

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

	Sayfa No
İlker Bekir TOPÇU, Tayfun UYGUNOĞLU, İsmail HOCAOĞLU (Araştırma Makalesi/Research Article) Yüksek Fırın Cüruf Katkılı Çimento Pastalarının Elektriksel Özdirençlerinin Araştırılması Investigation of Electrical Resistivity of Cement Paste Blended with Blast Furnace Slag	257-264
Tarik ASAR, Burak KORKMAZ, H. İbrahim EFKERE, Nihan AKIN, Süleyman ÖZÇELİK (Araştırma Makalesi / Research Article) <i>In,O</i> , İnce Filmlerin Yapısal, Morfolojik, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi: Gaz Sensörü Uygulamaları Investigation of the Structural, Morphological, Optical and Electrical Properties of <i>In,O</i> , Thin Films: Gas Sensor Applications	265-271
Ferhat BİNGÖL (Araştırma Makalesi / Research Article) Rüzgar Enerji Sistemleri için Hava Yoğunluğunun Hesaplanması Calculation of Air Density for Wind Energy Systems Use.....	273-281
Funda KAHRAMAN, Gökhan BAŞAR, Zülfi KOÇOĞLU, Emre YENİYİL (Araştırma Makalesi / Research Article) Delik Büyütme İşleminde Kesme Parametrelerinin Çok Yanıtlı Taguchi Deneysel Tasarım Yaklaşımı Kullanılarak Optimizasyonu Optimization of Cutting Parameters in Hole Machining Process by Using Multi-objective Taguchi Approach	283-290
Engin ÖZBAS (Araştırma Makalesi / Research Article) Experimental Study Of Diffusion Absorption Refrigeration Systems Using Solar Energy	291-297
Mehmet Ali ARSLAN, Mustafa AKTAŞ (Araştırma Makalesi / Research Article) İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtım Açısından Değerlendirilmesi Evaluation of Insulation Materials Used in Construction Sector Based on Heat and Sound Insulation.....	299-320
Semra BENZER, Recep BENZER (Araştırma Makalesi / Research Article) Modelling Nitrate Prediction of Groundwater and Surface Water Using Artificial Neural Networks Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Yer Altı ve Yüzeysel Sularındaki Nitrat Tahmininin Modellenmesi	321-325
Akbar SERVATMAND, Osman ŞİMŞEK (Araştırma Makalesi / Research Article) Yüksek Performanslı Harç Üretiminde Optimum Nano Malzeme Oranlarının Belirlenmesi The Determination of the Optimum Nano Materials Ratios in Production of High Performance Mortar.....	327-332
Sercan VANÇİN, Ebubekir ERDEM (Araştırma Makalesi / Research Article) Detection of the Vehicle Direction with Adaptive Threshold Algorithm Using Magnetic Sensor Nodes	333-340
Ayşe Nur ACAR, Abdul Kadir EKŞİ, Ahmet EKİCİBİL (Araştırma Makalesi / Research Article) The Physical Properties Of Aluminium-7xxx Series Alloys Produced By Powder Metallurgy Method Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Alüminyum-7xxx Serisi Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri	341-350
Serkan KIVRAK (Araştırma Makalesi / Research Article) İnşaat Projelerinde Kör Noktalardan Kaynaklanan İş Kazalarını Önleme Sistemi Job Accident Prevention System for Accidents Caused by Blind Spots in Construction Projects	351-357
Merve ŞENTÜRK ACAR, Onur KAYAPINAR, Oğuz ARSLAN (Araştırma Makalesi / Research Article) Islak Kireçli Baca Gazı Desulfürizasyon Sistemi Termodinamik ve Ekonomik Analizi Thermodynamic And Economic Analysis of Wet Lime Liquid Gas Desulfurization System	359-368
İrem ŞANAL (Araştırma Makalesi / Research Article) Beton Üretiminde Karbondioksit Emisyonları Açısından Önemli: Toplumsal ve Çevresel Etkiler Significance of Concrete Production in Terms of Carbon dioxide Emissions: Social and Environmental Impacts.....	369-378
Serkan KIVRAK, Gökhan ARSLAN (Araştırma Makalesi / Research Article) İnşaat Proje İmalatlarında Artırılmış Gerçeklik Teknolojisi Uygulamaları Augmented Reality Technology Applications in Construction Project Activities	379-385
Murat ERDEMOĞLU, Mustafa BİRİNCİ, Turan UYSAL (Derleme Makalesi / Review Article) Kil Minerallerinden Alümina Üretimi: Güncel Değerlendirmeler Alumina Production from Clay Minerals: Current Reviews	387-396
Ebubekir ÇANTLI, Mustafa AYDIN, Ferhat YILDIRIM (Araştırma Makalesi / Research Article) Production and Characterization of Composite Filaments for 3D Printing The Üç Boyutlu Yazım İçin Kompozit Filamentlerin Üretimi ve Karakterizasyonu	397-402
Meltem KOŞAN, Mustafa AKTAŞ (Araştırma Makalesi / Research Article) Faz Değiştiren Malzemelerle Termal Enerji Depolayan Bir Isı Değiştiricisinin Sayısal Analizi Numerical Analysis of a Heat Exchanger That Stores Thermal Energy with Phase Change Materials.....	403-409
Enes ERSÖZ, İsmail OVALI (Araştırma Makalesi / Research Article) AISI D2 Soğuk İş Takımı Çeliğine Uygulanan Endüstriyel Kriyojenik İşlemin Aşınma Davranışları Üzerindeki Etkisi The Effects of The Industrial Cryogenic Process on The Wear Behaviours of AISI D2 Cold Work Tool Steels.....	411-417
Çağlar KILIKÇIER, Ersen YILMAZ (Araştırma Makalesi / Research Article) Trafik Işığı Tespiti Yapan Bir Sürücü Güvenlik Destek Sistemi A Driver Safety Support System Which Detects Traffic Lights	419-426
Mustafa ÇULLU (Araştırma Makalesi / Research Article) Kürşün-Çinko Maden Artığı Kayaçlarla Üretilen Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması Investigation Of Mechanical And Physical Properties of Concrete Produced to Lead-Zinc Mining Waste Rocks.....	427-435
Sinan AKSÖZ, Bülent BOSTAN (Araştırma Makalesi / Research Article) Mekanik Olarak Sentezlenen NiTi + Zn Tozlarının Karakterizasyonu ve Sinterlenebilirliğinin Araştırılması Investigation of Characterization and Sinterability of Mechanically Synthesized NiTi + Zn Powders.....	437-443
Munise Didem DEMİRBAŞ, Mustafa Kemal APALAK (Araştırma Makalesi / Research Article) Fonksiyonel Olarak Kademelendirilmiş Modüllü Yapıştırıcı Bağlantıların Isıl Gerilme Analizi Thermal Stress Analysis of Functionally Graded Modulus Adhesive Joints	445-456
Afşin Yusuf ÇETİNKAYA (Araştırma Makalesi / Research Article) Süt Endüstrisi Atıksuyunun Biyometanizasyon Potansiyelinin İncelenmesi Investigation of Biomethane Potential of Dairy Industry Wastewater.....	457-460
Anwar ALNAWAS, Nursal ARICI (Review Article / Derleme Makalesi) The Corpus Based Approach to Sentiment Analysis in Modern Standard Arabic and Arabic Dialects: A Literature Review Modern Standart Arapça ve Arap Lehçelerinde Duygu Analizine Külliyyat (Korpus) Temelli Yaklaşım: Bir Literatür İncelemesi	461-470
Yağmur KOPRAMAN, Rüçhan Emir ÖZMEN, Anıl ÖZDEMİR, Ali ÖZGEDİK (Araştırma Makalesi / Research Article) Çelik Elemanlar ile Güçlendirilen Tuğla Duvarların Kayma Davranışının Araştırılması Research On The Shear Behaviour Of Masonry Walls Strengthened With Steel Members	471-476
Mustafa BURUNKAYA, Melek DİJLE (Araştırma Makalesi / Research Article) Yerleşik ve Gömülü Uygulamalarda Kontrol İşlemleri ve PC'de Yazı Yazmak İçin Kullanılabilen Düşük Maliyetli Genel Amaçlı Bir Konuşma Tanılama Sistemi A Low Cost General Purpose Speech Recognition System Used to Control Processes in The Embedded and Stationary System and Write Texts on The PC.....	477-488
Bekir ÇEVİK (Araştırma Makalesi / Research Article) Analysis of Welding Groove Configurations on Strength of S275 Structural Steel Welded by FCAW.....	489-495
Ahmet ÜNAL, Kemal YAMAN, Emre OKUR , Mehmet Arif ADLI (Araştırma Makalesi / Research Article) Bir İtici Vektör Kontrol (IVK) Test Sistemi Tasarımı ve Uygulaması Design and Implementation of a Thrust Vector Control (TVC) Test System	497-505
Kemal KOÇ (Araştırma Makalesi / Research Article) Nükleer Tıp Merkezlerinde Kullanılan Radyoizotop Kalibratörlerinde Kalite Sağlanması Üzerine Bir Uygulama-Lineerite Testi An Application Study (Linearity Test) About Maintaining Quality in Radioisotope Calibrators Which Are Used in Nuclear Medicine Centers	507-511
Kürşat YILDIZ (Araştırma Makalesi / Research Article) Şehir İçi Asfalt Kaplamaların Kayma Potansiyelinin Değerlendirilmesi - Bir Durum Çalışması Evaluation of Skid Potential of Urban Asphalt Coatings – A Case Study	513-518

POLİTEKNİK DERGİSİ

Journal of Polytechnic

POLİTEKNİK DERGİSİ

VOLUME / CİLT 21 NUMBER / SAYI 2 JUNE / HAZİRAN 2018

Politeknik Dergisi

Journal of Polytechnic

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

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

Editör Yardımcısı / Associate Editor
Doç. Dr. M. Tolga ÖZKAN
Gazi Üniversitesi / Gazi University

Editör / Editor
Prof. Dr. Adnan SÖZEN
Gazi Üniversitesi / Gazi University

Editör Asistanı / Assistant Editor
Dr. Serhat KARYEYEN
Gazi Üniversitesi / Gazi University

YARDIMCI EDITÖRLER/ASSOCIATE EDITORS

Prof. Dr. Jose Manuel LOPEZ-GUEDE, University of the Basque Country
Prof. Sanjeevikumar PADMANABAN, Aalborg University
Prof. Dr. Hacı Bayram KARADAĞ, İnönü Üniversitesi
Prof. Dr. İhsan ALP, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Hilal KURT, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Murat HOŞÖZ, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Dilek KUMLUTAŞ, Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Zafer TEKİNER, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Hakan KESKİN, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Murat YÜCEL, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Bünyamin CİYLAN, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa ÖZER, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Hamit SOLMAZ, Gazi Üniversitesi

YAYIN DANIŞMA KURULU/EDITORIAL ADVISORY BOARD

Abid ABU-TAIR , Berzeit University	M. Baki KARAMIŞ , Erciyes Üniversitesi
Adel NASİRİ , University of Wisconsin Milwaukee	Mahmood GHORANNEUISS , Azad University
Alper BÜYÜKKARAGÖZ , Gazi Üniversitesi	Metin GÜRÜ , Gazi Üniversitesi
Arcan DEREÇİOĞLU , Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Metin İPEK , Sakarya Üniversitesi
Arif WANI , California State University	Mustafa AKTAŞ , Gazi Üniversitesi
Ayhan ÖZÇİFTİ , Aksaray 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
Engin ÖZDEMİR , Kocaeli Üniversitesi	Nobumasa Matsui , Nagasaki University
Erol ARCAKLIOĞLU , Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	Nusret AS , İstanbul Üniversitesi
Farzollah MIRZAPOUR , University of Zanjan	Osman ISIKAN , Marmara Üniversitesi
Hakan YAVUZ , Çukurova Üniversitesi	Peter LUND , Helsinki University of Technology
Halit KARABULUT , Gazi Üniversitesi	Ramazan BAYINDIR , Gazi Üniversitesi
Hamit SARUHAN , Düzce Üniversitesi	Ramazan KURT , Bursa Teknik Üniversitesi
Hani H.W.SAIT , King Abdulaziz University	Ramazan YILMAZ , Sakarya Üniversitesi
Henryka Danuta STRYCZEWSKA , Politechnika Lubelska	Recep ÇALIN , Kırıkkale Üniversitesi
Hüseyin AKILLI , Çukurova Üniversitesi	Rodica MILICI , Stefan cel Mare Suceava University
Hüseyin Rıza BÖRKLÜ , Gazi Üniversitesi	Saffa B. RIFFAT , Nottingham University
İbrahim DİNÇER , University of Ontario, Institute of Technology	Sare SAHİL , Gazi Üniversitesi
İbrahim SEFA , Gazi Üniversitesi	Saw Sor HEOH , INTI International University
İhsan KORKUT , Gazi Üniversitesi	Sing LEE , Institute for Plasma Focus
İlhami ÇOLAK , İstanbul Gelişim Üniversitesi	Souad A.M.ALBATHI , International Islamic University of Malaysia
İlker USTA , Hacettepe Üniversitesi	Tayfun MENLİK , Gazi Üniversitesi
İshak KARAKAYA , Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Turgay AKBULUT , İstanbul Üniversitesi
Jamal KHATIB , University of Wolverhampton	Ulvi ŞEKER , Gazi Üniversitesi
Jerzy Smardzewski , Ponzan University	Yılmaz ARUNTAŞ , Gazi Üniversitesi
John KINUTHIA , University of South Wales	

Cilt /volume : 21	Sayı / number : 2	Haziran/ June : 2018
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 21 SAYI 2) KATKI VEREN HAKEMLER	
Adem ACIR	Meltem DOĞAN
Alaattin KAÇAL	Metin GÜRÜ (2 kez)
Ali ÇETİN	Metin İPEK
Alper BÜYÜKKARAGÖZ	Muharrem EYİDOĞAN
Aynur ÖZCAN	Muhittin BİLGİLİ
Bilge DEMİR	Murat DENER
Burcu GÜLTEKİN	Murat GUNGÖR
Cemal YILMAZ	Murat YÜCEL
Derya DIŞPINAR	Mürsel ERDAL
Ercan ÖZGAN	Mustafa ACARER
Eyüp AKÇETİN	Mustafa AKTAŞ (2 kez)
Faruk ŞEN	Mustafa BURUNKAYA
Fatih ŞAHİN	Mustafa GÜNAY
Güneş TANIR	Mustafa İLBAŞ (2 kez)
Hakan ADA	O. Ayhan ERDEM
Haluk KORALAY	Oğuz TURGUT
Hasbi YAPRAK	Osman ŞİMŞEK
Hayri ULVİ	Özgür ANIL
Hicabi BOLUKDEMİR	Ramazan YILMAZ
İbrahim ATILGAN	Rukiye KARAKIŞ
İbrahim ÇAVUŞOĞLU	Sabri KOÇER
İsmail ŞAHİN	Salih YAZICIOĞLU (2 kez)
Kadri YİĞİT	Seyfi POLAT
Kürşad SEZER	Şükrü ÇAVDAR
Kurtuluş BORAN	Tamer ÖZDEMİR
Latif UĞUR	Tansel TUNÇAY
M. Tolga ÖZKAN	Tayfun MENLİK
Mehmet AKCAYOL	Tunç APATAY
Mehmet ÖZKAYMAK	Uğur ÖZSARAÇ
Mehmet ŞİMŞEK	Yılmaz ARUNTAŞ
Melik ÇETİN	Yılmaz KOÇAK

<p>Yazışma Adresi / Correspondence Address :</p> <p>Politeknik Dergisi Editörlüğü Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Tanıtım ve Yayın Müdürlüğü 06500 Teknikokullar ANKARA –TÜRKİYE</p> <p>Tel : 0312-202 34 12 Fax : 0312-212 00 59 Elektronik Posta Adresi / e-mail : politeknik@gazi.edu.tr</p>

<p>Teknik Sorumlu / Technical Manager: Erdem ÇİFTÇİ</p> <p>Dizgi / Compositor: İdris ÖZÇELİK</p>
--

<p>Baskı / Printing : Gazi Üniversitesi Matbaası / Printing Unit of Gazi University</p>



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Yüksek fırın cüruf katkılı çimento pastalarının elektriksel özdirençlerinin araştırılması

Investigation of electrical resistivity of cement paste blended with blast furnace slag

Yazar(lar) (Author(s)): İlker Bekir TOPÇU¹, Tayfun UYGUNOĞLU², İsmail HOCAOĞLU³

ORCID¹: 0000-0002-2075-6361

ORCID²: 0000-0003-4382-8257

ORCID³: 0000-0001-9294-1120

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Topçu İ. B., Uygunoğlu T. ve Hocaoglu İ., “Yüksek fırın curuf katkılı çimento pastalarının elektriksel özdirençlerinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 257-264, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.403970

Yüksek Fırın Cüruf Katkılı Çimento Pastalarının Elektriksel Özdirençlerinin Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

İlker Bekir TOPÇU¹, Tayfun UYGUNOĞLU², İsmail HOCAOĞLU³

¹Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

^{2,3}Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 10.10.2016 ; Kabul/Accepted : 15.12.2016)

ÖZ

Bu çalışmada çimento pastalarında yüksek fırın cürufu içeriği ve su/çimento oranının elektriksel öz direnç üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı su/çimento oranlarında ve farklı oranda bağlayıcı içeren karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlarda çimento yerine ağırlıkça %0, %10, %20, %30 oranlarında yüksek fırın cürufu konulmuştur. Taze haldeki çimento pastalarına kalıp içerisinde elektrik akımı uygulanmış, ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır. Elektrik akımı uygulanmış ve elektrik akımı uygulanmamış numunelerdeki hidrasyon zamanı ile elektriksel öz direnç arasındaki farklar araştırılmıştır. Sonuç olarak, çimento pastalarına yüksek oranda yüksek fırın cürufu konulması ve elektrik akımı uygulanması ile priz süresi kısalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Beton bileşen, çimento pastası, elektriksel öz direnç, yüksek fırın cürufu.

Investigation of Electrical Resistivity of Cement Paste Blended with Blast Furnace Slag

ABSTRACT

In this study, the effects of blast furnace slag content and water/cement ratio at cement pastes on the electrical resistivity were investigated. Admixtures having different water/cement ratios and admixtures having binder at different dosage levels were prepared. The blast furnace slag was used in the admixtures by replacing the cement in ratio of 0%, 10%, 20% and 30% by weight. Electrical current was applied to the fresh cement pastes in the molds. The measurements were done at room temperature. The differences between electrical resistivity and hydration time with and without electric current application on the specimens were investigated. As a result, adding blast furnace slag at a high proportion and application of electrical current to the cement pastes shorten the setting time.

Keywords: Concrete structures, cement paste, electrical resistivity, blast furnace slag.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnşaat sektöründe artan talebi, en kısa zamanda ve ekonomik biçimde karşılayabilmek amacıyla seri üretim ve sanayileşme gereksinimi artmaktadır. Beton üretiminde Yüksek Fırın Cürufu (YFC) kullanılması evrensel olarak bilinmekte ve kazanç sağlamaktadır. Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu, yüksek fırınlarda daha hafif olmasından dolayı ham demirin üzerinde kalır. Demir filiz gangi, kok ve kireç taşının yanma sonrası atıkları öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC)'nu meydana getirir [1]. ÖYFC'nun hızlı soğutma uygulaması sonucunda camsı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür cüruf lar granüle yüksek fırın cürufu olarak adlandırılırlar [2]. Genelde yüksek fırın cürufunun %95'i veya daha fazlası silika, kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve oksijenden oluşmaktadır [3].

Genel olarak hidrasyon ısısının düşmesiyle puzolonik reaksiyon yavaşlamaktadır [4]. Puzolonik reaksiyonun yavaşlaması daha geç sertleşme görülmesi gibi sorunları doğurmaktadır. Diğer yandan sıcaklığın artması ile

puzolonik reaksiyon hızlandırılabilir. YFC kullanımının bir diğer faydası hidrasyonun ilk aşamalarında termal kırılmayı engellemesidir [5].

Çimento pastasının sertleşme işleminin gözlemlenmesinde elektriksel öz direnç bir parametre olarak kullanılabilir [6-7]. Elektrik iletkenlik, boşluk solisyonlarındaki çimento bazlı sistemlerde iyon transferi sebebiyle meydana gelmekte, çimento pastasında çimento ile suyun karıştırıldıktan hemen sonra (plastik şekil verilebilir durumda) hidrasyon işlemleri çalışmalarında önemli bir parametre olmuştur [8-9]. Karıştırma işleminden hemen sonra çimento pastasının hidrasyon süresince kalsiyum (Ca) ve hidroksil (OH) iyonları solisyona ilk 10 dakika içerisinde girmektedir [10]. Daha sonra kalsiyum ve hidroksil iyon konsantrasyonları yavaş bir şekilde artmaya devam ederken, yarı kristal kalsiyum silika hidrat jelinin (C-S-H) çökmesi dışında küçük değişiklikler meydana gelir [11-12]. Hidrasyonun derecesi hidrasyon işlemiyle tanımlanmakla birlikte çimento bazlı yapıların sistemlerindeki boşluk yapısıyla veya hidrasyon ürünlerinin miktarıyla ilişkilidir [13]. İletkenliliğin çeşitliliği zamanla bir fonksiyon olmasıyla, çimento pastasının zamanla boşluk solisyonlarının iç yapısında

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : afyonbeton@hotmail.com

değişiklikler meydana getirebilmektedir [14]. Bilindiği gibi çimento pastasındaki hidratasyon ürünleri C-S-H jelleri, etrenjit ve diğer bileşenlerden oluşmaktadır. Hidratasyon süresince sertleşen çimento pastalarının kapiler boşlukları gittikçe hidratasyon ürünleriyle dolmakta ve mikro yapının sıvı fazının dayanımı artmaktadır. Daha sonra çimento pastasının elektriksel direnci artmaktadır [15]

Xiao, ve Li [16], yaptıkları çalışmada elektriksel direncin ölçülmesiyle betonda uygun süper akışkanlaştırıcının seçilmesinin kolaylaştığı sonucuna ulaşmışlardır [16]. Xiao, ve Li [16], beton karışımının elektriksel direncini ölçmüşler, boşluk solisyonunun karışımındaki elektriksel öz direnç aparatıyla ilişkili olmadığı, elektriksel öz direnç ölçümü ile sertleşmemiş betonda hidratasyon hareketinin gözlenebileceği sonucuna ulaşmışlardır [16]. Chung [17] elektriksel öz direnç ölçümü ile çimento bazlı malzemelerin zarar görme potansiyelini araştırmıştır. Direncin artmasıyla zarar kanıtlanmıştır. Çimento bazlı malzemelerin zararını tespit etmek için elektriksel öz direnç miktarı parametre olarak kullanılabilceği, öz direnç miktarının arttıkça çimento bazlı malzemelerin zarar görme potansiyelinin artacağı sonucuna ulaşmışlardır [17]. Tamaas vd [18] çimento pastasının zamana bağlı elektriksel tepkisinin su içeriği, sıcaklık, klinker, alçı taşı ve karışım içeriği gibi çeşitli unsurlara bağlı olduğunu belirlemişlerdir [18]. Zhiyong, vd. araştırmalarında çimento pastasının relatif direnci ve C-S-H jellerini gösteren analitik model geliştirmişlerdir. Sonuç olarak hidratasyonun ileri aşamasında relatif direncin artmasıyla kapiler boşlukların kritik basıncını azalttığını düşünmüşlerdir [19]. Hongyan vd.[20] Relatif elektriksel iletkenlik ile C-S-H jelleri arasındaki ilişkiyi yaklaşık olarak belirleyen bir denklem elde etmişlerdir. Hidratasyon tamamen gerçekleştiğinde C-S-H jellerinin relatif elektriksel iletkenlik değerleri yaklaşık olarak 0.00775 olduğunu tahmin etmişlerdir [20]. Topçu vd. farklı su/çimento oranlarına sahip (0.40, 0.45, 0.50, 0.55) ve mineral katkıli çimento pastalarına elektrik akımı uygulamışlar, çimento pastalarına hem mineral katkı konması hem de elektrik akımı uygulanması ile priz süresinin kısaltılabileceğini belirlemişlerdir [21-22].

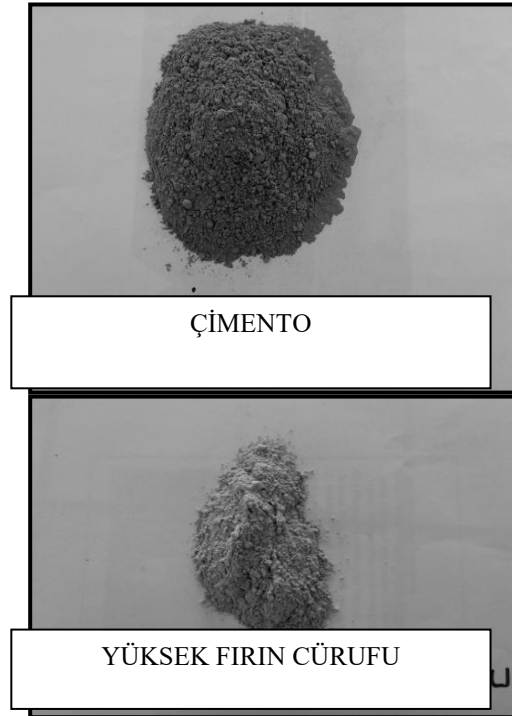
Bu çalışmada çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda Yüksek Fırın Cürufu (YFC) (%0, %10, %20, %30) konulmuş ve farklı su/çimento oranlarında (0.40, 0.45, 0.50, 0.55) sahip çimento pastalarının elektriksel öz dirençleri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri (Material used and their properties/features)

Çimento pastalarının hazırlanmasında çimento olarak Afyon Çimento Sanayi Fabrikasının üretimi olan TS EN 197-1' e uygun CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmış [23], Yüksek fırın cürufu ise Bursa çimento fabrikasından temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan çimento ve yüksek fırın cürufu Şekil 1.'de gösterilmiştir.

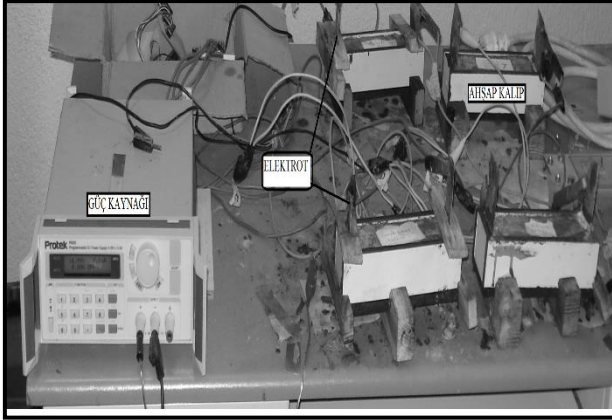
Çimentonun ve yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Çimentonun içerisindeki C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF ana bileşenleri oranları sırasıyla % 60.11, %11.02, %6.97 ve %9.95'tir. Portland çimentosunun priz başlama ve priz sona erme süreleri ise sırasıyla 182 ve 310 dakikadır. Elektrik akımı uygulanmış çimento pastaları Şekil 2.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çimento ve YFC'nin görüntüsü (A view of cement and blast furnace slag)

Çizelge 1. Çimento ve YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Physical and chemical features of cement and blast furnace slag)

İçerik, %	CEM I 42.5 R	YFC
CaO	63.6	39.8
SiO ₂	19.6	32.8
Al ₂ O ₃	4.72	11.8
Fe ₂ O ₃	3.27	1.45
MgO	1.91	4.15
Na ₂ O	0.34	0.51
K ₂ O	1.06	0.91
SO ₃	4.72	2.06
Cr ₂ O ₃	0.04	0.02
TiO ₂	0.41	0.63
KK	2.69	2.2
Özgül ağırlık	3.07	2.8
İncelik, cm ² /g	3312	4982



Şekil 2. Elektrik akımı uygulanmış çimento pastalarının görünüşü (A view of cement pastes which electrical current applied to)

2.2. Numune Üretimi ve Yapılan Deneyler

(Production of specimen and the experiments conducted)

Çimento pastalarına sırasıyla %0 (kontrol), %10, %20, %30 oranlarında çimento yerine ağırlıkça yüksek fırın cürufu katılarak ve su/çimento oranları sırasıyla 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan karışımlar hazırlanmıştır. Çimento, su ve yüksek fırın cürufu mikserde 5 dakika süreyle karıştırılmıştır.

Hazırlanan karışımlar 40 x 40 x 160 mm boyutlarındaki elektriksel yalıtımlı ahşap kalıplara konulmuştur. Kalıplar, sertleşen numunelerin kalıplardan daha kolay çıkartabilmek amacıyla yağlanmıştır. Kalıplara konulan karışımlarda hava boşluğu kalmaması için vibratör kullanılmıştır. Taze haldeki çimento pastalarının iki ucuna sabit uzaklıkta ve sabit bakır levhalar yerleştirilmiştir. Numunelere oda koşullarında 24 saat süresince DC güç kaynağından 15 Volt akım uygulanarak numunelerin elektrik akım geçişlerinin her 2 dakikada bir ortalaması alınarak veri kaydedici vasıtasıyla kaydedilmiştir. Ölçümler numunelerin elektrik akımı uygulandıktan hemen sonra başlamıştır (ilk 2 dakika içerisinde). Deneylerin daha kısa sürede bitirebilmek için hazırlanan düzeneğe 4 farklı numune bağlanmıştır. Her çimento pastasının elektriksel direnci aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$R = \frac{A}{l} \times \frac{U}{I}$$

Formülde 1; Elektrotlar arasındaki mesafeyi (metre), A ; Numunenin kesit alanını (m²), I; Numunenin içinden geçen akım şiddetini (amper), U; Elektrotlar üzerindeki gerilim değeri (volt) ifade etmektedir. Formül yardımıyla ohm.m birimi ile çimento pastalarının elektriksel öz dirençleri hesap edilmiştir.

Priz süresi deneyleri için normal kıvamda hazırlanan çimento pastaları Vicat halkasının içine yerleştirildikten sonra aletin iğnesi halka içindeki çimento pastasının üst yüzeyine indirilerek ayarlanmıştır. Daha sonra da hareket edebilir çubuk serbest bırakılarak kendi ağırlığının

etkisiyle iğnenin çimento pastasının içerisine dalması sağlanmıştır. Vicat iğnesinin ucu camın üzerine kadar indirilerek aletin göstergesi sıfıra getirilmiştir. Daha sonra, iğnenin ucu çimento pastasının üst yüzeyine dokunacak kadar indirilerek serbest bırakılmıştır. Sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından itibaren iğne ile taban arasındaki mesafe 3–5 mm uzaklıkta kaldığı an priz başlamıştır. İğnenin ucu çimento pastasının içerisine giremediği veya en çok 0.05 mm girebildiğinde priz sona ermiştir. Çimento pastalarındaki priz süresi tayini TS EN 196-3 ve ASTM C 191 standartına uygun yapılmıştır. Priz süresi deneyleri ağırlıkça belirli oranlarda YFC konulmuş (%10, % 20, % 30) ve elektrik akımı uygulanmayan çimento pastalarında yapılmıştır.

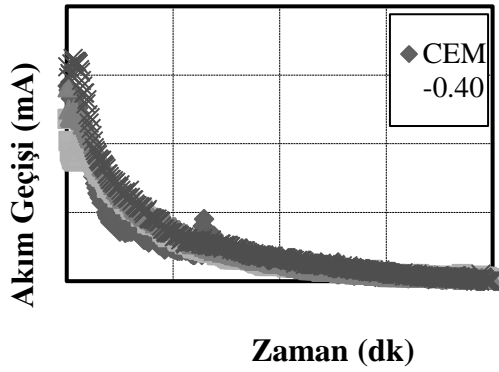
3. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

3.1. Yüksek Fırın Cürufunun ve Miktarının Elektrik Akımı Üzerindeki Etkisi (The impact of blast furnace slag and its amount on electrical current)

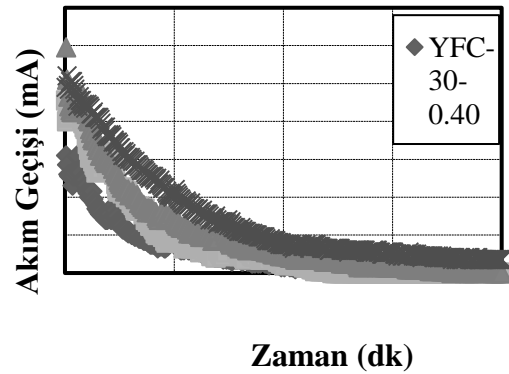
Çimento pastalarına yerleştirilmiş olan iki elektrot arasındaki akım geçişi ilk olarak sıvı fazda bulunan çimento pastasının içinde bulunan su sayesinde gerçekleşmektedir. Hidratasyonun ilk aşamasında tüm boşluklar birbiriyle bağlantılıdır. Bu sebeple elektrotlar arasındaki elektroliz olayı boşluklarda bulunan su ile doğru orantılıdır. Çimentonun ana bileşenleri ve su arasındaki tepkime zamanla meydana geldikçe birbirleriyle bağlantılı olan kaplara boşluklar birbirlerinden ayrılmaya başlarlar. Dolayısıyla çimento pastasının elektriksel direnci zamanla artar, çimento pastasının sertleşmesinden sonra ise elektriksel öz direnç en yüksek seviyelere ulaşır. Sonuç olarak çimentonun hidratasyon süresi ile çimentonun elektriksel direnci ilişkilendirilebilir.

Bu çalışmada farklı su/çimento oranlarında (0.40, 0.45, 0.50, 0.55) katkısız olarak ve farklı oranlarda YFC (%10, %20, %30) içeren çimento pastalarının priz alma süreleri boyunca elektrik akımının ve YFC'nin hidratasyon süresine etkisi üzerinde araştırma yapılmıştır. Deneyler 1 gün süresince uygun laboratuvar koşullarında yapılmıştır.

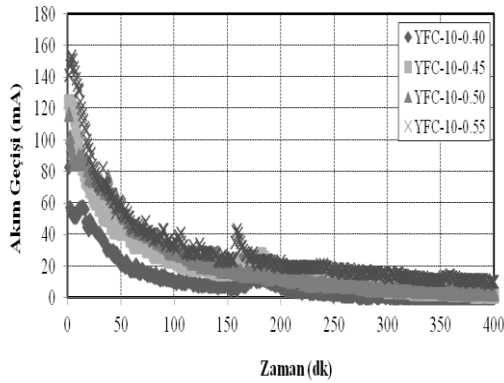
YFC katkısız çimento pastalarının elektriksel akım geçişleri karışımdaki su/çimento ile doğru orantılıdır. En büyük su/çimento oranına sahip (0.55) çimento pastasında en fazla elektrik akım geçişi meydana gelmiştir (Şekil 3). Su/çimento oranları sırasıyla 0.55 ve 0.40 olan çimento pastalarının elektriksel akım geçişleri karşılaştırılırsa su/çimento oranı 0.55 olan karışımın su/çimento oranı 0.40 olan karışıma göre 10 ila 30 dakika arasında ortalama % 21.46 kadar daha fazla akım geçişi gerçekleşmiştir. Mineral katkı olarak çimento yerine YFC konulduğunda mineral katkısız çimentoya göre akım geçişi daha az olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3-6).



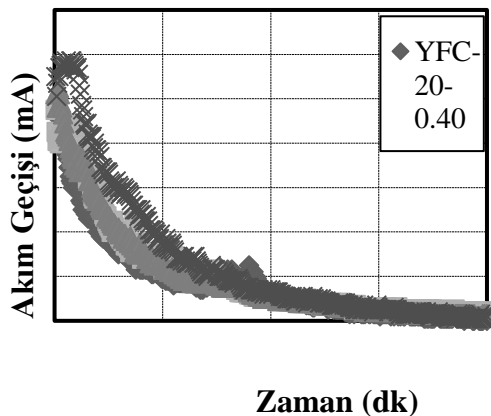
Şekil 3. Farklı su/çimento oranlarına sahip mineral katkısız çimento pastalarında zamana bağlı akım geçişleri (Current passes in cement pastes without mineral admixture on different water/cement proportions depending on time)



Şekil 6. Farklı su/çimento oranlarına sahip % 30 YFC katkılı çimento pastalarında zamana bağlı akım geçişleri (Current passes in cement pastes blended with 30% blast furnace slag on different water/cement proportions depending on time)



Şekil 4. Farklı su/çimento oranlarına sahip % 10 YFC katkılı çimento pastalarında zamana bağlı akım geçişleri (Current passes in cement pastes blended with 10% blast furnace slag on different water/cement proportions depending on time)



Şekil 5. Farklı su/çimento oranlarına sahip % 20 YFC katkılı çimento pastalarında zamana bağlı akım geçişleri (Current passes in cement pastes blended with 20% blast furnace slag on different water/cement proportions depending on time)

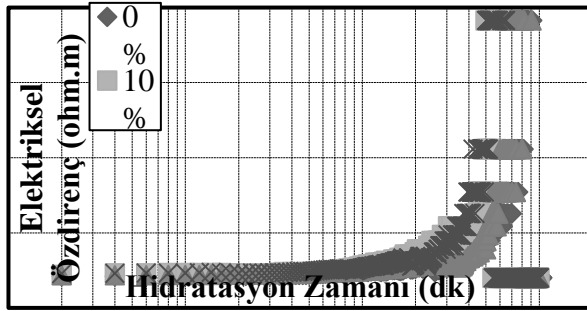
3.2. Yüksek Fırın Cürufunun ve Miktarının Elektriksel öz direnç Üzerindeki Etkisi (The impact of blast furnace slag and its amount on electrical resistance)

Şekil 7-10' den görüleceği üzere çimento yerine aynı ağırlıkta YFC konularak ve su/çimento oranları değiştirilerek yapılan incelemede çimento pastasının sıvı halinde iken (priz alırken) elektriksel öz direnç ile hidrasyon zamanı arasında ilişki kurulabileceği gözlemlenmiştir. Bütün su/çimento oranlarında hidrasyonun ilk aşamasında karışımdaki çimento miktarı arttıkça elektriksel öz direnç azalmıştır. Genel olarak hidrasyonun 10 ile 100 dakika arasında elektriksel direncin kayda değer şekilde arttığı gözlenmiştir. Hidrasyonun ilk aşamasında elektrik akımı taşıma kapasitesine sahip Ca^{+2} , OH^- , SO_4^{-2} ve alkali iyonları çok az olduğu için elektriksel öz direnç en düşük değerleri alır [24]. Çimento pastalarında iyonik konsantrasyonun azalmasıyla iyonik birleşme meydana gelir. Bu iyonik birleşmelerin sonucunda elektriksel öz direnç artmaktadır.

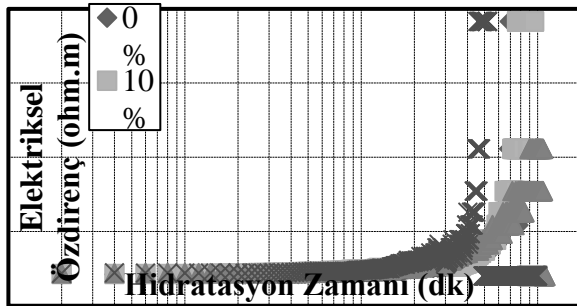
Şekil (7 -10)' de yüzde olarak farklı YFC içeriğinin ve farklı su/bağlayıcı içeriğine sahip (0.40, 0.45, 0.50, 0.55) elektrik direnci üzerindeki etkisi gözükmektedir. Hidrasyonun 10 ile 30 dakika aralığında YFC oranı %0' dan %30'a kadar artırılmasıyla elektriksel öz direnç artmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi elektriksel direncin artması çimento pastasının priz alma süresini kısalttığına göstergesidir. Elektrik akımı uygulanmayan (kontrol numunesi) ile elektrik akımı uygulanan numuneler karşılaştırıldığında elektrik akımı uygulanan numunede sertleşme (priz alma) daha kısa sürede meydana gelmiştir. Bu durum elektriksel direncin artmasıyla açıklanabilir.

Sonuçlar bazı özelliklere bağlıdır. Şöyle ki; çimentonun hidrasyon süresince iyonların filtrelenmesi ile karışımdaki miktarlarının azalmasına, hidrasyon süresince puzolanik mineral karışımdaki mineral içeriği

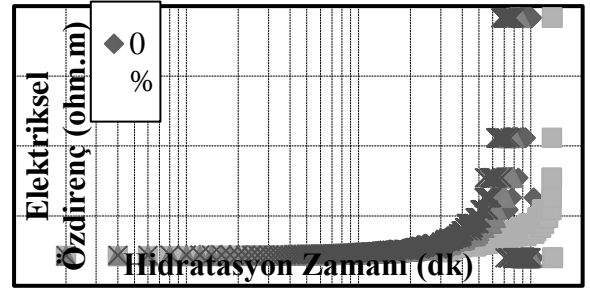
artıkça serbest Ca(OH)_2 ' nin azalma derecesi ile ilişkili olup [23,24], diğer bir yandan tüm karışımlar için hidrasyon gerçekleşikçe elektriksel öz direnç artar. Karışımın yüksek oranda YFC içermesi ile en yüksek elektriksel öz dirençlere ulaşılır. Puzolonik mineral karışımların (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 vb. içeren) ve serbest haldeki Ca(OH)_2 ' nin etkileşimi ile hidrasyonu sonucu C-S-H jellerinin çimento pastasındaki su içeriğini azaltması ile etrenjit-monosülfat oluşumunu hızlandırır [24,25]. Bu nedenle çimento pastasına YFC konulması karışımların elektriksel direncini arttırmaktadır. Hidrasyon süresince YFC taneciklerinin reaksiyonu sonucu Ca(OH)_2 içeriğinin azalmasına ve C-S-H jellerinin artmasına neden olur. Böylece C-S-H jellerinin oluşumunda YFC tanelerinin katkısının bulunduğu anlaşılmıştır. Yüksek elektriksel dirence ulaşılması ile sertleşme (priz alma) meydana gelmektedir. Bu nedenle çimento pastalarına hem YFC konulması (çimento yerine ağırlıkça aynı oranda) hem de elektrik akımı uygulanması ile hızlandırılmış kür yapılabilir.



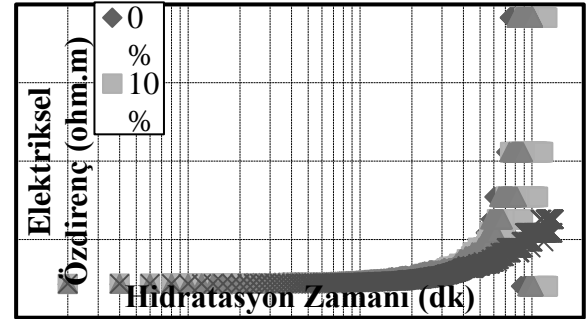
Şekil 7. Farklı oranlarda YFC konulmuş su/çimento oranı 0.40 olan çimento pastalarının elektriksel öz dirençlerinin hidrasyon zamanına göre değişimi (The change of electrical resistance of cement pastes blended with blast furnace slag on different proportions and whose water/cement proportion 0.40, according to hydration time)



Şekil 8. Farklı oranlarda YFC konulmuş su/çimento oranı 0.45 olan çimento pastalarının elektriksel öz dirençlerinin hidrasyon zamanına göre değişimi (The change of electrical resistance of cement pastes blended with blast furnace slag on different proportions and whose water/cement proportion 0.45, according to hydration time)



Şekil 9. Farklı oranlarda YFC konulmuş su/çimento oranı 0.50 olan çimento pastalarının elektriksel öz dirençlerinin hidrasyon zamanına göre değişimi (The change of electrical resistance of cement pastes blended with blast furnace slag on different proportions and whose water/cement proportion 0.50, according to hydration time)



Şekil 10. Farklı oranlarda YFC konulmuş su/çimento oranı 0.55 olan çimento pastalarının elektriksel öz dirençlerinin hidrasyon zamanına göre değişimi (The change of electrical resistance of cement pastes blended with blast furnace slag on different proportions and whose water/cement proportion 0.55, according to hydration time)

3.3. Yüksek Fırın Cürufunun ve Miktarının Priz Süresi Üzerindeki Etkisi (The impact of blast furnace slag and its amount on setting time)

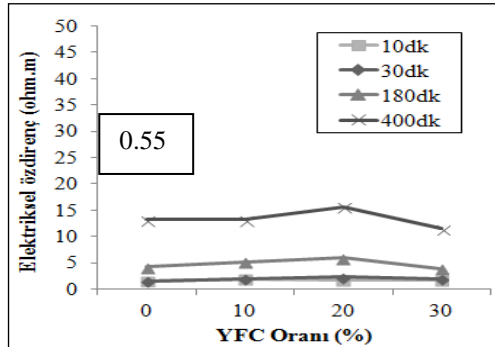
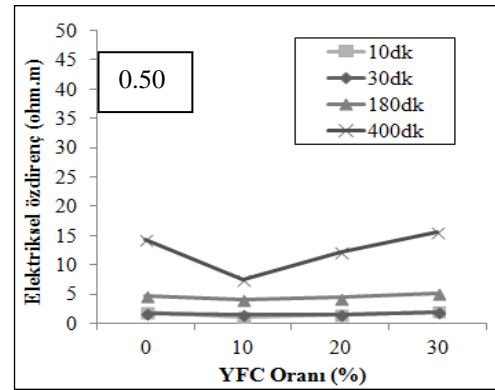
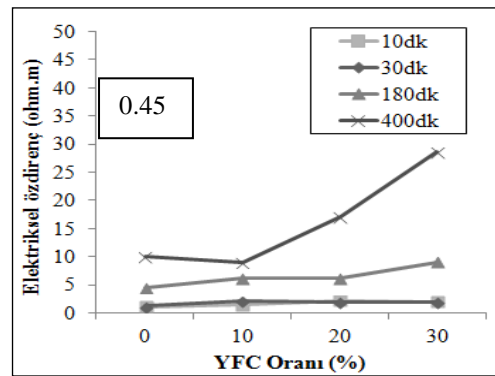
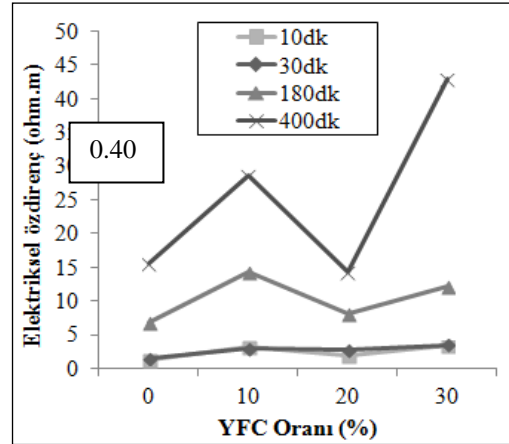
Çimento pastalarındaki elektrik akım geçişinin yüksek olması başlangıçta sıvı fazdaki su sayesinde meydana gelmektedir. Hidrasyonun ilk aşamasında tüm boşluklar birbirleriyle bağlantılıdır. Hidrasyon ürünleri gerçekleşikçe başlangıçta birbirleriyle bağlantılı olan boşluklar birbirinden ayrılmaktadır. Bu sebepten çimento pastalarının elektriksel direnci çimento pastası prizini tamamladığında maksimum seviyelere ulaşır. Sonuç olarak elektriksel öz direnç ile priz süresi arasında yakın bir ilişki vardır.

Genel olarak karışımlardaki su/çimento oranlarının artmasıyla priz sona erme süresi artmaktadır. Ayrıca çimento yerine ağırlıkça konulan YFC miktarı arttıkça da priz sona erme süresi artmaktadır. Priz sona erme süresinin kısalması çimento ile yüksek fırın cürufunun ağırlıkça belirli oranlarda yer değiştirildiğinde, çimentodan gelen C_3A miktarının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak karışımlara

elektrik akımı uygulandığında ve YFC oranının artmasıyla kontrol karışımlara göre sertleşmenin daha kısa sürede gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç çimento'nun hidratasyon sırasında iyon sayısındaki azalması ile açıklanabilmektedir [8].

Su/çimento oranına ve YFC oranına göre elektriksel öz direnç incelemesi yapmak için Şekil 11 çizilmiştir. Tüm su/çimento oranlarında hidratasyon zamanına göre karışımdaki YFC oranı arttıkça elektrik akım geçişi azalmış, elektriksel öz direnç artmıştır. Hidratasyonun 10. 30. 180. ve 400. dakikalarında su/çimento oranı 0.40 olan ve sırasıyla ağırlıkça %0, %10, %20, %30 YFC konulmuş çimento pastalarındaki elektriksel öz dirençleri Şekil 11' den görüleceği üzere YFC oranı arttıkça artmaktadır. Ancak; Çimento yerine %10 YFC konulan karışımda 10. 30. 180. dakikadaki elektriksel öz dirençleri %20 ve %30 YFC içeren karışıma göre daha yüksek değerler almıştır. Bu durum genel olarak diğer su/çimento oranlarında da benzer özellik göstermesi dikkat çekmiştir. Bunun sebebi YFC' nin içeriğinde bulunan silika ve alumina gibi yabancı maddelerin elektrik akımını iletmesi ancak YFC' nin %10' dan fazla kullanıldığı durumda portland çimentosunun hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)' in yeteri kadar olmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çimento pastalarına çimento yerine ağırlıkça %10 oranında YFC konulması ile çimento pastalarının priz başlama süresi kısaltılabilmektedir. Karışımdaki en uygun YFC içeriğinin %10 olması Emiroğlu vd. yapmış olduğu araştırmayla örtüşmektedir [26].

Tüm su/çimento oranları için hidratasyonun 10. ila 30. dakikalar arasında çimento yerine ağırlıkça konulan YFC miktarı %10' dan %30' a kadar artırılmasıyla elektriksel öz direncin arttığı görülmüştür (Şekil 11). Genel olarak su/çimento oranı arttıkça priz başlama sürelerinde düşüşler meydana gelmektedir. Örnek olarak su/çimento oranı 0.40 olan çimento pastasına %10 oranında YFC konulmasıyla 180. dakikadaki elektriksel öz direncin YFC' siz çimento pastasına göre % 51.99 daha yüksek olduğu görülmüştür. Sonuç olarak çimento pastasına ağırlıkça %10 oranında YFC konulması ve elektrik akımı uygulaması ile priz başlama süresi olması gerekenden daha kısa sürede tamamlandığı görülmüştür. Hidratasyonun 400. dakikasında ise genel olarak karışım içindeki YFC oranının %0' dan %30' a kadar artmasıyla elektriksel öz dirençte artışlar meydana gelmiştir. Özellikle su/çimento oranları 0.40 ve 0.45 olan çimento pastalarında bu artış kayda değerdir. Örnek olarak su/çimento oranı 0.40 olan YFC' siz çimento pastasının 400. dakikadaki elektriksel öz direnci 15.6 ohm.m iken çimento yerine ağırlıkça %30 oranında YFC konulması ile elektriksel öz direnç 42.9 ohm.m olarak ölçülmüştür.



Şekil 11. YFC oranına bağlı elektriksel öz dirençlerin karşılaştırılması (Comparison of electrical resistivity on different ratios of blast furnace slag)

3.4. Su/çimento Oranının Elektrik Akımı ve Elektriksel öz direnç Üzerindeki Etkisi (The impact of water/cement ratio on electrical current and electrical resistivity)

YFC içeren çimento pastaları sıvı fazda iken (hidratasyonun ilk aşamasında) su/çimento oranının artmasıyla elektrik akımını kolay iletirler. Elektriksel öz direnç ise en düşük seviyededir. Hidratasyon ürünlerini üretmek için elektrik akımının iletilmesi karışımlardaki boşluklarda bulunan serbest suyun kimyasal reaksiyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple su/çimento oranının artmasıyla hidrolik reaksiyon hızlanır. Çimento pastalarının elektriksel iletkenlik kabiliyetleri su/çimento oranı arttıkça artmaktadır [27]. Su/çimento oranı 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan ve %10 oranında YFC konulan çimento pastalarında priz başlangıç sürelerine karşılık gelen elektriksel öz dirençleri sırasıyla 14.29, 6.13, 3.98 ve 5.20 (ohm.m) olarak ölçülmüştür. Buradan düşük su/çimento oranında priz başlangıç süresine göre elektriksel öz direnç değeri en yüksek değerler aldıkları görülmüştür. Yüksek su/çimento oranında (0.55 vb.) çimento yerine yüksek miktarda YFC konulması sonucu su ile reaksiyona girecek çimento miktarı azalmasından ve karışımdaki su miktarı artması neticesinde hidratasyonun daha yavaş gerçekleştiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu araştırmanın sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Karışımlardaki elektriksel öz direnç değeri su/çimento oranının azalmasıyla artmaktadır. Hidratasyon zamanına bağlı olarak en düşük su/çimento oranına sahip çimento pastaları en yüksek elektriksel öz direnç göstermiştir.
- Çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda YFC konulması çimento pastalarının elektriksel öz direncini arttırmaktadır. Bunun sebebi karışımdaki su içeriğinin azalmasıdır. Sonuç olarak çimento yerine YFC konulması ile çimento pastasındaki kimyasal reaksiyonlar hızlandırılabilir düşülmektedir.
- Hidratasyonun 10 ila 30 dakika aralığında çimento yerine %0'dan %30'a kadar YFC konulması ile elektriksel öz direnç artmaktadır. Elektriksel öz direncin artma oranı çimento pastalarının erken priz almasında bir parametre olarak kullanılabilir.
- Farklı oranlarda YFC (%0, %10, %20, %30) içeren çimento pastalarının elektriksel öz dirençleri karşılaştırıldığında; En yüksek elektriksel öz direncin %10 oranında YFC içeren karışım göstermiştir.
- Elektriksel öz dirençle hidratasyon arasında bir bağlantı bulunmaktadır. Çimento yerine YFC konulması ve elektrik akımı uygulanmasıyla hidratasyon süresi olması gerekenden daha kısa sürmektedir. Başka bir deyişle kür süresi kısalmaktadır.

Sonuç olarak çimento pastası kompozitlerinin elektriksel öz direnç davranışları çimento yerine YFC konulmasıyla geliştirilebilir. YFC konulmuş çimento pastasının hidratasyonu elektrik akımı iletilmesi sonucu hızlandırdığı düşünülmektedir. Çalışmanın farklı gerilim şiddeti uygulanması ve farklı içerikli karışımlar üzerinde araştırmalar yapılmasıyla daha kapsamlı sonuçlar elde edilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Öner A., Yıldırım T. "Öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren ve içermeyen betonlarda kırılma kumu içeriğinin beton özelliklerine etkisi", *Deprem Sempozyumu Kocaeli*, Kocaeli, (2005).
- [2] Tokyay M., Erdoğan K., "Cüruflar ve cürufllu çimentolar", *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, (2002).
- [3] ACI 233.R-95, "Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete reported by ACI committee 233, *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan.
- [4] Morsy M.S., "Effect of temperature on electrical conductivity of blended cement pastes", *Cem Concr Res*, 29: 603-606, (1999).
- [5] Yio M.H.N., Phelan J.C., Wong H.S., Buenfeld N.R., "Determining the slag fraction, water/binder ratio and degree of hydration in hardened cement pastes", *Cement and Concrete Research*, 56: 171-181, (2014).
- [6] Backe K.R., Lile O.B. Lyomov, S.K., "Characterizing curing cement slurries by electrical conductivity", *SPE Drilling & Completion*, 201-207, (2001).
- [7] Whittington H.W., McCart J., Forde M.C., "The conduction of electricity through concrete", *Mag Concr Res*, 33: 48-60, (1981).
- [8] Xiao L., Li Z., Wei X., "Selection of superplasticizer in concrete mix design by measuring the early electrical resistivities of pastes", *Cem Concr Comp*, 29: 350-356, (2007).
- [9] Schwarz N., DuBois M., Neithalath N., "Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes", *Cem Concr Comp*, 29: 656-666, (2007).
- [10] Wei X., Li Z., "Early hydration process of portland cement paste by electrical measurement", *J Mater Civ Eng*, 18, 1: 99-105, (2006).
- [11] Buenfeld N.R. Newman J.B., "Examination of three methods for studying ion diffusion in cement pastes", *Mortars and Concrete. Mater Struct*, 20: 3-10, (1987).
- [12] Li Z., Xiao, L., Wei X., "Determination of concrete setting time using electrical resistivity measurement", *Journal of Mater Civ Eng*, 19, 5: 423-427, (2007).
- [13] Levita G., Marchetti A., Gallone G., Princigallo A., Guerrini G.L., "Electrical properties of fluidified portland cement mixes in the early stage of hydration", *Cem Concr Res*, 30: 923-930, (2000).
- [14] Rajabipour F., Weiss J., "Electrical conductivity of drying cement paste", *Mater Struct*, 40: 1143-1160, (2007).

- [15] Koleva D.A., Copuroglu O., Breugel K.V., Ye G., Wit J.H.W. de., “Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow”, *Cem Concr Comp*, 30: 731-744, (2008).
- [16] Xiao L., Li Z., “Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement”, *Cem Concr Res*, 38: 312-319, (2008).
- [17] Chung D.D.L.R., “Damage in cement-based materials studied by electrical resistance measurement”, *Mater Sci Eng*, 42: 1-40, (2003).
- [18] Tamaás F.D., Farkas E., Vörös M., Roy D.M., “Low-frequency electrical conductivity of cement, clinker and clinker mineral pastes”, *Cem Concr Res*, 17: 340-348, (1987).
- [19] Zhiyong L., Yunsheng Z., Laibao L., Qian J., “An analytical model for determining the relative electrical resistivity of cement paste and C-S-H Gel”, *Construction and Building Materials*, 48, 647-655, (2013).
- [20] Maa H., Hou D., Liu J., Li Z., “Estimate the relative electrical conductivity of C-S-H gel from experimental results”, *Construction and Building Materials*, 71: 392-396, (2014).
- [21] Topçu İ.B., Uygunoğlu T., Hocaoğlu İ., “Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures”, *Construction and Building Materials*, 28: 414-420, (2012).
- [22] Topçu İ.B., Uygunoğlu T., Hocaoğlu İ., “Electrical resistivity of fly ash blended cement paste at hardening state”, *Materials Science*, 22: 458-462, (2016).
- [23] EN 197-1/A3, “Cement- Part 1: Compositions and Conformity Criteria for Common Cements, TSE Ankara”, Turkey; [in Turkish] (2010).
- [24] Salem T.M., “Electrical conductivity and rheological properties of ordinary portland cement-silica fume and calcium hydroxide-silica fume pastes”, *Cem Concr Res*, 32: 1473-1481 (2002).
- [25] McCarter W.J., Starrs G., Chrisp T.M., “Electrical conductivity, diffusion, and permeability of portland cement-based mortars”, *Cem Concr Res*, 30: 1395-1400, (2000).
- [26] Emiroğlu M., Koçak Y., Subaşı S., “Yüksek fırın çürüfunun beton fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi”, *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, (2011).
- [27] Heikal M., Morsy M.S., Aiad I., “Effect of treatment temperature on the early hydration characteristics of superplasticized silica fume blended cement pastes”, *Cem Concr Res*, 35: 680- 687, (2005).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

In₂O₃ ince filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi: gaz sensörü uygulamaları

Investigation of the structural, morphological, optical and electrical properties of In₂O₃ thin films: gas sensor applications

Yazar(lar) (Author(s)): Tarık ASAR¹, Burak KORKMAZ², H. İbrahim EFKERE³, Nihan AKIN⁴, Süleyman ÖZÇELİK⁵

ORCID¹: 0000-0002-2430-0599

ORCID²: 0000-0003-2671-1022

ORCID³: 0000-0001-7456-0738

ORCID⁴: 0000-0002-2609-9657

ORCID⁵: 0000-0002-3761-3711

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Asar T., Korkmaz B., Efker H.İ., Akın N. ve Özçelik S., “In₂O₃ ince filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi: gaz sensörü uygulamaları”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 265-271, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.403971

In_2O_3 İnce Filmlerin Yapısal, Morfolojik, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi: Gaz Sensörü Uygulamaları

Araştırma Makalesi / Research Article

Tarık ASAR^{1,2,*}, Burak KORKMAZ^{1,2}, H. İbrahim EFKERE², Nihan AKIN², Süleyman ÖZÇELİK^{1,2}

¹Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi, 06500, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 08.02.2017 ; Kabul/Accepted : 09.07.2017)

ÖZ

Bu çalışmada, RF magnetron püskürtme yöntemi ile 50W ve 100W güç değerlerinde, iki adet In_2O_3 ince film üretildi. Üretilen ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlendi. In_2O_3 ince filmlerin sensör fabrikasyonları tamamlanarak, In_2O_3 gaz sensörleri elde edildi. Gaz sensörleri; butan gazı konsantrasyonu, uygulama voltajı ve sensör çalışma sıcaklığı değiştirilerek test edildi. Test sonuçları incelendiğinde, üretilen her iki sensörün de farklı sensör çalışma sıcaklığı ve gaz konsantrasyonları için kullanıma uygun olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: Metal oksit yarıiletken, indiyum oksit, gaz sensörü.

Investigation of the Structural, Morphological, Optical and Electrical Properties of In_2O_3 Thin Films: Gas Sensor Applications

ABSTRACT

In this study, two In_2O_3 thin films were prepared at 50W and 100W target power by using RF magnetron sputtering technique. The structural, morphological and optical properties of the produced thin films were investigated. The In_2O_3 gas sensors were produced by completing the fabrications of In_2O_3 thin films. The gas sensors were tested with changing butane gas concentration, application voltage and sensor operating temperature. When the test results were examined, it was seen that both of the produced sensors were found to be suitable for using with different sensor operating temperatures and gas concentrations.

Keywords: Metal oxide semiconductor, indium oxide, gas sensor.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal oksitler; eşsiz fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, son zamanlarda sıkça çalışılmaktadır [1–3]. Metal oksit malzemeler içerisinde; geniş bant aralığı (3.5 eV – 3.7 eV), yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek optik geçirgenlik gibi önemli fonksiyonel özelliklere sahip olan indiyum oksit (In_2O_3) ince filmler dikkat çekmektedir [4–6]. In_2O_3 ince filmlerin optik, yapısal ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla; püskürtme [7,8], buharlaştırma [9,10], atomik tabaka epitaksiyel büyütme [11], dönel kaplama [12], sol-gel [13] gibi metotlar kullanılmaktadır. Bu geliştirilebilir özelliklerinin birleşimi, indiyum oksit ince filmlerin, güneş hücrelerinde [14], organik ışık yayan diyotlarda [15] veya gaz sensörleri [16] gibi optoelektronik uygulamalarda kullanılmasına imkân vermektedir.

SnO_2 , In_2O_3 gibi gaz sensörleri, atmosferdeki zararlı ve zehirli gazların algılanması, izlenmesi ve kontrol edilmesi konularında hayati rol oynamaktadır [17]. Bu gaz sensörlerinin arasında yer alan In_2O_3 gaz sensörü, hava ortamında çalıştırıldığında, havadaki oksijen molekülleri indiyum oksit yüzeyi tarafından tuzaklanır ve oksijen molekülü iyonlaşır (O_2^- , O^- , O^{2-}). Böylece, yüzeye yakın kısımda yük taşıyıcılarının sayısı artar ve bir tüketim bölgesi oluşur. Bu durumdaki In_2O_3 gaz sensörü, etanol buharı gibi indirgeyici bir gaza maruz bırakılırsa, indirgeyici gaz ile iyonlaşmış oksijene sahip tüketim bölgesi etkileşir. Bu karşılıklı indirgeyici gazın oksitlenmesi ile sonuçlanır. Bu oksitlenme fenomeni, In_2O_3 yüzeyinden oksijen iyonlarının ayrılmasına ve dolayısıyla bariyer yüksekliğinin azalmasına neden olur. Bariyer yüksekliğinin azalması ise, iletkenliğin artmasına yol açar [17]. Bariyer yüksekliğindeki ve iletkenlikteki bu değişim, uygun elektronik düzenekler ile algılanır. Elektronik devreler tarafından işlenen bu

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : trkasar@gazi.edu.tr

değişim, sesli ve ya görüntülü ikaz olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, *RF* magnetron püskürtme yöntemi ile *50W* ve *100W RF* gücü değerlerinde iki adet katkısız In_2O_3 ince film üretildi. Üretilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlendi. In_2O_3 ince filmlerin sensör fabrikasyonları tamamlanarak, iki adet (*Sens-1* ve *Sens-2*) gaz sensörü elde edildi. Bu gaz sensörleri; bütan gazı konsantrasyonu, uygulama voltajı ve sensör çalışma sıcaklığı değişimine göre test edildi.

2. DENEYSSEL DETAYLAR

(EXPERIMENTAL DETAILS)

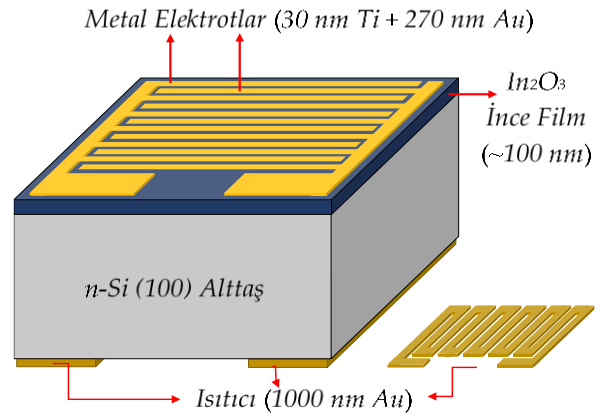
İndiyum oksit (In_2O_3) ince filmler, farklı In_2O_3 hedef gücü değerlerinde, *n-Si (100)* ve *cam* alttaşlar üzerine oda sıcaklığında radyo frekans püskürtme (sputtering) tekniği ile kaplandı. Alttaşlar sisteme yüklenmeden hemen önce, kimyasal yolla temizlendi. Kaplamalarda (%99.98) saflık oranına sahip In_2O_3 hedef malzeme kullanıldı. Hedeflerin güç değişimlerinin kaplamaya etkisini incelemek amacıyla, *50W* ve *100W* güç değerlerinde, sırasıyla, *InOx-1* ve *InOx-2* olarak isimlendirilen iki numune üretildi. Numunelerin üretimi sırasında; alttaş sıcaklığı, kaplama basıncı ve hedef-numune arası mesafe gibi kaplamayı etkileyebilecek diğer kaplama parametreleri sabit tutuldu. Kaplama parametreleri Çizelge 1’de verildi.

Üretimi tamamlanan numunelerin hedeflenen kalınlıkta ince filmlere sahip olup olmadığı, profilometre cihazı ile tayin edildi. İstenilen kalınlıkta olduğu teyit edilen ince filmlerin yapısal özellikleri X-ışınları kırınım difraktometresi (*XRD*), morfolojik özellikleri atomik kuvvet mikroskobu (*AFM*) ve optik özellikleri ultraviyole-görünür (*UV-VIS*) spektrometre ölçümleri ile belirlendi.

Çizelge 1. In_2O_3 ince film kaplama parametreleri (Deposition parameters of In_2O_3 Thin Films)

Numune Adı		<i>InOx-1</i>	<i>InOx-2</i>
Hedef Türü		In_2O_3	In_2O_3
Hedef Gücü	(W)	50	100
Alttaş sıcaklığı	(°C)	22	22
Kaplama Basıncı	(<i>mtorr</i>)	30	30
Hedef-Numune Arası Mesafe	(<i>cm</i>)	12	12
Kaplama Süresi	(<i>Dakika</i>)	45	30
Kalınlık	(<i>nm</i>)	98	97

Yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlenen In_2O_3 ince filmlerin sensör fabrikasyonları ise Şekil 1’de gösterilen, ısıtıcı ve metal elektrotların oluşturulması ile tamamlandı. Fotolitografik süreçler kullanılarak elde edilen ısıtıcı ve elektrotların metalizasyonunda; ısıtıcılar için *1000 nm* altın, elektrotlar için ise *30 nm* titanyum, üzerine *270 nm* altın kaplaması yapıldı. Fabrikasyonu tamamlanarak, Şekil 1’de şematize edildiği üzere sensöre dönüştürülen In_2O_3 ince filmler *Sens-1* ve *Sens-2* olarak isimlendirildi.



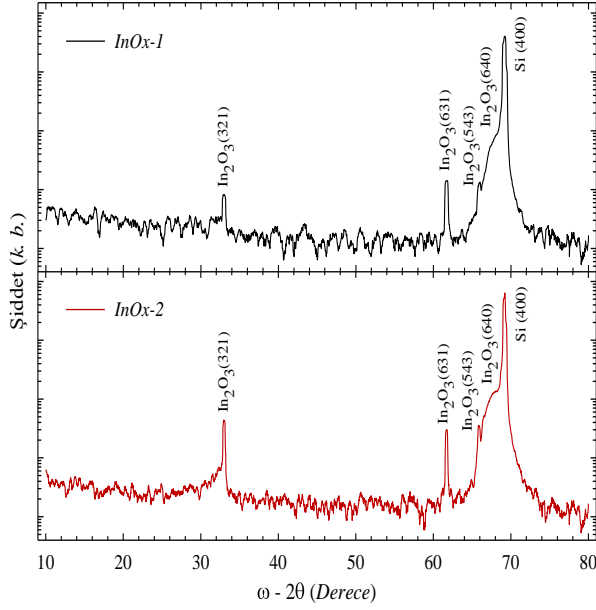
Şekil 1. In_2O_3 gaz sensörünün şematik gösterimi (The schematic demonstration of In_2O_3 gas sensor).

Üretilen sensörler; *250 ppm*, *500 ppm* ve *750 ppm* bütan gazı konsantrasyonlarında, *0V*, *1V*, *2V*, *3V*, *4V* ve *5V* uygulama voltajı değerlerinde ve *100°C* ve *300°C* çalışma sıcaklıklarında *Gaz Sensörü Test Sistemi* kullanılarak test edildi. Test sisteminde; *500 °C*’lik ısıtıcılı dört kontak sonda istasyonuna sahip şeffaf ölçüm odası, azot ve bütan gazlarını ± 0.5 hassasiyetle ayarlama imkanı sağlayan iki adet kütle akış kontrolörü (*Sierra SmartTrak100 MFC*), bilgisayar tarafından kontrol edilebilir endüstriyel tip akım-gerilim ölçer (*Fluke 289*), iki adet güç kaynağı (*Yıldırım Elektronik Y-0012*) ve 10^{-2} *mbar*’lık vakum pompası yer almaktadır.

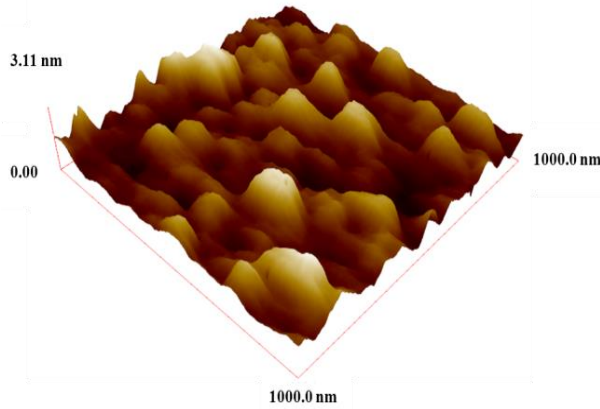
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

(RESULTS AND DISCUSSION)

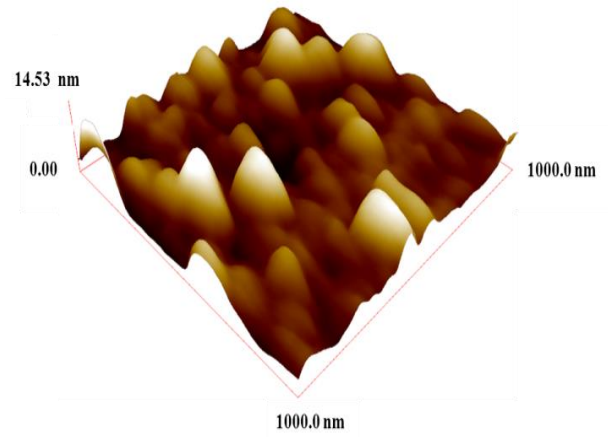
Şekil 2’de yer verilen $In_2O_3/n-Si$ yapısının *XRD* $\omega-2\theta$ taramasında; en şiddetli kırınım piki *n-Si* alttaşın kaynaklanmaktadır [18]. Diğer kırınım pikleri ise In_2O_3 ince filme ait In_2O_3 (321), In_2O_3 (631), In_2O_3 (543) ve In_2O_3 (640) düzlemlerinde oluşan *XRD* saçılmalarından meydana gelmektedir. Oluşan bu kırınım piklerinin pik pozisyonları, *JCPDS No.06-0416*’da yer alan kırınım pik pozisyonları ile uyum içerisindedir. Bu durum, *n-Si* alttaş üzerine In_2O_3 ince filmlerin cisim-merkezli kübik (*bcc*) polikristal yapıya sahip olarak üretildiğini göstermektedir [19–21]



Şekil 2. $In_2O_3/n-Si$ yapılarına ait XRD $\omega-2\theta$ desenleri ($\omega-2\theta$ XRD patterns of $In_2O_3/n-Si$ structures) 50W ve 100W güç değerlerinde katkısız olarak kaplanan In_2O_3 ince filmlerin yüzey morfolojileri atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak incelendi. Filmlerin $1 \mu m \times 1 \mu m$ 'lik tarama alanlarındaki iki boyutlu (2D) yüzey görüntüleri sırasıyla, Şekil 3 ve Şekil 4'te sunuldu.



Şekil 3. $InOx-1$ ince filmin yüzey morfolojisi (The surface morphology of $InOx-1$ thin film)



Şekil 4. $InOx-2$ ince filmin yüzey morfolojisi (The surface morphology of $InOx-2$ thin film)

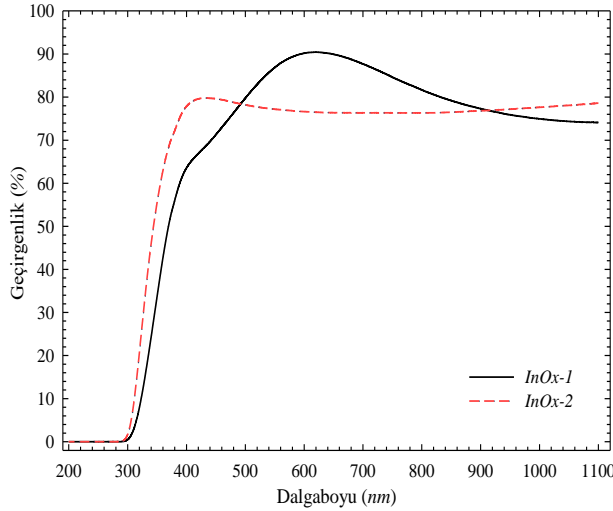
Gaz sensörü gibi geliştirilecek herhangi bir optoelektronik cihazın performansı için, yüzey homojenliği oldukça önemlidir. Bu çalışmada, üretilen her iki filmin de yüzeyi oldukça homojen olmakla birlikte filmlerin yüzeylerinde elektriksel kırılmalara, bir anlamda elektrotlar ile kısa devreler oluşturabilecek kusurlara (defect) da rastlanmadı. Ayrıca, In_2O_3 ince filmlerin yüzey morfolojilerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğünün karekök ortalaması (RMS) ve tanecik boyutu değerleri; $InOx-1$ ve $InOx-2$ örnekleri için sırasıyla; 0.484 nm , 1.876 nm ve 20.15 nm , 23.60 nm olarak belirlendi ve Çizelge 2'de verildi.

Çizelge 2'den artan kaplama gücü ile RMS değerinin ve tanecik boyutunun arttığı görülmektedir. RMS değerinin AFM gibi yüzey görüntüleme sistemlerinde birkaç nanometre civarında olması, malzeme yüzeyinin kaliteli olduğunu gösterir. Ancak; gaz sensörleri gibi bazı aygıtlarda; RMS değerinin birkaç nanometreden daha yüksek olması, büyük tanecik boyutundan ötürü sensör algılama yüzeyinin genişlemesine ve dolayısıyla, sensör hassasiyetinin de artmasına neden olabilmektedir. Elde edilen AFM sonuçları dikkate alındığında; $InOx-2$ numunesinden üretilen gaz sensörünün; $InOx-1$ numunesinden üretilen gaz sensöründen daha yüksek duyarlılığa sahip olması beklenebilir [22].

Çizelge 2. In_2O_3 ince filmlere ait AFM bulguları (The AFM results of In_2O_3 thin films)

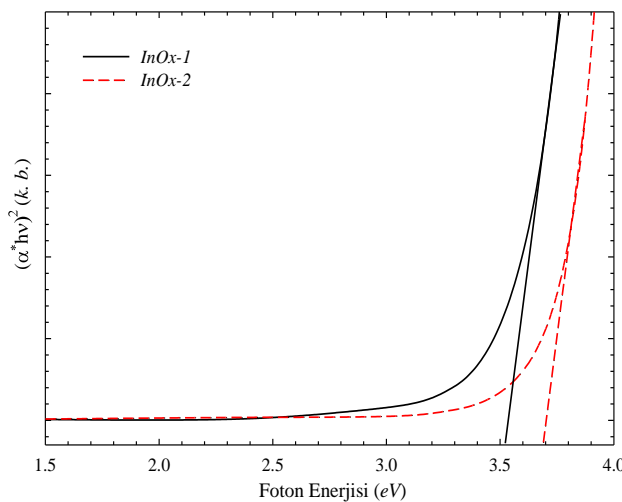
Numune	Hedef Gücü (W)	In_2O_3 İnce Film Kalınlığı (nm)	RMS (nm)	Tanecik Boyutu (nm)
$InOx-1$	50	98	0.484	20.15
$InOx-2$	100	97	1.876	23.60

In_2O_3 ince filmlerin optik özellikleri ise; cam alttaşlar üzerine kaplanmış örneklerin, 200 nm - 1100 nm dalgaboyu aralığındaki, UV-VIS spektrometre ölçümleri ile belirlendi. Ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak; Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen Geçirgenlik - Dalgaboyu ve $(\alpha^*h\nu)^2$ - Foton Enerjisi grafikleri çizildi.



Şekil 5. In_2O_3 ince filmlere ait Geçirgenlik-Dalgaboyu grafiği (The Transmittance-Wavelength graph of In_2O_3 thin films)

Numunelere ait Geçirgenlik - Dalgaboyu grafikleri incelendiğinde, In_2O_3 ince filmlerin; %80 - %90 geçirgenliğe sahip oldukları görülmektedir. Her ne kadar, belirli dalgaboylarında $InOx-1$ numunesi $InOx-2$ numunesinden daha yüksek geçirgenliğe sahip olsa da $InOx-2$ numunesi geniş bir spektrumda homojen bir geçirgenlik sergilemesi sebebiyle tercih edilebilir.



Şekil 6. In_2O_3 ince filmlere ait $(\alpha^*h\nu)^2$ -Foton Enerjisi grafiği (The $(\alpha^*h\nu)^2$ -Photon Energy graph of In_2O_3 thin films)

$InOx-1$ ve $InOx-2$ yarıiletken ince filmlerin yasak enerji aralıkları, $(\alpha^*h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişiminden (Şekil 6), sırasıyla, 3.52 eV ve 3.69 eV olarak belirlendi. Belirlenen yasak enerji değerlerinin, literatür ile uyumlu olduğu görüldü [4,23,24].

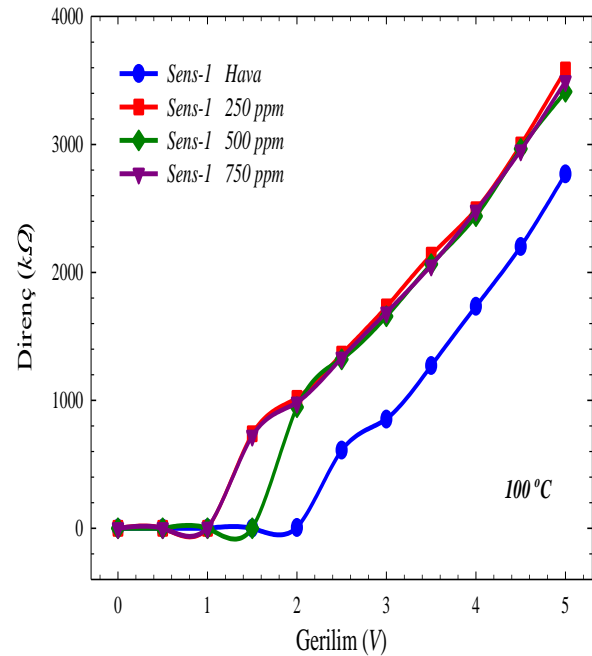
Yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlenen indiyum oksit ince filmlerin, fabrikasyonları tamamlanarak; gaz duyarlılığı gibi sensör çıktı parametreleri belirlendi.

Gaz sensörlerinin gaz duyarlılıkları (S); ortamda gaz olmadan oluşan direncin (R_{Hava}), algılanması istenilen gazın ortama verilmesi ile oluşan dirence (R_{Gaz}) oranı olarak karşımıza çıkmaktadır [17].

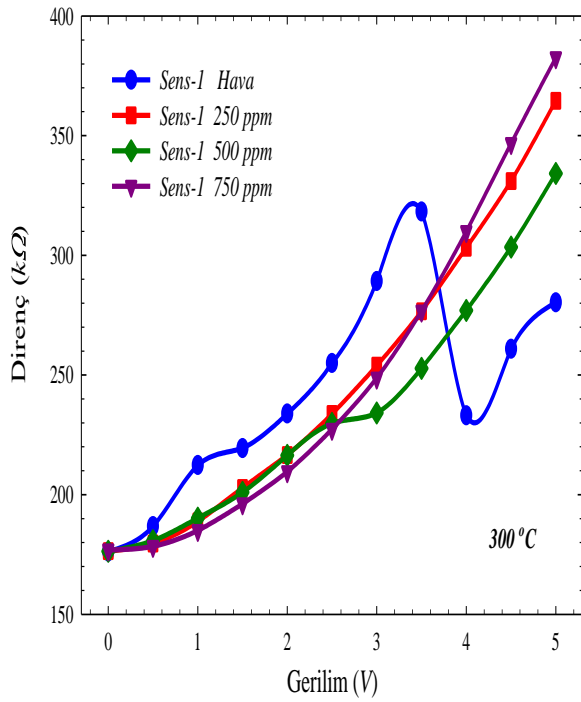
$$S = \frac{R_{Hava}}{R_{Gaz}} \quad (1)$$

O halde; sensörlerin direnç değerlerinin belirlenmesi için gerekli olan elektriksel ölçümlerin; ilk önce sensörlerin test edileceği ortama gaz verilmeden, yani hava ortamında ve daha sonra da duyarlılığının belirlenmesi istenilen gaz ortamında yapılması gerekmektedir.

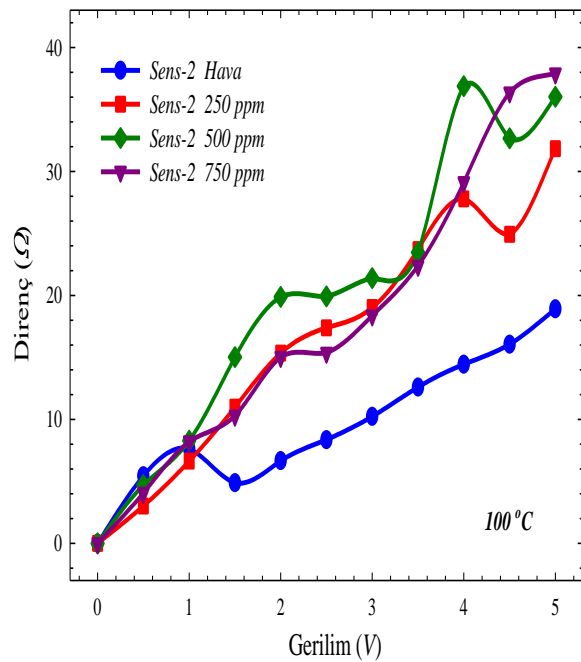
Üretimi tamamlanan gaz sensörlerinin gaz sensörü test sistemindeki elektriksel ölçümleri; 1V'luk artışlarla 0V – 5V uygulama voltajı aralığında, 100 °C ve 300 °C sensör çalışma sıcaklığında; 250 ppm, 500 ppm ve 750 ppm'lik bütan gazı ortamlarında alındı. Elde edilen verilerin kullanılmasıyla çizilen direnç-gerilim (R - V) grafikleri Şekil 7-10'da verildi.



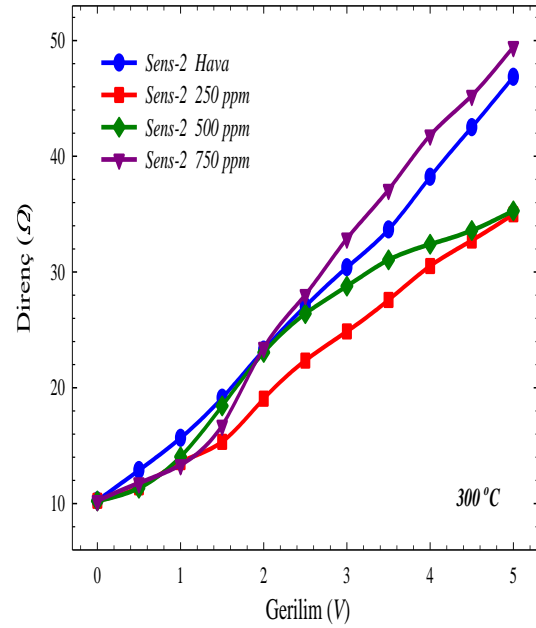
Şekil 7. Sens-1 gaz sensörünün 100 °C çalışma sıcaklığındaki R-V grafiği. (The R-V graph of Sens-1 gas sensor at 100 °C operating temperature)



Şekil 8. Sens-1 gaz sensörünün 300 °C çalışma sıcaklığındaki R-V grafiği. (The R-V graph of Sens-1 gas sensor at 300 °C operating temperature)



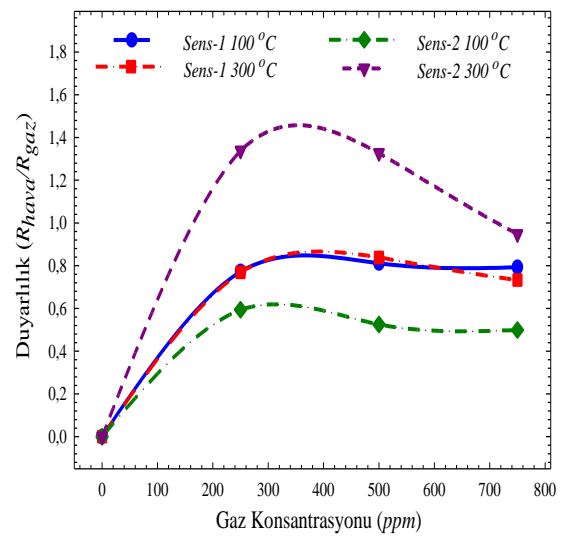
Şekil 9. Sens-2 gaz sensörünün 100 °C çalışma sıcaklığındaki R-V grafiği. (The R-V graph of Sens-2 gas sensor at 100 °C operating temperature)



Şekil 10. Sens-2 gaz sensörünün 300 °C çalışma sıcaklığındaki R-V grafiği. (The R-V graph of Sens-2 gas sensor at 300 °C operating temperature)

Elde edilen direnç değerleri ve Eşitlik.(1) kullanılarak, gaz sensörlerinin bütan gazına karşı duyarlılıkları hesaplandı. Gaz sensörlerinin, farklı sıcaklıklarda ve 5V uygulama voltajındaki duyarlılık - gaz konsantrasyonu değişimi incelendi ve Şekil 11’de verildi.

Şekil 11’den de anlaşılacağı üzere; Sens-1 gaz sensöründe sensör çalışma sıcaklığının etkisi gözlenmezken, Sens-2 gaz sensöründe sensör çalışma sıcaklığının etkisi ortaya çıkmıştır.



Şekil 11. 5V uygulama voltajında çalıştırılan In₂O₃ gaz sensörlerinin bütan gaz konsantrasyonuna bağlı duyarlılıkları (The sensitivities of the In₂O₃ gas sensors depend on butane gas concentration at 5V applied voltage)

Sens-2 gaz sensöründe sensör çalışma sıcaklığı; $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ayarlandığında, gaz konsantrasyonu değişimine bağlı olarak, sensör duyarlılığı $0.4 - 0.6$ aralığında değişim sergilerken; $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ayarlandığında, gaz konsantrasyonu değişimine bağlı olarak, sensör duyarlılığı $0.9 - 1.5$ aralığında değişim sergilemektedir. Duyarlılıktaki bu artış, çalışma sıcaklığının $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ayarlanması ile, *Sens-2* gaz sensörünün daha verimli kullanılabilceğini göstermektedir. Ayrıca, üretilen iki sensör $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sensör çalışma sıcaklığında ele alındığında, her ne kadar *Sens-1* gaz sensörünün duyarlılığı, *Sens-2* gaz sensörünün duyarlılığından daha iyi olsa da, gaz sensörlerinin elektronik devreler ile birlikte kullanımlarındaki sensör çalışma sıcaklığına duyarlılıkları da önem arz etmektedir. Bu açıdan; *Sens-1* gaz sensörünün aksine, *Sens-2* gaz sensörünün sensör çalışma sıcaklığına duyarlı oluşu, *Sens-2* gaz sensörünü bir adım öne çıkardığı düşünülmektedir. Elde edilen elektriksel sonuçlar, morfolojik sonuçlar ile birlikte ele alındığında; *Sens-2* gaz sensörünün duyarlılığındaki bu artış; RMS değerinin ve tanecik boyutunun *Sens-1* gaz sensöründen daha büyük olması ile ilişkilendirilebilir [22].

Bunların yanı sıra, *Sens-1* gaz sensörünün $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sensör çalışma sıcaklığındaki duyarlılığının, aynı sensör çalışma sıcaklığındaki *Sens-2* sensörünün duyarlılığından yüksek olması; düşük ısıtıcı gücü, yani bir başka deyişle düşük güç tüketimi olması anlamına gelmektedir. Bu açıdan, *Sens-1* gaz sensörü; düşük güç tüketimi istenilen, ancak duyarlılığın çok fazla yüksek olmasının beklenmediği gaz algılama devrelerinde kullanılabilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; RF magnetron püskürtme yöntemi ile 50 W ve 100 W güç değerlerinde hazırlanan, cisim-merkezli kübik (*bcc*) polikristal yapıya sahip, In_2O_3 ince filmlere ve bu ince filmlerden üretilen gaz sensörlerine yer verildi. İnce filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlendi. Yüzey pürüzlülüğünün karekök ortalaması ve tanecik boyutu değerleri; *InOx-1* ve *InOx-2* örnekleri için sırasıyla; 0.484 nm , 1.876 nm ve 20.15 nm , 23.60 nm olarak bulundu. Filmlerin %80 - %90 geçirgenliğe sahip oldukları görüldü. Yasak enerji aralıkları, sırasıyla; 3.52 eV ve 3.69 eV olarak belirlendi. In_2O_3 ince filmlerin sensör fabrikasyonları tamamlanarak, *Sens-1* ve *Sens-2* gaz sensörleri üretildi. Bu gaz sensörleri; farklı bütan gazı konsantrasyonlarında ($0-750\text{ ppm}$), farklı uygulama voltajı değerlerinde ($0-5\text{ V}$) ve farklı çalışma sıcaklıklarında ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $300\text{ }^{\circ}\text{C}$) test edildi. *Sens-1* gaz sensörünün aksine, *Sens-2* gaz sensörünün sensör çalışma sıcaklığına duyarlı olduğu görüldü. Yüksek duyarlılıkta çalışan gaz sensörlerinin, sensör çalışma sıcaklığının değişimine ihtiyaç duydukları düşünüldüğünde, bu özelliği ile *Sens-2* gaz sensörü ön plana çıkmaktadır. Ancak, her iki gaz sensörü; $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sensör çalışma sıcaklığındaki elektriksel özellikleriyle ele alındığında; *Sens-1* gaz sensörü; *Sens-2* sensöründen daha yüksek duyarlılığa sahip olduğu görülmektedir. Bu

özellik, *Sens-1* gaz sensörünü; düşük güç tüketimi, düşük duyarlılık beklenen gaz algılama devrelerinde kullanılabilir hale getirmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Kalkınma Bakanlığı (Proje No: 2011K120290) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Asar, B. Korkmaz, S. Özçelik, "Effect of platinum doping on the structural and electrical properties of SnO_2 thin films", *J. Exp. Nanosci.*, 11: 1285–1306, (2016).
- [2] B. Kinaci, T. Asar, S.Ş. Çetin, Y. Özen, K. Kizilkaya, "Electrical characterization of $\text{Au}/\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{n-Si}$ and $(\text{Ni}/\text{Au})/\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{n-Si}$ Schottky diodes by using current-voltage measurements", *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 14: 959–963, (2012).
- [3] B. Coskun, T. Asar, U. Akgül, K. Yildiz, Y. Atici, "Investigation of structural and electrical properties of Zirconium dioxide thin films deposited by reactive RF sputtering technique", *Ferroelectrics*, 502: 147–158, (2016).
- [4] D. Liu, W. Lei, S. Qin, L. Hou, Z. Liu, Q. Cui, et al., "Large-scale synthesis of hexagonal corundum-type In_2O_3 by ball milling with enhanced lithium storage capabilities", *J. Mater. Chem. A*, 1: 5274–5278, (2013).
- [5] M.A. Islam, M. Nuruzzaman, R.C. Roy, J. Hossain, K.A. Khan, "Investigation of Electrical and Optical Transport Properties of N-type Indium Oxide Thin Film", *Am. J. Eng. Res.*, 4: 62–67, (2015).
- [6] H.I. Yeom, J.B. Ko, G. Mun, S.H.K. Park, "High mobility polycrystalline indium oxide thin-film transistors by means of plasma-enhanced atomic layer deposition", *J. Mater. Chem. C*, 4: 6873–6880, (2016).
- [7] A.H.M.Z. Alam, P.K. Saha, T. Hata, K. Sasaki, "High-rate reactive deposition of indium oxide films on unheated substrate using ozone gas", *Thin Solid Films*, 352: 133–137, (1999).
- [8] C.E. Wickersham, J.E. Greene, "The effect of substrate bias on the electrical and optical properties of In_2O_3 films grown by RF sputtering", *Phys. Status Solidi.*, 47: 329–337, (1978).
- [9] S. Naseem, M. Iqbal, K. Hussain, "Optoelectrical and structural properties of evaporated indium oxide thin films", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 31: 155–162, (1993).
- [10] K.G. Gopchandran, B. Joseph, J.T. Abraham, P. Koshy, V.K. Vaidyan, "The preparation of transparent electrically conducting indium oxide films by reactive vacuum evaporation", *Vacuum*, 48: 547–550, (1997).
- [11] T. Asikainen, M. Ritala, W.-M. Li, R. Lappalainen, M. Leskelä, "Modifying ALE grown In_2O_3 films by benzoyl fluoride pulses", *Appl. Surf. Sci.*, 112: 231–235, (1997).
- [12] W.-Y. Chung, G. Sakai, K. Shimano, N. Miura, D.-D. Lee, N. Yamazoe, "Preparation of indium oxide thin film by spin-coating method and its gas-sensing properties", *Sensors Actuators B Chem.*, 46: 139–145, (1998).
- [13] A. Gurlo, M. Ivanovskaya, A. Pfau, U. Weimar, W. Göpel, "Sol-gel prepared In_2O_3 thin films", *Thin Solid Films*, 307: 288–293, (1997).

