperature on the engine performance. Two main conditions have been described as constant cycle temperature ratio condition (the 1. condition) and constant maximum combustion temperature condition (the 2. condition) in these figures. At the 1. condition, the maximum effective power, power density and effective efficiency increase while intake temperature increases since maximum combustion temperature and energy input increase. However, the maximum engine performance decreases with increasing intake temperature at the 2. condition as air mass introduced into cylinder decreases.

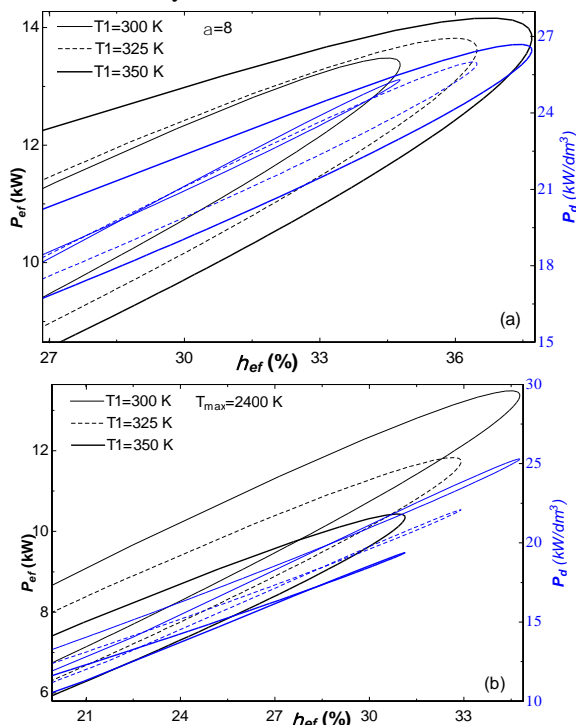


Figure 8. The variation of $P_{ef} - P_d - \eta_{ef}$ with respect to T_1 at constant a) α and b) T_{max} .

Fig. 9a, 9b, 9c and 9d illustrate the effects of equivalence ratio and compression ratio on the cycle temperature ratio and engine performance parameters. As can be seen from the figures, cycle temperature ratio, effective power, power density and effective efficiency increase with increasing compression ratio. However, they increase to a determined value and then begin to reduce with respect to increasing equivalence ratios. The reason for lower values of them at lower and higher equivalence ratios is that lower fuel energy input occurs at lower values of equivalence ratio. In the case of higher values of it, combustion efficiency decreases due to high rates of fuel mass input. It is clear that there are optimum values of equivalence ratio which provides maximum cycle temperature ratio, effective power, power density and effective efficiency. Their optimum values are obtained at different equivalence ratios. The maximum values of

cycle temperature ratio, effective power and power density are between 1 and 1.2 of equivalence ratio while the maximum value of effective efficiency is between 0.8 and 1 of that.

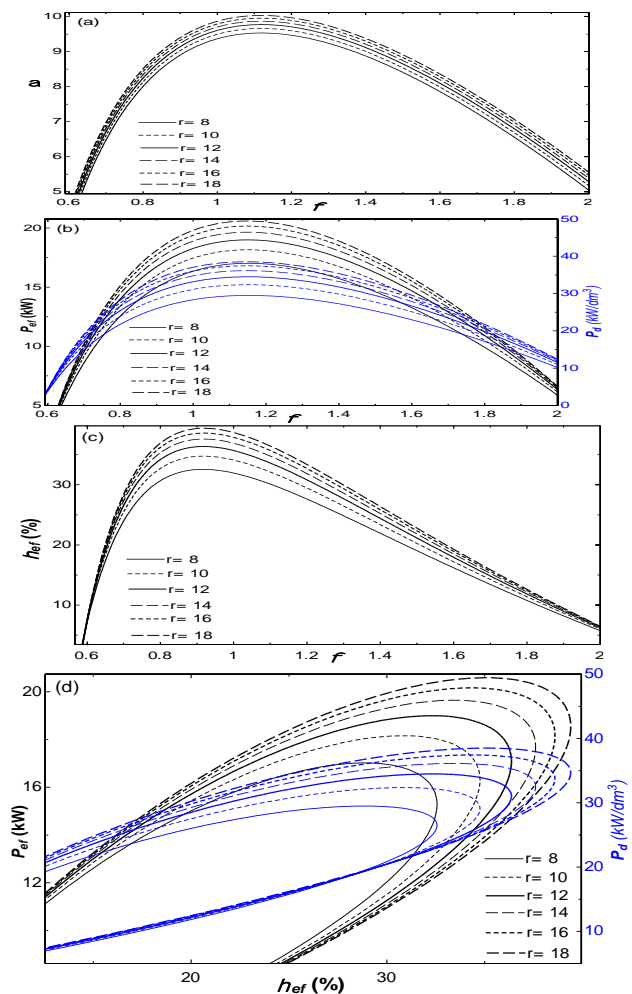


Figure 9. The variation of a) α , b) $P_{ef} - P_d$, c) η_{ef} and d) $P_{ef} - \eta_{ef}$ with respect to r and ϕ .

Fig. 10 shows the influence of equivalence ratio on the engine performance. Similar to previous figures, the maximum effective efficiency, effective power and power density increase to particular values of equivalence ratio and then start to decrease. The maximum effective efficiency is seen when equivalence ratio is equal to 0.9 while the maximum effective power is seen when equivalence ratio happens 1.2.

The effects of cylinder wall temperature on the engine performance is shown in Fig.11. There are no considerable changes in maximum effective power and power density depend on cylinder wall temperature. However, maximum effective efficiency increases with increasing cylinder wall temperature as heat transfer loss decreases.

Fig.12 demonstrates the influence of intake pressure on the engine performance. It is known that more air mass is introduced into the cylinder at higher pressure conditions.

Therefore, engine performance raises with increasing intake pressure.

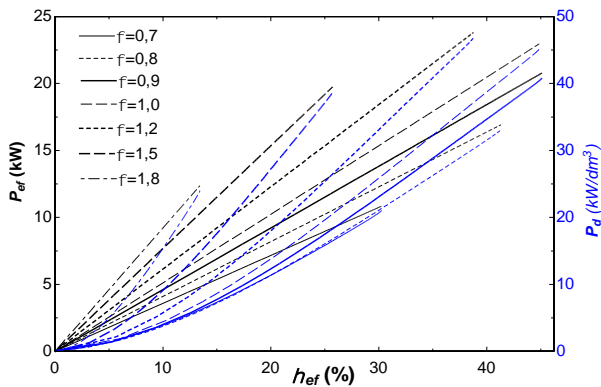


Figure 10. The variation of $P_{ef} - P_d - \eta_{ef}$ with respect to ϕ .

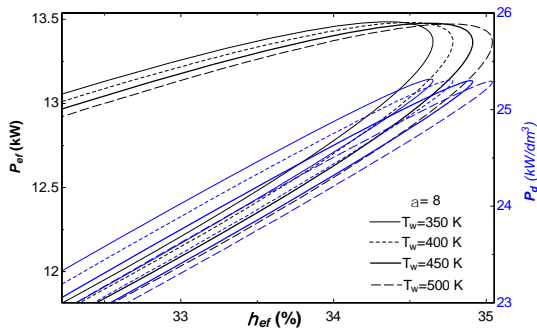


Figure 11. The variation of $P_{ef} - P_d - \eta_{ef}$ with respect to T_w .

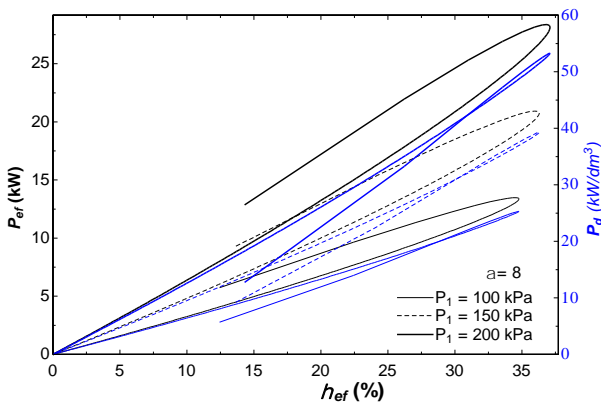


Figure 12. The variation of $P_{ef} - P_d - \eta_{ef}$ with respect to P_1 .

The influence of ratio of bore to stroke length (d/L) on the engine performance is shown in Fig.13. It is obvious that the engine performance increases with increasing d/L owing to increasing engine dimensions.

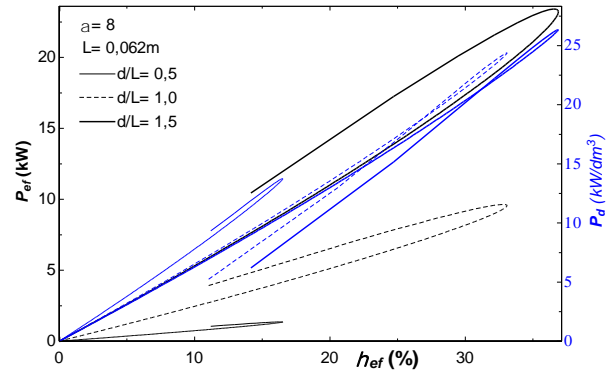
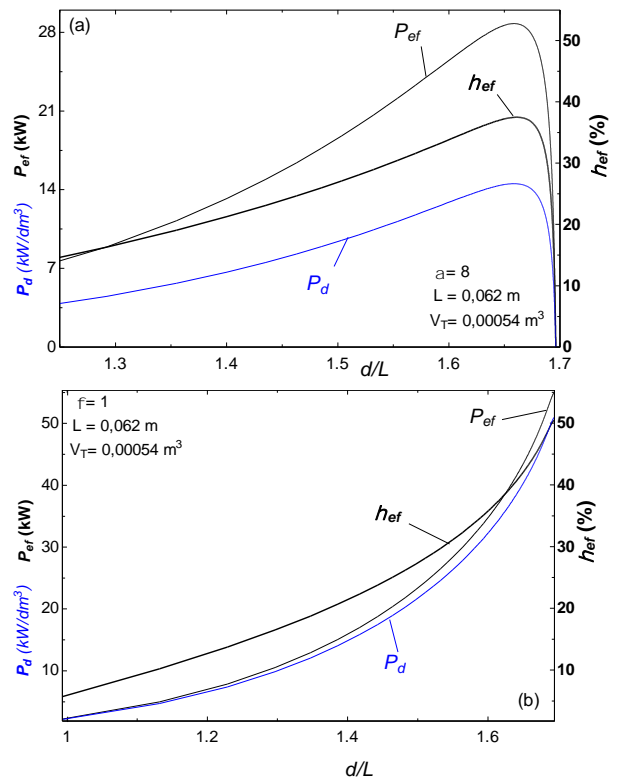


Figure 13. The variation of $P_{ef} - P_d - \eta_{ef}$ with respect to d/L .

Fig. 14 shows the effects of d/L on the engine performance at constant cylinder volume for different conditions. In this figures, three conditions are determined as constant cycle temperature ratio and stroke length condition (the 1. condition); constant equivalence ratio and stroke length condition (the 2. condition); constant equivalence ratio and compression ratio condition (the 3. condition). At the 1. condition, the effective power, power density and effective efficiency increase to a specified value and then begin to abate with increasing d/L . At the 2. and 3. conditions, the effective power, power density and effective efficiency raise with increasing d/L .



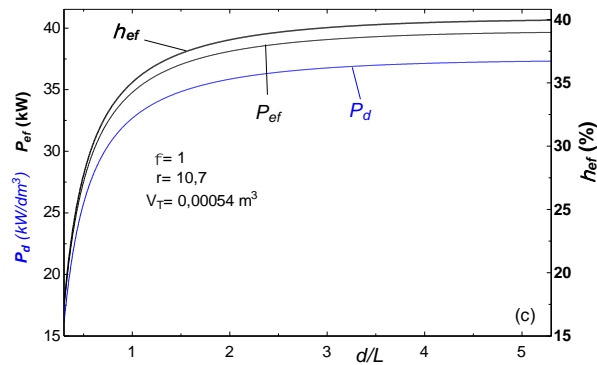


Figure 14. The effects of d/L on P_{ef} - P_d - η_{ef} variation at constant a) α and L , b) ϕ and L , c) ϕ and r .

Fig. 15 illustrate the effects of compression ratio on losses as fuel's energy. In order to investigate the energy losses, two conditions are determined as constant cycle temperature ratio condition (the 1. condition) and constant equivalence ratio condition (the 2. condition). Incomplete combustion loss (L_{ic}) and heat transfer loss (L_{ht}) increase whilst exhaust energy loss (L_{ex}) decreases and friction loss (L_{fr}) remains constant with increasing compression ratio at the 1. condition. Total cylinder volume and equivalence ratio change with respect to changing of compression ratio at this condition. However, L_{ic} and L_{fr} are constant, L_{ht} increases and L_{ex} decreases with respect to increasing compression ratio at the 2. condition. L_{ic} does not change at constant equivalence ratio because combustion efficiency is constant. Total cylinder volume increases with increasing compression ratio, hence L_{ht} increases and L_{ex} decreases. L_{fr} changes with respect to stroke length and engine speed which are constant at both of the conditions. Therefore, L_{fr} does not change at the 2. condition due to constant fuel energy input. At the 1. condition, it increases since fuel energy input decreases with increasing compression ratio.

4. CONCLUSION

In this study, the effects of the engine design and operating parameters on the effective power, power density and effective efficiency of an OC gasoline engine have been examined by using a realistic model based on the FTT. A comprehensive parametrical study has been carried out. In the parametrical studies, the effects of cycle temperature ratio (α), cycle pressure ratio (λ), friction coefficient (μ), engine speed (N), mean piston speed (\bar{S}_p), stroke length (L), inlet temperature (T_1), inlet pressure (P_1), equivalence ratio (ϕ), compression ratio (r) and bore-stroke length ratio (d/L) on the effective power, power density and effective efficiency have been examined. The results show that the effective power, power density and effective efficiency increase with increasing cycle temperature ratio (α), cycle pressure ratio (λ), inlet pressure (P_1).

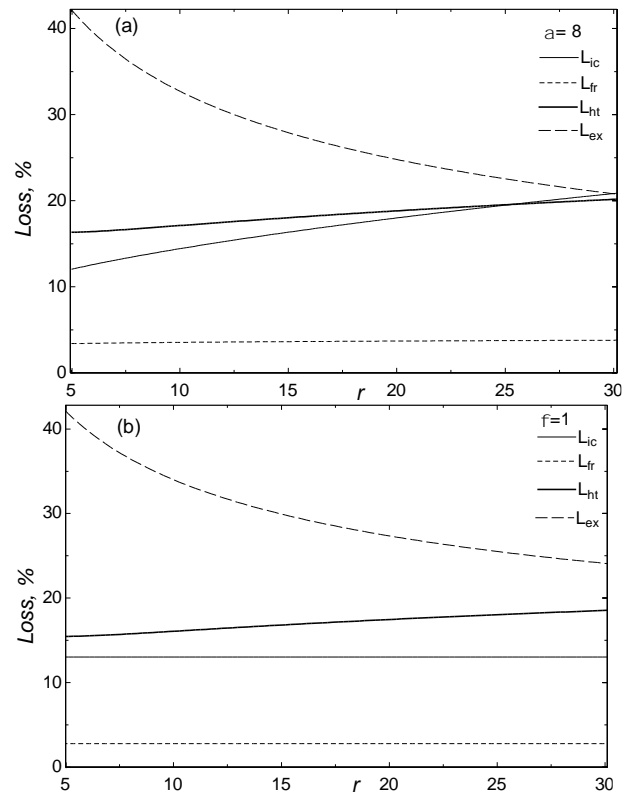


Figure 15. The variation of energy loss percentages with respect to r for constant a) α and b) ϕ .

The engine performance decreases with friction coefficient (μ). On the other hand, the effective power, power density and effective efficiency increase with increasing mean piston speed for constant engine speed conditions, however, as the effective power and power density increase, the effective efficiency decreases with increasing mean piston speed for constant stroke length conditions. While the effective power and power density increase, the effective efficiency decreases with increasing stroke length and engine speed. The effective power, power density and effective efficiency increase up to a determined value and then start to decrease with increasing equivalence ratio and compression ratio. The energy losses with respect to incomplete combustion and heat transfer increase, as exhaust output losses decrease with increasing compression ratio for constant α conditions. At this condition, friction losses are constant. However, the losses depend on friction and incomplete combustion are constant, while exhaust output losses decrease and heat transfer losses increase at the constant equivalence ratio conditions. The results are scientifically valuable and therefore, they can be assessed by gasoline engine designers.

Nomenclature

A	heat transfer area (m ²)
ASOC	Air-standard Otto cycle
C _v	constant volume specific heat (kJ/kg.K)
C _p	constant pressure specific heat (kJ/kg.K)
d	bore (m)
F	fuel-air ratio
FTT	finite-time thermodynamic
h _{tr}	heat transfer coefficient (W/ m ² K)
H _u	lower heat value of the fuel (kJ/kg)
ICE	Internal combustion engines
IOC	Irreversible Otto cycle
l	loss
L	stroke length (m), energy loss percentage (%)
m	mass (kg)
\dot{m}	time- dependent mass rate (kg/s)
N	engine speed (rpm)
OC	Otto cycle
P	pressure (bar), power (kW)
\dot{Q}	rate of heat transfer (kW)
r	compression ratio
R	gas constant (kJ/kg.K)
RGF	residual gas fraction
RP	realistic power
RPD	realistic power density
S	stroke (m)
\bar{S}_p	mean piston speed (m/s)
T	temperature (K)
v	specific volume (m ³ /kg)
V	volume (m ³)

Greek letters

α	cycle temperature ratio, atomic number of carbon
β	pressure ratio, atomic number of hydrogen
δ	atomic number of nitrogen
ϕ	equivalence ratio
γ	atomic number of oxygen
λ	cycle pressure ratio
μ	friction coefficient (Ns/m)
ρ	density (kg/m ³)

 η_C Isentropic efficiency of compression η_E Isentropic efficiency of expansion*Subscripts*

1	at the beginning of the compression process
a	air
c	combustion, clearance
cyl	cylinder
ef	effective
f	fuel
fr	friction
ht	heat transfer
i	initial condition
ic	incomplete combustion
in	input
l	loss
max	maximum
me	mean
min	minimum
mix	mixture
out	output
rg	residual gas
s	stroke, isentropic condition
st	stoichiometric
t	total
w	cylinder walls

REFERENCES

- [1] Mozurkewich M. and Berry R. S., "Optimal Paths for Thermodynamic Systems: The Ideal Otto Cycle", *J. Appl. Phys.*, 53(1): 34–42, (1982).
- [2] Wu C. and Blank D. A., "The Effects Of Combustion on a Work-Optimized Endoreversible Otto Cycle", *J. Inst. Energy*, 65: 86–89, (1992).
- [3] Wu C. and Blank D. A., "Optimization of the Endoreversible Otto Cycle with Respect to Both Power and Mean Effective Pressure", *Energy Convers. Manage.*, 34: 1255–1259, (1993).
- [4] Chen L., Wu C., Sun F. and Cao S., "Heat Transfer Effects on the Net Work Output and Efficiency Characteristics For An Air standard Otto Cycle", *Energy Convers. Manage.*, 39: 643–648, (1998).
- [5] Wu C., Puzinauskas P. V. and Tsai J. S., "Performance analysis and optimization of a supercharged Miller cycle Otto engine", *Appl. Therm. Eng.*, 23: 511–521, (2003).
- [6] Durmayaz A., Sogut O. S., Sahin B. and Yavuz H., "Optimization of thermal systems based on finite-time thermodynamics and thermoeconomics", *Prog. Energ. Combust. Sci.*, 30: 175–217, (2004).

- [7] Ge Y., Chen L., Sun F. and Wu C., "Thermodynamic Simulation of Performance of an Otto Cycle with Heat Transfer and Variable Specific heats for the Working Fluid", *Int. J. Therm. Sci.*, 44(5): 506–511, (2005).
- [8] Ge Y., Chen L., Sun F. and Wu C., "The Effects of Variable Specific-Heats of the Working Fluid on the Performance of an Irreversible Otto cycle", *Int. J. Exergy*, 2(3): 274–283, (2005).
- [9] Chen J., Zhao Y. and He J., "Optimization Criteria for the Important Parameters of an Irreversible Otto Heat-Engine", *Appl. Energy*, 83: 228-238, (2006).
- [10] Ozsoysal O. A., "Heat Loss as a Percentage of the Fuel's Energy in Air Standard Otto and Diesel Cycles", *Energy Convers. Manage.*, 47(7-8): 1051–1062, (2006).
- [11] Ge Y., Chen L., Sun F. and Wu C., "Finite-Time Thermodynamic Modelling and Analysis of an Irreversible Otto-Cycle", *Appl. Energy*, 85: 618-624, (2008).
- [12] Hou S. S., "Comparison of the Performances of Air Standard Atkinson and Otto Cycles with Heat-Transfer Considerations", *Energy Convers. Manage.*, 48(5): 1683–1690, (2007).
- [13] Abu-Nada E., Al-Hinti I., Akash B. and Al-Sarkhi., "Thermodynamic analysis of spark-ignition engine using a gas mixture model for the working fluid", *Int. J. Energy Res.* 31: 1031–1046, (2007).
- [14] Lin J. C. and Hou S. S., "Effects of Heat Loss As Percentage of Fuel's Energy, Friction And Variable Specific Heats Of Working Fluid On Performance of Air Standart Otto Cycle", *Energy Convers. Manage.*, 49: 1218–1227, (2008).
- [15] Lin J. C and Hou S. S., "Performance analysis of an air-standard Miller cycle with considerations of heat loss as a percentage of fuel's energy, friction and variable specific heats of working fluid", *Int. J. Therm. Sci.*, 47: 182–191, (2008).
- [16] Wang H., Liu S. and He J., "Performance analysis and parametric optimum criteria of a quantum Otto heat engine with heat transfer effects", *Appl. Therm. Eng.*, 29: 706-711, (2009).
- [17] Ust Y., Sahin B. and Safa A., "The Effects of Cycle Temperature and Cycle Pressure Ratios on the Performance of an Irreversible Otto Cycle", *Acta Phys. Pol. A*, 120: 412–416, (2011).
- [18] Cesur I., Parlak A., Ayhan V., Gonca G. and Boru B., "The effects of electronic controlled steam injection on spark ignition engine", *Appl. Therm. Eng.*, 55: 61–68, (2013).
- [19] Shu G., Pan J. and Wei H., "Analysis of onset and severity of knock in SI engine based on in-cylinder pressure oscillations", *Appl. Therm. Eng.*, 51(1-2): 1297-1306, (2013).
- [20] Ghareghani A., Koochak M., Mirsalim M. and Yusaf T., "Experimental investigation of thermal balance of a turbocharged SI engine operating on natural gas", *Appl. Therm. Eng.* 60(1-2): 200-207, (2013).
- [21] Irimescu A., Tornatore C., Marchitto L. and Merola S. S., "Compression ratio and blow-by rates estimation based on motored pressure trace analysis for an optical spark ignition engine", *Appl. Therm. Eng.*, 61(2): 101-109, (2013).
- [22] Boretti A., "Water injection in directly injected turbocharged spark ignition engines", *Appl. Therm. Eng.*, 52: 62-68, (2013).
- [23] Xie F. X., Li X. P., Wang X.C., Su Y. and Hong W., "Research on using EGR and ignition timing to control load of a spark-ignition engine fueled with methanol", *Appl. Therm. Eng.*, 50(1): 1084-1091, (2013).
- [24] Pan M., Shu G., Wei H., Zhu T., Liang Y. and Liu C., "Effects of EGR, compression ratio and boost pressure on cyclic variation of PFI gasoline engine at WOT operation", *Appl. Therm. Eng.*, 64(1-2): 491-498, (2014).
- [25] Li Z. H., He B. Q. and Zhao H., "Application of a hybrid breakup model for the spray simulation of a multi-hole injector used for a DISI gasoline engine", *Appl. Therm. Eng.* 65(1-2): 282-292, (2014).
- [26] Mendiburu A. Z., Roberts J. J., Carvalho J. A. and Silveira J. L., "Thermodynamic analysis and comparison of downdraft gasifiers integrated with gas turbine, spark and compression ignition engines for distributed power generation", *Appl. Therm. Eng.* 66(1-2): 290-297, (2014).
- [27] Merola S. S., Marchitto L., Tornatore C., Valentino G. and Irimescu A., "Optical characterization of combustion processes in a DISI engine equipped with plasma-assisted ignition system", *Appl. Therm. Eng.* 69(1-2): 177-187, (2014).
- [28] Pradeep V., Bakshi S. and Ramesh A., "Scavenging port based injection strategies for an LPG fuelled two-stroke spark-ignition engine", *Appl. Therm. Eng.*, 67(1-2): 80-88, (2014).
- [29] Najjar Y. S. H., Ghazal O. H. and AL-Khishali K. J. M., "Performance improvement of green cars by using variable-geometry engines", *J. Energy Ins.*, 87(4): 393-400, (2014).
- [30] Gürbüz H., Akçay I. H. and Buran D., "An investigation on effect of in-cylinder swirl flow on performance, combustion and cyclic variations in hydrogen fuelled spark ignition engine", *J. Energy Ins.*, 87(1): 1-10, (2014).
- [31] Hanipah M. R., Mikalsen R. and Roskilly A. P., "Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications", *Appl. Therm. Eng.*, 75: 493-503, (2015).
- [32] Wang T., Li W., Jia M., Liu D., Qin W. and Zhang X., "Large-eddy simulation of in-cylinder flow in a DISI engine with charge motion control valve: Proper orthogonal decomposition analysis and cyclic variation", *Appl. Therm. Eng.* 75: 561-574, (2015).
- [33] Cucchi M. and Samuel S., "Influence of the exhaust gas turbocharger on nano-scale particulate matter emissions from a GDI spark ignition engine", *Appl. Therm. Eng.* 76: 167-174, (2015).
- [34] Calam A., Solmaz H., Uyumaz A., Polat S., Yilmaz E and İçingür Y., "Investigation of usability of the fusel oil in a single cylinder spark ignition engine", *J. Energy Ins.*, 88(3): 258-265, (2015).
- [35] Wu C., Deng K. and Wang Z., "The effect of combustion chamber shape on cylinder flow and lean combustion process in a large bore spark-ignition CNG engine", *J. Energy Ins.*, 89(2): 240-247, (2016).
- [36] Beccari S., Pipitone E. and Genchi G., "Knock onset prediction of propane, gasoline and their mixtures in

- spark ignition engines”, *J. Energy Ins.*, 89(1): 101-114, (2016).
- [37] Gonca G., Sahin B., Ust Y. and Parlak A., “Comprehensive performance analyses and optimization of the irreversible thermodynamic cycle engines (TCE) under maximum power (MP) and maximum power density (MPD) conditions”, *Appl. Therm. Eng.* 85: 9-20, (2015).
- [38] Bagirov H., Can I., Oner C., Sugoza I. and Kapicioglu A., “Experimental investigation the effects of mixture impoverished on the specific fuel consumption, engine performance and exhaust emissions a pre-combustion chamber gasoline engine”, *J. Energy Ins.*, 88(3): 205-208, (2015).
- [39] Najjar Y. S. H. and Amer M. M. B., “Using a smart device and neuro-fuzzy control system as a sustainable initiative with green cars”, *J. Energy Ins.*, 89(2): 256-263, (2016).
- [40] Gonca G., Sahin B., Ust Y. and Parlak A., “A Study on Late Intake Valve Closing Miller Cycled Diesel Engine”, *Arab. J. Sci. Eng.*, 38: 383-293, (2013).
- [41] Ebrahimi R., “Performance analysis of an irreversible Miller cycle with considerations of relative air–fuel ratio and stroke length”, *Appl. Math. Model.*, 36: 4073-4079, (2012).
- [42] Ebrahimi R., “Thermodynamic modeling of performance of a Miller cycle with engine speed and variable specific heat ratio of working fluid”, *Computers and Mathematics with Applications*, 62: 2169-2176, (2011).
- [43] Ebrahimi R., “Effects of mean piston speed, equivalence ratio and cylinder wall temperature on performance of an Atkinson engine”, *Mathematical and Computer Modelling*, 53: 1289-1297, (2011).
- [44] EES Academic Professional Edition, V.9.701-3D, USA, *F-Chart Software*, (2014).
- [45] Ferguson C. R., “Internal combustion engines – applied thermosciences”, *John Wiley & Sons Inc.*, New York, (1986).
- [46] Hohenberg G. “Advanced Approaches for Heat Transfer Calculations”, *SAE*, 790-825, (1979).
- [47] Lin J., Chen L., Wu C. and Sun F., “Finite-Time Thermodynamic Performance of a Dual Cycle”, *Int. J. Energy Res.*, 23(9): 765–772, (1999).
- [48] Gonca G., “Effects of engine design and operating parameters on the performance of a spark ignition (SI) engine with steam injection method (SIM)”, *Appl. Math. Model.*, In press., (2017).