- [14] C.G. Granqvist, "Transparent conductive electrodes for electrochromic devices: A review", *Appl. Phys. A Solids Surfaces*, 57: 19–24, (1993).
- [15] C.C. Wu, C.I. Wu, J.C. Sturm, a. Kahn, "Surface modification of indium tin oxide by plasma treatment: An effective method to improve the efficiency, brightness, and reliability of organic light emitting devices", *Appl. Phys. Lett.*, 70: 1348, (1997).
- [16] T. Takada, K. Suzuki, M. Nakane, "Highly sensitive ozone sensor", *Sensors Actuators B. Chem.*, 13: 404–407, (1993).
- [17] K.K. Makhija, A. Ray, R.M. Patel, U.B. Trivedi, H.N. Kapse, "Indium oxide thin film based ammonia gas and ethanol vapour sensor", *Bull. Mater. Sci.*, 28: 9–17, (2005).
- [18] C. Suryanarayana, M.G. Norton, "X-ray Diffraction: A Practical Approach.", (1998).
- [19] D. Selvakumar, N. Dharmaraj, N.S. Kumar, V.C. Padaki, "Oxygen Sensing Properties of Platinum Doped Indium Oxide Nanoparticles Prepared by Hydrothermal Method", *Synth. React. Inorganic, Met. Nano-Metal Chem.*, 45: 753–758, (2015).
- [20] F.Z. Henari, A.A. Dakhel, "Investigation of nonlinear optical properties of gold nanograins embedded in indium oxide films by reflection Z-scan using continuous laser", *J. Appl. Phys.*, 108: 123109, (2010).
- [21] Z. Li, P. Zhang, T. Shao, J. Wang, L. Jin, X. Li, "Different nanostructured In₂O₃ for photocatalytic decomposition of perfluorooctanoic acid (PFOA)", *J. Hazard. Mater.*, 260: 40–46, (2013).
- [22] M. Suche, N. Katsarakis, S. Christoulakis, S. Nikolopoulou, G. Kiriakidis, "Low temperature indium oxide gas sensors", *Sensors Actuators B.*, 118: 135–141, (2006).
- [23] M. Mazouchi, S. Poduri, M. Dutta, "Growth and Characterization of Indium Oxide, Zinc Oxide and Cadmium Sulfide Nanowires by Vapor-Liquid-Solid Growth Technique", *Appl. Phys. Res.*, 6: 55–63, (2014).
- [24] N.G. Pramod, S.N. Pandey, P.P. Sahay, "Sn-doped In₂O₃ nanocrystalline thin films deposited by spray pyrolysis: Microstructural, optical, electrical, and formaldehyde-sensing characteristics", *J. Therm. Spray Technol.*, 22: 1035–1043, (2013).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Rüzgar enerji sistemleri için hava yoğunluğunun hesaplanması

Calculation of air density for wind energy systems use

Yazar (Author): Ferhat BİNGÖL

ORCID: 0000-0002-8071-3814

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bingöl F., “Rüzgar enerji sistemleri için hava yoğunluğunun hesaplanması”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 273-281, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385523

Rüzgar Enerji Sistemleri için Hava Yoğunluğunun Hesaplanması

Araştırma Makalesi / Research Article

Ferhat BİNGÖL*

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Gülbahçe Kampüsü, 35433, Urla, İzmir, Türkiye
(Geliş/Received : 08.02.2017 ; Kabul/Accepted : 09.06.2017)

ÖZ

Rüzgar tarlaları son yıllarda dünyada ve Türkiye’de deniz seviyesindeki alanların yanı sıra yüksek rüzgar hızı kapasitesine sahip dağlık bölgelerde de kurulmaya başlamıştır. Ancak, dikkat edilmesi gereken en önemli nokta bu konularda hava yoğunluğunun azaldığı ve bunun da rüzgar türbinlerinden üretim gücüne doğrudan etkilediğidir. Küçük görünen farklar eğer fizibilite aşamasında yanlış hesaplanırsa uzun yıllar üretim göz önüne alındığında önemli farklar yaratabilirler. Bu çalışmada Türkiye’de 126 ölçüm yapılmış nokta için temelde iki farklı yöntem kullanılarak yoğunluk hesabı yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Genel itibarıyla, sonuçlar yıllık ortalamalar dikkate alındığında iki metotta da birbirine yakın çıkmakta ama aylık ortalamalarda %2 seviyelerine ulaşan üretim tahmininde hatalara yol açacak farklılıklar göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbinleri, hava yoğunluğu, fizibilite.

Calculation of Air Density for Wind Energy Systems Use

ABSTRACT

In recent years, wind farms are being located at mountainous high altitude locations in Turkey. Nevertheless, most important point to pay attention for those locations are that the air density is lower and this effects the production of wind turbines directly. If the feasibility calculations are not performed in detail on the subject, small effects of air density can create a big loss in long term operational wind farms. In this study, two known methods (i) International standards for calculations and (ii) widely used engineering method are applied on datasets from 126 weathers stations all around Turkey and calculations are compared with each other. Results show similarities on yearly averages but outlines up to 2% differences in different months of the year.

Keywords: Wind turbines, air density, feasibility

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye’de rüzgar enerjisi kurulu gücü 10 sene içinde 200 katı aşan bir büyüme sağlanmış ve öncü yenilenebilir enerji kaynağı olmuştur. Diğer gelişmekte olan yenilenebilir enerji kaynakları güneş, jeotermal ve biyokütle de büyüme hızlarını artırarak yenilenebilir enerjileri Türkiye’nin petrol, kömür ve doğal gazdan sonra 4’üncü büyük enerji kaynağı olmaya aday hale getirmiştir [1]. Rüzgar enerjisinde arzın artırılabilmesi için temel kıstas büyümenin sağlıklı ve sürdürülebilir bir şekilde yapılmasıdır. Şu ana kadar ulaşımı kolay, düz ve rüzgar konusunda verimli arazilerin deniz seviyesine yakın noktalarda bulunan konumlar tercih edilmiştir. Buna karşın, birçok rüzgar enerjileri kapasite atlasına [2,3] ve Türkiye için en güncel çalışmalara [4,5] bakıldığında, ulaşımı zor, yüksek rakımlı noktalarda da Türkiye’nin rüzgar enerji kapasitesinin önemli bir bölümünün bulunduğu görülmektedir.

Yüksek rakımlı noktalarda rüzgar kapasitesinin varlığına dikkat edildiği kadar hava yoğunluğu değerine de dikkat etmek gerekir. Rüzgar türbinlerinin üreteceği güç, rüzgar hızının (U [m/s]) küpüne, kanat süpürme alanına (A

[m²]), türbinin güç katsayısına (C_p) ve hava yoğunluğuna (ρ [kg/m³]) [6] bağlıdır (Denklem 1). Rüzgar türbinlerin karakteristik özelliklerini (A , C_p) aynı türbini kullandığımızı farz ederek göz ardı edersek, bir rüzgar türbininin farklı noktalarda farklı oranda enerji üretmesine yol açan iki bağımsız değişkenin, hava yoğunluğu (ρ) ve rüzgar hızı (U) olduğunu söyleyebiliriz.

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A U^3 \quad (1)$$

Rüzgar hızı için ölçüm ve modellemeye ya da bunların birleşik çözümlerine dayalı rüzgar atlas metodolojileri geliştirilmiş ve bu sayede bir noktadaki rüzgar hızı istatistik olarak modellenenebilir hale getirilmiştir. Hava yoğunluğunu hesaplamak için ise ölçüm yapılmalıdır. Saha ölçümlerinde bu sebeple rüzgar yön ve hızları dışında sıcaklık, basınç ve nem de dahil edilmekte ve bu veriler en az bir sene süreyle toplanmaktadır. Dört mevsimi içeren bir senelik bir dönem için hava yoğunluğunun ortalaması alınarak modelleme yazılımlarında sahanın ortalama hava yoğunluğu olarak kullanılır.

Genel olarak hava yoğunluğunun bu hesaplama eklenmesi, üretilen enerjinin hesaplanmasından sonra hava yoğunluğuna göre her bir türbin noktasındaki üretim tahminin güncellenmesine ya da hesaplama öncesi rüzgar güç eğrisinin hava yoğunluğuna göre güncellenmesine

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ferhat.bingol@iyte.edu.tr

dayanır. Günümüzde bazı mühendislik uygulamalarında tüm arazide tek bir hava yoğunluğuna göre güncelleme yapılırken (ör: WAsP Yazılımı), daha yeni modellerde bir mühendislik yöntemi olan deniz seviyesinden yükseklik ve yıllık ortalama sıcaklığa göre hava yoğunluğunun her bir olası türbin noktası için hesaplanmasına dayanır (ör: WAT - Windfarm Assessment Tool).

Türbinlerin güç eğrileri üreticiler tarafından türbin kullanıcılarına genelde 15°C, standart hava basıncı ve %0 bağıl nem koşulları için hava yoğunluğuna (1.225~ kg/m³) göre hesaplanarak verilir. Oysa ki, hava yoğunluğu deniz seviyesinden farklı basınç ve neme göre değişebileceği gibi deniz seviyesinden yukarı çıkıldıkça düşebilir. Şu anda rüzgar türbinlerinin kullanıldığı yüksekliklerde 0.9 kg/m³'e kadar düştüğü gözlenen hava yoğunluğu, fizibilite hesaplarına katılmaz ise, büyük çaplı üretim tahmini hatasına yol açar. Denklem 1'de görüldüğü gibi, doğru orantılı düşüşe göre aynı özelliklere sahip iki türbin aynı rüzgar hızları altında %25'i aşan üretim kaybı yaratabilir. Yine Denklem 1'e göre teorik olarak kaybı karşılamak için rüzgar hızının deniz seviyesine göre %9 civarında artması farkın kapatılmasını sağlar ancak yüksek rakımlı bölgelere çıkıldıkça türbin konulabilecek her noktada mikro-meteorolojik şartların bu lineer dengeyi sağlaması kesin değildir çünkü dikey rüzgar profilleri [7] deniz seviyesinden yüksekliğe değil buldukları yerden yüksekliklerine bağlıdır [8,9]. Dolayısıyla deniz seviyesinden yukarı çıkıldıkça hava yoğunluğunun düştüğü ölçüde rüzgar hızının artacağı söylenemez.

Üretim hesabında bu kadar önemli olan hava yoğunluğunun hesaplanması için geliştirilen ilk standartlar 1981 yılına dayanır [10]. Geliştirilen hesaplama yöntemi o sene içinde standart haline gelmiş ve konu hakkındaki çalışmalar hesaplamaların 1992 yılında son halini almasına kadar [11] devam etmiştir. Daha sonra sabit değerlerde yapılan güncellemelerle geliştirilmiş ve yeni sürümleri çıkmıştır [12,13,14]. Yayınlanan son standart [15] bu çalışmada esas alınan hesaplama yöntemidir.

Bahsi geçen tüm çalışmalar hesapları üç atmosfer parametresine; hava sıcaklığı (t), hava basıncı (p) ve bağıl nem (h), bağlamıştır; $\rho(t,p,h)$. Öte yandan, bu çalışmaların rüzgar enerji sistemlerinde yapılan hesaplamalara etkisi hesaplanan hava yoğunluğuna göre rüzgar türbin üretim tahmini üzerinedir. Uluslararası standartları belirleyen IEC Teknik Komite 88 grubu, güç eğrilerinin hesaplanmış/ölçülmüş hava yoğunluğuna göre güncellenmesi başlığını ilk defa 2005 yılında IEC 61400-12-1 nolu standart içinde yayınlamıştır [16]. Belirtilen standart, güncel hava yoğunluğu hesaplama yöntemleri üzerine tavsiye içermemekte sadece hesaplanmış değerlerin güç eğrisini yeniden düzenlemek için nasıl kullanılacağı üzerinedir. Bu standardın uzun süre güncellenmemesinden dolayı rüzgar enerjisi sektöründe özellikle modelleme yazılımı geliştirenler yine güç eğrilerinin güncellenmesi üzerine metodolojiler geliştirmişlerdir [17,18,19]. Referans gösterilen çalışmalar, tümüyle hesaplanmış bir hava yoğunluğu değerinin güç eğrisinin

güncellenmesinde kullanılmasını hedefleyen sonuçlar içermektedir. Aynı bakış açısı, çalışmamız sırasında yürürlükte olan IEC 61400-12-1 standardının 2017 yılında yayınlanmış sürümünde de devam etmiştir [20]. Literatür taramasında görüldüğü üzere uluslararası standart metodun, mühendislik metodu ile ne kadar bağdaştığını araştırmış bilimsel yayın kısıtlıdır ve genelde açık deniz ya da okyanus üzerindeki hava yoğunluğunun gece ve gündüz arasında yüksek farklılık göstermesi ve bunun rüzgar tarlalarına etkisi konuları çalışılmıştır [21]. Sunulan çalışma bunların aksine hava yoğunluğunun hesaplandığı yöntemleri karşılaştıran ilk yayınlardan biridir.

Bir sonraki bölümde, bahsi geçen bilimsel ve mühendislik yöntemleri tanıtılmıştır. Daha sonra, karşılaştırmanın yapılabilmesi için kullanılan verilerin kaynakları konusunda bilgi verilmiştir. Takip eden bölümde ise iki yöntem ile hava yoğunluğu ayrı ayrı hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM (METHOD)

Kullanılan mühendislik yönteminin gerçek değerlerden ne kadar farklı olduğunu karşılaştırmak için hava yoğunluğunun hesaplanmasında "Uluslararası Ağırlık ve Ölçüm Komitesi (CIPM)" yöntemi temel kıstas olarak alınmıştır. CIPM hava yoğunluğunun hesaplanmasında standartlar geliştirmektedir ve otoritedir. İki yöntem takip eden alt başlıklarda açıklanmıştır.

2.1 Uluslararası Ölçüm Standartları Yöntemi

(Method of International Measurement Standards)

CIPM hava yoğunluğunu (ρ), hava sıcaklığı (t), hava basıncı (p) ve bağıl nem (h) ile Denklem 2'deki gibi ilişkilendirmiştir [15].

$$\rho(t, p, h) = \frac{p M_a}{Z R t} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (2)$$

Burada molar gaz sabiti, $R=8.314472$ J/mol.K, kuru havanın molar kütlesi, $M_a=28.96546 \times 10^{-3}$ kg/mol ve suyun molar kütlesi $M_v=18.01525 \times 10^{-3}$ kg/mol olarak alınabilir. Su buharı mol kesri, x_v , doymuş buhar basıncı p_{sv} ile artış katsayısının, f , çarpımı ve hava basıncına bölümüyle bulunur (Denklem 3).

$$x_v = \frac{p_{sv}}{f} \quad (3)$$

Doymuş buhar basıncı ve artış katsayısının deneysel çıktılara dayalı formülleri Denklem 4 ve 5'de verilmiştir.

$$p_{sv} = 1 \text{ Pa} \times e^{(c_1 T^2 + c_2 T + c_3 + \frac{D}{T})} \quad (4)$$

$$f = \alpha + \beta p + \gamma t^2 \quad (5)$$

Sıkıştırılabilirlik katsayısı, Z ise CIPM-81/91 denklemleriyle [15] aynı şekilde hesaplanır:

$$Z = 1 - p/t [a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + (b_0 + b_1 T + c_0 + c_1 T) x_v + (c_0 + c_1 T) x_v^2] + \frac{p^2}{t^2(d + e x_v^2)} \quad (6)$$

¹ <http://www.bipm.org/en/committees/cipm>

2.2 Mühendislik Yöntemi (Engineering Method)

Rüzgar enerjilerinde eğer ölçüm sırasında toplanan veriler arasında basınç p ve bağıl nem h yok ise, tavsiye edilen yöntem bu değişkenleri deniz seviyesinden yükseklik (z) ve sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) değerlerini kullanarak hesaplamak ve buradan hava yoğunluğuna ulaşılmasıdır [22]. Yani, sadece sıcaklık ölçümü bilgisi ve sabit olan yükseklik bilgisini kullanmaktır.

Hava basıncı, sıcaklık ve yüksekliğe bağlı olarak Denklem 7 gibi yazılabilir [9]. Burada, düşey sıcaklık gradyanı, $L=0.0065$ K/m, deniz seviyesi standart sıcaklığı, $t_0=288.15$ K, deniz seviyesi standart atmosferik basınç $p_0=101325$ Pa ve yer çekimi sabiti, $g=9.80665$ m/s² olarak alınır.

$$p(z) = p_0 \left[\left(1 - \frac{Lz}{t_0} \right) \right]^{\frac{gM_a}{RL}} \quad (7)$$

Sonuç olarak mühendislik yöntemi bilinmeyenleri ikiye indirir, deniz seviyesinden yükseklik (z) ve sıcaklık (T).

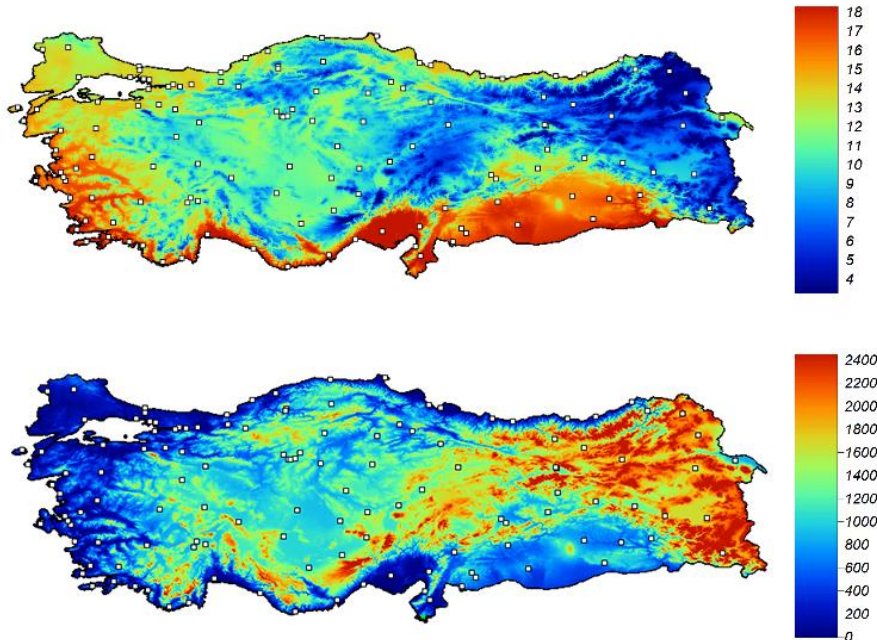
3. VERİ (DATA)

Yöntem bölümünde açıklanan CIPM ve mühendislik hava yoğunluğu hesaplama yöntemleri karşılaştırmak için Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından paylaşılan 126 ölçüm direği verisi, uydu verilerine dayalı sayısal yükseklik modeli verisi ve uzun dönem sıcaklık bilgilerine dayalı sıcaklık arşivi verileri kullanılmıştır (Şekil-1).

MGM direk verileri CIPM ölçüm standartlarına uygun olarak $\rho(t,p,h)$ formülünde kullanılmıştır. MGM'nin

Türkiye çapında 360'dan daha fazla ölçüm istasyonu vardır. Bunların arasından seçim yaparken şu kriterler gözletilmiştir (a) Türkiye'nin genelini kapsayacak bölgesel ve homojen dağılımı sağlamak; (b) Ölçüm sürelerinin en az 4 sene sürekli olması ve ölçülmüş verinin yüzde 90'ının üstünde olması. MGM'nin bu gereksinimlerini karşılayan direkleri ortalama 8 ila 12 m olup kurum tarafından kurulur, işletilir, arşivlenir ve cihazların bakımı standartlara uygun olarak düzenli olarak yapılır. Direklerden toplanan veriler rüzgar hızı (m/s), rüzgar yönü ($^{\circ}$), basınç (Pa), sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) ve bağıl nem (%) verileridir. Direkler hava yoğunluğunun hesabı için gerekli 3 parametreyi başarıyla toplamaktadır.

Mühendislik metodu olan $\rho(T,z)$ hesaplamasında kullanmak üzere ise sıcaklık verileri WorldClim [23] veri setinden alınmıştır. Bu veri seti noktasal veriye ek olarak ölçülmüş verilerden interpolasyon yöntemiyle yaratılmış yüksek çözünürlüklü aylık ortalama değerler içeren bir veri tabanıdır. 1950 ve 2000 yılları arasında toplanmış sıcaklık ve yağmur verilerini dünya meridyenlerini 10 arc-dakika ve 30 saniye arasında büyüklüklerde interpolate etmek için kullanılmış ve 0.0083° (yaklaşık 1~km) çözünürlükte bir sıcaklık veri tabanı oluşturmuştur. 12 aylık sıcaklıkların ayrı ayrı alınabilmesinin yanı sıra, bunların yıllık ortalaması da hesaplanabilir. Direklerin deniz seviyesinden yüksekliği ise yine MGM saha bilgilerinde bulunmasına karşın tam anlamıyla bir veri seti karşılaştırması yapabilmek için rüzgar enerjilerinde saha haritalarını çıkarmak için sıkça kullanılan Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) veri setinin 4.1



Şekil 1. Analizde kullanılan 126 istasyon (beyaz kareler). WorldClim verilerine göre Türkiye'nin yıllık sıcaklık ortalamaları [$^{\circ}\text{C}$] (üstte) ve SRTM 4.1 veri setine göre deniz seviyesinden yükseklik bilgileri [m] (altta) (126 stations that are used in the analysis (white squares). Averaged temperature atlas of Turkey derived from WorldClim dataset (top). SRTM 4.1 based elevation values for Turkey (bottom))

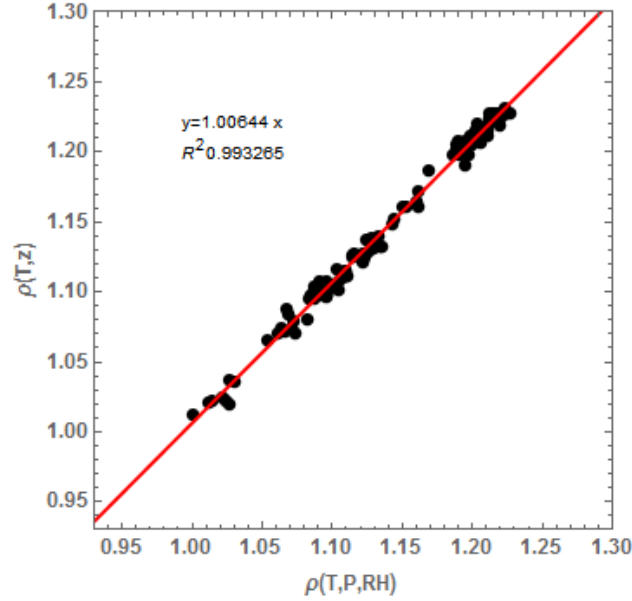
sürümü² kullanılmıştır [24]. SRTM verisi 2001 yılına dayanıyor olsa dahi daha yeni olan başka sayısal çalışmalarla yamalanmış ve boşlukları tamamen doldurulmuştur. Sonuç olarak iki farklı hesaplama yöntemi iki farklı veri grubuyla yapılmıştır.

4. BULGULAR (RESULTS)

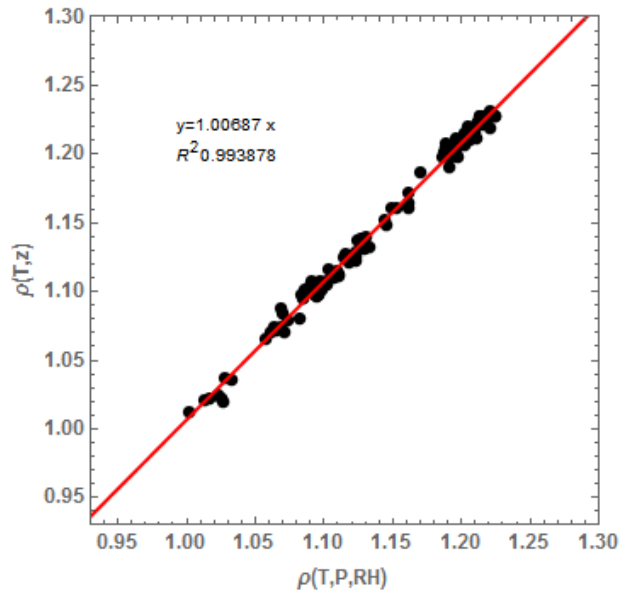
İlk adım olarak, her istasyon için tüm veri kullanılarak yıllık ve aylık ortalamalara göre bilimsel yöntem ile hesaplanmıştır. Mühendislik yöntemini uygulamak

içinse, istasyon konumlarına göre istasyonların deniz seviyesinden yüksekliği SRTM 4.1 veri setinden alınmıştır. Sıcaklık verileri ise WorldClim veri tabanında aylık ve yıllık olarak alınmıştır. Yıllık ve aylık ortalamalar üzerine hesaplanmış iki metodun karşılaştırması Şekil-2 ve Şekil-3'de sunulmuştur. Hata payının binde 6-7 mertebelerinde olduğu gözlenmiştir.

Aynı veri setleri ve yöntemler ikinci adımda aylık ortalamalara göre hesaplanmış ve mevsimsel değişkenliğin hesaplamalara olan etkisi incelenmek istenmiştir. Sonuçlar Şekil-4 ve Şekil-5'de sunulmuştur.

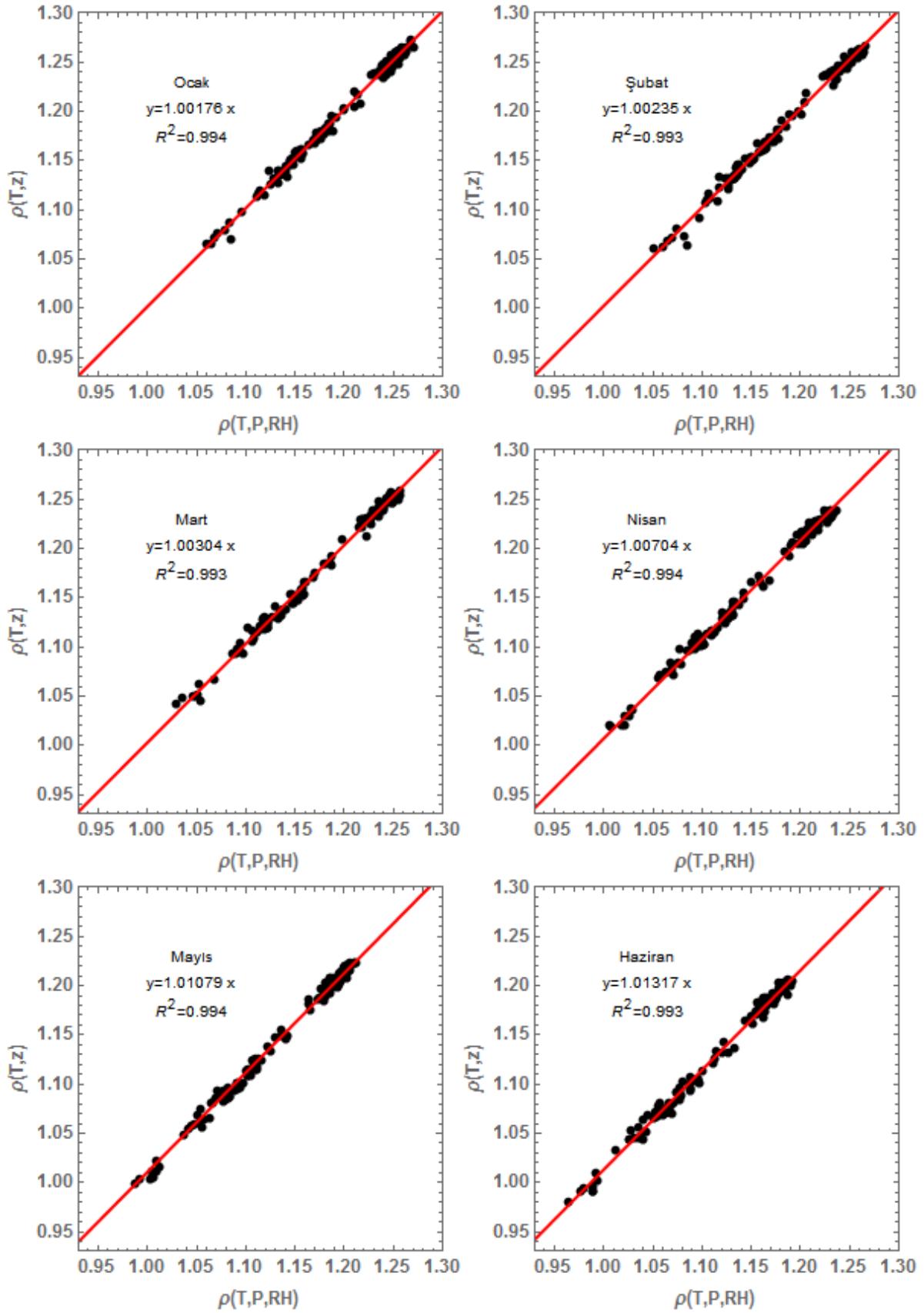


Şekil 2. Tüm verilerin yıllık ortalamasından her bir istasyon için hesaplanan iki farklı hava yoğunluğunun karşılaştırması. (Scatter plot of two methods for yearly averages)

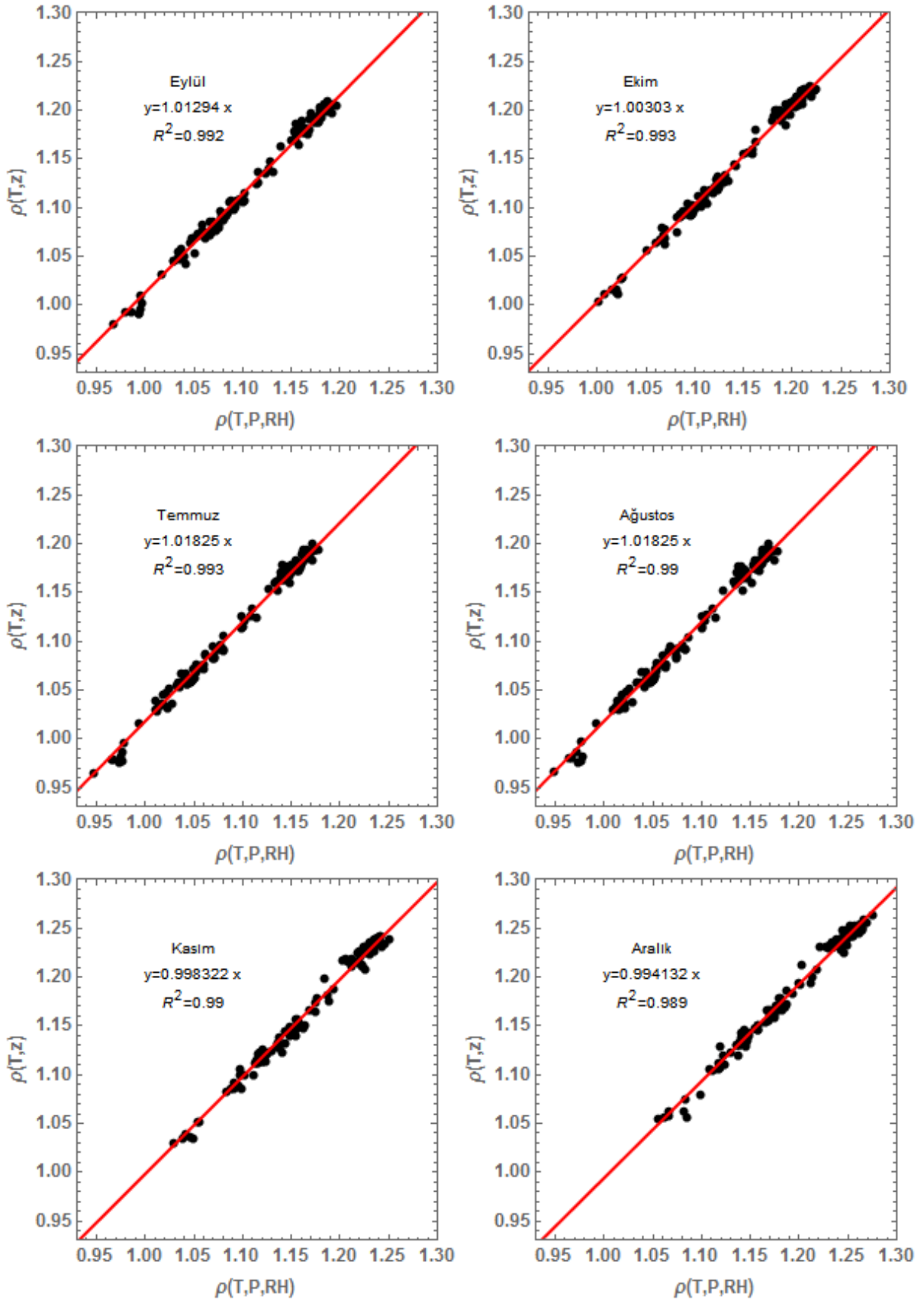


Şekil 3. Tüm verilerin aylık ortalamasından her bir istasyon için hesaplanan iki farklı hava yoğunluğunun karşılaştırması. (Scatter plot of two methods for monthly averages)

² <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>



Şekil 4. İki yöntemin ay bazında karşılaştırması (Ocak-Haziran) (Monthly comparison of the two methods (January-June))



Şekil 5. İki yöntemin ay bazında karşılaştırması (Temmuz-Aralık) (Monthly comparison of the two methods (July-December))

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Türkiye'nin 126 farklı noktasında toplanan 4 senelik hava sıcaklığı, hava basıncı ve bağıl nem verileri kullanılarak bahsi geçen noktaların hava yoğunluğu hesabı CIPM tarafından yayınlanan en güncel yöntemle göre hesaplanmıştır [15]. CIPM yöntemine dayalı hesaplamalar gerçeğe en yakın sonuçlar olarak öngörülmüş ve aynı noktalar için WorldClim sıcaklık verisi ve SRTM 4.1 sayısal yükseklik modeli kullanılarak hava yoğunluğu tahmini aylık ve yıllık bazda mühendislik yöntemi kullanılarak da yapılmıştır. Bulgulara göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Bu çalışma ile CIPM metodu kullanılarak Türkiye için ilk defa hava yoğunluğu hesabı sağlanması yüksek rakımlar için yapılmıştır. Hava sıcaklığı, hava basıncı ve bağıl nem verileriyle yapılan CIPM'in yayınladığı (Denklem 2) hesaplama yöntemi ile rüzgar enerjileri konusunda modelleme çalışmalarında da kullanılması tavsiye edilen yöntem (Denklem 2,7) arasında güç ve enerji üretimi hesabına etkiyen ve dikkate alınması gereken bir sapma yoktur. Sapma binde 6 mertebesindedir. Yüksek rakımlı ve düşük hava yoğunluğuna sahip noktalarda dahi, $\rho(t,z)$ yöntemi aylık ya da daha kısa periyotlarla toplanmış şekilde kullanılabilir. Ancak, aynı karşılaştırma aylar için yapıldığında hatanın binde 2 mertebesine düşebildiği ya da yüzde 2 mertebesine çıkabildiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, belirli aylarda üretim tahminine olan etkisi dikkate alınması gerekir bir seviyededir.
- 50 yıllık WorldClim verilerinin aylık ve yıllık ortalamalarından alınan sonuçlar, ölçüm değerlerinin kullanıldığı aylık ortalama verilerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Bu sebeple bu ortalama verilerin mühendislik çalışmalarında ön-hesap seviyesinde kullanılabilme olanağı gözlenmiştir; sahanın ortalama yüksekliği ve yıllık ortalama bilgilerine dayanarak yıllık hava yoğunluğu ortalaması hesaplanabilir. Bu çalışmada verilen hata payları üretim hesabına etkisi gözlemlenen hata oranı olarak da alınabilir. Günümüzde güncel araştırma projelerinde fizibilite çalışmalarında belirsizliğin %3'e indirilmesine çalışılmaktadır [25] ve uygulanan mühendislik metodu bu hedefe ulaşma da yardımcı olabilir.
- $\rho(T,z)$ metodunu kullanarak Türkiye'nin yüksekliklerinin tamamı göz önüne alınarak bir cetvel hazırlanmış ve bu cetvel Ek-A'da sunulmuştur. Cetvelde yer alan deniz seviyesinden yükseklik ve sıcaklıklara göre ara değerler doğrusal oranlama yöntemi ile bulunabilir.

SEMBOLLER

U	m/s	Rüzgar hızı
P	W	Güç
A	m ²	Kanat süpürme alanı
C_p	-	Güç katsayısı
ρ	Kg/m ³	Hava yoğunluğu
T	°C	Hava sıcaklığı (Celsius)
t	°K	Hava sıcaklığı (Kelvin)
p	mBar	Hava basıncı
h	%	Bağıl Nem
x_v	-	Su buharı mol kesri
Z	-	Sıkıştırılabilirlik katsayısı
R	J/mol.K	Molar gaz sabiti
M_a	Kg/mol	Kuru havanın molar kütlesi
M_v	Kg/mol	Suyun molar kütlesi
p_{sv}	mBar	Doymuş buhar basıncı
f	-	Artış katsayısı

SABİTLER

C_1	1/K ²	1.2378847 x 10 ⁻⁵
C_2	1/K	1.9121316 x 10 ⁻²
C_3	1/K ²	1.2378847 x 10 ⁻⁵
C_4	K	6.3431645 x 10 ³
a	-	1.00062
β	1/Pa	3.14 x 10 ⁻⁸
γ	1/K ²	5.6 x 10 ⁻⁷
a_o	K/P	1.58123 x 10 ⁻⁶
a_1	1/P	-2.9331 x 10 ⁻⁸
a_2	1/KP	1.1043 x 10 ⁻¹⁰
b_o	K/P	5.707 x 10 ⁻⁶
b_1	1/P	-2.051 x 10 ⁻⁸
c_o	K/P	1.9898 x 10 ⁻⁴
c_1	1/P	-2.376 x 10 ⁻⁶
d	K ² /P ²	1.83 x 10 ⁻¹¹
e	1/P	-0.765 x 10 ⁻⁸

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK 114C016 nolu "Üniform Rüzgar Atlaslarının Adaptasyonu: Türkiye Örneği" projesi tarafından desteklenmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne paylaştıkları veriler için teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] *Türkiye Rüzgar Enerjileri Birliği*, İstatistik Raporu, Ocak (2017).
- [2] Yenilenebilir Enerjiler Genel Müdürlüğü. REPA (İl Bazlı Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası), (2012).
- [3] Jake Badger, Neil Davis, Andrea N. Hahmann, Bjarke Tobias Olsen, Xiaoli Guo Larsén, Mark C. Kelly, Patrick Volker, Merete Badger, Tobias Torben Ahsbals, Niels Gylling Mortensen, Hans Ejsing Jørgensen, Erik Lundtang Petersen, Julia Lange, and Nicolas Fichaux. The new worldwide microscale wind resource assessment data on IRENA's Global Atlas. The EUDP Global Wind Atlas, (2015).
- [4] Ferhat Bingöl. Adaptation of Uniform Wind Atlases: Case Study of Turkey. TÜBİTAK (114C016) Final Report.
- [5] Sinem Değirmenci. Environmental Impact And Capacity Analysis Of Renewable Energy Resources: Case Study Of Wind Energy In Turkey. Master's thesis, Izmir Institute of Technology, (2016).
- [6] M.O.L. Hansen. Aerodynamics of Wind Turbines. Earthscan, (2013).
- [7] H. Tennekes. The logarithmic wind profile. Journal of the Atmospheric Sciences, 30(2): 234–238, (1973).
- [8] J. C. Kaimal and J. J. Finnigan. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement. Oxford University Press, (1994).
- [9] R Stull. Meteorology for Scientists & Engineers. Univ. of British Columbia, 3rd edition, (2011).
- [10] P Giacomo. Equation for the determination of the density of moist air (1981). Metrologia, 18(1): 33, (1982).
- [11] R S Davis. Equation for the determination of the density of moist air (1981/91). Metrologia, 29(1): 67, (1992).
- [12] A Picard and H Fang. Three methods of determining the density of moist air during mass comparisons. Metrologia, 39(1): 31, (2002).
- [13] A Picard, H Fang, and M Gläser. Discrepancies in air density determination between the thermodynamic formula and a gravimetric method: evidence for a new value of the mole fraction of argon in air. Metrologia, 41(6):396, (2004).
- [14] S Y Park, J S Kim, J B Lee, M B Esler, R S Davis, and R I Wielgosz. A redetermination of the argon content of air for buoyancy corrections in mass standard comparisons. Metrologia, 41(6):387, (2004).
- [15] A Picard, R S Davis, M Gläser, and K Fujii. Revised formula for the density of moist air (cipm-2007). Metrologia, 45(2):149, (2008).
- [16] Wind turbines - part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines (iec 61400-12-1:2005), (2005).
- [17] Lasse Svenningsen. Power curve air density correction and other power curve options in windpro. Technical report, EMD International A/S, (2010).
- [18] J.W. Wagenaar and P.J. Eecen. Dependence of power performance on atmospheric conditions and possible corrections. Technical report, ECN Wind Energy, 2011. In Proceedings at EWEA (2011).
- [19] Mark Young. Power curve measurement experiences, and new approaches. In EWEA Resource Assessment Workshop - Dublin, (2013).
- [20] Wind energy generation systems - part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines (iec 61400-12-1: (2017).
- [21] R. Feistel, D. G. Wright, H.-J. Kretzschmar, E. Hagen, S. Herrmann, and R. Span. Thermodynamic properties of sea air. Ocean Science, 6(1):91–141, (2010).
- [22] Technical University of Denmark. WAsP, Help Documents, version 11 edition, (2014).
- [23] Robert J. Hijmans, Susan E. Cameron, Juan L. Parra, Peter G. Jones, and Andy Jarvis. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 25(15): 1965–1978, (2005).
- [24] H. I. Reuter, A. Nelson, and A. Jarvis. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. International Journal of Geographical Information Science, 21(9): 983–1008, (2007).
- [25] Erik Lundtang Petersen, Ib Troen, Hans Ejsing Jørgensen, and Jakob Mann. The new European wind atlas. Energy Bulletin, 1(17): 34–39, (2014).

EK-A Tablo 1. Türkiye için hava yoğunluğu cetveli [kg/m^3]. Hata payı $\pm 0.0026 \text{ kg/m}^3$. Hava sıcaklığı ilk satır [°C] ve deniz seviyesinden yükseklik ilk sütunda [m] verilmiştir.

	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0	1.453	1.424	1.396	1.369	1.342	1.317	1.293	1.270	1.247	1.226	1.205	1.184	1.165	1.146	1.127
100	1.436	1.407	1.379	1.352	1.327	1.302	1.278	1.255	1.233	1.211	1.190	1.170	1.151	1.132	1.114
200	1.419	1.390	1.363	1.336	1.311	1.286	1.263	1.240	1.218	1.197	1.176	1.157	1.137	1.119	1.101
300	1.402	1.374	1.347	1.321	1.295	1.271	1.248	1.225	1.204	1.183	1.162	1.143	1.124	1.106	1.088
400	1.386	1.358	1.331	1.305	1.280	1.256	1.233	1.211	1.189	1.169	1.149	1.129	1.111	1.092	1.075
500	1.369	1.341	1.315	1.289	1.265	1.241	1.218	1.196	1.175	1.155	1.135	1.116	1.097	1.079	1.062
600	1.353	1.325	1.299	1.274	1.250	1.226	1.204	1.182	1.161	1.141	1.121	1.102	1.084	1.067	1.050
700	1.337	1.310	1.284	1.259	1.235	1.212	1.189	1.168	1.147	1.127	1.108	1.089	1.071	1.054	1.037
800	1.321	1.294	1.268	1.244	1.220	1.197	1.175	1.154	1.133	1.114	1.095	1.076	1.058	1.041	1.025
900	1.305	1.278	1.253	1.229	1.205	1.183	1.161	1.140	1.120	1.100	1.081	1.063	1.046	1.029	1.012
1000	1.289	1.263	1.238	1.214	1.191	1.168	1.147	1.126	1.106	1.087	1.068	1.050	1.033	1.016	1.000
1100	1.273	1.248	1.223	1.199	1.176	1.154	1.133	1.113	1.093	1.074	1.056	1.038	1.021	1.004	0.988
1200	1.258	1.233	1.208	1.185	1.162	1.140	1.119	1.099	1.080	1.061	1.043	1.025	1.008	0.992	0.976
1300	1.243	1.218	1.193	1.170	1.148	1.126	1.106	1.086	1.067	1.048	1.030	1.013	0.996	0.980	0.964
1400	1.228	1.203	1.179	1.156	1.134	1.113	1.092	1.073	1.054	1.035	1.018	1.000	0.984	0.968	0.952
1500	1.213	1.188	1.165	1.142	1.120	1.099	1.079	1.060	1.041	1.023	1.005	0.988	0.972	0.956	0.941
1600	1.198	1.174	1.150	1.128	1.106	1.086	1.066	1.047	1.028	1.010	0.993	0.976	0.960	0.944	0.929
1700	1.183	1.159	1.136	1.114	1.093	1.072	1.053	1.034	1.015	0.998	0.981	0.964	0.948	0.933	0.918
1800	1.169	1.145	1.122	1.100	1.079	1.059	1.040	1.021	1.003	0.986	0.969	0.952	0.937	0.921	0.907
1900	1.154	1.131	1.108	1.087	1.066	1.046	1.027	1.009	0.991	0.973	0.957	0.941	0.925	0.910	0.896
2000	1.140	1.117	1.095	1.074	1.053	1.033	1.014	0.996	0.978	0.961	0.945	0.929	0.914	0.899	0.884
2100	1.126	1.103	1.081	1.060	1.040	1.021	1.002	0.984	0.966	0.950	0.933	0.918	0.902	0.888	0.874
2200	1.112	1.089	1.068	1.047	1.027	1.008	0.989	0.972	0.954	0.938	0.922	0.906	0.891	0.877	0.863
2300	1.098	1.076	1.055	1.034	1.014	0.995	0.977	0.959	0.943	0.926	0.910	0.895	0.880	0.866	0.852
2400	1.084	1.063	1.041	1.021	1.002	0.983	0.965	0.948	0.931	0.915	0.899	0.884	0.869	0.855	0.841
2500	1.071	1.049	1.028	1.008	0.989	0.971	0.953	0.936	0.919	0.903	0.888	0.873	0.858	0.844	0.831
2600	1.058	1.036	1.016	0.996	0.977	0.959	0.941	0.924	0.908	0.892	0.877	0.862	0.848	0.834	0.821
2700	1.044	1.023	1.003	0.983	0.965	0.947	0.929	0.912	0.896	0.881	0.866	0.851	0.837	0.823	0.810
2800	1.031	1.010	0.990	0.971	0.952	0.935	0.918	0.901	0.885	0.870	0.855	0.840	0.827	0.813	0.800
2900	1.018	0.998	0.978	0.959	0.940	0.923	0.906	0.890	0.874	0.859	0.844	0.830	0.816	0.803	0.790
3000	1.005	0.985	0.965	0.947	0.929	0.911	0.895	0.878	0.863	0.848	0.833	0.819	0.806	0.793	0.780



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Delik büyütme işleminde kesme parametrelerinin çok yanıtlı Taguchi deneysel tasarım yaklaşımı kullanılarak optimizasyonu

Optimization of cutting parameters in hole machining process by using multi-objective Taguchi approach

Yazar(lar) (Author(s)): Funda KAHRAMAN¹, Gökhan BAŞAR², Zülfü KOÇOĞLU³, Emre YENİYİL³

ORCID¹: xxxx-xxxx-xxxx-xxxx

ORCID²: 0000-0002-9696-7579

ORCID³: xxxx-xxxx-xxxx-xxxx

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kahraman F., Başar G., Koçoğlu Z. ve Yeniyl E., "Delik büyütme işleminde kesme parametrelerinin çok yanıtlı Taguchi deneysel tasarım yaklaşımı kullanılarak optimizasyonu", *Politeknik Dergisi*, 21(2): 283-290, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385921

Delik Büyütme İşleminde Kesme Parametrelerinin Çok Yanıtlı Taguchi Deneysel Tasarım Yaklaşımını Kullanılarak Optimizasyonu

Araştırma Makalesi / Research Article

Funda KAHRAMAN¹, Gökhan BAŞAR², Zülfü KOÇOĞLU³, Emre YENİYİL³

¹Tarsus Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Müh. Bölümü, Mersin Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, İmalat Müh. Bölümü, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Türkiye

³Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Müh. Anabilim Dalı, Mersin Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 16.02.2017 ; Kabul/Accepted : 13.04.2017)

ÖZ

Bu çalışmada, AA 5754 alüminyum alaşımının ıslak delme işleminde delme parametrelerinin, yüzey kalitesi üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Girdi faktörleri olarak kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği, çıktı parametreleri olarak aritmetik ortalama pürüzlülük değeri (Ra), geometrik ortalama pürüzlülük (Rq) ve profilin ortalama maksimum yüksekliği (Rz) gibi yüzey pürüzlülük kriterleri seçilmiştir. Deneyler Taguchi L₉ ortogonal tasarım düzenine göre gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları kullanılarak yapılan varyans analizi ile kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki etki seviyeleri tespit edilmiştir. En etkili faktörlerin ilerleme (% 71.32) ve kesme hızı (% 22.20) olduğu görülmüştür. Çok yanıtlı Taguchi yaklaşımı kullanılarak, minimum yüzey pürüzlülük değerlerinin Ra, Rz ve Rq; 120 m/dak kesme hızı, 0.10 mm/dev ilerleme ve 0.75 mm kesme derinliği koşullarında gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, delik işleme, yüzey pürüzlülüğü, Taguchi, optimizasyon.

Optimization of Cutting Parameters in Hole Machining Process by Using Multi-objective Taguchi Approach

ABSTRACT

In this study, effects of drilling parameters on the various surface roughness characteristics; arithmetic average roughness (Ra), geometric average roughness (Rq) and average maximum height of the profile (Rz) in the wet drilling of AA 5754 Aluminium alloy were experimentally investigated. Cutting speed, feed and depth of cut were considered as control factors; Ra, Rz and Rq were considered as response factors. Experiments were designed according to Taguchi L₉ orthogonal array. Variance analysis was performed to determine the importance of control factors on the surface roughness. The percent contributions of the control factors on the surface roughness were obtained to be feed (71.32%) and cutting speed (22.20%). Minimum surface roughness values Ra, Rz and Rq were obtained 120 m/min cutting speed, 0.10 mm/dev feed rate and 0.75 mm depth of cut by using multi-objective Taguchi approach.

Keywords: Aluminium, hole machining, surface roughness, Taguchi, optimization

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metallerin talaş kaldırılarak işlenmesi, temel bir imalat metodu olup makine imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir [1]. Tornalama, frezleme ve delme temel talaşlı imalat yöntemleridir. Diğer talaş kaldırma işlemleri ise planyalama, raybalama, broşlama, taşlama, vargelde işleme ve testere ile delmedir. Talaş kaldırma işlemi, çeşitli tezgâhlarda kesici takımlar kullanılarak iş parçası üzerinden malzemenin talaş şeklinde atılması işlemidir [2]. Geleneksel yöntemler arasında delik delme işlemi en önemli talaşlı imalat yöntemlerinden biridir ve tüm talaşlı imalat işlemlerinin %33'ünü oluşturmaktadır [3]. Bu işlemde genellikle HSS malzemenin yapılmış iki ağızlı helisel matkaplar kullanılır.

Matkap ile açılan delikler daha sonra çeşitli takımlar kullanılarak genişletilebilir.

Metal kesme operasyonlarında bazı parametreler son işlem yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme hızı ve soğutma sıvısı gibi parametreler kontrol edilebilir faktörler iken titreşim, takım aşınması ve malzeme kusurları gibi parametreler ise kontrol edilemeyen faktörlerdir [4]. Elde edilen yüzey kalitesi, üretim maliyetlerini ve ürünün teknolojik kalitesini büyük ölçüde etkileyen önemli faktörlerden biridir. Makine parçalarının yüzey kalitesini belirlemede, rijitlik, yorulma dayanımı ve yüzey aşınması bakımından önemli olan Ra, Rz ve Rq yüzey pürüzlülüğü parametreleri kullanılmaktadır. Ra: ortalama yüzey pürüzlülüğü, Rz: 5 tane en yüksek ve 5 tane en alçak noktanın ortalaması veya yüzey pürüzlülük profilinin en yüksek ve en düşük

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : fkahraman@mersin.edu.tr

noktaları arasındaki dikey mesafedir. Rq: geometrik ortalama pürüzlülük değeridir [5, 6].

Ürünün yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametrelerinin optimizasyonunda çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Taguchi deneysel tasarım metodu optimizasyon problemlerinin çözümünde oldukça başarılı bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Taguchi metodunda, en iyi sonuçları minimum sayıda deney ile elde etmek için istatistiksel olarak tasarlanmış ortogonal dizinleri kullanır. Bu sayede deney sayısını azaltarak zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlanmış olunur. Taguchi metodunda kalite geliştirme çalışmaları üç aşamada gerçekleştirilir. Bunlar; sistem tasarımı, parametre tasarımı, tolerans tasarımı olarak sınıflandırılır [7].

Makine alanında tek çıktının olması durumunda sinyal/gürültü oranı bazlı Taguchi tekniği başarılı bir şekilde uygulamaktadır. Bu konuyla ilgili literatürde yapılan çalışmalar kısaca şöyle özetlenebilir; Meral ve arkadaşları, delik delme uygulamalarında delik kalitesinin Taguchi yöntemi ile optimizasyonu adlı çalışmasında AISI 1050 imalat çeliği üzerinde üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme miktarı ile delme deneyleri yapmıştır. Deneylerde iki farklı tipte ve üç değişik çapta TiAlN kaplamalı ve kaplamasız HSS matkaplar kullanılmıştır. Aynı kontrol seviyelerinde TiAlN kaplamalı matkapların performansının kaplamasız HSS matkaplara göre yüksek olduğu, her iki matkap türünde de çaptan sapma ve dairesellikten sapma değerleri üzerindeki en etkili faktörün kesme hızı olduğu tespit edilmiştir [5]. Çakır ve arkadaşları, AA 7075 ve AA 6013 alüminyum malzemelere delik delme operasyonu süresince delme parametrelerini incelemiştir. Çalışmada kesici takım ve delme parametrelerinin delik delme performansında birinci derecede etkili olduğu görülmüş, ilerleme oranlarındaki artışın kesme kuvvetleri ve momentlerde daha fazla artışa sebep olduğu sonucuna varılmıştır [8]. Şirin ve arkadaşları, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü Taguchi yöntemiyle optimize etmiş yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrelerin sırasıyla kesme hızı ve ilerleme olduğunu tespit etmişlerdir [9]. Kaplan ve arkadaşları, AISI D2 ve AISI D3 soğuk iş çeliklerinin delinmesinde işleme parametrelerinin çapak oluşumuna etkilerini incelemiştir. Deneylerden, ilerlemenin artmasına bağlı olarak delik sonu çapak yüksekliğinin azaldığı; delik sayısı, kesme hızı ve malzeme sertliğinin artmasına bağlı olarak da delik sonu çapak yüksekliğinin arttığı tespit edilmiştir [10]. Bahçe ve arkadaşları, Al-5005'in delinmesinde delme parametrelerinin çapak oluşumuna etkisini araştırmıştır. Delme deneyleri farklı devir sayıları, ilerleme oranları ve farklı uç açıları kullanılarak yapılmış olup, matkap uçlarının ilerleme ve devir sayılarının artmasına bağlı olarak çapak yüksekliklerinin arttığı ve uç açısı 130° olan matkap ile yapılan delme işlemlerinde en düşük çapak yüksekliğinin elde edildiği görülmüştür [11]. Motorcu ve Ekici, toz metalurjisi-sıcak presleme yöntemiyle üretilen farklı oranlarda B₄C parçacıklı kompozit malzemelerin kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla delinmesinde kesme kuvvetleri ve tork değerleri Taguchi metodu

kullanılarak optimize etmiştir. İlerleme miktarı ve parçacık takviye oranının artması ile aksel kuvvet ve torkun arttığı, kesme hızının ise azaldığını tespit etmişlerdir [12]. Çakır ve arkadaşları, AA 7075 ve AA 2024 alüminyum alaşımlarının delinmesi işleminde, dört farklı kesme hızı (100, 125, 150, 175 m/dak), dört farklı ilerleme (0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mm/dev) ve iki farklı ilerleme (geleneksel soğutma ve basınçlı hava ile soğutma) şartlarında gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda, soğutma sıvısının (geleneksel soğutmada) takımdaki yükleri azaltmada çok önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [13]. Kılıçkap ve Hüseyinoğlu yaptıkları çalışmada, AISI 316 paslanmaz çeliğin delinmesinde oluşan minimum çapak yüksekliğini belirlemek için Tepki Yüzey Modeli ve Genetik Algoritma kullanılarak optimum delme parametreleri belirlenmiştir. Delme işleminde üç farklı ilerleme (0.10, 0.20, 0.30 mm/dev), üç farklı kesme hızı (4, 8, 12 m/dak) ve üç farklı uç açısına sahip HSS matkap takımları kullanılmıştır [14]. Kıvık ve Şeker çalışmasında, Ti-6Al-4V alaşımının kuru ve ıslak delme şartlarında delinmesinde, M42 HSS takımlara uygulanan kriyojenik işlemin ve delme parametrelerinin, delik kalitesi (delik çapı, dairesellik ve silindiriklikten sapma) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçlarından, soğutma sıvısının kullanımı ve kriyojenik işlemin uygulanmasının delik kalitesini artırmada çok önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür [15]. Kıvık ve arkadaşları çalışmasında, AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin üç farklı kaplamalı HSS matkaplarla delinmesinde kesme parametreleri olarak; dört farklı kesme hızı (12, 14, 16, 18 m/dak) ve üç farklı ilerlemenin (0.08, 0.10, 0.12 mm/dev), dairesellik, delik çapı ve talaş oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçlarından, delik çapı ve dairesellik bakımından en iyi sonuç, çok katlı TiAlN/TiN kaplı takımlardan elde edilmiştir [16]. Kıvık ve arkadaşları çalışmasında, Inconel 718 süper alaşımının delme deneyleri kaplamasız, TiN ve TiAlN kaplı karbür matkaplar ile kuru kesme şartlarında, dört farklı kesme hızı (10, 12.5, 15, 17.5 m/dak) ve üç farklı ilerleme (0.05, 0.75, 0.1 mm/dev) kullanılarak yapılmıştır. Delme sırasında delme parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerine etkileri incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonuçlar kaplamasız takımla delinen numunelerden elde edilmiştir [17]. Siyambaş ve Turgut, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı HSLA-DIN EN 10149 malzemenin, 8 mm çap 130° uç ve 30° helis açılı TiAlN kaplamalı ve kaplamasız iki farklı matkap ile delinmesinde, delme parametrelerinin aksel kuvvet ve momentlere etkisi incelemiştir. Delme parametreleri; üç farklı ilerleme (0.05, 0.075, 0.1 mm/dev) ve beş farklı kesme hızı (10, 18, 26, 34, 42 m/dak) olarak seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre, TiAlN kaplamalı matkapların kaplamasız matkaplara göre aksel kuvvet ve moment bakımından daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir [18]. Savaşkan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kalıp imalatında kullanılan 40CrMnMoS8-6 kalıp çeliğinin delinmesinde, üç farklı matkap ucu (kaplamasız, TiN kaplamalı ve TiAlN kaplamalı), üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerlemenin

kesme kuvvetlerine etkileri Taguchi deneysel tasarımı yardımıyla incelenmiştir [19].

Kayır ve arkadaşları, AISI 316Ti paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesici uç yarıçapı, kesici uç formu ve kesme parametrelerinden yüzey pürüzlülüğü üzerine etkili faktörün ilerleme hızı olduğunu belirlemişlerdir [20]. Kıvak tarafından yapılan çalışmada, Hadfield çeliğini kaplamalı kesici uçlar ile kuru kesme şartları altında frezelenmesinde işleme parametrelerinden yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörün ilerleme hızı olduğunu göstermiştir [21]. Çetin ve Kıvak, 15-5 PH paslanmaz çeliğin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünü üzerinde etkili parametrenin ilerleme hızı (%84.64) olduğunu göstermiştir [22]. Kirby ve arkadaşları, 6061-T6 Alüminyum alaşımının tornalanmasında, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörün ilerleme hızı olduğunu Taguchi metodu kullanarak tespit etmişlerdir [23].

Optimizasyon problemlerinde, birden fazla çıktının olması durumunda geleneksel Taguchi tekniği yeterli gelmemektedir. Çok yanıtı sinyal gürültü (ÇYSG) oranı bazlı Taguchi tekniğinin veya gri ilişki analizi gibi tekniklerin kullanılması gerekmektedir [24-29].

Bu çalışmada, uzay, havacılık ve otomotiv endüstrisinde kullanımı oldukça yaygın olan AA 5754 alüminyum alaşımının delik büyütme işleminde, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Çok yanıtı Taguchi tekniği kullanılarak optimum kontrol faktörleri belirlenmiş ve doğrulama deneyleri yapılarak optimizasyonun başarısı test edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, AA 5754 alüminyum alaşımının delik büyütme işleminde kesme parametrelerinin, Ra, Rz ve Rq gibi yüzey pürüzlülüğü parametreleri üzerindeki etkileri araştırılarak optimum işleme şartlarının belirlenmesi

amaçlanmaktadır. Deneylerde kullanılan malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 1'de verilmiştir.

Deney numuneleri, Ø50×50 ölçülerinde hazırlanmıştır. Deney numuneleri üzerinde, HSS DIN 341 mors konik saplı uzun matkap ucu kullanılarak Ø19 mm çapında delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin ardından da delik büyütme işlemi uygulanmıştır (Şekil 1).

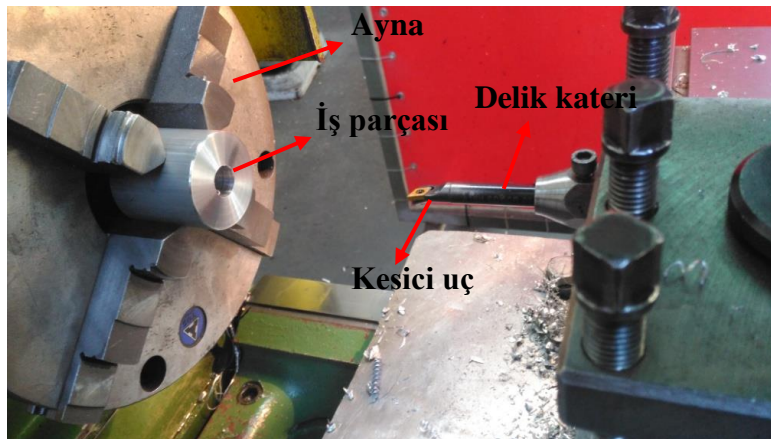
Delik büyütme deneylerinde kullanılan universal torna tezgahı Trens SN 50 C marka olup, motor gücü 5.5 kW'dır. ISO P20/K15C standardında, MT 3020 kalitede ve DCGT070204-HFP formulu kesici uç ve kesici takımın torna tezgahına bağlanmasında S12K SDQCR/L 07 kodlu iç çap delik torna kateri kullanılmıştır. Her bir deneyde, kesici ucun yeni bir köşesi kullanılarak kesicinin aşınmasından kaynaklanan etkiler giderilmiştir. Alüminyum alaşımı üzerinden talaş kaldırma işlemi sırasında yüzeyden kaldırılan talaşın yüzeye sıvanmaması için soğutma sıvısı olarak mazot kullanılmıştır. Delik büyütme işlemi yapılmış yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için MITUTOYO SURFTEST SJ 201P marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Delik büyütme işlemi yapılmış yüzeylerden üç defa yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmış ve bunların ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük parametreleri olan Ra, Rz ve Rq değerleri tespit edilmiştir.

Deneyler Taguchi L₉ ortogonal tasarıma göre yapılmış ve sonuçların değerlendirilmesinde Çok Yanıtlı Sinyal Gürültü (ÇYSG) oranı esas alınmıştır. Minitab 17 yazılımı yardımıyla sonuçlar değerlendirilmiştir. Son olarak doğrulama testleri yapılmıştır. Kesme parametrelerinin çok yanıtı optimizasyonu için akış şeması Şekil 2'de verilmiştir. Deneylerde kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği girdi faktörü olarak, yüzey pürüzlülüğü Ra, Rq ve Rz çıktı parametreleri olarak seçilmiştir. Belirlenen parametreler ve seviyeleri Çizelge

Çizelge 1. AA 5754 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of AA 5754 aluminum alloy)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0.4	0.4	0.1	0.5	2.6-3.6	0.2	0.3	0.15	0.15	Kalan

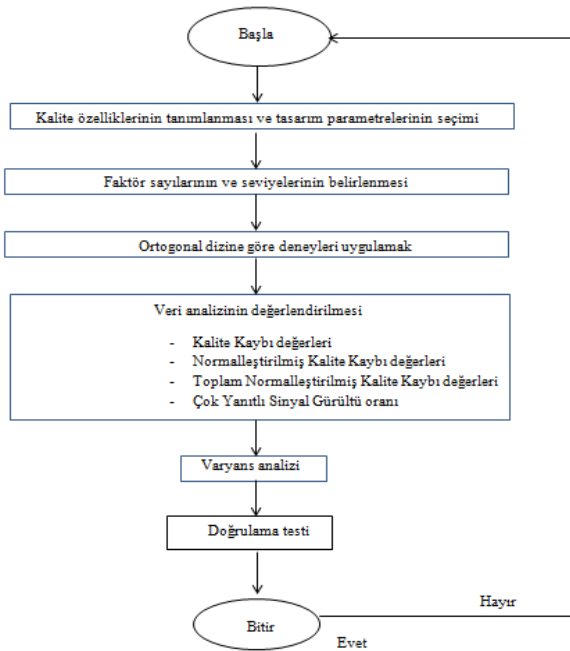


Şekil 1. Delik büyütme deney düzeneği (Hole machining test setup)

2’de verilmiştir. Çizelge 3’te ise L_9 ortogonal dizisi verilmiştir.

Geleneksel Taguchi yöntemi tek yanıtli problemlerin optimizasyonunda başarılı bir şekilde uygulanmasına rağmen, çok yanıtli problemlerin çözümünde kullanılmamaktadır. Tong ve arkadaşları tarafından önerilen çok yanıtli sinyal gürültü tabanlı Taguchi yönteminin uygulanmasında en iyileme prosedürü dört aşamadan oluşmaktadır. Bu dört aşama aşağıda verilmiş olup sırasıyla açıklanmıştır [27-30].

1. Aşama: Kalite kaybını hesaplamak
2. Aşama: Çok yanıtli sinyal gürültü oranını belirlemek
3. Aşama: En iyi faktör/seviye kombinasyonunu belirlemek
4. Aşama: Doğrulama deneylerinin yapılması



Şekil 2. Kesme parametrelerinin çok yanıtli optimizasyonu için akış şeması (Flow chart for multi-response optimization of cutting parameters)

Çizelge 2. Kontrol faktörleri ve ortogonal dizilim matrisinde kullanılan seviyeleri (Control factors and levels used in orthogonal array matrix)

Sembol	Faktör	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Kesme hızı	m/dak	60	84	120
B	İlerleme	mm/dev	0.10	0.15	0.20
C	Kesme derinliği	mm	0.25	0.5	0.75

Çizelge 3. L_9 ortogonal dizisi (L_9 orthogonal series)

Deney No	Kesme hızı (A)	İlerleme (B)	Kesme derinliği (C)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Aşama I: Kalite Kaybının Hesaplanması

Bu aşamada, Taguchi’ye göre her bir performans yanıtı için kalite kaybı aşağıdaki üç formül kullanılarak hesaplanır.

i) En büyük en iyi durumu için,

$$L_{ij} = k_1 \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \frac{1}{y_{ijk}^2} \quad (1)$$

ii) En küçük en iyi durumu için,

$$L_{ij} = k_2 \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_{ijk}^2 \quad (2)$$

iii) Nominal en iyi (Hedef değer en iyi) durumu için,

$$L_{ij} = k_3 \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_{ijk} \quad (4)$$

$$S^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{k=1}^{n_i} (y_{ijk} - \bar{y})^2 \quad (5)$$

Burada.

L_{ij} = j. denemede i. yanıtın kalite kaybı

y_{ijk} = k. tekrar ve j. denemede i. yanıt için gözlenen veri

n_i = i. yanıtın tekrar sayısı

k_1, k_2, k_3 = kalite kayıp katsayıları

S^2 = varyansdır.

Aşama II: Çok Yanıtli Sinyal Gürültü Oranının Belirlenmesi

Adım 1: Her denemede her bir performans yanıtının kalite kaybı için normalleştirme işlemi yapılır.

$$C_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_i^*} \quad (6)$$

$$L_i^* = \max \{L_{i1} \cdot L_{i2} \dots L_{ij}\}$$

Adım 2: Her deneme için Toplam Normalize edilmiş Kalite Kaybının (TNKK) hesaplanması.

$$TNKK_j = \sum_{i=1}^m w_i C_{ij} \quad (7)$$

w_i = i. kalite karakteristiği için ağırlık faktörünü göstermektedir.

Adım 3: Her deneme için ÇYSG oranının belirlenmesi.

$$\text{ÇYSG}_j = -10 \log (TNKK_j) \quad (8)$$

Aşama 3: En iyi Faktör ve Seviye Kombinasyonunun Belirlenmesi

Aşama 4: Doğrulama Deneylerinin Yapılması

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS and DISCUSSION)

3.1 Deneysel Verilerin Analizi (Experimental Data Analysis)

Deney sonrası yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerlerinin ortalama değerleri Çizelge 4'de verilmiştir. Kalite

karakteristiklerinin analizinde en küçük en iyi, en büyük en iyi ve nominal en iyi şeklinde üç kategori mevcuttur. Bu çalışmada; Ra, Rz ve Rq gibi yüzey pürüzlülük kriterlerinin minimum olması daha iyi performansı ifade etmektedir. Böylece "en küçük en iyi" eşitliği göz önüne alınarak yüzey pürüzlülüğü Ra, Rq ve Rz için kalite kaybı hesaplanmıştır (Çizelge 5). Normalize edilmiş kalite kaybı değerleri ise Çizelge 6'da verilmiştir. Çoklu kalite karakteristikleri Ra, Rq ve Rz için TNKK ve ÇYSG oranı değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 7'de gösterilmiştir. Kalite karakteristiklerinin yüzey kalitesi üzerine önemi eşit kabul edilmiş ve ağırlık değerleri $w_1=0.333$, $w_2=0.333$, $w_3=0.333$ olarak alınmıştır.

Kontrol faktörlerinin ÇYSG oranı üzerine etkisi Çizelge 8'den elde edilmiştir. Her kontrol faktörü için ÇYSG'de en büyük değere sahip olan seviye, o faktör için en iyi seviye anlamına gelmektedir. Böylece, en iyi faktör/seviye kombinasyonu A3B1C3 olarak tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü parametreleri Ra, Rz ve Rq için kontrol faktörlerinin ÇYSG oran grafikleri ($w_1=0.333$, $w_2=0.333$, $w_3=0.333$) Şekil 3'te görülmektedir. Grafik incelendiğinde, A3B1C3 deney kombinasyonunun, ÇYSG oranına göre en iyi faktör kombinasyonu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4. Deney koşulları ve ortalama Ra, Rz ve Rq değerleri (Experimental conditions and average values of Ra, Rz and Rq)

Deney No	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)
1	60	100	0.25	2.30	9.73	2.74
2	60	225	0.50	3.42	16.47	4.46
3	60	415	0.75	4.31	17.84	5.47
4	84	100	0.50	1.43	5.96	1.67
5	84	225	0.75	2.78	13.09	3.50
6	84	415	0.25	3.01	11.70	3.98
7	120	100	0.75	1.61	5.22	1.30
8	120	225	0.25	2.50	11.08	3.01
9	120	415	0.50	3.20	13.75	4.10

Çizelge 5. Yüzey pürüzlülüğü Ra, Rz ve Rq için kalite kaybı değeri (Quality loss values for surface roughness Ra, Rz and Rq)

Deney No	Kalite Kaybı Değerleri (dB)		
	Ra	Rz	Rq
1	5.2755	94.8331	7.4911
2	11.7570	271.7374	20.0124
3	18.7529	322.3212	30.3841
4	2.0613	35.5446	2.7962
5	7.7524	171.5743	12.2388
6	9.0849	139.1396	15.8924
7	2.5926	27.1567	1.6683
8	6.2667	122.7707	9.0808
9	10.2475	190.4995	16.8378

Çizelge 5. Yüzey pürüzlülüğü Ra, Rz ve Rq için kalite kaybı değeri (Quality loss values for surface roughness Ra, Rz and Rq)

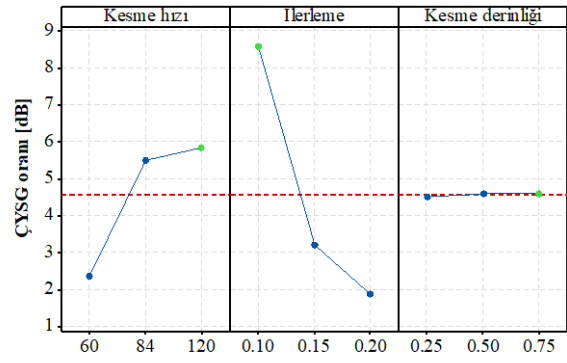
Deney No	Kalite Kaybı Değerleri (dB)		
	Ra	Rz	Rq
1	5.2755	94.8331	7.4911
2	11.7570	271.7374	20.0124
3	18.7529	322.3212	30.3841
4	2.0613	35.5446	2.7962
5	7.7524	171.5743	12.2388
6	9.0849	139.1396	15.8924
7	2.5926	27.1567	1.6683
8	6.2667	122.7707	9.0808
9	10.2475	190.4995	16.8378

Çizelge 6. Yüzey pürüzlülüğü Ra, Rz ve Rq için normalize edilmiş kalite kaybı değerleri (Normalized quality loss values for surface roughness Ra, Rz and Rq)

Deney No	Normalizasyon Edilmiş Kalite Kaybı Değerleri		
	Ra	Rz	Rq
1	0.2813	0.2942	0.2465
2	0.6269	0.8431	0.6586
3	1.0000	1.0000	1.0000
4	0.1099	0.1103	0.0920
5	0.4134	0.5323	0.4028
6	0.4845	0.4317	0.5231
7	0.1383	0.0843	0.0549
8	0.3342	0.3809	0.2989
9	0.5464	0.5910	0.5542

Çizelge 7. Yüzey pürüzlülüğü Ra, Rz ve Rq için TNKK ve ÇYSG oranı değerleri (Total normalized quality loss values (TNQL) and multiple S/N ratio (MSNR) values for surface roughness Ra, Rz and Rq)

Deney No	TNKK	ÇYSG (dB)
1	0.2740	5.6221
2	0.7096	1.4902
3	1.0000	0.0000
4	0.1041	9.8266
5	0.4495	3.4727
6	0.4797	3.1901
7	0.0924	10.3429
8	0.3380	4.7111
9	0.5639	2.4881
Tüm deneylerin ÇYSG ortalaması		4.5715

**Şekil 3.** Kontrol faktörlerinin ÇYSG oranı grafiği (MSNR graph of control factors)**Çizelge 8.** Faktörlerin ÇYSG oranı üzerindeki ana etkileri (Main effects of factors on MSNR)

Sembol	Faktörler	ÇYSG'de Ana Etkiler (dB)				Sıra
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Max-Min	
A	Kesme hızı	2.371	5.496	5.847*	3.476	2
B	İlerleme	8.597*	3.225	1.893	6.704	1
C	Kesme derinliği	4.508	4.602	4.605*	0.097	3

Delik büyütme işleminde yüzey pürüzlülüğü sonuçları üzerindeki etkili faktörleri ve bu faktörlerin katkı payını hesaplamak için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır (Çizelge 9). ANOVA çizelgesinden yüzey pürüzlülük parametreleri Ra, Rz ve Rq üzerinde en önemli etkiye sahip faktörün ilerleme olduğu görülmektedir. Ayrıca faktörlerin yüzde olarak etkileri incelendiğinde; ilerleme faktörünün etkisinin % 71.32, kesme hızının etkisinin % 22.20, kesme derinliğinin etkisinin % 1.58 olduğu görülmektedir. ANOVA analizindeki hata değerinin (% 4.89) düşük olması, yapılan deneysel çalışmanın anlamlı sonuçlar verdiğinin bir göstergesidir. Sonuç olarak, ANOVA tablosuna göre, yüzey pürüzlülüğü için dikkate alınacak olan en önemli faktörün, ilerleme olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sonucun literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür [20-23].

Çizelge 9. ÇYSG oranı için ANOVA analizi (ANOVA analysis for MSNR)

Faktörler	SD	KT	KO	F oranı	YD (%)
Kesme hızı	2	31.765	15.882	4.54	22.20
İlerleme	2	102.05	51.027	14.57	71.32
Kesme derinliği	2	2.267	1.134	0.32	1.58
Hata	2	7.002	3.501	-	4.89
Toplam	8	143.089	-	-	100

SD: Serbestlik derecesi, KT:Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması, YD:Yüzde dağılımı

S : 1.87. R² : %95.11

3.2. Doğrulama Deneyleri (Confirmation Experiments)

Optimizasyon işleminin son adımı, optimal değerleri veren koşulun öngörülen iyileşmeyi sağlayıp sağlamadığını doğrulamak için test edilmesidir. Doğrulama testi sonuçları Çizelge 10’da verilmiştir. Yapılan bu çalışmada, delik büyütme işlemi sonucunda yüzey pürüzlülüğü için optimum sonuca mevcut deney koşullarından $A_3B_1C_3$ deney şartında ulaşılmıştır. Taguchi tarafından belirlenen optimum delme şartlarındaki yüzey pürüzlülük değerlerinin Ra, Rz ve Rq hesaplanmasında denklem 9 kullanılmıştır. ÇYSG oranının optimum parametre seviyelerindeki tahmini değeri (η_{opt}) hesaplanmıştır.

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^p (\eta_{mi} - \eta_m) \quad (9)$$

Burada, η_m tüm deneylerin ortalama ÇYSG değeri, p performansı önemli derecede etkileyen delme parametre sayısı, η_{mi} optimum seviyelerdeki ortalama ÇYSG değeridir.

Çizelge 10. Doğrulama deney sonuçları (Results of the confirmation experiment)

Yüzey Pürüzlülüğü	Başlangıç parametresi	Optimum proses parametresi		Hata (%)
		Tahmini	DeneySEL	
Seviye	$A_2B_2C_2$	$A_3B_1C_3$	$A_3B_1C_3$	
Ra (μm)	2.91	1.65	1.61	2.48
Rz (μm)	13.84	5.72	5.22	9.58
Rq (μm)	3.62	1.41	1.30	8.46
ÇYSG (dB)	0.492	9.907	10.343	

Başlangıç parametresi ($A_2B_2C_2$) yerine optimal proses parametresi ($A_3B_1C_3$) kullanıldığında ÇYSG oranında 9.851 (dB)’lik bir iyileşme olduğunu görülmektedir. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar yapılan çok yanıtli optimizasyonun başarısını yansıtmaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada AA 5754 Alüminyum alaşımında, üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme ve üç farklı kesme derinliği kullanılarak delik büyütme işlemi yapılmıştır. Deneyler Taguchi L_9 ortogonal dizinine göre tasarlanarak minimum yüzey pürüzlülük değerlerine daha kısa sürede ve daha az maliyetle ulaşılmıştır. Bununla birlikte varyans analizi ile kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Yapılan doğrulama deneyleri ile optimizasyonun geçerliliği test edilmiştir.

Sonuçlar yüksek kesme hızı ve düşük ilerlemenin tercih edilmesi gerektiğini, ilerlemenin yüzey pürüzlülük

değerlerine en fazla etki ettiğini, kesme derinliğinin ise çok fazla etki etmediğini açıkça göstermiştir. Varyans analizi sonuçlarından, yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki en etkili parametrenin ilerleme (% 71.32), daha sonra kesme hızı (% 22.20) ve kesme derinliği (% 1.58) olduğu görülmüştür.

Çok yanıtli Taguchi optimizasyon yaklaşımı kullanılarak minimum yüzey pürüzlülük değerlerinin; 120 m/dak kesme hızı, 0.10 mm/dev ilerleme ve 0.75 mm kesme derinliği koşullarında gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlardan, AA 5754 Alüminyum alaşımının delik büyütme işlemindeki minimum yüzey pürüzlülük değerlerinin belirlenmesinde, çok yanıtli Taguchi optimizasyon yaklaşımının başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Groover M. P., “*Modern İmalatın Prensipleri*”. Yurdakul M., Tansel Y., Nobel Yayınları, 1150, Ankara, (2016).
- [2] Aydın M., Yaşar M., Gavas M., Altunpak Y., “*Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri*”, Seçkin Yayınları, Ankara, (2012).
- [3] Meral G., Sarıkaya M., Dilipak H., “Delik delme uygulamalarında delik kalitesinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu”, *Mühendislik ve Makine Dergisi*, 52: 42-49, (2011).
- [4] Meral G., Sarıkaya M., Dilipak H., “Delme işlemlerinde kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27: 332-338, (2011).
- [5] Rao Ch. M., Venkatasubbaiah K., Rao K. J., “Experimental investigation of surface roughness characteristics Ra, Rq and Rz”, *International Journal of Hybrid Information Technology*, 9(7): 373-388, (2016).
- [6] Rao Ch. M., Rao K. J., Babu K.S., “Analysis of process parameters in dry turning of medium carbon steel En19 by using grey relational grade and regression methods”, *Int J Eng Res Appl*, 5: 07-14, (2015).
- [7] Bağcı E., Özcelik B., “Analysis of temperature changes on the twist drill under different drilling conditions based on Taguchi method during dry drilling of Al 7075-T651”, *Int J Adv Manuf Technol*, 29: 629-636, (2006).
- [8] Çakır A., Nalbant M., Duran A., Ulaş H., “AA7075 ve AA6013 alüminyum malzemelere delik delme operasyonu sürecinde kesme parametrelerinin incelenmesi”, *3.Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Ankara, 9-18, (2012).
- [9] Şirin E., Şirin Ş., Turgut Y., Korkut İ., “AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi metodu ile optimizasyonu”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3: 132-144, (2015).
- [10] Kaplan Y., Nalbant M., Gökçaya H., “AISI D2 ve AISI D3 soğuk iş çeliklerinin delinmesinde işleme parametrelerinin çapak oluşumuna etkilerinin deneysel olarak incelenmesi”, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1: 37-46, (2011).
- [11] Bahçe E., Kılıçkap E., Özel C., “Al-5005’in delinmesinde delme parametrelerinin çapak oluşumuna etkisinin

- araştırılması”, **2.Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi**, Balıkesir, 242-250, (2010).
- [12] Motorcu A. R., Ekici E., “Al/B4C kompozitlerin karbür matkaplarla delinmesinin değerlendirilmesi”, **Pamukkale Univ Muh Bilim Derg**, 22 (4): 259-266, (2016).
- [13] Çakır A., Bahtiyar O., Şeker U., “Farklı Soğutma Şartları ile Farklı Kesme Parametrelerinin AA 7075 ve AA 2024 Alüminyum Alaşımlarında Delik Delme İşlemlerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, **16. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi**, İzmir, (2014).
- [14] Kılıçkap E., Hüseyinoğlu M., “Tepki yüzey modeli ve genetik algoritma kullanılarak AISI 316’ nın delinmesinde oluşan çapak yüksekliğinin modellenmesi ve optimizasyonu”, **Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi**, 1(1): 71-80, (2010).
- [15] Kıvak T., Şeker U., “Ti-6Al-4V Alaşımının Delinmesinde M42 HSS Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Delik Kalitesi Üzerindeki Etkileri”, **7th International Symposium On Machining**, İstanbul, 241-251, (2016).
- [16] Kıvak T., Çiçek A., Uygur İ., Özbek N. A., “AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliğin Delinmesinde Tek Katlı ve Çok Katlı Kaplamaların Delik Kalitesi Üzerindeki Etkileri”, **3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu**, Ankara, 28-34, (2012).
- [17] Kıvak T., Habalı K., Şeker U., “Inconel 718’in Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Talaş Oluşumu Üzerindeki Etkisinin Araştırılması”, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 25(2): 293-298, (2010).
- [18] Siyambaş Y., Turgut Y., “HSLA DIN EN 10149 Çeliğin Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Eksenel Kuvvet ve Momente Etkilerinin Deneysel Araştırılması”, **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 12(2): 41-49, (2015).
- [19] Savaşkan M., Taptık Y., Ürgen M., “Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu”, **İTÜ Dergisi D: Mühendislik**, 3(6): 117-128, (2004).
- [20] Kayır Y., Aslan S., Aytürk A., “AISI 316Ti paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesici uç etkisinin Taguchi yöntemi ile analizi”, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 28(2): 363-372, (2013).
- [21] Kıvak T., “Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts”, **Measurement**, 50: 19-28, (2014).
- [22] Çetin Ş., Kıvak T., “Optimization of the machining parameters for the turning of 15-5 PH stainless steels using the Taguchi method”, **Materials and Technology**, 51: 133-140, (2017).
- [23] Kirby E.D., Zhang Z., Chen J.C., Chen J., “Optimizing surface finish in a turning operation using the Taguchi parameter design method”, **Int J Adv Manuf Technol**, 30: 1021-1029, (2006).
- [24] Mia M., Khan Md A., Rahman S.S., Dhar N.R., “Mono-objective and multi-objective optimization of performance parameters in high pressure coolant assisted turning of Ti-6Al-4V”, **Int J Adv Manuf Technol**, 1-10, (2016).
- [25] İç Y., Duran H., Keçeci B., İlik E., Bilgiç B., “Çok yanıtlı Taguchi eniyilemesine yönelik bir bilgisayar uygulamasının geliştirilmesi”, **Politeknik Dergisi**, 19: 311-323, (2016).
- [26] Kıvak T., Sentaş G., Çiçek A., “Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills”, **Measurement**, 45: 1547-1557, (2012).
- [27] Ferah M., “Çok yanıtlı Taguchi deneysel tasarım metodu ve alüminyum sanayinde bir uygulama”, **SAU Fen Bilimleri Dergisi**, 7: 61-69, (2003).
- [28] Muhammad N., Manurung Y.H.P., Jaafar R., Abas S.K., Tham G., Haruman E., “Model development for quality features of resistance spot welding using multi-objective Taguchi method and response surface methodology”, **J Intell Manuf**, 24: 1175-1183, (2012).
- [29] Mohamed M.A., Manurung Y.H.P., Berhan M.N., “Model development for mechanical properties and weld quality class of friction stir welding using multi-objective Taguchi method and response surface methodology”, **J Mech Sci Technol**, 29: 2323-2331, (2015).
- [30] Tong L. I., Su C. T., Wang C. H., “The optimization of multi-response problems in the Taguchi method”, **Int J Quality&Reliability Management**, 14: 367-380, (1997).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Experimental study of diffusion absorption refrigeration systems using solar energy

Yazar(lar) (Author(s)): Engin ÖZBAŞ

ORCID: 0000-0003-4922-7890

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özbaş E., “Experimental study of diffusion absorption refrigeration systems using solar energy”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 291-297, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385931

Experimental Study Of Diffusion Absorption Refrigeration Systems Using Solar Energy

Araştırma Makalesi / Research Article

Engin ÖZBAŞ*

Yeşilyurt Demir Çelik Vocational School, Ondokuz Mayıs University, 55330 Samsun, Turkey

(Received : 20.02.2017 ; Accepted : 06.06.2017)

ÖZ

Bu çalışmada, güneş enerjisi kullanılarak difüzyon soğurmalı soğutma (DAR) sisteminin performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, deneyde ön soğutmalı / ön soğutmasız olmak üzere iki tip sistem kullanılmıştır. Enerji kaynağı olarak güneş enerjisinden faydalanmak amacıyla çalışma akışkanı su olan iki fazlı kapalı tip termosifon tip ısı borusu tercih edilmiştir. Deneyler sırasında; DAR sistemleri ve ısı boruları üzerindeki kritik nokta sıcaklıkları ile birlikte çevre sıcaklığı, DAR sistemleri basınçları ve güneş radyasyonu verileri 06:00-16:00 saatleri arasında kaydedilmiş ve her ısı borusu ile 82.5W güneş enerjisi toplanmıştır. DAR1 en düşük buharlaştırıcı giriş sıcaklığına (-14.8°C) 14:40'da ve DAR2 ise 13:55'de -0.9°C'ye ulaşmıştır. DAR1 ve DAR2'nin STK değerleri 0.2362 ve 0.2254 olarak bulunmuştur. DAR1 ve DAR2'de kullanılan ısı borularının verimliliği sırasıyla 0.3677 ve 0.3690 ve ısı direnci değerleri sırasıyla 0.1154W/°C, 0.0828W/°C'dir.

Anahtar Kelimeler: Yayınımlı soğurmalı soğutma, ısı borusu, güneş enerjisi, performans.

ABSTRACT

In this study, the performance of a diffusion absorption refrigeration (DAR) system using solar energy is investigated experimentally. For this purpose, two types of systems with/without sub-cooling are used for the experiment. Two-phase closed thermosyphon type heat pipes using water as the working fluid are used to utilize solar energy as heat source. During the experiments; ambient temperature along with critical point temperatures on DAR systems and heat pipes, DAR systems pressures and solar radiation data are recorded from 06:00 to 16:00 and each heat pipe has collected 82.5W of solar energy. DAR1 has achieved its lowest evaporator inlet temperature (-14.8°C) at 14:40, and DAR2 has reached -0.9°C at 13:55. COP values of DAR1 and DAR2 are found as 0.2362 and 0.2254. Efficiency of the heat pipes used in DAR1 and DAR2 are 0.3677 and 0.3690, and their thermal resistance values are 0.1154W/°C, 0.0828W/°C respectively.

Keywords: Diffusion absorption refrigeration, heat pipe, solar energy, performance.

1. INTRODUCTION

The diffusion absorption refrigeration (DAR) systems were invented by Von Platen and Munters in the 1920s [1]. The disadvantage of DAR, which is used in domestic spaces such as hotel rooms and offices particularly because it offers silent operation, is the quite low coefficient of performance (COP) it has. Its greatest advantage is that it can be run by any source of energy such as electricity, solar power, LPG, natural gas, and waste heat. Two working fluids are used in the DAR system: ammoniac as a cooler and water as an absorber. Additionally, hydrogen or helium is used as auxiliary gas in this system in order to decrease the partial pressure in the evaporator according to Dalton's law. Therefore, there are no moving parts in these systems, and solution cycle is achieved by the bubble pump heated at 150-200°C [2,3,4].

Heat pipes are used in electronic devices, heating and ventilation (HVAC) systems, and some other industrial sectors [5]. Various types of heat pipes are used in thermal applications. One of them is two-phase closed thermosyphon (TPCT) moved by gravitational force [6].

The literature contains a lot of studies carried out to enhance the performance of the DAR system and TPCT

separately. In the present study, the possibility of cooling through solar power was experimentally investigated by combining the DAR system, in which ammoniac, water and helium fluids are used, with TPCT, in which water is used as a working fluid. In this way, the usability of solar-powered TPCTs for cooling (besides heating) purposes was investigated.

2. DAR Systems

2.1. DAR1

The Figure 1 illustrates the DAR1 cooling machine that was invented by Platen-Munters and consists of a generator, a rectifier, a condenser, and an evaporator. When the system is in the steady state, the internal wall of the two-wall generator contains ammonia-water solution, which is also called rich solution.