Modeling and Analysis of a Microfluidic Capillary Valve

Ender YILDIRIM*

Çankaya University, Mechanical Engineering Department

(Received : 07.07.2016 ; Accepted : 24.10.2016)

ABSTRACT

Here, a numerical model for analysis of a capillary valve for use in microfluidic devices was presented. Capillary valves are preferred especially in passive microfluidic systems, where the capillary forces dominate the liquid motion, to manipulate the flow. The capillary valve in this work, was formed by the sudden expansion of a rectangular microchannel to an opening, whose depth and width are larger than the height and the width of the channel respectively. Noting that there was no available analytical model to determine the pressure capacity of such valves, a numerical model based on energy minimization was utilized. Free software Surface Evolver was used to solve the model. Dependence of the pressure capacity on the contact angle of the working liquid on the channel material was investigated. It was found that the pressure capacity of the valves would be maximum if the contact angle on all surfaces is 90° . Accordingly, the valves could withstand approximately 2.5 kPa for $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ channels when the contact angle was 90° . The model was verified by comparing the results with those available in the literature.

Keywords: Microfluidic, Capillary Valve, Pressure Capacity, Contact Angle.

ÖZ

Burada, mikroakışkan cihazlarda kullanılan kılcal valflerin analizi için bir numerik model sunulmuştur. Kılcal valfler, özellikle kılcal kuvvetlerin baskın olduğu pasif mikroakışkan sistemlerde, akışı yönlendirmek için tercih edilirler. Bu çalışmadaki kılcal valf, dikdörtgen kesitli bir mikrokanalın, derinliği ve genişliği kanalın yüksekliği ve genişliğinden daha fazla olan bir açıklığa doğru aniden genişlemesi ile oluşmaktadır. Bu şekildeki valflerin basınç kapasitesini belirlemek için herhangi bir analitik modelin bulunmaması göz önünde bulundurularak, enerji enazlamaya dayalı bir numerik model kullanılmıştır. Modelin çözümü için ücretsiz bir yazılım olan Surface Evolver kullanılmıştır. Basınç kapasitesinin, çalışma sıvısının kanal malzemesi üzerindeki temas açısı ile ilişkisi incelenmiştir. Tüm yüzeylerde temas açısının 90° olması durumunda basınç kapasitesinin en yüksek olacağı belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ kesitli kanallar için temas açısı 90° olduğunda valfler yaklaşık 2.5kPa'ya çıkabilmektedir. Model, sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ile doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikroakışkan, Kılcal Valf, Basınç Kapasitesi, Temas Açısı.

1. INTRODUCTION

Microfluidics relates to handling minute amounts of liquids (microliters to nanoliters) within channels of characteristic dimensions in the order of 10^1 - $10^2 \mu\text{m}$. Due to the fabrication methods, the channels in microfluidic devices often have rectangular cross section. Microfluidics is commonly perceived as an enabling technology especially for chemical and biological applications. In these applications, it is often required to manipulate the flow of different reagents and/or samples on the microfluidic device, commonly called as the lab-on-a-chip. For this purpose, researchers have developed various active or passive microvalves [1]. Among these, especially the capillary valves are of interest since they are typically passive and hence easy to operate, and they often do not involve any moving part, thus they are easy to implement.

Capillary valves function as pressure barriers, where an advancing meniscus stops due to an acute change in the hydrophilicity of the surface or in the channel geometry.

In ref. [2, 3] hydrophobic coatings were patterned at the bottom of microchannels, where the liquid advancing was blocked due to decreased tension at the solid coating-liquid interface. On the other hand, in ref. [4–6], diverging channels were utilized as capillary valves. Here, sudden expansion of the channel at diverging section causes the liquid meniscus to be pinned at the beginning of the expansion. In these studies, the expansions were implemented by simply widening the microchannel while keeping the channel height constant. Sudden expansion by increasing the height of the channel was also reported in the literature [7]. An interesting and easy-to-implement example of capillary valves was presented in ref. [8], where the side wall of the microchannel were patterned to define an acute change in the cross section. Alternatively, in ref. [9] ridges were patterned at the bottom of the microchannel, which acted as pressure barriers.

In this paper, capillary valves utilizing an abrupt increase in the cross-sectional area were considered (Figure 1a-b). Basically, when a meniscus advancing in a microchannel faces an opening (capillary valve) with a cross sectional area greater than that of the channel, the sharp bend on the channel boundary causes a sudden increase in the apparent contact angle ($90^\circ + \theta_1$) as illustrated on Figure 1c, considering the meniscus shape at the onset of

*Corresponding Author

e-mail: endery@canakaya.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 487-494

overflow). For the meniscus to advance through the opening, pressure must develop within the liquid, which in turn stretches the meniscus. After a certain pressure (henceforth it will be called the *pressure capacity*), the meniscus overflows the capillary valve. This explanation of the capillary valve overflow is often called as capillary burst. However, since the breaching of the capillary valve is a transient process involving the stretching of the meniscus rather than a sudden bursting, *overflow* term will be used instead of bursting in this paper. Figure 1c illustrates this overflow process.

Examining the literature yields that there is still no analytical model to accurately determine the pressure capacity of these particular capillary valves [10]. Besides, available numerical models describing the behavior of these capillary valves do not consider the overflow process. Thus, a model describing the meniscus geometry during overflow of the capillary valve and corresponding pressure capacity is highly needed. In this paper, a numerical method, which models the meniscus geometry during overflow was presented. The model also relates the geometry of the meniscus to the pressure capacity of the capillary valve.

Considering that these capillary valves could be fabricated by using different techniques and materials, the model was first utilized to investigate the effect of wetting properties of the channel material (hence the contact angle) on the pressure capacity of the valves. After determining the proper contact angle for the best performing valves (corresponding to the highest pressure capacity), effect of channel dimensions was examined by simulating a range of channels with varying depth and width. Finally, the results were compared to experimental and theoretical values reported previously in the literature to verify the method presented here.

2. MODEL

For the capillary valve of interest to be functional, Concus-Finn criterion [11, 12] (Equation 1), which relates the bend angle and the contact angle of the liquid on the channel material and on the cover material (β , θ_1 , and θ_2 respectively on Figure 1c), must be met.

$$\beta \geq 180^\circ - (\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

Concus-Finn criterion in Equation 1 was originally developed for describing behavior of meniscus in wedge. However, it was shown in ref. [12] that this relation can as well be used to describe meniscus stretching on pressure barriers similar to the one illustrated in Figure 1a owing to the wedge-like shape formed by the channel cover and the front wall on the opening (Figure 1a).

Although, 2D illustration in Figure 1c describes the basics of the operation, it does not provide an information about the pressure capacity of the capillary valve. The pressure developed at any capillary interface is given by Young-Laplace law (Equation 2), which states that the pressure across a capillary interface is proportional to mean curvature of the interface and the proportionality constant is the surface tension.

$$P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

Here, P is the pressure across the capillary interface, σ is the surface tension, R_1 and R_2 are the principle radii describing the curvature of the meniscus. It should be noted that, principle radii of curvature can only be determined through examining the 3D shape of the meniscus. Therefore, a 3D analysis must be carried out to fully understand the overflow behavior of the capillary valves and their respective pressure capacities.

Various analytical approaches to estimate the pressure capacity in similar capillary valves, where diverging channels with uniform height, have been presented in the literature [4–6]. However, there is no analytical model available for the valves considered in this paper. Moreover, some of the existing models for the other capillary valves do not consider the *corner filling* effect during overflow, which was first described by Concus and Finn in ref. [11]. Depending on the contact angle of the liquid on the channel material and cover material (θ_1 and θ_2 respectively in Figure 1c), the liquid tends to advance along the corner formed by the front wall and the top wall (stated as corner filling in Figure 1d) [13, 14]. Depending on the contact angles θ_1 and θ_2 , corner filling effect may result in very intricate meniscus shapes during overflow, which is illustrated in Figure 1d.

The author had previously developed an analytical model to describe the 3D shape of a meniscus overflowing a particular type of capillary valve; phaseguide [9], which is in the form of a shallow ridge located at the bottom of a microchannel. In case of phaseguide overflow, meniscus advancing is only in the direction of the channel axis. On the other hand, since meniscus advancing during overflow is not unidirectional in case of the capillary valves considered in this paper (as illustrated in Figure 1d), this model cannot be used here. Instead, a numerical approach was utilized in this paper to determine the meniscus shape during overflow of the capillary valve and respective pressure capacity.

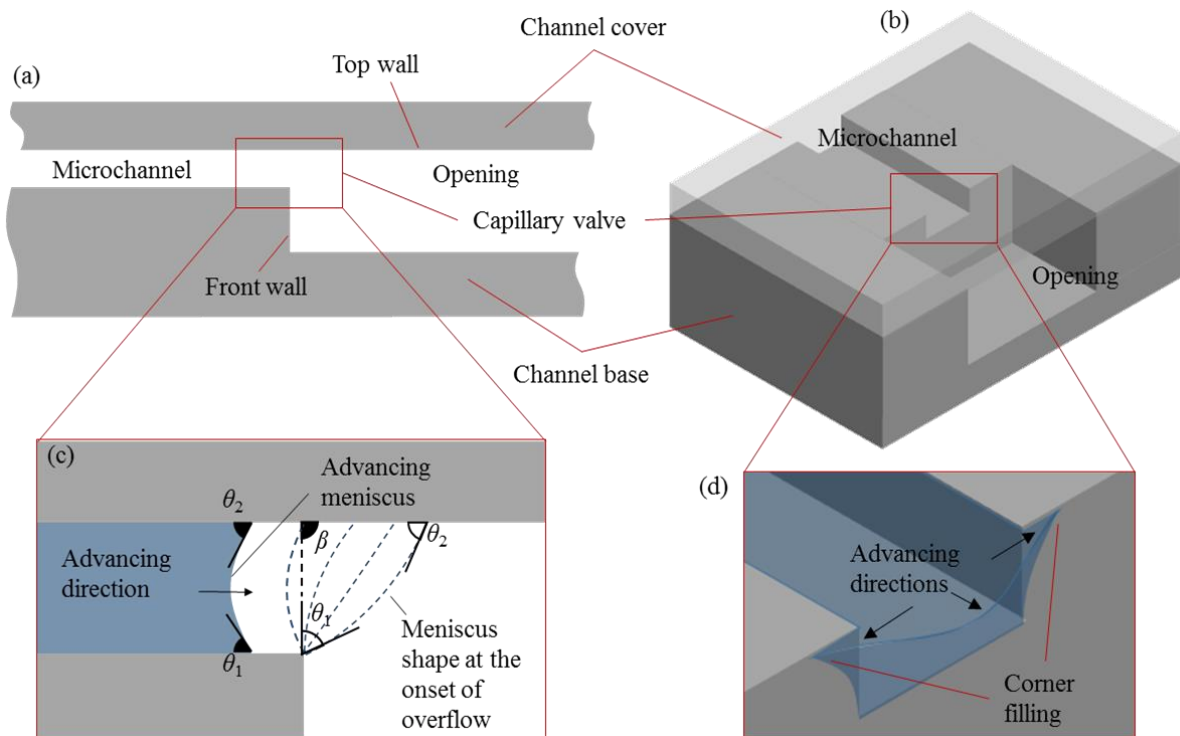


Figure 1. Capillary valve considered in this paper. (a) Profile view and (b) isometric view of the valve. Intersection of a rectangular microchannel and an opening, whose depth and width are larger than the height and the width of the channel respectively, forms the microchannel. A meniscus advancing in the microchannel gets pinned at the edges of this intersection. (c) Profile view illustrating the 2D understanding of the meniscus pinning and the overflow. (d) Isometric view of the meniscus pinned at the capillary valve, showing the corner filling effect and the meniscus advancing directions in 3D explanation of overflow.

Here, a freely available software – the Surface Evolver – was used to determine the meniscus shape. The Surface Evolver developed by K.A. Brakke, computes the shapes of the surfaces under surface tension, gravity, or other forms by minimizing the surface energy [15]. For this purpose, the Surface Evolver utilizes a finite-element approach, where the surface is divided into triangular facets. Surface energy (E) of a facet under surface tension, gravity, and a pressure difference across the facet can be stated as [15]:

$$E = \int_S \sigma \mathbf{k} \cdot d\mathbf{S} + g\rho \int_S \frac{z^2}{2} \mathbf{k} \cdot d\mathbf{S} - P \int_S z \mathbf{k} \cdot d\mathbf{S} \quad (3)$$

where σ is the surface tension, g is the gravitational acceleration, ρ is the density of the liquid, P is the pressure across the facet, \mathbf{k} is the surface normal vector defining the facet, z is the nodal position defining the facet, $d\mathbf{S}$ is the differential facet area, and S is the surface area of the interface. Here, it should be noted that although the gravity acts on the body instead of the surface, gravitational energy can be calculated through surface integral by utilizing divergence theorem [15]. On the other hand, considering that gravity often has a negligible effect due to the scale of the microfluidics, the second term on the right-hand side of Equation 3 was neglected in computation. Hence the surface energy becomes

$$E = \int_S \sigma \mathbf{k} \cdot d\mathbf{S} - P \int_S z \mathbf{k} \cdot d\mathbf{S} \quad (4)$$

The Surface Evolver minimizes this energy given in Equation 4 by incrementally moving the vertices of the facets until the change in the surface energy is less than a specified error. Thus, the pressure across the meniscus (P) can be computed in relation to the meniscus shape.

For this purpose, an initial approximate geometry describing the shape of the meniscus pinned at the capillary valve was modeled (Figure 2a). Here it should be noted that the surface of the liquid in the microchannel was not included in the model since its boundaries were fixed (walls of the microchannel), thus it had no contribution in variation of the surface energy. Boundary conditions of the model and faceted boundaries are shown in Figure 2a.

To determine the pressure capacity of the capillary valve and the shape of the meniscus during overflow, initially the pressure across the meniscus (P in Equation 4) was set to zero. Then, the meniscus was evolved to minimize the surface energy until the relative change in the energy is less than 1×10^{-4} . Resulting shape was determined as the meniscus shape at zero pressure. After then, the pressure was sequentially increased at small increments and respective meniscus shapes were determined. This procedure was carried out until the meniscus totally

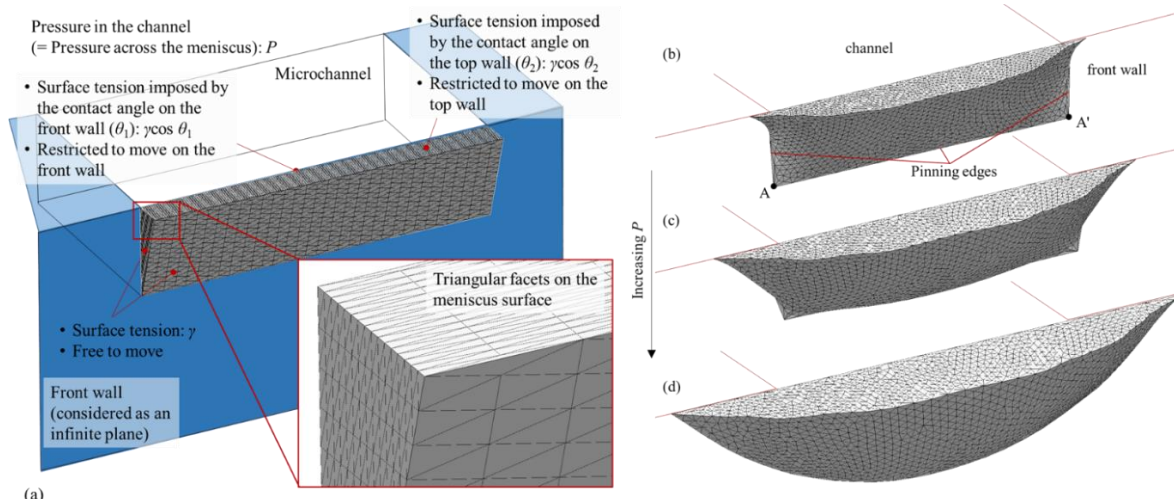


Figure 2. (a) Surface Evolver model of the meniscus and respective boundary conditions. The meniscus was modeled as a wedge leaning slightly out from the capillary valve. Surface of the meniscus was meshed by using triangular facets. Boundary conditions on the surfaces were explained on the figure. Top wall and the front wall were shaded in blue to improve visualization. (b)-(d) Meniscus shape during overflow of a specific valve (channel width: 400 μm , channel height: 100 μm , $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$). As the pressure in the channel (P) increases, the meniscus first tends to advance along the corner formed by the top wall and the front wall, while being trapped at the pinning edges. Overflow occurs when the meniscus breaches points A and A'.

breaches the capillary valve. The pressure at this point was identified as the pressure capacity of the capillary valve. Figure 2b illustrates the procedure by showing the shape of the meniscus during overflow of a specific capillary valve.

3. RESULTS

Numerical method described in the previous section was carried out for combinations of top wall and channel wall contact angles (θ_1 and θ_2 respectively). The motivation behind doing so was based on the common microfluidic fabrication techniques. Although there are a number of methods for fabricating microfluidic devices [16], especially one of these methods – PDMS (polydimethylsiloxane) molding [17] – is common because of its robustness and fairly rapid processing. In this method, PDMS resin is poured on a mold, which defines the channel geometry, and then cured under elevated temperature. After then, PDMS channel is sealed with a glass substrate by plasma assisted bonding process. Despite the advantages offered by the process, undesired properties of the material such as vapor permeability and uncontrolled wettability in long term use, limits the use of PDMS molded microfluidic devices to rapid prototyping only. For fabrication of commercial microfluidic devices, channels are often patterned on thermoplastic substrates such as polymethylmethacrylate (PMMA) or cyclic olefin copolymer (COC) by injection molding or hot embossing [18]. Patterned channels are then sealed with a blank thermoplastic substrate by thermo-compressive bonding. Figure 3a illustrates these fabrication techniques. Noting that different materials (commonly glass or thermoplastics) can be used to seal the channels fabricated on different materials (commonly

PDMS or thermoplastics), combination of top wall and channel wall contact angles were considered in the analysis of the capillary valves.

Contact angle of water on these substrates (glass, PDMS, and PMMA as a representative thermoplastic material) were measured to illustrate the parameter range (Figure 3b). Accordingly, contact angles on top wall and channel wall were selected as ranging between 30° and 90° . On the other hand, channel width and height were kept constant at 400 μm and 100 μm respectively, which are representative values for a typical microfluidic channel. Water was assumed as the working liquid in all the simulations. List of parameters is shown in Table 1.

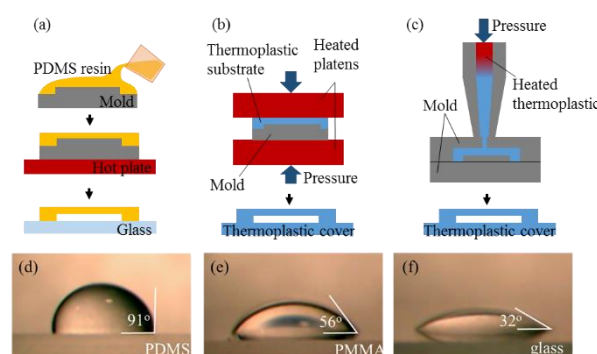


Figure 3. (a)-(c) Illustration of common microfluidic fabrication techniques: (a) PDMS molding, (b) hot embossing, and (c) injection molding. (d)-(f) Contact angle of water measured on (a) PDMS, (b) PMMA, and (c) glass.

Table 1. Parameters and variables tested in the simulations, and their corresponding values.

Parameter/variable name	Value
Contact angle on channel wall, θ_1	30°, 60°, 90°
Contact angle on top wall, θ_2	30°, 60°, 90°
Channel depth, d	100 μm
Channel width, w	400 μm
Surface tension of water, σ	0.073 J/m ²

The simulations were run on a workstation with 2.60 GHz dual processor and 16 GB RAM. Before running the simulations, mesh dependency was checked to ensure the convergence and accuracy of the results. Accordingly, it was decided to run the simulations on the models with approximately 3500 triangular facets. Figure 4a shows the simulated shapes of menisci at the onset of overflow for different contact angles and Figure 4b plots the corresponding pressure capacities.

Investigating the results reveals that the pressure capacity increases with increasing contact angle (both on top wall and channel wall) as implied by the Concus-Finn condition in equation 1. On the other hand, Figure 4b

shows that the effect of the contact angle on the top wall dominates the effect of that on the channel wall. Indeed, this results is obvious since the meniscus pinned at the capillary valve can advance freely on the top wall only. Another conclusion that can be drawn from the simulation results is related to the corner filling effect. It can be seen from Figure 4a that especially for relatively low contact angle combinations, the meniscus tends to advance along the corner formed by the top and the front walls before the meniscus breaches the capillary valve. Thus, although Concus-Finn condition in Equation 1 states that the sum of the contact angles on top wall and the channel wall should be greater than 90° for this particular valve to be operational, non-zero pressure capacity can be obtained even when this condition is not satisfied. However, since the pressure capacities for these specific cases ($\theta_1 + \theta_2 \leq 90^\circ$) are very low, it will probably not be feasible to utilize these specific valves.

The results show that the highest pressure capacity can be obtained when the contact angle on all surfaces is 90°, which is possible if the capillary valve is fabricated by PDMS molding (Figure 3a) and sealed by another PDMS slab. Therefore, to investigate the effect of the channel dimensions on the valve performance, a number of simulations were carried out by changing the channel

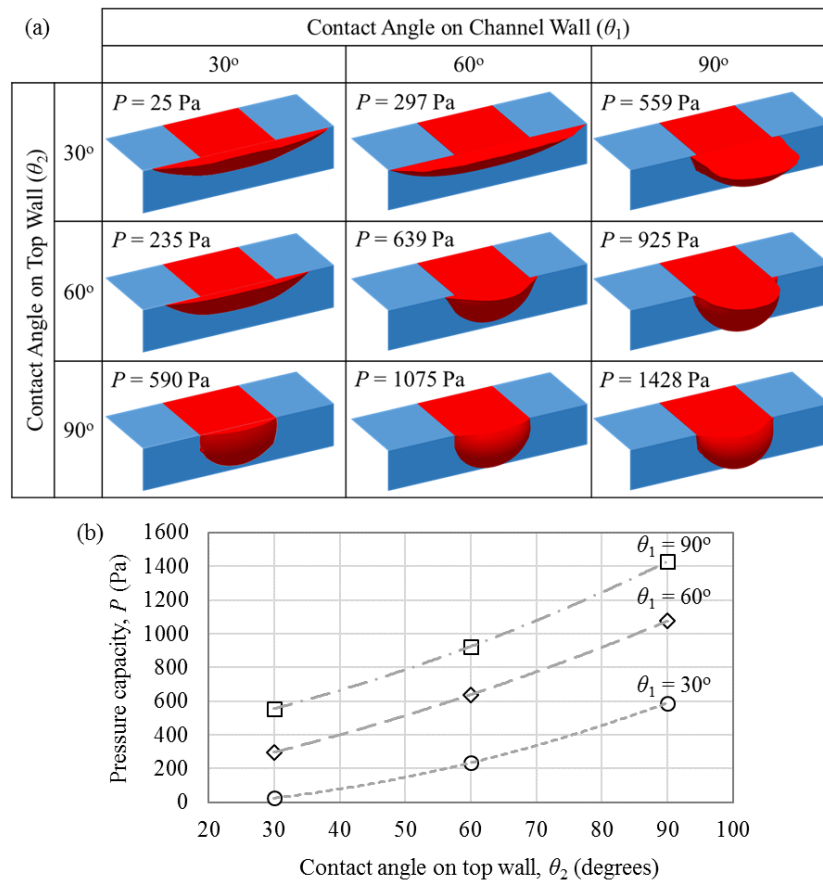


Figure 4. (a) Meniscus shapes computed by the Surface Evolver at the onset of overflow for different contact angle combinations. (b) Corresponding pressure capacities. Dashed lines on the plot indicates the trendlines fitted to the experimental data.

width and depth between 100 μm and 500 μm while keeping the contact angle constant at 90° . Figure 5 shows the change of the pressure capacity with respect to channel width and depth. Examining the results shows that decreasing the width and height improves the pressure capacity. It can be stated that either decreasing the width or the depth does not make a significant change in the increase of the pressure capacity. However, a careful investigation shows that increasing the channel width is slightly more effective than increasing the depth. This result is quite reasonable, since increasing the width does not only increase the surface on which the liquid can advance on the front wall (Figure 2a), but also the top surface, where the meniscus can stretch.

meniscus is not only pinned on the bottom edge of the channel but also on the side edges was not addressed. Therefore, indeed the apparent contact angle is also continuously changing on the side edges as well. To overcome this ambiguity, it was stated in this paper that the capillary valve was overflowed when the meniscus breached the vertices formed by the channel bottom, channel side walls, and the front wall (points A and A' shown in Figure 2b). Beyond this point, the meniscus would be freely moving on the front wall and the capillary valve would no longer be useful.

Another difference between the method presented here and that in ref. [10] is the corner filling effect. In ref. [10], the meniscus was assumed to be fixed at the pinning

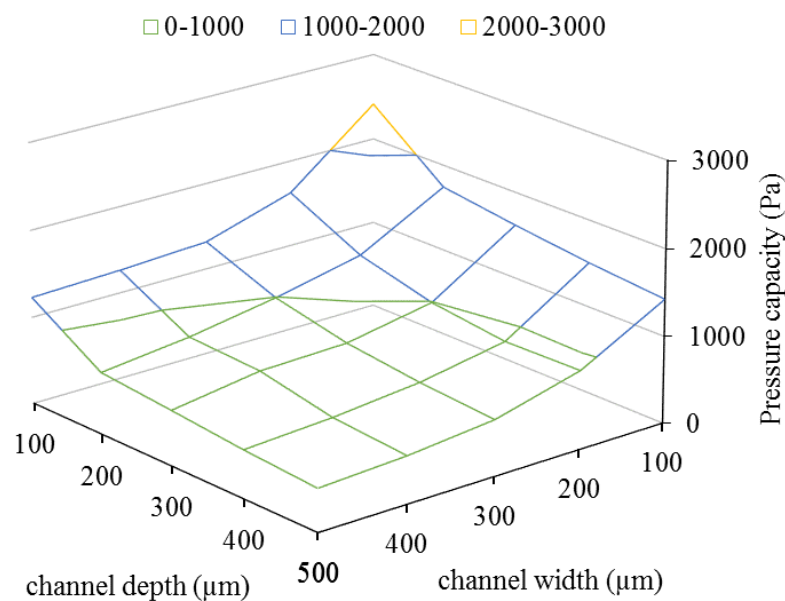


Figure 5. Pressure capacity of the capillary valve with respect to the channel depth and the channel width. Contact angle on all surfaces is

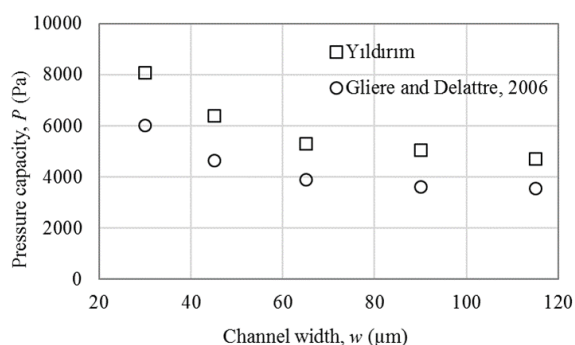
To verify the analysis method presented above, the results were compared to those presented in ref. [10], where another numerical approach, which utilized free surface equilibrium analysis [19] instead of energy minimization, was presented. For this purpose, θ_1 and θ_2 were kept constant at 60° and 80° respectively and the channel height was set to 15 μm , while varying the channel width between 30 μm and 115 μm . The results were plotted in Figure 6. It can be seen that the pressure capacities computed by using the method presented here are slightly larger than those presented in ref. [10]. This difference was attributed to one main reason, which is related to the definition of the overflow. In ref. [10], the authors define bursting as the state, when the contact angle measured at the mid-point of the pinning edge formed by the intersection of the channel bottom and the front wall, becomes equal to the contact angle on the channel wall. This definition is reasonable since the apparent contact angle changes during overflow (as illustrated in Figure 1c). However, the fact that the

edges. However, it was permitted to move on the front wall in this work, which allowed observation of the corner filling effect. Consequently, as the meniscus was pressurized, firstly it would tend to fill the corner formed by the top wall and the front wall instead of breaching the pinning edges and vertices A and A' (Figure 2b), which in turn would increase the apparent pressure capacity. However, this effect was not observed in the test case since the contact angles on the channel wall and the top wall were relatively large, which prevented corner filling.

The results obtained by the model presented here agrees well with the experimental results presented in ref. [10] for relatively low channel widths, which also verifies the model and the assumptions in this paper. On the other hand, the simulations carried out for comparison purposes revealed that the pressure capacity of the capillary valves can be significantly improved by decreasing the width and the height of the microchannel further.