Its external wall, on the other hand, contains poor solution in a structure that runs down from 1c and leaves its heat to the rich solution in the solution heat exchanger and connects to the absorber through 6. The ammonia gas that separates from the rich solution at 1c enters the condenser region by going through the rectifier to separate from the water on it, if any. The ammonia that liquefies in the condenser goes towards the gas heat exchanger through 3 where it transfers its heat to the

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : engin.ozbas@omu.edu.tr

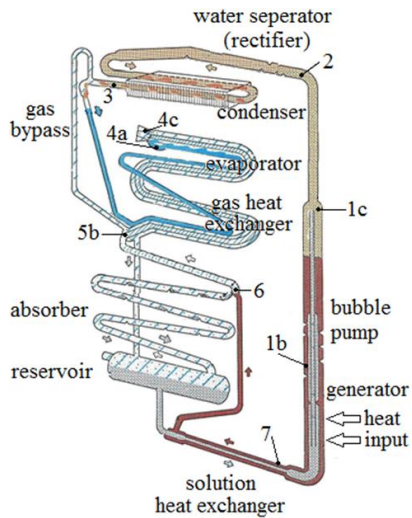


Figure 1. DAR1 [1]

helium gas via sub-cooling and enters the evaporator through 4a. The helium gas that gets heated in the gas heat exchanger and thus has higher concentration in the upper evaporator evaporates the liquid ammonia by decreasing its partial pressure in accordance with Dalton's law. The ammonia starting to evaporate enters the internal wall of the evaporator through 4c of the two-wall evaporator and goes on until the absorber. The ammonia facing the poor solution at 6 is absorbed by water and goes back to the tank as rich solution [2,3,4].

2.2. DAR2

Based on the DAR1 cycle, Zohar et al. [7] investigated the effect of liquid ammonia's entering the evaporator directly with no sub-cooling on the system performance.

As it can be understood from the Figure 2, in DAR2, a certain part of the evaporator has been turned into single wall, and it has been ensured that the liquid ammonia leaving 3 enters the evaporator straightforward with no sub-cooling. The functioning of other parts and liquids in the system is the same as DAR1.

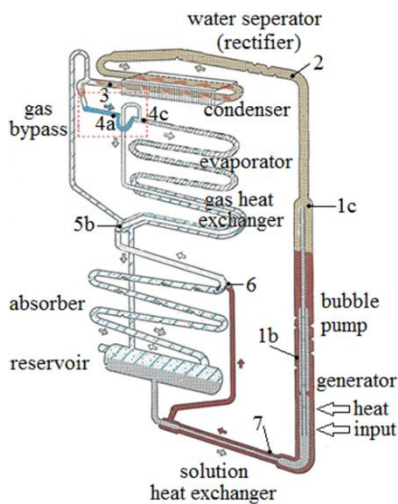


Figure 2. DAR2 [7]

3. TPCT

Two-phase closed thermosyphons (TPCT) are heat pipes with two close-ends 5% to 30% of whose volume is filled with working fluid and in which working fluid exists in both liquid and gas phases simultaneously [8].

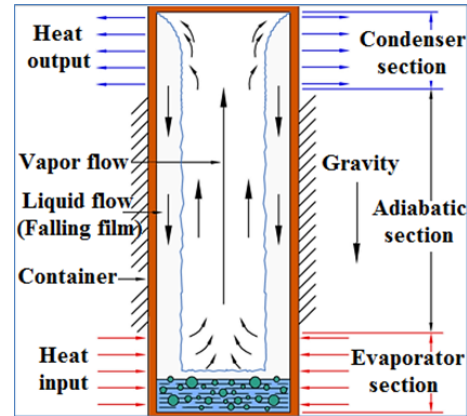


Figure 3. TPCT [9]

TPCT, whose physical mechanism is illustrated in the Figure 3, consists of three sections: evaporator, condenser, and adiabatic section. Owing to the heat it gets from the evaporator section, the working fluid reaches the condenser region by rising from the interior of the pipe in the vapor phase. The working fluid leaves its heat and turns into liquid phase here and completes its cycle by going down to the evaporator section from the pipe surface in the form of film membrane owing to gravity [9].

4. MATERIAL and METHOD

In this study, the effect of using solar power in diffusion absorption refrigeration (DAR) system, which can be run by any heat source, on performance was experimentally analyzed. To this end, solar-powered TPCT type heat pipe was combined with two different DAR systems (i.e. with sub-cooling (DAR1) and without sub-cooling (DAR2)).

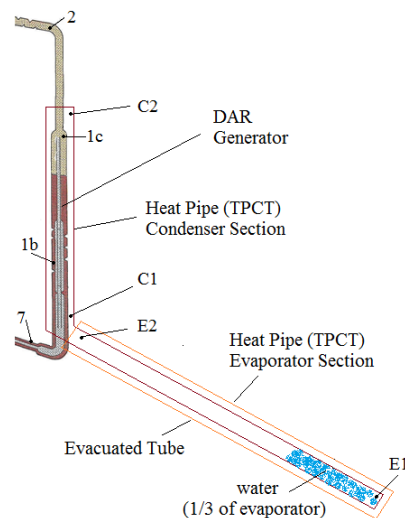


Figure 4. The combination of TPCT with DAR

Figure 4. illustrates the combination scheme of DAR and TPCT. Parabolic reflector was used with evacuated tube in order to reach higher temperatures in the heat pipe filled with water as working fluid at a ratio of 1/3 of the evaporator volume. For the performance calculations of TPCT, thermocouples were fastened through E1 and E2 points in the evaporator section and through C1 and C2 points in the condenser section for measuring temperature.

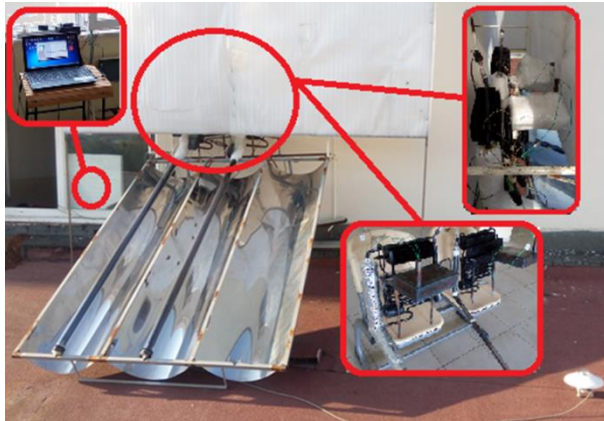


Figure 5. Experimental Setup

Figure 5. presents a general view of the experimental setup. The experiments were carried out under the weather conditions prevailing in Samsun, which is situated on the north coast of Turkey (the exact location at sea level: 41°14'N 36°26'E). The experiments were conducted between 06:00 and 16:00, and K-type thermocouples were used in all the temperature measurements required for analysis. Incident solar radiation was measured via DeltaOhm LP PYRA 02 pyranometer, and the pressure measurements of DARs were carried out via Keller PA-21Y pressure transmitter with ± 0.25 %FS linearity. All the experimental data were gathered at the intervals of one minute. ORDEL UDL100 universal Data Logger with 0.2% accuracy was used for recording.

5. RESULTS AND DISCUSSION

5.1. Experimental analysis

The experiments were carried out under the conditions of Samsun, Turkey. Solar-powered heat pipe placed at 35° slope angle was used as heat source. While temperature and pressure values were calculated for the performance analysis of DAR systems, only temperature values were calculated for the performance analysis of the heat pipe. The data related to the period from 06:00 to 16:00 were taken into consideration for results and calculations.

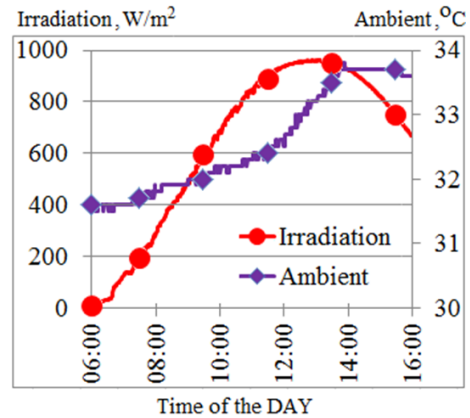


Figure 6. Temporal irradiation intensity and ambient temperature distribution

Figure 6 shows temporal irradiation intensity and ambient temperature distribution. It is evident that irradiation intensity reaches the highest level (i.e. 959.8 W/m²) at 12:55 and starts to fall at 13:15 while ambient temperature varies between 31.5°C and 33.8°C.

Figure 7 shows the temporal system pressure distribution for DAR1 and DAR2. The highest system pressure value is 19.5bar in DAR1 and 21.3bar in DAR2.

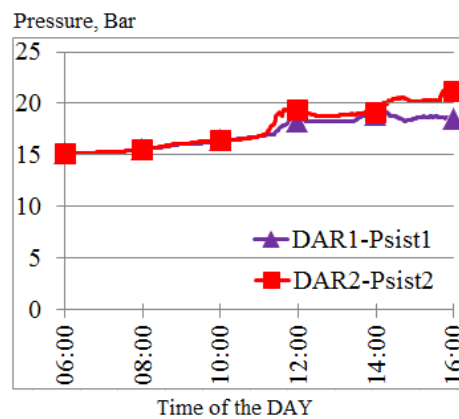


Figure 7. The temporal pressure values of the DAR systems

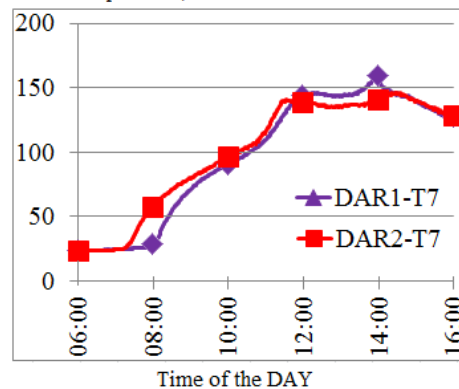


Figure 8. Temperature distribution of the point 7

Figure 8 shows the temporal temperature distribution of the point 7, which indicates the temperature values of the rich solution before entering the generator. The highest value is 160.1°C for DAR1 and 146.0°C for DAR2.

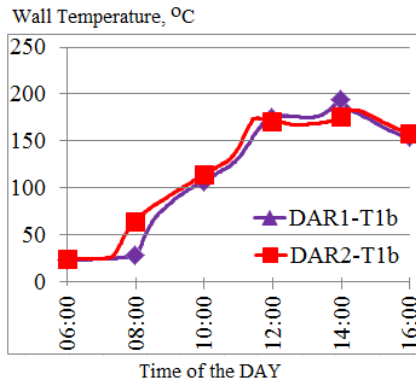


Figure 9. The temperature distribution of the point 1b

The distribution of the temperature values of the rich solution in the generator is seen in Figure 9. The highest temperature values of the 1b point are 195.6°C for DAR1 and 183.1°C for DAR2.

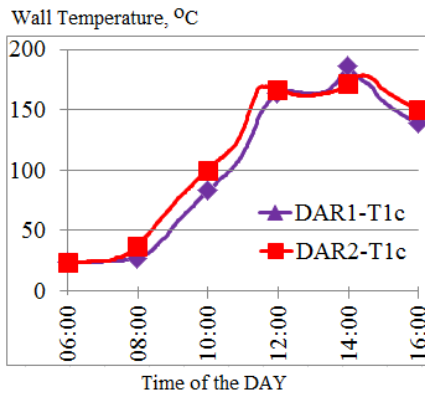


Figure 10. The temperature distribution of the point 1c

Figure 10 shows the temperature distribution of the bubble pump outlet. This measurement value, which also refers to the temperature of the ammonia vapor separating from the rich solution, is 188.4°C in DAR1 and 178.6°C in DAR2.

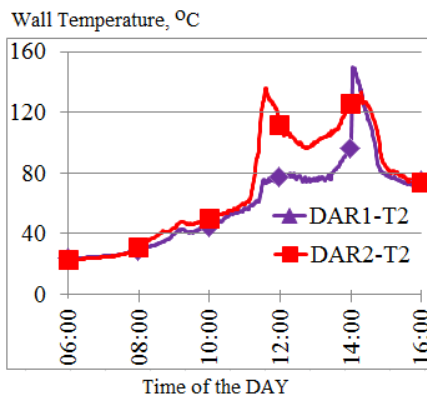


Figure 11. The temperature distribution of the point 2

Figure 11 shows the temperature distribution of the ammonia vapor entering the condenser from the rectifier. It is one of the indicators of cooling taking place in the DAR system. Sudden temperature increase in the point 2 indicates the start of vaporization in the evaporator. Sudden temperature increase of the point 2 took place at 11:36 for DAR2 (i.e. 135.7°C) and took place at 14:05 for DAR1 (i.e. 149.5°C), thereby reaching the highest level.

Figure 12 presents the temperature distribution of the point 3. The highest temperature of the ammonia turning into the liquid phase starting from this point is 54.7°C for DAR1 and 46.7°C for DAR2.

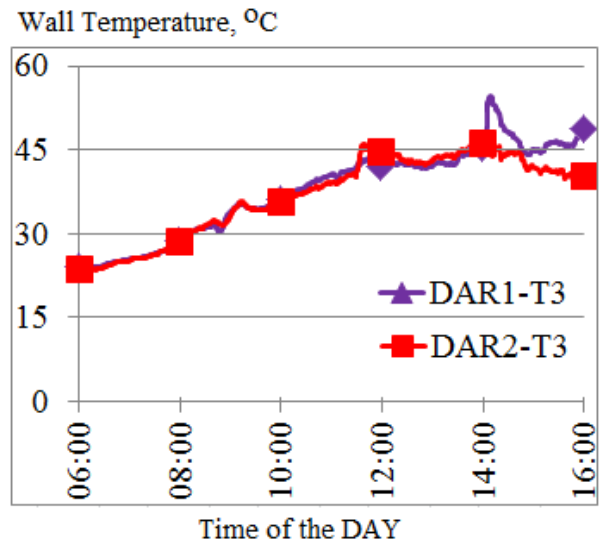


Figure 12. The temperature distribution of the point 3

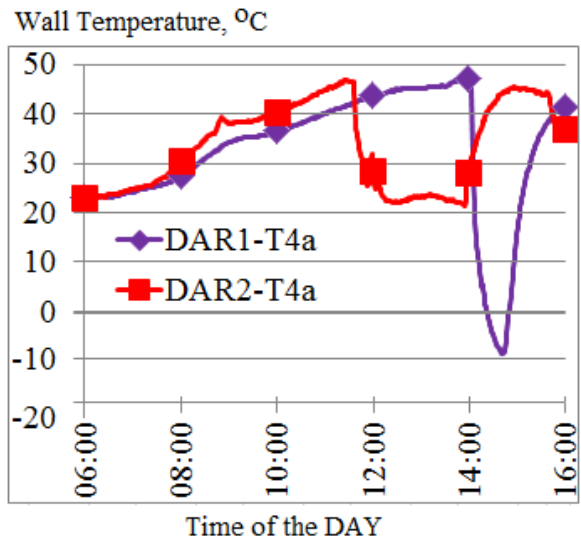


Figure 13. The temperature distribution of the point 4a

Figure 13 shows the temperature distribution of the ammonia coming from the condenser in the liquid phase just before it enters the evaporator. The lowest 4a temperature value was found to be -8.5°C for DAR1 and 21.5°C for DAR2.

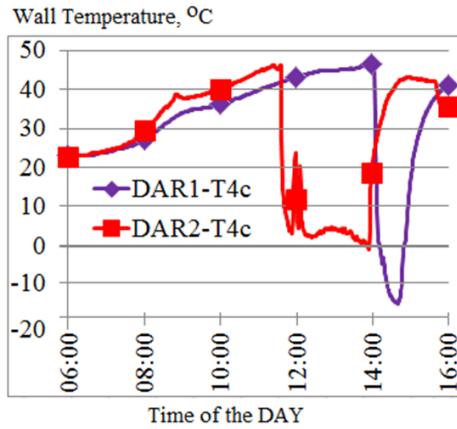


Figure 14. The temperature distribution of the 4c point

Figure 14 shows the temporal temperature distribution of the point 4c where vaporization starts in the evaporator. The fact that irradiation intensity started to decrease at 13:15 and its decrease accelerated after 14:00 caused cooling to be short-time by negatively affecting the systems. Cooling started at 14:05 for DAR1 and took approximately 1 hour whereas it started at 11:36 and finished at around 14:00 for DAR2. The lowest 4c temperature turned out to be -14.8°C for DAR1 and -0.9°C for DAR2.

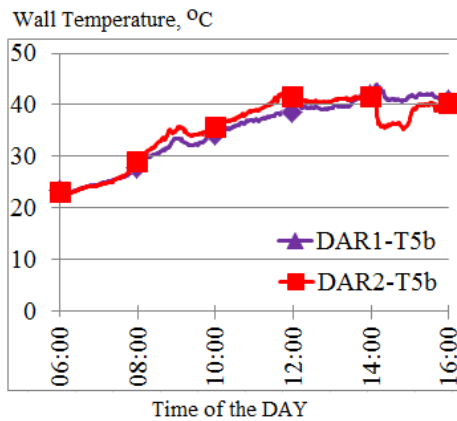


Figure 15. The temperature distribution of the point 5b

Figure 15 shows the temporal temperature distribution of the point 5b. The lowest value was measured to be 23.1°C in DAR1 and 22.8°C in DAR2.

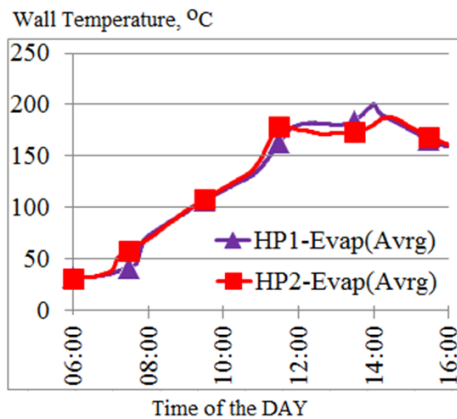


Figure 16. The evaporator temperature (average) distribution of the heat pipes

Figure 16 shows the average evaporator temperature distribution of solar-powered heat pipes used as heat source in DAR systems. HP1 is the heat pipe connected to the DAR1 system whereas HP2 is the heat pipe connected to the DAR2 system. The highest evaporator temperature (average) was measured to be 201.1°C in HP1 and 187.7°C in HP2.

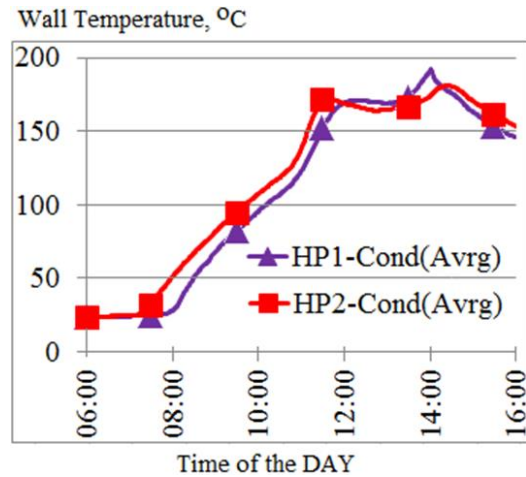


Figure 17. The condenser temperature (average) distribution of the heat pipes

Figure 17 shows the average condenser temperature distribution of the heat pipes. The highest value was found to be 192.0°C for HP1 and 180.8°C for HP2.

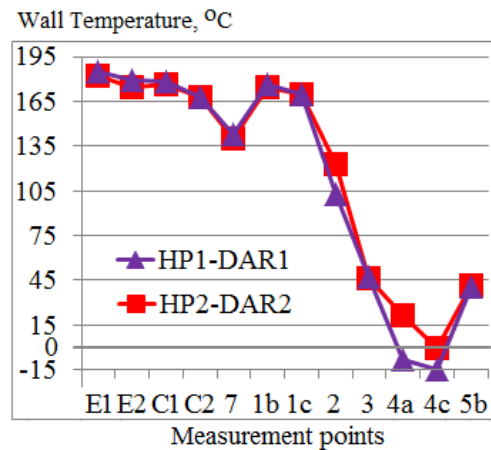


Figure 18. Comparison of measurement points for DAR and HP

The lowest 4c temperature was reached at 14:40 for DAR1 and at 13:55 for DAR2. Figure 18 involves a comparison of the temperatures in all the measurement points for DAR1 and HP1 at 14:40 and the temperatures in all the measurement points for DAR2 and HP2 at 13:55. E1 and E2 refer to the evaporator inlet and outlet temperatures of the heat pipes while C1 and C2 refer to their condenser inlet and outlet temperatures. The points 7, 1b, 1c, 2, 3, 4a, 4c, and 5b are the measurement points of the DAR system. The graph indicates that heat transfer from the heat pipes to the generator is highly successful.

5.2. Theoretical analysis

The temperature values measured in the experiments can be used for theoretical thermodynamic analysis (i.e. calculation of the coefficient of performance [COP] of the system). COP can be calculated with the following formula:

$$COP_{DAR} = \dot{m}_{pr-stm} \frac{\dot{Q}_{evap}}{W_{heater}} \quad (1)$$

In the DAR scheme for \dot{Q}_{evap} , the enthalpy values of the evaporator inlet (4c) and outlet (5b) points, h_{4c} and h_{5b} , can be used. In addition, the amount of energy collected by the solar-powered heat pipe used as heat source, $Q_{incident}$, can be written instead of W_{heater} .

$$Q_{incident} = A \int_1^2 I dt \quad (2)$$

where A refers to vacuumed glass tube surface area (m^2) and I refers to the global irradiance (W/m^2). The vacuumed tube used in the experiment has a surface area of $0.1332 m^2$.

Equation (3) is obtained when COP_{DAR} is rewritten by using Equation (1) and Equation (2).

$$COP_{DAR} = \dot{m}_{pr-stm} \frac{h_{4c} - h_{5b}}{Q_{incident}} \quad (3)$$

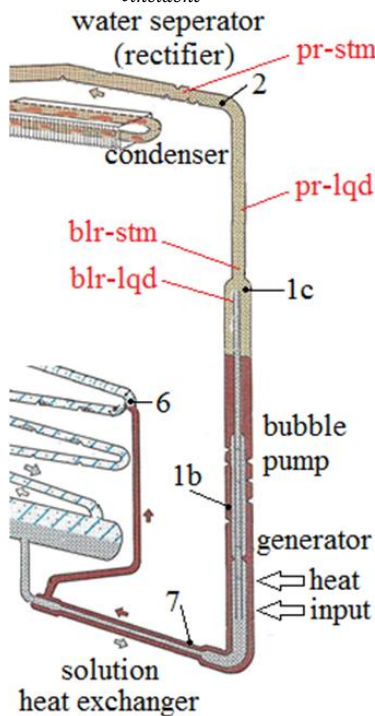


Figure 19. Necessary measurement points for theoretical analysis in DAR

Figure 19 shows the necessary measurement points for COP calculation in the DAR system. Here, the vapor ascending from the outlet of the bubble pump (1c) is represented by (*blr-stm*) whereas the liquid descending is represented by (*blr-lqd*). (*pr-lqd*) refers to the liquid condensing through (*blr-stm*) in the purifier whereas (*pr-stm*) refers to the pure ammonia vapor entering the condenser from the purifier in the vapor phase. According to the principle of energy conservation, the

mass flow of the ammonia-water vapor that flows from the boiler toward the purifier, $\dot{m}_{blr-stm}$, is calculated in accordance with the conservation of mass and energy equations at the outlet of the bubble pump.

$$\dot{m}_{1c} = \dot{m}_{blr-lqd} + \dot{m}_{blr-stm} \quad (4)$$

$$x_{1c} \cdot \dot{m}_{1c} = x_{blr-lqd} \cdot \dot{m}_{blr-lqd} + x_{blr-stm} \cdot \dot{m}_{blr-stm} \quad (5)$$

$$h_{1c} \cdot \dot{m}_{1c} + \dot{q}_{blr} = h_{blr-lqd} \cdot \dot{m}_{blr-lqd} + h_{blr-stm} \cdot \dot{m}_{blr-stm} \quad (6)$$

The mass flow of the pure ammonia vapor that flows to the condenser, \dot{m}_{pr-stm} , is calculated based on the conservation of mass equations at the purifier outlet.

$$\dot{m}_{blr-stm} = \dot{m}_{pr-lqd} + \dot{m}_{pr-stm} \quad (7)$$

$$x_{blr-stm} \cdot \dot{m}_{blr-stm} = x_{pr-lqd} \cdot \dot{m}_{pr-lqd} + x_{pr-stm} \cdot \dot{m}_{pr-stm} \quad (8)$$

REFPROP was used in all the calculations concerning the DAR system. The REFPROP software, which simulates the physical and chemical properties of fluid groups, was used in order to determine the mass ratios (x) and enthalpies (h) to be employed in the equations. The amount of energy collected by the heat pipe, $Q_{incident}$, is given in Equation (2). ΔT is the difference between the average vaporizer temperature and the average condenser temperature of the heat pipe. ΔT can be calculated with the following formula:

$$\Delta T = (E1 + E2)/2 - (C1 + C2)/2 \quad (9)$$

The thermal resistances of the pipes used for DAR can be calculated with the formulas (2) and (9) as follows;

$$R = \Delta T / Q_{incident} \quad (10)$$

DAR systems contain a mix of 75% water and 25% ammonia in mass. Accordingly, the amount of heat transferred by the heat pipe to the water in DAR can be calculated based on the change in the temperature of the water going through the generator, its mass flow, and specific heat as follows:

$$Q_{hp} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{1c} - T_7) \quad (11)$$

where \dot{m}_w is the mass flow of the water in the rich solution (kg/h); $c_{p,w}$ is the specific heat of water (kJ/kg°C); T_7 is the generator inlet temperature of the water in the rich solution (°C); and T_{1c} is its outlet temperature (°C).

Productivity (η) can be calculated based on the ratio of the total solar power amount coming onto the heat pipe ($Q_{incident}$) to the amount of the heat transferred by the heat pipe to the tank water (Q_{hp}):

$$\eta = Q_{hp} / Q_{incident} \quad (12)$$

Table 1 presents the values of the DAR1 and DAR2 systems calculated and measured at the moments when the points 4c reach the lowest temperature. It occurred at 14:40 for DAR1 and at 13:55 for DAR2. COP and mass flow (\dot{m}_{1c}) were calculated for DAR whereas thermal resistance (R) and productivity (η) were calculated for HP.

Table 1. Calculated and measured values

	R	COP	$\dot{m}lc$	η	H1	H2	E1	E2	
DAR1-HP1	14:40	0,1154	0,2362	0,2580	0,3677	182,0	174,1	176,1	167,7
DAR2-HP2	13:55	0,0828	0,2254	0,2220	0,3690	184,8	179,0	178,2	167,6

	7	1b	1c	2	3	4a	4c	5b	
DAR1-HP1	14:40	140,2	174,1	169,7	123,0	46,6	21,5	-0,9	41,5
DAR2-HP2	13:55	143,0	176,2	169,6	103,0	47,0	-8,3	-14,8	40,8

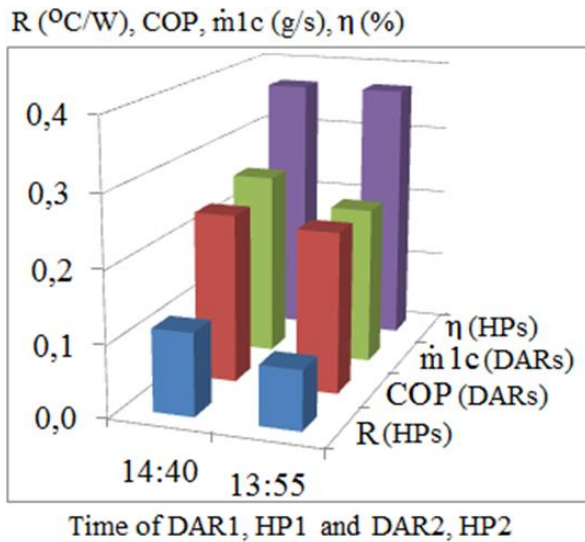


Figure 20. The graph of the values calculated for DAR and HP

Figure 20 presents a graphical representation of the values calculated based on the measurements for DAR and HP at 14:40 and 13:55. Figure 21 presents the distribution of the radiation coming to the heat pipes (incident) and thermal resistance.

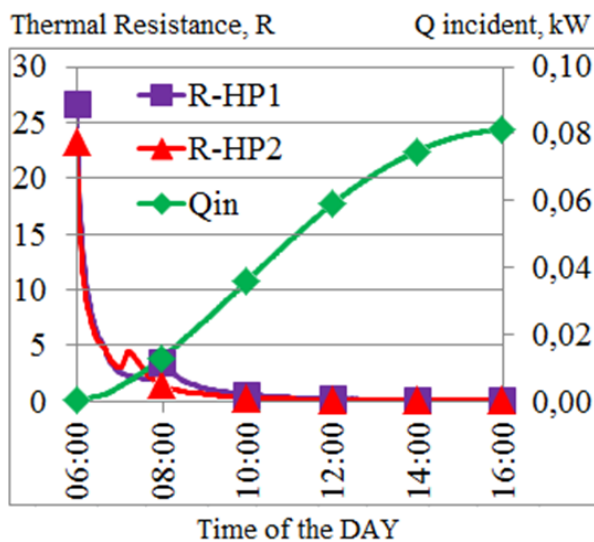


Figure 21. The distribution of the radiation coming to the heat pipes (incident) and thermal resistance

6. CONCLUSION

This study aimed to make an experimental analysis of the performance of the diffusion absorption refrigeration (DAR) system, which can be run by any heat source, with solar power. In this regard, two-phase closed thermosyphon (TPCT) type heat pipers were used to obtain high temperatures. DAR1 and DAR2 systems with and without sub-cooling were tested to understand the effect of solar energy on DAR systems better. Temperature and pressure measurements were evaluated. The performance analyses of DAR1 and the heat pipe connected to it (HP1) and DAR2 and the heat pipe connected to it (HP2) were separately made. In the end, while DAR1 yielded the lowest temperature, DAR2 yielded the longest cooling. Heat transfer was quite successful in HP1 and HP2, which had proper connections to the systems and in which water was used as working fluid. Future studies may focus on earlier and longer working of DAR systems. In this respect, the effects of different working fluids, different ratios, and different angles on DAR systems may be examined in the solar-powered heat pipe used as heat source.

REFERENCES

- [1] Von Platen B.C., Munters C.G., “Refrigerator”, *US Patent*, 1: 685-764, (1928).
- [2] Sözen A., Özbaş E., Menlik T., İskender Ü., Kılınc C., Çakır M.T., “Performance investigation of a diffusion absorption refrigeration system using nano-size alumina particles in the refrigerant”, *International Journal of Exergy*, 18(4): 443-461, (2015).
- [3] Sözen A., Özbaş E., Menlik T., Çakır M.T., Gürü M., Boran K., “Improving the thermal performance of diffusion absorption refrigeration system with alumina nanofluids: An experimental study”, *International Journal of Refrigeration*, 44: 73-80, (2014).
- [4] Sözen A., Menlik T., Özbaş E., “The effect of ejector on the performance of diffusion absorption refrigeration systems: An experimental study”, *Applied Thermal Engineering*, 33(34): 44-53, (2012).
- [5] Zohuri B., “Heat Pipe Design and Technology”, *CRC Press*, (2011).
- [6] Vasiliev L.L., Kakac S., “Heat pipe and solid sorption transformation, fundamentals and practical applications”, *Taylor&Francis Group, LLC*, (2013).
- [7] Zohar A., Jelinek M., Levy A., Borde I., “The influence of diffusion absorption refrigeration cycle configuration on the performance”, *Applied Thermal Engineering*, 27(13): 2213-2219, (2007).
- [8] Faghri A., “Heat Pipe Science and Technology”, *Taylor & Francis, Washington, DC*, (1995).
- [9] Jafari D., Franco A., Filippeschi S., Di Marco P., “Two-phase closed thermosyphons: A review of studies and solar applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: 575-593, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi

Evaluation of insulation materials used in construction sector based on heat and sound insulation

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Ali ARSLAN¹, Mustafa AKTAŞ²

ORCID¹: 0000-0001-9294-1905

ORCID²: 0000-0003-1187-5120

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Arslan M. A. ve Aktaş M., “İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 299-320, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.407257

İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet Ali ARSLAN^{1*}, Mustafa AKTAŞ²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500 Ankara/TÜRKİYE

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500 Ankara/TÜRKİYE

(Geliş/Received : 27.02.2017 ; Kabul/Accepted : 06.02.2018)

ÖZ

Makalenin amacı inşaat sektörü için üç alanı kapsayan: geleneksel, alternatif ve gelişmiş yalıtım malzemelerini dikkate alarak yalıtım malzemelerine genel bir bakış sağlamaktır. Makalenin birinci ve ikinci bölümünde ısı ve ses yalıtımı ile ilgili mevcut durum ve literatürde yapılmış olan çalışmalar ele alınmıştır. Üçüncü bölümde ısı ve ses yalıtımı için yalıtım malzemelerinde bulunması gereken özellikler, kriterler ve malzeme özelliklerinin değerlendirilmesi için başlıca uluslararası standartlar ele alınmıştır. Dördüncü bölümde mevcut yalıtım malzemeleri sınıflandırılarak ısı ve akustik özellikleri, su buharı direnci, yangın direnci ve çevresel özellikler dikkate alınarak incelenmiştir. Beşinci bölümde ısı ve ses yalıtımı için mevcut yalıtım malzemeleri dikkate alınarak gelecekte yapılacak olan çalışmalara yönelik değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Bu değerlendirmelere göre Türkiye enerji konusunda olduğu gibi yalıtım malzemeleri konusunda da ağırlıklı olarak dışa bağımlıdır. Bu konuda dışa bağımlılığı giderebilecek, rekabet gücü yüksek malzeme ve teknolojilerinin geliştirilmesi çok önemlidir. Literatürdeki çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde uygun malzeme ve bağlayıcılar kullanıp gerekli işlemler yapıldığında farklı maddelerden elde edilen yeni nesil kompozit yalıtım malzemelerinin istenen yalıtım performansı özelliklerini sağlayabileceği öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yalıtım malzemeleri, ısı yalıtımı, ses yalıtımı.

Evaluation of Insulation Materials Used in Construction Sector Based on Heat and Sound Insulation

ABSTRACT

The purpose of the paper is to provide an overview of the insulation materials, taking into including three areas for the construction sector: traditional, alternative and advanced insulation materials. In the first and second part of the paper, the current state of heat and sound insulation and the studies made in the literature are discussed. In the third section, properties and criteria to be found in insulation materials for heat and sound insulation and the main international standards for evaluating material properties are discussed. In the fourth chapter, existing insulation materials are classified and their thermal and acoustical properties are examined by taking into consideration water vapor resistance, fire resistance and environmental properties. In the fifth chapter, considering the existing insulation materials for heat and sound insulation, evaluations were made for future works. According to these evaluations, Turkey is predominantly be dependent on outside on insulation materials as well as on energy. The development of highly competitive materials and technologies is crucial in this regard. The studies in the literature are generally predicted to provide the desired insulation performance characteristics of the new generation composite insulation materials obtained from different materials when appropriate materials and binders are used and the necessary operations are carried out.

Keywords: Insulation materials, thermal insulation, sound insulation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 24 Haziran 2004 tarihinde onaylanan “Enerji Verimliliği Stratejisi”; Türkiye’deki nihai enerji tüketim sektörlerindeki enerji verimliliğini AB standartlarına çekmeyi hedeflemektedir. Avrupa Komisyonu Enerji ve Ulaşım Genel Müdürlüğü’nce yapılan çalışmalara göre, toplam enerji kullanım dağılımı % 32 ulaşım, % 28

endüstri ve % 40 binalar olarak belirlenmiştir. Binalardaki enerji kullanımının ise % 85’inin ısıtma için harcandığı ortaya çıkmıştır. Bu sonuca göre enerjide en büyük tasarruf potansiyelinin binalarda olduğu açıkça görülmektedir.

Ülkemizde, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılabilmesi ve nihai enerji tüketim sektörlerindeki enerji verimliliğinin Avrupa Birliği (AB) standartlarına çekilmesi stratejisi hedeflenmektedir. Ülkemizdeki yüksek bina stokları ve bina sektöründe hızlı büyüme, ısı yalıtımının önemini fazlasıyla anlatmaktadır. Isı yalıtım uygulamalarında ısı iletim katsayısı düşük, yanmaz,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mehmetali.arslan@gazi.edu.tr

kolay uygulanabilir ve ekonomik ısı yalıtım malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Sürdürülebilirlik ve ekolojik tasarım konuları son zamanlarda inşaat sektöründe araştırılan ve uygulanan en önemli konular arasında yer almaktadır. Yeşil bina tasarım standartlarına göre sertifika veren “Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik” (Leadership in Energy and Environmental Design-LEED), “Bina Araştırmaları Kurumu Çevresel Değerlendirme Metodu” (Building Research Establishment Environmental Assessment Method-BREAM) gibi uluslararası yeşil bina değerlendirme sistemleri sertifika programları ülkemizde de uygulanmakta ve doğa dostu, enerji korunumu yüksek ve sağlıklı yapılar hızla çoğalmaktadır.

Sürdürülebilir ve sağlıklı yaşam koşullarını sağlayan ortamlar tasarlanırken dikkat edilmesi gereken kriterlerden birisi de akustik konfor şartlarıdır. Bina ve çevresel akustik konfor şartlarını içeren kriterler her ne kadar yeşil bina sertifika programlarında yer alsada bu programlarda ön plana çıkan doğal aydınlatma ve havalandırma gibi kriterler, akustik gereklilikler dikkate alınmadan uygulandığında yapılarda daha çok akustik problemler yaratmaktadır.

Enerji kaynaklarının hızla azalması yüzünden alternatif enerji üretim metotları üzerinde yoğun çalışmalar devam etmektedir. İnşaat sektöründeki enerji kullanımı, dünyanın toplam enerji kullanımının ve sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturduğundan binaların enerji verimliliğini artırma çalışmaları önem kazanmıştır. Bu bağlamda enerji tasarrufu açısından yalıtım önemli yer tutmaktadır. Yalıtım teknolojileri sayesinde enerji kaybı minimize edilebilmektedir. Uygun metotlarla üretilen yalıtım malzemeleri iyi yalıtım performansı sağlayarak uzun ömürlü, ekonomik, çevre dostu ve sağlıklı, yerel ve sürdürülebilir olabilmektedir. Bu kapsamda ısı ve ses yalıtımı konutlarda makul enerji tüketimi, yeterli konfor ve sağlık koşullarının sağlanması açısından büyük önem taşıdığından gün geçtikçe bu tür yalıtım ürünlerine olan talep büyük ölçüde artmaktadır.

Bu çalışmanın amacı geleneksel, alternatif ve gelişmiş bina yalıtım malzemelerinin zayıf, güçlü yanlarını ve çeşitli özelliklerini ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirmektir. Bu değerlendirmede ısı ve akustik özellikler, su buharı direnci, yangın direnci ve çevresel özellikler dikkate alınmıştır.

kurutulmasında kullanılmak

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Özkan ve ark. (2009), yalıtım malzemesi kalınlığının ısı yalıtımına etkisi incelenmiştir. Ayrıca çalışmada pencere ve dış duvar alanı değişiminin, bina ısıtma enerjisi ihtiyacına ve optimum yalıtım kalınlığına etkisi araştırılmıştır. Yakıt maliyetleri ve ülkemizin enerjide dışa bağımlılığı düşünülerek, projecilerin ve uygulamacıların daha bilinçli olarak binalarda optimum kalınlıkta ısı yalıtımı yapmaları gerektiği tavsiye edilmiştir. Ayrıca ısı, ses

ve yangın yalıtımını birlikte yerine getirebilen yalıtım malzeme ve tekniklerinin araştırılıp geliştirilmesine önem verilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Binalarda enerjinin verimli kullanılmasına konutlarda yalıtım malzemesi ve kalınlığının doğru olarak saptanmasıyla ve binaların mimari detaylarının ısıtma gereksinimlerini azaltacak şekilde tasarlanmasıyla başlanabileceği ifade edilmiştir [1].

Günümüzde bina ısı yalıtımında yaygın olarak mantolama yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde daha çok geliştirilmiş polistiren sert köpük (EPS), haddelenmiş sert polistiren köpük (XPS), poliüretan köpük gibi köpük malzemeler ya da taş yünü-cam yünü gibi mineral yünleri (MW) ve ahşap yünü olmak üzere, lifli malzemeler yalıtım bloklarının yapımında tercih edilmektedir [2].

Ricciardi P., Belloni, E., Cotana, F., (2014), bir yapıştırıcı ile birleştirilen geri dönüştürülmüş tekstil lifleri ve atık kağıtlardan oluşturulmuş 12 mm ve 20 mm kalınlığındaki panellerin ısı ve akustik özellikleri araştırılmıştır. Numunenin ısı performansı UNI EN ISO 8990'a göre, sıcak kutu aparatı kullanılarak değerlendirilmiştir. Deney sonuçları araştırılan tüm panellerin iyi bir ısı davranış sergilediğini ve k-değerlerinin 0,034-0,039 W/m.K aralığında değiştiğini göstermiştir. Akustik yutum katsayısı ISO 10534-2 ile uyumlu olarak, Kundt's tüp kullanılarak belirlenmiştir. Numunelerin gürültü azaltma katsayısı (NRC - 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekanslarında) tabaka kalınlığına bağlı olarak, 0,23-0,38 aralığında değişmektedir. Deney sonuçları geleneksel yalıtım sistemlerinin, ısı ve ses özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre yenilikçi numunenin ısı iletim katsayısı değerleri taş yünü (0,037 W/m.K), kâğıt yün ve mineral yün (0,04 W/m.K) yalıtım malzemeleri ile benzer olmakla birlikte yeni panellerin yoğunlukları (433-483 kg/m³) taş yünü (90 kg/m³), kâğıt ve mineral yünlerin (32-40 kg/m³) yoğunluklarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir [3].

Papadopoulos A.M., (2005), son teknoloji malzemelerini değerlendirmiş ve gelecekteki araştırma gelişme hedeflerini mevzuat ve piyasa çerçevesinde incelemiştir. Yalıtım malzemeleri enerji etkin binaların tasarımı ve inşasında anahtar bir araçtır. Bunu artan yalıtım kalınlıkları ve bu alanda satış artışındaki yansımalar göstermektedir. Yalıtım malzemelerinin Avrupa pazarı inorganik lifli malzeme ve organik köpüklü malzeme grubu ürünlerinin hâkimiyeti altındadır. Bu malzemeler benzer yalıtım performansı göstermektedir. Malzemelerin ısı özellikleri son on yılda önemli ölçüde gelişmemesine rağmen, yangın ve neme karşı tepki veya mekanik özellikler gibi diğer özellikler bazen yalıtım yetenekleri pahasına geliştirilmiştir. Ayrıca, çalışmada verilen uygulamalar ve sanayi sektöründe gelecekteki belirlenen amaçlara ulaşmak için ‘optimum’ malzeme arayışında çevre ve insan sağlığının önemi giderek artan oranda rol oynayacağı vurgulanmıştır [4].

Jelle B.P., (2011), binalarda kullanılan ısı yalıtım malzemeleri ve ısı yalıtım çözümlerinin avantaj ve dezavantajlarını irdelemiştir. Hem geleneksel hem de son teknoloji

malzemelerin ısı iletkenlik, performasyon açığı, şantiye adaptasyon ve kesilebilme, mekanik mukavemet, yangından korunma, yangın sırasında duman emisyonu, sağlamlık, iklim, yaşlanma dayanıklılık, donma/çözülme direnci döngüleri, su direnci, maliyetleri ve çevresel etkileri karşılaştırılıp incelenmiştir. Bunların örnekleri mineral yün, genleştirilmiş polistiren, ekstrüde polistiren, poliüretan, vakum yalıtım panelleri, gaz dolgululu yalıtım panelleri, aerogeller, nano yalıtım malzemeleri ve dinamik yalıtım malzemeleri gibi gelecekteki olasılıklar şeklindedir. Geleneksel yalıtım malzemeleri nispeten yüksek ısı iletim katsayısı değerlerine sahiptirler, soğuk iklimlerdeki binalarda yüksek performans için çok kalın bina kaplaması gerekebilir. Geleneksel yalıtım malzemelerinde ısı iletim katsayısı değerleri artan nem içeriği ile önemli ölçüde artmıştır. En düşük ısı iletim katsayısına sahip geleneksel yalıtım malzemesi poliüretan (PUR) olup, ısı iletim katsayısı 0,020 W/m.K'den daha düşük değerlere sahiptir. Bununla birlikte, bir yangın sırasında poliüretandan gelen toksik gaz salınımı, ciddi sağlık tehlikesi sorunlarını ortaya çıkarmaktadır. Son teknoloji yalıtım malzemeleri arasında vakum yalıtım panelleri ve aerogeller, geleneksel malzemelere göre oldukça düşük ısı iletim katsayısı değerlerine sahiptir. Bir vakum yalıtım panelinin ısı iletim katsayısı değeri 0,004 W/m.K civarındadır. Buna karşın aerogel için en düşük değer 0,013 W/m.K'dir. Bununla birlikte, vakumsuz ya da delinmiş olması durumunda 0,020 W/m.K değerine ulaşır, nem ve difüzyon yoluyla hava girişi nedeniyle zamanla vakum yalıtım panellerinin ısı iletim katsayısı artar. Hem vakum yalıtım panelleri hem de aerogeller çok pahalıdır, ancak vakum yalıtım panellerinin uygun maliyetli olabileceği ve yüksek maliyetleri kaldırabilecek uygulama alanlarında kullanılacağı belirtilmiştir. Şu anda önemli özellikleri bakımından tüm gereksinimlerini yerine getirebilecek tek bir yalıtım malzemesi ya da çözüm mevcut olmadığı vurgulanmıştır [5].

Shastri, D., Kim, H.S, (2014), yapı malzeme uygulamaları için nişasta bağlayıcı ile genleştirilmiş perlit parçacıklarının sağlamlaştırarak yeni bir yapı malzemesi yapmışlardır. Üretilen perlit köpüklerin dayanımı ve basınç modülü köpük yoğunluğu aralığı (0,1–0,9 g/cm³) için alçı ile karşılaştırılmıştır. Sıkıştırma sırasında meydana gelen hasarlar görüntü analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Beklendiği gibi yüksek yoğunluklu perlit köpüğünün daha fazla hasar gördüğü tespit edilmiştir. Yeni oluşan üründe perlit köpüğü, perlit partikülü ve nişasta içermiştir. Perlit partikülleri başarılı yüzdürme yöntemi ve sıkıştırma tekniği ile güçlendirilmiştir. Islak perlit karışımı için üç farklı karakteristik aşama olduğu ve perlit partiküllerinin güçlendirilmesi için bu aşamalar tanımlanmıştır. Üretilmiş perlit köpüğünün sıkıştırma altında kırılma mekanizmaları tespit edilmiştir. Üretilen perlit köpüğünün köpüklü alçı ile kullanılmasında 0,3 g/cm³ yoğunluklu perlit köpüğünün basma dayanımını 0,7-0,9 g/cm³ yoğunluklu alçı köpüğü ile uyumlu bulunmuştur. Perlit köpüğünün daha yüksek yoğunluğu için daha fazla hasar tespit edilmiştir [6].

Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A., (2011), aerogellerin özellikle bina uygulamalarında kullanımı ve aerogel yalıtımı hakkında genel bir derleme yapmışlardır. Birinci aşamada aerogellerin üretim proseslerine ikinci aşamada güncel bina uygulamaları ve diğer alandaki uygulamalara yer verilmiştir. 13 mW/m.K altındaki ısı iletim katsayısıyla ticari ürünler için geleneksel ısı yalıtım malzemeleri ile karşılaştırıldığında kayda değer özellikler göstermektedir. Geleneksel mineral yünlerden 2-2,5 kat daha düşük ısı iletim katsayısına sahiptirler. Aerogeller güneş spektrumundaki yüksek geçirgenlik olasılığından dolayı da inşaat sektörü için de büyük bir ilgiye sahiptir. Aerogeller ayrıca ısı ve ses yalıtım malzemesi olarak bina uygulamalarında güncel olarak kullanılmaktadırlar [7].

Zukowski, M., Haese, G., (2010), çalışmalarında perlit yalıtımı ile dolu modern dikey delikli duvar ünitesinin ısı özelliklerinin araştırmışlardır. Sayısal hesaplamalara ve ölçümlere dayalı olarak yeni içi boş tuğlanın ısı özellikleri belirlenmiştir. Perlit rezervlerinin yaklaşık % 70'i Türkiye'de bulunmaktadır. Genleştirilmiş perlit çoğunlukla hafif ağırlıklı beton uygulamalarında kullanılmaktadır. Perlit ile doldurulmuş modern içi boş tuğlalar yüksek ısı dayanım sağlamakta ve herhangi bir ek yalıtım katmanı kullanmaksızın uygulanabilirler. Bu durumda da duvarın toplam ısı transfer katsayısı (U) değeri 0,29 W/m²K'den daha düşüktür. Perlit dolgululu içi boş tuğlaların perlit yalıtımı tuğlaların elle taşınması esnasında hasar görmektedir. Ayrıca uygulama esnasında boşluk içerisine harç girebilmekte ve bu durum ısı yalıtımını olumsuz etkilemektedir [8].

Alam, M., Singha, H, Brunner, S., Naziris, C. (2014), dumanlanmış silika yerine daha ucuz olarak genleştirilmiş perlit kullanarak vakum yalıtım paneli dolgusu için dumanlanmış silika-genleştirilmiş perlit kompozitinin ısı ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Genleştirilmiş perlitli kompozitin radyasyon iletkenliği, gaz ısı iletkenliği, ısı iletkenliği 1 atm basıncında ve 0,5 mbar basıncında değerlendirilmiştir. 100x100 mm örnek VIP panel değişen oranlarda genleştirilmiş perlit dumanlanmış silika, silikon karbür ve polyester elyaf içeren kompozit hazırlanmıştır. % 60 kütle oranında genleştirilmiş perlit içeren panel dolgusunun ısı iletim katsayısı atmosferik basınçta 53 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Genleştirilmiş perlit oranı % 30'a düşürüldüğünde ısı iletim 28 mW/m.K ölçülmüştür. Bir vakum yalıtım panelinin maliyeti genleştirilmiş perlit kullanılarak % 20 oranında azaltılabileceği vurgulanmıştır [9].

Picho'r W., Janiec, A., (2009), porselen ile modifiye edilen genleştirilmiş perlitin ısı kararlılığını araştırmıştır. Genleştirilmiş perlit alimino silikat jel ile modifiye edilmiştir. Genleştirilmiş perlitin ısı kararlılığı ve dayanıklılığı, perlit tanelerinin boşluklu yapısındaki yere porselen sentezi ile iyileştirilmiştir. Porselen alimino silikat jelden elde edilmiştir. Jel, erime noktasının altındaki kaba genleştirilmiş perlitin ısı kararlılığı ve dayanıklılığını iyileştirmek için gözeneklerin yüzeyine uygulanmıştır. Kimyasal modifikasyon porselen kristalleri ile takviyelendirilen genleştirilmiş perlit yapısının güçlenmesine neden olmuştur [10].

Lu, Z., Xu, B., Zhang J., Zhu, Y., Sun, G., Li, Z., (2014), parafinin genişletilmiş perlitin gözenekli bağları içerisine emdirilmesi ile kararlı genişletilmiş perlit/parafin kompoziti hazırlamışlardır. Kompozit yapı iyi ısı enerji depolama özelliği, ısı kararlılık ve ısı güvenilirlik göstermiştir. Genleştirilmiş perlit ve parafin arasında kimyasal etkileşimin olmadığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca direkt emdirme yöntemiyle sıvı sızıntısı olmaksızın kompozit içerisinde parafin üniform bir şekilde dağılmıştır. Kompozit yapı binalarda ısı enerji depolaması için büyük bir potansiyele sahiptir [11].

Yılmaz, S., Ozdeniz, M.B. (2005), genişletilmiş perlitin yapılan plakaların ses davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Bu plakalar ses yutumu için kullanılmaktadır. Ses parametresi olarak bu çalışmada ses yutum katsayısı belirlenmiştir. Nemin ses yutma katsayısını azalttığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Plakalar nemlendirilirse ve özellikle su ile doyduğunda ses yutum özelliği azalmaktadır. Kuru ve % 50 nem şartları arasında plakalarda ses yutma katsayısında bir farklılık olmadığı gözlemlenmiştir. % 50-% 95 arasında nem için ses parametreleri arasında önemli farklılıklar vardır. Sodyum silikat ile kaplanan genişletilmiş perlitin nem dayanımını arttırdığı ve karışım içerisine mineral fiberlerin eklenmesi plakaların ses yutma katsayısını ve dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir [12].

Vaou, V., Panias, D., (2010), geopolimerizasyon teknolojisiyle ham madde olarak perlit kullanılarak ısı yalıtım malzemesi yapmışlardır. Malzemenin köpürmesi ve gözeneklerin oluşabilmesi için hidrojen peroksit kullanılmıştır. Eklenen köpürücü malzemenin yapılan ısı yalıtım malzemenin ısı özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Genleştirilmemiş perlitin yapılan geopolimer köpüklerin özellikleri yalıtım malzemesi için uygun olduğu kanıtlanmıştır. Yapılan malzemenin ısı iletim katsayısı 0,03 W/m.K olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı 780 kPa'da %2 deformasyon göstermiştir. DIN4102 standardına göre A1 sınıfı yanmaz malzeme üretilmiştir. Maksimum uygulanma sıcaklığı 700 °C olarak belirlenmiştir [13].

Celik, A.G., Depci, T., Kılıç, A.M., (2014), yeni hafif ağırlıklı kolemanit katkılı perlit tuğla ve ticari diğer hafif ağırlıklı malzemeler ile fizikomekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Genleştirilmiş perlit (GP), kömür tozu, CMC ve su kullanılarak hazırlanan karışım ile hafif ağırlıklı tuğla kullanılmıştır. Kolemanit içeren hafif ağırlıklı betonun dayanımı, ısı ve ses dayanımları araştırılmıştır. Farklı miktarlarda ağırlıkça kolemanit % 0'dan % 20'ye kadar, 200 oC'den 400 oC'ye kadar farklı sıcaklıklar uygulanarak tuğlalar hazırlanmıştır. Karşılaştırılan sonuçlar tuğlaların en iyi özelliğinin 400 °C'deki başlangıç karışımına % 10'luk kolemanit ilavesi sırasında elde edildiğine işaret etmektedir. Üretilen tuğlaların ses yalıtımı (50 dB), ısı iletim katsayısı (0,12 W/m.K) ve birim ağırlığı (533 kg/m³) diğer inşaat malzemelerinden daha iyi olduğu belirtilmiştir [14].

Liu, W.V., Apel, D.B., Bindiganavile, V.S., (2014), genişletilmiş perlit agrega içeren hafif ağırlıklı kuru karışım

püskürtme betonunun ısı özelliklerini incelemişlerdir. Farklı oranlarda (Genleştirilmiş perlit/kum) kuru karışım hazırlanmış, püskürtme tekniği yardımıyla ahşap kalıplara yerleştirilerek panel üretilerek mekanik ve ısı iletkenlik testleri yapılmıştır. Genleştirilmiş perlit agrega ile püskürtme beton karışımlarının dökme beton ile karşılaştırıldığında benzer tek eksenli basınç direncine ve üstün yarma çekme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Genleştirilmiş perlit agreganın eklenmesi, ısı iletim katsayısı ve ısı yayılım katsayısının düşmesine neden olmuştur. Dökme beton ile karşılaştırıldığında kuru karışım püskürtme betonunun özgül ısı kapasitesinin daha düşük olduğu belirlenmiştir [15].

Abidi, S., Nait-Ali, B., Joliff, Y., Favotto, C., (2015), bir alçı kompozit malzemede ısı iletim katsayısına perlit, vermikülit ve çimentonun etkileri incelenmiştir. Sayısal ve deneysel yaklaşımlar ile ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılan yeni bir kompozit malzemenin ısı mekanik davranışı ve yapıyı yangından koruması araştırılmıştır. Kompozit panelde kalsiyum sülfat hidrat, su ve inorganik malzemeler kullanılmıştır. Analitik ve sayısal modeller kullanılarak ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır. Kompozit karışımına ağırlıkça % 5 veya % 25 vermikülitle ilave edildiğinde ısı iletim katsayısı sırasıyla 0,50 W/m.K'den 0,45 W/m.K'e ve 0,23 W/m.K'e düşmüştür. Ağırlıkça % 5 ve % 25 çimento ilave edilmesi durumunda ısı iletim katsayısı sırasıyla 0,53 W/m.K ve 0,52 W/m.K'e düşmüştür. Ağırlıkça % 5 ve % 25 perlit ilave edilmesi durumunda ısı iletim katsayısı sırasıyla 0,35 W/m.K ve 0,16 W/m.K olarak tespit edilmiştir. ısı iletim katsayısı sonuçları perlit ilavesinin kompozitin ısı yalıtım kalitesini arttırmak için vermikülit ve çimentodan daha iyi bir katkı maddesi olduğunu göstermiştir. Perlit ilavesi, yalıtkan olarak malzemenin ısı özelliklerini iyileştiren gözeneklilik oranını arttırmıştır. Ayrıca numune hazırlama esnasında perlit tabakalar arasında sıkışan suyun kompozitin ısı iletim katsayısını arttırdığı düşünülmektedir. Hacimce eşit oranda 1/3 sıva 1/3 perlit ve 1/3 vermikülit olarak hazırlanmış üç fazlı kompozit 4 saat boyunca yangına karşı test edilmiştir. Kompozit yüzeyinde ölçülen ortalama sıcaklık 98 °C (standart: Tmaksium <180 °C) ve ulaşılan maksimum sıcaklık 105 °C'dir. Üç fazlı kompozit standart tarafından istenen sıcaklıktan yaklaşık % 50 daha düşük bir sıcaklık değerine ulaşarak çok iyi bir yalıtım malzemesi olduğunu göstermiştir [16].

Gao ve ark. (2014), nano ısı yalıtım malzemelerinin çevresel etkilerini incelemişlerdir. Geri dönüştürülebilir ve çevre dostu hammadde kullanılarak çevresel etkiler büyük ölçüde azaltılmaya çalışılmıştır. Nano yalıtım malzemesi olarak silika nano-küreler kullanılmıştır. ısı iletim katsayısı 0.02 W/m.K olarak elde edilmiş ve sonuçlara göre ısı yalıtım malzemesinin diğer numunelere göre yüksek çevresel etkisi olduğu saptanmıştır [17].

Bajraktari ve ark. (2015) doğal havalandırma açıklıklarına sahip çift cephelerin ses yalıtımını incelemiştir. Yaşam kalitesini arttırabilmek için binada havalandırma yapılması gerektiğini ancak gürültü ve hava kirliliği nedeniyle her zaman doğal havalandırmanın mümkün olmadığını belirtmişlerdir. Laboratuvar ortamında örnek

numuneler yapılarak test edilmiştir. Amprik değerler kullanılarak ses yalıtımını tahmin edebilecek bağıntılar elde edilmiştir. Ek olarak ses geçişini tahmin edebilen basit bir analitik model geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre havalandırma boşlukları konumlarının ses yalıtımına önemli etkisi olduğu görülmüştür. Yani açıklıkların doğru yer seçimleri ile doğal havalandırmanın yanında ses yalıtımını da elde edilebileceği öngörülmüştür [18].

Nurzyński (2015), ses ve ısı yalıtımı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çeşitli yapı elemanlarının ısı ve ses davranışları arasındaki farklar gösterilmiştir. Farklı yapılar için elde edilen ölçüm sonuçlarının analizi ses ve ısı yalıtımı arasında basit bir ilişki bulunmuş ve oldukça zor olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte iyi bir ısı yalıtımı sağlanırken yapı elemanının ses yalıtım özelliğinin olumsuz etkilediği belirlenmiştir [19].

Arifuzzaman ve Kim (2014), geliştirilmiş perlit esaslı yalıtım malzemesini geliştirmiş ve mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bağlayıcı olarak sodyum silikat kullanılmıştır. Sodyum silikat; yanmaz, suya karşı dirençli ve nispeten ucuzdur. Geliştirilmiş perlit parçacıkları üç gruba ayrılmıştır ve dört farklı yoğunluk ölçümü yapılmıştır (kütle yoğunluğu, parçacık kaplama yoğunluğu, parçacık iskelet yoğunluğu, malzeme yoğunluğu). Panellerin hazırlanması; sodyum silikatın sulandırılması, kalıplanma, preslenme, kalıptan çıkarılıp kurutulması (sinterleme) aşamalarından oluşmuştur. Basınç dayanımı sıkıştırma basıncı ve bağlayıcı oranına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Sıkıştırma basıncı arttıkça, yoğunluğun arttığı görülmüştür. Ayrıca panelin yoğunluğunun geliştirilmiş perlit boyutuna göre çok hassas olmadığı vurgulanmıştır [20].

Arifuzzaman ve Kim (2015), perlit ve sodyum silikattan yapılmış kompozitin mekanik özelliklerini incelemiştir. Geliştirilmiş perlit boyutlarına göre üç ayrı gruba ayrılmıştır. Bağlayıcı olarak sulandırılmış sodyum silikat kullanılarak elde edilen kompozit köpük yoğunluğu 0,2-0,5 gr/cm³'dir. Geliştirilmiş perlit kırılmandır ve bağlayıcı ile karıştırıldığı zaman hasara uğrar. Bu olumsuz etkiyi telafi etmek için yoğunluk artırılır. Daha büyük partiküllerden yapılan panelde belli bir yoğunluğu elde edebilmek için daha fazla sıkıştırma işleminin gerekli olduğu tespit edilmiştir [21].

Skubic ve ark. (2013), geliştirilmiş perlitten yapılmış yalıtım panellerini sinterleme sıcaklığına göre matematiksel bir model ile simüle etmişlerdir. Daha sonra deneysel sonuçlar ile simülasyondan elde edilen değerler doğrulanmıştır. İlk olarak sodyum silikat ile geliştirilmiş perlit karıştırılmış ardından kalıplanmış ve preslenmiştir. Son olarak mikrodalga fırınında kurutulduktan sonra yüksek sıcaklıkta ısı işlem görmüştür. Isıl işlem görmüş panellerde büzülmeler meydana gelmiştir. Geliştirilmiş perlitin ısı iletim katsayısı 0,045 W/m.K olarak hesaplanmıştır. Sodyum silikat oranı azaldıkça sinterleme (kürleme) sıcaklığının arttığı görülmüştür. Sodyum silikat oranı % 30 olan numunelerin sinterleme sıcaklığı 700 °C olarak saptanmıştır. Geliştirilmiş perlit

esaslı panelin ısı iletim katsayısı 0,0503 W/m.K olarak ölçülmüştür [22].

Skubic ve ark. (2012), geliştirilmiş perlit esaslı yalıtım panellerinin mikrodalga ile kurutulmasını incelemiştir. Konveksiyon prensibine göre yapılan kurutma yöntemlerinde ısı ürünün yüzeyinden merkezine doğru nüfuz eder. Bu yüzden ısı yalıtım özellikleri olan bir maddenin geleneksel yöntemler ile kurutulması oldukça zor ve uzundur. Mikrodalga ürünün içine nüfuz ederek hızlı kurutmayı sağlamaktadır. Ancak kurutmanın son aşamasında ürünün hasar görmemesi için doğru zamanda kurutma işlemi sonlandırılmalıdır. Ek olarak kurutulmuş panelin içindeki sıcaklık dağılımı ve kurutma hızını tahmin etmek için matematiksel model geliştirilmiştir. Matematiksel modelden elde edilen değerler ile deneysel değerler birbiri ile çok yakındır ve kurutmanın bitiş süresi tahmini için kullanılabilir. Mikrodalga kurutmanın geliştirilmiş perlit esaslı yalıtım paneli için uygun bir kurutma yöntemi olduğu tespit edilmiştir. Ancak ürünün içindeki su tamamen uzaklaştırıldıktan sonra kurutma işlemi hemen sonlandırılmalıdır. Kurutma işlemi doğru bir zamanda sonlandırılmazsa ürün sıcaklığının hızlı bir şekilde artacağı ve ürünün hasara uğrayacağı vurgulanmıştır [23].

Bostancıoğlu (2011), binalarda yapılan ekolojik iyileştirmelerin enerji kazancına etkisini incelemiştir. Enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımına bakıldığında bina sektörü sanayi ve ulaşımdan sonra enerji verimliliğinin sağlanabileceği öncelikli alanlardan biri olarak görülmektedir. Binanın inşasından yıkımına dek geçen sürede kullanılan toplam enerjinin %80'i binanın kullanımı sırasında harcanmaktadır. Başta sanayi ve konut sektörleri olmak üzere enerji tüketimi her geçen yıl artmakta; konutlarda kullanılan enerjinin büyük bir kısmı ısıtma ve soğutma amaçlı tüketilmektedir. Konutlarda en etkin enerji tasarrufu; kolay uygulanabilir bir enerji verimlilik teknolojisi olan ısı yalıtımının uygulanmasıyla sağlanabilmektedir. Çalışma kapsamında seçilen bir konut binasının duvarlarına uygulanan farklı yalıtım uygulama alternatiflerinden elde edilen enerji kazancı değerlendirilmiştir. Farklı ekolojik iyileştirme uygulamalarının yıllık enerji maliyetleri hesaplanmış ve yalıtımsız binada meydana gelen enerji tasarrufları belirlenmiştir. Yapılan alan çalışmaları mevcut binalarda TS 825 standardına uygun olarak yapılan yalıtım uygulaması ile yapıların ısıtma enerjisi maliyetlerinde yaklaşık % 60 dolayında bir tasarruf sağlandığını ortaya koymuştur [24].

Sun ve Wang (2015), çimento harcının mekanik ve ısı özelliklerini iyileştirmek için parafin ve geliştirilmiş perlit kullanılmıştır. Çimento, parafin ve geliştirilmiş perlit doğrudan karıştırılmış ve karışımın mekanik ve ısı özellikleri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre parafin kılcal kuvvetle geliştirilmiş perlitin gözenekli yapısına hapsedilmektedir. Parafin/geliştirilmiş perlit içindeki ortalama parafinin kütle oranı % 65'e ulaşmıştır. Çimento harcının basma ve bükülme dayanımları parafin/geliştirilmiş perlitin artmasıyla azalmıştır. Çimento içindeki parafin/geliştirilmiş perlitin optimum oranı

%20 olarak tespit edilmiştir. Bu oranda yapılmış karışımın ısı iletim katsayısı 0,52 W/m.K olarak elde edilmiştir (normal çimentoğunun ısı iletim katsayısı 0,66 W/m.K'dir). Ek olarak parafin ile geliştirilmiş perlitin uyumlu olduğu görülmüştür [25].

Güner (2000), yaptığı çalışmada gürültünün insan sağlığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Giderek artan sanayileşme ve kentleşme sonucunda gürültü önemli bir çevresel kirlilik etkeni haline gelmiştir. Türkiye'de büyük şehirlerin pek çok semtinde yapılan gürültü ölçümlerinde elde edilen değerlerin eşik değerleri geçtiği saptanmıştır. Yine Avrupa'da 13 milyondan fazla insanın 65 dB'in üzerinde çevresel gürültüye maruz kaldığı belirtilmiştir. Gürültü, insanlarda işitme kayıplarının yanı sıra önemli bir stres ajanı olarak psikolojik, nörovegetatif ve kardiyovasküler sistemleri etkileyerek çeşitli hastalıklara yol açmaktadır. Gürültünün insan sağlığını pek çok yönüyle olumsuz etkilediği görülmeye karşın, toplumumuzda halen bir risk olarak algılanmamaktadır. Gürültü ile ilgili mevzuatımızda bulunan gürültü limit değerleri konusunda etkin denetim ve kontrollerin yapılması, yerel yönetimlerin ve işverenlerin bu konudaki sorumluluklarını yerine getirmeleri konusunda ısrarla izlenmesi gürültü kontrolünde etkili olacaktır belirtilmiştir [26].

Topçu ve Işıkdag (2008), yaptıkları çalışmada farklı orandaki çimento tiplerini dikkate alarak genişletilmiş perlit agregası içeren betonun özelliklerini incelenmiştir. Deneylerde belirli oranlarda geliştirilmiş perlitli agrega miktarının artırılmasının betonların basınç ve çekme dayanımı özelliklerini olumsuz olarak etkilediği fakat daha hafif bir malzeme olarak kullanılabilir nitelik kazandığını gözlemlemişlerdir. Çalışmada ayrıca geliştirilmiş perlitli agregaların ısı ve ses yalıtımı özelliği gösterdiği, inşaatlarda ekonomik fayda sağlayan hafif bir malzeme olarak kullanılabilmesi vurgulanmıştır [27].

Anonim (2010), ses yalıtımı ile ilgili 2010 yılında yürürlüğe giren "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" 2011 yılında revize edilmiş ve yönetmeliğin AB uyumlaştırma süreci devam etmektedir. Gürültünün fazla olduğu sanayi bölgelerinde, yoğun trafik alanlarında, eğlence mekânlarında ve konut gibi iç mekânlarda gündüz ve gece müsaade edilen en yüksek ses değerleri yönetmelikle belirlenmiştir [28].

Demirkale ve Aşçıgil (2007), Türkiye'de kentler ve yapıların gürültü açısından sağlıklı olabilmesi için Avrupa Birliği uyum sürecinde yayınlanan ve yürürlüğe giren yönetmelikleri değerlendirmişlerdir. Günlük yaşamda, istenmeyen ses olarak tanımlanan gürültü, insan sağlığını olumsuz etkiler. Gelişmekte olan ülkelerde, sadece işyeri gürültüsü değil, çevre gürültüleri de işitme bozukluğu için risk oluşturmaktadır. 1971'de Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından gürültünün, insan sağlığına karşı ana bir tehdit olarak görülmesi gerektiği bildirilmiştir. WHO'nun yaptığı araştırmalara göre Avrupa nüfusunun % 25'i, 65 dB'den fazla şiddette olan, insan sağlığını olumsuz etkileyecek derecedeki gürültüye maruz kalmaktadır. Türkiyede sorunlu bölgelerdeki yapılarda 29/6/2001 tarihli, 4708 sayılı Yapı Denetim

Hakkında Kanun ve 8/9/2002 tarihli, 24870 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan "Yapı Malzemeleri Yönetmeliği"ndeki (89/106/EEC) esasları sağlamak koşulu ile yalıtım yapılması zorunludur. Çalışmada ilgili yönetmelilerin çok geniş kapsamlı olduğu önemli olan bu yönetmeliklerin ilgili bütün paydaşlar tarafından doğru ve tam olarak uygulanması gerektiği vurgulanmıştır [29].

He (2005), ısı iletim katsayısını hızlı bir şekilde ölçmek için sıcak plaka metodunu geliştirmiştir. Sıcak plaka tekniğinde geçici bir düzlem kaynak kullanılarak iletim katsayısı ölçülmektedir. Bu metodun avantajları; geniş ölçüm aralığı (0,005 - 500 W/m.K), katı ve sıvıların ısı iletim katsayılarının ölçme kabiliyeti, numunelerin kolay hazırlanabilmesi, numuneyi bozmaması ve hassasiyetinin yüksek olmasıdır. Sıcak plaka sensörü çift spiral ince nikel telden (10 µm) oluşmaktadır. Sıcak plaka metodu ve diğer geçici kaynak tekniklerinde ısı kaynağı olarak ince bir metal tel şerit ya da bir metal plaka kullanılır. Metal plaka veya metal tel şerit, elektrik yalıtımı için iki ince poliamid film arasında tutulur. Ölçüm sırasında, sıcak plaka iki numune parçası arasında sıkıştırılır ve sensöre sabit bir akım verilir. Ek olarak sensör sıcaklık gözlemi yapar, böylece sensörde sıcaklık artışı hassas bir şekilde ölçülür. Bu sıcaklık artışı sensörün etrafındaki malzemenin ısı özelliklerine bağlıdır. Deneyi başlattıktan kısa bir süre için bu sıcaklık artışını izleyerek sensörün çevresindeki malzemenin ısı iletim katsayısı ölçülür. Doğru düzeltmelerle sıcak plaka tekniği geniş bir yelpazedeki malzemelerin ısı iletim katsayısını ve ısı yayılım katsayısını için hızlı ve doğru ölçüm sağlayan bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Bu teknik, yüksek doğrulukla geniş bir aralıkta ısı iletim katsayısını 2,5-5 saniye içerisinde ölçülebilmektedir. Sıcak disk tekniği malzeme incelemesi ve seçimi için değerli bir araç olduğu belirtilmiştir [30].

Jannot ve ark. (2009), düşük yoğunluklu ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayılarını ölçmek için metod geliştirmişlerdir. Palslı yöntemle dayanarak üç katmanlı (pirinç plaka/numune/pirinç plaka) bir ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Ölçüm cihazında silindirik numune iki pirinç plaka arasında yerleştirilmiştir. İki adet K tipi termokupl pirinç plakaların iç yüzeyine kaynatılmıştır. Alt plaka aynı çapta ve yalıtılmış olan başka bir dairesel plaka ile ısıtılmıştır. Üstteki pirinç plakanın üzeri açıktır ve çevresiyle olan ısı transferi doğal taşınım ve ışıyım yoluyla gerçekleşmektedir. Isıtılan plakaya bir kaç saniyelik ısı akısı verilip pirinç plakaların sıcaklıkları kaydedilmektedir. Bu veriler kullanılarak ısı iletim katsayısı elde edilebilmektedir. Ölçüm metodu atmosferik basınçta ve vakum altında yapılan deneysel ölçümlerde uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Ayrıca çok düşük ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin ($k < 0,15 \text{ W/m.K}$) ölçümünde % 5'den daha iyi bir hassasiyetle sahip olduğu ve ısı yayılım katsayısı hassasiyetinin malzemenin yoğunluğuna bağlı olduğu vurgulanmıştır [31].

S. Schiavoni, F.D'Alessandro, F.Bianchi, F.Asdrubali (2016), inşaat sektörü için yalıtım malzemelerinin ısı özelliklerini, akustik özelliklerini, ateş tepki ve su buharı direnci tepkilerini çevre sorunlarını da dikkate alarak bir

değerlendirme yapmışlardır. Üç kargir duvar ve bir ahşap duvarda farklı tipteki yalıtım malzemeleri ve farklı montaj türleri (dış, iç ya da boşluk yalıtımı) ile yalıtılmış 10 cm'lik bir yalıtım malzemesi tabakası göz önüne alınarak hem ısı geçirgenlik ve hem de dinamik ısı özellikleri için bir vaka çalışması yapılmıştır. Vaka çalışmasında kullanılan malzemeleri arasında, en iyi performans gösterenlerin poliizosiyanürat (k-değeri 0,022 W/m.K civarında), poliüretan (k-değeri 0,025 W/m.K civarında), kenaf (0.030 W/m.K civarında k-değer), geri dönüşümlü cam elyaf (k-değeri 0,031 W/m.K civarında), XPS (k-değeri 0,034 W/m.K) ve taş yünü (k-değeri 0,040 W/m.K eşit) olduğu belirlenmiştir. En yoğun malzemeler mineralize ağaç lifleri (533 kg/m³), geri dönüştürülmüş kauçuk (en fazla 930 kg/m³) ve hafif genişletilmiş kil agrega (en fazla 750 kg/m³), olduğu tespit edilmiştir. En yüksek özgül ısıya sahip malzemeler ağaç lifleri (2,1 kJ / kg K), mineralize ağaç lifleri (1,8 kJ / kgK), kenevir (1,7 kJ / kgK), kenaf (1,7 kJ / kgK), koyun yünü (1,8 kJ / kgK) ve XPS'dir (1,7 kJ / kgK). Mineral yünler, hafif genişletilmiş kil agrega, vermikülit ve perlit gibi genişletilmiş mineraller ve vakum yalıtım panelleri yangına karşı en iyi reaksiyona sahip malzemelerdir. Çalışmada poliüretan ve poliizosiyanüratın organik malzemeler arasında yangın direnci açısından B Euroclass sınıfında olduğu ancak bazı araştırmalarda bu malzemelerin yangın şartlarında zararlı gazlar açığa çıkardığı vurgulanmıştır [32].

zamanda yerel kaynaklardan üretilmiş yerli malzemelerin geliştirilebileceği öngörülmüştür.

3. YALITIM MALZEMELERİNİN ISI VE SES ÖZELLİKLERİ, ÖNEMLİ KRİTERLER VE STANDARTLAR (HEAT AND SOUND PROPERTIES OF INSULATING MATERIALS, IMPORTANT CRITERIA AND STANDARDS)

3.1. Isıl Özellikler (Thermal Properties)

Bir yalıtım malzemesinin ısı performansını ifade eden ana parametreler kararlı durumda ısı iletim katsayısı (k) ve kararsız durum için ısı yayılım katsayısı D' dir. Isı iletim katsayısı 1 m kalınlığındaki homojen bir malzemenin sıcaklık gradyanının (farkının) 1 K olduğunda birim alanından geçen ısı akışıdır; birimi W/m.K'dir.

Isı yayılım katsayısı, ısı iletim katsayısı yani ısı enerjisi iletim kabiliyeti k ve malzemenin ısı enerjisi depolayabilme kabiliyetini ifade eden yoğunluk ρ ve özgül ısı kapasitesi c_p 'nin çarpımı arasındaki orandır. Bu nedenle ısı yayılım katsayısı, ortamdaki ısı dalgalarının yayılımını açıklar. Birimi m²/s'dir ve malzemenin kendine has özelliklerinden oluşan türetilen bir niceliktir. Yukarıda belirtilen büyüklükler bir dizi yöntem ile ölçülebilir veya değerlendirilebilir. Çizelge 1'de en çok kullanılan uluslararası standartların bir listesini görülmektedir.

Çizelge 1. Isı iletim katsayısı, ısı geçirgenlik ve ısı yayılım katsayısı değerlendirilmesi için yöntemlerin listesi (List of methods for the evaluation of thermal conductivity, transmittance and diffusivity)

Değişken	S.I. ölçüm birimi	Standart	Not
Isı iletim katsayısı, k	W/m.K	EN 12664 [33]	Düşük ısı direnç
		EN 12667 [34]	Yüksek ısı direnç
		EN 12939 [35]	Kalın malzemeler
		ASTM C518 [36]	Isı akış ölçer cihazı
		ASTM C177 [37]	Güvenlikli sıcak plaka aparatı
		ISO 8990 [38]	Sıcak kutu yöntemi
Yoğunluk	kg/m ³	EN 1602 [39]	-
		ASTM C303 [40]	-
Özgül ısı kapasitesi	J/kgK	ISO 11357 [41]	-
		ASTM E1269 [42]	-
Isı yayılım katsayısı	m ² /s	ISO 22007-1 [43]	Genel ilkeler
		ISO 22007-2 [44]	Sıcak disk metodu
		ISO 22007-3 [45]	Sıcaklık dalga analizi yöntemi
		ISO 22007-4 [46]	Lazer flaş yöntemi

Yapılan literatür çalışmalarının genel bir değerlendirmesi yapıldığında, çevreci ve uygun bağlayıcılar kullanılarak gerekli işlemler yapıldığında farklı maddelerden elde edilen kompozit yalıtım malzemeleri üretilebilmektedir. Bu yalıtım malzemelerinin ısı ve akustik yalıtım performansını makul enerji tüketimi, yeterli konfor ve sağlık koşullarını sağlayarak sürdürülebilir nitelikte ve ekolojik aynı

Bir çok katlı duvar için, ısı özellikleri ısı transfer katsayısı [47] ya da U-değeri ile ifade edilmiştir. Bir kompleks bileşen veya homojen olmayan bir malzemenin sıcaklık gradyanının (farkının) 1 K olduğunda birim alanı boyunca geçen ısı akışı olarak ifade edilir. Birimi W/m².K'dir. Isı direnç veya R değeri (m²/K.W) ısı geçirgenlik katsayısının aritmetik olarak tersidir. Ayrıca ısı transfer katsayısı hesaplanırken yalıtım malzemesinin

kalınlığı ile konveksiyon ve radyasyonla ısı transferinin her ikisi de dikkate alınır.

3.1.1. Isı yalıtım malzemelerinde aranan genel özellikler (General characteristics of thermal insulation materials)

Sadece ısıl iletkenlik değerine bakılarak seçilen bir ısı yalıtım malzemesiyle istenilen sonuçlara ulaşmak neredeyse imkânsızdır. Yapıdaki nem ve yoğunlaşma problemleri sebebiyle ısı yalıtım malzemesinin başka özelliklere de sahip olması gereklidir. Isı yalıtım malzemesi seçerken ısıl performansla birlikte dayanıklılık, maliyet, basınç dayanımı, su buharı emilimi ve iletimi, yangına karşı direnci, uygulama kolaylığı ve ısıl iletkenlik da dâhil olmak üzere birçok parametre göz önüne alınmalıdır. Çizelge 2’de ısı yalıtım

inde hala havanın bulunması nedeniyle ısı yalıtım malzemesi için genellikle faydalıdır.

Hava kaynaklı ses yalıtımında olduğu gibibu özellik, malzeme kütlesine güçlü bir şekilde bağlıdır. Hafif malzemeler genellikle zayıf ses yalıtım malzemeleridir. Büyük bir yapının ses yalıtımı ağırlıklı olarak duvar veya beton gibi en ağır bileşenlerin performansına bağlıdır. Bir çift duvar söz konusu olduğunda ise arada ses emici malzemenin varlığı boşluk rezonanslarını sınırlamaya ve sonuç olarak duvarın ses yalıtımını arttırmaya izin verir. Ses yalıtım malzemeleri akustik konfor ve konuşma anlama üzerinde olumlu etkisi ile odaların yankılanma süresini azaltmak için kullanılır.

Yankılanma süresinin en uygun değerler oda içinde yapılacak faaliyetlere ve hacmine göre tanımlanır.

Çizelge 2. Isı yalıtım malzemelerinde aranan genel özellikler (General properties of heat insulation materials) [48,49,50,51]

Fiziksel işlevsellik	Dayanıklılık	Ekolojik Açıdan Uygunluk	Uygulama Kolaylığı	Ekonomiklik
Yüksek ısı tutuculuk	Su ve neme dayanıklılık	Çevre ve ekosistem açısından zararsızlık	Kolay işlenebilirlik	Ucuzluk ve kolay temin edilebilirlik
Düşük birim ağırlık	Kimyasal etmenlere dayanıklılık	Sağlık açısından zararsızlık	Üzerine uygun katmanların uygulanmasına olanaklılık	
Koşullara uygun buhar geçirimsizliği	Biyolojik etkilere dayanıklılık	Az enerji tüketimi	Sıva tutuculuk	
Yeterli basınç dayanımı	Yüksek sıcaklığa dayanıklılık-yangın emniyeti	Bakım gerektirmezlik ve kullanım sonrası değerlendirilebilirlik		
Yeterli çekme dayanımı	İnsan sağlığına ve çevreye zararlı olmaması	Kokusuzluk		
Boyutsal kararlılık	Yanmazlık ve alev geçirmezlik (yangın sınıfı)			
Isıl iletkenlik; düşük ısı iletim katsayısı	Sıcaklık dayanımı			
Yüksek ısıl direnç	Çürümezlik			
Uygun yoğunluk	Uzun ömürlülük			
	Parazitlere dayanıklılık			
	Buhar difüzyon direnci			
	Mekanik dayanım			

malzemelerinin sahip olmaları gereken özellikler listelenmiştir [48,49].

3.2. Akustik Özellikler (Acoustical Properties)

Akustik bakış açısına göre inşaat malzemeleri ses iletimini karşılaştırma ve çarpan ses dalgalarını yutma kabiliyetleri açısından karakterize edilebilir. İlk durumda hava kaynaklı ve yapısal (darbe) ses yalıtım özellikleri dikkate alınır. Diğer taraftan ses yutumu, sürtünme veya ısı kaybı (gözenekli malzemeler) veya rezonans olayı (delikli ve membran emiciler) nedeniyle bir malzemenin içinde dağılan akustik enerjinin bir bölümü olarak tanımlanır. Gözenekli ses yutucular genellikle iyi ısı yalıtım malzemeleri iken tam tersi her zaman doğru değildir. Ses yutucu malzemeler içinde hareketli havayı bulundurması gerekir. Bu nedenle açık gözeneklilik esastır. Bunun tam tersine kapalı gözeneklilik boşlukların

Katlarda ses yalıtımı söz konusu olduğunda ise, darbe sesi yalıtımı dikkate alınmalıdır. Yani yapı zemini boyunca darbe seslerinin (ayak, düşen nesnelere, vb) iletimini karşılaştırma yeteneği.

Bu durumda iyi bir performans elde etme yolları aşağıdaki gibidir:

- Rahatsız edici gürültünün olduğu alt odaya asma tavan yapmak,
- Rahatsız edici gürültünün olduğu üst odanın döşemesine vinil (sentetik kumaş) veya halı gibi bir esnek tabaka koymak,
- Üst odada yüzer bir döşeme oluşturmak (yapısal levha tarafından esnek bir tabaka ile ayrılmış zemin).

Akustik yalıtım gerçek boyutlu veya küçük numuneleri için hava kaynaklı ve darbe sesi için değerlendirilebilir; ilk durumda ölçümler laboratuvarında veya yerinde

Çizelge 3. Ses yalıtımının değerlendirilmesi ile ilgili yöntemlerin listesi (List of methods for the assessment of sound insulation)

Değişken	Ölçüm birimi	Standart	Not
Ağırlıklı ses azaltma indeksi, R_w	dB	ISO 717-1 [52]	Tek sayı, çinlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune
Görünür ağırlıklı ses azaltma indeksi, R'_w	dB	ISO 717-1 [52]	Tek sayı, yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Ses Azaltma İndeksi, R	dB	ISO 10140 [53] EN 12354-1 [54]	Çinlama odası, gerçek boyutlu numune Tahmin
Görünür ses azaltma indeksi, R'	dB	ISO 16283-1 [55]	Yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Ses iletim kaybı, TL	dB	Standart'ı bulunmamaktadır.	Empedans tüpü, küçük numuneler
Ağırlıklı darbe sesi yalıtım iyileşmesi, ΔL_w	dB	ISO 717-2 [56] EN 12354-2 [57]	Tek sayı, çinlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune Tahmin
Darbe sesi yalıtım iyileşmesi, ΔL	dB	ISO 10140 [53]	Çinlama odası, gerçek boyutlu numune
Ağırlıklı standartlaştırılmış darbe ses basınç seviyesi, $L_{n,w}$	dB	ISO 717-2 [56]	Tek sayı, çinlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune
Standartlaştırılmış darbe ses basınç seviyesi, L_n	dB	ISO 10140 [53] EN 12354-2 [57]	Çinlama odası, gerçek boyutlu örnek Tahmin
Ağırlıklı görünür standartlaştırılmış darbe ses basıncı seviyesi, $L'_{n,w}$	dB	ISO 717-2 [56]	Tek sayı, yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Görünür standartlaştırılmış darbe ses basıncı seviyesi, L'_n	dB	ISO 16283-2 [58]	Yerinde, gerçek boyutlu numune
Dinamik sertlik	MN/m ³	ISO 9052-1 [59]	Laboratuvar, küçük numuneler

gerçekleştirilebilir. Darbe ses yalıtımı ile ilgili olarak, yüzer bir döşemenin ses yalıtım performansının tahmini, küçük boyutlu numuneler (0,04 m²) üzerinde yapılan dinamik sertlik ölçümlerinin sonuçlarını kullanarak yapılabilir.

Malzemelerin ses yutumu performansı bir dizi yolla ölçülebilir. En yaygın olanı bir çinlama odasında dağınık ses alanında veya bir empedans tüpünde bir düzlem dalga alanında yapılan ölçümlerdir. Çizelge 3'de ses yalıtımının değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin bir listesi gösterilmiştir.

Çizelge 4 'de ses yutumu özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin listesi görülmektedir. Listedeki tüm parametreler boyutsuz büyüklüklerdir.

3.2.1. Akustik performansa etki eden temel malzeme özellikleri (Basic material properties affecting acoustic performance)

Aşağıdaki çizelge 5'de akustik performans parametreleri olan ses yutumu ve ses iletim kaybına etki eden temel malzeme özellikler görülmektedir.

4. YALITIM MALZEMELERİ VE SINIFLANDIRILMASI

(INSULATING MATERIALS AND CLASSIFICATION)

Bu bölümde ısı ve ses yalıtımında kullanılan malzemeler sınıflandırılarak ısı ve ses yalıtımı için bu malzemelerde bulunması gereken özellikler hakkında bilgi verilecektir.

4.1. Geleneksel Malzemeler (Traditional Materials)

4.1.1. Taş yünü (Stone wool)

Taş yünü inorganik hammaddeler olan dolomit, bazalt ve diyabaz gibi birkaç çeşit taşların 1400 °C - 1600 °C sıcaklıkta eritilip elyaf haline getirilmesi sonucu üretilen bir ısı ve ses yalıtım malzemesidir. Daha sonra genellikle reçineler, yiyecek cinsi nişasta ve sıvı yağlar gibi bağlayıcılar kullanılarak birbirine bağlanıp lifleri elde edilir [67,68].

Fiziksel Özellikleri: Yoğunlukları 20-200 kg/m³ arasında değişmektedir. Isı iletim katsayıları ise 0,033-0,040 W/m.K arasında değişmektedir. Özgül ısısı ise 0,8-1,0 kJ/kgK arasında değişmektedir. Taş yünü yanmaz olmasına karşın bağlayıcı bakalit, kaplama malzemesi olan mukavva ve bitümlü karton gibi malzemelerin

Çizelge 4. Ses yutum özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin listesi (List of methods for the assessment of sound absorption)

Değişken	Standart	Not
Ses yutum katsayısı, α	ISO 354 [60]	Çınlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum katsayısı, α	ASTM C423-09a [61]	Çınlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum katsayısı, α	ISO 10534-2 [62]	Empedans tüpü, küçük numuneler
Gürültü azaltma katsayısı, NRC	ASTM C423-09a [61]	Tek sayı, çınlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum ortalaması, SAA	ASTM C423-09a [61]	Tek sayı, çınlama odası, gerçek boyutlu numune

Çizelge 5. Akustik performansa etki eden temel malzeme özellikleri (Basic material properties affecting acoustic performance) [63,64,65,66].

Makro yapı özellikleri [63,64]	Mekanik özellikler	Gözenekli yapı içerisindeki hava özellikleri [65]	Malzemenin fiziksel özellikleri [66]
Hava Akış direnci Gözeneklilik Kıvrımlılık Termal Karakteristik uzunluk Vizkoz karakteristik uzunluk	Kayıp faktörü, Kayma modülü, Young modülü Poisson Oranı	Havanın yoğunluğu, Gözenek içerisindeki sesin hızı, Havanın viskozitesi, Özgül ısı oranı Prandtl sayısı Hava akışı hızı	Uygun birim ağırlık Malzeme yoğunluğu Kalınlık Boyutsal kararlılık

etkisiyle sıcaklık dayanımı azalır. 250 °C'den fazla sıcaklıklar karşısında deforme olur.

Basınç, çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna göre değişmekle birlikte liflerin her yönde dağılması sebebiyle cam yününe göre daha yüksektir. Isıl değişiklikler etkisiyle boyutsal değişikliğe uğramamaktadır [49].

Buhar geçirgenlik direnci 1,1-1,4 ile neredeyse cam yününe eşdeğerdir. İçeriğindeki hava boşluklarının gerek buhar yoğunlaşması gerekse doğrudan su etkisiyle ıslanması gerekmektedir. Aksi takdirde taş yünü malzemesinin ısı yalıtım performansı su buharı yoğunlaşmasından olumsuz etkilenerek ısı iletkenlik özelliği artacak ve bakalet çözümlerle malzeme bünyesi bozulmaya başlayacaktır [49].

Kimyasal olarak cam yününe göre daha dayanıksızdır. Bileşiminde kalsiyum varsa sert asitlerden kolayca etkilenir kükürt varsa metaller üzerinde korozyona sebep olabilir. Higroskopik değildir ve çürümektedir. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında, A1 (yanmaz) ve A2 (zor yanıcı) olabilirler [49].

Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve yoğunlukta değişik kaplama malzemeleri ile panel, keçe, rulo, şilte, levha, boru ve dökme şeklinde üretilmekte ve ticarileştirilmektedir. Sıcağa ve rutubete maruz kalması halinde dahi boyutlarında bir değişim olmaz. Taş yünü iyi bir ses emici kabul edilebilir ve genellikle boşluk yalıtımı için kullanılır. Ayrıca genel olarak yanmaz özelliğe sahip olduğundan cephe kaplamalarının arkasında ısı ve ses yalıtımı amacıyla, havalandırılmalı cephelerde yangın güvenliği amacı ile kullanılır [68]. Ekolojik Özellikleri cam yünü malzeme özellikleriyle benzer özellikler gösterirler.

Taş yünü malzemeleri üreticiler tarafından geri dönüştürülebilir veya katı atık sahasında yok edilebilir [69].

4.1.2. Cam yünü (Glass wool)

Cam yünü 1300-1450 °C'de doğal silis kumu ve cam (genellikle geri dönüşümlü) karıştırılarak üretilen bir ısı ve ses yalıtımı malzemesidir. Liflere dönüşümü santrifüjleme ve üfleme işlemleri sayesinde gerçekleşir. Daha sonra toz önleyici yağ ve fenolik reçinelerin ilavesi ile lifler bağlanır [32,67].

Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve yoğunlukta değişik kaplama ve katkı malzemesi ile şilte, levha, boru ve dökme şeklinde üretilmektedir. Günümüzde özel sistemlerle yerinde sprey olarak da uygulanabilmektedirler [68].