Table 2. Comparison of the performance of the capillary valve presented in this paper with those of the similar passive valves available in the literature.

Reference	Characteristic dimensions	Contact angle	Pressure capacity	Experimental /Theoretical
Yıldırım (This paper)	width: 100 μm height: 100 μm	90° on all surfaces	~2.5 kPa	Theoretical
Chen et. al. [5]	width: 300 μm height: 60 μm	68° on all surfaces	~0.4 kPa	Theoretical
Leu and Chang [6]	width: 300 μm height: 60 μm	75° on all surfaces	~30 kPa	Experimental and theoretical
Yıldırım et. al. [9]	width: 200 μm height: 120 μm	20° on channel top, 70° on channel walls	~0.6 kPa	Experimental and theoretical
Gliere and Delattre [10]	width: 15 μm height: 15 μm	60° on channel top, 80° on channel walls	~7 kPa	Experimental and theoretical

**Figure 6.** Pressure capacities computed by the model presented in this work (indicated by \square) and the model in ref. [10] (indicated by \circ). Channel height (h) is 15 μm . Contact angle on the channel wall (θ_1) is 60° and that on the top wall (θ_2) is 80°. Liquid is water with surface tension $\sigma = 0.073 \text{ J/m}^2$.

As a result, it was shown that the capillary valve presented here would perform best if the contact angle on channel boundaries are 90°. It was also shown that the pressure capacity of such capillary valves could be as high as 2.5 kPa when the channel width and depth were both set to 100 μm (Figure 5). On the other hand, decreasing the channel width and depth further would significantly improve the pressure capacity (Figure 6). Comparing the values computed in this study with the ones available in the literature (Table 2) shows that the capillary valve presented here could be a promising alternative in passive microfluidic systems.

4. CONCLUSION AND DISCUSSION

In this paper, a numerical approach to determine the pressure capacity of a capillary valve was presented. Considering that the wetting properties of the microchannel material was the predominant effect in operation of the capillary valves, the method was tested for various contact angle combinations (ranging between 30° and 90°). Depending on the contact angle of the liquid on the channel material and the cover material, the shape of the menisci at the onset of the overflow and corresponding pressure capacities were determined. It was found that the valve performs best when the contact angle is 90° on all surfaces. For this contact angle value, capillary valves with different widths and depths ranging between 100 μm and 500 μm were simulated. The results showed that the pressure capacity could reach to approximately 2.5 kPa when both the channel width and the depth were 100 μm . The results were compared to those presented in the literature and the model was verified accordingly. It was shown that the pressure capacity could go up to approximately 8 kPa especially when the channel width and the channel height were significantly small (35 μm and 15 μm respectively).

The capillary valves presented here are quite useful especially in pipette operated lab-on-a-chip devices [20–22]. It is believed that the method presented here would provide a guideline for the design of such capillary valves for use in microfluidic systems.

REFERENCES

- [1] Au A. K., Lai H., Utela B. R., and Folch A., "Microvalves and Micropumps for BioMEMS", *Micromachines*, 2: 179–220, (2011).
- [2] Man P., Mastrangelo C., Burns M., and Burke D., "Microfabricated plastic capillary systems with photo-definable hydrophilic and hydrophobic regions", *International Conference on Solid-State Sensors Actuators and Microsystems*, Sendai, Japan, 1-5, (1999).
- [3] Feng Y., Zhou Z., Ye X., and Xiong J., "Passive valves based on hydrophobic microfluidics", *Sensors and Actuators A: Physical*, 108: 138–143, (2003).
- [4] Cho H., Kim H.-Y., Kang J. Y., and Kim T. S., "How the capillary burst microvalve works", *Journal of Colloid and Interface Science*, 306: 379–385, (2007).
- [5] Chen J. M., Huang P.-C., and Lin M.-G., "Analysis and experiment of capillary valves for microfluidics on a rotating disk", *Microfluidics and Nanofluidics*, 4: 427–437, (2007).
- [6] Leu T.-S. and Chang P.-Y., "Pressure barrier of capillary stop valves in micro sample separators", *Sensors and Actuators A: Physical*, 115: 508–515, (2004).
- [7] Man P. P. F., Mastrangelo C. H., Burns M. A., and Burke D. T., "Microfabricated capillarity-driven stop valve and sample injector", *Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, Heidelberg, Germany, 1–6, (1998).
- [8] Zimmermann M., Hunziker P., and Delamarche E., "Valves for autonomous capillary systems", *Microfluidics and Nanofluidics*, 5: 395–402, (2008).
- [9] Yıldırım E., Trietsch S. J., Joore J., van den Berg A., Hankemeier T., and Vulto P., "Phaseguides as tunable passive microvalves for liquid routing in complex microfluidic networks", *Lab on a Chip*, 14: 3334–3340, (2014).
- [10] Glière A. and Delattre C., "Modeling and fabrication of capillary stop valves for planar microfluidic systems", *Sensors and Actuators A: Physical*, 130: 601–608, (2006).
- [11] Concus P. and Finn R., "On the behavior of a capillary surface in a wedge", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 63: 292–299, (1969).
- [12] Vulto P., Podszun S., Meyer P., Hermann C., Manz A., and Urban G. A., "Phaseguides: a paradigm shift in microfluidic priming and emptying", *Lab on a Chip*, 11: 1596–602, (2011).
- [13] Dong M. and Chatzis I., "The imbibition and flow of a wetting liquid along the corners of a square capillary tube", *Journal of Colloid and Interface Science*, 172: 278–288, (1995).
- [14] Mittelmann H. and Zhu A., "Capillary surfaces with different contact angles in a corner", *Microgravity Science and Technology*, 1: 22-27, 1996.
- [15] Brakke K. A., "The Surface Evolver", *Experimental Mathematics*, 1: 141–165, (1992).
- [16] Lei K.F., "Materials and Fabrication Techniques for Nano- and Microfluidic Devices", *Microfluidics in Detection Science : Lab-on-a-chip Technologies*, *The Royal Society of Chemistry*, Cambridge, UK, (2014).
- [17] Duffy D. C., McDonald J. C., Schueller O. J., and Whitesides G. M., "Rapid Prototyping of Microfluidic Systems in Poly(dimethylsiloxane)", *Analytical Chemistry*, 70: 4974–4984, (1998).
- [18] Becker H., "Polymer microfluidic devices", *Talanta*, 56: 267–287, (2002).
- [19] Myshkis A. D., Babskii V. G., Kopachevskii N. D., Slobozhanin L. A., and Tyuptsov A. D., "Low-Gravity Fluid Mechanics, Mathematical Theory of Capillary Phenomena", *Springer-Verlag*, 1, Berlin, (1987).
- [20] Kasap E. N., Çoğun F., Yıldırım E., Boyacı İ. H., Çetin D., Suludere Z., Tamer U., and Ertaş N., "Microchip Based Determination of Bacteria by In-chip Sandwich Immunoassay", *International Multidisciplinary Symposium on Drug Research and Development*, Eskişehir, Turkey, 89, (2015).
- [21] Doğan Ü., Kasap E., Çoğun F., Yıldırım E., Çetin D., Suludere Z., Boyacı İ. H., Ertaş N., and Tamer U., "Simultaneous Detection of Two Different Bacteria Using QDs and MNPs", *International Conference: 10th Aegean Analytical Chemistry Days*, Çanakkale, Turkey, 365, (2016).
- [22] Ahi E. E., Gümüştas A., Çiftçi H., Çağlayan M. G., Selbes Y. S., Çoğun F., Yıldırım E., and Tamer U., "Chip-Based Immunomagnetic Separation of Human Chorionic Gonadotropin", *International Conference: 10th Aegean Analytical Chemistry Days*, Çanakkale, Turkey, 361, 2016.

Atık Su Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliği

Harun TÜRKMENLER*

Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 02040, Adıyaman

(Geliş/Received : 20.06.2016 ; Kabul/Accepted : 25.09.2016)

ÖZ

Atık su arıtma tesislerinin işletilmesi esnasında kullanılan proses ve ekipmanlara bağlı olarak yoğun şekilde enerji kullanılmaktadır. Enerji maliyeti bir arıtma tesisinin işletilmesinde kullanılan bütçenin en önemli bölümüdür. Artan enerji maliyetlerinden dolayı atık su arıtma tesislerinde enerji yönetimi önemli bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada, Ataköy İleri Biyolojik Atık su Arıtma Tesisi'nin (A.İ.B.A.A.T.) giriş ve çıkış tasarımı ve işletme parametreleri kullanılarak tesisin ekonomik analizi yapılmıştır. A.İ.B.A.A.T.'nin 2012 yılı ocak-eylül ayları arasındaki değerleri kullanılarak aylık kişi başı harcanan su miktarı 5007 L, harcanan enerji miktarı ise 1652 W kişi olarak bulunmuştur. Toplam arıtılan atık su miktarı ortalama 9762735 m³/ay, toplam üretilen biyogaz miktarı ortalama 264799 m³/ay ve toplam türbin elektrik üretimi ortalama 1569,03 MW-saat/ay, toplam elektrik tüketimi ortalama 3221,93 MW-saat/ay ve enerji geri kazanımı ise %88,78 dir. 1 m³ atık su arıtımı için elektrik tüketimi değerleri ise 0,213-0,444 kW-saat arasında değişmektedir. Tesisin özgül enerji tüketimi, eşdeğer nüfus (e.n.) başına ve arıtılan atık su debisi başına 19,8 kW-saat/kişi.yıl ve 0,33 kW-saat/m³ olarak bulunmuştur. Atık su arıtma tesislerinde enerji tasarrufu ülkemizde enerji fiyatlarının giderek artmasından dolayı önemli bir konu haline gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık Su Arıtma Tesisi, Enerji Verimliliği, Biyogaz.

Energy Efficiency in Wastewater Treatment Plants

ABSTRACT

Intensive energy is used depending on the process and equipment used during the operation of the wastewater treatment plant. Energy cost is the most important part of the budget used for the operation of a treatment plant. Energy management in wastewater treatment plants due to rising energy costs have become a major issue. In this study, Ataköy Advanced Biological Wastewater Treatment Plant (AABWWTP) using the input and output of the plant design and operating parameters is performed economic analysis. AABWWTP of 2012 January-September, the monthly per capita water use values between the months spent in the amount of 5,007 L, the amount of energy spent 1,652 W/person, respectively. Total treated wastewater average is 9,762,735 m³/month, produced a total amount of biogas average 264,799 m³/month, and the total turbine power production average 1,569.03 MWh/month, total electricity consumption average of 3221.93 MWh/month, and energy recovery 88.78%. 1 m³ of wastewater, electricity consumption value for the treatment ranged from 0.213 to 0.444 kWh. The specific energy consumption of the plant was found to be 19.8 kWh/population equivalent (p.e.).year and 0.33 kWh/m³ per p.e. and treated wastewater, respectively. Wastewater treatment plants in our country energy savings due to the increasing price of energy has become an important issue.

Keywords: Wastewater Treatment Plant, Energy Efficiency, Biogas.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde evsel atık suların arıtılması için uygulanan birçok alternatif sistem mevcuttur. Kalkınmasını tamamlamış ülkelerde bu alternatiflerin sayısı istenilen çıkış suyu kalitesinin çok sıkı tedbirlerle sınırlandırılması nedeniyle daha az sayıdadır. Ekonominin, hükümet yönetimlerinin ve politikaların sürekli değiştiği kalkınmakta olan ülkelerde ise deşarj ölçütleri sıklıdan rahata kadar geniş bir ölçekte yer almaktadır. Bunun yanında arıtma tesisinin maliyet bileşenleri ve işletme gereksinimleri kalkınmış ülkelerde önemliyen kalkınmakta olan ülkelerde arıtma tesisi tipinin seçiminde karar verici bir unsur olarak rol oynamaktadır [1].

Atık su arıtma, çevre ve halk sağlığını korumak için sudaki kimyasal ve biyolojik kirlenmeleri gidermede önemli bir rol üstlenmiştir. Geçtiğimiz yıllarda atık su arıtma te-

sisleri, yıldan yıla daha kısıtlayıcı olan yasaların belirlediği deşarj limitlerine uymak, ıslah verimliliğini artırmak için benimsenen teknolojileri geliştirmektedir.

Atık su arıtma tesisi endüstrisinin asıl meselesi, halkın güvenini sağlamak için her zaman su kalitesi standartlarını karşılamak olmuştur [2]. Böylelikle, atık su arıtma tesisleri genelde herhangi bir büyük enerji kaybı olmadan belirli atık su deşarj gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanmıştır [3]. Enerji verimliliği göz önünde bulundurularak atık su arıtma tesisleri neredeyse hiç tasarlanmamıştır [4-6].

Geleneksel bir atık su arıtma tesisinde işletme maliyetlerinin %25-40'ının enerji tüketiminden kaynaklandığı literatürden ve yönetsel tecrübelerden bilinmektedir [5, 7, 8]. Bu değer, arıtılan atık suyun m³ ü başına yaklaşık olarak 0,3-2,1 kW-saat aralığında değişmektedir [9].

Tipik olarak geleneksel bir atık su arıtma tesisinde enerji tüketimine asıl katkıyı sağlayan karışık sınının havalandırılması (%55-70), çamur pompalama ile birincil ve ikincil çöktürme (%15,6) ve çamur susuzlaştırma

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: hturkmenler@adiyaman.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 495-502

(%7) [5]. Havalandırma ile ilgili olarak, hava üfleyicilere uygun kontrol cihazlarının yerleştirilmesi ve/veya verimli hava üfleyiciler, arıtılmış atık suyun 0,04 kW-saat/m³'e kadar olan enerji talebini azaltabileceği beklenebilir [5]. Enerji verimliliğinin yaygın tanımı ve ölçüsü, enerji kullanım girdisinin (örneğin elektrik tüketimi) enerji hizmet çıktısına (bir atık su arıtma tesisinin sağladığı belirli bir hizmet, örneğin arıtılmış atık su veya giderilen kirlilik miktarı) oranıdır.

Geleneksel olarak, atık su arıtma tesislerindeki enerji tüketimi, yıllık olarak arıtılmış atık suların hacmi (kW-saat/m³) [10,11] veya nüfus eşdeğer birimi (kW-saat/e.n) olarak ifade edildiği rapor edilmiştir [12,13].