Fiziksel Özellikler: Yoğunlukları 10-120 kg/m³ arasında değişmektedir. Isı iletim katsayısı 0,040 W/m.K'dır. Bina uygulaması için kullanılan cam yünü malzemelerinin ısı yalıtım performansı yüksek sıcaklık ve nem koşullarından etkilenmemektedir. Cam lifleri yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında A1 (yanmaz) ve A2 (zor yanıcı) olabilirler. Buna karşın bağlayıcı bakalet sebebiyle 250°C'den fazla sıcaklıklar karşısında deforme olur [49,70].

Basınç, çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna göre değişmekle birlikte liflerin yüzeye paralel olarak yer alması sebebiyle genel olarak düşüktür. Dış kuvvetlerin etkisiyle kolayca boyutsal değişikliğe uğrayabilmektedir. Bununla birlikte 8 ila 11 MN/m³ arasında dinamik sertliğe sahip

camyününden yapılmış yenilikçi ürünler piyasada bulunmaktadır [32].

Buhar geçirgenlik direnci 1,2 ile neredeyse havaya eşdeğerdir. İçeriğindeki hava boşluklarının gerek buhar yoğunlaşması gerekse doğrudan su etkisiyle ıslanmaması gerekmektedir. Aksi takdirde ısı iletkenlik özelliği artacak ve bakalit çözülerek malzeme bünyesi bozulmaya başlayacaktır. Kimyasal olarak nötr olup hidroflorik asit dışında asitlerden etkilenmemektedir. Higroskopik değildir ve çürümektedir [49].

Ekolojik Özellikler: Hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda eritilmesi söz konusu olduğundan orta derecede enerji kullanımı söz konusudur. Cam lifi üretimine bağlı olarak oluşan toz ve partiküller etrafa saçılarak deri, gırtlak ve göğüs rahatsızlıkları yaratabilmektedir. Her ne kadar Alman ve Kanada hükümeti tarafından kanserojen etkisi olmadığı açıklanmış olsa da özellikle imalat sektöründe çalışan 30 yıllık işçilerin % 25'inde akciğer kanseri gözlenmektedir. Buna sebep olan cam yünü liflerinin, malzeme bünyesinden kopması ve iç ortam havasına karışması söz konusu olabileceğinden kullanıcıların etkilenmemesi açısından önlemler alınmalıdır. Cam üretimine bağlı olarak sülfür ve nitrojen oksidasyonundan asit yağmuru oluşturabilecek salınımlar gerçekleşmektedir. Kalker ve silis çıkarmaya bağlı olarak yerel toprak kalitesine olumsuz etkileri olabilir. Biyolojik olarak parçalanmaz, zamanla bozulmaz, çürümez, küf tutmaz, korozyon ve paslanma yapmaz, böcekler ve mikroorganizmalar tarafından tahrip edilemez. Geri dönüştürülebilmesi konusunda hava kalitesine olumsuz etkileri olabileceğinden sağlıklı olacağı düşünülmektedir. Ancak günümüzde geri dönüştürülerek büyük oranda zemin dolgusu vb. alanlarda yeniden kullanılabilirler [68,69].

4.1.3. Mineral yün (Mineral wool)

Mineral yün cam yünü (cam elyafı) ve taş yünü içerir, normal olarak paspas ve pano olarak üretilir ancak dolgu malzemesi olarak da üretilmektedir. Hafif ve yumuşak mineral yün ürünleri ahşap iskeletli evler ve diğer boşlukları olan yapılarda uygulanır. Ağır ve sert mineral yün panolar yüksek kütle yoğunlukları ile ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılır. Taşıyıcı yükler için, dairelerde veya çatılarda kullanımı uygundur. Mineral yün aynı zamanda çeşitli boşlukları ve alanları doldurmak için dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Mineral yünün ısı iletim katsayısı değerleri 30 ve 40 mW/m.K arasında bulunmaktadır. Mineral yünün ısı iletim katsayısı sıcaklık, nem içeriği ve kütle yoğunluğu ile değişir. Bir örnek olarak mineral yününün ısı iletim katsayısı sırasıyla % 0 hacimden % 10 hacme artan nem içeriği ile 37 mW/m.K'den 55 mW/m.K'e artabilir. Mineral yün ürünleri delikli olabilir ve ayrıca ısıl direnç kaybı olmaksızın inşaat alanında kesilebilir ve boyutlandırılabilir [5].

4.1.4. Genleştirilmiş polistiren (Expanded polystyrene-EPS)

EPS katı köpük halinde termoplastik, kapalı gözenekli, tipik olarak beyaz renkli bir ısı yalıtım malzemesidir. EPS genellikle polistiren tanelerine ilave edilen pentanın

buharlaştırılmasıyla elde edilir. EPS kapalı gözeneklilik ve düşük yoğunluk nedeniyle önemli bir akustik özellik göstermez [67, 68].

Fiziksel Özellikler: Polistiren'in ısı iletim katsayısı 0,031 ila 0,037 W/m.K arasındaki, yoğunluğu 15 ila 75 kg/m³ arasında ve özgül ısısı yaklaşık 1,25 kJ/kgK'dir. Malzeme kolay yanıcı olduğundan ve yanarken tehlikeli gazlar açığa çıkardığından imalat sürecinde genellikle bir yangın geciktirici ilave edilir. 80°C' den fazla sıcaklıklar karşısında yanarak özelliğini yitirir. Basınç (0,012-0,062 N/mm²), çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna, hücre şekillerine ve dizilimlerine göre değişmekle birlikte düşük yoğunluğuna rağmen yüksektir. Dış kuvvetlerin etkisiyle boyutsal değişikliğe uğramamaktadır. Belirli bir kullanım süresi sonunda içeriğindeki hapsolmuş gazın havayla etkileşimi halinde ısı yalıtım özelliğini yitirebilir. Buhar geçirgenlik direnci 15-100 ile oldukça geçirimsizdir. Kapiler ve higroskopik olmadığından bünyesine su almaz ve buna bağlı olarak ısı yalıtım özelliğini yitirmez. Bununla birlikte bazı araştırmalar EPS'nin ısı iletim katsayısının nemden etkilendiğini ortaya koymuştur. Kuru EPS malzemesini 4 saat süreyle bağıl nem oranı % 90 olan bir iklim odasında tutarak, ısı iletim katsayısında % 1,4 ile % 2,1 arasında bir artış tespit edilmiştir [49, 71].

Kimyasal olarak çeşitli çözücülere dayanıksızdır ve güneş ışınlarından etkilenir. Biyolojik etkilere dayanıklıdır ve çürümektedir. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında, B1 (zor alevlenici) ve B2 (normal alevlenici) olabilirler [49].

Ekolojik Özellikler: Hammadde olarak petrokimyasallar, dolayısıyla yağ ve gaz kullanılması sebebiyle üretimde oldukça yüksek enerji kullanımına neden olurlar. Dünyadaki yağ tüketiminin % 4'ü plastik üretimi için kullanılmakta olup dünyadaki yağ rezervleri sadece 40 yıl daha kullanılabileceği öngörülmüştür. Petrokimyasal üretime bağlı olarak partikül, yağ, fenol ve ağır metaller gibi atıklar oluşmakta bu da dünya üzerindeki toksik emisyonların yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Petrokimyasal rafinerileri sülfür ve nitrojen oksidasyonundan asit yağmuru oluşturabilecek salınımların ve hidrokarbonlar gibi fotokimyasal aşındırıcıların açığa çıkmasında büyük rol sahibidirler. İşlenmemiş yağ çıkarımı ve nakliyesi yerel anlamda olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Yangın halinde, karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂) dumanı ve buharı oluşturarak sağlık açısından büyük tehditler oluşturabilmektedirler [69].

Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve yoğunlukta kalıp olarak üretilebilmektedir. Genellikle yalıtım performanslarını kaybetmeden değişik kenar ve yüzey şekillerinde kolayca işlenip kesilebilir levha ve paneller halinde kullanılabilir. Bu tür malzemelerin geri dönüşüm süreci uzmanlaşmış endüstriler tarafından gerçekleştirilmektedir.

4.1.5. Ekstrüde polistiren (Extruded polystyrene-XPS)

XPS, bir şişirme maddesi ilavesi ile polistiren tanelerinin bir ekstrüzyon presine eritilerek levha haline getirilmesi suretiyle üretilmektedir. XPS, EPS'ye benzer yalıtım özelliklerine sahiptir, ancak daha az nemi (% 2-4'e karşı

% 0,3) emer ve nem ısı iletim katsayısı değerlerini olumsuz olarak etkiler [32,72].

Fiziksel Özellikler: Yoğunlukları 25-50 kg/m³, özgül ısısı 1,3 -1,7 kJ/kg.K, ısı iletim katsayıları ise 0,028-0,036 W/m.K arasında değişmektedir. XPS, EPS'ye benzer yangına karşı tepki özelliklerine sahiptir. Basınç (0,20-0,70 N/mm²), çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna, hücre şekillerine ve dizilimlerine göre değişmekle birlikte, geliştirilmiş polistirene kıyasla daha yüksektir. Dış kuvvetlerin etkisiyle boyutsal değişikliğe uğramaktadır. Belirli bir kullanım süresi sonunda içeriğindeki hapsolmuş gazın havayla etkileşimi halinde ısı yalıtım özelliğini yitirebilir. Buhar geçirgenlik direnci 80-220 ile neredeyse geçirimsizdir. Üretim tekniği dolayısıyla kapalı gözenekli olup Kapiler ve higroskopik olmadığından bünyesine su almayan bir ısı yalıtım malzemesidir. Kimyasal olarak çeşitli çözücülere dayanıksızdır ve güneş ışınlarından etkilenir. Biyolojik etkilere dayanıklıdır ve çürümemektedir. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında B1 (zor alevlenici) ve B2 (normal alevlenici) olabilirler [49].

Ekolojik Özellikler: Genleştirilmiş polistiren malzeme özellikleriyle benzer özellikler gösterir. Genleştirilmiş polistirende pentan yerine genellikle hidro floro karbon (HFC) ve karbon dioksit (CO₂) gazı kullanılır. HFC'ler CO₂'ye göre küresel ısınmaya sebep oluş bakımından 3200 kat daha etkilidir [69].

Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve yoğunlukta değişik kenar ve yüzey şekillerinde levha olarak üretilmektedir. Endüstride sandviç çatı ve cephe panellerinde, frigorik kamyon kasalarında, soğuk hava depolarında, acil durum barakalarında, şantiye ve askeri amaçlı korunma ünitelerinde, doğrama sistemlerinin camsız bölümlerinde, ısı yalıtımlı sandviç ara bölme duvarlarında, besi çiftliklerinde kullanılabilir [68].

4.1.6. Fenolik köpük (Phenolic foam)

Fenolformaldehit bakalitine şişirici ve sertleştirici maddelerin katılmasıyla elde edilen organik bir malzemedir. Fenol köpüğü levhaları; muhtelif yoğunluklarda, sert fakat kırılğan, küçük gözenekli ve yüzeyi sürtünmeyle tozlaşan bir yapıya sahiptir. Açık ve kapalı hücre yapısında olabilirler [49, 68].

Fenolik köpük fiziksel özellikleri; düşük ısı iletim katsayısı değerleri 0,018-0,032 W/m.K ve diğer plastik köpüklerden (80-160 kg/m³'e kadar) daha yüksek yoğunluk ile karakterize edilirler. Özgül ısısı yaklaşık 1,3-1,4 kJ/kgK'dir. Zor alev alıp yangın halinde duman ve zehirli gaz oluşumu çok azdır. 150 °C'den fazla sıcaklıklar karşısında deforme olarak özelliğini yitirir. Basınç, çekme ve kopma dayanımı açık ve kapalı gözenekli olması durumuna göre değişiklik göstermektedir. İçeriğindeki freon gazı sayesinde ısı yalıtım değerini zamana bağlı olarak yitirmez. Buhar geçirgenlik direnci 3-40'dir (levha ve yerinde köpük oluşuna göre değişiklik gösterir). Açık gözenekli olanlar kapilerdir ve nem etkisiyle özelliklerini yitirebilmektedir. Kimyasal olarak potasyum ve yoğun asitlere dayanıksızdır. Güneş ışınlarından

etkilenir. Biyolojik etkilere dayanıklıdır ve çürümemektedir. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında B1 (zor alevlenici) olmak üzere plastik yalıtım malzemeleri arasında en yüksek yangın dayanımı gösteren malzemelerdir [32, 49].

Ekolojik Özellikler: Diğer plastik yalıtım malzemelerin özellikleriyle benzer özellikler gösterirler. Yapı ömrü boyunca kullanılacak kadar dayanıklılıkları yüksektir. İçeriğindeki bulunan fenol oldukça toksik bir malzemedir. Fenolik köpük uygulamaları sırasında çalışanların kimyasal bileşenlerin buharına maruz kalma riskleri olduğundan önlemler alınması gereklidir [69].

4.1.7. Poliüretan (Polyurethane-PUR)

PUR, poliöl ve izosiyanürat denen iki kimyasal malzemenin karıştırılarak hava yardımıyla köpürüp sertleşmesiyle elde edilir. Levha, sandviç panel ve boru kesitleri olarak üretilerek veya inşaat alanında püskürtme yöntemiyle ve köpük olarak genişletilerek kullanılan bir ısı yalıtım malzemesidir [49,68].

Fiziksel Özellikler: Isı iletim katsayısı 0,021 ila 0,040 W/m.K, yoğunluk 15 ila 45 kg/m³ arasında değişir ve özgül ısı 1,3 ila 1,45 kJ/kgK arasında değişir. Kolayca alev alıp yangın halinde yoğun duman oluşumuna sebep olabilir, bu nedenle özel katkı maddelerinin kullanılmasını gerektirir. 120 °C'den fazla sıcaklıklar karşısında deforme olarak özelliğini yitirir. Basınç (0,10-0,90 N/mm²), çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna, hücre şekillerine ve dizilimlerine göre değişmekle birlikte, yüksektir. Dış kuvvetlerin etkisiyle boyutsal değişikliğe uğramaktadır. Ancak tek taraflı ısıtılması sonucu deformasyona uğrar, bu nedenle levha halinde üretildiğinde iki yüzeyinin de kaplanması gerekir. Buhar geçirgenlik direnci levha halinde üretilenlerde 40-50, yerinde püskürtülenlerde 3-8'dir. Kapiler ve higroskopik olmadığından bünyesine su almaz ve buna bağlı olarak ısı yalıtım özelliğini yitirmez. Kimyasal olarak hafif asitlere, alkalilere ve deniz suyuna karşı dayanıklıdır. Güneş ışınlarından etkilenir. Biyolojik etkilere dayanıklıdır ve çürümemektedir. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında B1 (zor alevlenici) ve B2 (normal alevlenici) olabilirler [32,49].

Ekolojik Özellikler: Rijit poliüretan köpük üretiminde halen, ozon tabakasına zararı yüksek olan (kloro floro karbon) CFC kullanılmaktadır. Kurulum işçilerinin yerinde köpük uygulamalar sırasında, uçucu poliizosiyanata maruz kalması sonucunda nefes darlığı ve çeşitli alerjik reaksiyonlar geçirme olasılığı vardır. Yangın sırasında hidrojen siyanür gazı açığa çıkarması nedeniyle 1989 yılında mobilya yapımında kullanımı yasaklanmış olmasına rağmen yapıda kullanımı serbesttir. Formaldehit yüzdesi oldukça yüksek olması sebebiyle sağlık açısından büyük tehditler oluşturabilmektedir. Termoset bir plastik olduğundan geri dönüştürülemez, yeniden şekil verilemez ve yeniden kullanılamaz [69].

4.1.8. Poliizosiyanürat (Polyisocyanurate-PIR)

PIR, poliüretana benzer bir kimyasal reaksiyon ile oluşturulur ancak bir poliestere türevi poliöl ve daha yüksek

oranda metilen difenil diizosiyanat kullanılır. PIR malzemeler PUR olanlara göre daha yüksek bir yangın dayanımı ile karakterize edilir (B sınıfı, E sınıfı poliüretan yalıtıktan daha iyi) PIR malzemeler köpük pilastikler arasında en iyi yangın dayanımı olanlardır. Polyisocyanurate PUR yalıtkan ile karşılaştırıldığında 0,018 ve 0,027 W/m.K arasında daha düşük bir ısı iletim katsayısı ile tanımlanırlar ve yoğunluk (15-45 kg/m³) ve özgül ısı (yaklaşık 1,4 kJ/kgK) değerleri benzerdir. Bu yalıtım malzemesinin geri dönüşümü uzman sanayi kuruluşları tarafından yapılmalıdır [32,73,74].

4.1.9. Selüloz (Cellulose)

Selüloz haşarat, yangın ve çürümeye karşı direncini arttırmak için geri dönüştürülmüş kâğıtlar, ağaç lifleri ve bazı kimyasal kompozitlerin bir öğütücüde karıştırılıp birleştirilmesi ile üretilmektedir. Panel ve paspas olarak üretilebile duvar boşluklarına üflenebilen gevşek bir malzeme olarak daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Selüloz 0,037 ile 0,042W/m.K arasında bir ısı iletim katsayısı, 30 ve 80 kg/m³ arasında bir yoğunluk ve özgül ısı 1,3 ve 1,6 kJ/kgK arasında değişmektedir [32,75].

Gözeneklilik ve akış direnç değerleri ses yutumu ve boşluk yalıtımı için yeterli olup ısı ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla kullanılabilir. Ayrıca esnek bir malzeme olarak selüloz panellerin yüzer döşemelerde akustik yalıtım amaçlı kullanımı uygundur. Bu malzemeler yalıtım özelliklerinde istenmeyen azalmaları engellemek için üfleme işleminden sonra sıkıştırılmış olmamalıdır. Bu malzemeler geri dönüştürülebilir fakat bor tuzlarının içeriğinden dolayı gübreleştirme amaçlarına uygun değildir.

4.1.10. Mantar (Cork)

Meşe mantarı ağacı kabuklarının öğütülerek yüksek sıcaklıklarda fırınlanmasıyla elde edilir. Bazı ağaç türlerinden elde edilen mantar granülleri yüksek sıcaklık ve basınç etkisi altında kendi reçineleri ile birbirlerine bağlanırlar (aglomere mantar). Bazı türler için de çeşitli katkı maddeleri ve bağlayıcılar kullanmak gerekebilir (emprenye mantar). Açık hücreli yapıdadırlar.

Meşe mantarı ağacı malzemeleri ısı ve akustik performansları nedeniyle inşaat sektöründe yüzer şap ve ahşap döşemelerin altında, yumuşak ve esnek olmasından ötürü çatılarda özellikle ısı ve ses yalıtımının birlikte çözülmesi beklenen durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [49]. Mantar tanelerinden yapılmış malzemeler de darbe sesi yalıtımı, hava ile yayılan sesin yalıtımı ve ses yutumu için iyi akustik özelliklere sahiptirler [76].

Bu malzemelerin ısı iletim katsayısı 0,037 ila 0,050 W/m.K arasında, yoğunluğu 110 ila 170 kg/m³ arasında, özgül ısı ise 1,5 ila 1,7 kJ/kgK arasındadır [77,78].

Bu malzemeler paneller, şeritler halinde üretilebilirler. Katkısız veya sıva katkılı olarak kullanılabilir ve kolaylıkla geri dönüştürülebilir. Zor yanan bir malzeme olmasına karşın alev alınca sonuna kadar yanmaktadır. 130°C'den fazla sıcaklıklar karşısında deforme olur. Buhar geçirgenlik dirençleri 5-10'dur. Basınç (0,10-0,20 N/mm²), çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna göre

değişmekle birlikte, darbesel etkilere dayanımları yüksektir. Higroskopiktirler ama bünyelerine su almazlar. Kimyasal olarak halojenlere, amonyağa ve eter yağlarına dayanıksızdır. Organik oluşları sebebiyle biyolojik etkilere açıktır ve çürüyebilirler. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında B2 sınıfı normal alevlenicidirler. Bu nedenle katkı maddeleriyle bu özellikleri iyileştirilmeli ve detaylandırmada çeşitli önlemlerin alınması gerekir [49].

Ekolojik Özellikler: Mantar malzemeler toksik veya kanserojen etkileri olmayan doğal ürünlerdir. Hammadde kaynak kullanımını olarak tamamen yenilenebilir malzemelerdir ancak dış kabuğu zarar görürse ağaç enfekte olabilir. Üreticiler tarafından verilen bilgilere göre üretim ve işleme enerjileri bakımından bir miktar enerji kullanımı söz konusudur. Genellikle Portekiz, İspanya, Cezayir ve Korsika'da yetiştirilebilen bir meşe ağacı türünden elde edilebildiği için nakliye enerjileri yüksek olabilmektedir [69].

4.1.11. Ağaç lifleri (Wood fibers)

Sürdürülebilir ormancılıktan, kereste fabrikası atıklarından ve orman bakım çalışmalarından elde edilen ağaç yalıtım amaçlı ahşap lif üretiminde kullanılabilir. Bir bağlayıcı eklenebilir; alternatif olarak ahşap lignin (odun özü) alüminyum sülfat kullanılarak aktif hale getirilebilir. Eklenen katkı maddesi böcek ilacı ve anti-güve gibi davranır [79]. Bu malzemelerin ısı iletim katsayısı 0,038 den 0,050 W/m.K'e yoğunluğu 50 den 270 kg/m³'e ve özgül ısı 1,9 dan 2,1 kJ/kgK arasında değişir. Isı iletim katsayısı sıcaklık ve nem içeriği değerlerinin artması ile artar [80]. Ağaç liflerinden yapılmış dirençli malzemeler 30 ve 50 MN/m³ arasında dinamik sertlik ile karakterize edilir. Ağaç lifleri kolaylıkla geri dönüştürülebilir.

4.1.12. Mineralize ağaç lifleri (Mineralized wood fibers)

Bu malzemeler kavak, köknar (veya diğer hızlı büyüyen bitkiler) ya da kereste endüstrisinin artıklarından türetilen ağaç malzemelere bir mineralizasyon işlemi uygulanarak elde edilmiştir. Yapılan işlemler ateş, kemirgenler ve böceklerle karşı liflerin direncini artırır. Ağır paneller oluşturmak için bağlayıcı madde olarak kaliteli çimento kullanılmaktadır (Yoğunluk 320 ila 600 kg/m³). Isı iletim katsayısı 0,060 ve 0,107 W/m.K arasında ve özgül ısıları 1,8 ve 2,1 kJ/KgK arasında değişmektedir. Akustik yalıtım özellikleri ile ilgili olarak 58 dB ağırlıklı ses azaltma indeksine sahip mineralize ağaç lifleri kullanan sistemler vardır. Bu malzemeler, beton agregaları gibi geri dönüştürülebilir [32].

4.1.13. Hafif Genleştirilmiş Kil Agregası (Lightweight expanded clay aggregate)

Hafif genişletilmiş kil agregası yüksek sıcaklıklarda kil genişletme işlemleri kullanılarak üretilmiş hücreli bir malzemedir [81]. Granüllü malzeme serbest veya sıva ile karıştırılarak kullanılabilir. Ayrıca hafif beton üretimi için de kullanılır [82]. Bu malzemelerin ısı iletim katsayısı oldukça yüksektir (0,08-0,20 W/m.K), ancak yüksek yoğunlukta (290-750 kg/m³) düşük ısı yayılım katsayısı

seviyelerinin elde edilebilir. Hafif genişletilmiş kil agrega'nın özgül ısısı 0,9 ila 1,0 kJ/kgK arasında değişmektedir [32]. Hafif genişletilmiş kil agrega geniş bir frekans aralığında ses emici olarak etkin bir şekilde kullanılabilir [83]. Hafif genişletilmiş kil agrega beton veya dolgu alanları atığı için agrega olarak geri dönüştürülebilir.

4.1.14. Genleştirilmiş Vermikülit (Expanded vermiculite)

Vermikülit, volkanik mağma kaynaklarından elde edilen bir mineraldir. Yüksek ısı (800-1100 °C) altında işlenerek hacmi genişler, geçirgenliği artar ve hacim ağırlığı belirgin bir şekilde düşerek şekil değiştirir. Elde edilen ürün çok hafif, temiz, kokusuz ve sterildir [68].

Tuğla ve hafif betonlarda bağayıcı olmadan (tane boyutu 0,1-15 mm) veya bir bağayıcı madde ile karıştırılarak kullanılabilir ve ısı yalıtım performansı uzun bir süre için sabittir [84,85,86]. Çoğu mineral malzeme gibi kemirgenler ve böcekler tarafından hasar görmez. Genleştirilmiş vermicülit'in ısı iletim katsayısı 0,062 ila 0,090 W/m.K arasındadır. Bağayıcı ile karıştırıldığında 0,080 ve 0,100 W/m.K arasındadır. Serbet (sıkıştırılmamış) malzemenin yoğunluğu 85 ve 105 kg/m³ arasında ve özgül ısısı 0,8 ve 1 kJ/kgK arasındadır [32]. Diğer granüllü malzemelerde olduğu gibi gözenekli ortamda iyi akustik performans doğru tane boylarını seçerek, doğru bağayıcı yoğunluğunu ve kalınlıklarını kullanarak elde edilebilir [86].

Malzeme ekolojik olarak inorganiktir ve 20 yıl boyunca yapısı bozulmaz. Çok yüksek su tutma kapasitesine sahiptir. Ekstra hafif ağırlıktır. Yüksek havalanma kapasitesine sahiptir. Absorbe edilen sıvıları yavaşça serbest bırakma özelliği yanında düşük ısı geçirgenliği ile yüksek ısı yalıtım özelliğine sahiptir [68]. Genleştirilmiş vermicülit zararsız olup ısıtıldığında tehlikeli gazlar açığa çıkartmadığından güvenli bir şekilde kullanılabilir. Kullanım ömrünün sonunda yeniden kullanılabilir veya beton için agrega olarak geri dönüştürülebilir [87-89].

4.1.15. Genleştirilmiş Perlit (Expanded perlite-GP)

Sülfatlı organik tortul bir taş olan perlitin 900-1100 °C'de şok ısı ile genleştirilmesiyle elde edilir. Karma (açık ve kapalı) hücreli yapıdadır. Perlit bünyesinde % 2 – % 6 oranında su bulunduran volkanik bir kayadır; genellikle gri veya koyu gri renktedir. Perlitin kimyasal yapısının yaklaşık % 75'ini silika (SiO₂) ve % 15'ini alüminyum oksit (Al₂O₃) oluşturmaktadır. Volkanik bir taş olan perlitin hacmi 850 – 1100 °C arasında ısıtıldığında yapısında bulundurduğu suyun ve sıcaklığın etkisiyle 5 ila 25 kat arasında artmaktadır [68].

Genleşmiş perlit fiziksel Özellikleri: yoğunluğu 80 ve 150 kg/m³, ısı iletim katsayısı 0,040 ve 0,052 W/m.K, özgül ısısı 0,9 ve 1,0 kJ/kgK arasındadır. Genleştirilmiş perlit diğer mineral malzemelerle karşılaştırıldığında en düşük ısı iletim katsayısı ile tanımlanır. Genleştirilmiş perlit ile yapılmış paneller yüksek yoğunluğa (150 - 280 kg/m³) sahiptir ancak ısı yalıtım özellikleri ayırdır. İyi

bir ses yutucu olarak ses yutma katsayısı hafif genişletilmiş kil agrega ve genişletilmiş vermicülit gibi diğer granüllü malzemelere benzerdir [86,90].

Yanmaz ve yangın halinde alev geçirmez, toksik değildir. 1000°C'ye kadar özelliklerini yitirmeden kullanılabilir. Basınç (0,15-1,00 N/mm²), çekme ve kopma yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik gösterir. Buhar geçirgenlik direnci 1,8'dir. Katkı maddesi içermiyorsa kapiler bir malzemedir, buna bağlı olarak ısı yalıtım özelliğini yitirebilir. Kimyasal olarak nötr olduğundan asitler ve bazlardan etkilenmez. Güneş ışınlarından etkilenmez. Biyolojik etkilere dayanıklıdır ve çürümektedir [52].

Ekolojik Özellikler: Hammadde olarak perlit filizi çıkarımına bağlı toprak kalitesine ve zemin suyuna olumsuz etkiler yaratabilir. Yeniden kullanılabilir, alçı ve çimento sıva katkısı olarak kullanılmak üzere geri dönüştürülebilir [69]. Gevşek dolgu yalıtım malzemesi olarak veya sıva, kompozit panel, tuğla ve beton gibi çeşitli malzemelerin bünyesine serbest bir bağayıcı madde ile karıştırılarak kullanılabilir [68].

4.2. Alternatif Malzemeler (Alternative materials)

4.2.1. Kenevir (Hemp)

Kenevir hint keneviri'dan üretilen genellikle polyester elyaf ve yangın geciktiricilerle karıştırılmış bina uygulamaları için kullanılan bir tekstil lifidir. Kenevirin ısı iletim katsayısı 0,038 ila 0,060 W/m.K arasında yoğunluğu 20 ila 90 kg/m³ arasında ve özgül ısısı 1,6 ila 1,7 kJ/kg K arasındadır. Kenevir esaslı malzemeler her doğal materyal gibi havadan büyük miktarda su emme eğilimi gösterirler ve bunun sonucunda ısı iletim katsayıları artar [32, 91]. Zach ve ark. çeşitli hidrofobik katkı maddeleri ile yapılan uygulamaların etkilerini test ettiler. Bu malzemelerin nem artışı % 31-34 oranında içerebileceklerini tespit ettiler [92]. Kymäläinen ve ark. tarafından gerçekleştirilen karşılaştırmalı pazar ve performans analizi çalışmasında kenevir lifi malzemesi öncelikle daha uzun bir kullanım süresine olanak tanıyan biyolojik bozunabilirlik, düşük ısı iletim katsayısı ve bazı ekolojik özellikleri nedeniyle ısı yalıtım malzemesi olarak potansiyelini kanıtlamıştır [91]. Bununla birlikte, bu malzemelerin nem, kemirgenler, böcekler ve serbest suya karşı korunması gerekir. Korjenic ve ark kenevir lifleri (% 64 ve % 48), mıcır (sırasıyla % 16 ve % 32) ve bir bağayıcı kullanılarak elde ettikleri numuneleri test etmişlerdir. Yoğunluğu 82 kg/m³ olan malzeme için ölçülen en düşük ısı iletim katsayısı değeri 0,039 W/m.K bulunmuştur [93]. Kenevir mıcırı, bağayıcı ve su karıştırılarak oluşturulan yenilikçi bir materyal Glé ve ark. tarafından geliştirilmiş ve çalışılmıştır. Çalışmada ısı iletim katsayısı yaklaşık 0,060 W/m.K ve 150 Hz üzerinde en iyi performans gösteren karışım için ses yutma katsayısı yaklaşık 0,5 olarak elde edilmiştir [94]. Kenevir verimli toprağa ihtiyacı yoktur, gübrelemeye gerek duymaz, hızlı büyür ve kolay işlenebilir [68]. Atık kenevir esaslı malzemeler geri dönüştürülebilir veya atık toplama alanlarında imha edilebilir.

4.2.2. Kenaf (Kenaf)

Kenaf lifleri 2 yıl içinde yüksekliği 3,5 m ulaşabilen hızla büyüyen bir bitki olan *Hibiscus cannabinus*'dan elde edilir. Lifler genellikle polyester ve yangın geciktirici ile karıştırılır. Kenaf'ın protein içermemesi kemirgenler veya böcekler için cazip olamamasını sağlar. Isı iletim katsayısı 0,034 ve 0,043 W/m.K arasında yoğunluğu 30 ve 180 kg/m³ arasında özgül ısıları 1,6 ila 1,7 kJ/kgK arasındadır. Bazı kenaf esaslı malzemelerin akustik yutum katsayısı 500 Hz'den daha yüksek frekanslar için 0,2'nin üzerinde ve 1000 Hz'den daha yüksek frekanslar için 0,4'ün üzerindedir. Ayrıca dinamik sertlik 27,7 MN/m³ kadar düşük olabilir [32]. Xu ve diğerleri bağlayıcı olmadan üretilmiş yenilikçi bir kenaf panelin ısı yalıtım ve akustik yutum özelliklerini test etmişlerdir. Bu panellerin ısı iletim katsayısı yoğunluğuna bağlı olup 0.040 W/m.K'den (100 kg/m³'e eşit yoğunlukta) 0,060 W/m.K'e (250 kg/m³) kadar değişir [95]. Ses yutum katsayısı geleneksel malzemeler için gözlenen değerlere benzerdir. Daha hafif malzemeler daha iyi bir akustik yutum performansı ile karakterize edilebilir [96].

4.2.3. Keten (Flax)

Keten lifleri, M.Ö. 5000'den beri Mısırlılardan günümüze kadar kullanılan bir bitki olan (*linum usitatissimum*) ketenden üretilmektedir. Keten bitkisi yaklaşık %70 selüloz içerir. Keten lifleri havayı muhafaza ederek iyi yalıtım özellikleri gösterir. Liflerin elastikiyeti ayrıca darbe ses yalıtımları olarak kullanılmasını sağlar. Keten panellerin ve ruloların yoğunluğu 20 ile 100 kg/m³ arasında, ısı iletim katsayısı 0,038 ile 0,075 W/m.K arasında ve özgül ısı kapasitesi 1,4 ile 1,6 kJ/kgK arasındadır. Keten lifleri genellikle mekanik direnci arttırmak için polyester ile, ateş ve güve direncini arttırmak için bor tuzları gibi katkı maddeleri ile karıştırılır [91]. El Hacja ve ark. çekilmiş keten (kısa lifler) ve bazı keten ürünlerinden oluşan yenilikçi bir malzemenin ısı ve akustik performansını değerlendirmiştir. Test edilen malzeme sentetik bağlayıcı içermeyip 0,060W/m.K'lik bir ısı iletim katsayısına ve yaklaşık 170 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. Bu yeni malzemenin akustik özellikleri 2 mm kalınlığındaki bir panel için 500 Hz'den yüksek frekanslarda test edilmiş ve ses yutum katsayısı 0,4'den yüksek olduğu belirlenmiştir [97]. Keten ve kenevir, yüksek performanslı ısı yalıtım malzemesi üretmek için birlikte karıştırılabilir. En iyi performans gösteren karışım malzemesinin ısı iletim katsayısı 0,033 W/m.K'dir [98]. Keten lifi, mıcır ve sentetik bir bağlayıcıdan yapılmış 32 kg/m³'lük yoğun bir numune üzerinde yapılan ölçümler 0,043 W/m.K'lik bir ısı iletim katsayısı ve 2,9 su buharlı direnç faktörünü göstermiştir [93]. Keten yetiştirilmesi kolaydır ve gübreleme yada arındırma işlemine gerek duymadan herhangi bir toprakta yetiştirilip işlenebilir [68]. Ketende polyester elyaf kullanılmadığında atık ürünleri tekrar kullanılabilir, geri dönüştürülebilir ve gübre üretimi için de kullanılabilir [32].

4.2.4. Koyun yünü (Sheep wool)

Kullanılmamış ve geri dönüşümlü yünler bina yalıtım malzemelerinin üretimi için kullanılmaktadır. Lifler

polyester ile karıştırılabilir veya bir polipropilen ızgaraya sabitlenebilir [87]. Malzeme genellikle rulolar halinde satılır ve elastikiyeti yüzer döşemelerde esnek malzeme olarak kullanılmasını sağlar (Dinamik sertlik yaklaşık 5 MN/m³). Koyun yünü malzemelerin yoğunluğu 10 ve 25 kg/m³ arasında, ısı iletim katsayısı 0,038 ve 0,054 W/m.K arasında ve özgül ısıları 1,3 ila 1,7 kJ/kg.K arasında değişmektedir. Bu yüzden koyun yünü malzemelerin kışın ısı yalıtımı için yararlı olsa bile yaz şartlarında kararsız durumlar için performansı oldukça kötüdür. Ballagh bu malzemelerin ses yutum katsayısı ilgili yaptığı çalışmada 75 mm kalınlıkta bir numune için 500 Hz üzerindeki frekanslarda ses yutum katsayısını 0,8 ve daha yüksek değerler olarak ölçmüştür [99]. Zach ve diğerleri değişik kalınlık ve yoğunluktaki birkaç örnek üzerinde koyun yünü malzemelerinin ısı, akustik ve hidrotermal performansını değerlendirmiştir. Beklendiği gibi nem içeriği ne kadar yüksek olursa ısı iletim katsayısı da o kadar yüksek olur (0,036 dan 0,081'e W/m.K). Test edilen koyun yünü numunelerinde yüksek higroskopisite değerleri elde edilmiştir (% 35 kadar) [100]. Yünün yüksek higroskopisiteye sahip olması bu malzeme için en uygun nem düzenleyici yapar. Koyun yünü bina uygulamasında kullanmadan önce yangın geciktirici anti-güve ve parazit öldürücü ile takviye edilmelidir. Atık koyun yünü malzemeleri tekrar kullanılabilir, pilastığın yünden ayrılması durumunda geri dönüştürülebilir, çöp sahasında stoklanabilir veya organik gübre üretimi için kullanılabilir [32].

4.2.5. Hindistan cevizi lifi (Coir fiber)

Lifler hindistan cevizinin orta kabuğundan elde edilir. Lifler (Her hindistan cevizinin lifi, yaklaşık 80 g), çürüyebilen organik bileşenlerden ayırmak için işlenir. Bu malzeme hindistancevizi endüstrisinin bir yan ürünü olup genellikle ısınma ve gübreleme amacıyla kullanılır. Hindistan cevizi başta Hindistan, Endonezya ve Sri Lanka'da yetiştirilir. Bu nedenle ulaşım bu ürünlerin çevresel etkilerini etkileyen ana faktördür. Bununla birlikte, hindistan cevizi lifi düşük miktarda enerji ve sentetik malzemeler kullanılarak yan ürünlerden üretilmektedir. Lifler yüksek mekanik direnç sahiptir. Ayrıca böcek ve kemirgen çekmeyen, çürümeye dayanıklı anti bakteriyel bir malzemedir. Yangın dayanımını arttırmak için yanma geciktiriciler eklenir [32, 87]. Bu malzemenin ısı özelliklerini değerlendirmek için bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk girişimlerden biri Manohar tarafından yapılmıştır. Yoğunluğu 40 ila 90 kg/m³ arasında değişen Hindistan cevizi lif numunesinin ısı iletim katsayısı 15,6 °C de ve 21,8 °C de değerlendirilmiştir. En iyi performans gösteren malzeme için k değeri 24 °C 'de 0.049 W/m.K olarak belirlenmiştir [101]. Bu ısı iletkenlik değeri aynı yazar tarafından yapılan bir sonraki çalışmalarda ölçümlere ile doğrulanmıştır [102]. Diğer çalışmalar daha yoğun (250-350 kg/m³) Hindistan cevizi tabanlı bağlayıcısız suntalar dikkate alınarak yapılmış ve daha az yoğun numunenin ısı iletim katsayısı 0,046 W/m.K olmuştur [103]. Isı ve ses yalıtımı amacıyla Hindistan cevizi lifi kullanılan paneller ve üretilen rulolar piyasada mevcuttur.

Hindistan cevizi lifinden yapılan paneller ve ruloların ısı iletim katsayısı 0,040 ve 0,050 W/m.K arasında, yoğunluğu 50 ila 160 kg/m³ ve özgül ısı 1,3 ve 1,7 kJ/kgK arasındadır. Bazı ticari ürünlerin dinamik sertlik değeri yaklaşık 15 MN/m³'dir. Hindistan cevizi lifleri atık malzeme olarak geri dönüşütürülebilir, yeniden kullanılabilir ve gübre üretimi için kullanılabilir [32]. Genelde ses yalıtımı için çok nadir olarak da ısı yalıtımı için kullanılır. Ancak yakın geçmişte özellikle ziftli çatılar için hindistan cevizi hasırı geliştirilmiştir [68].

4.2.6. Geri dönüşütürülmüş kauçuk (Recycled rubber)

Geri dönüşümlü kauçuk, özellikle darbe sesi yalıtımı için binalarda kullanılabilir. Yoğunluk genellikle 500 ila 930 kg/m³ ve dinamik sertlik 15 ve 60 MN/m³ arasındadır. Kalınlık arttıkça dinamik sertlik azalır [32]. Ömrünü doldurmuş lastiklerin çokluğu, yeni kullanım alanlarını bulmayı amaçlayan araştırmalara neden olmuştur. Lastik ömrünün sonunda üretilen yanık malzemeler test edilmiştir. Yapılan çalışmada en iyi performans 61 MN/m³ dinamik sertlik ve ağırlıklı ölçülen iyileşmiş darbe sesi yalıtım değeri 26 dB olarak elde edilmiştir [104,105]. Geri dönüşümlü kauçuk kullanılan malzemelerin ısı iletim katsayıları 0,100 ve 0,140 W/m.K arasında değişmektedir. Benkreira H., ve ark. atık elastomerik artıklardan yapılan numunelerin ısı ve akustik performansı değerlendirilmiştir. Açık gözeneklilik ile karakterize edilen malzemeler en iyi akustik yutum özelliklerine (500 Hz üzerindeki frekanslar için akustik yutum katsayısı 0,5'den daha yüksektir) ayrıca yüksek ısı iletim katsayısı değerine (1 W/m.K) sahiptir. Kapalı gözenekli bir yapıya sahip numunelerin ısı iletim katsayısı 0,034 W/m.K gibi düşük bir değer göstermekle birlikte bu malzemeler akustik yalıtım için etkisizdirler [106]. Genellikle geri dönüşütürülmüş kauçuk esaslı malzemelerin ses absorpsiyon katsayısı tane büyüklüğü, bağlayıcı türü ve miktarı, sıkıştırma oranı ve kalınlığa bağlıdır [107]. Ayrıca geri dönüşütürülmüş kauçuk esaslı atık malzemeler geri dönüşütürülebilir.

4.2.7. Hint keneviri lifi (Jute fiber)

Bitki hint keneviri lifi olarak üretilmekte olup ağırlıklı olarak Hindistan'da ve Bangladeş'te yetiştirilmektedir. Taşınması malzemenin kullanılmasını önemli oranda etkiler. Bununla birlikte liflerin elastikiyeti, en yaygın kullanım alanı olan yüzer döşemelerde esnek malzemeler olarak kullanılmaya uygundur. % 85-90 hint keneviri lifleri, polietilen lifleri ve sodadan yapılmış bir yalıtım malzemesi 2,35 kJ/kgK'lik yüksek bir özgül ısı değeri ve 35-40 kg/m³ arasında düşük yoğunluklu değerlerine sahiptir. Bu durum dinamik ısı yalıtım performansı üzerindeki ilk parametrenin olumlu etkilerini olumsuz olarak dengelemektedir [32, 87]. Hint keneviri esaslı ticari malzemelerin ısı iletim katsayısı 0,038 ve 0,055 W/m.K arasındadır. Dinamik sertlik ise kenevir tabakalarına benzerdir [108]. Ayrıca Korjenic ve ark. hint keneviri lifi, talaş parçacıkları ve bir sentetik bağlayıcılardan yapılmış bir numune için ısı iletim katsayısını 0,046 W/m.K olarak ölçmüşlerdir.

Yoğunluğu 26 kg/m³ ve su buharı difüzyon direnç faktörünü 2 olarak bulmuşlardır [93].

4.2.8. Karton esaslı paneller (Cardboard based panels)

Yapılan çalışmalarda genel olarak düşük maliyetli bir ambalajlama için kullanılan karton panellerin ısı, akustik ve çevresel performansı hem deneysel hem de sayısal olarak değerlendirilmiştir. Karton paneller farklı boyalarda standardize edilmiş, ortası oluklu olarak birbirine yapıştırılmış iki yüzeyden oluşan levhaların farklı sayıda üst üste getirilmesi ile hazırlanırlar. Olukların yüksekliğini panellerin hava boşlukları boyutu belirler. Bu da malzemenin ısı özelliklerini etkileyebilir. İki tip oluk analiz edilmiştir: C ve E oluklar sırasıyla 4,1 ve 1,9 mm kalınlığındadır. E-oluk panellerin genel performansı kötüdür. Bu panellerin ısı iletim katsayısı korunaklı sıcak plaka cihazı ile ölçüldü ve sonuçlar sırasıyla C ve E-oluk örnekleri için 0,053 ve 0,058 W/m.K bulunmuştur. Hava oluklar içinde sıkıştırdığından ve açık gözenek bulunmadığından karton paneller çok iyi bir ses emici değildirlir. Bu malzeme gözenekli bir malzemedir ziyade membran emiciye benzemektedir ve akustik performans açısından membran emiciden daha iyidir. Bununla birlikte karton panelin kalınlığı arttıkça daha iyi ses yalıtımı özellikleri gösterirler. Çünkü yüksek yoğunluk nedeniyle E-oluklu paneller 900 ve 1600 Hz arasındaki C-oluk olanlara göre ses yalıtımı daha iyidir. Ses iletim kaybı C-oluklu panellerde yaklaşık 30 dB olmasına karşılık E-oluk panellerde 60 dB'lik ses iletim kaybı değerleri ölçülmüştür [109].

4.3. Gelişmiş Malzemeler (Advanced Materials)

Son zamanlarda, araştırmacılar ve üreticiler tarafından çok düşük ısı iletim katsayısı değerleri elde etmek amacıyla ağırlığı ve kalınlığı azaltılmış birçok yenilikçi malzemeler ve sistemler geliştirilmiştir. Bu malzemelerin örnekleri vakum yalıtım panelleri, gaz dolgu paneller ve aerogellerdir. Bu sistemlerin maliyeti, belirsiz hizmet ömrü, zayıf mekanik dayanımı ve esnek olmaması gibi bazı sorunları nedeniyle mevcut uygulamalarda yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır [32].

4.3.1. Vakum yalıtım paneli (Vacuum insulation panels-VIP)

VIP etrafına gaz giderici, nem giderici ve matlaştırıcı monte edilmiş çok katmanlı bir kaplama ile ötümlü bir çekirdek malzeme vasıtasıyla oluşturulmaktadır. Panelin içinde oluşturulan vakum ısı direnci artırır. Çekirdek, düşük ısı iletim katsayısına sahip gözenekli bir malzemedir yapılır. Malzeme küçük gözenekler (çapı yaklaşık 10 nm), açık hücre yapısı, yeterli sıkıştırma direnci ve kızılötesi radyasyon geçirimsizliği ile karakterize edilmiş olmalıdır [110]. Genellikle isli silika VIP çekirdeği için en sık kullanılan malzeme olup, bazı açık hücreli köpükler (poliüretan ve geliştirilmiş polistiren), tozlar (silika aerogeller, geliştirilmiş perlit ve bunların karışımları) ve ayrıca cam elyafı (yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun) kullanılabilir [111]. Kaplama tasarımı en önemli VIP konularından biridir. Çünkü çekirdek içindeki vakumu korumak ve ısı köprüsü

etkilerini sınırlamak için iyi mekanik mukavemete sahip olması talep edilmektedir. Ayrıca kaplama kullanım ömrünü ve VIP panelin küresel yalıtım performansını derinlemesine etkiler [110]. Kaplama için genellikle metal folyolar, metalize filmler ve polimer filmler kullanılır. Polimer filmler, kısa ömürlü olması nedeniyle neredeyse hiç kullanılmamaktadır. 5 mm kalınlıkta bir VIP panel 60 ile 160 yıl arasında bir kullanım ömrüne, 0,004 W/m.K den daha düşük bir ısı iletim katsayısı değerlerine ulaşabilir [110]. Yapılacak çalışmalar ve teknolojik gelişmeler VIP'lerin gerçek hayat performansını optimize etmek için gereklidir. Özellikle paneller delinmeye çok açıktır. Çünkü VIP bulunan bir duvara çakılan basit bir çivi ısı iletim katsayısını önemli ölçüde azaltabilir ve inşaat sırasında şantiyede kesilip boyutlandırılmaz. Ayrıca VIP'ler neredeyse tamamen su geçirmezdir ve bu durum yoğuşma sorunlarına neden olabilir.

4.3.2. Gaz dolgulu paneller (Gas filled panels-GFP)

Gaz dolgulu paneller [112,113] dış ortamdan mümkün olduğunca daha az geçirgen olan kaplama ile izole edilmiş bir gaz içeren yansıtıcı bir yapıdan (bölme) yapılmıştır. Gaz hava olabilir ancak ısı iletim katsayısı daha düşük olan gazlar tercih edilir. Panel içine doldurulan gaz maliyet, çevresel etki, toksisite, yangın direnci ve çiy noktası sıcaklığı dikkate alınarak seçilir. Baetens ve ark. sırasıyla hava ve argon ile dolu GFP'nin iki prototipini üretmiş ve test etmişlerdir. İki sistem arasında ısı iletim katsayısı hava doldurulmuş paneli için 0,046 W/m.K ve argon dolu diğeri için 0,040 W/m.K olmuştur. Ancak asal gaz kullanımı 45 mm'lik bir panelin maliyetini ikiye katlamıştır [112]. Farklı çalışmalarda daha iyi ısı yalıtımı performansı gözlemlenmiştir. Griffith ve ark. 44,5 mm'lik kripton dolu bir panel için 0,012 W/m.K'lik bir ısı iletim katsayısı değeri ölçmüşlerdir [113]. Numunenin kalınlığı panelin maliyetini ve ısı iletim katsayısını etkiler. GFP ne kadar kalın olursa, gaz miktarı ve maliyet ne kadar yüksekse, ısı iletim katsayısı o kadar düşük olur.

4.3.3. Aerojel (Aerogel)

Aerojel çapı 2 ila 50 nm arasında değişen gözeneklere sahip yüksek açık gözeneklilik ile karakterize edilen katı bir köpüktür. Genellikle süper kritik sıcaklıkta silika içeren bir jel kurutularak üretilirler [114]. Silis aerojelin gözenekliliği % 85 ve % 99,8 arasındadır [115]. Baetens ve ark. monolitik (tek parçalı) bir malzemenin ısı iletim katsayısının 0,0131 ile 0,0136 W/m.K arasında düşük değerlerle değiştiğini rapor etmişlerdir [116]. Çok yüksek gözeneklilik 3 kg/m³ gibi düşük bir yoğunluğa neden olabilir. Ancak bina uygulamaları için aerogellerin yoğunluğu genellikle 70-150 kg/m³'tür. Granül aerojelin ısı iletim katsayısı yüksek değerler göstermektedir. Bununla birlikte Neugebauer ve ark tarafından yapılan çalışma bu malzemelerin ısı iletim katsayısının sıkıştırma işlemi ile azaltılabileceğini göstermiştir. Sıcak tel yöntemi ile ölçülen ısı iletim katsayısı yoğunluğu 88 kg/m³ olan bir numune için 0,024 W/m.K'den, yoğunluğu 150 kg/m³ olan diğeri için 0,013 W/m.K'e düşer

[117]. Granül aerojel çift camlı pencerelerin boşluğu içinde görünür geçirgenliğini aşırı etkilemeden U-değerini düşürmek için kullanılabilir [118,119]. Ricciardi ve ark. 7 cm kalınlığında çok tabakalı bir silika aerojel numunesi için ses azaltma indeksi 60 dB olarak ölçülmüştür. Sonuçlar literatürdeki araştırma sonuçlarıyla tam uyuşmasa da bu malzemenin akustik potansiyelini teyit etmektedir [119]. Yeni aerojelli malzemeler ısı yalıtımını artırmak ve onların üretim ve kullanımı kolaylaştırmak amacıyla test edilip ve geliştirilmektedir. Geliştirilmiş olan yenilikçi bir malzeme 0,015 W/m.K ısı iletim katsayısı ve 20 kg/m³ bir yoğunluk değerleriyle karakterize edilmiştir [120].

Isı ve ses yalıtımı için malzeme seçerken ısıl ve akustik performansına etki eden makro yapı özellikleri, mekanik özellikler ve malzemenin fiziksel özellikleri ile birlikte fiziksel işlevsellik, dayanıklılık, ekolojik açıdan uygunluk, uygulama kolaylığı ve maliyet de dâhil olmak üzere birçok parametre göz önüne alınmalıdır.

İnşaat sektöründe ısı ve ses yalıtımı amaçlı mevcut kullanılan yalıtım malzemelerinin genel bir değerlendirmesi yapıldığında, tek bir yalıtım malzemesinin bu parametrelerin tümüne birden cevap verebilmesi neredeyse olanaksızdır. Bununla birlikte birlikte, bunların önemli bir kısmına sahip olan malzemeler üretilebilir. Yapılan ve yapılacak araştırmalar ile bu özelliklerin birçoğuna sahip ısı, ses ve yangın yalıtımını birlikte yerine getirebilen yalıtım malzeme ve tekniklerinin araştırılıp geliştirilmesine önem verilmesi gerektiği öngörülmüştür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Makale de hem geleneksel, alternatif ve gelişmiş yalıtım malzemelerini dikkate alınarak inşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı, ses, yangına tepki ve çevresel özellikler, su buharı geçirgenliği özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Türkiye'de sanayideki ve konutlardaki nihai enerji tüketimi hızla artmaktadır. Türkiye'de toplam enerji tüketiminin yaklaşık % 40'ı konutlarda gerçekleşmektedir. Konutlardaki enerji kullanımının yaklaşık % 85'i ısıtma için harcanmaktadır. Türkiye'de yaklaşık 22 Milyon konutun % 70'inin yalıtımsız olduğu gözönünde bulundurulduğunda konutlardaki enerji tasarrufu amaçlı ısı yalıtım uygulamalarının önemi ortaya çıkmaktadır.

İnşaat sektöründeki enerji kullanımı, dünyanın toplam enerji kullanımının ve sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturduğundan binaların enerji verimliliğini artırma talebi gittikçe artan bir zorunluluk haline gelmektedir. Dolayısıyla pasif evler ve sıfır emisyonlu binalar gibi kavramlar tanıtılmaktadır. Bu yüzden yalıtım malzemeleri mümkün olduğunca düşük ısı iletim katsayısına sahip olmalıdır. Dahası, yalıtım malzemeleri binanın tüm yaşam döngüsü boyunca kabul edilebilir bir performansı garanti etmek zorundadır. Buna ek olarak bu malzemeler ve çözümler, yerel ısı

köprülerinden kaynaklanan artış haricinde çivi ve benzeri dış nesnelere delinmiş olsa dahi düşük ısı iletim katsayısını koruyabilmelidir. Fakat ısı performans bir yalıtım malzemesi seçerken ele alınması gereken tek parametre değildir. Aynı zamanda yangın direnci, su buharı geçirgenliği, yaşlanma, delinme, şantiye uyarlamaları açısından da iyi bir performans sağlamalıdır.

Çevre ve insan sağlığı konusundaki farkındalığın artması, yalıtım malzemelerinin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesine yol açmakta ve gelecekteki yalıtım malzemeleri ve çözümlerinin kullanım süresi boyunca sürdürülebilir ve sağlıklı yaşam koşullarını sağlayacak ses yalıtımı gibi ısı olmayan özellikler dikkate alınarak geliştirilmesi gerekir.

Belirli bir uygulama veya inşaat sektörü için hangi yalıtım malzemesinin veya çözümünün seçileceğini belirlerken, yukarıda ifade edilen tüm önemli özellikler zayıf yönleri ve güçlü yönleriyle değerlendirilmelidir. Günümüz itibarıyla, her yönden üstün veya en iyi tek bir yalıtım malzemesi veya çözümü mevcut değildir. Hangi yalıtım malzemesinin seçileceğini belirlerken farklı özellikler ve uygulamalar için tüm artılarının ve eksilerinin değerlendirilmesi ciddi önem taşımaktadır.

Geleneksel ve alternatif yalıtım malzemeleri delinme, şekillendirilme etkilerine karşı daha dayanıklı ve şantiye ortamına uyumlu malzemelerdir. Bununla birlikte, geleneksel ve alternatif yalıtım malzemeleri gelişmiş yalıtım malzemelerine nispeten yüksek ısı iletim katsayısı değerlerine sahiptirler. Geleneksel ve alternatif yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayıları artan nem içeriği nedeniyle önemli ölçüde artabilmektedir. Gelişmiş yalıtım malzemeleri en düşük ısı iletim katsayılarına sahip olmakla birlikte ağırlıklı olarak maliyetleri ve montaj zorluğu nedeniyle kullanımı çok fazla yaygınlaşmamıştır. Ayrıca gerçek uygulamalarda karşılaşılan nem, difüzyon yoluyla hava girişi ve zaman içinde deforme olmaları ısı iletim katsayılarını artırmaktadır.

İncelenen yalıtım malzemeleri akustik özellikler açısından değerlendirildiğinde; taş yünü, cam yünü, sesliloz, mantar, mineralize ağaçlifleri hafif genişletilmiş kil agrega, genişletilmiş perlit, kenevir, kenaf, keten, koyun yünü, hindistan cevizi lifi, geri dönüştürülmüş kauçuk, karton esaslı paneller ve bu malzemeleri içeren kompozitler ses yalıtımı amaçlı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin darbe kaynaklı ses yalıtımı, hava kaynaklı ses yalıtımı ve ses yutum özellikleri öne çıkmaktadır.

Isı ve ses yalıtımında:

- Günümüzün mevcut geleneksel ve son teknoloji ısı-ses yalıtım malzemeleri ve teknolojilerinden en uygun olanının seçimi,
- Günümüzün mevcut geleneksel ve son teknoloji ısı-ses yalıtım malzemeleri ve teknolojilerinin sürekli araştırılması ve geliştirilmesi,

- Günümüzün mevcut malzeme ve teknolojilerinin tamamını aşan özelliklere sahip yeni yüksek performanslı ısı-ses yalıtım malzemeleri ve teknolojilerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar önem kazanmıştır.

Bu çerçevede, binalarda sürdürülebilir ve sağlıklı yaşam koşullarını sağlayan enerji verimliliği ve akustik konfor şartlarını sağlayacak, düşük ısı iletim katsayısına sahip olan yenilikçi ve bütüncül (ekonomik ve yerli) anlayış ile tasarlanmış ısı ve ses yalıtımının birlikte istendiği ortamlara yönelik kolay uygulanabilir yalıtım malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonuç olarak iyi yalıtım performansı, düşük üretim enerjisi, yeterli ısı-akustik konfor ve sağlıklı yaşam koşullarını sağlayan çevre dostu, yerel ve sürdürülebilir nitelikte yalıtım malzemelerinin üretiminin artırılması ve kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir.

SİMGE VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

A	Alan (m ²)
k	Isı iletim katsayısı (W/m.K)
R	Isıl direnç (m ² .K/W)
U	Toplam ısı transfer katsayısı (W/m ² K)
D	Isıl yayılım katsayısı (m ² /s)
f	Frekans, Hz
TL	Ses iletim kaybı, dB
α	Ses yutum katsayısı
GFP	Gas Filled Panels
VIP	Vacuum Insulation Panels
EPS	Expanded Polystyrene
XPS	Extruded Polystyrene
HFC	Hydrofluorocarbon
PUR	Polyurethane
CFC	Chlorofluorocarbon
PIR	Polyisocyanurate
GP	Expanded Perlite
DIN	German Institute for Standardization
EN	European Committee for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Özkan D.B., Onan C., Erdem S., "Yalıtım malzemesi kalınlığının ısı yalıtımına etkisi", *Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi*, Sigma 27: 190-196, (2009).

- [2] İzoder., (Isı, su ve Ses İzolasyoncuları Derneği), **T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Yapı Denetim Kuruluşları Yalıtım Semineri**, (2003).
- [3] P. Ricciardi P., Belloni E., Cotana F., “Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment”, *Applied Energy*, 134:150–162, (2014).
- [4] Papadopoulos A.M., “State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments”, *Energy and Buildings*, 37: 77–86, (2005).
- [5] Jelle B.P., “Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities”, *Energy and Buildings*, 43: 2549–2563, (2011).
- [6] Shastri D., Kim S.H., “A new consolidation process for expanded perlite particles”, *Construction and Building Materials*, 60: 1–7, (2014).
- [7] Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A., “Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review”, *Energy Build.*, 43: 761–9, (2011).
- [8] Zukowski M., Haese G., “Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation”, *Energy Build.*, 42:1402–8, (2010).
- [9] Alam M., Singh H., Brunner S., Naziris C., “Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite-Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core”, *Energy and Buildings*, 69: 442–450, (2014).
- [10] Pichor W., Janiec A., “Thermal stability of expanded perlite modified by mullite”, *Ceramics International*, 35: 527–530, (2009).
- [11] Lu Z., Xu B., Zhang J., Zhu Y., Sun G., Li Z., “Preparation and characterization of expanded perlite/paraffin composite as form-stable phase change material”, *Solar Energy*, 108: 460–466, (2014)
- [12] Yılmaz S., Özdeniz M.B., “The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates”, *Building and Environment*, 40: 311–318, (2005).
- [13] Vaou V., Pnias D., “Thermal insulating foamy geopolymers from perlite”, *Minerals Engineering*, 23: 1146–1151, (2010).
- [14] Celik A.G., Depci T., Kılıc A.M., “New lightweight colemanite-added perlite brick and comparison of its physico-mechanical properties with other commercial lightweight materials”, *Construction and Building Materials*, 62, 59–66, (2014).
- [15] Liu W.V., Apel D.B., Bindiganavile V.S., “Thermal properties of lightweight dry-mix shotcrete containing expanded perlite aggregate”, *Cement & Concrete Composites*, 53: 44–51, (2014).
- [16] Abidi S., Nait-Ali B., Joliff Y., Favotto C., “Impact of perlite, vermiculite and cement on the thermal conductivity of a plaster composite material: Experimental and numerical approaches”, *Composites: Part B*, 68: 392–400, (2015).
- [17] Gao T., Sandberg L.I.C., Jelle B.P., “Nano Insulation Materials: Synthesis and Life Cycle Assessment”, *Procedia CIRP*, 15: 490 – 495, (2014).
- [18] Bajraktari E., Lechleitner J., Mahdavi A., “Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation”, *Energy Procedia*, 78: 140 – 145, (2015).
- [19] Nurzyński J., “Is Thermal Resistance Correlated With Sound Insulation?”, *Energy Procedia*, 78: 152 – 157, (2015).
- [20] Arifuzzaman M., Sung Kim H.S., “Development of New Perlite/Sodium Silicate Composites”, *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, Khulna, Bangladesh, 26-27, (2014).
- [21] Arifuzzaman M., Sung Kim H.S., “Novel mechanical behaviour of perlite/sodium silicate composites”, *Construction and Building Materials*, 93: 230–240, (2015).
- [22] Skubic B., Lakner M., Plazl I., “Sintering Behavior of Expanded Perlite Thermal Insulation Board: Modeling and Experiments”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53: 10244–10249, (2013).
- [23] Skubic B., Lakner M., Plazl I., “Microwave Drying of Expanded Perlite Insulation Board”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51: 3314–3321, (2012).
- [24] Bostancıoğlu E., “Mevcut Binalarda Yapılan Ekolojik İyileştirmelerin Enerji Kazancı”, *The Turkish Online Journal of Design Art and Communication*, 2:15-24, (2011).
- [25] Sun D., Wang L., “Utilization of paraffin/expanded perlite materials to improve mechanical and thermal properties of cement mortar”, *Construction and Building Materials*, 101: 791–796, (2015).
- [26] Güner Ç., “Gürültünün Sağlık Üzerine Etkileri”, *Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi*, 9: 251–253, (2000).
- [27] Topçu İ.B., Işıkdag B., “Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete”, *Journal of Materials Processing Technology*, 204: 34–38, (2008).
- [28] Anonim, “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği”, 04.06.2010 Tarih ve 27601 Sayılı *Resmi Gazete*, Ankara, (2010).
- [29] Demirkale S.Y., Aşçıgil M., “Sağlıklı kentlerle ve yapılarla ilgili Türkiye’nin gürültü politikası”, VIII. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 267-285, (2007).
- [30] He Y., “Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor Part 1. Theoretical considerations”, *Thermochimica Acta* 436: 122–129, (2005).
- [31] Jannot Y., Degiovanni A., Payet G., “Thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52: 1105–1111, (2009).
- [32] Schiavoni S., D’Alessandro F., Bianchi F., Asdrubali F., “Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62: 988–1011, (2016).
- [33] EN 12664, “Thermal performance of building materials and products – determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – dry and moist products of medium and low thermal resistance”, *European Committee for Standardization*, (2001).
- [34] EN 12667, “Thermal performance of building materials and products – determination of thermal resistance by

- means of guarded hot plate and heat flow meter methods – products of high and medium thermal resistance”, *European Committee for Standardization*, (2001).
- [35] EN 12939, “Thermal performance of building materials and products – determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – thick products of high and medium thermal resistance”, *European Committee for Standardization*, (2000).
- [36] ASTM C518-10, “Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus”, *American Society for Testing and Materials*, (2010).
- [37] ASTM C177-13, “Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus”, *American Society for Testing and Materials*, (2013).
- [38] ISO 8990, “Thermal insulation – determination of steady-state thermal transmission properties – calibrated and guarded hot box”, *International Organization for Standardization*, (2013).
- [39] EN 1602, “Thermal insulating products for building applications. Determination of the apparent density”, *European Committee for Standardization*, (2013).
- [40] ASTM C303-10 “Standard test method for dimensions and density of preformed block and board-type thermal insulation”, *American Society for Testing and Materials*, (2016).
- [41] ISO 11357-4, “Plastics. Differential scanning calorimetry (DSC). Determination of specific heat capacity”, *International Organization for Standardization*, (2014).
- [42] ASTM 1269-11, “Standard test method for determining specific heat capacity by differential scanning calorimetry”, *American Society for Testing and Materials*, (2011).
- [43] ISO 22007-1, “Plastics –determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 1: General principles”, *International Organization for Standardization*, (2009).
- [44] ISO 22007-2, “Plastics –determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method”, *International Organization for Standardization*, (2008).
- [45] ISO 22007-3, “Plastics – determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 3: Temperature wave analysis method”, *International Organization for Standardization*, (2008).
- [46] ISO 22007-4, “Plastics – determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 4: Laser flash method”, *International Organization for Standardization*, (2008).
- [47] ISO 6946, “Building components and building elements – thermal resistance and thermal transmittance – calculation method”, *International Organization for Standardization*, (2007).
- [48] Toydemir N., Gürdal, E., Tanaçan L., “Yapı Elemanında Malzeme Tasarımı”, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul, (2000).
- [49] Ülker S., “Isı Yalıtım Malzemelerinin Özelliklerinin Uygulamaya Etkileri”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
- [50] Yılmaz H. K., “Binalarda Dış Duvarlarda Kullanılan Isı Yalıtım Kaplamalarının Enerji Korunum Performansları Açısından İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
- [51] Al-Homoud M.S., “Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials”, *Building and Environment*, 40: 353–366, (2005).
- [52] ISO 717-1, “Acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation”, *International Organization for Standardization*, (2013).
- [53] ISO 10140, “Acoustics – laboratory measurement of sound insulation of building elements”, *International Organization for Standardization*, (2010).
- [54] EN 12354-1, “Building acoustics – estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms”, *European Committee for Standardization*, (2000).
- [55] ISO 16283-1, “Acoustics – field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation”, *International Organization for Standardization*, (2014).
- [56] ISO 717-2, “Acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation”, *International Organization for Standardization*, (2013).
- [57] EN 12354-2, “Building acoustics – estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms”, *European Committee for Standardization*, (2000).
- [58] ISO 16283-2, “Acoustics – field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation”, *International Organization for Standardization*, (2015).
- [59] ISO 9052-1, “Acoustics – determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings”, *International Organization for Standardization*, (1989).
- [60] ISO 354, “Acoustics – measurement of sound absorption in a reverberation room”, *International Organization for Standardization*, (2003).
- [61] ASTM C423-09a, “Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method”, *American Society for Testing and Materials*, (2009).
- [62] ISO 10534-2, “Acoustics – determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method”, *International Organization for Standardization*, (1998).
- [63] Vidinlimen G.T., “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Gözenekli Malzemelerin Akustik Özellikleri ve Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [64] Cox, T. J., D’Antonio, P., “Acoustic Absorbers and Diffusers” *Spon Press*, London and New York, (2005).
- [65] Ravindran A., “Investigation of Inverse Acoustical Characterization of Porous Materials Used in aircraft Noise Control Application”, *Master of Science Thesis*, Wichita State University, (2007).

- [66] Skinner, C., Peters, J., and Vandenbroeck, J., Acoustic Absorbers: A third way for the management of sound in automobiles, *International Urethanes Technology Exhibition and Conference UTECH Europe*, Maastricht, Netherlands, 28-30, (2006).
- [67] Fangueiro R. "Fibrous and composite materials for civil engineering applications" *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge, (2011).
- [68] Kirbiyik E., "Ses ve Isı Yalıtımlı Ekolojik Yapı Malzemelerinin İncelenmesi ve Trakya Bölgesinde Yetiştirilen Ayçiçeği Bitkisinin Yalıtım Malzemesi Olarak Araştırılması", *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
- [69] Woolley, T., Kimmins, S., Harrison, P., Harrison, R., "Green Building Handbook", *Spon Press*, Manchester, 2005.
- [70] Tatematsu K., Hirota T., Suzuki H., Taniguchi M., Nunoi Y., Uzawa T., "Influence of temperature and moisture on aging of glass wool", *Journal of Environmental Engineering*, 79: 753–62, (2014).
- [71] Lakatos A., Kalmár F., "Analysis of water sorption and thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials", *Building Services Engineering Research and Technology*, 34:407–16, (2013).
- [72] Vo C.V., Bunge F., Duffy J., Hood L., "Advances in thermal insulation of extruded polystyrene foams", *Cellular Polymers*, 30:137–56, (2011).
- [73] Zhao C., Yan Y., Hu Z., Li L., Fan X., "Preparation and characterization of granular silica aerogel/polyisocyanurate rigid foam composites", *Construction and Building Materials*, 93: 309–16, (2015).
- [74] Pescari S., Tudor D., Tölgyi S., Maduta C., "Study concerning the thermal insulation panels with double-side anti-condensation foil on the exterior and polyurethane foam or polyisocyanurate on the interior", *Key Engineering Materials*, 660: 244–8, (2015).
- [75] Hurtado PL., Rouilly A., Vandenbossche V., Raynaud C., "A review on the properties of cellulose fibre insulation", *Building and Environment*, 96: 170–7, (2016).
- [76] Asdrubali F., Schiavoni S., Horoshenkov KV., "Review of sustainable materials for acoustic applications", *Journal of Building Acoustics*, 19: 283–312, (2012).
- [77] Maaloufa Y., Mounir S., Khabbazi A., Kettar J., Khaldoun A., "Thermal characterization of materials based on clay and granular: cork or expanded perlite", *Energy Procedia*, 74: 1150–61, (2015).
- [78] Limam A., Zerizer A., Quenard D., Sallee H., Chenak A., "Experimental thermal characterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and their composites) for building insulation", *Energy and Buildings*, 116: 89–95, (2016).
- [79] Kawasaki T., Zhang M., Kawai S., "Manufacture and properties of ultra-low density fiberboard", *Journal of Wood Science*, 44:354–60, (1998).
- [80] Troppová E., Švehlík M., Tippner J., Wimmer R., "Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards", *Materials and Structures*, 48: 4077–83, (2015).
- [81] Pargana N., Pinheiro MD., Silvestre JD., De Brito J., "Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings", *Energy and Buildings*, 82: 466–81, (2014).
- [82] Del Coz Díaz J.J., Álvarez Rabanal F.P., García Nieto P.J., Domínguez Hernández J., Rodríguez Soria B., Pérez-Bella J.M., "Hygrothermal properties of lightweight concrete: experiments and numerical fitting study", *Construction and Building Materials*, 40: 543–55, (2013).
- [83] Asdrubali F., Horoshenkov K.V., "The acoustic properties of expanded clay granulates", *Building Acoustics*, 9: 85–98, (2002).
- [84] Sutcu M., "Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks", *Ceramics International*, 41: 2819–2827, (2015).
- [85] Schackow A., Effting C., Folgueras M.V., Güths S., Mendes G.A., "Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent", *Construction and Building Materials*, 57: 190–197 (2014).
- [86] Maderuelo-Sanz R., Nadal-Gisbert A.V., Crespo-Amorós J.E., Barrigón Morillas J.M., Parres-García F., Juliá Sanchis E., "Influence of the microstructure in the acoustical performance of consolidated lightweight granular materials", *Acoustics Australia*, 44:149–157, (2016).
- [87] Fassi A., Maina L., "L'isolamento ecoefficiente. Guida all'uso dei materiali naturali" *Edizioni Ambiente*; Milano, (2009).
- [88] ISO/FDIS 10456, "Building materials and products — hygrothermal properties — tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values", *International Organization for Standardization*, (2007).
- [89] Suvorov S.A., Skurikhin V.V., "Vermiculite — a promising material for hightemperature heat insulators", *Refractories and Industrial Ceramics*, 44: 186–93, (2003).
- [90] Maderuelo R., Segura J.G., Nadal A, Julia E, Crespo JE, Gadea JM., "Acoustical properties of porous absorbers made from perlite", *International Conference Sustainable Materials Science and Technology*, Paris, 22-25, (2015).
- [91] Kymäläinen H.R., Sjöberg A.M., "Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations" *Building and Environment*, 43: 1261–1269, (2008).
- [92] Zach J., Hroudova J., Brožovský J., Krejzad Z., Gailiuse A., "Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems" *Procedia Engineering*, 57:1288–1294, (2013).
- [93] Korjenic A., Petránek V., Zach J., Hroudová J., "Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources", *Energy and Buildings*, 43: 2518–2523, (2011).
- [94] Glé P., Gourdon E., Arnaud L., "Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity" *Applied Acoustics*, 72: 249–259, (2011).
- [95] Xu J., Sugawara R., Widyorini R., Han G., Kawai S., "Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from Kenaf core", *Journal of Wood Science*, 50: 62–7, (2004).

- [96] D'Alessandro F., Pispola G., "Sound absorption properties of sustainable fibrous materials in an enhanced reverberation room", *International Congress on Noise Control Engineering*, Rio de Janeiro, 2359-2368, (2005).
- [97] El Hajja N., Mboumba-Mamoundou B., Dheilly R.-M., Aboura Z., Benzeggagh M., Queneudec M., "Development of thermal insulating and sound absorbing agro-sourced materials from auto linked flax-tows", *Industrial Crops and Products*, 34: 921-928, (2011).
- [98] Kauriinvaha E., Viljanen M., Pasila A., Kymäläinen H.-R., Pehkonen A., "Bio-fiber from field to insulation of building", Helsinki University of Technology, *Laboratory of Structural Engineering and Building Physics*, Publication 117; (2001).
- [99] Ballagh K.O., "Acoustic properties of wall", *Applied Acoustics*, 48:101-120, (1996).
- [100] Zach J., Korjenic A., Petráněk V., Hroudová J., Bednar T., "Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool", *Energy and Buildings*, 49: 246-253, (2012).
- [101] Manohar K., Ramlakhan D., Kochar G., Haldar S., "Biodegradable fibrous thermal insulation", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 28: 45-47, (2015).
- [102] Manohar K., "Experimental investigation of building thermal insulation from agricultural by-products", *British Journal of Applied Science & Technology*, 2:227-39, (2012).
- [103] Panyakaew S., Fotios S., "New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse", *Energy and Buildings*, 43:1732-9, (2011).
- [104] Asdrubali F., Baldinelli G., D'Alessandro F., Schiavoni S., Kenny J.M., Iannoni A., "Manufacturing process optimization of resilient materials made from recycled tyre granules", *16th International Congress on Sound and Vibration, Krakow*, 1985-1992, (2009).
- [105] Asdrubali F., D'Alessandro F., "Impact sound insulation and viscoelastic properties of resilient materials made from recycled tyre granules", *International Journal of Acoustic and Vibration*, 16:119-125, (2011).
- [106] Benkreira H., Khan A., Horoshenkov K.V., "Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues", *Chemical Engineering Science*, 66:4157-4171, (2011).
- [107] Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S., "Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs", *Acoustics '08*, Paris, (2008).
- [108] Zach J., Hroudova J., "Utilization of technical hemp for thermal insulating materials production", *2nd international conference on suitable construction materials and technologies*, Ancona, (2010).
- [109] Asdrubali F., Pisello AL., D'Alessandro F., Bianchi F., Fabiani C., Cornicchia M., "Experimental and numerical characterization of innovative cardboard based panels: thermal and acoustic performance analysis and life cycle assessment", *Building and Environment*, 95:145-59, (2016).
- [110] Baetens R., Jelle B.P., Thue J.V., Tenpierik M.J., Grynning S., Uvsløkk S., "Vacuum insulation panels for building applications: a review and beyond", *Energy and Buildings*, 42:147-72, (2010).
- [111] Alam M, Singh H, Limbachiya MC. "Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry a review of the contemporary developments and future directions", *Applied Energy*, 88:3592-3602, (2011).
- [112] Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A., Grynning S., "Gas-filled panels for building applications: a state-of-the-art review", *Energy and Buildings*, 42:1969-75, (2010).
- [113] Griffith B., Türler D., Arasteh D., "Optimizing the effective conductivity and cost of gas-filled panel thermal insulations", *22nd International Thermal Conductivity Conference*, Arizona State University, (1993).
- [114] Dorcheh A.S., Abbasi H., "Silica aerogel; synthesis, properties and characterization", *Journal of Materials Processing Technology*, 199: 10-26, (2008).
- [115] Van Bommel M.J., den Engelsen C.W., van Miltenburg J.C., "A thermoporometry study of fumed silica/aerogel composites", *Journal of Porous Materials*, 4:143-150, (1997).
- [116] Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A., "Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review" *Energy and Buildings*, 43:761-769, (2011).
- [117] Neugebauer A., Chen K., Tang A., Allgeier A., Glicksman L.R., Gibson L.J., "Thermal conductivity and characterization of compacted, granular silica aerogel", *Energy and Buildings*, 79:47-57, (2014).
- [118] Berardi U., "The development of a monolithic aerogel glazed window for an energy retrofitting project", *Applied Energy*, 154:603-615, (2015).
- [119] Ricciardi P., Gibiat V., Hooley A., "Multilayer absorbers of silica aerogel", *In: Proceedings of Forum Acusticum*, Sevilla, Spain, (2002).
- [120] Hayase G., Kanamori K., Abe K., Yano H., Maeno A., Kaji H., "Polymethylsilsesquioxane-cellulose nanofiber biocomposite aerogels with high thermal insulation, bendability, and superhydrophobicity", *Applied Materials & Interfaces*, 6:9466-9471, (2014).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Modelling nitrate prediction of groundwater and surface water using artificial neural networks

Yapay sinir ağları kullanılarak yer altı ve yüzey sularındaki nitrat tahmininin modellenmesi

Yazar(lar) (Author(s)): Semra BENZER¹, Recep BENZER²

ORCID¹: 0000-0002-8548-8994

ORCID²: 0000-0002-5339-0554

Bu makaleye řu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Benzer S. ve Benzer R., “Modelling nitrate prediction of groundwater and surface water using artificial neural networks”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 321-325, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385434

Modelling Nitrate Prediction of Groundwater and Surface Water Using Artificial Neural Networks

Araştırma Makalesi / Research Article

Semra BENZER¹, Recep BENZER^{2*}

¹Gazi Education Faculty, Science Education, Gazi University, Türkiye

²Turkish Military Academy, Department of Computer Engineering, National Defense University, Türkiye

(Geliş/Received : 27.02.2017 ; Kabul/Accepted : 13.04.2017)

ABSTRACT

This study aims to estimate the changes in the amount of nitrate in Yeşilırmak Watershed using surface water and underground water of the nitrate content determined by General Directorate of State Hydraulic Works using Artificial Neural Networks (ANNs). This study was conducted in 2010 at 30 stations (9 groundwater, 18 surface water and 3 closed water source) in Yeşilırmak Watershed. Nitrate ranged from 0.341 to 77.700 mg/L, with an average value of 17.870 mg/L. In this study, changes in the amount of nitrate in Amasya using groundwater and surface water in the basin of the nitrate content determined by the Provincial Directorate of Agriculture modeling was presented with an approach based on Artificial Neural Networks (ANNs) and predict the nitrate value for the year of 2020 and 2030. Thus, the nitrate levels of water samples obtained from 30 stations water supplies found to be under the limits of Turkish and international codex of drinking water intended for human consumption.

Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Yer Altı ve Yüzeysel Sularındaki Nitrat Tahmininin Modellenmesi

ÖZ

Bu çalışmada, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından Yeşilırmak Havzasında (Amasya) belirlenen istasyonlardaki Nitrat değişim miktarının yüzeysel ve yeraltı sularının Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma 2010 yılları arasında Yeşilırmak Havzasındaki 30 istasyonda (9 yer altı suları, 18 yüzeysel suları ve 3 kapalı su kaynağı) ölçülen veriler ile yürütülmüştür. Nitrat miktarı 0,341 ila 77,700 mg l-1 arasında olup ortalama nitrat miktarı 17.870 mg l-1'dir. İl Tarım Müdürlüğü tarafından belirlenen havzadaki yeraltı suyu ve yüzeysel suyundaki nitrat içeriği kullanılarak Amasya'da nitrat miktarındaki değişiklikler Yapay Sinir Ağları (ANNs) temelli bir yaklaşımla sunulmuş ve 2020 ve 2030 yıllarına ait nitrat değerleri tahmin edilmiştir. Yapılan modellemede, 30 istasyondaki su kaynağından elde edilen su numunelerinin nitrat seviyeleri, insan tüketimine yönelik Uluslararası ve Türk sınırların altında bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yapay sinir ağları, nitrat, Amasya, yüzeysel suları, yeraltı suları

1. INTRODUCTION

Groundwater and surface water pollution caused by nitrate is one of the serious ecological and agricultural problems in today's world. There have been a lot of droughts recently, and groundwater for agriculture has been overused; therefore, water supply in rural and urban areas has become a crucial issue in water resources management of water-scarce regions.

Nitrate can be found in surface and groundwater naturally and anthropogenically. Among the major sources of nitrate in surface and groundwater are decayed vegetable and animal wastes, certain solid wastes, household wastes, industrial waste waters, fertilizers used in agriculture, and sewage waters from waste water treatment facilities [1-3].

Overall, nitrate levels in drinking water coming from surface water are about 10 mg/l in most countries. For example, in some European countries, the percentage of

the population exposed to nitrate levels in drinking water above 50 mg l⁻¹ varied from 0.5% to 10 % (nearly 10 million people) [4-5].

In 2005, it was reported that 30% of the EU's groundwater bodies were at risk of not achieving good status by 2015. The situation, nonetheless, shows a considerable variation all over Europe. Such states as Belgium, the United Kingdom and the Czech Republic, predicted that approximately 60% of their groundwater bodies were at stake [6].

European Union countries are taking action to protect and assess many problems of underground waters. The project "Technical Assistance for the Implementation of Nitrates Directive in Turkey" is one of the three components of the Programme "Implementation of Nitrates Directive in Turkey", targeting to "reduce the nutrient input impact on the water resources, soil and atmosphere by controlling pollution caused by the agricultural sources in Turkey's water and soil resources, and to implement the Nitrates Directive in Turkey" [7].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : rbenzer@kho.edu.tr

Nitrate in waters has been observed in many studies through depth-specific sampling [8-12].

Estimating the nitrate concentration using cost-effective technologies is necessary. Black-box models like artificial neural networks (ANNs) attracts attention when estimating the nitrate concentration using easily measurable water quality parameters such as temperature, electrical conductivity (EC), groundwater level, pH, etc. In this regard, ANNs do not entail previous information about the structure and relationships possible to exist between significant variables. In addition, the learning abilities of the ANNs have enabled them to be adaptive to the changes in the system [13].

There are a number of studies into the prediction and modelling of nitrate in various water reservoirs, such as Şengörür and Öz [14] in Mahmudiye Stream; Garcet et al. [15], Yesilnacar et al. [16] in Harran Plain, O'Shea and Wade [17] in Kennet Catchment, Kunkel et al. [18] in Weser Basin, Peña-Haro et al. [19] in Castilla-La Mancha Region, İleri et al. [20] in Uluabat Lake, Aguilera et al. [21] in coastal waters in a Spanish tourist area, Palani et al. [22] in Singapore coastal waters, Singh et al. [23] in Gomti River (India).

This study aims to estimate the changes in the amount of nitrate in Yeşilirmak Watershed using surface water and underground water of the nitrate content determined by General Directorate of State Hydraulic Works using Artificial Neural Networks (ANNs).

2. MATERIAL and METHOD

2.1. Study Region and Data

The Yeşilirmak watershed is bordered by the Amasya and Tokat provinces and parts of Samsun, Çorum and Yozgat provinces (Figure 1). The watershed covers an area of about 36,000 km², while the total area of the five provinces is nearly 51,000 km². The total area of the provinces is actually the basis of present GIS, and corresponds to approximately 7% of the total area of

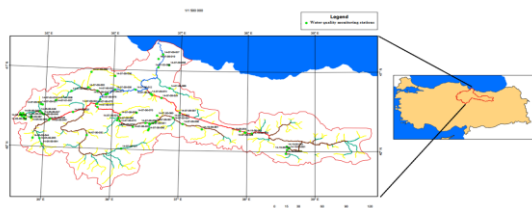


Figure 1. Location map of the Yeşilirmak Watershed with Stations [25]

Turkey. The total population of the watershed provinces is about 4 million [24].

The General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ), is a legal entity, and is the primary executive state agency responsible for planning, management, development, and operation of overall national water resources. This study was conducted by DSİ in 2010 at 30 stations (9 groundwater, 18 surface water and 3 closed water source)

in Yeşilirmak Watershed. Nitrate analysis was performed by DSİ, and the results were evaluated by ANNs approach.

2.1. Study Region and Data

ANNs refer to an information processing system which replicates the response of a human brain by imitating the operations and connectivity of biological neurons. As a mathematical interpretation, the ANNs result is defined as a complex nonlinear function with many parameters set to mimic the measured output in a known set of data [26].

Among the features and advantages of ANNs are nonlinearity, parallelism, implemented ease of local information processing, fault tolerance, to be learned that can be system, generalization, customization, hardware acceleration, analysis and design simplicity [27].

The transfer function, mostly used a sigmoid or a logistic function, gives values in the range of [0,1] and can be described as (normalization):

$$V_N = 0.8 \times \left(\frac{V_R - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \right) + 0.1 \quad (1)$$

V_R : data to be normalized

V_{min} : minimum value

V_{max} : maximum value

Mean Squared Error (MSE) was used as a criteria. MSE was used as convergence criteria during the training of the network. SSE is described by equations 2, respectively.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (2)$$

Where Y_i is the actual observation value, \hat{Y}_i is the prediction value, and n is the number of total observations.

This study used the sigmoid activation function. ANNs can work with a small data set; and ANNs seem better than other methods because it has such significant features as generalization, learning from data, working with unlimited number of variables and no need for any information about the problem in advance.

3. RESULTS and DISCUSSION

The maximum allowable concentration of nitrate in drinking water is 50 mg/L according to the TS 266 [28], the WHO (2) guidelines and the EU directive [29]. The maximum allowable concentration of nitrate in underground water is stations was determined as 25 mg l-1 according to the TS 266 [28]. Nitrate was well above the maximum admissible concentration and it ranged from 0.341 to 77.7 mg l-1, with an average value of 17.87 mg l-1. The excessive nitrate concentration in the study

area is triggered by excessive and uncontrolled irrigation [16].

Within the scope of the Regulation on the Protection of Waters against Nitrate Pollution from Agricultural Sources, the Provincial Directorates of Agriculture have been conducting nitrate analyzes for certain months (January-March-June-September-December) of the year at surface and underground measuring stations. In this context, the results of nitrate analysis in 2010 using the data taken for 30 stations (9 surface, 18 groundwater and 3 closed) from Amasya Provincial Directorate of Agriculture are given in Table 1.

Underground water stations have stations that exceed the limit nitrate values. Boğazköy, Hayrettin, İncekulak and İlyas stations' values are above 25 mg l-1. The critical value at the Ayten Çöl Farm is very close to 50 mg l-1. It is above 50 mg l-1 in the Tuzsuz Village station.

The structure of the ANNs proposed for Modelling Nitrate Prediction is as follows: The neuron number of the input layer is 3, the number of hidden layer is 1, and the number of output layer neuron is 1 (Figure 2).

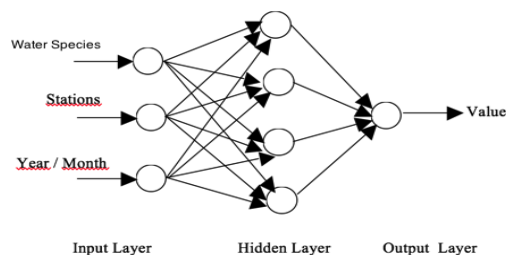


Figure 2. ANNs layers

The data of nitrate was further divided into 70% for training and 30 % for testing the data. Out of the 70 % for training, 30 % was used for just training the model.

Before being put as input into the ANNs, the inputs were normalized according to the normalization function defined in MATLAB, wherein the mean was subtracted and the value divided by the variance of the data.

The data used in the neural network approach is taken from the Provincial Directorate of Agriculture. The results of the data on Amasya are illustrated in Figure 3-

Table 1. Nitrate analyzes results for surface and groundwater stations in 2010 (Amasya/Turkey).

Station Name	Station ID	Water source Surface /Underground	Nitrate values (mg / L)				
			Jan	Mar	Jun	Sep	Nov
Yeşilirmak entrance	1	Surface	8.66	4.69	5.74	5.93	14.1
Yeşilirmak exit	2	Surface	12.4	8.38	12.2	9.86	10.2
Terkasan entrance	3	Surface	8.56	8.03	6.41	4.45	8.54
Tersakan -Yeşilirmak	4	Surface	12.2	5.89	4.88	4.99	2.83
Çekerek steram	5	Surface	10.3	9.76	12.3	13.3	11.5
Çekerek steram-Yeşilirmak	6	Surface	11.9	11	13.2	11.7	12.9
Çorum Stream	7	Surface	13.4	14.2	21.4	10.8	10.6
Doğantepe Pond	8	Surface	12.3	11.2	8.13	6.79	3.09
Uluköy Pond	9	Surface	1.87	1.02	0.341	0.74	0.38
Yassıçal	10	Underground	12	15.2	7.5	6.04	7.38
Tuzsuz	11	Underground	68.1	59.4	62.9	71.1	77.7
Yerkoğlu	12	Underground	Closed Station				
Boğazköy	13	Underground		30.4	41.4	17.3	22.2
Büyük Kızılca	14	Underground	4.76	25.8	22.8	7.21	35.2
Ezinepazar	15	Underground	12.5	1.71	11.3	17.6	16.1
Saluca	16	Underground	Closed Station				
Merbes	17	Underground	Closed Station				
Kendir Factory	18	Underground	32	32.7	31.2	26.1	31.1
Şarlayık	19	Underground	16.5	16.7	15.4	15.9	15.8
Esençay	20	Underground	1.02	0.974	1.04	1.18	1.18
Uzunoba	21	Underground	40.7	41.1	26.3	41.1	40.7
Hayrettin	22	Underground	25.6	30.1	27.6	26.9	26.2
Ayten ÇÖL Farm	23	Underground	48.9	44.3	39	36.9	37.3
İncekulak	24	Underground	24.2	21	20.7	26.0	27.8
Hasanbeyli	25	Underground	3.84	3.61	3.57	20.2	12.8
İlyas	26	Underground	26.7	26.2	24.5	26.2	27.1
Taşova	27	Underground	8.07	7.06	9.43	8.02	13.9
Eslenez	28	Underground	20.7	21.7	21	22.3	21.6
Gümüşhacıköy	29	Underground	16.2	7.48	13.9	22.8	23.8
Gümüş	30	Underground	7.45	13	10.9	7.13	5.42

4. The MSE value for the YSA model calculated with Amasya nitrate data was calculated to be 220.45 and 13.57 respectively. The MSE value was also found to be smaller than the observed data and the performance was better.

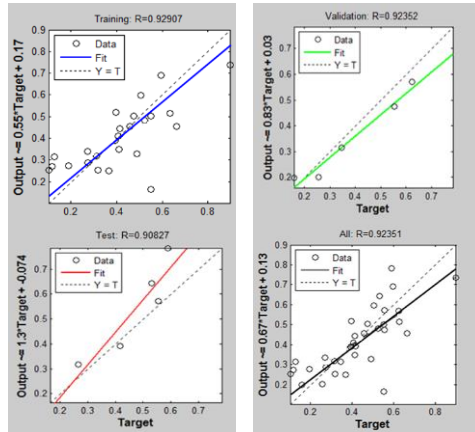


Figure 3. Results (training, validation, test and all) by ANNs

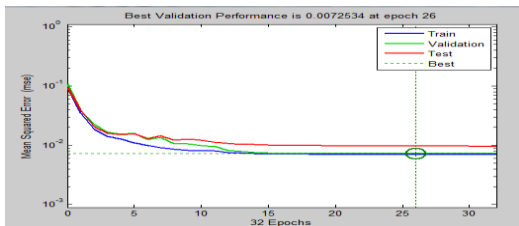


Figure 4. Performance related to learning, validation and test data

Table 2. Nitrate analysis predict year for 2020 and 2030.

	Nitrate Values			
	Min	Max	Average	ANNs
2010	0.341	77.70	17.87	15.636
Nitrate analysis Predict Year (2020 and 2030)				
2020	16.99			
2030	17.75			

Finally, long-term estimation of the nitrate value rates in line with the levels of education over the period between 2020 and 2030 is calculated by the model; and these results are shown in Table 2.

This study illustrates the usefulness of ANNs for the evaluation of complex data in water-quality assessment, and pollution sources, for effective water-quality management. In order to prevent nitrate pollution, it is necessary to monitor the nitrate values in this area and to obtain the required nitrates.

The designed, trained, validated neural network model is powerful enough to predict nitrate. It would be better to compare the data obtained with the longer-term data by

increasing the number of stations and the estimation methods (ANNs, ARIMA Model and Multi-Layer Perceptron (MLP) Model for time series forecasting). Thus, with the proposed ANNs application in the current study, surface water and groundwater resources can be managed in a more cost-effective and easy way.