Enerji maliyeti bir arıtma tesisinin işletilmesinde kullanılan bütçenin en önemli bölümüdür. Özellikle 50000 kişi nüfusa sahip yerleşimler için ülkemizde atık su arıtma tesisleri açısından büyük bir açık bulunmaktadır. Gelecek 10 yıllar içinde yaklaşık 3000 tesise ihtiyaç duyulduğu göz önünde bulundurulduğunda, enerji verimi en önemli konu haline gelmektedir. Enerji kullanımı, nüfus, giriş yükü, çıkış kalitesi, proses tipi, boyutu ve yaşından etkilenir. Önemli prosesler ise: toplama sistemleri (kanalizasyon ve pompa istasyonları), atık su arıtımı (birincil, ikincil ve/veya üçüncü/ileri) biyo katıların işlenmesi, bertarafı ve yeniden kullanımınıdır.

Toplama, arıtma ve kabul edilebilir izin standartlarında belediye atık sularının deşarjı çoğunlukla elektrik olarak değil, aynı zamanda doğal gaz veya diğer yakıtlar gibi

atık su arıtma tesislerinde enerji tüketiminde önemli artışlar gerektirebilir [15,16].

Ülkemizdeki su kaynaklarının korunması ve ülke menfaatleri doğrultusunda sürdürülebilir kullanımının sağlanması için, istenilen düzeyde arıtma verimi sağlayacak, düşük yatırım ve işletme maliyetine sahip atıksu arıtma teknolojilerinin seçilmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışmada, tesise ait veriler incelenerek e.n. ve arıtılan atık su debisi başına tesisin özgül enerji tüketimi bulunmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. İleri Biyolojik Atık su Arıtma Tesisinin Genel Tanıtımı (General Description of Advanced Biological Wastewater Treatment Plant)

Tesis, Marmara Denizi'ni atık su kirliliğinden korumak amacıyla birinci aşamada ortalama 400000 m³/gün'lük ileri biyolojik arıtma kapasitesi ile 1600000 nüfusun atık sularının arıtılmasını sağlamaktadır. Tesis 2010 yılında işletmeye alınmıştır ve Bağcılar, Bahçelievler, Bakırköy, Başakşehir, Esenler, Küçükçekmece ve Sultangazi ilçelerinin atık sularını arıtmaktadır. Tesisin nihai olarak 600000 m³/gün kapasiteye çıkarılması ve 2500000 kişiye hizmet vermesi planlanmıştır. Tesisin nihai olarak kurulacağı alan ise 430000 m² dir. Tesisin genel görünümü Şekil 1'de görülmektedir.



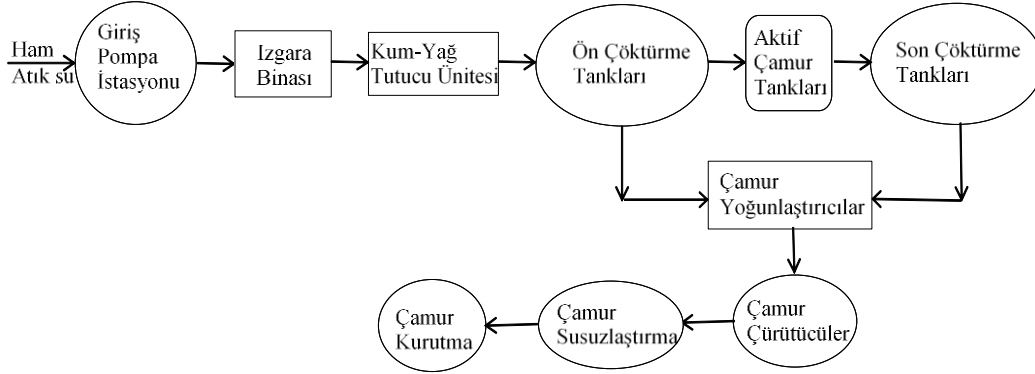
Şekil 1. A.İ.B.A.A.T. 'nin genel görünümü (General layout of AABWWTP)

enerji gerektirir. Ülke çapında, atık su arıtma, toplam enerji tüketiminin %0,1 ila 0,3 temsil eder ve yerel şehir ve toplum, hükümet içinde, su ve atık su arıtma işlemleri genellikle büyük enerji tüketicisidir [14]. Ayrıca, artan nüfus, daha sıkı deşarj gereksinimleri ve altyapının eskimesi nedeniyle gelecekte atık su arıtımı için enerjinin artması beklenmektedir. Bu tür ilaç ve kişisel bakım ürünleri gibi şu anda düzenleme yapılmayan kirlenici maddelerin çıkarılması için gelecekteki olası standartlar,

Tesise gelen atık sular karbon, azot, fosfor giderimi sağlanarak arıtılmaktadır. Atık su sıcaklığına bağlı olarak çıkış suyu kalitesini sağlamak için çamur yaşı 9 gün olarak tasarlanmıştır. Biyolojik arıtma, kademeli besleme tipinde (kaskat denitrifikasyon) 3 ayrı arıtma hattından oluşmaktadır. Her arıtma hattı nitrifikasyon ve denitrifikasyon içeren 2 adet kaskattan oluşur. Askıda katı maddenin (AKM) çökmesini önlemek, hava kabarcıklarının

yolunu uzatarak havalandırma verimini arttırmak ve homojen karışımını sağlamak üzere, her bir tankta 7 adet muz tipi karıştırıcılar mevcuttur. Havalandırma havuzlarının tabanlarına ince kabarcıklı membran difüzörler yerleştirilmiştir. Havalandırma havuzlarının ortasında iç

resirkülasyonu sağlamak, nitrifikasyon sonucu oluşan nitratlı suyu anoksik bölgeye pompalamak amacıyla resirkülasyon pompaları bulunmaktadır. Şekil 2’de A.İ.B.A.A.T. ’nin akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 2. A.İ.B.A.A.T.’nin proses akış diyagramı (Process flow diagram of AABWWTP)

Tesise ait üniteler ve kapasiteleri ise Çizelge 1 de görülmektedir.

Çizelge 1. Tesise ait üniteler ve kapasiteleri (Units and capacities of the plant)

Üniteler	Ünite adedi ve kapasitesi
Kaba Izgaralar	(3+1 adet) 10835 m ³ /saat
Giriş Terfi Merkezi	(5+1 adet) 1160 L/s kapasiteli, (2+1) adet 650 L/s kapasiteli toplam 9 adet dalgıç pompa
İnce Izgaralar	(6+3 adet) 5400 m ³ /saat
Havalandırılmalı Kum ve Yağ Tutucu	(6 adet) (1140 Nm ³ /saat kapasiteli 3+4 adet hava üfleyiciler, 108 m ³ /sa kapasiteli 6 adet dalgıç kum pompası, 3 adet kum ayırıcı, 3 adet köpük pompası)
Ön Çökeltme Havuzu	(2 adet dairesel tank) (2+1 adet 36 m ³ /saat kapasiteli primer çamur pompası, 2 adet köpük pompası)
Biyofosfor Havuzu	(3 adet) 27150 m ³ kapasiteli (3*4 adet karıştırıcı)
Havalandırma Havuzu	(3 adet) 78060 m ³ kapasiteli ((7 x 2) x 3 adet karıştırıcı, 11+1 adet 20000 Nm ³ /saat kapasiteli hava üfleyici, 30+1 adet 785 mm çap - 300 d/d kapasiteli resirkülasyon pompası)
Son Çökeltme Havuzu	(12 adet sıyrıcı köprülü dairesel tank) 7420 m ³ kapasiteli, 1 adet 36 m ³ /saat kapasiteli yüzen çamur pompası)
Hava Üfleyici Binası	(11+1 adet) 20000 Nm ³ /saat kapasiteli turbo hava üfleyici
Çamur Yoğunlaştırıcı	(1+1 adet 45 m ³ /saat kapasiteli primer çamur yoğunlaştırma ünitesi), (8+1 adet 72,9 m ³ /saat kapasiteli fazla çamur yoğunlaştırma ünitesi)
Geri Devir Binası	((4+2) x 3 adet geri devir çamur pompası), (6 adet fazla çamur pompası)
Çamur Çürütme Ünitesi	(6 adet 10000 m ³ anaerobik çamur çürütücü), Çamur karıştırma gaz enjeksiyonuyla sağlanmaktadır
Çamur Susuzlaştırma	(5+1 adet 53 m ³ /saat kapasiteli dekantör, 5+1 adet çamur susuzlaştırma besleme pompası)
Çamur Depolama Ünitesi	(3 adet)
Çamur Kurutma Ünitesi	(Her biri 100 ton/gün ıslak çamur kapasiteli 6 adet disk tip çamur kurutucu)
Koku Giderme Ünitesi	(Her biri 65000 m ³ /saat kapasiteli 2 adet ve her biri 10000 m ³ /saat kapasiteli 2 adet fan, 2 adet ozon ünitesi)
Geri Kazanım Ünitesi	(Tesiste, 5000 m ³ / gün kapasiteli, peyzaj ve tesis kullanım suyu olarak değerlendirilen atık su geri kazanım ünitesi)
Laboratuvar ve İşletme Binası	Gravimetrik, volumetrik, titrimetrik ve spektrofometrik tüm analizlerin yapılabildiği kimya bölümü, mikrobiyolojik analizler için bakteriyoloji bölümü, tartım odası, cam malzeme deposu, ofis ve gaz tüp odası bulunmaktadır.
Otomasyon Sistemi	Sistem ile işletme ve yönetici personelin her koşulda tesis ile iletişimini sağlayan her türlü kontrol ve raporlamalar, tesis dışından da etkili olarak yürütülebilmektedir.
Enerji Temini-Kojenerasyon	Gerekli elektrik enerjisinin üretilmesi için doğalgaz ve çamur çürütme tanklarında oluşan biyogazı kullanarak ısı ve elektrik enerjisine dönüştürebilen 4,6 MW gücünde 2 adet gaz türbini

Tesiste kullanılan teknoloji: Son kademenin hidrolik yükü için mekanik arıtma, azot ve fosforun biyolojik olarak kapsamlı şekilde giderilmesiyle biyolojik atık su arıtımı (düşürülmüş hidrolik yükler), 3 hatlı havalandırma tankı (kademeli besleme işlemi), anaerobik çürütücülerde çamur çürütme, kojenerasyon ünitesinde gaz kullanımı ve çamur kurutmadır.

2.2. Atık su Arıtma Tesislerinde Enerji Yönetimi (Energy Management in Wastewater Treatment Plants)

Atık su arıtma tesislerinde enerji yönetimi “minimum maliyet ile istenilen atık su arıtma deşarj standartlarını elde etmek ve sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için enerjinin uygun değerde ve sürekli olacak biçimde kullanımının sağlanması” anlamına gelmektedir. Oldukça kapsamlı olan bu tanım atık su arıtma tesisi projelendirilmesinden başlayarak uygun değerde olarak atık su arıtma tesisinin işletilmesine kadar olan birçok işlemi kapsar. Enerji yönetimi, birçok işlemin incelenmesi ve optimizasyonu ile sağlanabilir. Atık su arıtma tesislerinde enerji yönetiminin uygulanabilmesi için tasarımı sırasında aşağıdaki temel esasların dikkate alınması gerekir:

- arıtılmış atık su kalite standartlarını sağlayabilecek en az enerji kullanan arıtma prosesi seçilmeli,
- hidrolik olarak minimum terfi ihtiyacının olduğu arıtma tesis alanları seçilmeli,
- arıtma üniteleri arasında mümkün olduğunca pompa kullanılmamalı,
- yüksek verime sahip düşük enerji ihtiyacı duyan arıtma ekipmanları seçilmeli,
- arıtma tesisi için gerekli enerji ihtiyacı en ucuz olabilecek şekilde temin edilmelidir.

Atık su arıtma tesislerinde yüksek miktarda enerji tüketilmektedir. Proses seçiminde, istenilen arıtma çıkış deşarj limitlerinin sağlayabilecek enerji gereksinimi az olan atık su arıtma prosesleri seçilmelidir. Uygun arazilerin bulunduğu yerlerde enerji ihtiyacı olmayan stabilizasyon havuzları inşa edilebilir. Havasız çamur yataklı reaktörler çok az, fakültatif havalandırma lagünlerinde fazla, mekanik havalandırma lagünlerinde ise çok fazla enerji ihtiyacı vardır. Ayrıca havalı arıtma sistemleri havasız arıtma sistemlerine göre daha fazla enerji kullanılır [17].

Pompalar suyun düşük bir seviyeden daha yüksek bir seviyeye taşınabilmesi amacıyla geliştirilmişlerdir. Arıtma tesislerinde enerjinin büyük bir bölümünü pompalar tarafından tüketilmektedir. Pompa ihtiyacının olmadığı veya çok az pompa ihtiyacının olduğu araziler, arıtma tesis inşası için seçilmelidir. Bu sebepten, atık su arıtma tesisi planlanırken, tesisinin kurulacağı alanın hidrolik olarak uygun olup olmadığı tahkik edilmelidir. Atık su cazibeyle veya çok az bir kot seviyesi ile arıtma tesisine getirilebiliyor ise, tesisin işletilmesi esnasında büyük ölçekte enerji tasarrufu sağlanmış olacaktır [18].

Arıtma tesisinin projelendirilmesi esnasında, arıtma üniteleri, bağlantı boruları ve diğer detaylar yerleştirildikten sonra, boru hattı boyunca sürtünme kayıpları ve arıtma ünitelerindeki yük kayıpları hesaplanır. Arıtma tesisi sahasında, topoğrafik eğimlerden yararlanılarak, pompaj

ihtiyacı azaltılacak şekilde tesis inşası yapılmalıdır [17]. İyi bir hidrolik planlama ile arıtma ünitelerindeki ve borulamadaki yük kayıpları azaltılarak daha az pompaj ihtiyacı duyan tesisler inşa edilebilir.

Atık su arıtma tesislerinde kullanılan enerji miktarı arıtma tesisinde kullanılacak donanımlara da bağlıdır. Yüksek verime sahip ancak düşük enerji ihtiyacı duyan arıtma donanımlarının seçilmesiyle arıtma tesisinde önemli ölçüde enerji tasarrufu yapılabilir. Arıtma tesislerinde enerji kullanımında önemli pay sahibi pompa ve hava üfleyicilerin doğru ve verimli olarak seçilmesi ile tesiste daha az enerji kullanılmış olacaktır.

2.3. A.İ.B.A.A.T. ‘de Çamur Yönetimi (Sludge Management in AABWWTP)

Tesiste enerji üretimi hedeflendiği için ham çamur deposunda karışan yoğunlaştırılmış fazla çamur ile ön arıtmadan gelen primer çamur her biri 10000 m³ hacme sahip 6 adet çürütücüye gönderilmektedir. Çamur, çürütücülerde anaerobik ve mezofilik şartlarda (35-37°C’de) asetojen ve metanojen bakterilerinin faaliyetleri sonucunda stabilize edilmektedir. Bu işlem sonucunda biyogaz üretilmekte ve üretilen biyogaz, gaz depolama tanklarında toplanmaktadır.