In this study, we described the application of Artificial Neural Networks to the task of nitrate values prediction. We described the theory behind ANNs and our Neural Network model.

ACKNOWLEDGEMENT

Authors are thankful to anonymous reviewers whose suggestions have greatly improved of this article. This work was presented at the National Ecology Symposium in Sinop on 6-9 May 2015.

REFERENCES

- [1] McNeely R.N., Neimanis V.P. and Dwyer L., “Water quality sourcebook: a guide to water quality parameters”. Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Ottawa. (1979).
- [2] Ritter W.F. and Chirnside A.E.M., “Impact of land use on groundwater quality in Southern Delaware”, *Ground Water*, 22: 38–47, (1984).
- [3] Hem J.D., “Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water L: US”, Geological Survey water-supply paper 2254. US Geological Survey, Alexandria, (1985).
- [4] WHO, “Health hazards from nitrate in drinking-water. Report on a WHO meeting”, Copenhagen, 5–9 March 1984. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe (Environmental Health Series No. 1). (1985).
- [5] Ecetoc, “Nitrate and drinking water”. Brussels, European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals (Technical Report No. 27). (1988).
- [6] Wise, “Water Note 3 Groundwater at Risk: Managing the water under us”, http://ec.europa.eu/environment/water/participation/pdf/waternotes/water_note3_groundwateratrisk.pdf (2016).
- [7] Technical Assistance for the Implementation of Nitrate Directive, “Technical Assistance for the Implementation of Nitrates Directive in Turkey”. <http://nitrat.tarim.gov.tr/TarimsalCevre.Portal>. (2016).
- [8] Büyük G., Erhan A.K.Ç.A., Takashi K.U.M.E. and Nagano T., “Investigation of Nitrate Pollution in Groundwater Used for Irrigation in Konya Karapınar Region, Central Anatolia”, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi*, 19(2): 168-173. (2016).
- [9] Ertaş N., Gönülalan Z., Yıldırım Y., Serhat A.L. and Karadal F., “Kayseri Bölgesi Kuyu Sularındaki Nitrat ve Nitrit Düzeyleri”. *Journal of Faculty of Veterinary Medicine, Erciyes University*, 10(1), (2013).
- [10] Bulut, C., Atay, R., Uysal, K., and Köse, E., “Çivril Gölü yüzey suyu kalitesinin değerlendirilmesi”, *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi-C, Yaşam Bilimleri ve Biyoteknoloji*, 2: 1-8. (2012).

- [11] O'Shea, L., and Wade, A. "Controlling nitrate pollution: An integrated approach", *Land Use Policy*, 26(3): 799-808, (2009).
- [12] Ribbe L., Delgado P., Salgado E. and Flügel W.A., "Nitrate pollution of surface water induced by agricultural non-point pollution in the Pochochay watershed, Chile", *Desalination*, 226(1): 13-20, (2008).
- [13] Strik D., Domnanovich A.M., Zani L., Braun R. and Holubar P., "Prediction of trace compounds in biogas from anaerobic digestion using the Matlab Neural Network Toolbox". *Environ. Modell. Softw.* 20:803-10, (2005).
- [14] Şengörür B. and Öz C., "Determination of the effects of water pollution of aquacultures using neural networks". *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26(2): 95-106, (2002).
- [15] Garcet J.P., Ordonez A., Roosen J. and Vanclooster M., "Metamodelling: Theory, concepts and application to nitrate leaching modelling", *Ecological Modelling*, 193(3): 629-644, (2006).
- [16] Yesilnacar M.I., Sahinkaya E., Naz M. and Ozkaya B., "Neural network prediction of nitrate in groundwater of Harran Plain, Turkey", *Environmental Geology*, 56(1): 19-25, (2008)
- [17] O'Shea L. and Wade A., "Controlling nitrate pollution: An integrated approach", *Land Use Policy*, 26(3): 799-808, (2009).
- [18] Kunkel R., Kreins P., Tetzlaff B. and Wendland F., "Forecasting the effects of EU policy measures on the nitrate pollution of groundwater and surface waters", *Journal of Environmental Sciences*, 22(6): 872-877, (2010).
- [19] Peña-Haro S., Llopis-Albert C., Pulido-Velazquez M. and Pulido-Velazquez D., "Fertilizer standards for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture: El Salobral-Los Llanos case study, Spain", *Journal of Hydrology*, 392(3): 174-187, (2010).
- [20] İleri S., Karaer F., Katip A., Onur S.S. and Aksoy E., "Assessment of some pollution parameters with geographic information system (GIS) in sediment samples of Lake Uluabat, Turkey", *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 8(22), (2014).
- [21] Aguilera P.A., Frenich A.G., Torres J.A., Castro H., Vidal J.M. and Canton M., "Application of the Kohonen neural network in coastal water management: methodological development for the assessment and prediction of water quality", *Water Research*, 35(17): 4053-4062, (2001).
- [22] Palani S., Liong S.Y. and Tkalich P., "An ANN application for water quality forecasting", *Marine Pollution Bulletin*, 56(9): 1586-1597, (2008).
- [23] Singh K.P., Basant A., Malik A. and Jain G., "Artificial neural network modeling of the river water quality—a case study", *Ecological Modelling*, 220(6): 888-895, (2009).
- [24] State Institute of Statistics, "*Statistical Year Book of Turkey*". DIE, Ankara. (2000).
- [25] DSI, "*Yeşiltirmak Basin Plans*", Superior Water Quality Monitoring. http://www.yesilirmak.org.tr/userfiles/file/HARITA_20_1.pdf, (2016).
- [26] Lobbrecht A.H., Dibike Y.B. and Solomatine D.P., "*Applications of Neural Networks and Fuzzy Logic to Integrated Water Management*" 173. Project Report. (2002).
- [27] Öztemel E., "*Artificial Neural Networks*", Papatya Press, İstanbul, (2006).
- [28] TS 266, "*Water intended for human consumption*", Turkish Standards Institution. (2005).
- [29] Council Directive 98/83/EC, "*Official Journal of the European Communities. on the quality of water intended for human consumption*". L 330/32. (1998).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Yüksek performanslı harç üretiminde optimum nano malzeme oranlarının belirlenmesi

The determination of the optimum nano materials ratios in production of high performance mortar

Yazarlar (Authors): Akbar SERVATMAND¹, Osman ŞİMŞEK²

ORCID¹: 0000-0001-5605-4698

ORCID²: 0000-0003-3842-5541

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Servatmand A. ve Şimşek O. "Yüksek performanslı harç üretiminde optimum nano malzeme oranlarının belirlenmesi", *Politeknik Dergisi*, 21(2): 327-332, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.399080

Yüksek Performanslı Harç Üretiminde Optimum Nano Malzeme Oranlarının Belirlenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Akbar SERVATMAND*, Osman ŞİMŞEK

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Beşevler, Ankara, Türkiye
(Geliş/Received : 28.02.2017 ; Kabul/Accepted : 26.07.2017)

ÖZ

Sürdürülebilirlik açısından betonarme altyapı elamanlarında bazı sebeplerden ötürü bozulmalar oluşmaktadır. Bu bozulmaların tamir ve onarımında yüksek dayanımlı tamir harcı üretimi konusunda araştırmalar artmıştır. Bunun nedeni kısa sürede bozulan altyapı betonarme elamanlarının tamir ve onarımının daha az maliyetli olmasından kaynaklanmaktadır. Çalışmada yüksek performanslı tamir ve onarım harçları üretim amacıyla üç farklı nano malzeme çimento ağırlığının % 0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında ilave edilir iken karışıma giren bağlayıcının %55'i oranında UK ikame edilmiştir. Her bir karışım için 28 günlük basınç dayanımı için üçer tane 50×50×50 mm küp numuneler hazırlanmıştır.

Genellikle nano silikat ve nano alüminat bütün karışım oranlarında yaklaşık olarak birbiriyle paralellik göstermiştir. Nano silikat ve nano alüminat %1 oranında kullanıldığında maksimum basınç dayanımını kazanırken, nano kalsit %0.5 oranında kullanıldığında maksimum basınç dayanımı değerini vermiştir. Nano malzemeler birbiri ile kıyaslandığında en yüksek dayanımı 97,86 MPa ile %1 oranı ile hazırlanan nano silikatlı numuneler verirken, en düşük dayanımı 54,32 MPa ile %0,5 oranı ile hazırlanan nano alüminatlı numuneler vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Nano Silikat, Uçucu kül, Yüksek performanslı beton, onarım harcı.

The Determination of the Optimum Nano Materials Ratios in Production of High Performance Mortar

ABSTRACT

In terms of sustainability reinforced concrete infrastructure elements deteriorate for some reasons.. The research on the production of high performance repair mortars in the repair of these deteriorations has increased rapidly. The reasons for this is the use of nanomaterials at certain rates in the production of repair mortar and its great advantage of high performance in a short time. In the study, three different nano materials were added at 0.5%, 1%, 1.5% and 2% of the weight of the cement for the production of high performance repair and repair mortars, while the admixture binder was 55% UK substituted. Samples of 50 × 50 × 50 mm cubes were prepared for 28 days compressive strength for each mixture. Generally, with the nano-silicate and nano-aluminate mixtures had approximately parallel results to each other in all mixture ratios. Nano-silicate and nano-aluminate mixtures gave the maximum compressive strength when used at 1% whereas nano-calcite mixture gave the maximum compressive strength when used at 0.5% ratio. When the nano materials compared with each other, nano-silicate samples prepared at 1% ratio gave the highest strength of 97,86 MPa, while the nano-aluminate samples prepared at 0

ile arasında kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Bu.5 ratio gave the lowest strength of 54,32 MPa .

Keywords: Nano silicate, fly ash, high performance concrete, repair mortar.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sürdürülebilirliğin esası doğayı tahrip etmeden, mevcut olan kaynakların dengeli bir biçimde tüketilmesidir. Genellikle, betondan yapılmış altyapılar için servis süresi yaklaşık 50 yılın üzerindedir. Ama son zamanlarda tabiat etkileri ve yeterli kalitede üretilemeyen altyapıların servis ömrü azalmaktadır [1]. Bu altyapı elemanlarının servis ömürlerindeki kısalma nedeniyle bu yapılarda kullanılan tamir harçlarında yüksek dayanımın önemi ortaya çıkmıştır [2, 3]. Ama son zamanlarda inşaat maliyetlerinde meydana gelen artışla var olan yapıların yeniden yapılmaksızın tekrar onarılmasının önemini ortaya koymuştur [4]. Yüksek dayanımlı yapı onarım malzemelerinin geliştirilmesi beton yapıların açısından çok önemli olmuştur [5]. Yapı onarım malzemelerinin maliyetini düşürmek amacıyla çimento yerine uçucu

küllerin kullanılması onarım işlerinde artış göstermiştir. Beton karışımlarında çimento yerine kullanılan uçucu küller puzolanik etkiye sahiptirler ve 90. Günden sonra çimentonun yapacağı dayanıma benze dayanımlar veren atık ürünlerdir [6]. Uçucu kül tanelerinin boyutları 0,01-100 µm arasında olup yoğunluğu 2,6 g/cm³ civarında olan malzemedir [7]. ASTM C 618 [8]'e göre UK'lerin S+A+F miktarı toplamı %70 'in üzerinde ise UK'ler F sınıfı, S+A+F miktarı toplamı %50 'in üstünde ise UK'ler C sınıfı olarak isimlendirilir. Portland çimentosunun hidratasyonu sonunda meydana gelen kalsiyum hidroksit reaksiyonlar çimentonun hidratasyon işleminden daha uzun bir sürede meydana gelir [9, 10]. Uçucu küllerin ilk yaş dayanımlarında çok fazla dayanıklılık gösterememesi fakat ilerki yaşlarda dayanım göstermesi sonucu nano malzeme kullanılarak ilk yaş dayanımlarında artış meydana getirmek için birçok araştırmacı çalışmalar yapmıştır. [11,12].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : servatmand.akbar@gmail.com

Nano Teknolojinin her alanda kullanılmasının sonucunda beton teknolojisinde nano kullanılması kaçınılmaz olmuştur [13,14]. Beton teknolojisinde kullanılan nano malzemelerin uygulanabilirliği ve yapılan çalışmalarla beton dayanımına katkısı gün geçtikçe artmaktadır.

Çimento esaslı kompozitlerin oluşturulmasında kullanılan nano malzemelerden bazıları magnetik nano tanecikleri ve nano TiO₂ [15,16,17] olarak söylenebilir. Çok yüksek mukavemete sahip betonlar için karışımında kullanılacak malzemelerin taneciklerinin ince olması önemlidir. İnce tanecikli malzemeler kullanılan betonun mukavemeti de normal betondan daha çok olacaktır [17,18].

Beton ile yapılan son çalışmalarda kullanılan nano alümine, nano kalsit ve nano silikanın normal betona göre beton mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir [19]. Nazari ve Riahi'nin [20,21] akademik yayınlarında ağırlık olarak çimento yerine %4'e varan miktarlarda nano-silika kullanılması sonucunda beton numunelerinin basınç dayanımlarında belli oranda artış meydana gelmiştir. Doğada bulunan kalsitin nano olarak üretilmesinde bazı metotlar kullanılabilir. Bunlar; öğütme, ezme ve eleme metotlarıdır. Doğal halde var olan kalsitin saflığı ve değeri yeterli olmamaktadır [22]. Bundan ötürü farklı bir metot olan kristalleşme yöntemi kullanılarak doğal kalsit nano kalsit olarak yeniden üretilebilir. Nano kalsit üretimi için gerekli malzemeler doğada mevcut olduğundan dolayı kristalleştirme metodu uygulanarak istenilen CaCO₃ üretilebilir [22,23]. Kalsit, betonda dayanım açısından belli oranda iyileştirme yaptığından ötürü tamir harçlarında dolgu malzemesi olabilir. Kalsitin betonun dayanımına etkisini C₃A bakımından zengin olan çimentolarla reaksiyona girip karboalüminat oluşturması söylenebilir [24]. Kalker tozu ikamesinin artmasıyla betonun taze halde işlenebilirliğinin arttığı ve daha homojen bir yapı ortaya çıktığı görülmüştür [25,26].

Bu çalışmada karışıma giren çimento ağırlığının 4 farklı % oranda, nano-silika, nano alümine ve nano kalsit katılarak, optimum nano malzeme oranlarını belirlemek için basınç dayanımları incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Malzemeler (Materials)

Bu deneysel çalışmada 400 µm boyutunda silisli kum, çimento, Kangal C sınıfı uçucu külü, kalsiyum format, nano silika, nano alüminat ve nano kalsit kullanılmıştır.



Şekil 1. Çalışmalarda kullanılan uçucu kül, çimento, silis kumu ve kalsiyum format [27] (Fly ash, cement, silica sand and calcium formiat used in the study)



Şekil 2. YPLDÇK karışımlarında kullanılan nano malzemeler [27] (Nano materials used in mixtures)

Bu harç bileşim malzemeleri belirli oranlarda karışımlar hazırlanarak 50 mm boyutunda küp deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan harç numunelerine 28 gün sonra basınç dayanımı testi uygulanmıştır.

Araştırmada kullanılan çimento, uçucu kül ve silis kumun teknik özellikleri Çizelge 1 'de verilmektedir. Çizelge 2' de kullanılan Nano malzemelerinin fiziksel ve kimyasal analizinin özeti ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir.

Çizelge 1 Araştırmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri [27] (physical and chemical properties of materials used in the study)

Kimyasal Özellikler	PÇ52,5 Beyaz	UK	Silis Kumu 400 (SK)	Nano Kalsit (nK)
CaO (%)	65.70	29,85	0.05	98.88
SiO ₂ (%)	21.60	33,26	99.31	0.4-0.1
Al ₂ O ₃ (%)	4.05	12,88	0.29	0.4-0.1
Fe ₂ O ₃ (%)	0,26	5,36	0.05	0.5-0.1
MgO (%)	1.30	2,55	-	0.5-0.1
SO ₃ (%)	3.30	4,90	-	-
K ₂ O (%)	0,35	0,95	0.02	-
Na ₂ O (%)	0,32	0,33	-	-
Kızdırma Kaybı (%)	3.20	4,65	0.09	13.50
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	25.91	51,5	99.65	1.3-0.3
Fiziksel Özellikler				
Yoğunluğu (g/cm ³)	3.06	2.13	2.65	-
Blaine İnceliği (cm ² /g)	4600	2698	-	2μ
Hacim genişmesi(mm)	1.00	-	-	-
90 μm elek üstü (%)	5. 18	17,58	63.22	-
45 μm elek üstü (%)	22,22	33,42	94,68	-

Çizelge 2. Araştırmada kullanılan Nano Al₂O₃ ve Nano SiO₂ malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri [27] (Physical and chemical properties of Nano Al₂O₃ and Nano SiO₂ used in the study)

Özellikler	Nano Al ₂ O ₃	Nano SiO ₂
APS	20 nm	15-20nm
SSA:	~150 m ² /g	~300m ² /g
Yapısı	Hemen hemen küresel	Gözenekli
Renk	Beyaz	Beyaz
Yogunluk:	3890 kg/m ³	Gerçek Yogunluk Birim Hacim Ağırlığı
		2.4 g/cm ³ <0.05 g/cm ³
Ultraviyole Reflektivite	-	>85%
Hidroksil İçeriği	-	>45%
Ca	<25	<20
Al	-	<20
Fe	<80	<10
Cr	<4	-
Mg	-	<10
Na	<70	-
Mn	<3	-
CO	<2	-
Cl	-	<10

Çizelge 3. 1 m³ için nano malzemesi karışım miktarları (Nano materials mixture quantities for 1 m³)

Malzeme	Nano Aluminat				Nano Kalsit				Nano Silikat			
	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2
Silis Kum	486	487	488	489	486	486	486	486	481	476	472	467
Çimento	533	532	530	528	533	530	527	525	527	517	512	505
Su	328	329	329	330	328	328	328	328	325	321	318	315
Uçucu Kül	652	650	648	645	651	648	645	641	645	635	626	617
Nano	6.07	12.18	18.30	24.45	6.07	12.14	18.20	24.29	6.01	11.90	17.68	23.35
Akışkanlaştırıcı	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2
Kalsiyum Format	24.31	24.35	24.40	24.45	24.28	24.28	24.29	24.29	24.00	23.81	23.60	23.35
Bağlayıcı	1216	1218	1220	1223	1214	1214	1214	1214	1202	1187	1179	1168

2.2. METOT (METHOD)

Karışımlarda su/ çimento oranı 0,62, Uçucu kül / bağlayıcı oranı 1,22 oranlarda sabit olarak alınmış ve karışıma giren malzeme miktarları Çizelge 3'de verilmiştir. Bu malzemeler ile 50 mm boyutunda küp numunesi hazırlanmıştır. Basınç dayanımı testi ASTM C39/C39M [28] standardına uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 3. Basınç dayanımı test cihazı (Compressive strength test machine)



Şekil 4. Basınç testi sonrası numunelerin görüntüsü (The view of the samples after being subjected to compressive strength test)

3. BULGULAR VE TARIŞMA (FINDINGS and DISCUSSION)

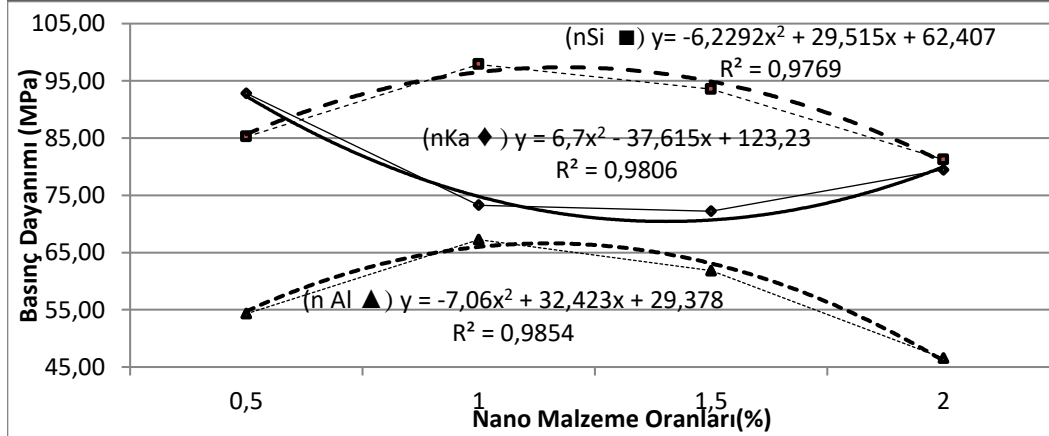
Çalışmada nano malzemelerin optimum karışım oranını belirlemek için çimento ağırlığının yüzdesi olarak 0,5, 1, 1,5 ve 2 oranlarında nano kalsit, nano silikat ve nano alümine katılarak üçer adet küp numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı incelenmiştir. Bu karışımlar içinde en yüksek basınç dayanımını veren nano malzeme optimum olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 4 ve Şekil 1 incelendiğinde nano alüminatlı karışım oranlarıyla üretilen numunelerin en yüksek basınç dayanımını 67,25 MPa ile %1 nano alüminatlı numuneler vermiştir. Katkı oranı basınç dayanımı ilişkisi ikinci derece polinom denklemi $y = -7,06x^2 + 32,423x + 29,378$ olur iken R^2 'si 0,9854 olarak hesaplanmıştır. Basınç dayanımı ile katkı oranı arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu söylemek zorda olsa, çimento ağırlığının % 1 oranı optimum olarak saptanmıştır. En düşük basınç dayanımı 46,53 MPa ile %2 oranıyla üretilen karışımlar vermiştir.

Çizelge 4 ve Şekil 5 incelendiğinde nano kalsitli karışım oranlarıyla üretilen numunelerin en yüksek basınç dayanımı 92,82 ile %0,5 nano kalsitli numuneler vermiştir. Katkı oranı basınç dayanımı ilişkisi ikinci derece polinom denklemi $y = 6,7x^2 - 37,615x + 123,23$ olur iken R^2 'si 0,9806 olarak hesaplanmıştır. Basınç dayanımı ile katkı oranı arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu söylemek zorda olsa, çimento ağırlığının %

Çizelge 4. Numunelerin basınç dayanımları sonuçlarının istatistiksel değerlendirilmesi (Statistical evaluation of compressive strength results of samples)

	Nano Alüminat Karışım Basınç Dayanımı (MPa)				Nano Kalsit Karışım Basınç Dayanımı (MPa)				Nano Silikat Karışım Basınç Dayanımı (MPa)			
	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2
Oranlar (%)												
Min	51,32	63,19	58,89	43,6	90,91	72,64	68,38	77,86	80,89	95,11	92,54	74,89
Max	55,91	70,4	64,22	48,5	94,42	73,97	74,62	81,66	88,58	99,54	94,67	85,58
St.Sapma	2,60	3,69	2,71	2,59	1,78	0,67	3,36	1,97	3,95	2,40	1,07	5,62
Ort	54,32	67,25	61,84	46,53	92,82	73,26	72,22	79,46	85,25	97,86	93,55	81,25



Şekil 5. Karışımlarda nano malzeme oranı ve basınç dayanımı ilişkisi (The relationship between nano material ratio and compressive strength in mixtures)

0,5'ini veren oran optimum olarak saptanmıştır. En düşük basınç dayanımı 72,22 MPa ile %1,5 oranıyla üretilen karışımlar vermiştir.

Çizelge 4 ve Şekil 5 incelendiğinde nano silikatlı karışım oranlarıyla üretilen numunelerin en yüksek basınç dayanımını 97,86 MPa ile %1 nano silikat numuneler vermiştir. Katkı oranı basınç dayanımı ilişkisi ikinci derece polinom denklemi $y = -6,2292x^2 + 29,515x + 62,407$

olur iken R^2 'si 0,9769 olarak hesaplanmıştır. Basınç dayanımı ile katkı oranı arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu söylemek zorda olsa, çimento ağırlığının % 1'ini veren oran optimum olarak saptanmıştır. En düşük basınç dayanımı 81,25 MPa ile %2 oranıyla üretilen karışımlar vermiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Genellikle nano silikat ve nano alüminat bütün karışım oranlarında yaklaşık olarak birbiriyle paralellik göstermiştir.

Nano silikatlı karışımlarda en yüksek basınç dayanımını 97,86 MPa ile sağlayan %1 nano silikat oranı optimum olarak belirlenmiştir.

Nano alüminatlı karışımlarda en yüksek basınç dayanımını 67,25 MPa ile sağlayan %1 nano alümina oranı optimum olarak belirlenmiştir.

Nano kalsitli karışımli karışımlarda en yüksek basınç dayanımını 92,82 MPa ile sağlayan % 0,5 nano kalsit oranı optimum olarak belirlenmiştir.

Bu üç nano malzeme içinde en yüksek basınç dayanımını nano silikatlı karışımlar vermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Toklu, K., Şimşek, O., "Investigation of mechanical properties of repair mortars containing high-volume fly ash and nano materials" *Journal of Australian Ceramic Society*, <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0150-7>, (2017).
2. Cilason N., "Quality assurance and quality control for concrete in hot climates "- Paper submitted to Rilem, *9th International Symposium*, Torquay, England, 167-71, September 21-25 , (1992).
3. Alexander M.G., Stanish K., "Durability design and specification of reinforced concrete structures using a multi-factored approach. *CONMAT'05*, 10, (2005).
4. Mehta P.K., Burrows R.W., "Building durable structures in the 21st century" *Conc Int*, 23(3), 57-63, (2001).
5. Vecchio F., Bucci F., "Analysis of repaired reinforced concrete structures," *ASCE Str Eng*, 125(6), 644-652, (1999).
6. Aruntaş, H.Y., "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli "*Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 06500 Ankara, 21(1): 193-203, (2006).
7. Şengül Ü., "Uçucu Kül ve Çevresel Etkileri", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1): 89-104, (2001).
8. ASTM C 618, "Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete", *ASTM*, (2001).

9. Şimşek, O., "Beton ve Beton Teknolojisi", *Seçkin Yay. San. ve Tic. A.Ş.*, Ankara, 5: 50-62, (2016).
10. Hearn, N., Hooton, R. D., and Mills, R. H., "Pore Structure and Permeability", *Concrete and Concrete-Making Materials*, Edited by: Klieger, P. and Lamond, J., *ASTM STP 169C*, 240-262, (1994).
11. Federal Highway Administration (FHWA), *Manual of Practice "Materials and procedures for rapid repair of partial-depth spalls in concrete pavements"*, 135, (1999).
12. Li, M., and Li, V. C., "High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites for Fast, Durable Concrete Repair – Material Properties," *ACI Materials Journal*, 108(1): 3-12. (2011).
13. Turan, O., " Bir Fırsat Penceresi: İnşaat Sektöründe Nanoteknoloji", *Beton Prefabrikasyon Dergisi*, 97, (2011).
14. Belytschko T, Xiao SP, Schatz GC, Ruoff R." Atomistic simulations of nanotube fracture" *Phys Rev B*; 65(23):235430-7, (2002).
15. Pekmezci,B.,Y., ve Atahan, H.,N., "Kimyasal ve Nano Katkılar: Betonda Kullanımı ve Beton Performansına Etkileri", 01/2013, s. 239-263, Beton 2013: *Hazır Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 21.02.2013 - 23.02.2013, (Çağrılı Bildiri _ Invited Paper)
16. Blyszko, W. Kiernozycki, N. Guskos, G. Zolnierkiewicz, J. Typek, U. Narkiewicz, M. Podsiadly, (2008). Study of mechanical properties of concrete with low concentration of magnetic nanoparticles, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354: 35–39, (2008),
17. Li, H., Xiao, H., Yuan, J., Ou, J., "Microstructure of Cement Mortar with Nano- Particles", *Composites: Part B: Engineering*, 35:185-189, (2004).
18. Collepardi, S., Borsoi, A., Olagot, J.J.O., Troli, R., Collepardi, M., Curzio, A.Q., "Influence of Nano-Sized Mineral Additions on Performance of SCC", *6. International Congress, Global Construction*, Ultimate Concrete Opportunities, Dundee, U.K, (2012).
19. Makar JM, Beaudoin JJ. "Carbon nanotubes and their applications in the construction industry", In: Bartos PJM, Hughes JJ, Trtik P, Zhu W, editors. *Nanotechnology in construction, Proceedings of the 1st international symposium on nanotechnology in construction. Royal Society of Chemistry*; 331–41, (2004).
20. Nazari, A. and Riahi, S., "Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles" *Materials Science and Engineering A*, 527, 7663–7672, (2010).
21. Nazari, A. and Riahi, S. "The role of SiO₂ nanoparticles and ground granulated blast furnace slag admixtures on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete" *Materials Science and Engineering A*, 528, 2149–2157, (2011).
22. Özdemir K.S. ve Özdemir E., "Delikli nano CaCO₃ üretimi", *3. Sanayi Şurası*, Ankara, (2013).
23. Ukrainczyk, M.; Kontrec, J.; Babic-Ivancic, V.; Brecevic, L.; Kralj, D., *Powder Technology*, 171, 192, (2007).
24. Shah SP, Konsta-Gdoutos MS, Metaxa ZS, Mondal P., "Nanoscale modification of cementitious materials" In: Bittnar Z, Bartos PJM, Nemecek J, Smilauer V, Zeman J, editors. 51, (2009).

25. Matschei T., Lothenbach B., Glasser F.P., "The role of calcium carbonate in cement hydration" *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, pp. 551–558, (2007).
26. Gökçe, M., Dalmıs, K., Simsek, O., "Farklı Tip Akiskanlaştırıcı Katkı ile Değişik Oranlarda Mermer Tozu İkame Edilen Betonların Performansları" *Yapılarda Kimyasal Katkılar 3. Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 215-224, (2009) Toklu, K., Baharavar, S., Şimşek, O., 'Uçucu kül içeren yüksek performanslı güçlendirme harcında nano silikatin etkisi', *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5, 1. (2017).
27. ASTM C39/C39M, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *For Annual Book of ASTM Standards volume information*, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Detection of the vehicle direction with adaptive threshold algorithm using magnetic sensor nodes

Yazar(lar) (Author(s)): Sercan VANÇİN¹, Ebubekir ERDEM²

ORCID¹: 0000-0003-1420-2490

ORCID²: 0000-0001-7093-7016

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Vancin S. and Erdem E., “ Detection of the vehicle direction with adaptive threshold algorithm using magnetic sensor nodes”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 333-340, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389586

Detection of the Vehicle Direction with Adaptive Threshold Algorithm Using Magnetic Sensor Nodes

Araştırma Makalesi / Research Article

Sercan VANÇİN^{1*}, Ebubekir ERDEM¹

¹Firat University, Computer Engineering Department, Elazığ, Türkiye

(Received : 12.03.2017 ; Accepted : 20.12.2017)

ABSTRACT

In this paper, we describe how, so as to perform vehicles direction detection in road traffic using proposed method along with the average-constant threshold and contributions of adaptive threshold detection algorithm (ATDA) thanks to special-purpose sensor nodes integrated with magnetic sensors. In this study, proposed algorithm with the adaptive threshold value as a magnetic resultant force has produced more pronounced and precise results than the average-fix threshold value. In this mean, it is clear that detected adaptive threshold generates more correct result for the systems like vehicle existence, direction assignment, and speed detection in different grounds where magnetic field is changeable as a result of environmental measurements. The direction of motion of the vehicles on the x-axis was determined as well as whether it was from left to right or from right to left, and the results were 97% average accurate. The simplicity of the proposed algorithms, the absence of any complex computations, the low cost of the sensor node and integration and the low power depletion of the communication system show the advantage of this system in comparison with the other studies.

Keywords: Wireless sensor networks, magnetic sensor, adaptive threshold detection algorithm (ATDA), vehicle direction detection.

ÖZ

Bu çalışmada, manyetik algılayıcılarla entegre özel amaçlı sensör düğümleri sayesinde, ortalama sabit eşik ve adaptif eşik algılama algoritmasının (ATDA) katkılarıyla birlikte, önerilen yöntem kullanılarak trafik yollarında araç yönü algılamasının nasıl yapılacağı anlatılmaktadır. Bu çalışmada uyarlanabilir eşik değeri manyetik sonuç kuvveti olarak önerilen algoritma, ortalama düzeltme eşik değeri daha belirgin ve kesin sonuçlar vermiştir. Bu anlamda, tespit edilen uyarlanabilir eşik, çevresel ölçümler sonucunda manyetik alanın değiştirilebildiği farklı gerekçelerdeki araç varlığı, yön tahsisi ve hız tespiti gibi sistemler için daha doğru sonuç ürettiği açıktır. Araçların x-ekseni üzerindeki hareket yönü, soldan sağa mı yoksa soldan sağa mı doğru belirlendi ve sonuçların ortalaması% 97 çıkmıştır. Önerilen algoritmaların basitliği, herhangi bir karmaşık hesaplamasının olmaması, sensör düğümünün düşük maliyeti ve entegrasyon ve iletişim sisteminin düşük güç tüketmesi diğer çalışmalara kıyasla bu sistemin avantajını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz algılayıcı ağlar, manyetik sensör, adaptif eşik algılama algoritması (AEAA), araç yönü algılama

1. INTRODUCTION

Wireless sensor networks (WSNs) are a developing technology and has great potential to be employed in critical situations [1]. The key advantage of WSNs is that the network can be deployed easily and can operate unattended, without the need for any pre-existing infrastructure and with little maintenance [2]. Figure 1 presents a WSN architecture. The sensor is also referred to as the detector or probe, as well as the elements that perform the sensing process in electronic applications.

The main components of the sensor node are the microcontroller, transceiver, power supply, memory, and one or more sensor components. There are many types of nodes used in the market to create wireless sensor networks, such as TelosA, TelosB, Mica2, MicaZ, eMote, IMote2, and Sensenode [3-5]. Which direction of the vehicles moving towards in the traffic, is important in terms of traffic safety and management. It is possible drivers and traffic officers to obtain direction information of the vehicles and to provide traffic coordination, which can significantly reduce traffic accidents. So, in this study, the direction of vehicles in traffic, was determined

by means of magnetic sensor. In this work, sensor nodes capable of working in a number of convenient ways have been used and installed sensor sensors using magnetic sensors (HMC5983L) placed on them. These sensor nodes used are less costly than market nodes such as TelosB or MicaZ. With the help of these sensor circuits, the direction of any vehicle passing by is firstly determined by the fixed threshold value and then by the adaptive threshold value detection algorithm. In this study, adaptive threshold detection algorithm is used unlike other study. This demonstrates the our contribution of the paper. Direction of vehicles is detected using both fixed and adaptive threshold algorithm, were compared the results of the algorithms with each other. It has been obtained nearly 100 % accuracy rate with adaptive threshold algorithm. The use of the sensor node optimally and a precise threshold algorithm shows the superiority of this work. Furthermore, the use of sensor nodes and proposed energy efficient algorithm clearly demonstrates the difference from other studies and the novelty of this study.

* Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-mail : svancin@firat.edu.tr

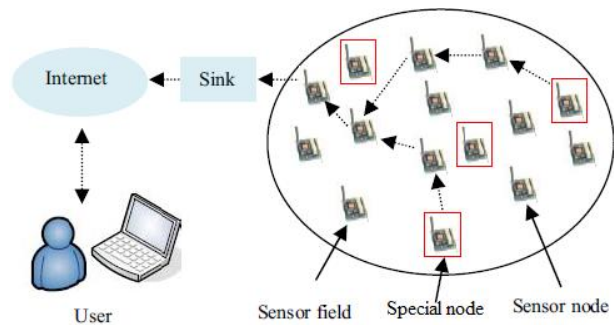


Figure 1. A WSN architecture

The rest of the paper can be listed as follows. Section 2 shows the previous work on the subject. In section 3, the system concept is explained in detail by explaining the concept of magnetic sensors and the scenario considered. The adaptive threshold value algorithm is described in section 4. Experimental results and system analysis are presented in section 5. Finally, the results of this study and the proposals on the study are discussed in section 6.

2. RELATED WORK


In many studies, on behalf of detection, finding direction, speed, recognition of the vehicles, sensor node systems have been developed. Anisotropic magnetoresistive sensor (AMR) and microphone sensor were used to investigate the vehicles road direction detection and traffic situation of any road [6]. In addition, a wireless sensor with a magnetometer sensor was used using an acoustic sensor [7], an ultrasonic sensor [8], and video camera analysis systems or arial images [9]. The detected magnetic field over a certain threshold value was measured on the time axis as a signal, Vehicle detection and various applications like monitoring parking system of the vehicle or vehicles moving on the roads have been developed [10]. Another study examined a real-time traffic control system using wireless sensor networks [11]. In one study, traffic monitoring system was proposed as a system integrated with mobile data monitoring and management [12]. Wireless sensor networks have been used to detect vehicles using multiple sensors, and vehicles are classified as light, medium and heavy vehicles [13]. An optimal partitioned sample-based classification and regression tree algorithm (CART) has been proposed to classify and find the direction of the vehicles on the road [14]. The motion artificial neural network method for mod-based vehicle recognition is proposed in [15]. The paper [16] presents an intelligent vehicle identification system used within a complete solution for a traffic monitoring system that uses a novel wireless sensor network architecture to monitor traffic with vehicle direction detection. In a study, the system will estimate and track the target based on the spatial differences of the target signal strength detected by the sensors at different locations. Magnetic and acoustic sensors and the signals captured by these sensors are of present interest in the study. The system is made up of three components for detecting and tracking the moving objects [17]. The paper [18] researches

monitoring free flow traffic using vehicular networks and vehicle types and directions. In another paper [19], authors survey recent progress in mobile WSNs and compare works in this field in terms of their models and mobility management methodologies. In a research paper [20] proposes an algorithm which not only determines green light duration dynamically but also handles the emergency vehicle management efficiently. It also handles the deadlock and starvation condition, which causes due arrival of emergency vehicle in repeated interval of time in traffic intersection. The paper presents a way to build a strong, secured wireless network in vehicle. The proposed method of encryption and decryption ensures that, sensor and actuator data is available only to required ECUs and not to any other unintended receiver [21].

3. PROPOSED ALGORITHM AND SYSTEM DESIGN

The main purpose of using magnetic sensors is not only to measure the magnetic field. There are many purposes such as detecting the vehicle, determining the type of the vehicle, determining the direction of the vehicle, finding the speed of the vehicle or detecting the presence of magnetic change. Direct measurements can not be made to achieve these goals or the correct result can not be reached with certain parameters. Conventional sensors such as temperature, pressure, light and voltage can convert the desired parameter directly into proportional voltage or current output. However, magnetic sensors can not directly detect direction, angle or electrical currents. First of all, the magnetic field that occurs or changes with the applied input becomes the subject matter. The current or iron derivative object in the copper wire causes a change in the magnetic field of the place. When the magnetic sensor senses magnetic field changes, it needs to pass through the signal processing process in order to convert the output signal to the desired parameter value. This process is a step that makes it difficult to use the magnetic sensor in many applications. However, a good understanding of the effects of these changes facilitates accurate and reliable results [10, 22].

There are many sensor types produced by Honeywell used in the market. HMC1001, 1002, 2003, 5983L are just a few of them. They are separated from each other by single, double or triple axis measurements.

We have used HMC5983L magnetic sensor in this study as seen in Figure 2. The main reason for using this sensor in this work is that it can be connected to the sensor node via  port and communicate in serial via pins.

M_X , M_Y and M_Z represent the magnetic force for each of the 3 axes is obtained by converting the 1-byte magnetic value in each X, Y, and Z data registers to the value in the decimal value, respectively. As a result, the resultant value (C_{RV}) is calculated with the help of equation 1.

$$C_{RV} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad (1)$$

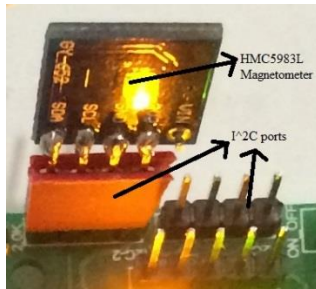


Figure 2. HMC5983L Magnetic Sensor

This C_{RV} value corresponds to the magnetic data $a(t)$ when adaptive threshold detection is performed. When the vehicle approaches the nodes, the value of C_{RV} rises. Because the vehicles abundantly contain metals such as iron, nickel or cobalt (ferrous mass) and change the ferromagnetic wave of the place [23]. Normally, the magnetic field of the place is about 500 mGauss and this value increases or decreases when the vehicle magnetic sensor passes near 0.5-0.75 m. If this C_{RV} value is divided by 256, the gaussian magnetic field value is computed. For example, if the C_{RV} value is 276, the magnetic field at that location means about 1.07 gauss. The magnetic change in all three axes causes the C_{RV} value to change. When the vehicle is detected with the HMC5983L magnetometer, the C_{RV} value is basically measured. If any road passes near this sensor circuit, which is placed on the side or center of the vehicle, the value of C_{RV} is measured above the predetermined threshold ($C_{threshold}$) and means there is a vehicle on the way. So the vehicle is detected.

A professional sensor circuit, which is used for vehicle direction detection systems during this operation, is shown in Figure 3 with its power card and battery connection. This sensor node's name is WiSeN and sold on the [24]. This node differs from other sensor nodes such as TelosB, MicaZ by the optional creation of hardware components.

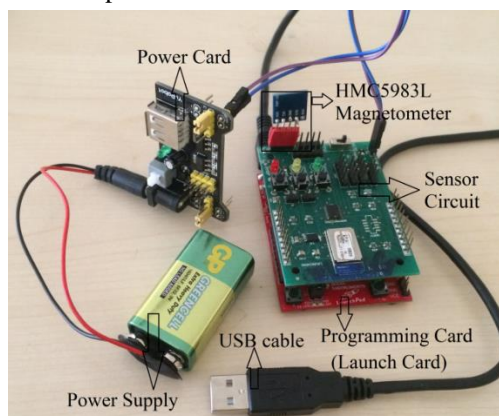


Figure 3. Sensor circuit designed for vehicle direction detection

On this sensor node, there are many connectors for convenience of SHT11 temperature, humidity sensor, EEPROM and operation. In addition, there is a UART1 connector to which the Sim900 node can be connected and a UART2 connector to which the serial port output can be monitored, which is used to transfer the data obtained by the sensor to the internet environment [25-27].

As can be seen from Figure 3, the HMC5983L (magnetic sensor) sensor, which is directly attached to the I^2C port of the sensor node, can be used as a 3-axis compass. When the sensor circuit is designed, the 3.3 volt output of the power board is connected to the Vcc pin of the sensor circuit. With a 12-bit ADC, the angle with respect to the magnetic poles of the earth can be found with 1-2 ° accuracy.

In addition, when a metal object is brought close to the compass sensors and the sensor nodes communicate over the I^2C protocol. When the sensors are programmed, the values of all the axes of the sensor are read, and the resultant value (C_{RV}) is calculated by the formula in equation 1. If the sensor is not used as a compass but only the magnetometer is influenced by other objects, the resultant value is sufficient. Here, the resultant value is different in each environment, but the value changes when a metal object is approximated. In this way, the metal objects around the sensor can be understood.

In this study, firstly, it was determined based on the magnitude of the magnetic wave and the duration of the vehicle's proximity to the sensor node. Secondly, the adaptive threshold value algorithm is applied to the proposed system to determine the direction of the vehicles.

In the first application, a fixed threshold value [27] based on a threshold value assumption is based on a very small average of the threshold values obtained in experiments on 100 vehicles.

In order to make vehicle detections and to make more precise and accurate measurements, one wireless sensor node is placed in the middle of the road. In this study, the magnetic information and the magnetic resultant force (C_{RV}) value are found using equation 1. The magnetic sensor is connected to the I^2C port of the sensor node. If the sensor circuit is thought of as an end node, it will send the programmed node as a magnetic data pick-up node. The end node, the magnetic information of the 3 axes (x, y, z), is created by the software that generates the magnetic junction and transmits this value every 90 ms to the coordinator node (coordinator node). That is, the coordinator node sends a C_{RV} value to the Tera Term, serial port software, each 90 ms. $C_{threshold}$, which is a constant threshold value in the study implemented, was initially set at 253. However, this value may be different in different environments because of being different magnetic field values in different parts of the world. After many experimental applications for vehicle detection,

this $C_{threshold}$ value is set to 255 for the fixed threshold algorithm. Values below this value are considered "no vehicle" and values above are considered "vehicle". For this reason, the magnetic sensor used may be influenced by other metals in the environment during the measurement. However, by using the adaptive threshold value detection algorithm, the adaptive threshold value $h(k)$ is determined and vehicle orientation is determined based on this level. Also, using the adaptive threshold level, we avoided the measurement complexity for each environment, so we found the threshold value dynamically. The magnetic sensor HMC5983L transfers the data acquisition node received every 90ms. Reduction of this means that the number of samples of magnetic data will increase. Although the increase in the number of samples gives more clear and precise results, Tera Term can not obtain data in a very short time. For this reason, the sampling time is set to 90 ms as the optimum time.

In this study, the direction of motion of the vehicles was determined by passing. The direction of the vehicle is from left to right or from right to left. In this application, more than one sensor was used and the change in the magnetic field was measured in the direction of motion in one direction. Figure 4 gives the application scenario for the vehicle direction determination.

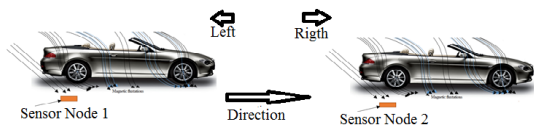


Figure 4. Direction determination scenario

In this study, to detect the direction of the vehicle, two sensor circuits were placed in the middle of the road 8 m apart. The aim here is to observe if the change in magnetic field was similar in the nodes placed nearby. The direction is determined when the resultant magnetic field C_{RV} in one of the nodes exceeds the $C_{threshold}$ at a certain time before the other node detects the vehicle. As in the previous application, the measurement time interval of the sensors was set to 90 ms. Figure 5 shows the flow diagram of the algorithm to determine the vehicle direction.

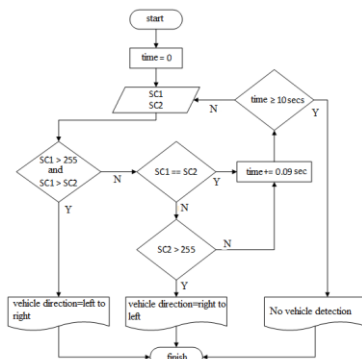


Figure 5. The flow chart of the proposed algorithm to detect the vehicle direction

SC1 and SC2 arguments in the flow chart are the C_{RV} values read at the sensor 1 and sensor 2, respectively. To implement this application, firstly, a car was made to pass by the sensor nodes at a fix speed of 45 mph as in Figure 6. The direction on the x-axis is described as from left to right if the car travels from sensor 1 to sensor 2 and from right to left otherwise. Magnetic signature length (MSL) value used in vehicle direction determination is computed with the multiplying of the magnetic amplitude difference (ΔM) and the occupation time (Δt) vehicle in the sensor node range. However, magnetic signature length value is calculated as $MSL = \Delta M \times \Delta t \times V$ if vehicle speed (V) is taken into consideration. In this way, when a vehicle pass by the road at a speed faster than previous, Δt decreases and MSL remains constant. Similarly, when a vehicle passes by the road at a speed slower than previous, Δt increases and MSL remains constant. To put it more clearly, $\Delta t \times V$ expression in the $MSL = \Delta M \times \Delta t \times V$ equation describes D_V which is distance path received by the vehicle in the sensor node's coverage area. So, we consider the magnetic signature length value as $MSL = \Delta M \times D_V$. In this sense, MSL does not vary if the vehicle's speed is changeable. In this study, magnetic signature length value is used as $MSL = \Delta M \times \Delta t$ because of the fact that speeds of the vehicles are constant. This means that we assume Δt value is equal to D_V .

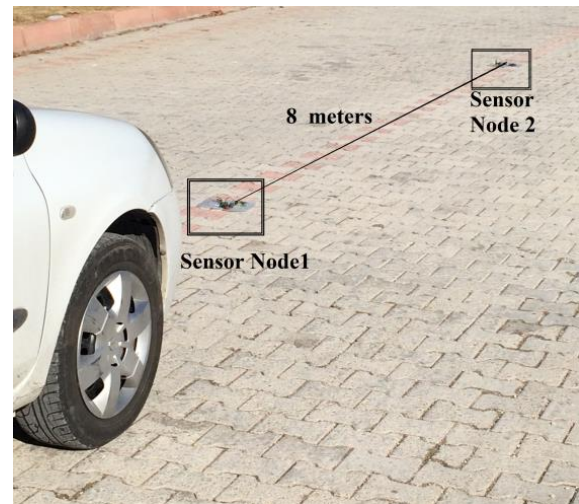


Figure 6. The vehicle approaching the sensor circuit

However, uncertainty condition related to vehicle direction can occur like Figure 7 below when vehicle presence is detected by the two sensor nodes. So, it can not be understood that V_1 and V_2 vehicles are moving in which direction according to Figure 5. However, which vehicle in which direction to move can be determined by acquiring magnetic measurements and plotting related signal graphics.

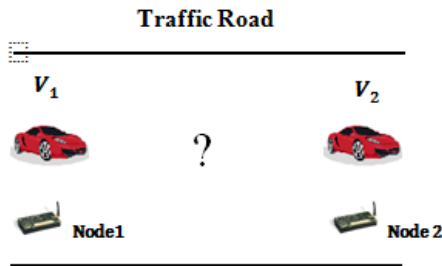


Figure 7. Uncertainty of the direction of the vehicles

For instance, when obtained graphic as seen Figure 8 below to be seen V_1 vehicle passed over the Sensor node 1 in the $t_2 - t_3$ time interval at first and Sensor node 2 in the $t_5 - t_6$ time interval later, it can be understood that the direction of the V_1 vehicle was determined as from left to right according to Figure 5. Similarly, as seen Figure 8 to be seen V_2 vehicle passed over the Sensor node 2 in the $t_0 - t_1$ time interval at first and Sensor node 1 in the $t_4 - t_7$ time interval later, it can be understood that the direction of the V_2 vehicle was determined as from right to left according to Figure 5. Also, vehicle presence was detected by the two sensor nodes in the $t_5 - t_6$ time interval according to Figure 8. However, it is obvious that obtained magnetic signal gives different results for different vehicles. In this mean, it is easy to decide which vehicle in which direction to move on the road.

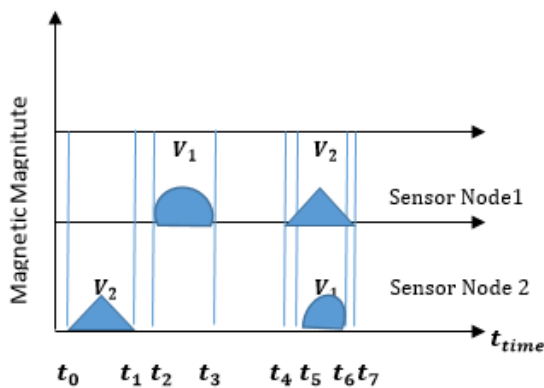


Figure 8. Determining the direction of the vehicles

4. ADAPTIVE THRESHOLD DETECTION ALGORITHM

The necessity of the large-scale use of traffic surveillance systems necessitates a strong and accurate design of vehicle detection algorithms. Adaptive threshold detection algorithm (ATDA) was proposed by Cheung and Varaiya in 2007 [27] to detect vehicles in traffic based on magnetic signals in this mean. With this algorithm, it is aimed to determine the threshold value on the magnetic signal taken from the sensor nodes and to present a suitable solution to the vehicle detection

decision. In order to produce real-time detection results, to reduce the calculation requirement of the detection algorithm and to consume less energy in the processor of the sensor node, other static algorithms or assumptions are replaced by threshold value logic. Figure 9 shows the block diagram of the adaptive threshold detection algorithm [25,26].

The signal from the node is filtered to convert the corrected signal to the shape. The signal is used when the signal has an adaptive edge line. After the edge line is detected, a magnetic signal is sent to the detection status machine. Then, a detection flag is generated by means of the output state buffer.

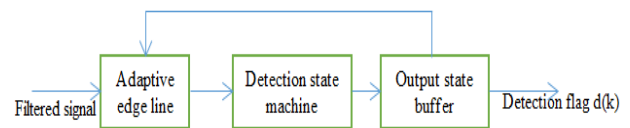


Figure 9. Block diagram of adaptive threshold detection algorithm

4.1. Adaptive Edge Line

Although there is an uncontrollable deviation in the magnetic signal, the rate of deviation is very low because it is often measured. This means that if the signal of the moving vehicle is 1 second during the process, the signal deviation of the vehicle detection has negligible effect. An adaptive edge line must be watched and generated in a magnetic readout so that the long-term lead can be calculated. In this case, an adaptive threshold value level can be determined for the detection state machine. The adaptive edge line for all three magnetic axes is found by means of equation 2 [25,27].

$$B_i(k) = \begin{cases} B_i(k-1)\alpha + a_i(k)(1-\alpha) & \text{if } s(\tau) = 0 \forall \tau \in [(k - s_{buf}) \dots (k-1)] \\ B_i(k-1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$T(k) = \begin{cases} \text{true} & \text{if } |a_z(k) - B_z(k)| > h_z(k) \\ \text{false} & \text{otherwise} \end{cases} \text{ for } s(k-1) \neq \text{Event}_{detect} \quad (3)$$

$B(k)$, adaptive edge line, $s(k)$, the detection state of machine state, α forgetting factor, s_{buf} , the buffer size of $s(k)$, $h(k)$, the threshold value level, $a(k)$, filtered magnetic data and finally i , represents every three axes. With these equations, the adaptive edge line is updated by magnetic reading only when vehicle detection is not performed for a certain period and when there are no signal fluctuations. With this adaptive edge line, the "Over_threshold" flag is generated according to equation 3.

In the case of two different vehicles standing and moving near the sensor node as seen in the studies performed, it is not possible to get a false result below the threshold

and to take into account the measurements on the X and Y axes as well as the Z axis for the decision state of $T(k)$ when the state machine is in the "Event_detect" state is as taken.

4.1. Detection State Machine

The "Over_threshold" flag state machine is used to filter out the artifacts that occurred before vehicle detection. The state machine consists of 5 main cases [25].

- S1: "Start_edge line"

This is the state that is used to generate a reset state when there is no vehicle near the sensor node. In this case, the edge line will be started by going to S1 and by environmental measurements.

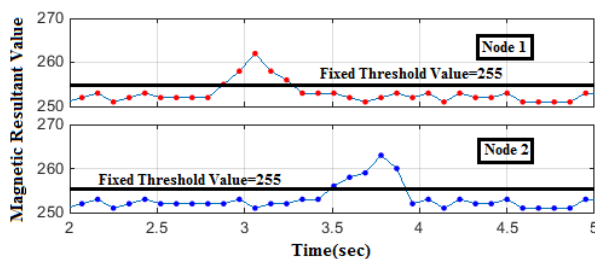
- S2: "On_edge line"

After the predetermined time has elapsed, the edge line branches to S2 state where it is adaptively updated. The

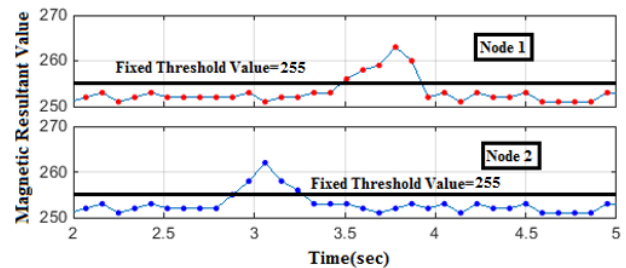
detected, $T(k)$ goes false and branches to state S2 when the false state reaches a certain number. When the detection period arrives at the specified period, the state machine branches back to S1 to start these operations again. After detection, the detection flag $d(k)$ generates the output status [26].

5. EXPERIMENTAL RESULTS

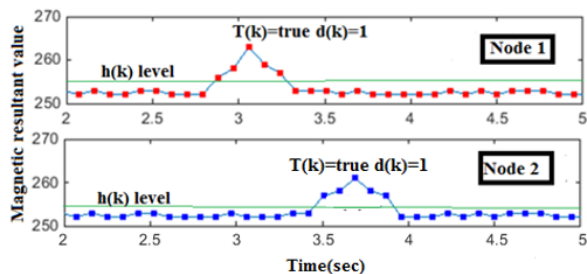
Firstly, we implemented on fixed threshold algorithm and are shown in Figure 10.a. According to Figure 10.a, the vehicle was detected first by Node 1 and then by Node 2. Node 1 reported the presence of the vehicle in a locating where measurements were taken every 0.09 s. Soon after, Node 2 also informed the vehicle presence. Hence, for short period of time, Node 1 sends the logic value 1 and Node 2 sends the logic 0. Then, Node 1 sends the logic 0 and Node 2 sends the logic 1.



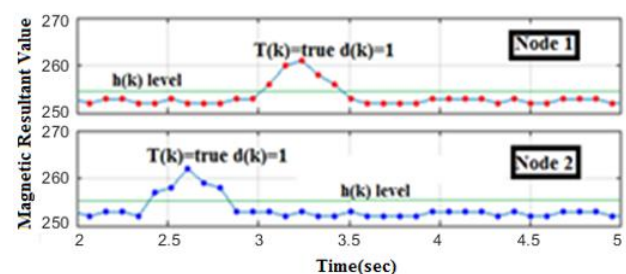
a) Detection of the vehicle direction, from left to right (Fixed threshold algorithm)



b) Detection of the vehicle direction, from right to left (Fixed threshold algorithm)



c) Detection of the vehicle direction, from left to right (Adaptive threshold algorithm)



d) Detection of the vehicle direction, from right to left (Adaptive threshold algorithm)

Figure 10. Experimental results according to the algorithms

measurement on the Z axis is branched to the state S3 if it is greater than the adaptive threshold.

- S3: "Over_threshold_counter "

This state counts when $T(k)$ is true. In cases where $T(k)$ is false, it branches to S4. Otherwise, it branches to S5 when reaching a certain number that $T(k)$ is true.

- S4: " Below_threshold_counter "

In this case, when the number of $T(k)$ is false reaches a certain number, it branches to S2. When $T(k)$ is true to avoid miss the vehicle detection, it branches to S3 state.

- S5: "Event_detect"

This means that magnetic fluctuations are moving near the sensor node of the vehicle. It is read from the sensor nodes that all three axes $T(k)$ are true. After the vehicle has been

These results were plotted with Matlab program. Because a flow from Node 1 to sensor Node 2 was seen, the direction of the vehicle was determined as from left to right. However, It can be understood that the vehicle was first detected by sensor node 2 and then sensor node 1 and therefore it is determined that the vehicle was moving from right to left as seen in Figure 10.b. Secondly, we conducted the proposed algorithm with adaptive threshold manner and shown in Figure 10.c. According to equation 4, $T(k)$ was found "true" due to the fact that threshold level was exceeded. Also, $d(k)$ output flag was determined logical 1 (Figure 10.c). Threshold level $h(k)$ could be seen in Figure 10.c. So, the vehicle was detected first by Node 1 and then by Node 2. For example, the highest magnetic resultant value detected by Node 1 was 264 and by Node 2 was 263. The occupation times in the coverage zone of the sensor were

Table 1. Accuracies for the algorithms of vehicle direction determination

Algorithms	Direction of Vehicle	The number of vehicle passed	The number of vehicle detected		Accuracy of the algorithms
			Left to right	Right to left	
[6]	Left to right	50	47	3	%94
	Right to left	50	3	47	%94
CART	Left to right	50	47	3	%94
	Right to left	50	2	48	%96
Fixed Threshold [27]	Left to right	50	48	2	%96
	Right to left	50	2	48	%96
Proposed With Adaptive Threshold	Left to right	50	49	1	%98
	Right to left	50	2	48	%96
Total number of vehicle for each algorithm					
100					

also similar. Because a flow from Node 1 to sensor Node 2 was seen, the direction of the vehicle was determined as from left to right. In addition to these, data obtained by the sensor were similar with each other. So, one could understand that the same vehicle passed by the nodes. The plot showing the vehicles moving from right to left is given in Figure 10.d. It can be understood that the vehicle was first detected by sensor node 2 and then sensor node 1 and therefore it is determined that the vehicle was moving from right to left. As a results of this simulations, we obtained more precision and accurate threshold value in adaptive threshold algorithm than the fixed threshold algorithm. After that, a direction determination experiment was performed with 100 vehicles of which 50 were travelling from left to right and 50 were travelling from right to left. In this way, the study in reference [6], Classification and Regression Tree (CART), fixed and proposed adaptive threshold detection algorithms were compared in terms of direction determination criterion. As seen in Table 1, an accuracy of 98% was attained for vehicles moving from left to right and 96% for the ones moving from right to left when used the adaptive threshold detection algorithm. In general, the system has an accuracy of 97% which is the highest rate among the all algorithms.

6. CONCLUSIONS

In this study, as a new approach fixed threshold value detection and adaptive threshold detection algorithm are compared by using the purpose-specific wireless magnetic sensors. In this view, the results of the two methods are analyzed and the importance of the adaptive method, which may be more suitable for use in vehicle direction finding systems, is emphasized. In this method, the necessary parameters are given as inputs and the vehicle recognition system is provided with the flag based on the output buffer. The adaptive threshold level is dynamically determined and a level below the default constant threshold value is obtained. In addition, this method allows for accurate results to be obtained adaptively in different environments as different parts of the world have different magnitudes of magnetic fields. The most important features of this work are that the vehicle detection system is simple, relatively dynamic with other operations, and that the proposed method and

algorithms produce appropriate results. In addition, the amount of equipment used and the low cost of the materials used reflect the other feature of trying to communicate the sensor nodes according to the Zigbee communication standard, which consumes low power with each other.

In future studies, various parameters such as mass, types, speed and size of vehicles, will be analyzed and contributed to the traffic monitoring applications. In addition,, researchers can offer more performance solutions making energy efficient evaluations of acquired vehicle information.

REFERENCES

- [1] Haoui A., Kavalier R. and Varaiya P., "Wireless magnetic sensors for traffic surveillance," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16 (3): 294-306, (2008).
- [2] Lei Z., Wang R. and Cui L., "Real-time Traffic Monitoring with Magnetic Sensor Networks", *Journal of information science and engineering*, 27(4): 1473-1486, (2011).
- [3] Vancin S. and Erdem E., "Design and Simulation of Wireless Sensor Network Topologies Using ZigBee Standard", *International Computer Networks and Applications*, 2(3):135-143, (2015).
- [4] Mihajlov B. and Bogdanoski M., "Overview and analysis of the performances of Zigbee based wireless sensor networks", *International Journal of Computer Applications*, 29(12):28-35, (2011).
- [5] Wang X. and Zhang S., "Comparison of Several Sensor Deployments in Wireless Sensor Networks", *International Conference on E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies*, 1: 236-239, (2010).
- [6] Jimenez V-P-G. and Fernandez M- J., "Simple Design of Wireless Sensor Networks for Traffic Jams Avoidance", *Journal of Sensors*, 2015: 1-7, (2015).
- [7] Nooralahiyan A-Y-H., Kirby R. and McKeown D., "Vehicle classification by acoustic signature," *Mathematical and Computer Modelling*, 27(9):205-214, (1998).

- [8] Jo Y. and Jung I., "Analysis of vehicle detection with wsn-based ultrasonic sensors," *Sensors*, 14(8): 14050–14069, (2014).
- [9] Leitloff J., Rosenbaum D., Kurz F., Meynberg O. and Reinartz P., "An operational system for estimating road traffic information from aerial images," *Remote Sensing*, 6(11): 11315–11341, (2014).
- [10] Michael J., Caruso L. and Withanawasam S., "Vehicle detection and compass applications using AMR magnetic sensors", *Honeywell, SSEC, 12001 State Highway 55*, Plymouth, MN USA 55441, (1999).
- [11] Chen W. and Chen L., "A Realtime Dynamic Traffic Control System Based on Wireless Sensor Network". *In Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'05)*, 258-264, (2005).
- [12] Nadeem T., Dashtinezhad S., Liao C. and Iftode L., TrafficView: "A Scalable Traffic Monitoring System", *IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM'04)*, 1-14, (2004).
- [13] Ng E-H., Tan S-L. and Guzman J-G., "Road traffic monitoring using a wireless vehicle sensor network", *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication System*. Bangkok, Thailand, (2008).
- [14] Haijian L., Honghui D., Limin J. and Moyu R., "Vehicle classification with single multi-functional magnetic sensor and optimal MNS-based CART", *Measurement*, 55: 142-152, (2014).
- [15] Lifu W., Nong Z. and Haiping D., "Real-time identification of vehicle motion-modes using neural networks", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 51: 632-645, (2015).
- [16] Nabeel M-M., EI-Dien F-M. and EI-Kader A-S. "Intelligent vehicle recognition based on wireless sensor network". *Int. J. Comput. Sci.* 10:164–174, (2013).
- [17] Padmavathi G., Shanmugapriya D. and Kalaivani M., "A study on vehicle detection and tracking using wireless sensor networks", *Wirel. Sens. Netw.*, 2: 173–185, (2010).
- [18] Arbabi H. and Weigle C-M. "Monitoring free flow traffic using vehicular networks". *In Proceedings of the IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, 272–276, 9–12 January 2011.
- [19] Wang Y., Wu F. and Tseng Y., "Mobility management algorithms and applications for mobile sensor networks". *Wirel. Commun. Mobile Comput.*, 12: 7–21, (2012).
- [20] Chakraborty S.P., Nair P., RajSinha P. and Ishan Kumar B., "Real time optimized traffic management algorithm". *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, 6: 119–136, (2014).
- [21] Potdar M. and Wani S., "Wireless Sensor Network in Vehicles," *SAE Technical Paper 2015-01-0241*, <https://doi.org/10.4271/2015-01-0241>, (2015).
- [22] Sifuentes E., Casas O. and Pallas-Areny R., "Wireless magnetic sensor node for vehicle detection with optical wake-up," *IEEE Sensors Journal*, 11(8), 1669–1676, (2011).
- [23] Muheden K., Erdem, E. and Vançin S., "Design and implementation of the mobile fire alarm system using wireless sensor networks", *In Computational Intelligence and Informatics (CINTI), 2016 IEEE 17th International Symposium on (pp. 000243-000246)*. IEEE., 243-246, (2016).
- [24] Dener M., "WiSeN: A new sensor node for smart with wireless sensor networks", *Computers and Electrical Engineering*, 64: 380-394, (2017).
- [25] Cheung S., Y. and Varaiya P., "Traffic Wireless Sensor Networks: *Final Report*", *California PATH Research Report UCB-ITS-PWP-2004-7*, (2004).
- [26] Vancin S. and Erdem E., "Implementation of the vehicle detection system with adaptive threshold algorithm in wireless sensor networks", *International Artificial Intelligence and Data Mining Symposium*, Inonu University, Malatya, (2016).
- [27] Vancin S. and Erdem E., "Implementation of the vehicle recognition systems using wireless magnetic sensors". *Sadhana Springer*, 42(6): 841-854, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

The physical properties of aluminium-7xxx series alloys produced by powder metallurgy method

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen alüminyum-7xxx serisi alaşımlarının fiziksel özellikleri

Yazar(lar) (Author(s)): Ayşe Nur ACAR¹, Abdul Kadir EKŞİ², Ahmet EKİCİBİL³

ORCID¹: 0000-0001-7208-1530

ORCID²: 0000-0003-2227-8006

ORCID³: 0000-0003-3071-0444

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Acar A.N., Ekşi A. K. ve Ekicibil A., “The physical properties of aluminium-7xxx series alloys produced by powder metallurgy method”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 341-350, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389588

The Physical Properties Of Aluminium-7xxx Series Alloys Produced By Powder Metallurgy Method

Araştırma Makalesi / Research Article

Ayşe Nur ACAR^{1*}, Abdul Kadir EKŞİ², Ahmet EKİCİBİL³

¹ The Faculty of Ceyhan Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Çukurova, 01950 Adana, TURKEY

² The Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Çukurova, 01330 Adana, TURKEY

³ The Faculty of Arts and Sciences, Department of Physics, University of Çukurova, 01330 Adana, TURKEY

(Geliş/Received : 17.02.2017 ; Kabul/Accepted : 15.03.2017)

ABSTRACT

Alumix-431 materials were prepared by cold and warm compaction method applying 350-400 MPa pressures at RT (room temperature) 50 and 80°C temperatures. The density measurements of materials were performed; the thermoelectric properties of materials were investigated at 5-300K under the He atmosphere, and the relationship between the measurements and sample properties was examined. The measurements of thermoelectric properties showed that maximum resistivity [Alumix -431-1] and thermal conductivity [Alumix -431-6] values were obtained 0.161Ωm and 24.31W/Km, respectively at 285-295K temperature ranges and minimum electrical resistivity and thermal conductivity values were obtained on Alumix-431-6 and Alumix-431-1 samples, respectively. It was observed that Seebeck coefficient values varied mostly from negative sign to positive sign indicated dominate from carriers. The maximum Figure of merit value was determined as 18.71×10^{-2} ; on the Alumix-431-5 alloy at 96.904K

Keywords: Cold and warm compaction, powder metallurgy thermoelectric properties, Al-7xxx alloys.

Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Aluminyum-7xxx Serisi Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri

ÖZ

Alumix-431 malzemeleri; oda sıcaklığında (RT) ve 50,80°C sıcaklıklarında 350-400MPa basınç uygulayarak soğuk ve sıcak presleme yöntemiyle hazırlanmıştır. Malzemelerin yoğunluk ölçümleri yapılmıştır ve termoelektrik ölçümleri He atmosferi altında 5-300K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Termoelektrik ölçümlerinde sonuçlar maksimum elektriksel öz direnç ve maksimum termal öz iletkenlik sırasıyla 285-295K sıcaklık aralığında Alumix-431-1 malzemesinde 0.161Ωm ve Alumix-431-6 malzemesinde 24.31W/Km olarak kaydedilmiştir. Minimum elektriksel öz direnç ve termal öz iletkenlik sırasıyla Alumix-431-6 ve Alumix-431-1 malzemelerinde elde edilmiştir. Seebeck katsayısı taşıyıcıların yoğunluğuna bağlı olarak pozitif değerden negative değere değişim göstermiştir. Maksimum performans katsayısı Alumix-431-1 alaşımında 96.904K sıcaklığında 1.871×10^{-2} olarak saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Soğuk ve sıcak presleme, toz metalurjisi, termoelektrik özellikler, Al-7xxx alaşımlar.

1. INTRODUCTION

Powder compaction is an attractive forming process, because it presents an approach to net-shape and near net-shape manufacturing [1]. On the many powder compaction methods; for obtaining high density mass, providing the required shape and dimensional control the plastically deformed metal powders are pressed. There are two main powder compaction methods whether applied pressure or not; *i*) pressure applying compaction methods such as cold and warm compaction, double pressing-sintering, isostatic pressing and powder forging, *ii*) pressureless compaction methods such as slip casting and tape casting [2]. In this study; on the preparing of materials, cold and warm compaction methods, as powder compaction methods, were applied and compared the mechanical and physical properties of cold and warm compacted alloys. As known; cold

compaction method is applied owing to the directly affect to other processes such as the product density, allow adsorption, diffusion of liquids such as oil and in addition to lead to carrier mobility and warm compaction method is also used due to provide good properties such as higher strength and fatigue strength, tolerances to dimensional variances, grain refinement and increasing Figure of merit (ZT) related to the lattice thermal conductivity [3-6].

The thermoelectrical efficiency of material is evaluated in terms of thermoelectrical Figure of merit (ZT). Effective Figure of merit is provided the high electromotive power Seebeck coefficient (α) ($\alpha = \Delta V / \Delta T$) needed high voltage; high electrical conductivity (σ) and low electrical resistivity (ρ) [$\rho = 1 / \sigma$] required to reduce the internal resistance of material; low thermal conductivity [κ] necessitated the large temperature range between two ends of materials [7,8]. ZT is given as follow:

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : anacar@cu.edu.tr

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa} \quad (1)$$

All properties such as Seebeck coefficient, electrical resistivity, and thermal conductivity are determined by electronic structure and scattering of charge carriers (electrons and holes) and therefore these properties are independently not controlled [9].

In this study; Alumix-431 alloy used is an Al-7xxx series alloy and applied commonly on the air and automotive industry owing to the low density, high strength and hardness and also excellent workability capability [10-12]. The structure of Alumix-431 alloy is included of zinc, copper and magnesium besides of aluminium. For Alumix-431 alloy, zinc is significant alloying addition and, is supporting material for precipitation hardening. Also zinc is dissoluble in aluminum [13]. Because of intrinsic foundry problems such as macrosegregation and cracking, an applied practical limit is about 8wt%, for conventional cast materials [14]. Such as zinc element, copper plays also role as supporting material to precipitation hardening and in order to provide the wetting behavior of the liquid phase of aluminium [13]. Both copper and zinc containing Al alloys have been commonly applied in aerospace, automotive, textile engineering *etc.* and have a high strength/weight ratio [15]. The Al-7xxx alloys are susceptible to localize corrosion because, there are the strengthening phases such as MgZn₂, AlMg₃Zn₂, Al₃CuZn [15]. Magnesium element is the lightest material and shows superior features such as high dimensional stability and thermal conductivity, good formability and recyclability, inadequate corrosion resistance due to high reactivity. Magnesium and its alloys are characterized by way of low hardness and wear resistance, therefore, their useful areas are limited to mechanical parts worked under static conditions such as casing, housing [16]. Even at 0.5% magnesium element level possesses positive effect on shrinkage by way of decreasing the oxide, enabling diffusion and metal/metal contact at particle interfaces [13].

On Al-7xxx alloys; the electrical resistivity behaviour has inclusively been studied during the pre-precipitation stage. Ferragut et al. examined the early stages of pre-aging in an Al-Zn-Mg-Cu alloy with electrical resistivity at near room temperature. In the early stages of pre-aging, it was determined, the increasing of electrical resistivity. There is susceptible of electrical resistivity to the microstructural factors consisting of vacancy concentration, solute concentration in the matrix, precipitate (or cluster) size and precipitate volume fraction. Resistivity varies to the increase of the electron scattering resulting from a non-random distribution of the formed pre-precipitates. Authors determined the enough changing of the resistivity in the sense of a JMA (Johnson-Mehl-Avrami) type for volume fraction growth of the Guinier-Preston zones or pre-precipitate solute cluster formed [17]. Guyot and Gotignies investigated precipitation kinetics and features size and volume fraction, mechanical strength and electrical

conductivity of AlZnMgCu alloys by in-situ SAXS experiments [18]. Salazar-Guapuriche et al. studied the mechanical properties such as tensile strength, proof strength hardness and the transport properties such as electrical conductivity of Al alloy 7010 under various temper and ageing conditions so as to associate strength with hardness and electrical conductivity [19]. Massadier et al., measured the TEP value of a 6061-Al alloy during isothermal ageing performed between 200 and 500°C. They expressed permitting the TEP kinetics an evaluation of the residual concentration of solute in the final equilibrium state and stated the reflecting of variations of TEP the microstructural transformations occurring in the alloy [20]. Sun et al. investigated the solution treatment and aging of a 2024 Al alloy using TEP technique and compared to obtained results by microhardness and optical microscopy. They stated the varying of the TEP value with solution treatment temperature and duration during solution treatment and variations in the solubility of the alloying elements in the α -Al [21]. The purpose of this study is to investigate the mechanical and physical properties of Alumix-431 (Al-5.5Zn-2.5Mg-1.5Cu) material which is the Al-7xxx series alloy and prepared utilizing the traditional press and sintering process in various pressure and temperatures.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

In this study, the compacted Alumix-431 material obtained from the powder which is the alloy of Al-7xxx series alloy and acquired from Ecka Granules in Germany was utilized. In the below Table 1 the chemical composition of Alumix 431 powder is given.

Table 1. The Percentage of the Chemical Composition of Alumix-431.

<i>Chemical Composition, % (density 2.786 g/cm³)</i>	
Al	89.0
Cu	1.5
Mg	2.5
Zn	5.5
Lubricant	1.5

Previously, the components of powder in Table 1 chemical composition (Al-5.5Zn-2.5Mg-1.5Cu) which are roughly weight of 15 g are blended to place the blanks, until a homogeneous mix by the lubricants. Obtained a homogeneous mixture placed into prismatic die (10×10×55) mm³ which has approximately a weight of 3.5 g with an accuracy of 0.001 g for static properties. Alumix-431 alloys were pressed up 350 and 400 MPa pressures at various temperatures; room temperature (RT), 50° C and 80° C. In order to observe mechanical properties; the density measurements of green Al alloys was assessed. Densities of green parts pressed were measured by Classical Method and the Archimedes Principle which is water displacement technique, using

Precisa 320XT series for analytical and precision balances which has 1/10.000 precision of scale. In order to measure the physical properties such as thermal conductivity, Seebeck coefficient, electrical resistivity, in the literature; there are the measurement methods (22-24). In this study, the physical properties were performed on the PPMS-QD (Physical Properties Measurement –Quantum Design). In PPMS; thermal conductivity is measured by monitoring the decrease of temperature because of heat passing through the sample; in order words by direct transient method where the variations (increase and decrease) in temperature between two thermometers (25,26). Seebeck coefficient measurement is performed from attaching four ends to the sample by conducting silver epoxy. Whereas one end at a constant temperature by continuing good the conductivity with a low temperature reservoir is holded; at the other end of the specimen applying of heat is occurred a temperature gradient (27). For measuring of electrical resistivity; there are several options in PPMS. The measurement of electrical resistivity is made by adding a configurable resistance bridge board, called the user bridge board to PPMS. To specific system, none of the four channels on the user bridge board is allocated; therefore, all four channels exist in order to make four-end resistance measurements on the PPMS (28). The cold and warm compacted specimens (10×55×10) mm cut to take place PPMS machine. The obtained materials were enumerated to increasing pressures and temperatures. In following chart; designated materials were given;

Table 2. The preparation conditions of Alumix-431.

<i>Sample Names</i>	<i>Preparation conditions</i>
Alumix-431-1	350MPa, RT
Alumix-431-2	350 MPa, 50°C
Alumix-431-3	350 MPa, 80°C
Alumix-431-4	400MPa, RT
Alumix-431-5	400MPa, 50°C
Alumix-431-6	400MPa, 80°C

3.RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Powder Morphology and Characterization

3.1.1. Particle Size Distribution of Alumix-431 Alloy Powder

In Figure 1, the SEM image and the cumulative particle size distribution of Alumix-431 alloy powder are presented. The SEM image of Alumix-431 alloy powder obtained by Nova NanoSEM 650 machine and the cumulative particle size distribution of this powder was determined using BT-9300HT Laser Particle Size Analyzer with water medium and Mie scattering. As

observed in SEM image; particles of Alumix-431 powder have irregular shape. The irregular shape of Alumix-431 particles is provided more compactibility on compressing of alloys compared to the circular shape [29]. The particle size distribution is important for packing and sinterability [30,31]. Because of consisting of a variety of particle size of ranges, the distribution of Alumix-431 alloy is observed the multimodal distribution [31]. In this study, the mean particle size of Alumix-431 is obtained of 67.458 μm.

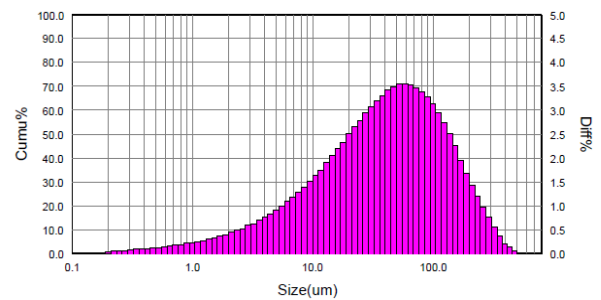
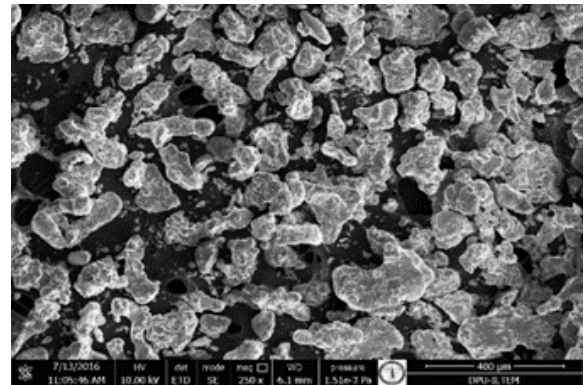


Figure 1. The SEM image and cumulative particle size distribution of Alumix-431 alloy powder

3.1.2. The XRD pattern of Alumix-431 alloy powder

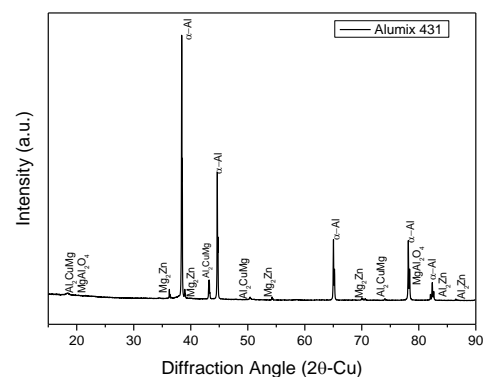


Figure 2. The XRD pattern of Alumix-431 alloy Powder

In Figure 2, there is an apparent of the phase analysis of Alumix-431 powder obtained XRD (X-Ray Diffraction) using PANalytical EMPYREAN model XRD Device

with $[CuK\alpha]$ radiation ($\lambda=1.54\text{\AA}$), tube voltage of 40 kV, tube current of 35mA and scanning rate of $0.02^\circ/\text{min}$. The Figure 2 was showed the strong peaks of main peak of Al and the weak peaks of other elements of Mg, Zn, Cu. Sometimes, on strong peaks, the other elements were locally available with aluminum. In Figure 2, α -Al as the main phase, η ($MgZn_2$) phase as the second main phase and having hexagonal closed packed (HCP) eutectic structure, S (Al_2CuMg) phase having the orthorhombic eutectic structure, Al_2Zn phase on final peaks and also locally placed spinel phases on peaks are observed [32-33]. The dissolving of Al_2CuMg is difficulty than $MgZn_2$ phase. The $MgZn_2$ phase is important due to the obstacle dislocation movement; for this reason it will be increased mechanical features [34,35]. On the spinel phase, it was thought out the Mg element will be dissolved in to grain boundary because of the reaction of Mg and oxide layer on aluminum particle. On the final peaks, the observation of Al_2Zn alloys is considered due to contain Zn embedded in aluminium.

3.1.3. Optic Microscope (OM) Images of Alumix-431 Alloy

The optical microscope images of Alumix-431-1 material are shown in Figure 3, it was showed the grain and grain boundaries of Cu, Mg, Zn, Al elements prominently. It was appeared that an equixed grains and two types with apparent origins, the first generated at the grain boundaries during the solidification process caused to segregation of the alloying elements when the second phase is widely formed near the grain boundaries. Many coarse precipitates are distinct within the constituted grains [36].

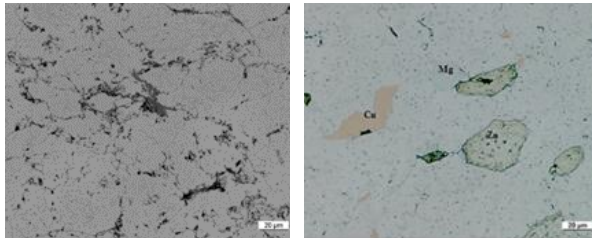


Figure 3. Optical microscope images of Alumix-431-1 sample with materials $[20\mu\text{m}] [350\text{MPa}/ \text{RT}]$.

3.2. Mechanical Properties of Alumix-431 Alloys

3.2.1. The Green Density of Alumix-431 Alloys

For materials produced from powder metallurgy (PM) methods, the density measurements are crucial because of influencing the mechanical and physical properties of the materials. As known; to increase the performance of PM part, the best way is the rising of the density [15]. The rising density is caused to propose the various treatments; *i*) for high and uniform densities and decreasing of residual stresses and providing magnetic properties; warm compaction (W/C) method has been utilized. *ii*) As known, in the W/C method, material powder is preheated and compacted in a heated material. *iii*) to fabricate both cost-effective and highly dense

sintered products, W/C process has been developed [37]. The results of the density measurements of Alumix-431 samples showed that the density of the samples increase with increasing compacting pressure. To move rearrangement and deform of powder particles, the rising of the compacting pressure is beneficial. Increasing of density is also closely associated with the state of lubricant based on the temperature [38]. It was presented the increasing of density with increasing pressures and in Figure 4, it was observed that the density of alloys was firstly increased and then decreased with the increasing of temperature on both pressures. With the rising temperature, porosity is decreased because of reducing of volume of compacted parts and gaining particles and non-varied weight (see in Figure 4). These conditions increase the density of samples [39]. The decreasing of density is recommended the increasing of resistance to density with reducing of porosity [40]. The highest density value of samples was indicated at compacted specimens on the $400\text{MPa}/50^\circ\text{C}$ (Alumix-431-5) conditions.

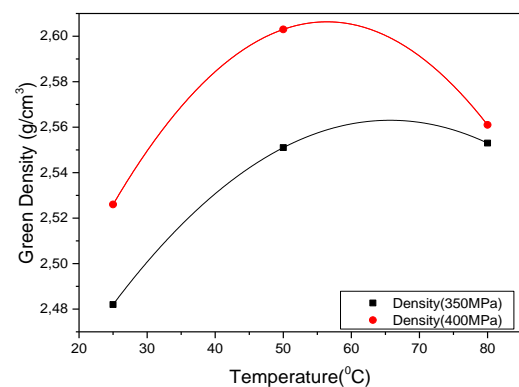


Figure 4. Green Density related to the Temperature of the Alumix-431 samples.

3.3. The Physical Properties of Alumix-431 Alloys

In this study, the physical properties of Alumix-431 alloys are performed on the PPMS-Quantum Design (Physical Property Measurement System) at 5-300K temperature under He atmosphere. The physical properties obtained from PPMS for Alumix-431 alloys were electrical resistivity, thermal conductivity and Seebeck coefficient. Figure of merit was calculated from acquired properties according to the Wiedemann-Franz Law, as known.

3.3.1. The Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Alumix-431 alloys

As known, electrical resistivity (ρ) is resistance to flow of electric current and electrical resistivity property is based on the material type and temperature. Materials having low electrical resistivity permit the movements of electrical current. Metals have low electrical resistivity and generally give $10^{-7}(\Omega\text{m})$ electrical resistivity values whereas insulators have 10^{10} - $10^{20}(\Omega\text{m})$ electrical resistivity values, namely presents high electrical resistivity property. Semiconductivity materials also

posses averaged resistivity and have range of 10^{-4} - 10^6 (Ωm) electrical resistivity values [41].

In this study; on electrical resistivity-Temperature graphs, it was observed the electricity resistivity values of Alumix-431 samples compacted on 350MPa pressure at RT,50,80°C temperatures were higher than the ones of compacted Alumix-431 samples on 400MPa at the same temperatures (see Figs. 5-6). Maximum and minimum electrical resistivity values are obtained on Alumix 431-1 and 5; 6 samples at 5-300K temperature, respectively.

In Alumix-431-1 material, the valleys are prominently appeared according to the other Alumix-431 materials in range from 250 to 200 K temperatures ($1.48 \times 10^{-2} \Omega\text{m}$ at 205.05K and $1.392 \times 10^{-2} \Omega\text{m}$ at 218.593 K) and observed in roughly constant. It was considered to such a tendency is attributed to a falling offset of E_F (Fermi Energy) from the valley of the pseudo-gap because of motion of E_F to the location with larger density of states (DOS) causing to the reducing in the electrical resistivity magnitude and also considered [36,37] in Figure 5. Maximum electrical resistivity is obtained in value of $16.1 \times 10^{-2} \Omega\text{m}$ at about 299K for Alumix-431-1 specimen. As shown in Figure 5 superconductivity property of materials was considered. In Alumix-431-1, the sharp decreasing was exhibited at about 250K. It was thought on similar behaviour to superconductivity property of materials or structural transition via TEP. Both the constitution and resolution of η 'phase and the constitution of η phase a strongly effect on the electrical resistivity. This effect is more than inclined via the development of GP zones [38]. On Alumix-431-2 sample, it was observed the linear increase as temperature rose. Alumix -431-3 samples showed a similar behavior to superconductivity property and same property on the Alumix-431-1 sample. After 225K, the reason for the GP zone generation may be less in concentration of defects (38). Maximum electrical resistivity obtained on the Alumix-431-1 sample ($0.161 \Omega\text{m}$ at 300K).

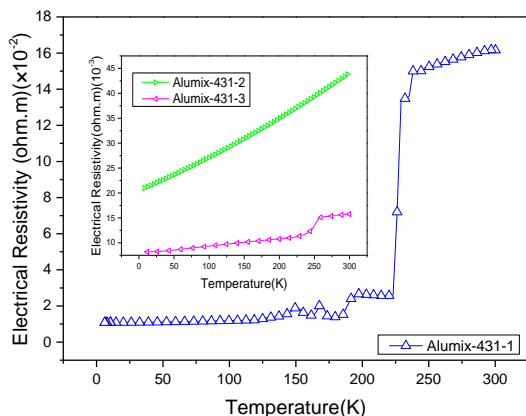


Figure 5. The Electrical Resistivity versus Temperature curve of Alumix-431-1, 2 and 3.

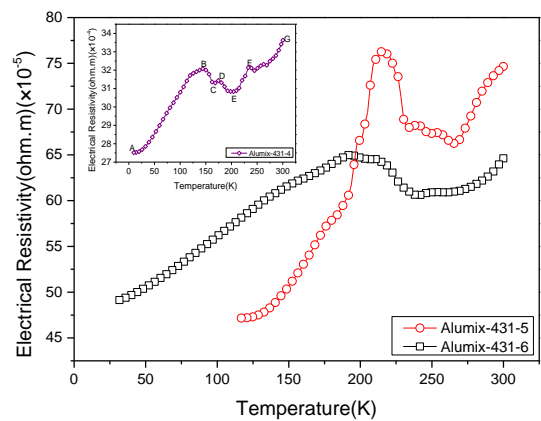


Figure 6. The Electrical Resistivity versus Temperature curve of Alumix-431-4, 5 and 6.

On Alumix-431-4-5-6 samples, it was observed the phase transition regions in Figure 6. Apparently the phase transition regions was realized on the Alumix-431-4 sample and characterized; AB- metallic transition because of the scattering of electrons from isotropic centers, BC-DE- semiinsulating transition the constitution of electron hole drop or quantum well, CD-EF- semimetallic transition anisotropic scattering of electrons from gap or cracked sites, FG- hybrid transition because of both the metalloid diffusion and semimetallic diffusion [45] (see in Figure 6). On Alumix-431-6 sample, it was appeared the variation of BC and CD phase transition regions decreases as temperature rises. The increase in resistivity for Alumix-431-5 system (at temperature range 5-300K) is explained lowers the resistivity of from $6.624 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ at 251.88K, $6.807 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ at 207.24K and $4.717 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ at 12.88K, and produces a metallic conductors shown in Figure 6. In Alumix-431-6 specimen, the decrease in resistivity is also observed in $6.457 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ at 203.16K, $6.0657 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ at 240.068K and $6.0807 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ at 140.60 K. These observings show that within these temperature ranges, there is a composition attribute that obtained semiconducting features while metallic behavior is sighted on both sides of these ranges (Figures 6) [46]. In Figures 6, it was observed the increasing of the resistivity due to the increasing of the lattice distortions, causing to the carrier concentration and decreasing of mobility [47,48]. Minimum electrical resistivity obtained on the Alumix-431-6 sample ($49.145 \Omega\text{m}$ at 31.68K) and then , on the Alumix-431-5 sample ($47.174 \Omega\text{m}$ at 116.86K).

A high quality thermoelectric material must be necessitated both a low electrical resistivity and a high thermopower and a low thermal conductivity. According to the Wiedemann-Franz law, total thermal conductivity is expressed by the transporting heat of carriers (holes and electrons) (κ_e) and the phonons travelled via the lattice (κ_{ph}) [49].

$$\kappa_{\text{total}} = \kappa_e + \kappa_{\text{ph}} \quad (2)$$

High thermal conductivity worsens the overall the thermoelectric performance. To provide thermoelectric performance of alloys, the thermal conductivity is decreased [50].

On all Alumix-431 samples, it was observed the increasing of thermal conductivity as rising of pressure and temperature and the thermal conductivity of compacted alloys on 350MPa were higher than the ones of compacted alloys on 400MPa. Increasing of thermal conductivity is occurred from rapidly both decreasing of electrical resistivity and strong increasing of the electronic thermal conductivity component (κ_e).

As generally examining Figs. 7 and 8; the low thermal conductivity was obtained on the Alumix-431-1 alloy compacted on the low pressure and temperature and it was recommended that low thermal conductivity was meant the having a higher content of solute elements in the α -Al matrix (0.260W/Km at 6.19 K). It was also observed the low thermal conductivity on Alumix-431-1 samples according to other alloys considering dominating via grain boundary and impurity scattering and considered the low thermal conductivity due to the occurring of heat transfer, embedded alloying elements the movements of free electrons that are primary source in order to transport heat in metals and decreasing free path [50,51]. The decreasing thermal conductivity is caused to the decreasing of the electronic thermal conductivity according to Wiedemann-Franz Law (see Fig 7). Maximum thermal conductivity was acquired in value of 24.31 W/Km at 297.065 K for Alumix 431-6 specimen. High thermal conductivity is led to low porosity position and large grain size because of decreasing grain boundary and spreading of phonons[52]. On Alumix -431 -6 sample, it also appeared having high density property after that one of compacted Alumix-431-5 sample on 400MPa/50°C. With increasing temperature, at Alumix-431-6 sample the thermal conductivity increased linearly and did not show any peak based on the microstructural change and, due to the rapidly decreasing of solid solubility of Cu atoms in the α -Al matrix, this case was occurred to increasing of thermal conductivity [53].