Çürütme işlemi sonucunda elde edilen %6 yoğunlukta çamur santrifüj sistemine dayanan mekanik yoğunlaştırıcılardan geçerek %25 yoğunlukta çamur keki haline gelmektedir. Sisteme gerekli elektrik ve ısı enerjisini temin etmek için kojenerasyon ünitesi kurulmuştur. Gerekli elektrik enerjisinin üretilmesi için doğalgaz ve çürütücülerden oluşan son ürün olan metan gazını yakan gaz türbini kullanılmaktadır. Metan gazının kojenerasyon ünitesinde yakılmasıyla sistemden elektrik ve atık ısının geri kazanılmasıyla buhar elde edilmektedir. Böylece tesiste üretilen biyogaz enerjisi sayesinde şebekeden çekilen elektriğe ve tesisin işletme maliyetine de katkı sağlanmış olacaktır. Atık ısıdan faydalanarak aynı zamanda tesisin ısınma ihtiyacı da sağlanabilmektedir. Atık egsoz ısısı çamur kurutma ünitesinde kullanılan buharı ekstra maliyet olmaktan çıkarır.

Kurutma sistemi, endirekt ve kontakt yani sıcak buharın çamur ile temas etmeden buharın ısısından faydalanarak gerçekleşen ısıtma çamur kurutma prosesidir. Kojenerasyon ünitesinden elde edilen atık gazın ısısından faydalanarak elde edilen buhar ile çamur kurutma ünitesinde kurutulmaktadır. Susuzlaştırma çıkış çamuru %90 kuru luğa kadar kurutulmakta olup nihai ürün olarak granül hale dönüşmektedir. Nihai ürün katı atık yakma merkezlerinde yakıt olarak, tarım sektöründe gübre şeklinde kullanılarak ekonomiye katkı sağlamaktadır.

Çamur kurutma ünitesinde, kuru madde içeriği %25 olan biyolojik çamurun, kuru çamur yani %90 seviyesinde kuru malzemeyle çevrilmesi sağlanmaktadır. Islak çamurda bulunan bu fazla nem, 6 adet çamur kurutucu ile ısı transferi vasıtasıyla buharlaştırılmaktadır.

Her biri 100 ton/gün ıslak çamur kurutulabilecek kapasitede olan kurutuculara gerekli olan ısı, kojenerasyon ünitesinden elde edilen kızgın yağ ile sağlanmaktadır. Kurutucular disk tip kurutucu olup bu alanda kullanılan

en dayanıklı ve güvenilir yapıdaki donanımlardandır. Her bir kurutucunun içine iletilen ıslak çamur, içinden kızgın yağ geçen kurutucu tambur içindeki diskler ile temas edilerek ısınmaya başlar. Isınma sonucu çamurun su içeriği buharlaşarak çamur kurutma işlemi gerçekleşmiş olur. Böylece ısı kaynağı ile ıslak çamur temas etmeden endirekt olarak kurutulur.

Endirekt kurutma prensibi sayesinde patlama riskleri ortadan kalkar ve kapalı devre sistem kurutmada kullanılan ve kirlenen hava-buhar miktarı önemli oranda azaltılır. Kurutma sayesinde pek çok açıdan hem çevresel hem de ekonomik bir sorun olan ıslak atık su arıtma çamurunun taşınması ve depolanması problemleri ortadan kalkmaktadır. Atık çamuru, yakıt olarak kullanabilecek ekonomik değeri olan kurutulmuş bir ürün haline gelmektedir. Kurutma işlemi ile yağ çamur %75 oranında azalarak kalan miktar da faydalı ürüne dönüştürülmektedir.

Tüm tesisin enerji ihtiyacı ve aynı zamanda kurutma ünitesindeki termal enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla gaz türbini tipi kojenerasyon ünitesi kurulmuştur. Gerekli elektrik enerjisinin üretilmesi için doğalgaz ve atık sudan elde edilen biyogazı yakabilen 4,6 MW gücünde 2 adet gaz türbini kullanılmaktadır. Bu gaz türbinleri sayesinde tesisin ihtiyacı olan elektrik enerjisi elde edilirken, ısı eşanjörleri ve buhar kazanı sistemleri yardımıyla da türbinlerin yüksek ısıdaki atık egzost gazı değerlendirilerek tesise termal enerji sağlanmaktadır.

Böylece hem doğalgaz ve atık sudan elde edilen biyogaz yakılarak üretilen elektrik enerjisi için ayrıca para verilmeyecek hem de çamur kurutmak için atık ısı kullanıldığından, çamur kurutma işlemi için gereken ısı enerji masrafının önüne geçilmiş olacaktır. Bu sistem, özellikle ürettiği elektrik enerjisine ek olarak yüksek termal enerji ihtiyacını da karşıladığından, elektriksel ve ısı enerji ihtiyacı fazla olan uygulamalarda büyük bir avantaj teşkil etmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Enerji Tüketiminin Belirlenmesi (The

Determination of Energy Consumption)

Arıtma tesislerinde harcanan enerjinin büyük kısmı havalandırma ünitelerinde kullanılmaktadır. Bu ünitenin dışında en çok enerji tüketen üniteler ise atık su ve çamur

pompalarıdır. Tesiste havalandırma havuzlarında difüzör kullanılması tesisin enerji kullanımını ciddi oranda azaltmaktadır. Ayrıca tesis çamur yaşı da düşük olduğu için anaerobik çürütücüye beslenen çamur miktarı ve uçucu katı madde içeriği de fazladır. Bundan dolayı çürütücüde daha fazla biyogaz üretimi ve enerji geri kazanımı mümkün olmaktadır.

Tesiste tüketilen toplam enerji miktarı tesis içerisinde bulunan trafolardan her gün alınan değerlerin toplamı ile hesaplanmaktadır. A.İ.B.A.A.T. 'de her ay tesis girişinde günlük debi değerleri, tesis çıkışında debi değerleri, tesisdeki fiziksel arıtma ünitelerinde, biyolojik arıtma ünitesinde, diğer üniteler ve tüm tesis için toplam enerji tüketimleri, tesise ait tasarım parametreleri temin edilmiştir. Temin edilen bu veriler değerlendirilerek, arıtma tesisinin giriş yükleri, tesise ait giderim verimleri, şebekeden alınan elektrik, toplam türbin elektrik üretimi, enerji ilişkileri incelenmiş toplam elektrik tüketimi için MW-saat cinsinden giderim enerji değerleri, m³ ve kişi başı tüketilen enerji miktarları hesaplanmıştır. A.İ.B.A.A.T. 'nin giriş ve çıkış BOİ₅, KOİ, AKM, TN ve TP değerleri ve minimum giderim verimleri incelenmiştir (Çizelge 2). Çizelge 3'te A.İ.B.A.A.T. 2012 yılı (ocak-eylül) değerleri, Çizelge 4'te ise A.İ.B.A.A.T. 2012 yılı (ocak-eylül) enerji değerleri verilmiştir.

Çizelge 2. A.İ.B.A.A.T. giriş ve çıkış dizayn verileri, minimum giderim verimleri (AABWWTP influent and effluent design datas, minimum removal efficiencies)

Parametre	Birim	Giriş	Çıkış	Min. Giderim Verimi (%)	
Debi	m ³ /gün		390000	-	-
e.n.	kişi		1950000	-	-
BOİ ₅	kg/gün		117000	9750	92
KOİ	kg/gün		234000	48750	80
AKM	kg/gün		195000	13650	93
TN	kg/gün		23400	3900	83
TP	kg/gün		3120	1170	63

Çizelge 3'te tesiste en fazla arıtılan atık su miktarının Ocak ayında olmasının nedeni yağışların bu ayda fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Ocak ayında ortalama günde yaklaşık olarak 370000 m³ atık su arıtılmıştır.

Çizelge 3. A.İ.B.A.A.T. 2012 yılı (ocak-eylül) değerleri (AABWWTP 2012 year (january-september) values)

Aylar (2012)	Toplam Arıtılan Atık su Miktarı (m ³ /ay)	Toplam Tesis Elektrik Tüketimi (MW-saat /ay)	Ortalama Aylık Polielektrolit Tüketimi (kg/gün)	Çamur (Kuru Ürün) Miktarı (kg/ay)	Toplam Üretilen Biyogaz Miktarı (m ³ /ay)	Toplam Tüketilen Doğalgaz Miktarı (m ³ /ay)
OCAK	11.457.200	2.475,741	244,4	730.120	184.009	218.224
ŞUBAT	9.375.200	1.999,184	163,8	386.940	107.283	288.832
MART	11.157.607	2.787,725	227,4	784.220	192.260	891.092
NİSAN	10.046.700	3.383,332	187,5	586.540	119.628	232.886
MAYIS	10.879.936	3.902,274	420,2	1.539.100	409.798	559.925
HAZİRAN	8.552.090	3.793,937	445,8	1.254.360	336.560	973.382
TEMMUZ	8.647.650	3.664,801	522,6	1.671.060	328.141	1.157.324
AĞUSTOS	7.629.280	3.242,696	587,1	1.992.300	346.771	1.250.791
EYLÜL	10.118.954	3.747,694	501,7	1.601.740	358.741	1.130.224
ORT.	9.762.735	3.221,93	366,72	1.171.820	264.799	744.742,22

Tüketilen doğalgaz miktarı ise, kazan doğalgaz tüketimi ile türbin doğalgaz tüketiminin toplamından ibarettir. Ocak ayı süresince türbinde doğalgaz tüketimi olmadığından (türbin çalıştırılmaya başlamadığından) bu değer düşük bulunmuştur. Doğalgaz tüketimi sadece kazanlarda olmuştur.

Ağustos ayında en düşük arıtmanın gerçekleşme nedeni yağışların olmamasından kaynaklanmaktadır. Tesiste ortalama günde yaklaşık olarak 247000 m³ atık su arıtılmıştır. Türbinde kullanılan doğalgaz tüketiminin artmasıyla bu ayda toplam doğalgaz tüketimi de artmıştır.

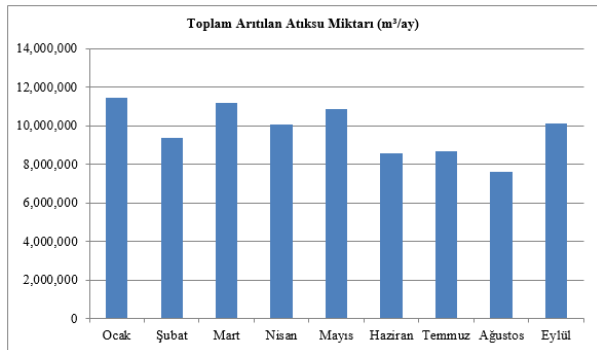
Çizelge 4'te Ağustos ayında tesise gelen atık su miktarı ortalama günde yaklaşık olarak 247000 m³ tür. Diğer aylara göre tesise en az atık su gelmiştir. Bu yüzden

Çizelge 4. A.İ.B.A.A.T. 2012 yılı (ocak-eylül) enerji değerleri (AABWWTP 2012 year (january-september) energy values)

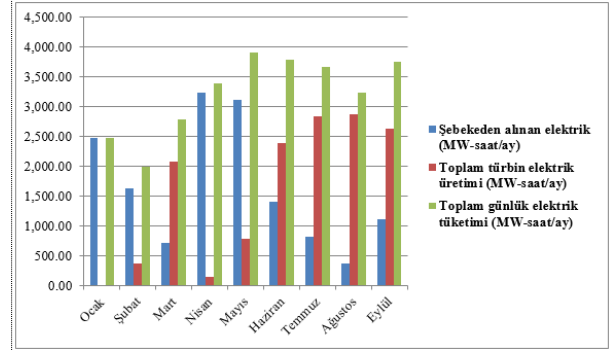
Aylar (2012)	Şebekeden Alınan Elektrik (MW-saat/ay)	Toplam Türbin Elektrik Üretimi (MW-saat/ay)	Toplam Elektrik Tüketimi (MW-saat/ay)	Enerji Geri Kazanımı (%)	Toplam Arıtılan Atık su Miktarı (m ³ /ay)	1 m ³ Atık su için Elektrik Tüketimi (kW-saat/m ³)
OCAK	2.475,741	0,00	2.475,741	0,00	11.457.200	0,216
ŞUBAT	1.624,184	375,00	1.999,184	18,76	9.375.200	0,213
MART	715,935	2.071,79	2.787,725	74,32	11.157.607	0,250
NİSAN	3.237,832	145,50	3.383,332	4,30	10.046.700	0,337
MAYIS	3.121,974	780,30	3.902,274	20,00	10.879.936	0,359
HAZİRAN	1.400,437	2.393,50	3.793,937	63,08	8.552.090	0,444
TEMMUZ	823,501	2.841,30	3.664,801	77,53	8.647.650	0,424
AĞUSTOS	363,596	2.879,10	3.242,696	88,78	7.629.280	0,425
EYLÜL	1.112,894	2.634,80	3.747,694	70,31	10.118.954	0,370
ORT.	1.652,90	1.569,03	3.221,93	46,34	9.762.735	0,33

tesiste bulunan ve elektriği kullanan donanımlar daha düşük seviyelerde çalıştırılmış ve şebekeden alınan elektrik miktarı da düşük olmuştur. Şebekeden alınan elektrik miktarının düşük olmasından dolayı tesisin diğer üniteleri için gerekli olan elektrik tribünlerden daha fazla temin edilmiştir. Bu da tribünlerde daha fazla elektrik üretimine neden olmuştur.

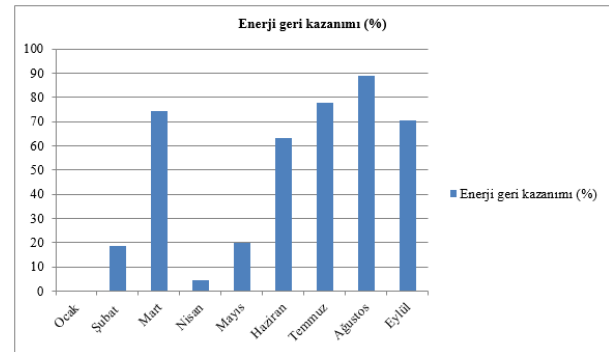
A.İ.B.A.A.T. 2012 yılı (ocak-eylül) ayları arasında toplam arıtılan atık su miktarı Şekil 3'de, aylık enerji değerleri Şekil 4'de, aylık giderim verimleri Şekil 5'te, m³ başı atık su için elektrik tüketimi Şekil 6'da verilmiştir.