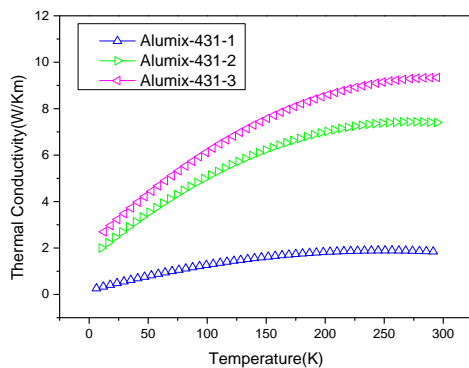


Figure 7. The Thermal Conductivity versus Temperature curve of Alumix-431-1, 2 and 3.

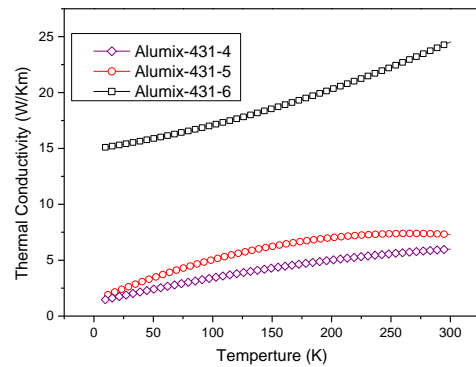


Figure 8. The Thermal Conductivity versus Temperature curve of Alumix-431-4, 5 and 6.

3.3.2. The Seebeck Coefficient of Alumix-431 alloy

The Seebeck coefficient value is significant physical feature because of enhancing the potential performance of thermoelectric materials and quite sensitive to electronic structure [50]. In transport property, a change is showed as the sign and the magnitude of $S(T)$ change rapidly demonstrating charge carriers varied from n-type to p-type [54]. At a temperature (T) the Seebeck coefficient is important value for electronic structure is expressed by Mott's formula;

$$S(T) = T \left(\frac{\partial \ln \sigma(E)}{\partial E} \right)_{E_F = E_F} \quad (3)$$

$\sigma(E)$ is expressed the electrical conductivity-reciprocal of electrical resistivity-as a function of function energy. According to the formula; Seebeck coefficient is suitable to the incline of DOS at the Fermi level and is generated via both electrons and holes [54]. The negative effect of Seebeck coefficient is occurred by the increasing of the electrons whereas the positive effect of Seebeck coefficient is acquired the increasing the carriers. Increasing of Seebeck coefficient is also recommended with inducing to the lower carrier concentration and decreasing of mobility on the same as electrical resistivity increasing values [48].

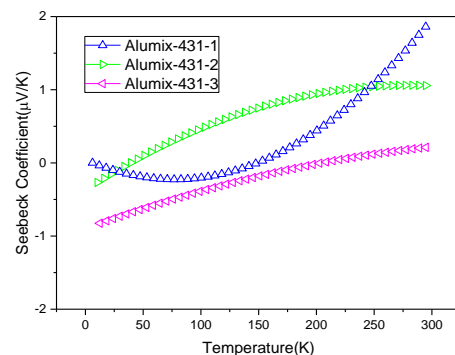


Figure 9. The Seebeck Coefficient versus Temperature curve of Alumix-431-1, 2 and 3

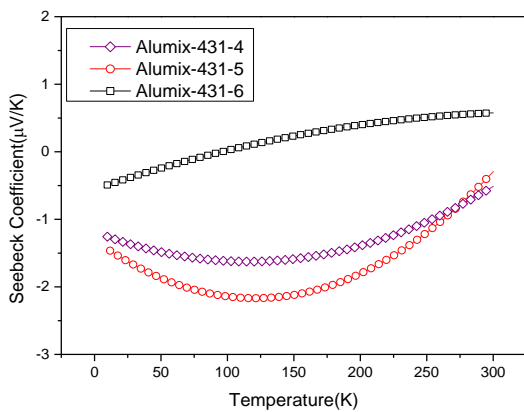


Figure 10. The Seebeck Coefficient versus Temperature curve of Alumix-431-4, 5 and 6

In Figures 9 and 10; it was observed ; on compacted Alumix-431 alloys on 350MPa, the Seebeck Coefficient values of Alumix-431-2 and 3 samples were continuously increased and on other compacted alloys on 400MPa, the value of only Alumix-431-6 was increased and also appeared the one of other sample firstly decreased and then increased. Alumix-431-2, 3, 6 samples showed the positive Seebeck coefficient occurred from holes stemmed from a powerful energy based on the hole mobility and caused to the positive TEP at higher temperatures. Reasons of increasing of conductivity (see Figures 7 and 8) and decreasing of Seebeck coefficient (see Figures. 9-10) are the formation of defects when applied sintering in reduced atmosphere and variation of carrier concentration on Alumix-431-1, 4, 5 samples [50].

For Alumix-431-1, 2, 3 and 6 samples, Seebeck coefficient values are neutralized at 59.49K, 32.59K, 198.67K and 164, 23K where neutralize of the Seebeck coefficient values respectively (see Figures 9 and 10). In Fig.9, the high Seebeck Coefficient was acquired on the Alumix-431-1 sample and the Seebeck Coefficient value firstly decreased due to the mostly electron concentration and then increased due to the carrier concentrations. The Seebeck coefficient value of this alloy was changed from n-type to p-type. At final temperature, the alloy was showed on the p-type mostly carrier concentration and gave the value 1.8663 μV/K at 294.90K. On the same time, high Seebeck coefficient is also corresponded to high porosity specimen and grain size because of the rising spreading carriers by the impurities and flaws that increased impurities and flaws caused to reducing the grain boundaries [52]. It was observed on Alumix -431-1 sample having the low density (2.482g/cm³) according to the other samples. In Figure 10, Alumix-431-5 had high Seebeck coefficient, presented n-type because of the mostly electron concentration and also gave 2.165μV/K at 121.49K.

3.3.3. The Figure of Merit of Alumix-431 alloys

The dimensionless thermoelectric figure of merit (ZT) summed up the thermoelectric properties is important factor in selecting material for TEP (thermoelectric power) generation and coolant [46]. As above expressed by formula; the Figure of merit (ZT) is calculated from electrical resistivity, Seebeck coefficient and thermal conductivity. The high ZT value is provided by low electrical resistivity and thermal conductivity and high Seebeck coefficient values.

On Figure 11; it was observed that the value of Alumix-431-1 sample was firstly decreased and then increased to final temperature and on the Alumix-431-3; the value changed reverse of the value of Alumix-431-3 sample. Also on the Alumix-431-2 sample, it was appeared increasing of the Figure of merit change. Minimum Figure of Merit was obtained on the Alumix-431 -3 sample due to low Seebeck Coefficient and high thermal conductivity (0.0055×10^{-3} ; 179.63K). On the other Figure 12; the Figure of merit values of Alumix-431-4 and -5 samples were firstly increased and then decreased. As is seen Figure 12; the maximum Figure of merit was obtained on Alumix-431-5 sample due to the low electrical resistivity and thermal conductivity and high negative Seebeck coefficient values according to the other all Alumix-431 samples (1.871×10^{-2} ; 96.904K). Also, on the Alumix-431-6 sample; Figure of merit of alloy was not showed continuously whether increasing or not the decreasing even though locally fluctuates and also given low values due to high thermal conductivity and low Seebeck Coefficient values even though minimum electrical resistivity.

On the all Alumix-431 samples; it was also observed the valleys due to the phase transition phase transition variation from η phase to η' phase [55].

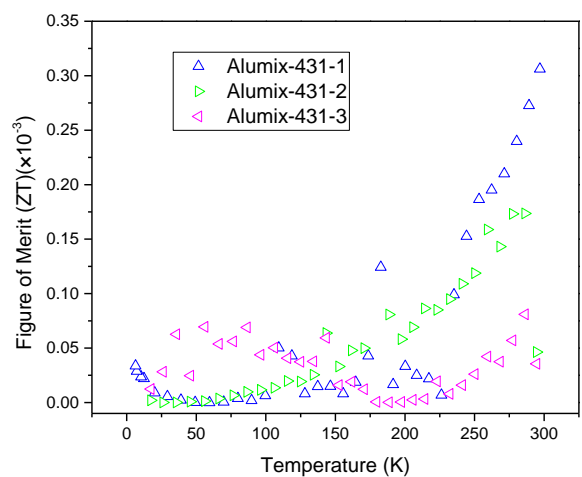


Figure 11. The Figure of Merit versus Temperature curve of Alumix-431-1, 2 and 3

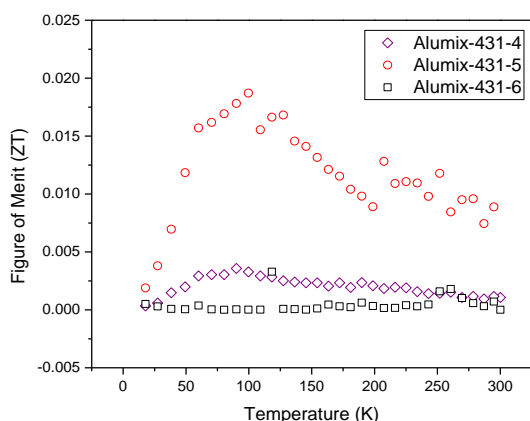


Figure 12. The Figure of Merit versus Temperature curve of Alumix-431-4, 5 and 6

4. CONCLUSIONS

The Alumix-431 materials prepared by cold and warm compaction method by applying to 350-400 MPa pressures at RT, 50, 80°C temperatures were investigated with regard to the density and thermoelectrical properties at 5-300K temperatures. It were attained following principal results;

1. The particle size characterization presents the irregular shape of particle size, multimodal distribution and mean particle size of 67.458µm

2. The high green density value were acquired at the compacted specimens on the 400MPa/50°C condition (Alumix-431-5).

3. The obtained physical experimental results show that at temperature range of 5-300 K under He atmosphere;

a. The maximum electrical resistivity and thermal conductivity were acquired 0.161Ωm [Alumix-431-1] and 24.31W/Km, [Alumix-431 -6] respectively and, minimum electrical resistivity and thermal conductivity values obtained on Alumix -431- 6, and 1 alloys, respectively.

b. The Seebeck Coefficient values changed mostly negative sign to positive sign due to dominate from carriers on Alumix-431 alloys compacted on 350MPa, at RT, 50 and 80°C temperatures, while the other Alumix-431 samples compacted on 400 MPa at same temperatures, except for Alumix-431-6 sample, showed giving the negative Seebeck Coefficient values. It was also observed the Alumix-431-6 samples compacted on high pressure and temperature, having the positive Seebeck Coefficient values.

c. Maximum Figure of Merit was obtained on the Alumix-431-5 sample (1.871×10^{-2} ; 96.904K); minimum Figure of Merit also was acquired on the Alumix-431-3 sample (0.0055×10^{-3} ; 179.63K).

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is supported by the Research Fund of Çukurova University, Adana, Turkey, under grant contract no. ÖYP-2090.

REFERENCES

- [1] Rahman M.M., Nor S.S.M. and Rahman H.Y., Technical Report, "Investigation on the effect of lubrication and forming parameters to the green compact generated from iron powder through warm forming route", *Materials and Design*, 32: 447-452,(2011)
- [2] Melúch L., "Warm compaction of aluminum alloy alumix 123", *Thesis of Doctoral of Philosophy*, University of Birmingham, page 237,(2009)
- [3] Jafar-Salehi E., Ghasempour A. and Eslamian M., "Experimental study and predictive modelling of cold compaction green density in powder metallurgy of stainless steel components", *Powder Metallurgy*, 56: 3, 208-215,(2013)
- [4] Cao G., Zhang Q. and Brinker C.J., "Annual review of nano research" Volume 3, *World Scientific Publishing*, Singapore, page 568, (2010)
- [5] Rahman M.M., Ariffin A.K., Nor S.S.M. and Rahman H.Y., "Powder material parameters establishment through warm forming route", *Materials and Design* 32: 264-271, (2011)
- [6] Bhuiyan M.H., Kim T.-S. Koo J.M. and Hong S.-J., "Microstructural behavior of the heat treated n-type 95% Bi₂Te₃-5% Bi₂Se₃ gas atomized thermoelectric powders", *Journal of Alloys and Compounds* 509: 1722-1728,(2011)
- [7] Zevalkink A., Toberer E. S., Zeier W. G., Flage-Larsen E. and Snyder G.J., "Ca₃AlSb₃: An inexpensive, non-toxic thermoelectric material for waste heat recovery", *Energy Environ.Sci.*, 4: 510-518, (2011)
- [8] Ohta H., Sugiura K. and Koumoto K., "Recent Progress in Oxide Thermoelectric Materials: p-Type Ca₃Co₄O₉ and n-Type SrTiO₃" *Inorg. Chem.*, 47, 8429-8436, (2008)
- [9] Snyder G.-J. and Toberer E.S., "Complex thermoelectric materials", *Nature Materials*, vol.7.: 105-114,(2008)
- [10] Fang S.F., Wang M.P. and Song M., "An approach for the aging process optimization of Al-Zn-Mg-Cu series alloys", *Materials and Design*, vol. 30:2460-246, (2009)
- [11] Jia Y., Cao F., Ning Z., Guo S., Ma P. and Sun J., "Influence of second phases on mechanical properties of spray deposited Al-Zn-Mg-Cu alloy", *Materials and Design*, vol. 40: 536-540, (2012)
- [12] Liu Y., Jiang D., Li B., Yang W. and Hu J., "Effect of cooling aging on microstructure and mechanical properties of an Al-Zn-Mg-Cu alloy", *Materials and Design*, vol. 57: 79-86, (2014)
- [13] Ekşi A., Veltl G., Petzoldt F., Lipp K. and Sonsino C.M., "Tensile and fatigue properties of cold and warm compacted alumix 431 alloy", *Powder Metallurgy*, 200A, vol 47, no.1: 60-64, (2004)
- [14] Feng W., Baiqing X., Yongan Z., Hongwei L., and Xiaoqing H. "Microstructural development of spray deposited Al-Zn-Mg-Cu alloy during subsequent porosity", *Journal of Alloys and Compounds*, 477: 616-621, (2009)
- [15] Xue W., Wang-Tian H., and Lai Y., "Corrosion behaviour and galvanic studies of microscopic oxidation films on Al-Zn-Mg-Cu alloy", *Surface ad Coatings Technology* 201: 8695-8701, (2007)

- [16] Mola R., "Fabrication and microstructural characterization of Al/Zn enriched layers on pure magnesium", *Material Characterization*, 78: 121-128, (2013)
- [17] Ferragut R., Somoza A. and Torriani I., "Pre-precipitation study in the 7012 Al-Zn-Mg-Cu Alloy by electrical resistivity", *Material Science and Engineering*, A334:1-5, (2002)
- [18] Guyot P. and Gottigines L., "Precipitation kinetics, mechanical strength and electrical conductivity of AlZnMgCu alloys", *Acta Mater* vol.44, no 10: 4161-4167, (1996).
- [19] Salazar-Guapuriche M.A., Zhao Y.Y., Pitman A., and Greene A., "Correlation of strength with hardness and electrical conductivity for aluminum alloy 7010", *Materials Science Forum*, vols 519-521:853-858, (2006)
- [20] Massadier V., Epicier T. and Merle P., "Correlation between the microstructural evolution of a 6061 aluminum alloy and the evolution of its thermoelectric power", *Acta Mater.*, 48,:2911-2924,(2000)
- [21] Sun D., Sun X.-C. and Northwood D.O., Sokolowski J.-H., "Thermoelectric power characterization of a 2024 aluminum alloy during solution treatment and aging", *Materials Characterization* 36:83-92, (1996)
- [22] Ahiska R. and Ahiska K., "New method for investigation of parameters of real thermoelectric modules", *Energy Conversion and Management* 51:338-345, (2010)
- [23] Ahiska R., Ahiska G. and Ahiska K., "Analysis of a new method for measurement of parameters of real thermoelectric module employed in medical cooler for renal hypothermia", *Instrumentation Science and Technology*, 37: 102-123, (2009)
- [24] Ahiska R., "New method for investigation of dynamic parameters of thermoelectric modules", *Turk J Elec Engin*, Vol.15, No.1,51-65 (2007).
- [25] Sebek J. and Santava E., "Influence of the sample mounting on thermal conductance measurements using PPMs TTO option", *Journal of Physics: Conference Series*,150:012044,1-4, (2009)
- [26] Borup K.A., Boor J. de. Wang H., Drymiotis F., Gascoin F., Shi X., Chen L., Fedorov M.I., Müller E., Iversen B.B. and Snyder G.J., "Measuring thermoelectric transport properties of materials", *Energy Environ. Sci.*, 8: 423-435, (2015)
- [27] Hettinger J.D., Lofland S.E., Finkel P., Meehan T., Palma J., Harrell K., Gupta S., Ganguly A., El-Raghy T. and Barsoum M.W., "Electrical transport, thermal transport, and elastic properties of M_2AlC ($M=Ti, Cr, Nb, \text{ and } V$)" *Physical Review B*, 72:115120, (2005)
- [28] Physical Property Measurement System Resistivity Option User's Manual, Quantum Design s.48
- [29] Rudianto H., Joo J.K., Sun Y.S., Jin K.Y. and Diouhy I., "Mechanical properties of sintered of Al-5.5Zn-2.5Mg-0.5Cu PM Alloy", *Materials Science Forum*, vols 794-796: 501-507,(2014)
- [30] Liu Z.Y., Sercombe T.B. and Schaffer G.B., "The effect of particle shape on the sintering of aluminum", *Metall. Mater. Trans.* A38: 1351-1357,(2007)
- [31] Buranasrisak P. and Narasingha M.P., "Effects of particle size distribution and Packing characteristics on the preparation of highly-loaded coal-water slurry", *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 3, no. 1: 31-35, (2012)
- [32] Naeem H.T., Mohammad K.S., Ahmad K.R. and Rahmat A., "Characteristics of Al-Zn-Mg-Cu alloys with nickel additives synthesized via mechanical alloying, cold Compaction and heat treatment", *Arap J.Sci. Eng.*, 39: 9039-9048, (2014)
- [33] LaDelpha A.D.P., Neubing H. and Bishop D.P., "Metallurgical assessment of an emerging Al-Zn-Mg-Cu P/M alloy", *Materials Science and Engineering*, A 520 :105-113, (2009)
- [34] Mondal C. and Mukhopadhyay A.K., "On the nature of $T(Al_2Mg_3Zn_3)$ and $S(Al_2CuMg)$ phases present in as-cast and annealed 7055 aluminum alloy", *Materials Science and Engineering*, A391:367-376, (2005)
- [35] Rudianto H., Jang G.J., Yang S.S., Kim, Y.J. and Dlouhy I., "Evaluation of sintering behavior of premix Al-Zn-Mg-Cu alloy powder", *Advances in Materials Science and Engineering*, volume 2015: 987687, 1-8, (2015)
- [36] Rudianto H., Jang G.J., Yang S.S., Kim Y.J. and Dlouhy I., "Effect of SiC particles on sinterability of Al-Zn-Mg-Cu P/M alloy", *Archives of Metallurgy and Materials*, volume 60, issue 2 :1383-1385,(2015)
- [30] Mazzer E.M., Alfonso C.R.M., Galano M., Kiminami C.S. and Bolfarini C., "Microstructure evolution and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy reprocessed by spray-forming and heat treated at peak aged condition", *Journal of Alloys and Compounds*, 579: 169-173,(2013)
- [37] Shokrollahi H. and Janghorban K., "Effect on warm compaction on the magnetic and electrical properties of Fe-based soft magnetic composites", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 313:182-186, (2007)
- [38] Feng S.-S., Geng H.-R. and Guo Zh.- Q., "Effect of lubricants on warm compaction process of Cu-based composite", *Composites: Part B*, 43: 933-939,(2012)
- [39] İynen, O., "The influence of sintering and shot peening processes on Alumix 431 Powder materials", *Master Thesis*, Çukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences, (2009)
- [40] Gökmeşe G. and Bostan B., "AA 2014 alaşımında presleme ve sinterlemenin gözenek morfolojisi ve mikroyapısal özelliklere etkileri", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part: C, Tasarım Ve Teknoloji GU J Sci Part: C 1*[1]:1-8, (2013)
- [41] Callister, W.D. Jr. and Rethwisch D.G., "Material science and engineering", Eight Edition, *XXVI John Wiley and Sons Asia Pte Ltd.* USA, page 974, (2011)
- [42] Aksan M.A., Göldeste A., Balcı Y. and Yakıncı M.E., "Degradation of superconducting properties in MgB_2 by Cu addition", *Solid State Communications*, 137: 320-325, (2006)
- [43] Aksan M.A., Altın S., Balcı Y. and Yakıncı M.E., "Structural characterization and transport properties of the $HT_c Bi_2Sr_2(Ca,Cd)Cu_2O_{8+\delta}$ glass-ceramic rods", *Materials Chemistry and Physics* 106: 428-436, (2007)
- [44] Smontara A., Smiljanić I., Bilušić A., Jagličić Z., Klanjšek M., Roitsch S., Dolinšek J. and Feuerbacher M., "Electrical, magnetic, thermal and thermoelectric properties of the "Bergman phase" $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ complex metallic alloy", *Journal of Alloys and Compounds* 430: 29-38, (2007)
- [45] Gormani M.A., Raza S.M., Farooqui N., Ashfaq M. and Ahmed M.A., "On thermally activated electrical resistivity in metallic glasses", *Solid State Communications*, vol. 95, no. 5: 329-333, (1995)
- [46] Tani J.-I. and Kido H., "Thermoelectric properties of Al-doped $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ [$x \leq 0.1$]", *Journal of Alloys and Compounds*, 466: 335-340, (2008)

- [47] Rana R. and Liu C., "Thermoelectric power in low-density interstitial-free iron-aluminum alloys", *Philosophical Magazine Letters*, Vol. 93, No. 9: 502–511, (2013)
- [48] Sang S., Wang J., Xu B., Lei X., Jiang H., Zhang Q., and Ren Z., "Thermoelectric properties of n-type $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ with addition of nano ZnO:Al Particles", *Materials Research Express* 1:035901, 1-8, (2014)
- [49] Elsheikh M.H., Shnawah D.A., Sabri M.F.M., Said S.B.M., Hassan M.H., Bashir M.B.A. and Mohamad M., "A review on thermoelectric renewable energy: principle parameters that affect their performance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30 :337–355, (2014)
- [50] Cheng H., Xu X.J., Hng H. and Ma J., "Characterization of Al-doped ZnO thermoelectric materials prepared by RF plasma powder processing and hot press sintering", *Ceramics International*, 35 :3067-3072, (2009)
- [51] Krishna S.C., Supriya A.K., Pant B., Sharma S.C., and George K.M., "Thermal conductivity of Cu-Cr-Zr-Ti alloy in the temperature range of 300–873K", *International Scholarly Research Network ISRN Metallurgy*, Volume 2012: 580659, 4 pages, (2012)
- [52] He Z., Platzek D., Stieve C., Chen H., Karpinski G., and Müller E., "Thermoelectric properties of hot-pressed Al- and Co-doped iron disilicide materials", *Journal of Alloys and Compounds*, 438: 303–309, (2007)
- [53] Broudouy B. and Four A. "Low temperature thermal conductivity of aluminum alloy 5056", *Cryogenics*, 60:1-4, (2014)
- [54] Kuo Y.K., Lue C.S., Hsu G., Huang J.Y. and Hsieh H.L., "Investigation of Al substitution on the thermoelectric properties of SrSi_2 ", *Materials Chemistry and Physics*, 137: 604-607, (2012)
- [55] Pan L., Qin X.Y., Xin H.X., Song C.J., Wang Q., Sun J.H., and Sun R.R., "Effect of silicon condition on thermoelectric properties of bulk Zn_4Sb_3 at low temperatures", *Solid State Science*, 12: 1511-1515, (2010)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

İnşaat projelerinde kör noktalardan kaynaklanan iş kazalarını önleme sistemi

Job accident prevention system for accidents caused by blind spots in construction projects

Yazar(lar) (Author(s)): Serkan KIVRAK

ORCID: 0000-0001-7660-6488

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kıvrak S., “İnşaat projelerinde kör noktalardan kaynaklanan iş kazalarını önleme sistemi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 351-357, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385914

İnşaat Projelerinde Kör Noktalardan Kaynaklanan İş Kazalarını Önleme Sistemi

Araştırma Makalesi / Research Article

Serkan KIVRAK*

Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İki Eylül Kampüsü, Eskişehir, Türkiye

(Geliş/Received : 17.03.2017 ; Kabul/Accepted : 22.06.2017)

ÖZ

İnşaat sektörü iş kazaları açısından en riskli sektörlerden biri olarak bilinmektedir. İnşaat sektöründe iş sağlığı ve güvenliği istatistiklerine göre yüksekten düşme ve ekipman kazaları, iş kazalarının büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Bu tip kazalara neden olan en önemli etkenlerden biri inşaat ekipmanlarında ve döşeme boşlukları gibi tehlikeli yerlerde var olan kör noktalardır. Bu çalışmada inşaat projelerinde kör noktalardan kaynaklanan iş kazalarının önlenmesine yönelik bir iş güvenliği sistemi geliştirilmiştir. Sistemde sensörler, RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama) ve GPS (Küresel Konumlama Sistemi) kullanılmıştır. Sistem, temsili laboratuvar-şantiyede test edilmiştir. Test sonuçlarına göre, sistemin şantiyelerde kör noktalardan kaynaklanan iş kazalarını azaltmada önemli katkılar sağlayacağı öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İnşaat sektörü, iş kazaları, kör noktalar, sensörler.

Job Accident Prevention System for Accidents Caused by Blind Spots in Construction Projects

ABSTRACT

The construction industry has been recognized as one of the most hazardous industries. According to the health and safety statistics in construction, fall from height and equipment related accidents comprise the majority of construction accidents. One of the main factors causing this type of accidents are blind spots which exist in construction equipment and dangerous areas such as slab openings. In this study, a safety system has been developed to prevent accidents caused by blind spots in construction projects. In this system, sensors, RFID (Radio Frequency Identification) and GPS (Global Positioning System) have been used. The system is tested on simulated construction site. Based on the test results, it has been proposed that the system can significantly reduce construction accidents caused by blind spots.

Keywords: Construction industry, job accidents, blind spots, sensors

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnşaat sektörü, istatistiklere göre iş kazası ve kaza sonucu ölümlü ve ağır yaralanmalı olay sayısı bakımından tüm sektörler arasında ilk sıralarda yer almaktadır [1]. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının çok yetersiz olduğu araştırmacılar tarafından sıkça dile getirilen bir husustur [2]. Dünyada özellikle son yıllarda inşaat firmalarının iş sağlığı ve güvenliği konusuna daha fazla önem verdikleri görülmektedir [3]. İş kazalarının yol açtığı manevi zararların yanı sıra kazalar sonucu ödenen tazminat ve sigorta maliyetleri, dünyadaki inşaat firmalarının iş güvenliğine daha fazla odaklanmalarını sağlayan önemli etkenlerdendir. Ayrıca, dünyanın birçok gelişmiş ülkesinde inşaat firmalarının başarısı projelerde iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarını başarılı bir şekilde tamamlamaları ile değerlendirilmektedir [4]. Gelişmiş ülkelerde inşaat sektöründeki ölümler, artık iş yapmanın bir parçası olarak kabul edilmemektedir [1]. Dünyanın önde gelen inşaat firmaları iş sağlığı ve güvenliği

uygulamalarını verimli bir biçimde firmalarına adapte etmekte ve ‘sıfır kaza politikası’ni kendilerine bir hedef olarak ortaya koymaktadır [5]. Ayrıca bu firmalar, güvenlik uygulamalarında gelişmiş teknolojileri adapte ederek etkili bir iş sağlığı ve güvenliği yönetimi ile iş kazalarını minimuma indirmeyi amaçlamaktadır.

İş kazaları temelde güvensiz davranışlar ve güvensiz durumlar nedeniyle meydana gelmektedir. Güvensiz davranışlar, çalışanların davranışlarından kaynaklanan kişisel faktörlerdir. Tehlikelerin önemsenmemesi ve kişisel koruyucu malzeme kullanımı yetersizliği güvensiz davranışlara örnek olarak verilebilir. Güvensiz durumlar ise saha koşullarının uygunsuzluğu, ekipmanın niteliği, araç ve ekipmanın bakım ve kontrollerinin yapılmaması ve kör noktalar gibi işyerinde her an kazaya yol açabilecek şartların varlığıdır. Araştırmalara göre kör noktalar, engeller ve aydınlatma koşulları görüş oranının düşüklüğünden kaynaklanan ölümlerin en yaygın nedenleri olmuştur. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri’nde görüşün yetersiz olmasından kaynaklanan ölümler, 1990-2007 yılları arasında inşaat sektöründe meydana gelen ölümlerin yaklaşık %5’ini oluşturmaktadır [6]. Kör noktalar, operatörün görüş

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : serkankivrak@anadolu.edu.tr

alanını kısıtlayarak yerdeki malzeme ve çalışma alanlarındaki diğer ekipmanı ve personeli görmelerini engelledikleri için sorun yaratmaktadır [7]. Dolayısıyla inşaat projelerinde kör noktaların varlığını tanımlayabilecek ve kör noktalardan kaynaklanan kazaları önleyebilecek sistemlerin oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Şimdiye kadar şantiyelerde kör noktalardan kaynaklı kazaları engellemek amacıyla yapılan çalışmalar nispeten az sayıdadır ve şantiye uygulamalarında bazı kısıtlamalara sahiptir. Bu çalışmada inşaat projelerinde kör noktalardan kaynaklanan iş kazalarının önlenmesine yönelik yenilikçi bir iş güvenliği sistemi geliştirilmiştir. Sistemin inşaat projelerinde kör nokta kaynaklı iş kazalarını azaltmada önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

2. İNŞAAT PROJELERİNDE KÖR NOKTALAR (BLIND SPOTS IN CONSTRUCTION PROJECTS)

Kör noktalar, sahada görünmeyen veya görünme ihtimali düşük olan ve kazaya neden olabilecek bölgeler olarak tanımlanabilir. Kör noktaların kaynakları; insan fizyolojisinden kaynaklanan görme ve algılama sınırları, iş makinelerinin operatöre yarattığı görme ve algılama engelleri, ve şantiye ya da yapıdan kaynaklanan doğal tehlikeli iş ortamları olarak 3 kısım halinde incelenebilir [8]. Bu kaynakların her biri bir işçinin hayatını ciddi bir biçimde tehdit etme potansiyeline sahiptir.

İnşaat ekipmanları kazaları çoğu zaman görüşün yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Yağmur, toz ve çatlama veya kirli pencereler, sınırlı görüşün sebepleri arasında yer almaktadır. Bir ekipmanın hareketi; operatörün görüş alanı, reaksiyon zamanı ve dikkat/odak seviyesinden etkilenmektedir. Bu faktörlerden herhangi birinde bir sorun yaşanması durumunda kaza olma ihtimali yükselmektedir [9]. Ekipman operatörleri özellikle geri manevralarda aracın arka kısmını görmemeleri sonucunda kazaya neden olmaktadır. Ekipmanlardaki düşük görme açısı kör noktaları artırıp, operatörün ve işçilerin kaza yapmalarına neden olmaktadır [10]. Akademik araştırmaların yanı sıra otomobil üreticileri, kör noktalara çözüm üretmek için üç farklı yöntem geliştirmiştir. İlk çözüm, standart aynaların içine eklenmiş, görüş alanını genişleten dışbükey şeklindeki küçük kör nokta aynalarının kullanımıdır. Daha kullanışlı ve düşük maliyetli olan ikinci yöntem ise kapalı devre televizyon sisteminin kullanılmasıdır. Bu çözüm araç kabini içindeki ekrana odaklanmayı gerektirmesi nedeniyle operatör için dikkat dağıtıcı olabilmektedir [11]. Üçüncü yöntem ise daha gelişmiş kör nokta monitör veya alarm sistemi kurulmasıdır [12].

Görüşün düşük olmasından kaynaklanan kazaların nedenleri; atmosferik engeller, genel engeller, çok aydınlık ortam, çok karanlık ortam ve kör noktalar olarak 5 farklı kategoride incelenebilir. Hava durumundan kaynaklanan engeller, görüş mesafesini ve operatörlerin doğruluk düzeyini düşürücü etkiye sahiptir. Kötü hava koşulları; farlar, ön cam ve işaretler üzerindeki etkileriyle görüşürlük düzeyini düşürmektedir. İkinci kategorideki

engeller, operatörün çevresindeki işçilerle arasındaki görüşü bloke eden durumları kapsamaktadır. Bu duruma örnek olarak işçinin görüşünü engelleyen toprak yığınları veya dolgu malzemeleri verilebilir. Çok aydınlık ortam kategorisi, ani parlaklık ya da karanlık bir ortamdaki aydınlık bir ortama geçişte göz kamaşması yaratarak çevrede yer alan objelere dair referans noktasını yitirmenin sebep olduğu kazaları içermektedir. Dördüncü kategori olan çok karanlık ortam, aydınlatmanın yetersiz olduğunda gözlenmektedir. Bu kategori, çoğunlukla gün doğumu ve batımı zamanı yetersiz aydınlatma eşliğinde yapılan çalışmalarda işçi yaralanmalarını ya da ölümlerini kapsamaktadır [13]. Beşinci kategoriye kör noktalar oluşturmaktadır. Kör noktalar, operatörün görüş alanını kısıtlamaları nedeniyle kazaya neden olabilmektedir.

İnşaat ekipmanları çoğunlukla yerden yüksek sürüşü olan ve büyük lastik üzerinde konumlandırılmış taşıma araçlarıdır. Örneğin damperli kamyon, malzemenin düşmesini engellemek için her tarafı kapalı olan bir taşıma alanına sahiptir. Bu alan "kör nokta" yaratarak operatörü sınırlı görüş alanı sağlayan dikiz aynalarını kullanmayı zorunlu kılar. Dikiz aynalarının civarında ve kamyon kasasının arkasındaki objeler çoğunlukla görüşün dışında kalmakta ve geri manevranın gerekli olduğu zamanlarda tehlikeli durumlar yaratmaktadır. Hinze ve Teizer'in [13] yaptıkları çalışmaların sonuçlarına göre ekipmanların geri manevralarında gerçekleşen kazaların sayısı ekipmanların ileri giderken gerçekleşen kazaların sayısının yaklaşık dört katıdır. Kör nokta oranı karşılaştırıldığında, ekipmanların geri manevra esnasında yaşanan kaza sayısının yüksek olması ekipmanların hareket esnasındaki kör nokta oranları ile doğru orantılıdır. Günümüzde ekipmanların geri manevralarında operatörleri kör noktalar konusunda uyararak için geliştirilmiş uyarı sistemleri mevcuttur. Görsel ya da radar tabanlı algılama ve uyarı sistemleri inşaat sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte bazı ekipmanların ileri giderken daha yüksek kaza oranlarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Hinze ve Teizer [13] bu durumu ekipman aksamının yarattığı hareketli kör noktalarla açıklamaktadır. Örneğin ekskavatör kovanının sürekli hareket halinde olması, ekskavatörün yakınında çalışan bir işçinin görüş alanının dışında kalması tehlikesini oluşturmaktadır.

Teizer ve ark. [7], şantiyelerde kör noktaları belirlemek amacıyla lazer tarayıcıları kullanmıştır. Ekskavatörler, damperli kamyonlar, greyderler, silindirler, lastikli yükleyiciler ve küçük ağır ekipmanlar gibi araçların dışına ve kabinin içindeki sürücü koltuğuna lazer tarayıcı monte edilerek lazer taraması yapılmıştır. Teizer ve ark. [7], 3 boyutlu lazer tarayıcı tarafından toplanan verilerin analiz edilmesi için ışın izleme algoritması kullanmıştır. Işın izleme, sürücünün durduğu yerden mükemmel bir ışık kaynağı kullanma fikrine benzetilmektedir. Teizer ve ark. [7] yönteminin bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. En önemli problemlerden biri kör noktaları tespit eden lazerin uzaklık ve açısal kısıtlamalarıdır. Örneğin; lazer

tarayıcıların bir kısmı 0,6 m'den daha yakın ve $3\pi/4 \leq \theta \leq \pi$ aralığında olan noktaları okuyamamaktadır.

Teizer ve ark.'nın [7] çalışmasına benzer bir diğer araştırma Lee ve ark. [14] tarafından gerçekleştirilmiştir. Lee ve ark. [14] RFID teknolojisini kullanmış, ek olarak RTLS sistemini (Gerçek Zamanlı Konumlandırma Sistemi) iş güvenliği yönetim sistemine dahil etmişlerdir. Geliştirdikleri sistem RFID'nin bilgi depolama, transfer kapasitesi ve görece ucuz montaj maliyeti gibi faydalarına sahip olarak şantiyeler için uygulamada etkili bir yöntem önermektedir. Lee ve ark. [14], çalışmalarında LOS ve NLOS olmak üzere iki çeşit ortam tanımlamışlardır. LOS (Açık Görüş Hattı); verici ve okuyucular arasında iletişimi ve sinyal transferini olumsuz etkileyecek herhangi bir engelin olmadığı ortamlardır. NLOS (Açık Olmayan Görüş Hattı); verici ve okuyucular arasında iletişimi ve sinyal transferini olumsuz etkileyecek engellerin (duvar, malzeme, ekipman, işçi vb.) olduğu ortamlardır ve şantiyelerin büyük çoğunluğu NLOS ortamlarından oluşmaktadır. Lee ve ark.'nın [14] geliştirdiği sistemin odak noktası sinyal elverişliliğinin iyileştirilmesi olmuştur. Geliştirilen sistemde gerçek ve tahmin edilen koordinatlar arasında hatalar çıkmasına rağmen, özellikle çelik yapılarda uygulanabileceği öngörülmüştür.

Kör noktaların diğer bir türü de hareket halinde olan kör noktalar. Hareketli kör noktalar, operatörün çok daha dikkatli bir şekilde çalışmasını ve sahadaki işçilere ve engellere karşı dikkatli olmasını gerektirmektedir. İnşaat ekipmanları ve işçilerin dışında şantiyenin kendi fiziki şartlarından kaynaklanan kör noktalar mevcuttur. Şantiyedeki kör noktalar genellikle proje uygulama planları ya da yapım aşamalarından kaynaklanan bölgelerdir. Örneğin döşeme boşlukları, inşaat işlerinin aşamalı yapılmasından kaynaklanan kör noktalardan biri olarak gösterilebilir. Şantiyelerdeki kazalara neden olan diğer boşluk tipi binaların çatısında oluşan boşluklardır. Çatının döşenmesi ya da tamir aşamasında işçinin kontrol ve dengesini kaybedip boşluğa düşmesiyle meydana gelen kazalara sıkça rastlanmaktadır. Bu tip kazalara neden olan faktörlerin başında işçinin görüş açısından kaynaklanan kör nokta alanları gelmektedir.

Literatürde yer alan çalışmaların inşaat projelerinde kör noktalardan kaynaklanan kazaların önlenmesine yönelik çok önemli katkıları olmuştur. Ancak bu konuda gerçekleştirilen çalışmalar halen nispeten sınırlıdır ve uygulamada bazı kısıtlamalara sahiptir. Bu çalışmada sensörler, RFID, GPS teknolojileri ile birlikte hareket/hareketsizlik sensörleri de kullanılarak kör nokta kaynaklı kazaların önlenmesine yönelik literatüre ve sektöre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

3. SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ (DEVELOPMENT OF THE SYSTEM)

Bu çalışmada inşaat projelerinde kör noktalardan kaynaklanan kazaları önlemek amacıyla bir iş sağlığı ve güvenliği sistemi geliştirilmiştir. Sistem; sensörler (vericiler ve alıcılar), RFID, hareket/hareketsizlik

sensörü ile GPS kullanılarak tasarlanmıştır. Vericiler, bir alanda tanımlanabilir sinyalleri üreten; alıcılar ise bu sinyalleri alıp analiz edip işleyen araçlar olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada vericiler merdiven ve duvar açıklıkları gibi inşaat alanında tehlike yaratacak bölgeler ile inşaat ekipmanlarına yerleştirilmiştir. İnşaat işçileri vericiden sinyal alan alıcılar taşımıştır. Tehlike anında ve tehlikeli yerlerde, vericiler sinyal (alarm) gönderirken; alıcılar da bu sinyali almış ve yaklaşan bir tehlikeden kişi/kişileri korumuştur. Böylece, kazaları azaltmak ve iş sağlığı ve güvenliği için etkili bir araç geliştirilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, işçilerin çalışma esnasındaki hareketlerini izlemek amacıyla hareketsizlik sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörler, şantiyelerde işçilerin kalp krizi, bayılma ve şuur kayıpları nedeniyle meydana gelen kaza ve ölümleri engellemek amacıyla kullanılmıştır. İşçinin sağlık problemi nedeniyle nabız atışlarının çok yavaşladığı ya da hızlandığı belli bir sürenin (ortalama 1-2 dak.) aşılması halinde acil müdahale etmek amacıyla işçilerin üzerine hareketsizlik sensörü yerleştirilmiş ve bu sensörler ile GPS sistemleri arasında bir bağlantı kurulmuştur. Sistemin programlanması ve kullanımı ile ilgili detaylar ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

3.1. Sistemin Programlanması (Programming the System)

Sistem, GPS ve RFID birimlerinin haberleşmesi ile mevcut arazide çalışan işçi ve iş makinelerinin konumlarını web ortamında izlemek ve otomatik olarak tehlikeli alanlarda ve kör noktalarda iş kazalarını önlemeye yönelik olarak tasarlanmıştır. Sistemde; RFID, hareket/hareketsizlik sensörü ile GPS koordinat sistemleri birlikte kullanılmıştır.

RFID teknolojisi, bir tür otomatik tanımlama, veri toplama ve lokal veri saklama teknolojisidir. Barkod gibi diğer otomatik tanımlama teknolojilerine göre en büyük avantajı veri okuma mesafesinin yüksek olması ve okuma yapmak için belli bir açı ile doğrudan görüş gerektirmemesidir. Bu özelliği ile çok düzenli olmayan ve dinamik bir yapısı olan inşaat sahalarında otomatik veri toplamaya olanak sağlamaktadır [15-17]. RFID etiketleri 3 farklı şekilde olabilir; pasif (etkisiz), yarı pasif (yarı etkin) veya aktif (etkin). Pasif etiketlerin kendi güç kaynakları yoktur, okuyucunun gücüyle çalışırlar. Buna karşılık, yarı pasif etiketlere ise gelen sinyalden güç almaya gerek bırakmayacak şekilde küçük bir pil eklenmiştir. Aktif etiketler ise, diğer çeşitlerden farklı olarak devrelerini çalıştırmalarını ve cevap sinyali üretmelerini sağlayan kendi güç kaynaklarına sahiptirler. Bu özellikleriyle yüksek performans sergilerler ancak maliyetleri daha yüksektir [18]. Bu çalışmada, yüksek hassasiyetinden dolayı üçüncü tip, aktif olan RFID etiketi kullanılmıştır. Aktif etiketlerde iletim bandı 13.56 MHz olarak ayarlanmıştır.

Bir Radyo Frekansı ile Tanımlama sisteminde, nesnelere tesbit etmek için nesnelere eklenen sensörler kullanılır. Alıcı sensöre bir sinyal gönderir ve geri gelen yanıtı okur. Alıcılar genellikle kendi verilerini RFID yazılım/katmanı çalıştıran bir bilgisayar sistemine iletir. Sensörün

üzerindeki bilgiler kolayca silinmeyen bellekte, elektronik olarak saklanır. RFID sensörler, küçük bir radyo frekans verici ve alıcı içerir. Bir RFID alıcısı sensörü sorgulamak için kodlanmış bir radyo sinyali gönderir. Sensör mesajı alır ve kendi kimlik bilgileri ile yanıt verir. Bu sadece tek bir sensör seri numarası ya da işçi bilgileri ile olabilir. Bu çalışmada yazılabilir sensörler kullanılmıştır. Bu özellik sayesinde her sensör için herhangi bir veri yazılabilir. En iyi sonuçları elde etmek için de her aktivite (basınç, yükseklik ve ısı değişiklikleri) algılanabilir. İşçiler üzerine yerleştirilen sensörlerin okuyucu tarafından okunmasıyla bilgiler otomatik olarak kaydedilebilir veya değiştirilebilir.

Sistem tasarımının gerçekleştirildiği ana bilgisayarda bulunan IIS (web sunucusu) vasıtasıyla arazide çalışan işçi ve iş makinelerinin konumları önceden verilen kullanıcı adı ve şifre vasıtasıyla web sayfasından izlenebilir. Veritabanına kaydedilen her veri, günlük, haftalık ve aylık olarak depolanır. Ayrıca, her GPS günlük hareket aktiviteleri de görsel olarak .jpg formatında veri tabanında kayıt altına alınır. GPS uydularının gönderdiği sinyaller ile GPS alıcısı konumunu tam olarak tespit edebilir. Sistemin geliştirilmesi aşamasında C++ ve ASP.NET programlama dilleri ve MySQL veri tabanı yönetim sistemi kullanılmıştır. Sistem için geliştirilen baret-GPS-RFID birimi Şekil 1-2’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Baret-GPS birimi (Helmet-GPS unit)



Şekil 2. Baret-GPS-RFID birimi (Helmet-GPS-RFID unit)

3.2. Sistemin Test Edilmesi (Testing of the System)

Sistem, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin bulunduğu İki Eylül Kampüsü'nde test edilmiştir. Temsili laboratuvar-şantiye olarak seçilen bölgede belirli kör noktalara sensörler yerleştirilmiştir. Sensörler, merdiven ve duvar açıklıkları gibi tehlike yaratacak alanlar ile inşaat ekipmanlarına yerleştirilmiştir. Temsili şantiyede yerleştirilen bu sensörlerden bazı görüntüler Şekil 3-6'da verilmiştir.

Temsili şantiyede yapılan testlere 5 işçi katılmıştır. Testlere katılan işçilere çalışma kapsamında geliştirilen ve üzerinde sensörler bulunan baretler verilmiştir. GPS ve RFID birimlerinin haberleşmesi ile şantiyede üzerinde sensörleri taşıyan işçilerin konumları temsili şantiye ofis merkezinde web ortamında izlenmiştir. İşçilerin üzerine yerleştirilen sensörlerin okuyucu tarafından okunmasıyla bilgiler otomatik olarak kaydedilmiştir. Her bir baret ve iş makinasının XML dosyası kodlanmıştır. Bu XML dosyası her bir aracın konumunu kayıt altına almış ve veri tabanına depolanmıştır. Baretlerin ve iş makinelerinin belli frekanslar aracılığı ile arazinin belli noktalarında bulunan RFID cihazları ile bağlantı kurması için ortak frekans kodları belirlenmiştir. Baretlerde bulunan hafıza birimi aracılığı ile işçinin tehlikeli bölge giriş verileri kodlanmış ve şantiye ofis merkezinde bulunan ana bilgisayara kaydedilmiştir. Arazide çalışan işçi daha önceden işlemciye kodlanmış hareketsizlik süre kodu (5 dak.) ile takip edilmiş ve işçi hareket etmediğinde, üç eksenli GPS (darbeye duyarlı) hareketsizlik sensörü RFID aracılığı ile ana bilgisayara veri göndererek program aracılığı ile işçinin haritadaki konumunu siyah renge dönüştürmüştür. Ayrıca, hareketsizlik süresi aşıldığında sistem vasıtasıyla şantiye sorumlularının (proje müdürü, şantiye şefi, iş sağlığı ve güvenliği müdürü vs.) mobil cihazlarına ilgili işçinin konumunu ve bilgilerini açıklayan bir mesaj gönderilmektedir. Dolayısıyla şantiyede çalışan diğer işçilerin farketmediği ve işçinin bayılma ve kaza sonucu hareketsiz kalması gibi durumlarda zaman kaybetmeden işçiye acil müdahale etme imkanı sağlanmaktadır. İşçi ve iş makinelerinin takibinde alıcılar sensöre bir sinyal göndermiş ve geri gelen yanıtı okumuştur. Sensörün üzerindeki bilgiler bellekte elektronik olarak saklanmıştır.



Şekil 3. Sensörlerin yerleşimi-I (Layout of the sensors-I)



Şekil 4. Sensörlerin yerleşimi-II (Layout of the sensors-II)

Baretlere ve iş makinelerine monte edilen devrelerde hareketsizlik sensörü, harekete duyarlı sensör, işlemci, titreşim motoru, RFID, hafıza birimi ve GPS birimleri mevcuttur. İşçilerin kullandığı baretlerin üzerine monte edilen GPS, RFID elektronik devre aracılığı ile şantiyede 500-1000 m uzaklık içindeki işçilerin ve iş makinalarının konumlarını ana bilgisayarda bulunan veri tabanına ve arayüz programına 3 saniye ara ile enlem-boylam verilerini ve tehlikeli bölge merkez noktasını hesaplayarak veri tabanına aktarmaktadır. Devreye bağlı olarak çalışan GPS, çalışanların ve iş makinalarının konumlarını veri tabanından alarak web arayüzünde izleme olanağını sağlamaktadır (Şekil 7).



Şekil 5. Sensörlerin yerleşimi-III (Layout of the sensors-III)



Şekil 6. Sensörlerin yerleşimi-IV (Layout of the sensors-IV)



Şekil 7. İşçilerin web arayüzünde takibi-I (Tracking workers on the web-I)

Temsili şantiyede testlerin uygulama aşamasında kör nokta tehlike mesafe alanı 20 m olarak belirlenmiş ve geliştirilen yazılıma adapte edilmiştir. İşçiler belirlenen bu mesafe alanlarına girdiklerinde ana bilgisayardaki yazılım ve RFID aracılığı ile baretlerine titreşim gönderilmiştir. Bu titreşimler işçilerin kör nokta tehlike mesafe alanına girdiklerinde başlamakta ve tehlikeli alana yaklaştıkça şiddeti artarak devam etmektedir. Dolayısıyla işçilerin tehlikeli alana ulaşmadan titreşimleri hissetmeleri sağlanmaktadır. İşçi ve iş makineleri aktif ve tehlike alanda olmadığında yeşil, tehlikeli alana girdiğinde ise kırmızı renk ile izleme programında görsel olarak kodlanmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. İşçilerin web arayüzünde takibi-II (Tracking workers on the web-II)

Titreşimlerin sistem yazılımı ve RFID vasıtasıyla otomatik olarak gerçekleşmesi nedeniyle işçilerin web arayüzünde sürekli izlenmesi gerekmemektedir. İşçilerin web arayüzündeki takibi; gerektiğinde işçilerin ve iş makinelerinin konumlarını belirlemek ve bilgileri kayıt altına alarak her bir işçinin tehlikeli alana yaklaşma verilerini elde etmek amacıyla kullanılabilir. Bu veriler, düzenli olarak gerçekleştirilecek iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinde işçilerin şantiyelerindeki kör noktalara karşı gösterdikleri davranışları değerlendirmek ve gerektiğinde iyileştirmeler yapmak amacıyla kullanılabilir.

Hareketli inşaat ekipmanları için de benzer işlemler gerçekleştirilmiştir. İnşaat ekipmanı tehlikeli bölgeye yaklaştıkça (örneğin 5 m) ekipmanın ateşleme sistemine entegre edilen elektronik devre işleme girmektedir. Bu esnada C++ ile oluşturulan masaüstü kontrol yazılımı vasıtasıyla RFID birimine bir uyarı kodu gönderilmektedir. RFID birimi de ekipmana entegre edilen elektronik devreye sinyal göndermektedir. Bu sinyal ile ekipmanın elektronik devresinin bağlı olduğu ateşleme sistemi devre dışı bırakılarak ekipmanın hareket kabiliyeti kısıtlanmaktadır. Dolayısıyla ekipmanın kaza yapma riski önlenmektedir.

Sistem; bina, köprü, baraj ve tünel gibi her çeşit şantiyede kullanılabilir nitelikte tasarlanmıştır. Sistemden en iyi performansı elde etmek amacıyla ana bilgisayar ve kör nokta bölgeleri arasındaki mesafelerin 500-1000 m'yi aştığı şantiyelerde her 1000 metrede bir ek RFID cihazlarının kullanılması gerekmektedir. Benzer şekilde binaların her katında, kat sınırlaması olmaksızın, ek RFID cihazların yerleştirilmesi sistemin verimli bir biçimde çalışmasını sağlayacaktır. Sistemin kurulum maliyeti işçi başına yaklaşık 2.000 TL olarak hesaplanmıştır. Şantiyelerde iş kazalarının meydana gelmesi durumunda manevi zararların yanı sıra kazalar sonucu ödenen tazminat ve sigorta maliyetleri göz önüne alındığında sistemin kurulum maliyetinin kaza sonucu ortaya çıkan maliyetlerden daha az olacağı öngörülmektedir. Ayrıca, sistemin web arayüzünden

sürekli takibi gerektirmemesi, titreşimlerin sistem yazılımı ve RFID vasıtasıyla otomatik olarak gerçekleşmesi ve hareketsizlik durumlarında şantiye sorumlularına mesaj gönderme özellikleri nedeniyle sistem için ek bir işletme maliyetine ihtiyaç duyulmamaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İş sağlığı ve güvenliği alanında yapılan çalışmaların genel amacı, iş sağlığı ve güvenliği bilincini artırarak çalışanların yaralanmalarını ve can kaybına uğramalarını önlemenin yanı sıra üretim ve işletme maliyetlerini düşürmektir. Günümüzde can ve mal kaybını azaltarak üretim ve işletme maliyetlerini düşürmek ve projeleri daha etkin, güvenli, kaliteli, zamanında ve maliyet-efektif bir biçimde tamamlayabilmek amacıyla inşaat firmalarının özellikle iş sağlığı ve güvenliğine yönelik gelişmiş bilgi teknolojilerini organizasyonlarına dahil etmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu amaç doğrultusunda geliştirilen iş sağlığı ve güvenliği sistemi ile şantiyelerde kör noktalardan kaynaklanan mevcut problemlerin çözülmesi hedeflenmiştir.

Çalışmada kör noktalardan kaynaklanan kazaları engellemek amacıyla geliştirilen sistemin programlama ve test edilme işlemleri açıklanmıştır. Günümüzde kör noktalardan kaynaklanan inşaat kazalarını azaltmak için geliştirilen çeşitli sistemler bulunmaktadır. Ancak geliştirilen sistemlerin şantiye uygulamalarında bazı kısıtlamaları mevcuttur. Çalışma kapsamında geliştirilen iş sağlığı ve güvenliği sisteminde RFID ve GPS teknolojileri ile birlikte hareket/hareketsizlik sensörleri de kullanılarak kör nokta kaynaklı kazaların önlenmesine yönelik literatüre ve sektöre katkı sağlanması hedeflenmiştir. Temsili şantiyede gerçekleştirilen test sonuçlarına göre, sistemin kör noktalardan kaynaklanan iş kazalarını önlemede sektöre önemli katkılar sağlayabileceği öngörülmüştür.

Sistemin inşaat firmalarında etkili bir biçimde uygulanabilmesi için şantiyelerde çalışan tüm personelin kör noktalar konusunda bilinçlendirilmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu konuda şantiye personeline etkili eğitimler sağlanmadan yeni teknolojilerin kullanımında verimli sonuçlar elde edilmesi mümkün değildir. Bu doğrultuda sistemin kullanılması ile birlikte özellikle inşaat işçilerine kör noktalar ile ilgili verilecek eğitimlerin inşaat kazalarını önemli oranda azaltacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK (Proje No. 112M889) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Guo H., Yu Y. and Skitmore, M., "Visualization technology-based construction safety management: A review", *Automation in Construction*, 73: 135-144, (2017).

- [2] Kheni N.A., Dainty A.R.J. and Gibb A., “Health and safety management in developing countries: a study of construction SMEs in Ghana”, *Construction Management and Economics*, 26: 1159-1169, (2008).
- [3] Ulubeyli S., Arslan V. and Kıvrak S., “A semiotic analysis of cartoons about occupational health and safety issues in the construction workplace”, *Construction Management and Economics*, 33(5-6): 467-483, (2015).
- [4] Loushine T.W., Hoonakker P.L.T., Carayon P. and Smith M.J., “Quality and safety management in construction”, *Total Quality Management*, 17(9): 1171-1212, (2006).
- [5] Zwetsloot G.I.J.M., Kines P., Ruotsala R., Drupsteen L., Merivirta M.L. and Bezemer R.A., “The importance of commitment, communication, culture and learning for the implementation of the Zero Accident Vision in 27 companies in Europe”, *Safety Science*, 96: 22-32, (2017).
- [6] Bureau of Labor Statistics (BLS), “Census of Fatal Occupational Injuries (CFOI) - Current and Revised Data”, (2011).
- [7] Teizer J., Allread, B.S. and Mantripragada U., “Automating the blind spot measurement of construction equipment”, *Automation in Construction*, 19(4): 491-501, (2010).
- [8] Ray S.J. and Teizer J., “Dynamic blindspots measurement for construction equipment operators”, *Safety Science*, 85: 139-151, (2016).
- [9] Zhu Z., Park M.W., Koch C., Soltani M., Hammad A. and Davari, K., “Predicting movements of onsite workers and mobile equipment for enhancing construction site safety”, *Automation in Construction*, 68: 95-101, (2016).
- [10] Fosbroke D.E., “Studies on heavy equipment blind spots and internal traffic control”, *Roadway Work Zone Safety & Health Conference*, Baltimore, Maryland, (2004).
- [11] Teizer J., Caldas C. and Haas C., “Real-time three-dimensional occupancy grid modeling for the detection and tracking of construction resources”, *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(11): 880-888, (2007).
- [12] Ford Motor Company, 2009. “New Ford Mirror Design and Radar Systems to Minimize Blind Spot Risk”, (2009).
- [13] Hinze J. and Teizer J., “Visibility-related fatalities related to construction equipment”, *Safety Science*, 49(5): 709-718, (2011).
- [14] Lee H., Lee K., Park M., Baek Y. and Lee, S., “RFID-based real-time locating system for construction safety management”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(3): 366-377, (2012).
- [15] Ergen E., “İnşaat sektöründe radyo frekanslı tanımlama (RFID) teknolojisi uygulamaları”, *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, 451(5), (2008).
- [16] Ergen E., Akıncı B. and Sacks R., “Life-cycle data management of engineered-to-order components using radio frequency identification”, *Advanced Engineering Informatics*, 21(4): 356-366, (2007).
- [17] Kızıldaş S., Akıncı B., Ergen E., Tang P. and Gordon C., “Technological assessment and process implications of field data capture technologies for construction and facility/infrastructure management”, *ITCon*, 13, (2008).
- [18] GS1 Türkiye, “RFID teknolojisi”, http://gs1.tobb.org.tr/icerik_goster.php?Id=15.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Islak kireçli baca gazı desülfürüzyon sistemi termodinamik ve ekonomik analizi

Thermodynamic and economic analysis of wet lime liquid gas desulfurization system

Yazar(lar) (Author(s)): Merve ŞENTÜRK ACAR¹, Onur KAYAPINAR², Oğuz ARSLAN³

ORCID¹: 0000-0003-1442-4560

ORCID³: 0000-0001-8233-831X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Acar M. Ş., Kayapınar O. ve Arslan O., “Islak kireçli baca gazı desülfürüzyon sistemi termodinamik ve ekonomik analizi”, Politeknik Dergisi, 21(2): 359-368, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389589

Islak Kireçli Baca Gazı Desülfürüzyon Sistemi Termodinamik ve Ekonomik Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Merve ŞENTÜRK ACAR^{1*}, Onur KAYAPINAR², Oğuz ARSLAN³

¹Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Kütahya, Türkiye

²Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, Türkiye.

³Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye.

(Geliş/Received : 20.03.2017 ; Kabul/Accepted : 10.07.2017)

ÖZ

Bu çalışmada, ıslak kireçli baca gazı desülfürüzyon sistemi (IKBGDS) ele alınmış olup, Kütahya ilinde refrakter tuğla üretimi yapılan bir fabrikada ıslak kireçli baca gazı desülfürüzyon sistemi uygulamasının termodinamik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi yapılmıştır. Buna göre sistem, enerji ve ekserji analizi metodları ile ele alınarak termodinamik değerlendirilmeleri yapılmış, ömür ve maliyet hesabı (LCC) ile birlikte net bugünkü değer (NBD) yöntemleri kullanılarak sistemin yatırıma değer olup olmadığı araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, sistemin enerji verimi %48 ekserji verimi %59,5 olarak hesap edilmiştir. Mevcut çalışma şartları altında, sistemin ömrü 20 yıl kabul edilerek, NBD'si 2.999.727 TL olarak bulunmuş. Sistemde yapılacak iyileştirmeler neticesinde sistemin NBD'nin 58.171.167 TL'ye çıkarılabileceği edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji-ekserji analizi, net bugünkü değer, ıslak kireçli baca gazı desülfürüzyon sistemi.

Thermodynamic And Economic Analysis of Wet Lime Liquid Gas Desulfurization System

ABSTRACT

In this study, the wet lime flue gas desulphurisation system (WLFGD) is considered and the wet flue gas desulphurisation system applied in a factory where the refractory brick production is made in Kütahya province is evaluated from the thermodynamic and economic point of view. The system is evaluated by energy , exergy analysis methods and thermodynamic evaluations (LCC) together with net present value (NPV) methods to determine whether the system is worth investment. As a result of the work done ,the energy efficiency of the system is calculated as %48 exergy efficiency of system is calculated as %59,5. Under the current working conditions, the system life has been accepted for 20 years and the investment value of the system which is found as NPV 2.999.727 TL has been determined. Due to the improvements ,the NPV value can be increased to 58.171.167 TL.

Keywords: Energy-exergy analysis, analysis, net present value, wet flue gas desulphurization

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İlk ıslak kireçli baca gazı desülfürüzyon sistemi 1931 yılında, London Power Company' e ait olan Bettersea Termik santralinde hayata geçirilmiştir. İkinci olarak, 1935 yılında Bettersea santralının bir benzeri olan Swansea Termik santralinde uygulanmıştır. Üçüncüsü ise Fulham Termik 1938 de uygulanmıştır. İkinci dünya savaşına kadar olan sürede dünya genelinde sadece üç adet ıslak kireçli baca gazı desülfürüzyon sistemi uygulanmıştır. 1940 ikinci dünya savaşı ve 1970 yılları arasında hiç uygulama olmamıştır [1].

Yanma işleminden sonra toz ve kirletici gaz emisyonları ortaya çıkmaktadır. Yanmanın temelini kükürt, hidrojen ve karbon oluşturmaktadır. Yanma sonucu büyük miktarda zararlı etkilerin oluşmaması kaçınılmazdır. Ülkemizde yakıt olarak ciddi anlamda kömür tüketimi mevcuttur.

Kömür yapısında yüksek miktarda kükürt içerdiğinden, yanma sonucu büyük miktarda SO₂ açığa çıkabilmekte-

dir. Kükürt ciddi anlamda insan sağlığına ve çevreye zararlı zehirli bir gazdır. Bu nedenle SO₂' yi kaynağında, atmosfere salınmadan azaltmak gerekir. SO₂ salınımını önlemek için kuru ve yaş olmak üzere desülfürüzyon sistemleri kullanılır. Veriminin yüksek olması, SO₂' nin dışında toz yakalama kabiliyetlerinin de olmasından ötürü ıslak sistemler termik santraller ve yüksek kömür tüketen endüstriyel tesislerde tercih edilmektedir. Islak sistemlerde SO₂ iyi bir şekilde absorbe etmesinden ötürü kireç taşı veya sönmüş kireç kullanılmaktadır [2].

Desülfürüzyon sistemi kullanımıyla ilgili literatürde de bir çok çalışma mevcuttur. Karakas ve Giannakopoulos, (1995), çalışmalarında kuru desülfürüzyon sistemindeki kuru absorban maddenin, SO₂ salınımına etkisini iki ana matematiksel model ile belirlemeye çalışmışlardır. Bu matematiksel modeller Shrinking core ve Pore tree'dir. CaO absorban maddesinin desülfürüzyon işlemiyle CaSO₄ dönüşümü sırasında, SO₂ konsantrasyonu, gaz sıcaklığı ve tane boyutu parametrelerine bağlı olarak iki matematiksel model test edilmiş ve doğrulanmıştır [3]. Mitsubhishi Company (1996), 1996 yılında çift taraflı etkileşimli akış özelliğine sahip ve jet püskürtme yöntemi içeren yıkama kulesi geliştirmiştir. Çift

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : merve.senturkacar@dpu.edu.tr

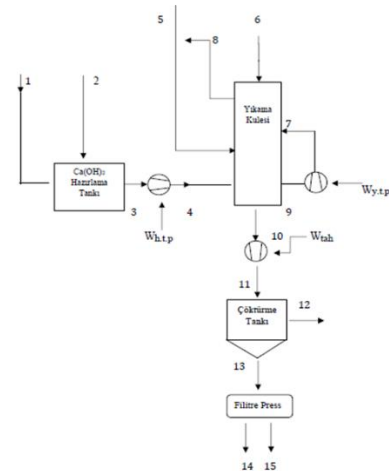
tarafli etkileşimli akış özelliği sayesinde %99.4 desülfürizasyon verimi elde edilmiştir [4]. Şentürk (2002), çalışmasında doğal trona mineralinin yaş ve kuru desülfürizasyon işlemine etkilerini incelemiştir. Trona kullanımı için desülfürizasyon sıcaklığının 423 K olması gerektiği, MgO ve Mg(OH)₂ bileşiklerini kullanılmadan tronanın tek başına işlevsel olmadığı sonucuna varılmıştır [5]. Xiao vd., (2008), çalışmalarında desülfürizasyon işlemi sonrası oluşan yan ürün CaSO₃'ün Portland çimentosunda katkı maddesi olarak kullanılmasını araştırmışlardır. 200 °C sıcaklıkta 60 dakika ısıtılma gören CaSO₃'ün, %3.5 portland çimentosuna karıştırılması ile cimento mukavemetinin arttığı belirlenmiştir [6]. Yu, vd., (2009) monoetanolaminin kimyasal absorpsiyonu ile CO₂ dekarbürizasyon yöntemini ve ıslak kireçli baca gazı desülfürizasyon sisteminin aynı anda uygulanarak, enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik bir model gerçekleştirmişlerdir. Ele alınan yöntemin ekserji kaybı geleneksel sistemin kaybindan %15.48 - %20.75 arasında daha fazla olduğu tespit edilmiştir [7]. URS Power Company (2010), hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemi ile ıslak kireçli baca gazı desülfürizasyon tesislerinde geliştirmeye yönelik bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma neticesinde eski nesil tek taraflı akışkanlı koni nozzların yerine çift taraflı koni akışkanlı nozzların kullanımının %10 daha fazla verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte yıkama kulesi içerisine helozon şeklinde hava yönlendiricileri ile yıkama kulesindeki akışın yönlendirilmesinin desülfürizasyon yüzey alanının artırdığı sonucuna da ulaşılmıştır [8]. Carletti vd., (2013), çalışmalarında, kireç ve dolamit cinsinin desülfürizasyon verimine etkilerini gösteren bir simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Toplamda 12 farklı kireç ve dolamit cinsi için desülfürizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon modeli her bir test örneğinin kireç süt pH değerine etkisi göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak kireç sütü hazırlama prosesinde çözünmeyen kireç ve dolamit cinslerinin, desülfürizasyon sistemlerindeki ekonomik olmadığını ve fiziksel olarak sistemde sorunlar oluşturduğunu belirlemişlerdir [9]. Arif vd., (2015), çalışmalarında, yüksek kapasiteli bir ıslak kireçli baca gazı desülfürizasyon sisteminin optimizasyonu için hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemi kullanarak, sistem optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında baca gazının hızı, yıkama kulesindeki ısı transferi, buharlaşmanın etkisi, nozle lokasyonu ve tane boyutu değişiminin sisteme etkisi gözlemlenmiştir. Buna göre, yıkama kulesindeki ideal gaz hızının 5-8 m/s hızı sahip olması gerektiği, nozle dan çıkan Ca(OH)₂ damla boyutunun 2.2-3.5 mm aralığında olması ve ideal nozle püskürtme hızının 7.39 m/s olduğu sonucuna ulaşılmıştır [10].

Bu çalışmada, Kütahya ilinde yerleşik ve refrakter tuğla üretimi yapan bunun sonucunda da atık ürün olarak SO₂ salınımı gerçekleştiren bir üretim tesisinin ıslak kireçli Baca Gazı Desülfürizasyon tesisinin termodinamik analizi yapılmıştır. Termodinamik değerlendirmede enerji ve ekserji analizi yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca sistem ekonomik olarak da değerlendirilmiş ve yatırıma uygun

olup olmadığı araştırılmıştır. Ekonomik değerlendirme aşamasında, sistemin ömür maliyet döngüsü dikkate alınarak, paranın zaman değerini de dikkate alan NBD analizi metodu kullanılmıştır [2].

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, bir ıslak kireçli baca gazı desülfürizasyon tesisinin termodinamik analizi yapılmış, sistemin ekserjik kayıpları araştırılmıştır. Bunun için Kütahya ilinde bulunan MgSO₄'ten MgO elde eden ve yan ürünü SO₂ olan bir tesisin ıslak kireçli baca gazı desülfürizasyon tesisi ele alınmıştır. Tesiste MgO üretimi sonrası 100 °C sıcaklıkta 70.000 kg/h ve 450 kg/m³ SO₂ derişimine sahip kirli gaz oluşmaktadır. Teorik olarak bu gaz ıslak kireçli baca gazı desülfürizasyon sisteminden geçirilerek SO₂ seviyesinin 400 mg/m³ altına düşülmesi hedeflenmektedir. Şekil 1.'de, sisteme ait akış verilmektedir. Buna göre sistem başlıca; Ca(OH)₂ hazırlama tankı, hazırlama tankı transfer pompası, yıkama kulesi, yıkama kulesi yıkayıcı pompası, yıkama kulesi tahliye pompası, çöktürme tankı ve filitre presten oluşmaktadır. Sisteme 1 noktasından giren CaO ve 2 noktasından giren H₂O, hazırlama tankında tepkimeye girerek Ca(OH)₂ (3 noktası) oluşturmaktadır. Oluşan Ca(OH)₂ hazırlama tankı transfer pompasından çıkarak (4 noktası) yıkama kulesine pompalanmaktadır. Yıkama kulesinde yıkayıcı pompaya 9 noktasından giren Ca(OH)₂, çıkışta (7 noktası) 96 adet nozle yardımı ile, yıkama kulesinde desülfürizasyon işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Yıkama kulesine, 5 noktasından kirli gaz, 6 noktasından SO₂ girmekte ve 8 noktasından temiz gaz olarak çıkmaktadır. Desülfürizasyon işlemi sonrasında oluşan CaSO₃ sulu çamuru 10 noktasında yıkama kulesi tahliye pompasına girmekte ve (11 noktası) çöktürme tankına ulaşmaktadır. Çöktürme tankından 12 noktasında H₂O çevreye atılmakta, 13 noktasından düşük H₂O derişimli CaSO₃ çamuru çıkmaktadır. CaSO₃ çamuru filitre prese girmesiyle, 14 noktasından kuru CaSO₃, 15 noktasından H₂O olarak sistemden çevreye atılmaktadır [2].



Şekil 1. ıslak kireçli baca gazı desülfürizasyon sistemi akış diyagramı [2]. (Flow diagram of wet lime flue gas desulfurization system.)

Islak kireçli baca gazı desülfürüzyon sisteminde absorber madde olarak Ca(OH)_2 kullanılmıştır. Bunun için CaO ve H_2O kullanılarak Ca(OH)_2 hazırlanmakta, Ca(OH)_2 'nin SO_2 ile tepkimeye girmesiyle CaSO_3 oluşmaktadır. Desülfürüzyon sistemi tümü ile ele alınarak, termodinamik verimi incelenmiştir. Sisteme giren maddelerin standart çevre sıcaklığı 25°C 'da olduğu kabul edilmektedir. Hazırlama tankında hazırlanan Ca(OH)_2 'nin yıkama kulesinde SO_2 içeren kirli hava ile çarpıştırılması sonucu CaSO_3 çamuru oluşmaktadır. Oluşan bu çamurun fiziksel yöntemlerle H_2O ve CaSO_3 'e ayrılması ile CaSO_3 berteraf edilmekte, oluşan H_2O berteraf edilmektedir. Mevcut sistem günlük 24 h ve yılda 300 gün çalışmaktadır. Sistemde bulunan Ca(OH)_2 transfer pompası ve tahliye pompası 29 dk/gün, yıkama pompası 24 h/gün çalışmaktadır. Aynı zamanda sisteme giren kirli hava ideal gaz kabul edilmektedir [2].

3. ISLAK KİREÇLİ BACA GAZI DESÜLFÜRÜZASYON SİSTEMİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ (ENERGY AND EXHAUST ANALYSIS OF WET LIQUID CRUSHING GAS DESULFURIZATION SYSTEM)

Islak kireçli baca gazı desülfürüzyon sistemleri çevre ile kütle ve enerji alışverişine sahip olduğundan, açık sistemlerdir. Açık sistem için kütle dengesi aşağıdaki gibidir [11];

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_c = \frac{dm_{sis}}{dt} = 0 \quad (1)$$

Sürekli akışlı açık sistemler için enerji dengesi aşağıdaki gibidir [11];

$$\sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_c = \frac{dE_{sis}}{dt} = 0 \quad (2)$$

Sürekli akışlı bir sistem ele alındığında denklem [11],

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_c \quad (3)$$

Eşitliği ile elde edilir. Eş. (3) enerji terimimleri ile birlikte daha açık bir şekilde yazılırsa [11];

$$\dot{Q}_g - \dot{W}_g + \sum \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_g = \dot{Q}_c - \dot{W}_c + \sum \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_c \quad (4)$$

şeklini alır. Sistemdeki kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edildiği takdirde [11];

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g \quad (5)$$

ifadesi elde edilir. Sistemin birinci kanun verimi ise [11];

$$\eta = \frac{\dot{E}_c}{\dot{E}_g} \quad (6)$$

eşitliği ile elde edilir.

Her bir sistem bileşeni için kütle ve enerji dengesi aşağıda verildiği gibidir.

Ca(OH)_2 hazırlama tankı için kütle dengesi yazılırsa;

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (7)$$

eşitliği elde edilir. Burada \dot{m}_1 ; CaO , \dot{m}_2 ; H_2O ve \dot{m}_3 ; Ca(OH)_2 kütle debisidir.

Ca(OH)_2 hazırlama tankı enerji dengesi;

$$\dot{Q}_{ht} - \dot{W}_{ht} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1 \quad (8)$$

şeklinde elde edilir. Burada h_1 T_0 referans sıcaklığındaki CaO 'nin entalpi değeri, h_2 T_0 referans sıcaklığındaki H_2O 'nun entalpi değeri ve h_3 T_1 sıcaklığındaki oluşan Ca(OH)_2 'nin entalpi değeridir. Ca(OH)_2 oluşum tepkimesi egzotermik bir reaksiyon olduğundan, oluşan Ca(OH)_2 T_1 sıcaklığında bulunmaktadır.

Ca(OH)_2 hazırlama tankı transfer pompası için kütle dengesi;

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (9)$$

eşitliği elde edilir. Burada \dot{m}_3 ; Ca(OH)_2 , \dot{m}_4 ; Ca(OH)_2 kütleli debidir. Ca(OH)_2 hazırlama tankı pompası enerji dengesi ise;

$$\dot{Q}_{htp} - \dot{W}_{htp} = \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3 \quad (10)$$

şeklinde elde edilir. Eş. (10)'da \dot{Q}_{htp} değeri ihmal edilmektedir.

Hazırlama tankı transfer pompası işi aşağıdaki ifade ile belirlenmektedir.

$$\dot{W}_{htp} = m_{\text{Ca(OH)}_2} \cdot \frac{\Delta P}{\rho_{\text{Ca(OH)}_2}} \cdot t_{tg} \cdot t_g \cdot \frac{1}{1000} \quad (11)$$

Burada; ΔP pompa basıncı, $\rho_{\text{Ca(OH)}_2}$ Ca(OH)_2 'nin özkütlesi, t_{tg} günlük çalışma saati, t_g yıllık toplam gün çalışma süresidir. Pompa izotropik verimi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\eta_{iz} = \frac{\Delta P}{\rho_{\text{Ca(OH)}_2} \cdot \dot{W}_{tp}} \quad (12)$$

Yıkama kulesi için kütle dengesi;

$$\dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_6 + \dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10} \quad (13)$$

eşitliği elde edilir. Burada \dot{m}_4 ; Ca(OH)_2 , \dot{m}_5 ; kirli hava, \dot{m}_6 ; SO_2 , \dot{m}_7 ; Ca(OH)_2 , \dot{m}_8 ; Ca(OH)_2 , \dot{m}_9 ; temiz hava, \dot{m}_{10} ; CaSO_3 'nun kütleli debisidir.

Yıkama kulesi için enerji dengesi ;

$$\dot{Q}_{yk} - \dot{W}_{yk} = [\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{10} h_{10}] - [\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_7 h_7] \quad (14)$$

şeklinde elde edilir. Burada h_6 SO_2 'nin sisteme gelen kirli gaz sıcaklığındaki entalpisi, h_{10} desülfürüzyon tepkimesi sonrası oluşan CaSO_3 'nun tepkime sıcaklığındaki entalpisidir.

Yıkama kulesi yıkayıcı pompası için kütle dengesi yazılırsa;

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_7 \quad (15)$$

eşitliği elde edilir. Burada \dot{m}_7 ; Ca(OH)_2 , \dot{m}_9 ; Ca(OH)_2 kütleli debisidir. Yıkama kulesi yıkayıcı pompa enerji dengesi ise;

$$\dot{Q}_{ytp} - \dot{W}_{ytp} = \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_9 h_9 \quad (16)$$

şeklinde elde edilir. Burada \dot{Q}_{ytp} yıkayıcı pompadaki ısı kaybı değeri ihmal edilmiştir. Yıkama kulesi yıkayıcı pompası işi aşağıdaki ifade ile belirlenmektedir.

$$\dot{W}_{ytp} = \frac{nm_{\text{Ca(OH)}_2}}{3600} \cdot \frac{\Delta P}{\rho_{\text{Ca(OH)}_2}} \cdot n_{nz} \cdot t_{tg} \cdot t_g \cdot \frac{1}{1000} \quad (17)$$

Burada; ΔP pompa basıncı, $\rho_{Ca(OH)_2}$ $Ca(OH)_2$ 'nin özkütlesi, t_{tg} günlük çalışma saati, t_g yıllık toplam gün çalışma, $nm_{Ca(OH)_2}$ bir adet nozzleden geçen $Ca(OH)_2$ 'nin kütleli debisi, n_{nz} sistemdeki toplam nozzle sayıdır.

Yıkayıcı pompa izantropik verimine aşağıdaki ifade ile ulaşılmaktadır.

$$\eta_{iz} = \frac{\Delta P}{\rho_{Ca(OH)_2} \cdot W_{yp}} \quad (18)$$

Yıkama kulesi tahliye pompası için kütle dengesi yazılırsa;

eşitliği elde edilir. Yıkama kulesi tahliye pompası enerji dengesi;

$$\dot{Q}_{tah} - \dot{W}_{tah} = \dot{m}_{11}h_{11} - \dot{m}_{10}h_{10} \quad (19)$$

şeklinde elde edilir. Burada \dot{Q}_{tah} tahliye pompası ısı kaybı değeri ihmal edilmiştir. Tahliye pompası işi aşağıdaki ifade ile belirlenmektedir.

$$\dot{W}_{tah} = m_{CaSO_3} \cdot \frac{\Delta P}{\rho_{CaSO_3}} \cdot t_{tg} \cdot t_g \cdot \frac{1}{1000} \quad (20)$$

Burada; ΔP pompa basıncı, ρ_{CaSO_3} $CaSO_3$ 'nin özkütlesi, t_{tg} günlük çalışma saati, t_g yıllık toplam gün çalışma süresidir. Tahliye pompası izantropik verimine aşağıdaki ifade ile ulaşılmaktadır.

$$\eta_{iz} = \frac{\Delta P}{\rho_{CaSO_3} \cdot W_{tah}} \quad (21)$$

Çöktürme tankı için kütle dengesi yazılırsa;

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} + \dot{m}_{13} \quad (22)$$

eşitliği elde edilir. Burada \dot{m}_{11} ; sulu $CaSO_3$ çamuru \dot{m}_{12} ; H_2O , \dot{m}_{13} ; $CaSO_3$ çamuru kütleli debisidir.

Çökertme tankı enerji dengesi ise;

$$\dot{Q}_{ct} - \dot{W}_{ct} = \dot{m}_{13}h_{13} - \dot{m}_{12}h_{12} - \dot{m}_{11}h_{11} \quad (23)$$

şeklinde elde edilir. Çöktürme tankına bir iş girişi olmadığından \dot{W}_{ct} ihmal edilmiştir.

Filtre pres için kütle dengesi yazılırsa;

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} + \dot{m}_{15} \quad (24)$$

eşitliği elde edilir. Burada \dot{m}_{13} ; $CaSO_3$ çamuru, \dot{m}_{14} ; kuru $CaSO_3$ \dot{m}_{15} ; H_2O kütleli debisidir.

Filtre pres enerji dengesi ise;

$$\dot{Q} - \dot{W}_{fp} = \dot{m}_{15}h_{15} - \dot{m}_{14}h_{14} - \dot{m}_{13}h_{13} \quad (25)$$

şeklinde elde edilir.

Ekserji analizi temeli termodinamiğin birinci ve ikinci kanuna dayanmaktadır. Kontrol hacimi için genel ekserji dengesi [12];

$$\dot{E}x_g - \dot{E}x_c - \dot{E}x_k = 0 \quad (26)$$

ifadesi ile verilir, sürekli akış koşulları için bu ifade [12];

$$\left((\dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{ch} + \dot{E}x_Q + \dot{E}x_W) \right)_g - \left((\dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{ch} + \dot{E}x_Q + \dot{E}x_W) \right)_c = \dot{E}x_k \quad (27)$$

şeklinde tekrar yazılabilir. Burada, $\dot{E}x_{ph}$; fiziksel ekserjiyi, $\dot{E}x_{ch}$; kimyasal ekserji, $\dot{E}x_Q$; ısı ile transfer edilen ekserji, $\dot{E}x_W$; iş'e ait ekserjiyi, $\dot{E}x_k$ ise ekserji

kaybını tanımlamaktadır. Eş. (28) tekrar düzenlenirse [12];

$$\dot{E}x_k = \sum_g \dot{m}(\psi_{ph} + \psi_{ch}) - \sum_c \dot{m}(\psi_{ph} + \psi_{ch}) + \sum \int \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) \dot{Q} - \left(\dot{W} - p_0 \frac{dV}{dz}\right) \quad (28)$$

şeklini alır.

Burada, ψ_{ph} ; spesifik fiziksel ekserjiyi [12];

$$\psi_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (29)$$

tanımlanmaktadır. $\bar{\psi}_{ch}$ molar bazda standart kimyasal oluşum ekserjisi olup Eş. 30'te verildiği gibidir [12]. Alt indis "o" referans çevre şartlarını tanımlamakta olup, basınç 101,325 kPa ve sıcaklık 25^o C olarak dikkate alınmıştır [13].

$$\bar{\psi}_{ch} = \sum x_k \cdot \bar{\psi}_{ch,k} + \bar{R}T_0 \sum x_k \cdot \ln x_k \quad (30)$$

Burada, sistemin ekserji verimi ise faydalı iş için gereken ekserjinin, kütle ve enerji kaynağının potansiyel ekserjiye oranı alınarak tanımlanır ve

$$\varepsilon = \frac{E x_c}{E x_g} = 1 - \frac{E x_k}{E x_g} \quad (31)$$

eşitliği ile verilir [12].

Hazırlama tankında ısı kaybı söz konusu olduğundan, ısı ile transfer edilen ekserji akımı aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

$$\dot{E}x_{Q_{ht}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{Ca(OH)_2}}\right) \cdot \dot{Q}_{ht} \quad (32)$$

$Ca(OH)_2$ hazırlama tankında gerçekleşen $\dot{E}x_{k,th}$ ekserji yıkımı, fiziksel ekserji değerleri, kimyasal ekserji değerleri ve $\dot{E}x_Q$ değerinde dahil edilmesi ile aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$\dot{E}x_{k,th} = (m_{CaO} \psi_{ph,CaO} + m_{H_2O} \psi_{ph,H_2O} + m_{CaO} \psi_{ch,CaO} + m_{H_2O} \psi_{ch,H_2O}) - (m_{Ca(OH)_2} \psi_{ph,Ca(OH)_2} + m_{Ca(OH)_2} \psi_{ch,Ca(OH)_2} + \dot{E}x_{Q_{ht}}) \quad (33)$$

Transfer pompasına giren $Ca(OH)_2$ 'in kimyasal ve fiziksel ekserjisi değişmediğinden pompa daki ΔP basınçına bağlı olarak ,transfer pompasındaki ekserji yıkımı

$$\dot{E}x_{k,tp} = W_{tp} \cdot t_{tp} \cdot t_g - \sum \dot{W}_{tp} \quad (34)$$

şeklinde elde edilir. Burada W_{tp} pompa motor gücü, t_{tp} günlük çalışma süresi, t_g yıllık çalışma günüdür.

Yıkama kulesinde ısı transferinden ötürü, ısı ile iletilen ekserji akımı söz konusudur. Isı ya bağlı ekseji akımı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\dot{E}x_{Q_{yk}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{kirli\ gaz}}\right) \cdot \dot{Q}_{yk} \quad (35)$$

Buna ek olarak yıkama kulesinde fiziksel ve kimyasal ekserji akımında mevcuttur. Buna göre, yıkama kulesindeki ekserji yıkımı;

$$\dot{E}x_{k,yk} = [\dot{m}_4 \psi_{ph,4} + \dot{m}_4 \psi_{ch,4} + \dot{m}_5 \psi_{ph,5} + \dot{m}_6 \psi_{ch,6} + \dot{m}_6 \psi_{ph,6} + \dot{m}_7 \psi_{ph,7} + \dot{m}_7 \psi_{ch,7}] - [\dot{m}_8 \psi_{ph,8} + \dot{m}_9 \psi_{ph,9} + \dot{m}_9 \psi_{ch,9} + \dot{m}_{10} \psi_{ph,10} + \dot{m}_{10} \psi_{ch,10} + \dot{E}x_{Q_{yk}}] \quad (36)$$

Yıkama pompasına giren Ca(OH)_2 'ın kimyasal ve fiziksel ekserjisi değişmediğinden pompa daki ΔP basınçına bağlı olarak ,yıkama pompasındaki ekserji yıkımı

$$\dot{E}x_{k.yp} = W_{yp} \cdot t_{tp} \cdot t_g - \sum \dot{W}_{yp} \quad (37)$$

şeklinde elde edilir.Burada W_{tp} pompa motor gücü , t_{tp} günlük çalışma süresi, t_g yıllık çalışma günüdür.

Transfer pompasına giren CaSO_3 'nın kimyasal ve fiziksel ekserjisi değişmediğinden pompa daki ΔP basınçına bağlı olarak, tahliye pompasında ki ekserji yıkımı;

$$\dot{E}x_{k.tahp} = W_{tah} \cdot t_{tp} \cdot t_g - \sum \dot{W}_{tah} \quad (38)$$

şeklinde elde edilir.

Çöktürme tankında ısı transferinden ötürü, ısı ile iletilen ekserji akımı söz konusudur.İsı ya bağlı ekseji akımı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir

$$\dot{E}x_{k.qct} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ct}}\right) \cdot \dot{Q}_{ct} \quad (39)$$

Çöktürme tankında gerçekleşen ekserji yıkımı aşağıda belirtilmektedir.

$$\dot{E}x_{k.ct} = (\dot{m}_{11}\psi_{ph,11} + \dot{m}_{11}\psi_{ch,11}) - (\dot{m}_{12}\psi_{ph,12} + \dot{m}_{12}\psi_{ph,12} + \dot{m}_{13}\psi_{ph,13} + \dot{m}_{13}\psi_{ph,13} - \dot{E}x_{k.qct}) \quad (40)$$

Filtre preste ısı transferinden ötürü, ısı ile iletilen ekserji akımı söz konusudur.İsı ya bağlı ekseji akımı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir

$$\dot{E}x_{k.qfp} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{fp}}\right) \cdot \dot{Q}_{ft} \quad (41)$$

Buna göre, filtre preste gerçekleşen ekserji denkliği;

$$\dot{E}x_{k.fp} = (\dot{m}_{13}\psi_{ph,13} + \dot{m}_{13}\psi_{ch,13} + \dot{E}x_{k.qfp} + \dot{E}W_{f.p}) - (\dot{m}_{14}\psi_{ph,14} + \dot{m}_{14}\psi_{ch,14} + \dot{m}_{15}\psi_{ph,15} + \dot{m}_{15}\psi_{ch,15}) \quad (42)$$

şeklinde elde edilir.

4. ISLAK KİREÇLİ BACA GAZI DESÜLFÜRÜZASYON MALİYET ANALİZİ (COST ANALYSIS OF WET LIQUID FLUE GAS DESULFURIZATION)

Sistemin maliyeti yatırım, işletme ve ıskarta maliyeti olmak üzere 3 ana başlıkta incelenmiştir. Islak kireçli baca gazı desülfürüzasyon sisteminin yatırım maliyetini; projelendirme, sistem bileşenleri; kireç silosu, Ca(OH)_2 hazırlama tankı, pompalar, yıkama kulesi, çöktürme tankı ve filtre presten meydana gelmektedir. Sistemin toplam yatırım maliyeti;

$$M_{tym} = M_{ks} + M_{ht} + M_{htp} + M_{yk} + M_{yktp} + M_{fp} + M_{ct} \quad (43)$$

Desülfürüzasyon sisteminin işletme maliyetini, sistemin tükettiği elektrik enerjisi maliyeti, bakım ve onarım giderleri, personel giderleri ve sistemin çalışması için gerekli olan H_2O ve CaO giderleri oluşturmaktadır. Desülfürüzasyon sisteminde kullanılan toplam elektrik güçleri;

$$W_t = W_{htp}t_{tg} + W_{ytp}t_{tg} + W_{tah}t_{tg} + W_{f.p}t_{tg} + W_{os}t_{tg} \quad (44)$$

Eşitlikte W_i ; desülfürüzasyon tesisindeki pompaların toplam elektrik güçlerini, $W_{h.t.p}$; hazırlama tankı transfer pompasını , $W_{y.t.p}$; yıkama kulesi yıkayıcı pompa gücünü , W_{tah} ; yıkama kulesi tahliye pompasının gücünü, $W_{f.p}$; filtre pres gücünü ve $W_{o.s}$; otomasyon sistemi gücünü ifade etmektedir. Desülfürüzasyon sisteminde kireç tüketimi, operatör gideri ve sistem bakımı temel işletme maliyetini oluşturmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus t_{tg} günlük çalışma süreleridir. Mevcut sistemde transfer ve tahliye pompaları 0,48 h/gün, diğer bileşenlerin 24 h/gün çalıştığıdır [2].

Desülfürüzasyon sisteminin yıllık çalışma süresi t_g 300 gün/yıl olarak bilinmektedir. Elektrik birim maliyeti 0,1487 TL/kWh kabul edilmiştir [2]. Toplam elektrik maliyeti;

$$M_{tem} = W_t \cdot t_{tg} \cdot 0,1487 \quad (45)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Sistemde kullanılan elektrikli sistemlerin toplam bakım maliyeti toplam, ilk yatırım maliyetinin 0.02'si olarak belirlenmiştir. Buna göre toplam bakım maliyeti [14-16];

$$M_{tmb} = M_{tem} \cdot 0,02 \quad (46)$$

Yıllık toplam işletme maliyeti;

$$M_{tim} = M_{tem} + M_{tmb} + M_{km} \quad (47)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Islak kireçli baca gazı desülfürüzasyon tesislerinde yoğun miktarda paslanmaz çelik ve paslanmaz mamuller kullanılmaktadır, bundan dolayı hurda maliyeti toplam ilk yatırım maliyetinin %10 olarak kabul edilmiştir. Buna göre hurda maliyeti;

$$M_h = M_{tym} \cdot 0,10 \quad (48)$$

eşitliği ile elde edilir [14-15].

Kurulu gücü 500 MW ve üzeri olan tesislerde, SO_2 salınımı 400 mg/Nm³ altında olmalıdır. 2014 yılında sistemin kurulması ile SO_2 salınım seviyesi 400mg/Nm³'ün altına düştüğünden, ceza durum oratadan kalkmıştır. SO_2 salınımı ile ilgili kanun yürürlüğe girdiğinde desülfürüzasyon sistemi mevcut olmadığından Kütahyadaki fabrika 800.000 TL üzeri ceza ödemiştir. Ayrıca SO_2 salınımı konusunda gerekli önlemleri almayan tesislerin mühürlenmesi söz konusudur. Bundan dolayı desülfürüzasyon sisteminden sağlanan toplam yıllık kazanç, fabrikanın karşılaştığı 800.000 TL ceza bedeli olarak kabul edilmiştir [2].

$$G=800.000 \text{ TL/yıl} \quad (49)$$

Desülfürüzasyon tesisinin faydalı ömrü 20 yıl belirlenmiştir. Net bugünkü değer yöntemiyle sistemin maliyet boyutu araştırılmıştır. Net bugünkü değer (NBD) matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir [2].

$$NBD = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} \quad (50)$$

Eşitlikte, n ; projenin faydalı ömrünü, B_t ; t yılındaki nakit akışını, r ; iskonto oranını ifade etmektedir. Bu

çalışmada, sistemin faydalı ömrü 20 yıl ve iskonto oranı %12 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir [17].

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Kütahya ilinde bulunan, refrakter tuğla üretim tesisine ait desülfürüzyasyon tesisi için mevcut çalışma şartlarındaki işletme verileri, Şekil 1’de verilen akış şemasına istinaden Tablo 1’de ve aynı desülfürüzyasyon sistemine

ait mevcut çalışma koşullarında ki sistem bileşenleri için enerji analizi sonuçları Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 1 ve 2 incelendiğinde, en yüksek enerji kaybının yıkama kulesinde olduğu, sonrasında yıkama kulesinin tahliye pompasında gerçekleştiği görülmektedir. Yıkama kulesi enerji verimi % 14,9 olarak hesaplanırken, sistemin toplam enerji verimi % 48 olarak hesaplanmıştır. Sistem bileşenlerinin fiziksel ve kimyasal ekserji değerleri Tablo 3’te ve sisteme ait ekserji analizi sonuçları ise Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 1. Örnek desülfürüzyasyon sistemine ait mevcut çalışma koşulları ve sistem noktaları için termodinamik veriler.(Thermodynamical properties of the current operating conditions and system points of the sample desulfurization system.)

Sistem Noktası	Materyal	\dot{m} mol/s	\dot{m} kg/s	T (°C)	P1 (kPa)	h (kJ/mol)	s (kJ/mol.K)	C_p (kJ/kg.K)	ρ (kg/m ³)
1	CaO	1,95	0,1094	25	101,325	237,9	0,053	-	-
2	H ₂ O	1,95	0,0351	25	101,325	285,83	0,069	-	-
3	Ca(OH) ₂	1,95	0,1445	25,73	101,325	558,44	0,142	-	1466
4	Ca(OH) ₂	1,95	0,1445	25,73	401,325	558,44	0,142	-	1466
5	Kirli Hava	-	19,44	100	101,325	-	-	1,007	-
6	SO ₂	1,95	0,1249	100	101,325	2960,09	11,62	-	-
7	Ca(OH) ₂	1,95	0,1445	25,73	101,325	558,44	0,142	-	1466
8	Temiz Hava	-	19,44	40	101,325	-	-	1,009	-
9	Ca(OH) ₂	1,95	0,1445	25,73	1501,325	558,44	0,142	-	1466
10	CaSO ₃ çamuru	1,94	0,2694	25,99	101,325	1835,84	0,312	-	2800
11	CaSO ₃ çamuru	1,94	0,2694	25,98	401,325	1835,84	0,312	-	2800
12	H ₂ O	1,63	0,0294	25,98	101,325	291,02	0,083	-	-
13	CaSO ₃	1,73	0,2400	25,98	101,325	1753,43	0,278	-	2800
14	CaSO ₃	1,94	0,2340	25,98	101,325	1753,43	0,278	-	-

Tablo 2. Örnek desülfürüzyasyon sistemine ait mevcut çalışma koşullarında ki sistem bileşenleri için enerji analizi sonuçları. (The energy analysis results of the current operating conditions and system points of the sample desulfurization system.)

Sistem Bileşeni	$\sum E_{k\ddot{u}tle,giren}$ (kWh/yıl)	$\sum E_{k\ddot{u}tle,\c{ı}kan}$ (kWh/yıl)	Q (kWh/yıl)	W (kWh/yıl)	η
Ca(OH) ₂ hazırlama tankı	7354171,69	7840622,46	1401858,76	-	%87,5
Ca(OH) ₂ transfer pompası	7840622,46	7840622,46	-	212.86	%78,2
Yıkama kulesi	78464074,25	11703253,78	66760820,97	-	%14,9
Yıkama kulesi yıkayıcı pompa	7840622,46	7840622,46	-	24192	%70,7
Yıkama kulesi tahliye pompası	25772626,77	25772626,77	-	180.53	%66,4
Çöktürme tankı	25772626,77	26382656,17	610029	-	%97,6
Filtre press	22959665,9	23984143,92	160478,0139	36000	%97,3
Tüm sistem	23031457467	87958040,46	68933186,73	60585,39	%48

Tablo 3. Sistem bileşenlerindeki fiziksel ve kimyasal ekserji değerleri. (Physical and chemical exergies of system components.)

Çevrim noktası	\dot{m} mol/s	\dot{m} kg/s	T °C	$P1$ (kPa)	h (kJ/mol)	s (kJ/mol)	$\dot{E}_{x^{ph}}$ (kWh/yıl)	$\dot{E}_{x^{ch}}$ (kWh/yıl)
1	1,95	0,1094	25	101,325	237,9	0,053	0	1787292
2	1,95	0,0351	25	101,325	285,83	0,069	0	12636
3	1,95	0,1445	25,73	101,325	558,44	0,142	-	994032
4	1,95	0,1445	25,73	401,325	558,44	0,142	-	994032
5	-	19,44	100	101,325	-	-	10541866,	75,29
6	1,95	0,1249	100	101,325	2960,09	11,62	-1883,64	4400136
7	1,95	0,1445	25,73	101,325	558,44	0,142	-	994032
8	-	19,44	40	101,325	-	-	2107779.9	-
9	1,95	0,1445	25,73	1501,325	558,44	0,142	0	993931,28
10	1,94	0,269	25,99	101,325	1835,84	0,312	-	3000537,77
11	1,94	0,269	25,98	401,325	1835,84	0,312	-	3000537,77
12	1,63	0,0294	25,98	101,325	291,02	0,083	-948.75	10585,51
13	1,73	0,240	25,98	101,325	1753,43	0,278	-	22239533,9
14	1,94	0,234	25,98	101,325	1753,43	0,278	1411	19342294,2
15	1,94	0,006	25,98	101,325	291,02	0,083	-193,59	2160

Tablo 4. Örnek tesise ait ekserji analizi sonuçları. (Exergy analysis results of the system.)

Sistem Bileşeni	\dot{E}_g^{ph} (kWh/yıl)	\dot{E}_g^{ch} (kWh/yıl)	\dot{E}_c^{ph} (kWh/yıl)	\dot{E}_c^{ch} (kWh/yıl)	\dot{E}_xQ (kWh/yıl)	\dot{E}_xW (kWh/yıl)	\dot{E}_xk (kWh/yıl)	ϵ
Ca(OH) ₂ hazırlama tankı	0	1799928	-528485,51	994032	-3438	-	1337819,52	%25,6
Ca(OH) ₂ transfer pompası	528485,51	994032	528485,51	994032	-	212,86	59	-
Yıkama kulesi	9483011,70	6388200	1967315,52	3994469,05	-13418361,44	-	12606404,51	%20,5
Yıkama kulesi yıkayıcı pompası	528485,51	994032	528485,51	994032	-	27417,6	24192	-
Yıkama kulesi tahliye pompası	-363147	21712063,81	-363147	21712063,81	-	180,53	91,33	-
Çöktürme tankı	-363147	21712063,81	-363147	21712063,81	-2230,33	-	1993345	%90,6
Filtre pres	-363146,81	22239533,99	1217,23	21685705,64	-536,34	36000	224927,95	%98,9
Tüm sistem	9450542	75839854	1770724	72086398	-13424566,11	63810,99	18211839,31	%59,5

Tablo 3 ve 4 incelendiğinde en yüksek ekserji kaybının yıkama kulesinde gerçekleştiği görülmektedir. Yıkama kulesinin ekserji verimi % 20,5 olarak hesaplanırken aynı sistem için sistemin toplam ekserji verimi % 59,5 olarak hesaplanmıştır. Tablo 5'te sisteme ait ilk yatırım maliyetleri belirtilmektedir.

Tablo 5. İlk yatırım maliyeti. (Investment cost.)

Bileşen	İlk yatırım maliyeti (TL)
Kireç silosu	120.000
Ca(OH) ₂ hazırlama tankı	147.000
Ca(OH) ₂ transfer pompası	15.000
Yıkama kulesi	780.000
Yıkama kulesi yıkayıcı pompa	63.000
Tahliye pompası	15.000
Filtre press	42.000
Çöktürme tankı	37.000
Otomasyon sistemi	90.000
Toplam ilk yatırım maliyeti:	1.183.000 TL

Desülfürüzyon sisteminde elektrik tüketimi pompalar, filtre pres ve otomasyon sistemi tarafından gerçekleştirilmektedir. Sistemin yıllık toplam işletme maliyeti Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. İşletme maliyeti. (Operating cost.)

Bileşen	Elektriksel güç(kW)
Ca(OH) ₂ transfer pompası	1,875
Yıkama kulesi yıkayıcı pompası	4,625
Yıkama kulesi tahliye pompası	1,875
Filtre press	5
Otomasyon sistemi	2
Toplam elektrik gücü , $W = 13,55$ kWh	
Toplam yıllık elektrik maliyeti, $M_{tem} = 12.660$ TL	
Toplam yıllık bakım maliyeti, $M_{tbm} = 118.800$ TL	
Toplam yıllık kireç tüketim maliyeti, $M_{km} = 1.090,65$ TL	
Toplam işletme maliyeti, $M_{tim} = 1.222.110$ TL	

Mevcut çalışma koşulları için sistem maliyeti Tablo 7’de verilmiştir.

giren kirli gazın sıcaklığı arttıkça, enerji ve ekserji verimleri düşmekte yani sistem zarar etmektedir. Bir

Tablo 7. Mevcut sistem maliyetleri. (Cost of current system.)

Kireç silosu maliyeti (TL)	Hazırlama tankı maliyeti (TL)	Transfer pompası maliyeti (TL)	Yıkama kulesi maliyeti (TL)	Yıkayıcı pompa maliyeti (TL)	Tahliye pompası maliyeti (TL)	Çöktürme tankı maliyeti (TL)	Filtre press maliyeti (TL)	Otomasyon sistemi maliyeti (TL)	İlk yatırım maliyeti (TL)	CaO maliyeti (TL)	H ₂ O maliyeti (TL)	Toplam elektrik gideri (TL)	Toplam bakım maliyeti (TL)	Toplam işletme maliyeti (TL)	Harda maliyeti (TL)	Yıllık fayda (TL)
120.000	147.000	15.000	780.000	63.000	15.000	37.000	42.000	90.000	1.183.000	1.090.560	258.540	12.660	118.800	1.222.110	118.800	800.000

Tablo 8’de her bir sistem için kirli gaz sıcaklığına göre sistemdeki birinci kanun verimi ve ikinci kanun verimi verilmiştir.

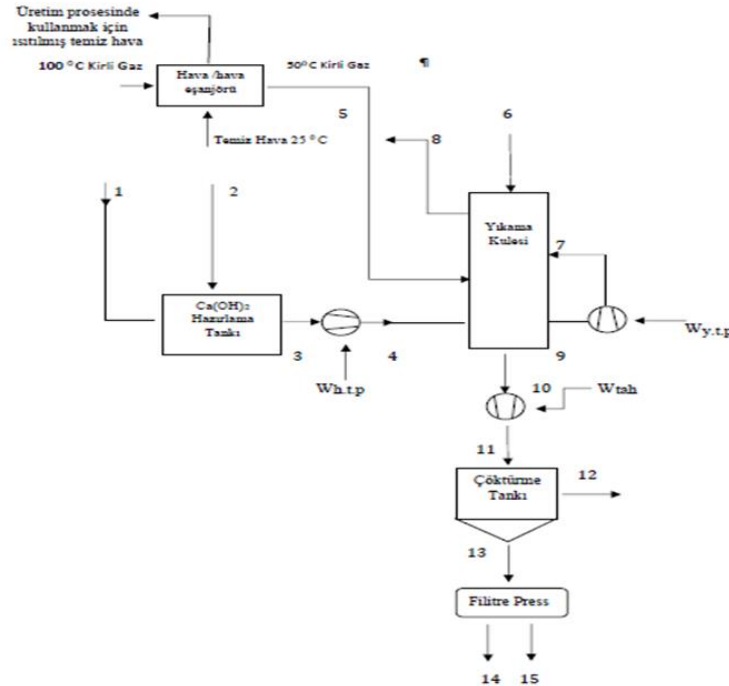
başka deyiş ile, sisteme giren sıcak hava ısı enerjisini boş yere sistemde kaybetmektedir. Sisteme giren gazın sıcaklığı sistemin kurulu olduğu işletmenin üretim

Tablo 8. Sabit çalışma pH değerinde ve farklı gaz sıcaklıklarında ekserji yıkımı ve sistemin birinci, ikinci kanun verim değerleri. (First and second law efficiency values of the system and the degradation of the exergy at constant working pH and different gas temperatures.)

Sistem Çalışma pH değeri 6									
T_{gaz} °C	$\dot{E}x_{k,ht}$ (kWh/yıl)	$\dot{E}x_{k,tp}$ (kWh/yıl)	$\dot{E}x_{k,yk}$ (kWh/yıl)	$\dot{E}x_{k,yp}$ (kWh/yıl)	$\dot{E}x_{k,tahp}$ (kWh/yıl)	$\dot{E}x_{k,çt}$ (kWh/yıl)	$\dot{E}x_{k,fp}$ (kWh/yıl)	η_s	ϵ_s
50	1337819,52	59	4037187,79	10008	91,33	1994470	36000	%59,4	%75,9
60	1337819,52	59	4869327,63	10008	91,33	1994470	36000	%57,6	%73,9
70	1337819,52	59	6574441,84	10008	91,33	1994470	36000	%54,3	%70,2
100	1337819,52	59	12606404,51	10008	91,33	1994470	36000	%48,0	%59,5
120	1337819,52	59	17189173,84	10008	91,33	1994470	36000	%44,0	%53,3

Mevcut sistem pH 6 değerinde ve 100 °C kirli gaz sıcaklığında çalışmaktadır. Mevcut çalışma koşullarında sistemin enerji verimi %48 , ekserji verimi %59,5 dir. Tablo 8’de görüldüğü üzere desülfürizasyon sistemine

koşullarına bağlı olduğundan, termodinamik iyileştirme için gaz sıcaklığına müdahale edilememektedir. Şekil 2 sisteme uygulanabilecek atık ısı geri kazanım sistemini göstermektedir.



Şekil 2. Mevcut sistem için atık ısı geri kazanım sistemi. (Waste heat recovery system for the existing system.)

Sisteme giren 100 °C daki 70.000 kg/h kirli gazın ancak bir eşanjör vasıtası ile sıcaklığı 50 °C'a düşürülürse enerji verimi %59,4, ekserji verimi %75,9 elde edilmektedir. Pompa motorlarını daha yüksek izantropik verime sahip motorlar ile değiştirmek mümkündür. Sistemde pompalar haricinde bulunan filtre pres ve otomasyon sisteminde şu anki mevcut fiziki yapı ile iyileştirme yapmak mümkün değildir. Termodinamik ve elektriksel iyileştirmelerin dışında sistemde mekanik iyileştirmelerde yapılabilmektedir. Bunlar yıkama kulesindeki nozzulların daha verimli olanları ile değiştirilmesi, yan ürün olarak oluşan CaSO₃'ün istiflenerek mali olarak değerlendirilmesi, sistemden çıkan H₂O'nun tekrar sistemde kullanılmasının sağlanmasıdır. Tüm iyileştirmelerin yapıldığı var sayılarak termodinamiğin enerji ve ekserji verimi tekrar hesaplanmış, iyileştirmeler sonucu elde edilen maddi kazanımlar ile NBD analizi yeniden yapılmıştır. Tablo 9'da tüm iyileştirmelerin yapılmasıyla elde edilebilecek enerji verimi, ekserji verimi ve NBD'yi iyileştirme yapılmamış mevcut sistem ile karşılaştırmaktadır.

SO₂'i salınımını önlemesi için kullanılan bu ıslak kireçli baca gazı desülfürüzyonu tesisinden daha verimli bir şekilde yararlanabilmek iyileştirmeler ile mümkün olmaktadır. Enerji verimi %48, ekserji verimi %59,5 ve NBD 2.999.727 TL iken termodinamik, elektriksel ve mekanik iyileştirmelerin sonucunda sistemin enerji verimi %59,4, ekserji verimi %75,9 ve NBD'yi 15.573.138 TL olmaktadır.

Tablo 9. Mevcut sistem için en iyi durum ve mevcut çalışma koşullarındaki durum. (The best case for the current system and the situation in the current working conditions.)

Sistem çalışma pH değeri 6		
Durum	Termodinamik Elektriksel, Mekanik İyileştirme yapılmış sistem	Mevcut şartlar dahilinde iyileştirme olmaksızın kullanılan sistem
T °C	50	100
$\dot{E}x_{k,ht}$ (kWh/yıl)	1337819,52	1337819,52
$\dot{E}x_{k,tp}$ (kWh/yıl)	27,83	59
$\dot{E}x_{k,yk}$ (kWh/yıl)	4037187,795	12606404,51
$\dot{E}x_{k,yp}$ (kWh/yıl)	5760	1008
$\dot{E}x_{k,tahp}$ (kWh/yıl)	54,36	91,33
$\dot{E}x_{k,ct}$ (kWh/yıl)	1994470	1993345
$\dot{E}x_{k,fp}$ (kWh/yıl)	225231,61	224927,95
W_{tp} (kWh)	1,66	1,875
W_{yp} (kWh)	4,160	4,750
W_{tahp} (kWh)	1,62	1,875
W_{fp} (kWh)	5	5
W_{ct} (kWh)	2	2
η	%59,4	%48
ε	%75,9	%59,5
G (TL)	1.818.700 TL	800.000
NBD	15.573.138	2.999.727

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Sonuç olarak, mevcut çalışma şartlarında sistem %48 enerji verimine, %59,5 ekserji verimine, 2.999.727 TL NBD değerine sahiptir. Mevcut sistem her ne kadar desülfürüzyon işlemini gerçekleştiriyor olsada, kuruluşundan gelen elektriksel, mekanik ve termodinamik eksikliklerden ötürü iyileştirmelerin yapılabileceği, gelişime açık bir sistemdir.

Termodinamik, elektriksel, mekanik iyileştirmelerin yapılması ile enerji verimi %59,4, ekserji verimi %75,9 ve NBD'yi 15.573.138 TL elde edilebilmektedir. Tüm bunlara ek olarak sistemin mevcudiyetinden ötürü SO₂ salınım vergisi yürürlüğe girdiğinde, SO₂ verilmediği düşünülürse, yıllık gelirin artması ile NBD'yi 58.171.167 TL olarak elde edilebilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Biondo, S. J. and Marten, J. C., "A history of flue gas desulfurization systems since 1850", *Journal of the Air Pollution Control Association*, 27(10): 948-961, (1977).
- [2] Kayapınar, O., "Islak Kireçli Baca Gazı Desülfürüzyon Sisteminin Termodinamik Analizi", Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, (2017).
- [3] Karakaras, E. and Giannakopoulos, D., "Modeling of flue gas desulfurization using dry additives", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 34(5): 421-432, (1995).
- [4] Ukawa, N., Takashina, T., Okino, S., Kimura, K. and Iwashita, K., "Development of Double-Contact-Flow Scrubber for Flue Gas Desulfurization", *Mitsubishi Heavy Industries, Technical Review*, 33(2): (1996).
- [5] Şentürk, G., "Tronanın Farklı Sistemlerdeki Sülfatasyon Kapasitesinin Belirlenmesi", İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, (2002).
- [6] Xiao, L., G. and Hui, S. S., "Thermal treatment and utilization of flue gas desulfurization gypsum as an admixture in cement and concrete", *Construction and Building Materials*, 22(7): 1471-1476, (2008).
- [7] Yu, Y.S., Yi, L., Li, Q., Jiang, J., Zhang, Z., X., "An innovative process of simultaneous removal CO₂ and SO₂ from flue gas of a power plant by energy integration", *Energy Conversion and Management*, 50: 2885-2892, (2009).
- [8] Gordon, M., Nobbet, J., Denlinger D. and Klingspor, J., "New Technologies to Improve the Performance and Realibility of Older FGD Systems", *URS Corporation Technical Review*, 129(1): (2010).
- [9] Carletti, C. Bjondahi., De Blasio, C., Ahibeck, J., Jarvinen, L. and Westerlund, T., "Modelling limestone reactivity and sizing the dissolution tank in wet flue gas desulfurization scrubbers", *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 32: 663-672, (2013).
- [10] Arif, A. Everson R. C. and Neomagus, H. W. J. P., "CFD modelling of wet flue gas desulphurization (WFGD) Unit: A new era of process system control and optimization", *Conference of the National Association for Clean Air*, South Africa, (2015).

- [11] Çengel Y. and Boles, M.A., “*Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*”, Çev. Derbentli T., Literatür Yayıncılık, İstanbul, (1996).
- [12] Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran M. J., “*Thermal Design And Optimization*”, John Wiley, 113–167, (1996).
- [13] Ahrendts, J., “Reference states”, *Energy*, 5: 667-677, (1980).
- [14] Yılmaz, D, Aydın, G. and Özkan, C., “Metal kutu üreten bir firmada fizibilite etüdü uygulaması”, *V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, (2005).
- [15] Güler, T. and Yücedağ M., “*Atmosfer kontrollü soğuk hava tesisi fizibilite raporu*”, Doğrudan Faaliyet Destek Programı, Fırat Kalkınma Ajansı, (2011).
- [16] Yoğunoğlu A., Yüzeroğlu M., Hopoğlu S. and Gökçe, S.G., “*Dondurulmuş Meyve-Sebze Sektör Analizi ve Ön Fizibilitesi*”, Fırat Kalkınma Ajansı, (2013).
- [17] <http://www.tcmb.gov.tr>, “Reeskont İskonto Oranı”, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Significance of concrete production in terms of carbondioxide emissions: social and environmental impacts

Beton üretiminin karbondioksit emisyonları açısından önemi: toplumsal ve çevresel etkiler

Yazar(lar)(Author((s)): İrem ŞANAL

ORCID: 0000-0003-1682-1789

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Şanal İ. “ Significance of concrete production in terms of carbondioxide emissions: social and environmental impacts”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 369-378, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389590

Beton Üretiminin Karbondioksit Emisyonları Açısından Önemi: Toplumsal ve Çevresel Etkiler

Araştırma Makalesi / Research Article

İrem ŞANAL*

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Bahçeşehir Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

ÖZ

Beton etkili sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen güçlü çevresel faydalarından dolayı oldukça önem kazanmakta olan bir malzemedir. otoriteler, mühendisler ve tasarımcılar, artan çevresel ve ekonomik güçlere tepki olarak yenilenemez kaynakları koruyan verimli, yenilikçi somut çözümler arayışındadırlar. Bir yapı malzemesinin ömrü üzerindeki çevresel etkisini göz önünde bulundururken birçok açıdan- üretim, inşaat, işletme, yıkım ve geri dönüşüm - beton en avantajlı seçenektir. Dünya çapında beton üretim atıklarına bir düzenleme getirilme ihtiyacı büyümekte olan bu çevresel ve ekonomik etkiler sonucu ortaya çıkmaktadır. Özellikle son yıllarda çimento imalat sürecinde yüksek enerji tüketimini ve çevresel etkileri önemli ölçüde azaltabilen bazı alternatiflere ulaşmak için araştırmacılar tarafından çeşitli çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Bu nedenle, geleneksel betonlara çevre dostu bir alternatif olarak "yeşil beton" kavramı ortaya çıkmaktadır. Bu yayın, betonun gelecek nesillerin sürdürülebilir kalkınmasına nasıl katkıda bulunduğunu ve mimar, mühendis, müteahhit ve müşterilerin yanı sıra binalarda ve altyapı tasarımında, inşasında veya işletmede yer alan diğer kişiler üzerindeki etkilerini de göstermeyi amaçlıyor. Betonun karbondioksit (CO₂) emisyonuna katkıda bulunan asıl kaynakları belirlemek ve geleneksel betonları "yeşil betonlar" ile karşılaştırmak, harmanlanmış çimentolarla üretilen betonları ve çimentonun kısmen azaltılması için kullanılan uçucu külü kullanmak suretiyle beton üretiminin çevresel etkisini incelemek bu çalışmanın temel amaçlarıdır.

Anahtar Kelimeler: Karbon emisyonları, çevresel faktörler, çimento üretimi, beton üretimi, sürdürülebilirlik.

Significance of Concrete Production in Terms of Carbondioxide Emissions: Social and Environmental Impacts

ABSTRACT

Concrete is being recognized for its strong environmental benefits in support of creative and effective sustainable development. In response to growing environmental and economic forces, regulatories, engineers, developers and owners are seeking efficient, innovative concrete solutions that conserve non-renewable resources. When considering the lifetime environmental impact of a building material -extraction, production, construction, operation, demolition and recycling- concrete is the most advantageous choice to meet these goals. Global demands for regulating concrete production waste arise from the growth of these environmental and economic issues. Various efforts have been conducted by researchers to arrive at some alternatives that are able to significantly reduce high energy consumed and environmental impacts during fabrication process of cement. Therefore, the concept of "green concrete" as an environmentally friendly alternative to conventional concrete has been emerging. This publication seeks to demonstrate how concrete contributes to future generations' sustainable development, and will be of interest to architects, engineers, policy makers, contractors and clients, as well as others involved with the design, construction or operation of buildings and infrastructure. The main objective of this study is to identify and evaluate the key sources contributing to CO₂ emissions from concrete and compare traditional concretes with "green concretes", concretes produced with blended cements and fly ash used as partial replacement of cement, in order to diminish the environmental impact of the concrete production.

Keywords: Carbon emissions, environmental aspects, cement production, concrete production, sustainability

1. INTRODUCTION

Upsurge in population, unplanned urbanization, depletion of natural sources rapidly bring environmental problems together. Construction sector is one of the leading sectors that cause environmental problems. At the present time, generally buildings are constructed by reinforced concrete framework construction technique (Aydin and Sancak 2005). Concrete is a basic building

material that will continue to be in demand far into the future. A world without concrete, and its dominant precursor, Ordinary Portland Cement (OPC), is hard to imagine. Although there are different types of concrete that have been developed for use in different applications, their common virtues are familiarity, versatility, strength, durability, wide availability, fire resistance, resistance to the elements and comparatively low cost. Global concrete industry uses approximately 1.6 billion tonnes of cement and 10 billion tonnes of sand, gravel, and crushed rock every year (Mehta, 2001). The

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : irem.sanal@eng.bau.edu.tr

world's yearly cement production of 1.6 billion tonnes accounts for about 7% of the global loading of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere (Mehta, 2001). There are two major sources of greenhouse gas (GHG) emissions associated with concrete production: (a) The mining, processing, and transport operations involving large quantities of aggregate consume considerable amounts of energy, produce large quantities of GHGs, and adversely affect the ecology of the areas they are extracted from. As the hauling distances between the quarries to the processing plants and processing plants to construction sites increase, GHG emissions associated with the transportation of NA also increase. (b) The manufacturing of cement involves emission of considerable amount of GHG in the atmosphere. It is estimated that producing one tonne of Portland cement requires about four giga-joules of energy, which in turn emits 1.25 tonnes of carbon dioxide into atmosphere (Wilson, 1993).

1.1. CO₂ Emissions of Concrete Industry

The push to reduce global CO₂ emissions is backed by governments and corporations who understand that the present rate of release of GHG into the atmosphere is a serious threat to future life and prosperity on the planet. Various authorities have introduced legislation and incentives (tax rises such as CO₂ taxes, quarrying and extraction tax, etc.) in order to regulate and reduce the activities of the industrial sectors most responsible for greenhouse gas emissions. However, the rate of increase in emissions continues almost unabated as a result of population growth and increased industrialization and economic activity in developing countries. (OECD/IEA and World Business Council for Sustainable Development, 2009). Regardless of personal feelings about global warming, carbon emissions, LEED certifications, or any “green” terms, it is important to realize our decisions have consequences, and our actions can make a difference in the future.

cement formulations and production processes are needed.

Due to concrete's large consumption, even small reductions of greenhouse gas emissions per ton of manufactured concrete can make a significant global impact. Therefore, reliable estimates of CO₂ emissions of various construction materials are becoming important, because of the environmental awareness of the users. The CO₂ emissions from most of the activities involved in concrete production and placement result from the energy consumed to accomplish them. Hence, to find the CO₂ emissions associated with an activity, the energy consumption per unit of material produced had to be audited. Examples of carbon footprint of concrete and concrete structures are given, taking into account the embodied energy during all the life cycle phases (Figure 1).

Several studies have been carried out on cement, concrete and concrete products that have pointed out phases of its life cycle that have a major environmental impact (Boesch and Hellweg, 2009; Huntzinger and Eatmon, 2010; Boesch and Hellweg, 2010; Young et al., 2002; Ali et al, 2011; Kim and Worrell, 2012; Lundström, 1997; Van Geem, 1998; Nisbet and Van Geem, 1997). Although the final product of all cement plants is more or less of the same quality, significant differences of raw materials (e.g., fuel consumption), production processes and varying performance/investments in air pollution control systems lead to different environmental impacts. Portland cement is not environmentally very friendly material. Previous research into the environmental impacts of cement production has already yielded several estimates of the CO₂ emissions per tonne of cement produced. Similarly, fly ash and GGBFS have also both been investigated previously, and their emissions quantified.

In terms of embodied CO₂ during the production phases, concrete will have significant carbon footprint, in which



Figure 1. Life cycle phases from cradle to grave.

It seems safe to say we all want to preserve or improve our environment, and we want our children and our grandchildren to have a better environment than we enjoy. As practitioners in our industry, more steps should be taken in order to make a difference. If the cement and concrete industries are to become sustainable and effectively contribute to emission reduction then, in addition to improvements in process efficiency and reliance on ordinary Portland cement (OPC) blends incorporating waste materials, moving to less carbon intensive fuels, developing clinker substitutions employing other low carbon materials with cementitious properties, and new low carbon and carbon-reducing

the main contributor is the cement manufacturing process. Other cementitious components considered include ground granulated blast furnace slag (GGBFS), a by-product of the steel industry, and fly ash, a by-product of burning coal. These two materials are generally used to replace a portion of the cement in a concrete mix. The use of water and admixtures in concrete leads to minimal CO₂ emissions, which leaves cement, coarse and fine aggregates as the main material contributors to the environmental impacts of concrete. Clinker production is the most energy-intensive stage in cement production, accounting for over 90% of total energy use, and virtually all of the fuel use. Therefore, more blended cements or

cement replacement, especially with chemical and mineral admixtures should be used.

In the present paper, CO₂ emission results from production of concretes with both ordinary Portland cement, blended cement and fly ash/slag replacement is examined. The necessary data for the elaboration of this paper came mainly from ready-mix concrete production plants located in Turkey, but other sources of data are used where necessary in order to figure out necessary assumptions (IPCC, 2006).

1.2. Sustainable Green Concretes

Concrete has shaped civilizations from as far back as Ancient Egypt and the Greek and Roman Empires. Today, it is indispensable in the development of infrastructure, industry and housing. Without concrete, the built environment would fail to accommodate the modern and demanding lifestyles.

To be truly sustainable, all aspects associated with a concrete structure, including design, location, materials utilized, construction techniques, maintenance, impact on the environment, overall energy consumption, and effect on future generations must be considered. All elements should be coordinated in a manner to benefit society. The consequences of today's decisions now will definitely affect our environment and society in the future. Much of the concern in the field of going green relates to carbon emissions in the atmosphere. A reported threefold increase in CO₂ in the atmosphere since 1977 prompts the global warming concern. One aspect of sustainability is the minimization or elimination of carbon emissions to reduce the portion of climate change that may be caused by this phenomenon.

When it comes to building structures, developers and contractors have the advantage of choosing from a variety of materials to use. Generally, the decision on material choice depends on several factors including cost and performance for specific applications. Due to growing interest in sustainable development and various incentives, the key players in the construction industry are motivated more than ever before to use materials that are sustainable or in such a way that their environmental impact is minimal. CO₂ emissions from cement manufacturing contribute significantly to global warming. To mitigate those effects, researchers are exploring how advanced materials and nanotechnologies can produce 'greener' concretes that are environmentally-friendly, and just as durable.

Therefore, it is important to develop green concrete that can be used in buildings and structures. Green concrete is defined as a concrete which uses waste material as at least one of its components; or its production process does not lead to environmental destruction. In other words, green concrete is an environment friendly concrete. Green concrete improves the three pillars of sustainability: environmental, economic, and social impacts. The key factors that are used to identify whether the concrete is green are amount of portland cement replacement materials, manufacturing process and methods,

performance and life cycle sustainability impacts. Materials used for making green concrete are composed of renewable, rather than non-renewable resources. These materials are referred to as green materials and are environmentally responsible because impacts are considered over the life of the product. Depending upon project-specific goals, green materials may involve an evaluation of the three criteria given in the following:

- (i) Locally available: Construction materials, components, and systems found locally or regionally, saving energy and resources in transportation to the project site.
- (ii) Salvaged, re-furnished, or re-manufactured: Includes saving a material from disposal and renovating, repairing, restoring, or generally improving the appearance, performance, quality, functionality, or value of a product.
- (iii) Reusable or recyclable: Select materials that can be easily dismantled and reused or recycled at the end of their useful life.

Various efforts have been conducted by researchers to arrive at some alternatives that are able to significantly reduce high energy consumed and environmental impacts during fabrication process of cement, including implementing the concept of industrial ecology and green chemistry as well as nanoengineering that study the behavior of the structure and organization of nanoparticles of cement in the mix for achieving higher performance. The philosophy of green concrete, in fact of any green product is based on the principle of optimizing its embodied energy i.e. on minimizing the energy spent to put it into its final functional form. It therefore depends on the practices related to every stage of its production. How green a product is generally defined, depending on the embodied energy, since the lower the embodied energy is, the greener the product will be. For concrete, any practice which aids to reduce the energy associated with its production, energy efficient cement production, use of blended cements, savings made on transportation of ingredients and direct use of recycled waste contribute towards its greenness.

There are a number of alternative environmental requirements with which green concrete structures must comply:

- CO₂ emissions shall be reduced by at least 30 %.
- At least 20 % of the concrete shall be residual products used as aggregate.
- Use of concrete industries own residual products.
- Use of new types of residual products, previously land filled or disposed of in other ways.
- CO₂-neutral, waste-derived fuels shall substitute fossil fuels in the cement production by at least 10 %.

1.3. Alternative Ways of Making Green Concretes

The concrete industry is dedicated to continuous environmental improvement through process and product

innovation. One important issue is the use of environmental-friendly concrete “green concrete” to enable world-wide infrastructure-growth without increase in CO₂- emission. The key findings of this study are the emissions associated to the various components of both traditional and green concretes and how they consolidate into a carbon footprint for concrete.

1.3.1. Blended cements

The production of blended cements involves the intergrinding of clinker with one or more additives; e.g., fly ash, bnb granulated blast furnace slag, silica fume, volcanic ash, in various proportions. The use of blended cements is a particularly attractive efficiency option since the intergrinding of clinker with other additives not only allows for a reduction in the energy used (and reduced GHG emissions) in clinker production, but also directly corresponds to a reduction in CO₂ emissions in calcinations as well. Blended cement has been used for many decades around the world [Worrell & Galtisky 2004]. Although it is most common to make use of supplementary cementing materials in the replacement of cement in the concrete mixture, blended cement is produced at the grinding stage of cement production where fly ash, blast furnace slag, or silica fume are added to the cement itself.

Blast furnace slag (GGBS) is a by-product of iron manufacturing industry. The production of GGBS requires little additional energy compared with the energy required for the production of Portland cement. Blended Portland cement with GGBS will lead to a significant reduction of CO₂ gas emission. GGBS is therefore an environmentally friendly construction material. It can be used to replace as much as 80% of the Portland cement when used in concrete. GGBS concrete has better water impermeability characteristics as well as improved resistance to corrosion and sulphate attack. As a result, the service life of a structure is enhanced and the maintenance cost reduced. High volume eco-friendly replacement slag leads to the development of concrete which not only utilizes the industrial wastes but also saves significant natural resources and energy. This in turn reduces the consumption of cement.

1.3.2. Cement Replacement

Reuse of post-consumer wastes and industrial byproducts in concrete is necessary to produce even “greener” concrete. A great potential exists to reduce the concrete industry’s contributions to greenhouse gases through reductions in cement consumption. One alternative concrete system is the use of fly ash as a supplementary cementing material.

Fly ash is produced from coal and some other solid fuel combustion systems, where bottom fuel ash is left in the region of combustion, fine grained fly ash is carried with combustion flu gases and commonly collected by electrostatic precipitation. Because of its pozzolanic properties, fly ash is often used to replace typically 30% of the mass of Portland cement in a concrete mix, for example to lower permeability and reduce initial heat

evolution. Fly ash will contribute to the strength of concrete after seven days of curing. Strength development of fly ash in concrete is due to a chemical reaction between the fly ash and calcium hydroxides.

1.4. Environmental Significance of Concrete

The extensive use of green concretes with cement replacement of fly ash in the construction industry has a number of environmental benefits. These benefits can be classified as longer service life, recycled material usage, reduced energy consumption, reduced CO₂ emissions. **Longer Service Life:** Green concrete gains strength faster and has a lower rate of shrinkage than concrete made only from Portland Cement. Structures built using green concrete have a higher resistance to fire. It also has a greater resistance to corrosion, which is important with the effect pollution has had on the environment. Acid rain greatly reduces the longevity of traditional building materials. All of those factors add up to a building that will last much longer than one made with ordinary concrete. Similar concrete mixtures have been found in ancient Roman structures. If buildings aren’t constantly having to be rebuilt, fewer construction materials are needed. The impact on the environment is reduced. **Uses Industrial Waste:** In view of the energy and greenhouse gas (GHG) emission concerns in the manufacturing of portland cement, it is imperative that either new environmentally friendly cement-manufacturing technologies be developed or substitute materials be found to replace a major part of the portland cement for use in the concrete industry [Malhotra 2004]. Instead of a 100% Portland cement mixture, green concrete uses between 25% and 100% fly ash. Fly ash is a byproduct of coal combustion. It is gathered from the chimneys of industrial plants that use coal as a power source. There are copious amounts of this industrial waste product. Hundreds of thousands of acres of land are used to dispose of fly ash. Green concrete provides a way to use fly ash and save many acres of land.

Reduced Energy Consumption: If you use less Portland cement and more fly ash when mixing concrete, then you will use less energy. The materials that are used in Portland cement require huge amounts of coal or natural gas to heat. Fly ash already exists as a byproduct of another industrial process, so you are not expending much more energy to use it to create green concrete. Another way that green concrete reduces energy consumption is that a building constructed from it is more resistant to temperature changes, thus saving heating and cooling costs.

Reduced CO₂ Emissions: Among the main ingredients in ordinary cement are pulverized limestone, clay, and sand which are heated to a high temperature. This process is responsible for between 5 and 8% of all CO₂ emissions worldwide. The manufacturing of green concrete releases up to 80% fewer Carbon Dioxide emissions. As a part of a global effort to reduce emissions, switching completely to green concrete for construction will help considerably.

1.5. Social Significance of Concretes

Major forces that were responsible for economic and social transformations in society are population growth, industrialization and urbanization, globalization of market economy and consumerism, and environmental pollution. The forces are interconnected. Their combined impact has triggered another force, namely climate change, which is threatening to cause serious damage to human civilization on the earth. Global warming is the most important sustainability issue today in the public mind.

In recent years, the focus was put on environmental aspects when addressing the question of sustainable development and construction. The social and economic aspects of sustainability have been almost ignored, which has created a distorted working definition of sustainability. Conservation and environmental protection has become a major world issue in the global context. Since The World Earth Summit 1997 in Kyoto, Japan, which initiated the need to reduce CO₂ emissions on a large scale (targeted before 2010 emissions reduced by about 21%) to avoid catastrophic global world, so many huge industrial countries around the world have agreed to formulate regulations that dreams related to the mission of the protection and preservation of the environment can become a reality. (Malhotra, 1999) About 8 ~ 10% of total world CO₂ emissions, which are believed to be the main drivers of global climate change did not come from polluting vehicles on the highway or a forest fire, but comes from the cement manufacturing process in cement factories. Global warming gas is released when the raw material of cement, limestone and clay is crushed and heated in a furnace at high temperature (± 15000 C). Each year, approximately 1.89 billion tons of cement (which is a major component of concrete) have been produced worldwide.

In addition to strive for minimal environmental impact during the use cycle of concrete (since the process of making cement, concrete manufacture until, for example 50 years, concrete buildings that have been used dismantled / broken), which is no less important aspect in the success of efforts to conserve the environment are: government policies/institutions/ industries through various forms of regulation, the willingness of the user community, and (the willingness of the industry itself to change the perception. Cement and concrete industries that have grown rapidly and established, may have to change the situation due to issues of preservation and protection of the environment, due to a significant change from how concrete is designed, specified, manufactured, transported, printed, finished, and recycled money (Holland, 2002). To illustrate that during the service life cycle use of concrete / concrete experience various stages that need to be considered in all aspects of conservation / environmental protection.

2. MATERIAL and METHOD

The objective of this study is to identify the key emission sources contributing to the GHG emissions from concrete. Following this it will be possible to quantify the emissions resulting from the production of a cubic meter of concrete. These calculations can then be extrapolated to depict the emissions resulting on a national level as well as in the various sectors of end use. The final, logical objective is to evaluate possible mitigation strategies to decrease the CO₂ emissions from concrete production.

2.1. Identification and Determination of Emissions

The first step that is required before emission sources can be identified is to select a reporting boundary, where there are three main scopes of emissions that will need to be examined within each activity:

- Scope 1 - Direct emissions: Primarily result from on site consumption of fossil fuels.
- Scope 2 - Indirect emissions: The main GHG emission source results from the electricity consumption.
- Scope 3 - Other Indirect emissions: Final production transportation and outsourced activities

Since concrete is a product composing of a number of components with each component contributing to the overall emissions related to concrete production, the services and materials included in the production process of concrete have been identified and depicted in Table 1.

Table 1. Identification of emission sources according to the corresponding activity

Activity	Emission Sources		
	1.Direct	2.Indirect	3.Other Indirect
Cement	Coal Firing of Kiln	Electricity	Transportation to site Water Consumption Landfill Usage
	On site Fuel-Kiln		
	Calcination of Raw Materials		
	On Site Fuel-Vehicles		
Aggregates	On Site Fuel-Vehicles	Electricity	Transportation to site Water Consumption
	Explosives		
Fly Ash	On Site Fuel-Vehicles		Transportation to site
Slag	On Site Fuel-Vehicles		Transportation to site
Admixtures	On Site Fuel-Vehicles		Transportation to site
Readymix	On Site Fuel-Loader		Transportation to site Water Consumption Landfill Usage

2.2. Emissions from the Concrete Production

Water, sand, stone or gravel, and other ingredients make up about 90% of the concrete mixture by weight. The process of mining sand and gravel, crushing stone, combining the materials in a concrete plant and transporting concrete to the construction site requires very little energy and therefore only emits a relatively small amount of CO₂ into the atmosphere. The amounts of CO₂ embodied in concrete are primarily a function of the cement content in the mix designs.

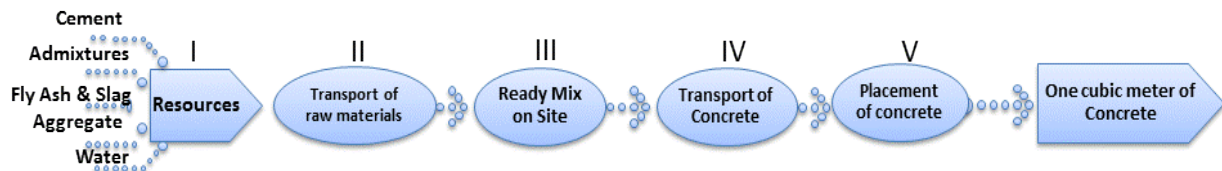


Figure 2 Concrete CO₂ emissions system diagram (Adapted from: Flower and Sanjayan, 2007, p238).

All of these sources from I to V will count towards a concrete production activity's CO₂ emissions inventory. In the scope of this study, only the sources I, II, III and IV will be examined and included in the CO₂ emission calculations, since the emissions related with concrete placement and service life will be the scope of a further study, which will be the 2nd part of the present research.

2.2.1. Emissions from Cement

Cement has received the most attention out of all of the components that contribute to concrete and has been comprehensively scrutinised (Humphreys and Mahasenan, 2002). This is due to the fact that it has a relatively high specific emission and is produced in large quantities. The main indirect emissions source is grid electricity consumption, since cement sites are large energy intensive industrial sites (Hendriks *et al.*, 1998; Humphreys and Mahasenan, 2002). Main other indirect emissions result from off-site transport of raw or intermediate products by road, rail and trucks. Transport does not normally have a significant impact on the total CO₂ emissions of cement production due to the large quantity of emissions from direct and indirect sources (Worrell *et al.*, 2001).

2.2.2. Emissions from Aggregates

There are very few emissions resulting from aggregate production, which include explosives for the blasting of geological reserves and fuel used by onsite vehicles; mainly for loading and hauling, as well as electricity contributing to indirect emissions. Indirect emissions account for up to 70 % of emissions from aggregate production, which is due to crushing operations at a quarry rely on electricity.

Diesel usage accounts for most of the Scope 1 emissions. The bulk of Scope 2 emissions come from the consumption electricity. Due to the fact that explosives are consumed in such small amounts there are very few emissions associated to explosives despite their high specific emissions.

2.2.3. Emissions from Fly Ash and Slag

Emissions resulting from fly ash are mainly from direct emissions, since the bulk of emissions result from diesel use in on site trucks. Fly ash is the by-product of the power industry. Therefore, the specific emissions only took activities into consideration post "primary" production. The major emissions associated with fly ash preparation is from electricity consumption. Just like fly ash, the product would be produced regardless of demand from the concrete and cement industries. The largest direct emissions source results from fuel used for on site

vehicles. The emission factor for the fly ash and slag manufacturing are taken based on a previous study (Flower and Sanjayan, 2007).

2.2.4. Emissions from Admixtures

Admixture manufacturers were not able to supply their related emissions and hence internal literature sources were used for these specific emissions. The primary emission sources from admixtures are from fuel and electricity. Plasticisers are usually added in concentrations of 0.25 to 0.8 % by weight of cement. Therefore, admixtures have a small contribution to the footprint of concrete due to the fact that they are used in very small quantities per cubic meter of concrete. The emission factor for the admixture manufacturing for different types of admixtures are adapted from a previous study (Flower and Sanjayan, 2007).

2.2.5. Emissions from Water

Water consumption contributed the least CO₂ emissions to a cubic meter of concrete. Other similar studies that were examined excluded these components which contribute less than one half of a percent of CO₂ emissions to a cubic meter. The investigation of emissions associated with water consumption revealed they could in fact be deemed as immaterial.

2.2.6. Emissions from Readymix Concrete Production

The emissions resulting from the processes involved in the preparation of readymix will be very low. This is due to the fact that the processes are not energy intensive. Readymix sites produce the concrete mix and transport it to site. It is expected that emissions will result primarily from fuel use, followed by emissions from electricity.

2.2.7. Emissions from Concrete Transportation to Site

The transport of batched concrete consumes diesel fuel. Through trucking records taken over one year period, the average amount of fuel consumed per cubic metre of concrete transported was found to be 3.1 l/m³, which was

found to be responsible for 0.009 t CO₂-e/m³. According to the National Academy of Science (USA), the fuel consumptions of light and heavy vehicle, concrete trucks' average fuel consumption is 2,9 km/l. Therefore, the specific fuel consumption for a concrete truck operated is calculated as 0,19 kgCO₂/km.m³ (based on 2,6 kg-CO₂/lt emission). The calculation of CO₂ emissions can be obtained through calculations from production data or through direct measurement.

3. CALCULATIONS

Direct measurement of emissions is almost always impractical, so the CO₂ emissions resulting from concrete production was investigated using closed ended questionnaires distributed to readymixed concrete plants and manufacturers of cement, aggregates, fly ash and admixtures.

3.1. Emission Factors

Questions were designed to gather specific activity data covering all emission sources from 6 readymix concrete plants, sites located across Ankara and Istanbul

establish the emissions per cubic meter of a specific concrete mix. An appropriate measurement of emissions intensity needed to be selected. In the case of the concrete industry, measurement of emissions intensity format was chosen to be "t CO₂ emitted per cubic meter of concrete produced" (t CO₂/m³). The data were gathered by means of questionnaires were then consolidated and inputted into the model to determine the associated CO₂ emissions. This was done by linking the activity data with an emissions factor (Table 2), and resulting specific emissions of CO₂ per m³ of each emission source were obtained for each component of the concrete industry. The figures obtained were then totalled and divided by the total product produced to determine an emission factor (Table 3).

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Emissions Related with Concrete Production

For comparative purposes various mix designs from 6 different readymix concrete plants are given below. It is important to note that, concrete produced in Site 1 is

Table 2. Emission Factors (IPCC, 2006) (NRMCA, 2012)

Source	Emission Factor	Unit	Scope
Diesel Fuel Consumption	2,697	kgCO ₂ /lt	1
Consumption of Electricity	0,866	kgCO ₂ /kWh	2
Water Consumption on Site	0,009	kgCO ₂ /lt	3
Landfill Usage	0,9	kgCO ₂ /ha	3
Average Transport Distance- Diesel Tracks	0,19	kgCO ₂ /km	3

contributing to the concrete industry. Some of the sources include fuel and electricity consumption as well as total raw product sold. Additionally, default emissions factors were used and inferential methodologies to determine the CO₂ emissions were applied. Each of the activities of the concrete industry had a tailored questionnaire, based on average monthly: i)Production amounts (m³), ii)Electricity Consumption (kWh/m³), iii) Fuel Consumption (lt/m³), iv)Plant Water Consumption (kg/m³), v)Landfill Usage (hectare), vi)Transport Distance (km). The most common sources for emission factors are the IPCC and the GHG. Typical emission factors include the following examples in Table 2, taken from the IPCC and other references. (IPCC, 2006) (NRMCA, 2012)The emission factors obtained were then inputted into a concrete CO₂ determination model to

green concrete with silicafume and fly ash replacement. Additionally, concretes from Sites 2, 3 and 4 are also green concretes with blended cements as can be seen in Table 4.

Table 4. Type of Concretes from Different Sites

Site	Concrete Class	Type of Application
1	Green	Cement Replacement
2, 3, 4	Green	Blended Cement
5, 6	Normal	-

The emissions associated with each activity in the concrete production process were combined into a total figure based on mix design, which were given in Table 5.

Table 3. Emission Factors Calculated for each component of the concrete

Activity	Emission Factor	Unit
CEM I	0,913	(t CO ₂ / t)
CEM III/B	0,350	(t CO ₂ / t)
Aggregate	0,009-0,05*	(t CO ₂ / t)
Fly Ash	0,027	(t CO ₂ / t)
Slag	0,143	(t CO ₂ / t)
Admixture	0,04-0,05 *	(t CO ₂ / t)
Water	0,009	(t CO ₂ / t)
Concrete Batching	0,09-0,015*	(t CO ₂ / m ³)

*Can be different according to the specific type of material used

Figure 3 compares the CO₂ variations between the designed mixes from 6 different plants. Dependent on the concrete mix proportions, the range of total CO₂ emissions (including Scope 1, 2 & 3) were calculated between 0,271 (Site 4) and 0,443 (Site 5) t CO₂/m³, as can be seen in Figure 3. It is also observed from Figure 3 that concrete mixtures with Cem III/B cement (Site 2, 3 and 4) has the lowest CO₂ emissions, whereas mixtures with CEM I (Site 1, 5 and 6) showed higher CO₂ emissions. Considering the mixtures with same type of cement (CEM I), it can be noted that whenever a mineral admixture is used (Site 1) the emissions resulting from concrete production are decreased (when compared to Site 5 and 6). Due to the fact that cement has a relatively large emissions factor small changes in content result in significant CO₂ variations.

Additionally, from Figure 3 it was observed that, for traditional concrete mixtures (Site 5 and Site 6), change in concrete type (C35 and C45) does not have a significant effect on the resulting carbon emissions.

cement and concrete industry has fully committed to the need for sustainable development. Efficiencies and innovations during concrete manufacturing, along with its inherent properties in a range of applications, ensure that green concrete provides solutions to the built environment that help to achieve sustainable development. The concrete industry is dedicated to continuous environmental improvement through process and product innovation. Concrete performs well when compared to other building materials but when it comes to sustainable development there is always opportunity for improvement. A sustainable industrial growth will influence the cement and concrete industry in many respects as the construction industry has significant environmental impacts due to high consumption of energy and other resources. One important issue is the use of environmental-friendly concrete “green concrete” to enable world-wide infrastructure-growth without increase in CO₂- emission. The key findings of this study are the emissions associated to the various components

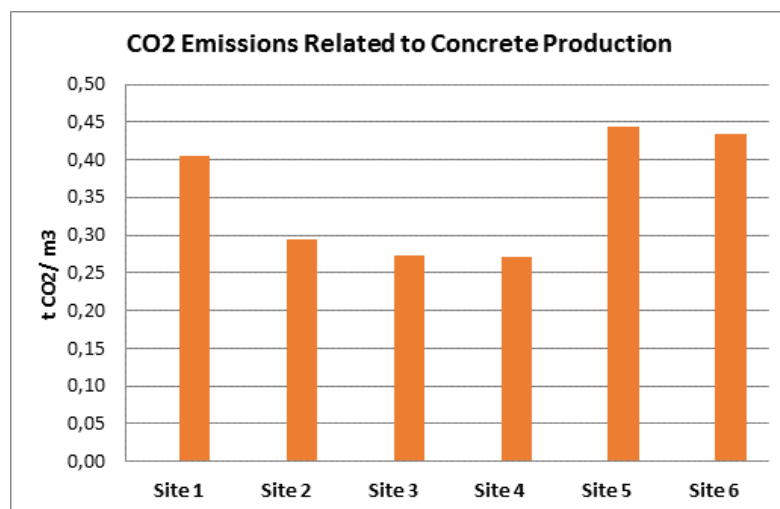


Figure 3. CO₂ emissions resulting from various mix designs from 6 different plants

Another important point to emphasize is that, concrete mixtures from Site 1, 2, 3 and 4 are high performance (Durabet) concretes, which have higher durability and longer service lives.

Therefore, if overall emissions throughout the life-cycle of concretes were to be evaluated, resulting CO₂ emissions from high performance concrete's might have been decreased due to their longer lifespans. However, CO₂ emissions resulting from placement, performance and service life of the concretes will not be evaluated in the scope of this study. Second part of this study will focus on the remaining sources of concrete lifecycle.

5. CONCLUSION

Important strategies that include social and environmental solutions within a detailed and comprehensive approach are required to ensure that future generations are not disadvantaged by current consumption patterns. Recognising the importance of immediate action, the

of both traditional and green concretes and how they consolidate into a carbon footprint for concrete. According to the results of this study, concrete production, transport and placement activities were all found to contribute very small amounts of CO₂ to total concrete emissions. Emission contributions due to admixtures and water were found to be negligible, whereas cement production was found to be the primary source of CO₂ emissions. When considering green concretes, it was observed that there is a significant decrease in the CO₂ emissions when compared to traditional concretes. Using a blended cement with GGBS results significantly lowered values of CO₂ emissions. Based on the results, to reduce CO₂ emissions related to concrete production, decreasing amount of cements and using fly ash as cement replacement has a significant effect on the decrease of CO₂ emissions, since they both could potentially reduce overall energy consumption in concrete production, and this will contribute to the efforts for reducing CO₂ emissions.

Overall, “green concrete” has the benefits of lowered cement/CO₂ footprint per unit of concrete produced. Additionally, green concrete also has potential for commercialization by providing developers and contractors with an alternative concrete that is environmental-friendly, in line with the environmental policy incentives.

related to concrete production, decreasing amount of cements and using fly ash as cement replacement has a significant effect on the decrease of CO₂ emissions, since they both could potentially reduce overall energy consumption in concrete production, and this will contribute to the efforts for reducing CO₂ emissions. Overall, “green concrete” has the benefits of lowered

Table 5. Resulting Carbon Emissions Based on Concrete Mix Proportions

Material	Type	Mix Proportions and Resulting CO ₂ Emissions											
		Site 1		Site 2		Site 3		Site 4		Site 5		Site 6	
		t/m ³	tCO ₂ /m ³	t/m ³	tCO ₂ /m ³	t/m ³	tCO ₂ /m ³	t/m ³	tCO ₂ /m ³	t/m ³	tCO ₂ /m ³	t/m ³	tCO ₂ /m ³
Cement 1	CEM I 42,5 N	0,285	0,260										
Cement 2	CEM III/B 32,5			0,400	0,140	0,380	0,133	0,390	0,137				
Cement 3	CEM I 42.5 R									0,390	0,356		
Cement 4	CEM I 42.5 R											0,310	0,283
Mineral Adm. 1	Silica	0,030	0,004										
Mineral Adm. 2	FA	0,050	0,001										
Agregate 1	0-5 mm			0,479	0,043								
Agregate 2	5-15 mm			0,468	0,042								
Agregate 3	15-22 mm			0,462	0,041								
Agregate 4	0-3 mm			0,448	0,027								
Agregate 5	0-3 mm					0,426	0,051						
Agregate 6	0-5 mm					0,474	0,028						
Agregate 7	5-15 mm					0,496	0,030						
Agregate 8	15-22 mm					0,496	0,030						
Agregate 9	0-5 mm	0,402	0,026					0,458	0,029				
Agregate 10	5-15 mm	0,514	0,033					0,493	0,032				
Agregate 11	15-22 mm	0,495	0,032					0,423	0,027				
Agregate 12	0-2 mm	0,469	0,048					0,434	0,045				
Agregate 13	0-5 mm									0,948	0,045		
Agregate 14	5-15 mm									0,322	0,015		
Agregate 15	15-22 mm									0,546	0,026		
Agregate 16	0-5 mm											1,000	0,102
Agregate 17	5-15 mm											0,408	0,024
Agregate 18	15-22 mm											0,423	0,025
Admixture 1	Optima 100			0,006	0,001	0,005	0,000	0,007	0,001				
Admixture 4	AirG100							0,001	0,000				
Admixture 5	3587											0,003	0,000
Admixture 6	G 675									0,004	0,000		
Water 1	Well	0,102	0,001										
Water 2	Well			0,148	0,001			0,137	0,001				
Water 3	Well					0,141	0,001						
Water 4	Well									0,161	0,001		
Water 5	Well											0,180	0,002

use of environmental-friendly concrete “green concrete” to enable world-wide infrastructure-growth without increase in CO₂- emission. The key findings of this study are the emissions associated to the various components of both traditional and green concretes and how they consolidate into a carbon footprint for concrete. According to the results of this study, concrete production, transport and placement activities were all found to contribute very small amounts of CO₂ to total concrete emissions. Emission contributions due to admixtures and water were found to be negligible, whereas cement production was found to be the primary source of CO₂ emissions. When considering green concretes, it was observed that there is a significant decrease in the CO₂ emissions when compared to traditional concretes. Using a blended cement with GGBS results significantly lowered values of CO₂ emissions. Based on the results, to reduce CO₂ emissions

cement/CO₂ footprint per unit of concrete produced. Additionally, green concrete also has potential for commercialization by providing developers and contractors with an alternative concrete that is environmental-friendly, in line with the environmental policy incentives.

ACKNOWLEDGEMENT

In the scope of this study, the author would like to convey special thanks to the OYAK Ready Mix Concrete plants for sharing their data generously.

REFERENCES

- [1] Ali M.B, Saidur R., Hossain M.S. “A review on emission analysis in cement industries”. *Renew Sust Energ Rev* 2011; 15 (5): 2252-2261. (2011)

- [2] Aydın, A. B. ve Sancak, E., "The Environmental Impacts of Concrete and Concrete Products", *1st International Vocational and Technical Education Technologies Congress - MTET 2005*, Marmara University, Istanbul. (2005)
- [3] Boesch M. E., Hellweg S. "Model for cradle-to-grate life cycle assessment of clinker production". *Environ Sci Technol* 2009; 43: 7578-7583. (2009)
- [4] Boesch M. E., Hellweg S. "Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment". *Environ Sci Technol* 2010; 44: 9143-9149. (2010)
- [5] European Cement Association, Sited in: WWF: A blueprint for a climate friendly cement industry. (2004)
- [6] Flower DJM, Sanjayan JG "Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture". *Int J LCA* 12 (5) 282–288. (2007)
- [7] Hendriks, C.A., Worrell, E., Price, L., Martin, N., Ozawa Meida, L., de Jager, D. and Riemer, P. "Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry", *Proc. Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, August 30–September 2, Interlaken. (1998)
- [8] Holland, T.C. "Sustainability of the Concrete Industry – What Should be ACI's Role". *Concrete International*. Vol.24, No. 7, July, 35-40. (2002)
- [9] Humphreys K, Mahasenan M "Toward a Sustainable Cement Industry. Substudy 8, Climate Change". *World Business Council for Sustainable Development*. (2002)
- [10] Huntzinger D. N., Eatmon T. D. "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies". *J Clean Prod* ; 17: 668-675. (2009)
- [11] IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. II, Chapter 1. IPCC. (2006)
- [12] Kim, Y., Worrell, E. "CO2 emission trends in the cement industry: an international comparison" *Mitig Adapt Strat Gl*, 7, pp. 115-133. (2002)
- [13] Leese, R. and Casey, D. "Report on Embodied CO2e of UK cement, additions and cementitious material- Fact Sheet 18", *Mineral Products Association*, MPA Cement, London, UK. (2015)
- [14] Lippiatt, B. C. and Ahmad, S., "Measuring the Life-Cycle Environmental and Economic Performance of Concrete : The BEES Approach." *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, pp.213-230.(2004)
- [15] Lundström, H. "LCA av Betongtakpannor – en Analys av Miljöbelastning Under Takpannans Livscykel", *Chalmers Industriteknik*, Göteborg, Sweden (in Swedish). (1997)
- [16] Malhotra, V. M. "Making Concrete Greener with Fly Ash". *Concrete International*. 21 (5), May 61-66. (1999)
- [17] Mehta, P.K. "Reducing the environmental impact of concrete". *Concrete International*, ACI, October issue, pp: 61-66. (2001)
- [18] National Research Council, "Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium and Heavy-Duty Vehicles", The National Academy of Sciences, March, pp. 2- 2 and 2-3.(2010)
- [19] Neville, A.M. "Properties of Concrete", John Wiley & Sons. (1996)
- [20] Nisbet M. and van Geem, M. "Environmental life cycle inventory of Portland cement and concrete", *World Cement*, Vol. 28, No. 4, pp.100–103. (1997)
- [21] NRMA, National Ready Mixed Concrete Association, "Concrete CO2 Fact Sheet", (2012)
- [22] VanGeem, M. "The portland cement association's environmental life cycle assessment of concrete", *Air and Waste Management Association's 91st Annual Meeting and Exhibition*, San Diego, California, USA, June 14–18. (1998)
- [23] Wilson, A. "Cement and Concrete: Environmental Considerations", *Environmental Building News*, Vol. 2, No.2. (1993)
- [24] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C. and Ozawa Meida, L. "Carbon dioxide emissions from the global cement industry", *Annual Review Energy Environment*, Vol. 26, pp.303–329. (2001)
- [25] Young, S., Turnbull, S. and Russell, A. "Toward a sustainable cement industry. Substudy 6 – what LCA can tell us about the cement industry", *An Independent Study Commissioned by the World Business Council for Sustainable Development*, (2002)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

İnşaat proje imalatlarında artırılmış gerçeklik teknolojisi uygulamaları

Augmented reality technology applications in construction project activities

Yazar(lar) (Author(s)): Serkan KIVRAK¹, Gökhan ARSLAN²

ORCID¹: 0000-0001-7660-6488

ORCID²: 0000-0001-8338-270X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kıvrak S. ve Arslan G., “İnşaat proje imalatlarında artırılmış gerçeklik teknolojisi uygulamaları”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 379-385, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385916

İnşaat Proje İmalatlarında Artırılmış Gerçeklik Teknolojisi Uygulamaları

Araştırma Makalesi / Research Article

Serkan KIVRAK^{1*}, Gökhan ARSLAN²

¹Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İki Eylül Kampüsü, Eskişehir, Türkiye

²Anadolu Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Eskişehir, Türkiye

(Geliş/Received : 10.04.2017 ; Kabul/Accepted : 22.06.2017)

ÖZ

Bilgi teknolojilerine yeni bir bakış açısı getiren artırılmış gerçeklik, gerçek dünyanın sanal dünyadan gelen bilgi ile zenginleştirilmesidir. Artırılmış gerçeklik, gelecekte inşaat projeleri uygulamalarına önemli katkılar sağlayacak yenilikçi teknolojilerden biridir. Bu çalışmada, artırılmış gerçeklik teknolojisi kullanılarak inşaat projelerinde çalışan işçi, ekipman operatörü, mühendis ve yöneticilerin yapımını veya kontrolünü üstlendikleri imalat işlerinin baştan sona aşamalar halinde bilgilendirildiği bir sistem geliştirilmiştir. Akıllı gözlük ile oluşturulan sistemde kullanıcılar, yapımını ya da kontrolünü üstlendikleri işlerle ilgili eğitim ve yapım yöntemlerine şantiyede işin başındayken ulaşarak imalat ile ilgili gerekli bilgilere anında erişebilecektir. Bu şekilde hatalı imalat yapmaktan ya da imalatın doğrusunu öğrenmek için zaman ve para harcamaktan sakınmış olacaktır. Sistem, tuğla duvar imalatının aşamaları kullanılarak test edilmiştir. Sistemin inşaat proje imalatlarının kalitesini artırabileceği dolayısıyla sektöre önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Artırılmış gerçeklik, inşaat sektörü, akıllı gözlük, bilgi teknolojileri.

Augmented Reality Technology Applications in Construction Project Activities

ABSTRACT

Augmented reality, which brings a new perspective into information technologies, can be defined in the simplest form as augmenting the real world with information from the virtual world. Augmented reality is one of the innovative technologies that will provide significant benefits to construction project applications in the future. In this study, an augmented reality system is developed for improving construction project activities. This system shows the workers, equipment operators, engineers and managers how to perform the tasks of the specific job, step by step, with relevant supplemental information. Using smart glass in the system, the users will be able to reach the training and building methods about the relevant project activities. By this way, construction failures and spending money and time to learn the correct methodology for the execution of the activity will be avoided. The system is tested using the brick wall production phases. It has been proposed that the system can improve the quality of construction activities and thus, provide significant contributions to the construction industry.

Keywords: Augmented reality, construction industry, smart glass, information technologies.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnşaat projelerinde çalışan ve çoğunlukla yetersiz mesleki eğitime sahip işçilerin gerçekleştirdikleri imalatlarda yapılan hatalar, yapım sürecini ve kalitesini olumsuz etkilemektedir [1]. İmalat hataları, projelerin standartlarda istenen kalitesini etkilemekte, gecikmelere neden olmakta, maliyeti artırmakta ve işveren ile yüklenici arasında anlaşmazlıkların çıkmasına yol açmaktadır. Ayrıca uygulama hataları, yapıların depremlerde zarar görmesine neden olan önemli faktörlerden biridir [2]. İnşaat proje imalatları aşamasında bilgi teknolojilerinin etkin kullanılması, projelerdeki verimliliği, kaliteyi, iş sağlığı ve güvenliğini ve dolayısıyla proje maliyeti ve süresini olumlu yönde etkileyecektir. Bu bağlamda, bilgi teknolojilerine yeni bir

bakış açısı getiren artırılmış gerçeklik, inşaat proje imalatlarını iyileştirmede önemli bir potansiyele sahiptir.

Artırılmış gerçeklik, gerçek dünyanın sanal dünyadan gelen bilgi ile zenginleştirilmesidir [3,4]. Artırılmış gerçeklik, yakın bir gelecekte hemen hemen her alanda uygulama potansiyeline sahip yenilikçi teknolojilerden biridir. Artırılmış gerçeklik, sanal gerçekliğin bir varyasyonudur. Sanal gerçeklik, gözle görülebilir her türlü iç ve dış mekânın ve etkinliğin bilgisayar ve internet ortamında interaktif olarak aşağı yukarı, sağa sola ve öne arkaya olmak üzere 360 derecelik 3 boyutlu bir açı ile izlenmesini sağlayan bir uygulamadır. Böylece izlenen görüntünün içerisinde ve o an yaşıyormuş gibi hissedilir [5]. Artırılmış gerçeklik ise gördüğümüzü, duyduğumuzu ve hissettiğimizi zenginleştirerek gerçek olanla bilgisayar ürünü arasındaki çizgiyi bulandırmaktadır. Artırılmış gerçeklikte gerçek ortam sanal ortama göre daha baskın durumdadır. Sanal

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : serkankivrak@anadolu.edu.tr

gerçeklikten farklı olarak da artırılmış gerçeklik, kullanıcının sanal objelerle birleştirilmiş gerçek dünyayı algılamasına izin verir [6-8].

Artırılmış gerçekliğin yakın bir gelecekte hemen hemen tüm sektörlerde kullanımı öngörülmektedir. Örneğin, otomotiv endüstrisinde artırılmış gerçeklik kullanılarak bir otomobilin bakımı çok daha kolaylaşacaktır. Dünyanın önde gelen otomobil üreticilerinden Volkswagen tarafından geliştirilen ancak henüz test aşamasında olan MARTA (Mobile Augmented Reality Technical Assistance) adlı artırılmış gerçeklik sistemi [9], bir otomobilin bakımını yapmak isteyen kişiye adım adım nasıl ilerleyeceğini, hangi aletlerin nasıl monte edileceğini, bunun için hangi araç-gereçlerin kullanılmasını gerektiğini grafik ve görsel tabanlı olarak açıklamaktadır (Şekil 1).

İnşaat sektörü, bu gelişmiş teknolojiyi henüz yeterince kullanmayan sektörlerin başında gelmektedir. İnşaat sektöründe artırılmış gerçeklik teknolojilerinden faydalanılarak şantiyelerdeki personelin kullanabileceği akıllı cihazlarla başarılı uygulamalar ortaya çıkarmak, inşaat projelerinde yeni bir dönemin başlangıcı olacaktır [10].



Şekil 1. Otomotiv endüstrisinde artırılmış gerçeklik uygulaması (Augmented reality application in automotive industry)

2. İNŞAAT PROJELERİNDE ARTIRILMIŞ GERÇEKLIK UYGULAMALARI (AUGMENTED REALITY APPLICATIONS IN CONSTRUCTION PROJECTS)

İnşaat sektöründe artırılmış gerçekliğin kullanımı konusunda yapılan çalışmalar son yıllarda artış göstermektedir [11]. Bu teknolojinin inşaat sektörü uygulamalarında gün geçtikçe daha fazla kullanılması sektöre önemli avantajlar sağlamaktadır. Örneğin, artırılmış gerçeklik ile bir yapının inşa edilmeden önce kendini çevreleyen koşullar ile nasıl uyum sağlayabileceğini öngörebilmek mümkündür (Şekil 2).

Wang ve Dunston [3] işe yeni başlayan bir inşaat ekipmanı operatörünün gerçek şartlarda şantiyede bir eğitim almasının, bahsi geçen eğitimin maliyetli olması, lojistik güçlüğü, tehlikesi ve de kontrolünün çok zor olması gerekçesi ile pratik olmadığını vurgulamaktadır.

Geliştirdikleri artırılmış gerçeklik modeli ARTS (Augmented Reality-based Real World Training System) ile gerçek saha eğitimi yerine operatörün, gerçek bir inşaat ekipmanı ile sanal malzeme ve sanal hedeflerle donatılmış gerçek bir şantiye ortamında eğitilmesi hedeflenmiştir. ARTS ile eğitim alan operatör, sanal nesnelere ile görsel, işitsel ve dokunsal zenginleştirmelerle, gerçeğe yakın bir varlık hissiyatı ve etkileşimi hissetmektedir.



Şekil 2. Bir inşaat projesi için artırılmış gerçeklik uygulaması (Augmented reality application for a construction project)

Şantiyelerdeki kazı işlerinde, mevcut altyapı tesislerinin zarar görmesi oldukça sık karşılaşılan bir durumdur. Bu tür olumsuzlukları engellemek için Behzadan ve Kamat [12], artırılmış gerçeklik ile küresel konumlandırma sistemini (Global Positioning System-GPS) bütünleştirerek, altyapı tesislerinin CAD (Computer-Aided Design) modelleri ile gerçek görüntülerin canlı videosunu birleştirmiştir. Böylece ekipman operatörü gerçek kazı şantiyesinde, altyapı tesislerinin sanal görüntülerini gerçek zamanlı görüntüleyerek kazının altyapı tesislerine zarar verilmemesini sağlamaktadır. Zhao ve ark. [13] artırılmış gerçeklik teknolojisini inşaat işlerindeki elektrik kazalarını önlemek için kullanmışlardır. Hazırladıkları yapay senaryolar içinde elektrik kazalarına öncelik vererek işçilerin elektrikle ilgili kazalara karşı eğitimini amaçlamışlardır.

Chen ve ark. [14] artırılmış gerçeklik teknolojisini kullanarak SAVES (Safety for Augmented Virtuality Environment System) adlı bir program tasarlamıştır. Şantiye sahasının yapı bilgi modellemesi (Building Information Modeling-BIM) hazırlanarak çeşitli eğitim senaryoları ile işçilerin iş güvenliği bilinci artırılmaya çalışılmıştır. Tsai [15], MERIS (Mobile Emergency Response Information System) adlı bir sistem geliştirmiştir. Bu sistem açık havada çalışan işçilerin tehlikeli bir durumla veya iş kazası ile karşı karşıya

kaldıklarında cep telefonları ile yardım istemelerini içermektedir. Kaza anında sistem, işçinin yerini belirleyebilmekte ve yöneticilere artırılmış gerçeklik teknolojisini kullanarak aktarabilmektedir.

Artırılmış gerçeklik teknolojisi ile eğitim materyalleri oluşturulmasına yönelik bir çalışma Behzadan ve Kamat [16] tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar bu çalışmalarında inşaat mühendisliği öğrencilerini hedef kitle olarak seçmişler ve artırılmış gerçeklik teknolojisi ile şantiye aktivitelerini öğrencilere aktarmaya çalışmışlardır. Hammad ve ark. [17], altyapı projelerinde çalışan ve yapısal elemanların yerlerini kontrol eden şantiye mühendisleri ve teknisyenleri için MARSIFT'i (Mobile Augmented Reality System for Infrastructure Field Tasks) geliştirmişlerdir. MARSIFT, otomatik olarak alınan bilgilerle, kullanıcının çevresindeki yol, köprü ve tünel gibi gerçek dünya nesnelerin görüntülerini zenginleştirmektedir. Kim ve ark. [18], artırılmış gerçeklik teknolojisini kullanarak yapı makinelerinin şantiyelerdeki olası optimum senaryolarının modellemesini yapmışlar ve bu modellerin inşaat planlama sürecinde potansiyel iyileştirmeler sağlayabileceğini öngörmüşlerdir. Yapı makinelerinin şantiyelerdeki verimliliğini artırmak amacıyla taşıyan bir diğer çalışma, Lee ve Akın [19] tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, artırılmış gerçeklik teknolojisini kullanarak geliştirdikleri AROMA-FF (Augmented Reality-based Operation and Maintenance Fieldwork Facilitator) modeli ile yapı makinelerinin saha performanslarını artırmayı hedeflemişlerdir.

Shin ve Dunston [20,21], çelik kolonların analizlerinde kullanılmak üzere artırılmış gerçeklik teknolojisini adapte ettikleri ARCam adlı bir prototip model geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, artırılmış gerçeklik teknolojisi ile bu tip analizlerde daha efektif sonuçlar elde edildiğini göstermişlerdir. Park ve Kim [22], artırılmış gerçeklik, konum izleme, yapı bilgi modellemesi ve oyun teknolojilerini entegre ederek bir güvenlik yönetimi ve görselleştirme sistemi (Safety Management and Visualization System- SMVS) geliştirmişlerdir. Çalışmalarında artırılmış gerçeklik teknolojisini akıllı telefonlar ve tablet bilgisayarlar ile birlikte gerçek zamanlı ve konum bazlı iş güvenliği yönetiminde kullanmışlardır.

Shin ve ark. [23], artırılmış gerçeklik teknolojisini binaların modellemesinde kullanmışlar ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin 3 boyutlu modellemelere göre sağladığı avantajları belirlemişlerdir. Benzer bir modelleme Yang ve ark. [24] tarafından gerçekleştirilmiş ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin avantajları ortaya konmuştur.

Artırılmış gerçeklik teknolojisinin yapı bilgi modellemesi ile entegre edildiği bir diğer model de Wang ve ark. [25] tarafından ortaya konmuştur. Bu modelde artırılmış gerçeklik teknolojisinin şantiyelerde gerçek zamanlı iletişimin nasıl gerçekleştirilebileceği üzerine odaklanılmıştır. Irizarry ve ark. [26], yapı bilgilerine ulaşmada artırılmış gerçeklik teknolojisini kullanmışlar

ve bu teknolojinin yapım uygulamalarını geliştirme potansiyelinin bulunduğunu öngörmüşlerdir.

Artırılmış gerçeklik teknolojisinin sanal şantiye ortamlarının planlanmasındaki kullanımı ise Wang [27] tarafından ortaya konmuştur. Araştırmacı, artırılmış gerçeklik teknolojisi ile planlama hatalarının engellenebileceğini ve bu süreçte verimliliğin artacağını öngörmüştür.

Kwon ve ark. [28] tarafından tasarlanan DM-AR (Mobile-Based Augmented Reality Defect Management) sistemi, inşaat projelerinde kalite kontrolüne yönelik gerçekleştirilen en güncel çalışmalardan biridir. Araştırmacılar, yapı bilgi modellemesi, görüntü işleme ve artırılmış gerçeklik teknolojilerini birlikte kullanarak kalite yönetimine yönelik bir sistem geliştirmişlerdir. Bu sistem ile şantiye imalatlarının boyutsal hataları yapım aşamasında kontrol edilmektedir.

Chi ve ark. [10], inşaat sektöründe artırılmış gerçeklik teknolojisinin gelecekteki potansiyel uygulama alanlarını araştırmıştır. Araştırma sonuçlarına göre mobil cihazların kullanımının gelecekte daha etkili ve ucuz olacağı öngörülerek artırılmış gerçeklik teknolojisinin bu cihazlardaki uygulamalarının artacağı belirtilmiştir. Wang'a [27] göre, bu uygulama alanlarından biri de artırılmış gerçeklik teknolojisinin inşaat projelerinin kalite kontrol yönetimindeki potansiyel kullanım alanlarından oluşmaktadır.

Wang ve ark. [29], inşaat sektöründe artırılmış gerçeklik ile ilgili 2005-2011 yılları arasında uluslararası dergilerde yayımlanan makaleleri incelemiştir. Araştırmacılar, artırılmış gerçeklik teknolojisi ile ilgili yapılan çalışmaların çoğunluğunun laboratuvar tabanlı olduğunu ve inşaat projelerindeki uygulama çalışmalarının henüz yetersiz olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak inşaat projelerinin artırılmış gerçeklik teknolojisi alanında laboratuvar tabanlı araştırmalardan ziyade gerçek projelerde uygulanabilecek araştırmalara ihtiyacı olduğunu ifade etmiştir.

Yukarıda açıklanan araştırmalar, artırılmış gerçeklik teknolojisinin inşaat sektöründe geliştirilmesi açısından özellikle son beş yılda yapılan önemli çalışmalardır. Ancak artırılmış gerçeklik teknolojisinin inşaat sektörü dışındaki (eğitim, sağlık, oyun, askeri, film vb.) sektörlerdeki kullanımı ve bahsedilen sektörlerle katkıları ile ilgili çok sayıda araştırma olmasına karşın, bu teknolojinin inşaat sektöründeki uygulamaları ile ilgili çalışmalar günümüzde nispeten sınırlıdır. Literatür çalışmasından da anlaşılacağı üzere inşaat sektörünün özellikle şantiyelerde artırılmış gerçeklik teknolojisinin uygulanabileceği ve eğitim amaçlı modellere gereksinimi vardır [29]. Dolayısıyla bu çalışmada geliştirilen artırılmış gerçeklik sisteminin inşaat projelerinde uygulanma potansiyeli dikkate alındığında sektöre önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

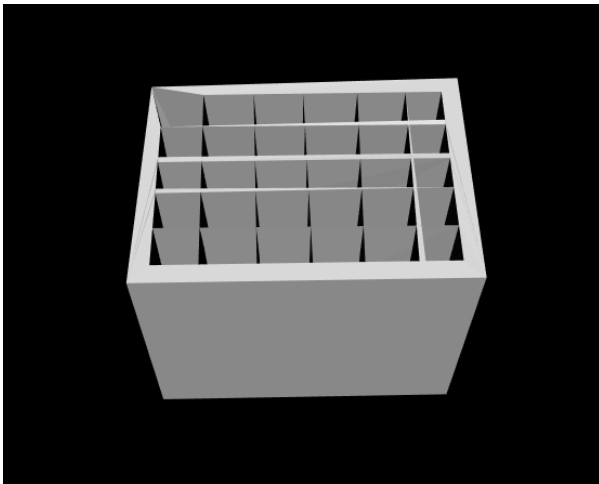
3. İNŞAAT PROJE İMALATLARINDA ARTIRILMIŞ GERÇEKLİK TEKNOLOJİSİNİN UYGULANMASI (APPLICATION OF AUGMENTED REALITY IN CONSTRUCTION PROJECT ACTIVITIES)

Bu çalışmanın amacı; artırılmış gerçeklik teknolojisini kullanarak inşaat projelerinde çalışan işçi, ekipman operatörü, mühendis ve yöneticilerini yapımı veya kontrolü için görevlendirildikleri imalat işini baştan sona aşamalar halinde bilgilendiren bir sistem geliştirmektir. Böylece inşaat imalatı ile ilgili tüm aşamaların daha verimli, güvenli ve kaliteli icra veya kontrol edilmesine olanak sağlanacaktır. Akıllı gözlükler kullanılarak oluşturulan sistem ile hatalı imalat riski en aza indirgenmekle birlikte imalatlardaki istenen kalite sağlanmış olacaktır. Örneğin bir inşaat işçisi inşaat demirini nasıl bağlayabileceğini, tuğla duvar yapımında su terazisini nasıl kullanması gerektiğini bu sistem vasıtası ile şantiyede anında akıllı gözlükten izleyerek öğrenebilecek ve uygulamalarını standartlara uygun bir biçimde gerçekleştirebilecektir.

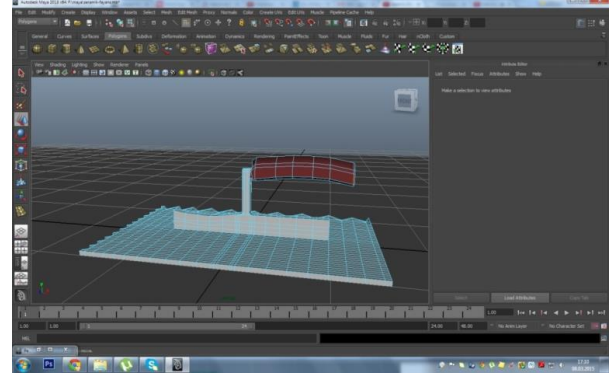
3.1. Sistemin Geliştirilmesi (Development of the System)

Bu çalışmada şantiyelerde en sık kullanılan uygulamalardan biri olan tuğla duvar yapımı örnek imalat kalemi olarak seçilmiştir. Tuğla duvar yapım yöntemlerinin hazırlanmasında standartlara uygunluk açısından Milli Eğitim Bakanlığı'nın Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi kapsamında ve İNTES'in (İnşaat Sanayicileri İşveren Sendikası) mesleki yeterlikleri kazandırmaya yönelik geliştirdikleri öğretim materyallerinden faydalanılmıştır [30,31].

Çalışmanın ilk aşamasında tuğla duvar imalatında kullanılan materyallerin 3 boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Modeller, imalatın standartlara uygun olarak yapım aşamasının başlangıcından bitimine kadar tüm aşamaları gösterecek şekilde 3ds Max ve Maya programları kullanılarak tasarlanmıştır (Şekil 3,4).



Şekil 3. Tuğla modeli (Brick model)



Şekil 4. Model hazırlamada kullanılan yazılım örneği (Example of the software in preparing models)

Çalışmanın ikinci aşamasında artırılmış gerçeklik sistemi geliştirilmiştir. Mobil ekipmanların güçlendirdiği artırılmış gerçeklik uygulamaları algoritma ve yazılım kodları ile geliştirilmektedir. Bu çalışmada artırılmış gerçeklik sisteminin geliştirilmesinde artırılmış gerçeklik platform yazılımı, modelleremlere gerçeklik vermek için Unity programı, yazılım geliştirmede Xcode ve Android SDK programları, artırılmış gerçeklik kamera Vuforia SDK, ve mobil cihaz olarak seçilen akıllı gözlüğün Android 4.04 işletim sistemine uyumlu olabilmesi için Android Studio ve C++ yazılım dilleri kullanılmıştır.

Çalışmada artırılmış gerçeklik sisteminde hazırlanan inşaat imalat uygulamasının aşamaları belirlenmiştir. Her aşama için uygulama alanı oluşturulup aşamalar arası geçişler için ileri ve geri geçiş butonları hazırlanmıştır. İlk aşamada planlanan uygulamaların birbir modellerinin 3 boyutlu modelleri hazırlanmış ve artırılmış gerçeklik mobil platformu geliştirilmiştir. Hazırlanan 3 boyutlu modeller artırılmış gerçeklik geliştirme programına aktarılmıştır. Artırılmış gerçeklik sistemi, aşağıda belirtilen yöntemler kullanılarak tasarlanmıştır.

- Görüntü İzleme

Görüntü izleme yönteminde önceden sayısal olarak taranmış olan alan kullanılmıştır. Taranmış alan artırılmış gerçeklik platform yazılımına kaydedilmiştir. Modellemeler yerleştirilmiş ve görüntü tarama alanı veritabanına kaydedilerek Android Studio yazılım dilinde Android sistemine uyumlu olarak apk formatında hazırlanmış ve akıllı gözlüğe aktararak kurulumu gerçekleştirilmiştir.

- Genişletilmiş İzleme

Genişletilmiş izleme yönteminde belirli bir alan yerine geniş alan taraması yapılarak artırılmış gerçeklik yazılım platformuna aktarılmıştır. Görüntü izleme yönteminde olduğu gibi akıllı gözlüğe aktararak kurulumu gerçekleştirilmiştir.

- Nesne İzleme

Nesne izleme yönteminde resmi çekilmiş olan bir nesne, veritabanına kaydedilmiş ve QR (Quick Response) kodu artırılmış gerçeklik platform yazılımına aktarılmıştır. Bu yöntem hareketsiz nesnelere için uygulanmıştır. Aktarılan

nesnenin üzerine 3 boyutlu modeller yerleştirilmiş ve Android Studio yazılım dilinde Android sistemine uyumlu olarak apk formatında hazırlanıp akıllı gözlüğe aktarılmıştır. Akıllı gözlük ile modellenen nesneye bakıldığında imalat işinin gerektirdiği aşamalar izlenebilmektedir.

- Yüz İzleme

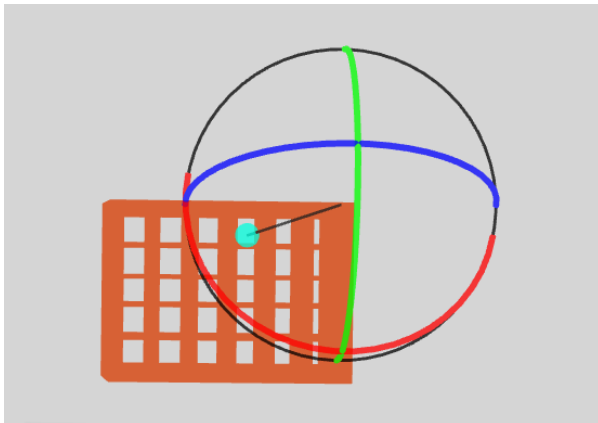
Yüz izleme yönteminde artırılmış gerçeklik platformunda yüz modeli üzerine 3 boyutlu modeller yerleştirilmiş ve kişinin yüzüne gelecek şekilde ayarlanmıştır. C++ yazılımı kullanılarak yazılım kodları hazırlanmıştır. Artırılmış gerçeklik modeli, önceki yöntemlerde olduğu gibi akıllı gözlüğe aktarılmıştır.

- Marker İzleme

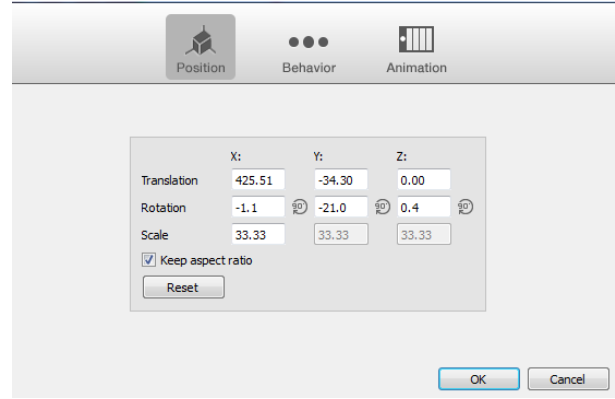
Marker izleme yönteminde her bir artırılmış gerçeklik modeli için özel olarak marker hazırlanmıştır. Veritabanına kaydedilen marker, artırılmış gerçeklik platformuna aktarılmıştır. Marker izlemeye alındığında üzerinde görülmesi istenen 3 boyutlu modeller eklenmiştir. Yazılım kodları kullanılarak diğer yöntemlerde olduğu gibi akıllı gözlüğe aktarılmıştır.

Artırılmış gerçeklik geliştirme programına aktarılan görüntü üzerine Maya programında hazırlanan 3 boyutlu görüntüler aktararak x,y,z koordinat düzenlemeleri yapılmış ve model eşleşmeleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Model eşleşmelerinin etkin sonuçlar vermesi açısından model için uzaklık ve yükseklik ile ilgili düzenlemeleri yapılmıştır (Şekil 6).

Model eşleşme işleminin ardından Android SDK mobil yazılımı ile hazırlanan uygulamaların entegre edilecek platforma göre kodlanması gereklidir. Android platformu için yazılım kodları hazırlandıktan sonra artırılmış gerçeklik geliştirme programı üzerinde seçilen platforma göre aktarım yapılır. Oluşturulan uygulama dosyası mobil cihaza aktarıldıktan sonra çalıştırıldığında 3 boyutlu model (saydam olarak) ekranda görülür. Artırılmış gerçeklik sisteminde eşleşme işlemi için gerçek modelin resmi ekranın önüne geldiğinde eşleşme gerçekleşmiş olur.



Şekil 5. Tuğla modelinin geliştirme programına aktarılması (Transferring the brick model into application program)



Şekil 6. Modelin uzaklık ve yükseklik düzenlemeleri (Distance and height arrangements of the model)

3.2. Sistemin Test Edilmesi (Testing of the System)

Sistem, artırılmış gerçeklik yazılımının akıllı gözlüğe adapte edilmesi ile tuğla duvar imalatı için test edilmiştir. Akıllı gözlük seçimi, çalışmanın etkili sonuçlar vermesi açısından önemli bir rol oynamıştır. Akıllı gözlükler, oldukça yeni bir teknoloji olmaları nedeniyle günümüzde sektör uygulamalarına adapte edilebilmesi için sürekli bir gelişme ve iyileştirme aşamasındadır. Bu çalışmanın amaç ve hedefleri doğrultusunda hızla gelişen bu teknolojinin çalışmaya en uygun, uygulamada kolaylık sağlayan ve yazılımları adapte etmede problem yaratmayacak en gelişmiş akıllı gözlük olarak Epson'un Moverio BT-200 modeli seçilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Epson Moverio BT-200 akıllı gözlük (Epson Moverio BT-200 smart glass)

Moverio BT-200, gözlük ve kontrol birimi olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Üzerinde dokunmatik bir panel bulunduran kontrol birimiyle ekranda imlecin hareket ettirilmesine imkan tanımaktadır. Android 4.0'la çalışan Moverio BT-200, böylece gözlerin önüne Android işletim sistemini ve uygulamalarını getirmektedir. Gözlüğün ön yüzünde bir kamera bulunmaktadır. Bu sayede fotoğraf ve video kaydı yapılabilmektedir [32]. Akıllı gözlüğe artırılmış gerçeklik yazılımı işletim sistemine yüklenerek kullanıcı konsolu yardımı ile çalışma kapsamında geliştirilen 3 boyutlu yazılım simülasyonlarını izleme ve gözlükteki hoparlör yardımı ile sesli olarak eğitim materyallerini dinleme imkanı sağlanmıştır. Akıllı gözlüğün ana ekranından bir görüntü Şekil 8'de verilmiştir.