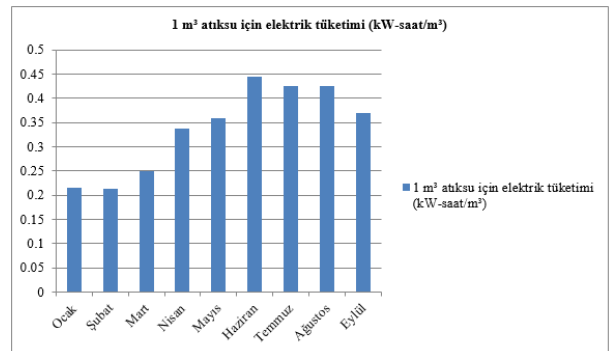
Şekil 3. A.İ.B.A.A.T. 2012 yılı (ocak-eylül) toplam arıtılan atık su miktarı (m³/ay) (AABWWTP 2012 year (january-september) total treated wastewater(m³/month))



Şekil 4. A.İ.B.A.A.T. 2012 yılı (ocak-eylül) aylık enerji değerleri (AABWWTP 2012 year (january-september) monthly energy values)



Şekil 5. A.İ.B.A.A.T. 2012 yılı (ocak-eylül) aylık giderim verimleri (AABWWTP 2012 year (january-september) monthly removal efficiencies)



Şekil 6. A.İ.B.A.A.T. 2012 yılı (ocak-eylül) aylık m³ atık su için elektrik tüketimi (AABWWTP 2012 year (january-september) for m³ wastewater electric consumption)

3.2. Tesisten Elde Edilen Verilere Göre Hesaplamalar (Calculations by the Data Obtained From Plant)

Bu çalışmada A.İ.B.A.A.T.'de enerji tüketimi, üretimi incelenmiştir. Bu amaçla tesisin 2012 yılı ocak-eylül ayları arasında giderim sırasında tüketilen enerji miktarı tüm tesis için toplam olarak tespit edilmiştir. Tesise ait bulgular Çizelge 2., 3., 4., ve Şekil 3., 4., 5., 6.'da verilmiştir.

Şekil 3., 4., 5. ve 6.'da verilen bağıntılardan da görüleceği üzere, giren ve giderilen kirletici yükü arttıkça, toplam enerji sarfiyatı artmasına rağmen, birim enerji sarfiyatı beklendiği gibi düşmektedir. Tesisin enerji tüketiminin aynı olmasına rağmen, giderilen kirlilik yükündeki artış, birim enerji tüketimini düşürmektedir.

Tesisin enerji sarfiyatları incelendiğinde; ortalama aylık toplam elektrik tüketimi 3221930 kW-saat enerji tüketildiği tespit edilmiştir. Tesisin aylık ortalama debisini ve enerji tüketim değerlerini ele alınırsa tesisin tamamı için 1 m³ debi başına harcanan enerji miktarlarını bulunur. Bu değerler; $Q_{ort.} : 9762735 \text{ m}^3/\text{ay}$; Tüm tesis toplamı için: 0,33 kW-saat/m³ olarak bulunmuştur.

Tesise ait yıllık ortalama enerji tüketimi 3221930 kW-saat/ay ve e.n. 1950000 kişi dikkate alındığında, tesisteki ortalama özgül enerji kullanımı, 19,8 kW-saat/kişi.yıl, 0,33 kW-saat/m³ olarak hesaplanmıştır.

İncelenen tesiste özgül enerji tüketiminin artırılan atık su debisine ve e.n. göre değişimi literatürde yapılan çalışmalarda tesislerin özgül enerji tüketimleri giriş atık su debisinin ve e.n. artmasıyla azalmaktadır. Tesis kapasitesinin artması özgül enerji tüketimine olumlu etki yapmaktadır. Tesisin kişi başı özgül enerji tüketimi 19,8 kW-saat/kişi.yıl olup, bu değer Almanya'daki atık su arıtma tesisleri için bildirilen 23-30 kW-saat/kişi.yıl aralığının dışında kalmıştır [19]. Avusturya için bildirilen 23 kW-saat/kişi.yıl medyan değeri ile kıyaslandığında bu değer daha düşük bulunmuştur [20, 21]. Panepinto ve arkadaşları [22], İtalya da 2700000 EN sahip Società Metropolitana Acque Torino (SMAT) tesisinde ortalama özgül enerji kullanımını 24,73 kW-saat/kişi.yıl ve 0,30 kW-saat/m³ olarak bulmuştur.

Tesiste kişi başı özgül enerji kullanımının düşük çıkmasının nedeni difüzörlerle yapılan havalandırmanın, mekanik havalandırıcılara göre daha yüksek verimli olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tesisin tasarım hesaplamalarında bulunan e.n. ve tesise gelen tespit edilen debi ele alınacak olunursa aylık kişi başı harcanan su miktarını bulunur.

$Q_{ort.}/e.n. (2012 \text{ yılı için}) = 9762735 \text{ m}^3/\text{ay} / 1950000 \text{ kişi} = 5,00653 \text{ m}^3 = 5007 \text{ L/N-ay}$ olarak bulunur.

Tüm tesiste harcanan aylık ortalama enerji miktarı ve tasarım hesaplamalarında bulunan e.n. ele alınacak olunursa kişi başına harcanan enerji miktarı bulunabilir. Tesiste harcanan aylık ortalama enerji miktarı/e.n. (2012 yılı için) = 3221930 kW-saat /ay / 1950000 kişi = 1,652 kW-saat/kişi = 1652 W/kişi olarak bulunur.

A.İ.B.A.A.T. aktif çamur sistemi ile çalışan bir tesistir. Aktif çamur sürecini uygulayan arıtma tesislerinde yüksek enerji-işletme maliyetleri bilinmektedir. Ancak küçük hacimlerde yüksek debiyi karşılayabilen bu sistem A.İ.B.A.A.T. için de uygun görülmüştür. Tesisten elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda; Tesisin tamamı için giderim verimleri, Ağustos 2012 ortalaması %88,78, dokuz aylık ortalama ise %46,34 olarak bulunmuştur. Tesisin aylık ortalama enerji sarfiyatı kullanılarak 1652900 kW-saat/m³ enerji gideri bulunmuştur. Aynı şekilde toplam enerji sarfiyatından ve tesise gelen günlük ortalama debi miktarı kullanılarak 1 m³ atık su için 0,33 kW-saat enerji gideri hesaplanmıştır. E.n. tesise gelen ortalama günlük debiye göre kişi başı su tüketimi 5007 L.N/ay olarak bulunmuştur. Tesiste harcanan toplam enerji sarfiyatına ve e.n. değerlerine göre de arıtma tesisinde atık su arıtımında kişi başı harcanan aylık enerji miktarı 1652 W olarak bulunmuştur. Tesisten elde edilen verilerden, tesiste giderilen yük arttıkça, birim enerji tüketimi azalmaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada A.İ.B.A.A.T.'de enerji üretimi, tüketimi, özgül enerji kullanımı, birim arıtılan atık su başına enerji tüketimi, aylık kişi başı harcanan su miktarı, kişi başına harcanan enerji miktarı ve enerji geri kazanımı incelenmiştir. Tesisten elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda;

- Tesisin elektrik üretiminin ortalama aylık 1569030 kW-saat olduğu,
- Tesisin enerji sarfiyatları incelendiğinde; ortalama aylık 3221930 kW-saat enerji tüketildiği,
- Tesiste birim arıtılan atık su başına enerji tüketiminin 0,213-0,444 kW-saat/m³ aralığında değiştiği,
- Aylık kişi başı harcanan su miktarının 5007 L/N-ay olduğu,
- Kişi başına harcanan enerji miktarı 1652 kW-saat/kişi olduğu,
- Tesisin özgül enerji tüketimi, e.n. başına ve arıtılan atık su debisi başına 19,8 kW-saat/kişi.yıl ve 0,33 kW-saat/m³ olduğu,
- Tesisin tamamı için giderim verimlerinin Ağustos 2012 ortalamasının %88,78, dokuz aylık ortalamasının ise %46,34 olduğu,
- Tüketilen enerjinin (havalandırma, karıştırma, pompalama, çamur arıtımı vb. nedeniyle) artırılmış atık suyun debisi veya atık su arıtma tesisine giren kirlilik yükü ile orantılı olduğu tespit edilmiştir.

Artan enerji maliyetlerinden dolayı atık su arıtma tesislerinde enerji yönetimi önemli bir konu haline gelmiştir. Atık su arıtma tesislerinde enerjinin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için atık su arıtma tesisinin hidrolik olarak iyi planlanması, istenilen arıtma deşarj

standartlarını sağlayabilecek en az enerji kullanan arıtma prosesi ve ekipmanların seçilmesi ile sağlanabilir.

Mevcut tesislerde kullanılan prosesler enerji ve arıtma performansı açısından dikkatli bir şekilde izlenmeli ve özgül enerji tüketimlerinin kabul edilebilir aralıkta olup olmadığı incelenmelidir. Bu şekilde yapılan analiz sonuçları gelecekte yapılması tasarlanan tesisler için de önemli bir veri kaynağı olacaktır.

Enerji tasarrufu, atık su arıtma tesisleri, pompalar, havalandırma ekipmanları, çamur arıtma ekipmanları ve karıştırma ekipmanlarının yerleşimini ve tasarımını optimize ederek elde edilebilir. Atık su arıtma tesislerinin enerji verimliliği esaslarına uygun, etkili bir şekilde işletiminin sağlanması (işletmecilerin eğitimi), atık su arıtma tesisleri alanında faaliyet gösteren tasarım ve mühendislik firmalarının konuyla ilgili olarak bilgilendirilerek etkin ve verimli enerji kullanımının gelecek projelere dahil edilmesi sağlanmalıdır.

Açıkçası, daha yüksek enerji verimliliği daha düşük enerji tüketimi, daha düşük sera gazı emisyonlarını ve atık su arıtma tesisleri için daha düşük işletme maliyetleri anlamına gelmektedir.

Tesiste arıtılan atık su; park, bahçe, spor tesisleri, eğlence ve dinlenme alanları, otoyol kenarları, yangın söndürme ve sanayide kullanılmakta ve tesis sayesinde yaklaşık 200000 ton atığın denize dökülmesi engellenmektedir. Tesis, aynı zamanda ülkemizdeki atık suyun katı nihai ürüne ve biyogaza dönüştürüldüğü, biyogazdan elektriğin üretildiği, kuru ürünün ise çimento fabrikalarına katı yakıt olarak verildiği ileri teknolojiye sahip atık su arıtma tesisidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazar, bu çalışmada A.İ.B.A.A.T. ile ilgili verilerin temininde katkı sağlayan ve yardımlarını esirgemeyen İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi'ne (İSKİ) teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Von Sperling M., "Comparison Among the Most Frequently Used Systems for Wastewater Treatment in Developing Countries", *Water Science and Technology*, 33(3): 103-110, (1996).
- [2] Focus on Energy, Water and wastewater energy best practice guidebook. Prepared for Wisconsin Department of Administration by the Focus on Energy Program. Madison, WI, US, (2006).
- [3] Ahmetovic' E., Ibric' N., and Kravanja Z., "Optimal design for heat-integrated waterusing and wastewater treatment networks", *Applied Energy*, 135: 791-808, (2014).
- [4] Rojas J., and Zhelev T., "Energy efficiency optimization of wastewater treatment: study of ATAD", *Computers&Chemical Engineering*, 38: 52-63, (2012).
- [5] Tchobanoglous G., Burton F.L., and Stensel H.D., "Metcalf and Eddy Inc., *Wastewater engineering: Treatment and reuse (4th ed.)* ", New York: McGraw-Hill, (2006).

- [6] Vera L., Sun W., Iftikhar M., and Liu J., "LCA based comparative study of a microbial oil production starch wastewater treatment plant and its improvements with the combination of CHP system in Shandong China", *Resources Conservation and Recycling*, 96: 1-10, (2015).
- [7] Elias-Maxil JA., Peter van der Hoek J., Hofman J., and Rietveld L., "Energy in the urban water cycle: actions to reduce the total expenditure of fossil fuels with emphasis on heat reclamation from urban water", *Renewable&Sustainable Energy Reviews*, 30: 808-820, (2014).
- [8] Venkatesh G., and Brattebø H., "Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: case study of Oslo (Norway)", *Energy*, 36: 792-800, (2011).
- [9] Liu H., Ramnarayanan R., and Logan BE., "Production of electricity during waste-water treatment using a single chamber microbial fuel cell", *Environmental Science and Technology*, 38: 2281-2285, (2004).
- [10] Yang L., Zeng S., Chen J., He M., and Yang W., "Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants", *Water Science and Technology*, 62(6): 1361-1370, (2010).
- [11] Mizuta K., and Shimada M., "Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan", *Water Science and Technology*, 62(10): 2256-2262, (2010).
- [12] Balmer P., "Operation costs and consumption of resources at Nordic nutrient removal plants", *Water Science and Technology*, 41(9): 273-279, (2000).
- [13] Krampe J., "Energy benchmarking of South Australian WWTPs", *Water Science and Technology*, 67(9): 2059-2066, (2013).
- [14] Energy Conservation in Wastewater Treatment Facilities Manual of Practice; *Water Environment Federation: Alexandria*, VA, USA, 1-142, (1997).
- [15] Westerhoff P., Yoon Y., Snyder S., and Wert E., "Fate of Endocrine-Disruptor, Pharmaceutical, and Personal Care Product Chemicals during Simulated Drinking Water Treatment Processes", *Environmental Science and Technology*, 39: 6649-6663, (2005).
- [16] Zwiener C., and Frimmel F.H., "Oxidative Treatment of Pharmaceuticals in Water", *Water Research*, 34: 1881-1885, (2000).
- [17] Öztürk İ., Timur H., ve Koşkan U., "Atık su Arıtımının Esasları -Eysel, Endüstriyel Atık su Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü", T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, İstanbul, (2005).
- [18] İMC, İstanbul Master Plan Study, İstanbul Water and Sewerage Administration, (1999).
- [19] MURL-Ministry for Environment, Nature Protection, Agriculture&Consumer Protection in the German State of North Rhine Westphalia, Energy in WWTPs (in German), Düsseldorf, Almanya, (1999).
- [20] VASS-Swedish Water Association online database (in Swedish).
- [21] Jonasson M., "Energy Benchmark for Wastewater Treatment Process - A Comparison between Sweden and Austria", Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, (2007).
- [22] Panepinto D., Fiore S., Zappone M., Genon G., and Meucci L., "Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy", *Applied Energy*, 161: 404-411, (2016).