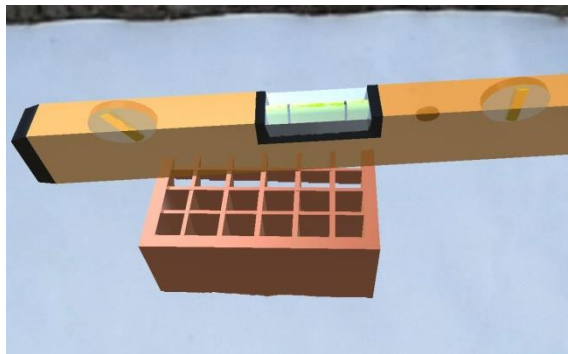


Şekil 8. Akıllı gözlük ana ekran görüntüsü (Smart glass main page view)

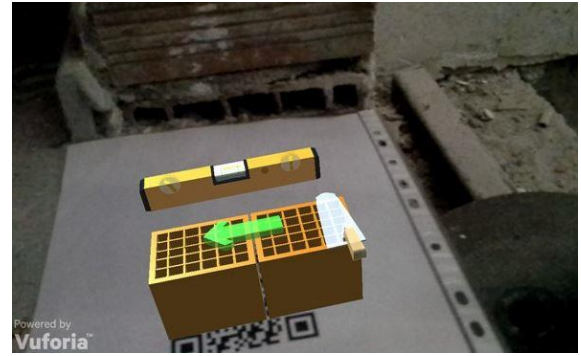
Tuğla gibi küçük boyutlu malzemelerde en etkili eşleşmeyi sağlayabilmek için akıllı gözlük-nesne mesafesi 2,5 m olarak kullanılmıştır. Bu mesafenin kullanılmasının ana nedeni, bu tip malzemelerde 10 m ve üzeri uzaklıklarda malzemeler yeterince görünmediği için eşleşmeler etkili olmamaktadır. Ancak kolon ve duvar gibi büyük boyutlu elemanların eşleşmesinde 10 m ve üzeri mesafelerin kullanımı daha uygun olmaktadır. Test aşamasında QR kod okuyucu aracılığı ile okutulan her kod veritabanında eşleştirilerek akıllı gözlük ekranına modellerin çağırılması ve render görüntüleri ile eşleşmesi sağlanmıştır. Tuğla duvar imalatı için gerçekleştirilen testlerde akıllı gözlükten alınan ekran görüntülerinden örnekler Şekil 9-11’de verilmiştir. Yazılım içinde geliştirilen kodlar aracılığı ile tuğla duvar imalatındaki aşamalar ileri-geri geçişler ile sağlanarak imalatın tüm



Şekil 9. Sistemin akıllı gözlük ile test edilmesi-I (Testing the system using smart glass-I)



Şekil 10. Sistemin akıllı gözlük ile test edilmesi-II (Testing the system using smart glass-II)



Şekil 11. Sistemin akıllı gözlük ile test edilmesi-III (Testing the system using smart glass-III)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Artırılmış gerçeklik, gelecekte birçok sektörün farklı alanlarında uygulanma potansiyeline sahip yenilikçi teknolojilerden biridir. Artırılmış gerçeklik teknolojisinin geliştirilmesine paralel olarak yakın gelecekte diğer sektörlerde olduğu gibi inşaat sektöründe de uygulamalarının yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla Türk inşaat firmalarının gelecekte rekabet avantajını kaybetmemesi adına bu teknolojiye olabildiğince hızlı adapte olması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada artırılmış gerçeklik teknolojisi kullanılarak inşaat proje imalatlarının yapımını baştan sona aşamalar halinde bilgilendiren bir sistem geliştirilmiştir. Sistemin şantiye çalışanları tarafından kullanılması ile şantiyede işe yeni başlayan personelin iş başında hızlı ve düşük maliyetli eğitimi mümkün olacak ve proje ile bütünleşmeleri hızlı bir şekilde gerçekleşecektir. Deneyimli çalışanlar ise doğru bildikleri yanlış imalatları düzeltme şansına sahip olacaklar ya da imatlarıdaki kritik aşamaları akıllı gözlüklerine yansıtılan detaylar vasıtasıyla iyileştirerek performanslarını artıracaktır. Sistem, Türk inşaat sektöründe artırılmış gerçeklik teknolojisi vasıtasıyla kaliteli, güvenli ve verimli bir yapım yönetimi sağlayarak inşaat projelerinin süre, maliyet ve kalite parametrelerini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Dolayısıyla, sistemin sektöre önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK (Proje No. 213M364) ve Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (Proje No. 1406F326) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gordon C., Akıncı B. and Garrett J.H., “Formalism for construction inspection planning: requirements and process concept”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 21(1): 29-38, (2007).
- [2] İnel M., Özmen H.B. and Akyol E., “Observations on the building damages after 19 May 2011 Simav (Turkey)

- earthquake”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11: 255–283, (2013).
- [3] Wang X. and Dunston P.S., “Design, strategies, and issues towards an augmented reality-based construction training platform”, *ITcon*, 12: 363-380, (2007).
- [4] Tanyer, A.M. and Pekerçli M.K., “İnşaat sektörü için bilgi teknolojilerindeki son gelişmeler”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 451, (2008).
- [5] Söylemez R., “Sanal gerçeklik nedir?”, <https://vrturkiye.net/>, (2015).
- [6] Ünal F.C., “Artırılmış gerçeklik teknolojisinin kullanımıyla mimarlık rehberi: Eindhoven kenti üzerinden değerlendirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [7] Bonsor K., “How will augmented reality work? How stuff works”, www.howstuffworks.com/augmented-reality.htm/, (2001).
- [8] Kuo C., Jeng T. and Yang I., “An invisible head marker tracking system for indoor mobile augmented reality”, *Automation in Construction*, 33: 104-115, (2013).
- [9] Volkswagen, “MARTA-Innovative Service Support Tool for the Volkswagen XL1”, <http://www.volkswagenag.com>, (2016).
- [10] Chi H.L., Kang S.C. and Wang X., “Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction”, *Automation in Construction*, 33: 116-122, (2013).
- [11] Agarwal S., “Review on application of augmented reality in civil engineering”, *International Conference on Inter Disciplinary Research in Engineering and Technology*, 68-71, (2016).
- [12] Behzadan A.H. and Kamat V.R., “Automated generation of operations level construction animations in outdoor augmented reality”, *Computing in Civil Engineering*, 23(6): 405-417, (2009).
- [13] Zhao D., Thabet W., McCoy A. and Klienr, B., “Managing electrocution hazards in the US construction industry using VR simulation and cloud technology”, *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, 759-764, (2012).
- [14] Chen A., Golparvar-Fard M. and Kleiner B., “Saves: A safety training augmented virtuality environment for construction hazard recognition and severity identification”, *Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, 30-31 Ekim, Londra, Birleşik Krallık, (2013).
- [15] Tsai M.K., “Streamlining information representation during construction accidents”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(7): 1945-1954, (2014).
- [16] Behzadan A.H. and Kamat V.R., “Enabling discovery-based learning in construction using telepresent augmented reality”, *Automation in Construction*, 33: 3-10, (2013).
- [17] Hammad A., Garrett J.H.Jr. and Karimi H.A., “Potential of mobile augmented reality for infrastructure field tasks”, *Proc., Applications of Advanced Technology in Transportation Conf. ASCE*, Cambridge, 456-472, (2002).
- [18] Kim B., Kim C. and Kim H., “Interactive modeler for construction equipment operation using augmented reality”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 26(3): 331-341, (2012).
- [19] Lee S. and Akın Ö., “Augmented reality-based computational fieldwork support for equipment operations and maintenance”, *Automation in Construction*, 20: 338-352, (2011).
- [20] Shin D.H. and Dunston P.S., “Identification of application areas for augmented reality in industrial construction based on technology suitability”, *Automation in Construction*, 17(7): 882-894, (2008).
- [21] Shin D.H. and Dunston P.S., “Technology development needs for advancing augmented reality-based inspection”, *Automation in Construction*, 19(2): 169-182, (2010).
- [22] Park C.S. and Kim H.J., “A framework for construction safety management and visualization system”, *Automation in Construction*, 33: 95-103, (2013).
- [23] Shin D.H., Park J., Woo S. and Jang W.S., “Representations for imagining the scene of non-existing buildings in an existing environment”, *Automation in Construction*, 33: 86-94, (2013).
- [24] Yang M.D., Chao C.F., Huang K.S., Lu L.Y. and Chen Y.P., “Image-based 3D scene reconstruction and exploration in augmented reality”, *Automation in Construction*, 33: 48-60, (2013).
- [25] Wang X., Love P.E.D., Kim M.J., Park C.S., Sing C.P. and Hou L., “A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality”, *Automation in Construction*, 34: 37-44, (2013).
- [26] Irizarry J., Gheisari M., Williams G. and Walker B.N., “Info SPOT: a mobile augmented reality methods for accessing building information through a situation awareness approach”, *Automation in Construction*, 33: 11-23, (2013).
- [27] Wang X., “Using augmented reality to plan virtual construction worksite”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 4(4): 501-512, (2007).
- [28] Kwon O.S., Park C.S. and Lim C.R., “A defect management system for reinforced concrete work utilizing BIM, image-matching and augmented reality”, *Automation in Construction*, 46: 74-81, (2014).
- [29] Wang X., Kim M.J., Love P.E.D. and Kang S.C., “Augmented reality in built environment: classification and implications for future research”, *Automation in Construction*, 32: 1-13, (2013).
- [30] MEGEP-Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, “İnşaat teknolojisi, duvar”, *Milli Eğitim Bakanlığı*, Ankara, (2007).
- [31] Milli Eğitim Bakanlığı, “Mesleki gelişim, iş güvenliği ve işçi sağlığı”, *Milli Eğitim Bakanlığı*, Ankara, (2014).
- [32] Epson, Moverio BT-200 Smart Glasses, <http://www.epson.com>, (2016)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

Kil minerallerinden alümina üretimi: güncel değerlendirmeler

Alumina production from clay minerals: current reviews

Yazar(lar) (Author(s)): Murat ERDEMOĞLU¹, Mustafa BİRİNCİ², Turan UYSAL³

ORCID¹: 0000-0003-2922-7965

ORCID²: 0000-0002-1954-7837

ORCID³: 0000-0003-1643-6725

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Erdemoğlu M., Birinci M. ve Uysal T., “Kil minerallerinden alümina üretimi: güncel değerlendirmeler”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 387-396, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.386907

Kil Minerallerinden Alümina Üretimi: Güncel Değerlendirmeler

Derleme Makalesi / Review Article

Murat ERDEMOĞLU, Mustafa BİRİNCİ, Turan UYSAL*

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 44280 Malatya, Türkiye
(Geliş/Received : 12.04.2017 ; Kabul/Accepted : 28.10.2017)

ÖZ

Günümüzde üstün fiziksel ve teknolojik özelliklerinden dolayı çok önemli bir malzeme olan alümina (Al_2O_3) endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve alümina üretiminin neredeyse tamamı hammadde kaynağı olarak boksitin kullanıldığı Bayer prosesi ile karşılanmaya devam etmektedir. Ancak yüksek üretim miktarlarına bağlı olarak Bayer prosesine beslenecek uygun kalitedeki boksit rezervlerinin hızla azalması, alümina üretim maliyetlerindeki artışlar, bazı ülkelerin boksit rezervlerinin sınırlı olması ya da hiç bulunmaması gibi teknik ve ekonomik gerekçelerden dolayı boksit dışı kaynaklardan alümina üretimi konusu hem bilimsel araştırma hem de endüstriyel uygulamalar açısından oldukça önem taşımaktadır. Doğada bol ve yaygın yaygın bir şekilde bulunmaları, nispeten yüksek alüminyum tenörüne sahip olmaları, madencilik yöntemleriyle üretimlerinin kolay ve ucuz olması, diğer kaynaklara göre daha basit hazırlama ve zenginleştirme işlemleri gerektirmeleri gibi nedenlerden dolayı kil mineralleri alümina üretimine en elverişli boksit dışı kaynak olarak görülmektedir.

Killerden alümina üretimi amacıyla geliştirilmiş ve genel kabul görmüş bazı süreçler bulunmaktadır. Bunlar arasında özellikle "Asit Liç Süreci" daha fazla ön plana çıktığı, bazı üsünlüklerinden dolayı alümina üretiminde daha etkin bir yöntem olarak uygulanabileceği konusunda bir fikir birliği olduğu görülmektedir. Bununla birlikte süreç koşulları ve süreç işlem kademeleri üzerinde birtakım değişikliklere gidildiği, bazı modifikasyonların denendiği güncel çalışmalara rastlanılmaktadır. Killerden alümina üretimi konusunda yapılmış olan çalışmaların ve güncel araştırma bulgularının derlenmesiyle hazırlanan bu çalışmanın amacı, başta alümina endüstrisi ve paydaşları olmak üzere ilgili araştırmacılara bilgi vermek, bu alanda yapılan bilimsel çalışmalara katkı sunmaktır.

Anahtar Kelimeler: Alümina, kil mineralleri, pirofillit, asidik liçing, mekanik aktivasyon.

Alumina Production from Clay Minerals: Current Reviews

ABSTRACT

Alumina (Al_2O_3), which is a very important material due to its superior physical and technological properties, is widely used in industry and almost all of alumina is obtained from Bayer process using bauxite as a raw material. However, some technical and economical handicaps of alumina production with Bayer process (such as limited or non availability of bauxite reserves in some countries, reduction of high grade bauxite deposits, growing alumina demand for industry etc.) require alternative raw material sources and methods to produce alumina. Therefore, investigations on the alumina production from non-bauxite sources is one of the current studies in related literature as well. Clay minerals are considered to be the best available source of non-bauxite raw material for alumina production. Because clay minerals are abundant and common in the earth crust, they have relatively high grade of aluminum, when compared to other sources, clay mining is easier and require simpler preparation and enrichment processes. There are various processes developed to produce alumina from clays, but among them "Acid Leaching Process" has become well-known method that could be practiced as a more effective method in alumina production due to some advantages. Moreover, it is seen that there is a consensus on Acid Leaching Process. Besides, there are current studies investigating several technical modifications and improvements on the process steps. The aim of this study prepared by reviewing the studies obtained from literature and current experimental results on production of alumina from clays is to give information particularly to alumina industry and stakeholders and related researchers, and to contribute to scientific studies on this topic.

Keywords: Alumina, clay minerals, pyrophyllite, acidic leaching, mechanical activation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum (Al) modern dünyanın en çok ihtiyaç duyduğu metallere arasındadır. Yeni gelişen teknolojilerin de katkısıyla kullanım çeşitliliği ve miktarı giderek artan alüminyumun önümüzdeki yüzyılda da önemini

koruyacağı tahmin edilmektedir. Bununla birlikte üstün teknik özellikleri sayesinde en az alüminyum kadar değerli olan alümina; aşındırıcılar, biyo-medikal malzemeler, boya, dolgu maddesi, katalizör, refrakter malzeme, saflaştırma sistemi, yalıtım malzemesi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Dünya toplam alümina üretimi 2005 yılında 64.667.000 ton iken 2015'de

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : turan.uyosal@inonu.edu.tr

yaklaşık iki kat artış göstererek 115.247.000 ton olarak gerçekleşmiştir [1].

Alümina ve alüminyum üretimi için yalnızca boksit cevherlerinin işlenmesine uygun bir yöntem olan Bayer prosesi çok uzun yıllardır başarıyla uygulanmaktadır. Bunun yanında, boksit kaynakları az olan, hiç olmayan ve/veya olup da Bayer prosesine uygun özelliklerde olmayan ülkelerde alümina ve alüminyum üretimi büyük ölçüde ithalatla karşılanmaktadır. Bayer prosesi sürecinde oluşan “kırmızı çamurun” depolanması zorunluluğu ve çevre için oluşturmuş olduğu potansiyel tehlikeler de, boksit dışı kaynak arayışlarının bir diğer önemli nedeni olmaktadır [2]. Dünya boksit rezervleri ile alüminyum üreticisi ülkeler karşılaştırıldığında oldukça ilginç bir istatistik sonuçları karşılaşıldığı görülmektedir. Buna göre alüminyum üretiminde önde gelen ülkelerin çoğu boksit rezervi bakımından son sıralarda yer almaktadır [3]. Boksit kaynakları yeterli olan ülkelerin bile, boksitten alüminyum üretiminde enerji maliyetlerini düşürmek [4], hatta boksit dışı kaynaklardan daha az enerji harcayarak alümina ve alüminyum üretimi arayışları içerisinde oldukları görülmektedir. Örneğin hiç boksit rezervi olmamasına rağmen Kanada, neredeyse tamamı ithal cevhere dayalı olarak alüminyum üretmektedir. Aynı zamanda 2004 yılında Laval Üniversitesinde (Quebec City, Kanada) geliştirilen asitlerle liç yöntemiyle, Kanada’da özel bir şirketin

alüminyum içeren killerden günde yaklaşık 1 ton yüksek saflıkta alümina üretimi yaptığı bilinmektedir [5].

Boksit dışı kaynaklar olarak yer kabuğunda hemen her coğrafyada sıkça rastlanabilen kömür şeylleri [6], alunit [7], nefelinli siyenit [8], kyanit, andalusit, sillimanit, ayrıca termik santral artığı uçucu külleri [9-12] ve özellikle kil yatakları dikkat çekmektedir. Söz konusu hammaddelerin özelliklerine bağlı olarak başlıca alümina üretim süreçleri; (1) Termal aktifleştirmeyi takiben asit çözeltileriyle liç ve (2) Kireç ya da soda-kireç karışımıyla sinterlemeyi takiben su veya alkali çözeltilisiyle liç yöntemlerinden birisi tercih edilmektedir. Çizelge 1’de bu yöntemlerin bir karşılaştırılması yapılmaktadır.

Alümina üretim süreçlerinden sinterleme süreci, toz halindeki malzeme ile kireç ve/veya soda, yüksek sıcaklıkta reaksiyona girerek çözünür kalsiyum alüminat ve çözünmeyen dikalsiyum silikat bileşiklerini oluşturur. Sinterlenmiş bu alümina bileşiklerini su veya alkali çözeltilerde (Na_2CO_3 and NaOH) liç edildikten sonra yüklü alüminyum çözeltilisi filtre edilir. Bu sırada aşırı miktarda kalsiyum silikat artıklar oluşur. Yüklü alüminyum çözeltilisinden yüksek saflıkta alümina elde etmek için saflaştırma işlemleri uygulanır ve alüminyum uygun bir bileşiği halinde kristallendirilir. Katı alüminyum bileşiğini alüminaya dönüştürmek üzere uygun sıcaklıkta kalsinasyon işlemi uygulanır [9].

Çizelge 1. Alümina üretimi için önerilen farklı süreçlerin karşılaştırılması [9] (Comparison of different processes proposed for alumina production)

	Süreç	Avantaj	Dezavantaj
Sinterleme Süreçleri	Kireç Sinter Süreci	Sinterleşmiş kütlelerin soğuması sırasında parçalanması öğütme ihtiyacını ortadan kaldırır. Kireç daha az maliyetlidir.	Çok aşırı miktarda kalsiyum silikat artıklar oluşur.
	Kireç-Soda Sinter Süreci	Kireç sinterleme yöntemine göre daha az artık oluşur.	Süreç karmaşıktır. Enerji maliyeti nispeten yüksektir.
	Ön desilikasyon ve kireç-soda sinter süreci	Eşzamanlı olarak silika ve katı artıkları çözümlenerek belirli seviyeye indirebilir.	Desilikasyon çözeltilisinin yıkanması ve filtrasyon işlemi.
	“Calsinter” Süreci	Kireç sinterleme işlemine göre kireç maliyeti daha azdır. Alüminyum ve diğer metaller seyreltik asitle çözümlenir.	Süreç karmaşıktır. Çözünür safsızlıkların bir kısmı yüklü çözeltiliye geçebilir.
Asit Liç Süreçleri	Doğrudan Asit Liç Süreci	Alüminyum ve diğer metalleri eş zamanlı çözer.	Aside dayanıklı ekipmanlar gerektirir. Asit kullanımı fazla, liç verimi düşüktür.
	Geliştirilmiş Asit Liç Süreci	Seyreltik asit ile liç verimliliği göreceli olarak yüksektir.	Enerji maliyeti nispeten yüksektir.
	Sinter-Asit Liç Karma Süreci	Seyreltik asit ile liç verimliliği göreceli olarak yüksektir.	Süreç karmaşıktır. Enerji maliyeti nispeten yüksektir.
	“Hiclor” Süreci	Asit ya da alkali kullanmadan alüminyum ve diğer metaller klorlamayla aynı anda kazanılır. Bayer Sürecine göre %70 daha az enerji gerektirir.	Enerji maliyeti nispeten yüksektir. Liç verimi düşüktür.

Şimdiye dek denenilen boksit dışı kaynaklardan alümina üretim yöntemlerin pek çoğunun, günümüz koşullarında ekonomik açıdan, Bayer Prosesi ile rekabet etmesinin oldukça zor olduğu bilinen bir gerçektir. Çünkü boksitin alümina içeriği %50 iken kil minerallerinin alümina içeriği yaklaşık %20-30 civarındadır. Dolayısıyla düşük tenörlü cevherlere kıyasla yüksek tenörlü cevherlerden alümina üretiminin teknik ve ekonomik açılarından avantaj sağlayacağı açıktır. Bunun yanısıra Bayer sürecinde elde edilen alüminyum hidroksitinin ($Al(OH)_3$) kalsinasyonu ve çöktürülmesi, asit liçi sonucu elde edilen alüminyum klorür hegzahidrata ($AlCl_3 \cdot 6H_2O$) göre daha kolay olmaktadır. Ayrıca asidik süreçlerin uygulandığı liç işleminde kullanılan asitler şiddetli korozyona neden olmaktadır. Oysa alkali liç işlemlerinde bu türden sorunlarla karşılaşılmamaktadır [13].

Boksit dışı kaynaklardan alümina üretimi konusundaki literatür çalışmaları incelendiğinde kil mineralleri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bunlar arasında seçilmiş bazı önemli çalışmalar kronolojik sırasıyla verilmiştir: Flint vd., 1946 [14], Cohen ve Mercier, 1976 [6], Bengtson, 1979 [15], Sawyer vd., 1983 [16], Al-Ajell ve Al-Sindy, 2006 [17], Bazin vd., 2007 [18], Al-Zahrani

pazarı genişleyecektir. Bunun yanında özellikle düşük kalitedeki pirofillit cevherlerinin katma değeri yüksek yeni bir ürüne dönüştürülmüş olmasıyla pirofillit çok daha kıymetli hammadde haline gelecektir. Kısaca, doğada bol bulunan ve madenciliği göreceli olarak daha ucuz olan kil minerallerinden öncelikli olarak “yüksek alüminalı”, olanları ile “safsızlık sorunu” olduğu için çimento ve seramik sektörlerinde kullanılamayan kil minerallerinin alümina üretimi için değerlendirilmesinin hem daha ekonomik hem de daha çevreci olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, alümina üretiminde potansiyel bir kaynak olarak görülen kil minerallerinden alümina üretimi konusunda yapılan çalışmalar çeşitli kaynaklardan derlenerek özetlenmiştir. Asit liçi yöntemiyle alümina üretim süreci ve süreç basamakları ayrıntılı olarak ele alınıp irdelenmeye çalışılmıştır. Ayrıca alümina üretiminde yeni bir kaynak olarak düşünülen pirofillit konusunda yapılan çalışmalardan elde edilen güncel araştırma bulguları alümina endüstrisinin dikkatini çekeceği ve bu konulardaki bilimsel çalışmalara önemli katkılar sunacağı düşünülmektedir.

Çizelge 2. Alümina üretiminde değerlendirilebilecek bazı kil minerallerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri [24] (Physical and chemical properties of some clay minerals that can be evaluated in alumina production)

Kil minerali	Mineralojik Formül	Mineralojik İçerik, %			Kristal Yapı	Mohs Sertliği
		Al_2O_3	SiO_2	H_2O		
Pirofillit	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$	28,3	66,7	5	Monoklinik	1-2
Kaolinit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	39,50	46,54	13,96	Triklinik	2-2,5
İllit	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	17,02	54,01	12,03	Monoklinik	1-2
Halloysit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	39,50	46,54	13,96	Monoklinik	1-2

ve Abdul Majid, 2009 [19], Tang vd., 2010 [20], Daniels, 2012 [21], Ohale vd., 2017 [22]. Diğerlerine göre çok daha yüksek oranda Al_2O_3 içeren kaolinitten ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) alümina üretimi konusunda oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Kaolinitten alümina üretiminde bu kadar çok çalışma yapılmasının bir sebebi de dünya kaolen rezervlerinin oldukça bol ve üretiminin kolay olmasıdır. Zira, dünyada 14 milyar ton kaolen rezervi olup, kağıt ve seramik sanayinin ihtiyacı için yılda 39 milyon ton kaolen üretimi yapılmaktadır [23]. Alümina kaynağı olarak değerlendirilebilecek killerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

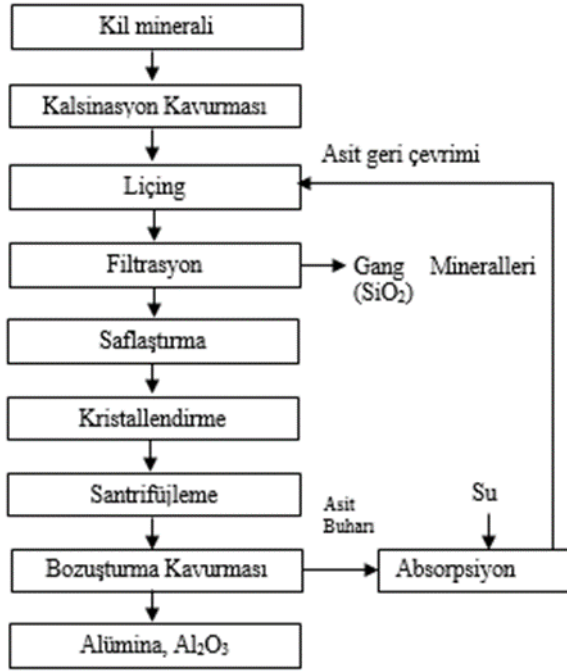
Pirofillitten ($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$) alümina üretimi konusu literatüre henüz yeni girmiş olup bu konuda güncel çalışmalar mevcuttur [25, 26, 27]. Dünyadaki pirofillit cevherleri seramik ve beyaz çimentoda kullanılabilecek kalitede olmakla birlikte bazı yataklardaki cevherler özellikle Fe_2O_3 içeriğinin yüksek olması nedeniyle kullanılamamaktadır. Ocaklarda sadece seramik için uygun seviyeler işletilmekte, diğer kısımlar pasa olarak kalmaktadır. Bu tür cevherlerin alümina üretiminde kullanılması durumunda pirofillit için yeni bir tüketim alanı doğmuş olacak ve bunun sonucu olarak da pirofillit

2. ASİTTE LİÇ YÖNTEMİYLE KİL MİNERALLERİNDEN ALÜMİNA ÜRETİMİ (ALUMINA PRODUCTION FROM CLAY MINERALS BY ACID LEACHING METHOD)

Killerden alümina üretim çalışmalarını boksit kaynakları bulunmayan ve/veya yeterli miktarda olmayan ülkelerin başlattıkları bilinmektedir. Hatta, boksit rezervi bulunmayan ülkelerde zaman zaman Bayer Prosesi ile alümina üretiminin yapılamaması tehlikesiyle karşılaşmıştır. Örneğin II. Dünya Savaşı yıllarında ortaya çıkan hammadde darboğazı nedeniyle İsveç ve SSCB’inde sırasıyla andalusit ve düşük kaliteli boksitlerden Pedersen Prosesiyle (kireçle ergitmeyi takiben su ya da alkali çözeltisinde liç) alümina üretimi yoluna gidilmiştir [28]. Aynı yıllarda Amerika Birleşik Devletleri de killerden alümina üretimi konusunda çalışmalara başlamış olup, 1960-1970 yılları arasında boksitik olmayan cevherlerden alümina üretmek için asit liçi ve alkali sinterleme yöntemleri üzerine ilk denemeler gerçekleştirmişlerdir [15, 29]. Bu çalışmalar sonucunda kil mineralleri için asit liçi yöntemi [14, 15, 16] pilot ölçekte deneme aşamasına gelirken alkali sinterleme yöntemi bazı teknik ve ekonomik zorluklarından dolayı laboratuvar safhasında kalmıştır. Ancak alkali sinterleme

yönteminin kömür uçucu külleri için uygun olduğu, bu yöntemle uçucu küllerden alümina üretiminin mümkün olduğu belirtilmektedir [9].

Kil minerallerinden alümina üretiminde araştırmacılar tarafından önerilen akım şeması Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Kil minerallerinden alümina üretimi için temel işlemler akış şeması [30] (Flow diagram of basic processes for alumina production from clay minerals)

Şekil 1’de başlıca dört işlem basamağı vardır. Bunlar; (1) Bir ön işlem uygulanarak (çoğunlukla kalsinasyon kavurması) cevherdeki özellikle kil mineralleri aktifleştirilir, (2) Kalsine edilmiş cevher uygun bir asitle liç yapılır, (3) Liç işlemiyle elde edilen alüminyumlu çözeltilerden alüminyum tuzu çöktürülür, (4) Çöktürmeyle elde edilen alüminyum tuzu kavurma işlemiyle alüminaya dönüştürülür. Bu temel işlem aşamalarının her biri aşağıda ayrı bir başlık altında ele alınıp ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

2.1. Liç Öncesi Aktifleştirme Yöntemleri (Activation Methods Prior to Leaching)

Kil minerallerinden alümina üretimi amacıyla, liç işleminde alüminyumun çözünme verimini ve hızını artırmak üzere uygulanan başlıca yöntem kalsinasyon kavurmasıdır (termal aktivasyon). Ancak cevherdeki alüminyum silikat minerallerinin aşırı öğütme (mekanik aktivasyon) yoluyla da aktifleştirilebileceği konusunda çalışmalarda mevcuttur [25, 26].

Kalsinasyon kavurması yoluyla meydana gelen termal aktivasyon işlemi özellikle bileşiminde karbonat (CaCO_3 , MgCO_3 gibi) ve kristal suyu bulunan ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) belirli cevherler için uygulanabilmektedir. Oysa yüksek enerji yoğunluklu değirmenlerin kullanıldığı aşırı öğütme yoluyla meydana

gelen mekanik aktivasyon işlemi, cevherler için çok daha geniş bir uygulama alanına sahiptir.

2.1.1. Termal aktivasyon (Thermal activation)

Kil minerallerinin termal aktivasyonu, kalsinasyon kavurması yoluyla gerçekleştirilmektedir. Bu yolla, alüminyum silikat minerallerinin kristal yapısı bozularak, asit ile tepkimeye daha elverişli ya yeni bir mineral yapı ya da amorf bir yapı ortaya çıkması hedeflenmektedir.

Kalsinasyon kavurması sırasında silikatlı mineral yapısındaki kristal suyu, buhar fazında uzaklaşırken (dehidroksilasyon), gözenekli, yüksek özgül yüzey alanına sahip, XRD analizi deseninde amorf olarak görünen ve seyreltik asitlerde çözünebilir -yani aktifleşmiş- bir katı elde edilir [30]. Bu durumda aktivasyonu sağlayan başlıca mekanizma dehidroksilasyon olmaktadır. Isıl işlem görmüş silikatlar seyreltik asitlerle liç edildiğinde, metalik içerikleri çözeltilere geçer ve geride silis (SiO_2) bir mineral iskelet kalır. Bununla birlikte, derişik asit kullanıldığında silis jelleşir ve süzme sorunlarına yol açar. Kavurma sıcaklığının dehidroksilasyon sıcaklığından bir miktar yüksek olması durumunda, amorflaşmış ve böylece aktifleşmiş olan mineral yüksek sıcaklığın etkisiyle yeniden kristallenerek liç işlemine yanıt veremez duruma gelir. Çizelge 3’de kaolinitin kalsinasyon ve liçing sırasındaki çözünme reaksiyonları verilmiştir.

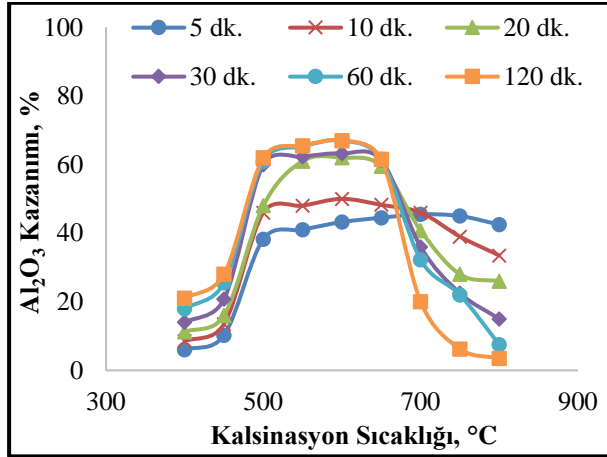
Çizelge 3. Kaolinitin farklı süreçlerdeki reaksiyonları (Reactions of kaolinite at different processes)

Süreç	Reaksiyonlar
Kalsinasyon kavurması	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{Kaolinit}) \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2(\text{Metakaolin}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g})$
Asit Liçi	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 6\text{H}^+(\text{sulu}) \rightarrow 2\text{Al}^{3+}(\text{sulu}) + 2\text{SiO}_2(\text{kati}) + 3\text{H}_2\text{O}$

Kaolinit, 400-800 °C sıcaklık aralığında kavrulduğunda metakaoline dönüşür. Metakaolin amorf yapıdır ve alüminyum seçimli olarak sulu çözeltilere geçirmek üzere seyreltik asitlerle kolaylıkla tepkimeye girer. Ancak, 900-1050 °C sıcaklığa ulaşıldığında amorf metakaolin yeniden kristalleşir ve artık asitte çözünmez hale gelir.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, Al-Ajeel ve Al-Sindy [17], kaolinitik killerin farklı sıcaklıklarda 30 ve 45 dakika kalsine edilmesi sonucunda, kalsinasyon sıcaklığı 720 °C’ye ulaşıncaya kadar alümina kazanımının arttığını, bu sıcaklıktan sonra ise azaldığını belirlemişlerdir. Benzer şekilde, Abdul-Majid [19], Suudi Arabistan’da yaygın olarak bulunan kaolinitik kilin 400-800 °C sıcaklıklarda kalsinasyonundan sonra HCl ile liç yapmışlardır. Buna göre 700 °C sıcaklıkta kalsine edilmiş kilden alümina kazanımı %32 iken, 600 °C sıcaklıkta kalsine edilmiş kilden alümina kazanımı yaklaşık %63’tür. Kazanılan alümina miktarı 600 °C kalsinasyon sıcaklığına kadar arttığı, 600 °C’den yüksek

sıcaklıklarda ise azaldığı gözlenmiştir. En yüksek alümina kazanımı ise; 600 °C'de 1 saat kalsine edilen kilden elde edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Kalsinasyonun sıcaklığı ve süresinin, alümina kazanımına etkisi [19] (Effects of calcination temperature and time on alumina recovery)

Bazin vd., [18] illit/klorit tipi kil minerallerinden alümina kazanımı üzerine kalsinasyonun etkisini çalışmışlardır. Buna göre kalsinasyon yapılmadan kazanılabilen alümina miktarı en fazla %74,7 iken, kalsinasyon kavurması sonucu bu oran %84,9 olarak bulunmuştur.

Ajemba ve Onukwuli [31], “yüzey yanıt yöntemi” ile killerden sülfürik asit liçiyile alümina kazanımında asit derişimi ve kalsinasyon sıcaklığının en önemli faktörler olduğunu belirtmişlerdir. Alümina kazanım yüzdesinin kalsinasyon sıcaklığı, liç sıcaklığı, asit derişimi ve karıştırma hızıyla doğru orantılı, ancak katı/çözeltili oranıyla ters orantılı olduğu bulunmuştur. Numluk ve Chaisena [32], %22,7 Al₂O₃ içeren killerden 750 °C sıcaklıkta kalsine edildikten sonra 3 M sülfürik asit çözeltisinde 100 °C sıcaklıkta 2 saat liç işlemi sonucunda alümina kazanımının %95,1 olduğunu rapor etmişlerdir. Birinci vd. [27], başlıca pirofillit içeren Pütürge (Malatya) kaynaklı kil cevherlerinden alüminyumun asit liçi yoluyla çözeltiye alınmasında kalsinasyon kavurmasının etkisini incelemişlerdir. Kalsinasyon kavurması yapılmadan pirofillit cevherinden kazanılabilen alümina miktarı en fazla %12,5 iken, 800 °C'de termal aktivasyon uygulanan örneklerde bu oran %35,6 olmuştur.

Özetle yapılan bu çalışmalar, asit liç sürecine beslenecek killerin çözünme verimini artırmak için mutlaka bir ön aktivasyon işleminden geçirilmeleri gerektiğini, bunun için de kalsinasyonla meydana gelen termal aktivasyonun etkili olması nedeniyle tercih edildiği belirtilmektedir.

2.1.2. Mekanik aktivasyon (Mechanical activation)

Minerallerin, verilen enerjinin çoğunun, öğütme ortamına değil de minerale aktarıldığı yeni nesil “enerji verimi yüksek” değirmenlerde öğütülmesi, onların mekanik olarak aktifleştirilmesine sebep olmaktadır. Bu

işleme, yaygın olarak, “mekanik aktivasyon” denilmektedir.

Minerallerin mekanik aktivasyonu, liçing sırasında seçimli çözünme veriminin ve çözücünün etkinliğinin artmasını sağlayarak tepkime hızında artışa yol açmaktadır [33]. Bu artış, özgül yüzey alanında, yapısal düzensizlikte ve mikrogerilimlerde artışın [34], mineral kristallerinin amorflaşmasının [35], mikrotopografik değişimlerin [36], çözünmeye daha yatkın yeni fazların oluşmasının [37] ve ısı olarak indirgenmeye yatkınlığın [38] bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Mekanik aktivasyon durumunda mineral, elden geçirileceği kalsinasyon kavurması [39, 40] veya liçing [41] gibi bir metalürjik süreç sırasında artık daha aktif olarak davranır ve bu durum sürecin sıcaklığını düşürür ya da hızını artırır. Ayrıca, mekanik aktivasyonun uygulandığı tesislerde, tepkimelerin artık daha kısa sürelerde gerçekleştiği, daha basit ve daha ucuz reaktörler ya da fırınlar kullanıldığı bilinmektedir. Mevcut tesiste yapılan tek değişiklik, reaktör ya da fırından önce bir yoğun-enerji aktarmalı değirmen yerleştirilmesinden ibarettir.

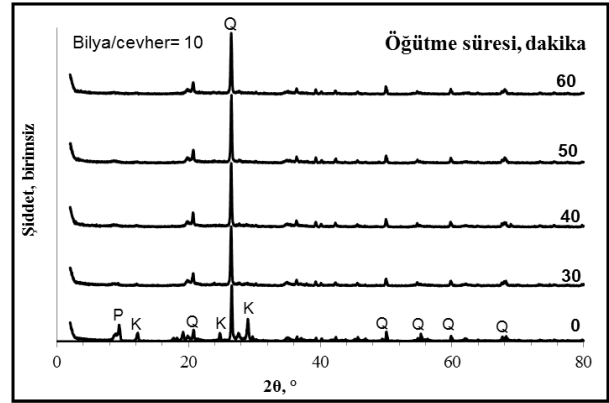
Mekanik aktivasyonla sağlanan minerallerin çözünme yeteneğindeki bu artış, süreç kademelerinin sayısında azalma (kalsinasyona gerek kalmaması), klasik yöntemlerle elde edilmesi zor bir ürünün elde edilmesini sağlama (pirofillit cevherinden alümina üretimi), daha düşük maliyetli kimyasal çözücülerin kullanılması (HNO₃ yerine HCl kullanımı) gibi çok önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca kalsinasyon ve kavurma gibi ısı işlem gerektiren süreçlerde oluşan ve doğal çevre için güncel bir sorun olmaya devam eden CO₂, SO₂ gibi zararlı gazlar problemi mekanik aktivasyon işleminde yaşanmamaktadır. Bu bakımdan cevherlerin mekanik yolla aktive edilmeleri ekolojik açıdan da önemli yarar sağlamaktadır.

Mekanik aktivasyon için kullanılan donanımlar değirmenlerdir. Ancak, geleneksel aktarılan ortam değirmenleri, sağlanan enerjinin çoğunluğunun değirmen gövdesini ve öğütme ortamını döndürmek üzere tükettiğinden mekanik aktivasyon için elverişli değildirler [42]. Mekanik aktivasyon amacıyla, farklı ve değişik çalışma rejimlerine (sıkıştırma, çarpma, kesme) sahip gezegensel değirmen, ekzantrik titreşimli değirmen ve karıştırmalı ortam değirmeni gibi enerji verimi yüksek değirmenler kullanılmaktadır.

Liç işlemi için ön hazırlık olan mekanik aktivasyonun esas amacı mineraldeki suyu uzaklaştırmak değil, sadece alümina silikat kristal kafes özelliklerinin bozularak kafes bağlarının zayıflatılmasıdır. Tamamıyla dehidroksilasyona yol açamayan aşırı öğütme sırasında kil mineralinin kristal yapısında X-ışınları difraktometresiyle kolaylıkla saptanabilen belirgin bir bozulma ve amorflaşma meydana gelir. Aşırı öğütme işleminden beklenen sonuç, genelde kimyasal yapısı değil fakat fiziksel yapısı bozulmuş kil mineralinin seyreltik asit çözeltilerinde yüksek verimle liç edilebilmesidir.

Literatürde, aşırı öğütmenin minerallerin özellikleri üzerine etkilerinin incelendiği sayısız çalışma bulunmaktadır. Bunların içerisinde, kaolinit, talk ve pirofillitin aşırı öğütülmesiyle ortaya çıkan sonuçların tartışıldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, Pérez-Rodríguez vd., [43] pirofillitin uzun süreler kuru öğütülmesiyle yapısındaki değişimleri incelemiştir. Öğütmenin ilk aşamalarında, delaminasyon, tabakaların bükülmesi ve kayması, ve tane boyunda aşırı küçülme, ve böylece yüzey alanında yaklaşık 60 m²/g'a kadar artışın meydana geldiği ortaya çıkarılmıştır. Çok uzun süre öğütmeye bağlı olarak aglomeratların oluştuğu ve bunun sonucunda yüzey alanında azalma olduğu bulunmuştur. Uysal vd., [44] tarafından yapılan bir çalışmada ise, pirofillit cevherinin çeşitli sürelerde aşırı öğütülmesi sonucunda; cevherdeki pirofillit, kaolinit ve dikit gibi minerallerin XRD pik şiddetlerinde kısa sürede kısımlar meydana geldiği görülmüştür. Tamamıyla amorflaşmanın meydana geldiği sürelerde öğütülen pirofillitin dehidroksilasyon başlangıç sıcaklığının 550-600 °C'den 450-500 °C aralığına düştüğü belirlenmiştir.

Literatürde, aşırı öğütmenin pirofillitin çözünme verimi üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar da bulunmaktadır. Tang vd., [20] mekanik aktivasyonun kaolin artışı bir cevher üzerindeki etkilerini incelemiştir. Mekanik aktivasyon sonucu iğne şekilli kristallerin küreselleştiği, tane boyunun küçüldüğü, 4 saat öğütme sonunda ham cevherin XRD kırınımalarının gözden kaybolduğu gözlemlenmiştir. Mekanik aktivasyonun kaolin artışının reaktifliğini artırdığı, liç sıcaklığı ve liç süresini düşürerek liç kinetiğini etkilediği yorumları yapılmıştır. Temuujin vd., [46] pirofillitten poroz silika üretmek amacıyla mekanik aktivasyonu takiben asitlerle liçi hakkında bir çalışma gerçekleştirmiştir. Pirofillit, gezegensel bir değirmende çeşitli koşullarda öğütülmüş ve 3 saatlik öğütmeye dehidroksilasyon sıcaklığının 550 °C'den 490 °C'ye düştüğü bulunmuştur. Aynı çalışmada, 18 saate kadar uzun sürelerde öğütmenin, 4 M HCl ile 80 °C'de 2 saat liç işlemiyle çözeltilmeye geçen alüminyum miktarında azalma oluşturmasıyla birlikte, pirofillit örneklerinin kristal yapılarında bozulmaya ve yüzey alanlarında artışa sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Erdemoğlu vd., [25, 26] ile Uysal vd., [45] Pütürge pirofillit cevherlerinden alüminyumun asit liçi yoluyla çözeltilmeye alınmasında mekanik aktivasyonun etkisini incelemiştir. Bu çalışmaya göre, kil minerallerinden alüminyum üretiminde kullanılan kalsinasyon kavurmasına alternatif olabilecek yeni bir yöntemin araştırılması söz konusu olmuştur. Bu çalışmada bilye-cevher oranı 10 olduğu koşullarda ve 400 devir/dakika dönme hızında gezegensel bilyeli değirmende sadece 50 dakika öğütme ile cevherden alüminyum kazanımı %12,5'dan %73,09'a çıktığı saptanmıştır. Cevherdeki pirofillit ve kaolinitin aşırı öğütme koşullarında kısa sürede amorflaşmaya başladığı, bununla birlikte, öğütme süresi uzadıkça cevherdeki kuvarsın da amorflaşmaya başladığı belirlenmiştir (Şekil 3).

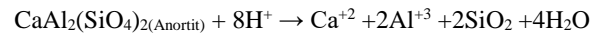
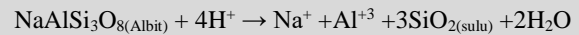
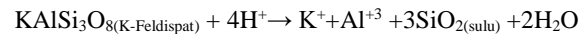
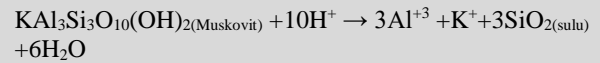


Şekil 3. 400 devir/dakika öğütme hızında çeşitli sürelerde öğütülmüş pirofillit cevherine ait XRD desenleri [45] (XRD patterns of pyrophyllite ore milled at 400 rpm for different periods)

2.2. Liçing (Leaching)

Genel olarak silikatlar, alkali çözeltilerde kimyasal tepkimeye girerler. Ancak, hidratlı kompleks silikatlı bileşiklerin çökmesi nedeniyle çözeltileri kararsızdır [30]. Bu nedenle silikatlı minerallerin liçinde alkali çözücüler tercih edilmemektedir. Bununla birlikte, pek çok silikatlı mineral HF dışında pek çok asitte çözünmez. Bu tür mineralleri daha kolay çözünür duruma getirmek için liç işleminden önce cevherin ya kalsinasyon işlemiyle ya da aşırı öğütme gibi işlemlerle aktifleştirilmesi gerekmektedir. Çizelge 4'de farklı alümina silikatların asitte çözünme reaksiyonları verilmiştir.

Çizelge 4. Alümina silikat yapıları minerallerin asidik çözeltilerde çözünme reaksiyonları (Dissolution reactions of alumina silicate minerals in acidic solutions)



Killerin liçi için H₂SO₄ [21], HNO₃ [47], HCl ve H₂SO₄ [48] gibi inorganik asitlerin kullanımı yaygındır. Bu asitlerden hangisinin kullanılacağı, kilin tepkime yeteneğinden çok, asit maliyetleriyle belirlenir. Liç sürecinde kullanılan çözücünün geri kazanım verimi maliyetleri doğrudan belirlediğinden, killerin liçinde kullanılan asitin geri kazanımı da temel alınabilir. Bu konuda kaolinitin çeşitli asitlerde liç maliyetlerinin

karşılaştırılması yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5’de verilmiştir.

Çizelge 5. Kaolinitin çeşitli asitlerde liç maliyetlerinin karşılaştırılması [30] (Comparison of leaching costs of kaolinite in various acids)

Asit türü	Asit maliyeti	Bozuşma için gereken enerji
H ₂ SO ₄	Düşük	Yüksek
HCl	Orta	Orta
HNO ₃	Yüksek	Düşük

Liç için H₂SO₄ kullanılırsa ve alüminyum sülfat kristallendirilmişse, asit maliyeti düşük ancak sülfatın oksite bozuşma (dekompozisyon) maliyeti, kavurmanın yüksek sıcaklıklarda yapılması gerekliliğinden dolayı yüksek olmaktadır. Öte yandan, liç için HNO₃ kullanıldığında ve alüminyum nitrat kristallendirilirse, asit maliyeti yüksek fakat bozuşma maliyeti düşük olmaktadır. HCl ile liç ve alüminyum klorürün bozuşma maliyetleri, H₂SO₄ ve HNO₃ maliyetlerinin arasında kalmaktadır.

2.3. Çözelti Saflaştırma (Purification of the Solution)

Yüklü liç çözeltisi, orijinal cevherden (özellikle demir) veya ortamdan kaynaklanacak titanyum, silika ve diğer safsızlıklar içerebilir. Liç sırasında alüminyum yanında bu safsızlıklarda çözünerek çözeltinin kirlenmesine, daha sonra çöktürülen alüminyum tuzunun ve son ürün alüminanın saflığının düşük olmasına sebep olurlar. Yüklü çözeltinin saflaştırılması amacıyla, liç sırasında çözeltiye geçen demirin kalsiyum ferrosiyanür yardımıyla Prusya Mavisini halinde çöktürülerek uzaklaştırılabileceği önerilmektedir [30]. Ancak, asidik ortamda ferrosiyanürün aşırı zehirli hidrojen siyanüre dönüşmesi tehlikesi söz konusu olmaktadır. Bunun yerine, özellikle di-(2-etil hegzil) fosforik asit (D2EHPA) [49], tri-oktil/desil amonyum klorür (Aliquat 336) [50] ve bunlara benzer biçimde tri-n-butil fosfat (TBP) ve bis(2,4,4- tri metil pentil) fosfinik asit (Cyanex 272) gibi reaktifler yardımıyla HCl çözeltilerindeki demir solvent ekstraksiyon yöntemiyle uzaklaştırılmaktadır. Katı/çözelti ayırımı için liç aşamasından sonra uygulanan filtrasyona rağmen, çözeltiden uzaklaşmayan koloidal silikanın son ürün alüminayı kirlenmesini engellemek üzere çeşitli flokülant veya koagülantlarla seçimli çöktürme yöntemleri kullanılarak başarılı sonuçlar alınabilmektedir. Böylece silika kaynaklı çözelti kirlenmesinin de önüne geçilebilmektedir.

2.4. Çöktürme (Precipitation)

Yüklü çözeltiden alüminyum tuzunun çöktürülmesi için, soğutma yoluyla çöktürme ve/veya alüminyum tuzunun anyonunun (HCl durumunda, Cl⁻) derişiminin artırıldığı çöktürme yöntemleri uygulanmaktadır. Çok aşamalı olan bu çöktürme işleminin etkili ve verimli olmaması durumunda, AlCl₃.6H₂O’ın, bir “döner buharlaştırıcı”

kullanılarak, kurutma yoluyla çöktürme işlemi gerçekleştirilebilir. Çöktürülen alüminyum tuzu santrifüj yardımıyla çözeltiden ayrılmakta ve kurutulmaktadır. Killerden liç yoluyla alümina üretiminde, liç çözeltisinden alüminyum tuzu çöktürülmesi konusunda literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Reh vd., [51] killerin HCl ile liçyle elde edilen çözeltilerde HCl gazının kabarcıklandırılarak AlCl₃.6H₂O kristallendirilmesi hakkında birtakım çevrimli testler gerçekleştirmişler ve yeniden kristallendirme aşaması olmadan elektroliz hücresi kalitesinde alümina üretilmeyeceği sonucuna varmışlardır. Bu sonucu destekler nitelikte çalışmalar gerçekleştiren Eisele vd., [52], HCl kullanılarak elde edilen liç çözeltisinden AlCl₃.6H₂O’ı çöktürmek için çözeltide HCl gazı kabarcıklandırması yöntemini uygulamışlar ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Benzer şekilde, Al-Zahrani ve Abdul-Majid [19], çözeltiye alınan alüminyumun çöktürülmesi amacıyla HCl gaz enjeksiyon yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemde artan HCl konsantrasyonu ile çözeltide AlCl₃.6H₂O çökeleği oluşmaktadır.

2.5. Bozuşturma Kavurması (Decomposition Roasting)

Çöktürmeyle elde edilen alüminyum tuzunun Al₂O₃’e bozuşumunun sağlanacağı kavurma işlemi sırasında bir yandan alüminyum tuzu alüminaya bozuşurken, öte yandan dönüşümün diğer ürünü olan HCl buharı açığa çıkar. Oluşan asitin ortama yayılmadan toplanmasını sağlamak üzere kavurma işleminin, asit buharlarına dayanıklı malzemelerden üretilmiş fırınlarda gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Oluşacak asit buharlarını toplamak üzere fırın çıkışına gaz yıkama sistemi veya asit buharının çevreye kontrolsüz yayılmasını engellemek üzere fırın çıkış bacasına, asitle kimyasal tepkimeye girerek onu nötrleştirecek granül CaCl₂, CaCO₃ gibi alkali içerikli maddelerin kullanıldığı bir sistem eklenebilir.

Bozuşturma kavurması ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında Hartman vd., [53] AlCl₃.6H₂O tuzunun termal bozuşması ile ilgili çalışmada, 270 °C sıcaklığa kadar yükselen sıcaklıklardaki bozuşma hızını araştırmışlardır. Bu sıcaklıklarda Al₂O₃ oluştuğu ancak hala bir miktar klorürlü türün bulunduğunu, 350 °C’de 1 saat kalsinasyondan sonra alüminanın yaklaşık %9 klorür içerdiğini rapor etmişlerdir. Park ve Jeong [57] ise düşük-sodalı alümina için alüminyum klorür hegzahidratın termal bozuşması sırasındaki morfolojik değişimlerini dikkate alarak bozuşma sıcaklığını 300-900 °C aralığında, kalsinasyon sıcaklığını ise 1100-1400 °C aralığında incelemişlerdir. Buna göre üretilen düşük-sodalı alüminanın Bayer prosesiyle üretilen alüminayla karşılaştırılabilir olduğunu bulmuşlardır.

Çeşitli alüminyum tuzlarının tam bozuşma tepkimeleri ve tepkime sıcaklıkları Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 6. Farklı alüminyum tuzlarının tam bozuşma tepkimeleri (Degradation reactions of different aluminum

Bozuşma Reaksiyonları	Tepkime Sıcaklığı	Kaynak
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O \longrightarrow Al_2O_3 + 3SO_3 + 18H_2O$	1350 °C	[54]
$2AlCl_3 \cdot 6H_2O \longrightarrow Al_2O_3 + 6HCl + 9H_2O$	350°- 1100 °C	[53], [55]
$2Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O \longrightarrow Al_2O_3 + 6HNO_3 + 15H_2O$	250 °C	[56]

3. SONUÇ (CONCLUSION)

Killerden alümina üretimi konusunda yapılmış olan çalışmaların derlenmesi ve güncel araştırma bulgularıyla da ilişkilendirilerek irdelenmesiyle hazırlanan bu çalışmadan çıkarılabilecek belli başlı sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Killerden alümina üretimi amacıyla geliştirilmiş ve literatüre de konu olmuş bazı süreçler bulunmaktadır. Bunlar içerisinde özellikle “Asit Liç Süreci” daha fazla ön plana çıkmış bulunmaktadır. Hatta dünyada boksit dışı kaynaklardan asit liç yöntemiyle alümina üretiminin yapıldığı iki önemli endüstriyel uygulama da bulunmaktadır. Rusya’da nefelin siyenitlerden, Kanada’da ise kaolinit ve anortozitlerden tesis ölçeğinde alümina üretimi yapılabilmektedir.

Asit liç sürecinde genel kabul görmüş dört işlem kademesi bulunmaktadır: (a) Çözündürme öncesi kilin hazırlanması ve kalsine edilmesi, (b) Kalsine kili asit çözeltisinde çözündürme, (c) Çözelti saflaştırma ve çözeltideki alüminyumun çöktürülmesi, (d) Çöktürülmüş alüminyum tuzunun yüksek sıcaklıklarda kavrulmasıyla alümina üretimidir. Bu işlem kademelerinin her biri teknik ve ekonomik açıdan eşit öneme sahiptir. Ancak liç öncesi killerin kalsine edilmesi, çok kritik öneme sahiptir. Killerin liç davranışı ve alümina üretim prosesinin başarısı büyük ölçüde kalsinasyonun etkinliğine bağlı kalmaktadır.

Kil minerallerinin çözünürlük verimini iyileştirmek amacıyla zorunlu bir yöntem olarak uygulanan kalsinasyon işlemi konusunda literatürde yeterli çalışma bulunmaktadır. Fakat son yıllarda kalsinasyonun bilinen bazı sakıncalı yönlerini ortadan kaldıracak, daha etkin ve verimli, daha çevreci, daha düşük maliyetli aktivasyon yöntemleri üzerinde çalışıldığı görülmektedir. Güncel bazı kaynaklarda killerin mekano-kimyasal işlemlerle de aktifleştirilebileceğine (mekanik aktivasyon) dikkat çekilmiş, bir kil minerali olan pirofillitten asit liç yöntemiyle alümina üretimi konusunda bu makalenin yazarları tarafından gerçekleştirilen güncel çalışmalar bulunmaktadır. Devam etmekte olan bu çalışmalardan elde edilen deneysel bulgular göstermiştir ki, termal aktivasyona kıyasla mekanik aktivasyon pirofillitin liç performansı üzerinde daha fazla olumlu bir etki oluşturmakta ve alüminyumun çözünme verimini belirgin bir şekilde artırmaktadır. Elde edilmiş olan bu ümit verici bulgular, asit liç yöntemiyle killerden alümina üretiminde önemli bir işlem kademesini oluşturan

aktivasyon işleminin mekano-kimyasal yolla da mümkün olabileceğini göstermiştir. Killerin termal aktivasyonuna alternatif bir seçenek olarak düşünülen mekanik aktivasyon konusundaki bu bulguların alümina endüstrisinin ve bu konuyla ilgili araştırmacıların dikkatini çekeceği, bu konulardaki bilimsel çalışmalara önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar, bu makalenin hazırlanmasına temel olan araştırma projesine (Proje No: 214M432) verdiği destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu’na (TÜBİTAK) teşekkür ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] World Aluminium, <http://www.world.aluminium.org/statistics/alumina-production>. Son Erişim Tarihi: 28 Şubat 2017.
- [2] Habashi, F., *Handbook of Extractive Metallurgy, Volume 2*. Heidelberg, Germany: **Wiley-VCH**, 1997.
- [3] Girgin, İ., Boksit dışı kaynaklardan alümina üretimi, *Madencilik Dergisi*, 23(3), 7-14, 1984.
- [4] Günay, D., Alüminyum sektörü hakkında bir değerlendirme, Türkiye Kalkınma Bankası, *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Müdürlüğü*, 50s. Ankara, 2006.
- [5] Orbite Aluminae Inc. <http://www.nasdaq.com/symbol/orbf/press-releases>, Son Erişim Tarihi: 27 Şubat 2017.
- [6] Cohen, J., Mercier, H., Recovery of alumina from non-bauxite aluminum-bearing raw materials, Société Aluminium Pechiney, Light Metals, **Wiley-VCH**, 1976.
- [7] Özdemir, M., Çetişli, H., Extraction kinetics of alunite in sulphuric acid and hydrochloric acid, *Hydrometallurgy*, 76, 217-224, 2005.
- [8] Arlyuk, B. I., So. D., Pivnev A.I., Efficiency of nepheline ore processing for alumina production all-union aluminum and magnesium, Leningrad, In: Peterson, W.S. (Ed.), Light Metals, **Wiley-VCH**, 1992.
- [9] Yao, Z.T., Xia, M.S., Sarker, P.K., Chen, T., A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China, *Fuel*, 120, 74-85, 2014.
- [10] Singh, R., Singh, L., Singh, S. V., Beneficiation of iron and aluminium oxides from fly ash at lab scale,

- International Journal of Mineral Processing*, 32–37, 145, 2015.
- [11] Ding, J., Ma, S., Zheng, S., Zhang, Y., Xie, Z., Shen, S., Liu, Z., Study of extracting alumina from high-alumina PC fly ash by a hydro-chemical process, *Hydrometallurgy*, 58–64, 161, 2016.
- [12] Shemi A., Ndlovu S., Sibanda V., van Dyk L.D., Extraction of aluminium from coal fly ash: Identification and optimization of influential factors using statistical design of experiments, *International Journal of Mineral Processing*, 127, 10–15, 2014.
- [13] Habashi, F., Alumina from Silicates, *The International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium*, Volume 17, June 2017.
- [14] Flint E. P., Clarke W. F., Newman E. S., Leo Shartsis. D. L. Bishop and Lansing S. Wells, Extraction of alumina from clays and high silica bauxites, *Journal of Research of The National Bureau of Standards*, Volume 36, 1946.
- [15] Bengtson, K.B., A technological comparison of six processes for the production of reduction grade alumina from non-bauxitic raw materials. In: Peterson, W.S. (Ed.), Light Metals, *Wiley-VCH*, pp. 217–312, 1979.
- [16] Sawyer, D.L., Turner, T.L., Hunter, D.B., Alumina mini-plant operation-overall mass balance for clay hcl acid leaching, *U.S. Bureau of Mines*. Report No 8759, 29 pp, 1983.
- [17] Al-Ajeel, A.W. A., Al-Sindy, S. I., Alumina recovery from iraqi kaolinitic clay by hydrochloric acid route, *Iraqi Bulletin of Geology and Mining*, 2(1), 67-76, 2006.
- [18] Bazin, C., El-Ouassiti K., Ouellet V., Sequential leaching for the recovery of alumina from a Canadian clay, *Hydrometallurgy*, 88, 196–201, 2007.
- [19] Al-Zahrani, A.A., Abdul-Majid, M.H., Extraction of alumina from local clays by hydrochloric acid process, *Journal of King Abdulaziz University: Engineering Sciences*, 20(2), 29-41, 2009.
- [20] Tang, A., Su, L., Li, C.H., Wei, W., Effect of mechanical activation on acid leaching of kaolin residue, *Applied Clay Science*, 48, 296-299, 2010.
- [21] Daniels, A. L., Muzenda E., Recovery of aluminium oxide from flint clay through H₂SO₄ leaching, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol III WCE 2012, July 4 - 6, London, U.K., 2012.
- [22] Ohale, P.E., Uzoh, C.F., Onukwuli, O.D., Optimal factor evaluation for the dissolution of alumina from Azaraegbelu clay in acid solution using RSM and ANN comparative analysis, *South African Journal of Chemical Engineering*, 43-54, 24, 2017.
- [23] Devlet Planlama Teşkilatı, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Seramik Killeri-Kaolen-Feldspat-Pirofillit-Wollastonit-Talk Çalışma Grubu Raporu, Ankara, 2001.
- [24] <http://webmineral.com/> Son Erişim Tarihi: 17 Ekim 2017.
- [25] Erdemoğlu, M., Birinci M., Uysal, T., Porgalı, E., Yumuşak S., Characterization of mechanically activated pyrophyllite for Al₂O₃ production by acid leaching process, *International Mineral Processing Symposium*, İstanbul, 2016.
- [26] Erdemoğlu, M., Birinci M., Uysal, T., Porgalı, E., Barry, T. S., Acid leaching performance of mechanically activated pyrophyllite ore for Al₂O₃ extraction, *International Conference on Mechanochemistry and Mechanical Alloying*, Slovakia, 2017.
- [27] Birinci, M., Uysal, T., Erdemoğlu M., Porgalı, E., Barry, T.S., Acidic Leaching of Thermally Activated Pyrophyllite Ore From Pütürge (Malatya-Turkey) Deposit, *XVII Balkan Mineral Processing Congress*, Antalya, 2017.
- [28] Miller J., Irgens, A., Alumina Production By The Pedersen Process - History And Future, In: Peterson, W.S. (Ed.), Light Metals, *Wiley-VCH*, pp. 977– 982, 1979.
- [29] Habashi, F., A Textbook of Hydrometallurgy. Métallurgie Extractive Québec, Québec City, Canada, 1993.
- [30] Habashi, F., Textbook of Hydrometallurgy (2. Edition), *Métallurgie Extractive*, Québec City, Canada, 1999.
- [31] Ajemba, R. O., Onukwuli, O. D., Process optimization of sulphuric acid leaching of alumina from Nteje clay using central composite rotatable design, *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 3(5), 1-7, 2012.
- [32] Numluk, P., Chaisena, A., Sulfuric acid and ammonium sulfate leaching of alumina from Lampang clay, *E-Journal of Chemistry*, 9(3), 1364-1372, 2012.
- [33] Warris C.J., McCormick, P. G., Mechanochemical processing of refractory pyrite, *Minerals Engineering*, 10, 1119-1125, 1997.
- [34] Baláz, P., Influence of solid state properties on ferric chloride leaching of mechanically activated galena, *Hydrometallurgy*, 40, 359-368, 1996.
- [35] Tkáčová, K., Baláz, P., Mišura, B., Vigdergauz, V.E., Chanturiya, V.A., Selective leaching of zinc from mechanically activated complex Cu-Pb-Zn concentrate, *Hydrometallurgy*, 33, 291-300, 1993.
- [36] Tromans, D., Meech, J.A., Enhanced dissolution of minerals: microtopography and mechanical activation, *Minerals Engineering*, 12, 609-625, 1999.
- [37] Welham, N.J., Enhanced dissolution of tantalite/columbite following milling, *International Journal of Mineral Processing*, 61, 145-154, 2001.
- [38] Pourghahramani, P., Forssberg, E., Effects of mechanical activation on the reduction behavior of hematite concentrate, *International Journal of Mineral Processing*, 82, 96-105, 2007.
- [39] Şener, M., Jipsin (CaSO₄.2H₂O) ıslı davranışına mekanik aktivasyonun etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 2012.
- [40] Uysal T., Mutlu H.S., Erdemoğlu M., Effects of mechanical activation of colemanite (Ca₂B₆O₁₁.5H₂O) on its thermal transformations, *International Journal of Mineral Processing*, 151, 51-58, 2016.

- [41] Erdemoğlu, M., Carbothermic reduction of mechanically activated celestite, *International Journal of Mineral Processing*, 92, 144-152, 2009.
- [42] Wang, Y., Forssberg, E., Enhancement of energy efficiency for mechanical production of fine and ultra-fine particles in comminution, *China Particuology*, 5, 193-201, 2007.
- [43] Pérez-Rodríguez, J. L., Madrid Sánchez Del Villar, L. M., Sánchez-Soto, P.J., Effects of dry grinding on pyrophyllite, *Clay Minerals*, 23, 399-410, 1988.
- [44] Uysal, T., Şener, M., Toptaş, H., Karamazı, Ş. S., Yazıcı, S., Eroğlu, Y., Erdemoğlu, M., Mechanically induced changes on crystal structure and thermal behaviour of industrial minerals: case studies for colemanite, pyrophyllite and quartz, *The Journal of Ore Dressing*, 17, 8-14, 2015.
- [45] Uysal T., Birinci, M., Porgalı E., Erdemoğlu, M., Effects of intensive milling on the structural characteristics of pyrophyllite ore, *18. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 2016.
- [46] Temuujin, J., Okada, K., Jadambaa, T.S., MacKenzie, K.J.D., Amarsanaa, J., Effect of grinding on the leaching behaviour of pyrophyllite, *Journal of European Ceramic Society*, 23(8), 1277-1282, 2003.
- [47] Dewey, J.L., Scott, C.E., Kane, J.F., Stratton, C.L., Rushing, J.C., Spoonts, R.H., Alumina production by nitric acid extraction of clay, United States Patent No: 4.246.239, 1981.
- [48] Redlich, O., Jiarch, C.C., Adams, J.F., Sharp, F.H., Holt, E.C., Taylor, J.E., Extraction of alumina from clay, *Industrial and Engineering Chemistry*, 38(11), 1181-1187, 1946.
- [49] Biswas, R.K., Begum, D.A., Solvent extraction of Fe³⁺ from chloride solution by D2EHPA in kerosene, *Hydrometallurgy*, 50, 153-168, 1998.
- [50] Mishra, R.K., Rout, P.C., Sarangi, K., Nathsarma, K.C., Solvent extraction of Fe (III) from the chloride leach liquor of low grade iron ore tailings using Aliquat 336, *Hydrometallurgy*, 108, 93-99, 2011.
- [51] Reh L., Plass, L., Marchessaux, P., Process for the thermal decomposition of aluminum chloride hexahydrate to obtain alumina, United States Patent No: 4.107.281, 1978.
- [52] Eisele, J.A., Bauer, D.J., Shanks, D.E., Bench-Scale studies to recover alumina from clay by a hydrochloric acid process, *Industrial Engineering Chemistry Product Research and Development*, 22, 105-110, 1983.
- [53] Hartman, M., Trnka, Šolcová, O., Thermal decomposition of aluminum chloride hexahydrate, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(17), 6591-6598, 2005.
- [54] Çilgi, G. K. Çetişli H., Thermal decomposition kinetics of aluminum sulfate hydrate, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 98(3):855-861, 2009.
- [55] McSweeney, Gerald B., Thermal decomposition of aluminum chloride hexahydrate, Patent No: CA1172427, 1984.
- [56] E. El-Shereafy, M. M. Abousekkina, A. Mashaly, M. El-Ashry, Mechanism of thermal decomposition and γ -pyrolysis of aluminum nitrate nonahydrate (Al(NO₃)₃.9H₂O), *Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 237, No 12, 183-186, 1998.
- [57] Park, K. Y., Jeong, J., Manufacture of low-soda alumina from clay, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35(11), 4379-4385, 1996.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Production and characterization of composite filaments for 3D printing

3D yazıcılar için kompozit filament üretimi ve karakterizasyonu

Yazar(lar) (Author(s)): Ebubekir ÇANTI¹, Mustafa AYDIN², Ferhat YILDIRIM³

ORCID¹: 0000-0002-1821-3595

ORCID²: 0000-0002-9150-4081

ORCID³: 0000-0002-0524-4050

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Çantı E., Aydın M. ve Yıldırım F., “Production and characterization of composite filaments for 3D printing”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 397-402, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389591

Production and Characterization of Composite Filaments for 3D Printing

Araştırma Makalesi / Research Article

Ebubekir ÇANTI¹, Mustafa AYDIN^{2*}, Ferhat YILDIRIM³

¹TUBITAK, BILGEM BTE, Gebze/Kocaeli, Turkey

^{2*}Hasan Ferdi Turgutlu Technology Faculty, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Manisa Celal Bayar University, Turkey

³Faculty of Simav Technology, Department of Industrial Design Engineering, Dumlupınar University, Turkey
(Geliş/Received : 18.04.2017 ; Kabul/Accepted : 03.06.2017)

ABSTRACT

In this study, various nano and micro particles with different properties, including density, surface area, purity and particle morphology were used as reinforcement particles for the production of polymer composite filaments to be used for 3D printing. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) was matrix material and Multi wall carbon nanotubes (MWCNTs), SiO₂, ZrB₂, and, Al particles were reinforcements. Production of the composite filaments was carried out by using a twin screw extruder. Produced composite filaments were characterized via Differential Scanning Calorimeter (DSC), Scanning Electron Microscope (SEM), Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), tensile test and surface roughness tests. Results showed that addition of micro/nano particles into ABS matrix improved the Ultimate Tensile Strength (UTS) of the composites by around 16% compared to non-reinforced one. As a result of reinforcing with micro particles, ZrB₂ and Al, the tensile strain of neat-ABS filament increased by 17.8% and 40%, respectively

Keywords: Additive manufacturing, polymer, ABS, composite, filament, FDM

The Üç Boyutlu Yazım İçin Kompozit Filamentlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

ÖZ

Bu çalışmada, yoğunluk, yüzey alanı, saflık ve parçacık morfolojisi gibi farklı özelliklere sahip çeşitli nano ve mikro parçacıklar, 3D baskıda kullanılacak polimer kompozit filamentlerin üretimi için takviye parçacıkları olarak kullanılmıştır. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) matris malzemesi iken, MWCNTs, SiO₂, ZrB₂, Al partikülleri takviye olarak kullanılmıştır. Kompozit filamentlerin üretimi ikiz vidalı bir ekstrüder kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit filamentler Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC), Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), Dispersif X-ışını Spektroskopisi (EDS), çekme testi ve yüzey pürüzlülük testleri ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar, ABS matrise mikro/nano parçacıklarının eklenmesinin, takviyesiz ABS ile karşılaştırıldığında kopma gerilmesini yaklaşık %16 oranında geliştirdiğini göstermiştir. ZrB₂ ve Al mikro parçacıklarının takviye edilmesi sonucunda, katkısız ABS filamentin çekme gerilimi sırasıyla %17.8 ve %40 kadar yükselmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli üretim, polimer, ABS, kompozit, filament, FDM

1. INTRODUCTION

Additive manufacturing (AM) is a bottom up process based on creating objects directly from material layer by layer as opposed to traditional manufacturing methods that relies on subtraction of material from work piece. Because of this unique approach, AM allows to manufacture complex shaped parts with minimum scratch. Different AM techniques have been developed in the literature, including Laminated Object Manufacturing (LOM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), and Fused Deposition Modelling (FDM). However, FDM is the most prominent and prevalent one due to simplicity of the FDM devices and wide availability of the materials [1].

Today, ABS, polycarbonate (PC), polylactide (PLA), polyamide (PA), and the mixtures of different types of thermoplastics are the most common feedstock material in other words filaments in FDM technique [2]. However, the parts to be manufactured using these filaments lack sufficient mechanical strength and robustness, due to inherent nature of the polymeric materials, to withstand mechanical loading, which is a prerequisite for all functional mechanical components. This shortcoming restricts implementation of the FDM technology significantly and limits its applicability to industrial applications. Therefore, there is an urgent need for development of novel materials with enhanced mechanical properties for manufacturing of functional mechanical components [3]. Polymer nano-composites stand out as a potential solution to overcome this limitation. Because of having larger surface area over a

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : aydin.mustafa@cbu.edu.tr

given volume by transition of the dimension scale from micrometer to nanometer, nanometer scaled particles improves mechanical and physical properties significantly of the polymer materials [4]-[6].

Even though the effects of manufacturing parameters on the mechanical properties of 3D printed parts have been vastly studied in the literature [7]-[10], developing novel filament thus achieving printed parts with superior properties is limited. Hence, the aim of the current study was to produce ABS micro/nano composite filaments with different reinforcements, including MWCNTs, SiO₂, ZrB₂, and Al and to characterize them.

2. MATERIAL and METHOD

2.1. Used Materials and Properties

In this study, MWCNTs, SiO₂, ZrB₂, and Al particles were used as reinforcement particles for the production of polymer composite filaments. The Al particles were produced by gas atomization method in “Gas atomization unit” in Dumlupınar University. The SiO₂ and MWCNTs particles were supplied from Ege Nanotech (Izmir, Turkiye, code EN/N-EA234 and EN/N-KNT14-1, respectively). The ZrB₂ particles were purchased from the ABCR (Karlsruhe, Germany, code 82299).

Material properties of used micro/nano particles were presented in Table 1. Figure 1 shows SEM microstructure of the reinforcement particles. As shown in Table 1 and Figure 1, the particles have different properties, including density, surface area, purity, and particle morphology.

Table 1. Properties of the used particles.

Properties	Unit	Reinforcements			
		MWCNTs	SiO ₂	ZrB ₂	Al
Density	gr/cm ³	2,1	2,2-2,6	6,1	2,64
Surface Area	m ² /gr	40	440	1,6	-
Purity	%	>95	99,90	96-97	96-98
Morphology	-	Tube	Spherical	Hexagonal, Irregular	Spherical
Outer Diameter	nm	< 50	30	10 micron	35 micron
Inner Diameter	nm	<5-15	-	-	-
Length	µm	10-20	-	-	-

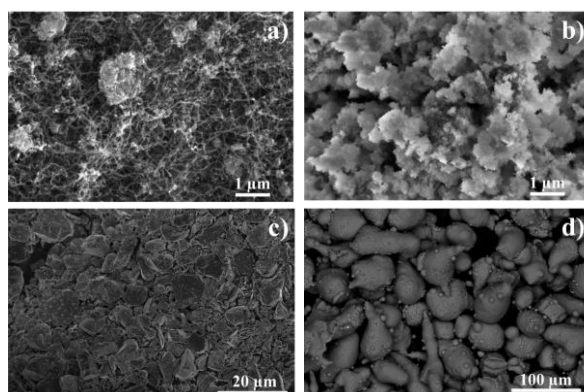


Figure 1. The SEM microstructure of used micro/nano particles, a) MWCNTs, b) SiO₂, c) ZrB₂, d) Al.

2.2. Fabrication of the Composite Filaments

A twin screw extruder, AES Lab-30 (Aysa Machine, Istanbul, Turkiye), was utilized for the filament production. The extruder has twin screw one of each has a diameter of 22 mm. Also, length/diameter (L/D) ratio of the extruder is 32. The machine can be operated in a temperature range 60oC-400oC precisely by the help of 6 heat zones and cooling installations located on the main barrel.

Production steps are illustrated in Figure 2. At first, mixing of the reinforcement particles with the ABS granules was done in a mechanical alloying machine without steel balls for ten minutes, in order to provide penetration of the fillers into the ABS granules. Following, the composite granules were poured into the feeder of the extruder machine to maintain uninterrupted extrusion process. For constant feeding, rotation speeds of the feeder and main twin screw were set to 15 rpm and 73 rpm, respectively. During the extrusion, main barrel temperature was controlled by the independent 6 heating zones which are located on. The temperatures of the heat zones, from 1st heat zone to last, were set in range 175oC to 210oC by equal increment. An extruder die contains only a single exit with a diameter of 2 mm was employed in the process. Having been extruded from die, the filaments dived into water pool (19oC) for solidification to 50 rpm to improve consistency of the filament diameter, which was resulted in a filament with diameter of 1.75 mm. Table 2, shows weight ratios of the

reinforcement particles and matrix material besides containing images of the produced filaments.

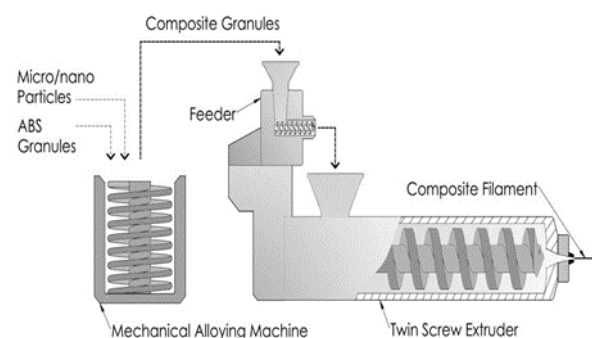







Figure 2. The production steps of nano-micro polymer composite filaments.

Table 2. The weight ratio of the particles added into the ABS matrix and produced filament images.

ABS, (wt%)	Additive, (wt%)	Additive	Produced Filaments
98.5	1.5	MWCNTs	
98.5	1.5	SiO ₂	
98.5	1.5	ZrB ₂	
98.5	1.5	Al	
100	0	-	

2.3. Characterization of ABS Composite Filaments

The composite filaments were characterized via different methods, including DSC, tensile test, surface roughness, and SEM-EDS. Tensile test were performed on 4 samples extracted from various sections of the filaments then subjected to axial loading by using Zwick BF2-FZ0.5TH.D16 (Zwick, Germany) at room temperature. Maximum tensile load allowed by the tensile machine was of 5kN and extension resolution was <0.1 microns. Distance between grippers was set to 100 mm and all of the specimens were stretched at 25 mm/min with constant speed. SEM-EDS studies were conducted via FEI Nova NanoSEM 650 (FEI, Oregon, USA) in Advanced Technology Center at Dumlupinar University (ILTEM). DSC was performed on granulated filaments by using SETSYS Evolution TGA&DTA/DSC (SETARAM Instrumentation, USA) in the same center.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. SEM-EDS Analysis of the Filaments

Following the filament production, EDS studies of the composite filament's cross sections have been obtained to validate dispersion of micro/nano particles in the ABS matrix. In Figure 3, EDS graphs were plotted. The EDS studies showed that reinforced particles were present in the ABS matrix.

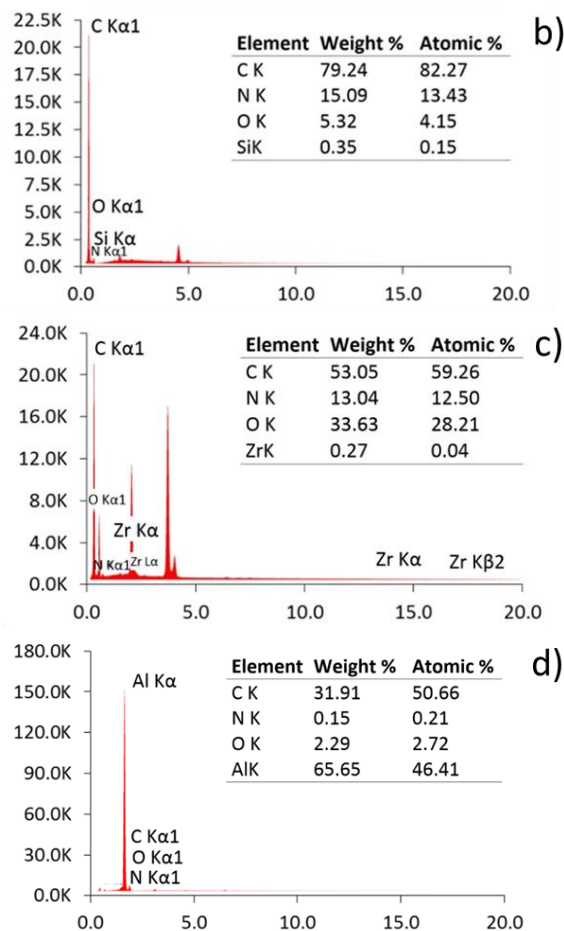
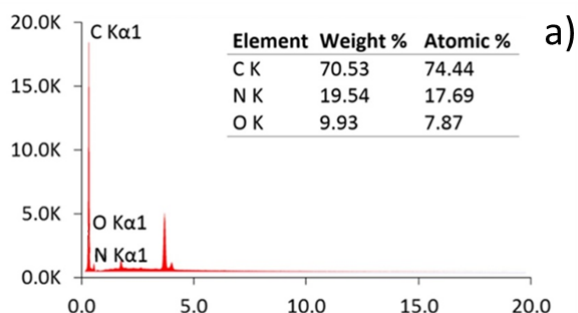


Figure 3. The SEM-EDS plot of the composite filaments, a) MWCNTs/ABS, b) SiO₂/ABS, c) ZrB₂/ABS, and d) Al/ABS.

3.2. Tensile Test of the Filaments

Corresponding tensile stress to tensile strain, based on the tensile test results, were plotted in Figure 4 and presented in Table 3. According to results, nano-particle addition decreased elongation at break values by up to 17.8%. However, UTS values of the filaments increased by 6.7% and 16% by reinforcing MWCNTs and SiO₂, respectively.

Micro particle reinforcement affects the tensile-strain more thoroughly than tensile-stress. Reinforcing with ZrB₂ increased UTS 4.5% while its elongation at break increased 18%. Results were more promising with Al reinforcing. An UTS increase of around 16% and an elongation at break increase of around 40% were observed in Al reinforced filament. Young moduli of all filaments except MWCNTs were increased. Significant decrease, of around 18% was observed in MWCNTs reinforced filament.

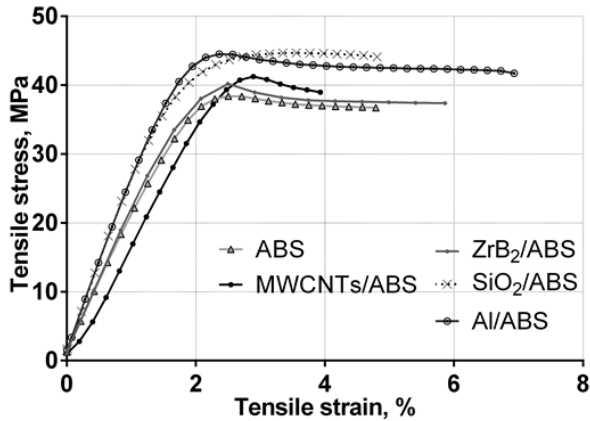


Figure 4. The stress-strain graph of the produced ABS composite filaments.

Table 3. The weight ratio of the particles added into the ABS matrix and produced filament images.

Matrix	Reinforcement	Young Modulus, (GPa)	UTS, (MPa)	Elongation at break, (%)
ABS	-	2,05	38,44	4,99
ABS	(nm) MWCNTs	1,68	41,2	4,05
ABS	(nm) SiO ₂	2,49	44,72	4,84
ABS	(µm) ZrB ₂	2,14	40,2	5,88
ABS	(µm) Al	2,55	44,56	6,99

3.3. Comparison of the Filament Diameters

In Figure 5, cross section surfaces of both of neat-filament and the filament reinforced with SiO₂ were compared. Today, commercial FDM filaments, mostly, have a diameter of 1.75 mm. Following the extrusion process, produced filaments were used in an FDM printer for trials. Too thin or too thick filaments caused printing errors, interrupted the process, and made impossible to print fully integrated parts. Trial processes showed that the importance of the consistency of the filament diameter. In this study, neat and SiO₂ reinforced filament were compared and their diameter measured as 1.771 mm and 1.741 mm, respectively. Results show that, by arranging the extrusion process parameters properly, achieving suitable filaments compatible with FDM printing can be provided either using reinforcement particles or not using.

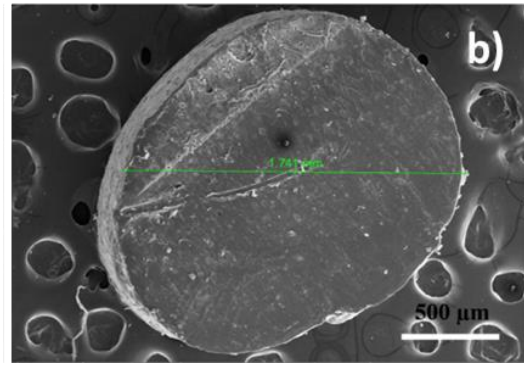
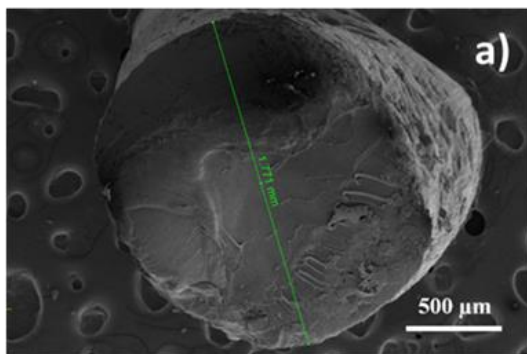
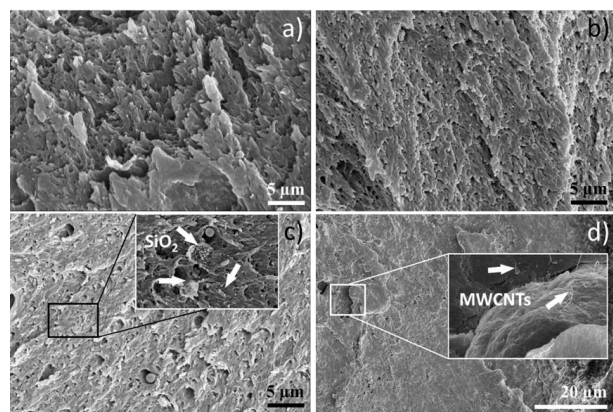


Figure 5. The SEM microstructure of a) neat-ABS, b) SiO₂/ABS composite filaments, X150 magnification.

SEM microstructures of fractured surface of tested filaments are shown in Figure 6. Fractured surface formations of the both non-reinforced filament and filament with ZrB₂ reinforcement were almost same (Figure 6a, b). Fracture surface formation of the specimen with SiO₂ reinforcement indicates ductile fracture same like filaments with non-reinforced and ZrB₂ reinforced (Figure 6b, c). SEM images of these filaments indicated ductile fracture and show agreement with the elongation at break values were presented in Table 3 (4.84%, 4.99% and 5.88%; SiO₂, non-reinforced and ZrB₂, respectively). To validate presence of the micro Al alloy particle in the polymer matrix, the SEM image was added as Figure 6f.

3.4. SEM Microstructure of Fracture Surface

Examination of the specimen with MWCNTs reinforcement showed agglomeration of the nano-tubes (Figure 6d, e). It can be said that there was non-uniform dispersion of MWCNTs in the ABS matrix, due to the morphology of MWCNTs and weak adhesion between particles and the ABS matrix. Besides, agglomeration of the particles in the cross section of the filament was acted as a stress concentrator resulted with poor capability to withstand failure. Although, UTS value of the filament with MWCNTs was slightly higher than the non-reinforced one, there was notable decrease in elongation at break value (4.99% and 4.05%, respectively; Table 3).



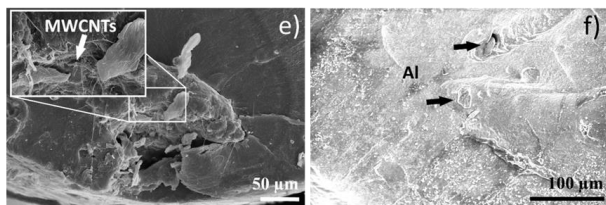


Figure 6. The fracture surface of neat-ABS and reinforced ABS filaments, a) neat-ABS X10.000, b) ZrB₂/ABS X10.000, c) SiO₂/ ABS X10.000 with higher magnification, d) MWCNTs/ ABS X5000 with higher magnification, e) MWCNTs/ ABS X1000 (agglomeration) with X10.000 magnification, f) Al/ABS X1000.

The specimen with SiO₂ has the highest UTS value presumably owing its morphology and of size. SiO₂ particles have the highest surface area with the 440m²/gr value among all of the reinforcements with spherical morphology. This can be thought that the possible reason for the UTS increase for SiO₂ reinforced filament. SEM images indicated more homogenized distribution of the reinforcement particles in the ABS matrix except MWCNTs.

3.5. DSC Studies of the Produced Filaments

For all of the produced filaments, results of the DSC studies were shown in Figure 8. According to results neat-ABS shows a glass transition temperature (T_g) around of 107°C. This finding was compatible with the result of Faes et al. study [11]. Also, there have been shown mixed values for T_g of the ABS from 105°C to 108°C in literature [[12], [13].

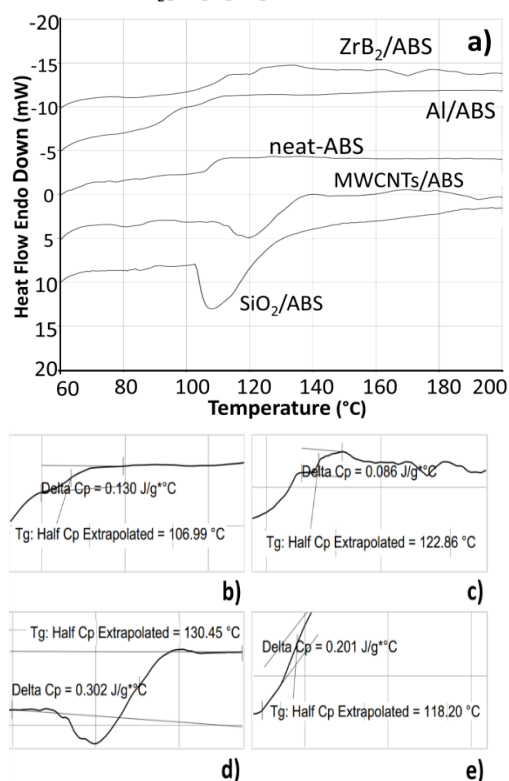


Figure 7. DSC studies of a) all produced samples, b) Al/ABS, c) ZrB₂/ABS, d) MWCNTs/ABS, e) SiO₂/ABS.

4. CONCLUSION

ABS composite filaments reinforced with different nano/micro particles have been successfully produced by using a twin screw extruder in this study. Characterization results shows that these novel composites can be used as filament material in commercial FDM devices without requiring modification. According to the results;

- 1- The nano and micro reinforced ABS composite filaments for FDM type 3D printer were produced via a twin screw extruder between 175oC - 210oC without degradation of the matrix.
- 2- DSC studies showed that produced filaments were compatible with commercial 3D printers because of having lower T_g values (maximum value was 130°C for MWCNTs/ABS nano composite) than standard processing temperatures of the commercial 3D printers (mostly 230°C). However, a Melt Flow Index (MFI) should be applied on the composite polymers for determining exact processing temperature.
- 3- Addition of micro sized particles (ZrB₂ and Al alloy) in the polymer matrix was resulted increase of the tensile strain at least 18%.
- 4- The EDS results showed that, in generally, the micro reinforcements were embedded and distributed in the ABS matrix well while nano particle reinforced filaments had local agglomeration and internal void problems.
- 5- SEM microstructure of fracture surfaces indicated brittle fracture mode for the MWCNTs reinforced ABS filament as opposed to expectation. This can be aroused mainly by the weak matrix-filler interaction between polymer matrix and MCWCNTs filler.
- 6- During the extrusion process, the nano composite filaments need to be fabricated-granulated for a couple cycles to achieve well dispersion of the reinforcement particles in the ABS matrix.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) in the context of 2210-C Graduate Scholarship Program for Priority Areas. Also, the article was previously presented at the International Symposium on 3D Printing Technologies (3D-PTS 2017).

REFERENCES

- [1]. Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S., "Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modeling", *Composites Part B: Engineering*, 80: 369-378, (2015).
- [2]. Hill, N., & Haghi, M., "Deposition Direction-Dependent Failure Criteria For Fused Deposition Modeling Polycarbonate", *Rapid Prototyping Journal*, 20(3):221-227, (2014).

- [3]. Chatterjee, A., & Deopura, B. L., "High modulus and high strength PP nanocomposite filament", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(5): 813-817, (2006).
- [4]. Nawani, P., Burger, C., Rong, L., Hsiao, B. S., & Tsou, A. H., "Structure and Permeability Relationships in Polymer Nanocomposites Containing Carbon Black and Organoclay", *Polymer*, 64: 19-28, (2015).
- [5]. Weng, Z., Wang, J., Senthil, T., & Wu, L., "Mechanical and Thermal Properties of ABS/Montmorillonite Nanocomposites for Fused Deposition Modeling 3D Printing", *Materials & Design*, 102: 276-283, (2016).
- [6]. Ciprari, D., Jacob, K., & Tannenbaum, R., "Characterization of Polymer Nanocomposite Interphase and Its Impact on Mechanical Properties", *Macromolecules*, 39(19): 6565-6573, (2006).
- [7]. Mueller, J., Shea, K., & Daraio, C., "Mechanical Properties of Parts Fabricated With Inkjet 3D Printing Through Efficient Experimental Design", *Materials & Design*, 86: 902-912, (2015).
- [8]. Dawoud, M., Taha, I., & Ebeid, S. J., "Mechanical Behaviour of ABS: An Experimental Study Using FDM and Injection Moulding Techniques", *Journal of Manufacturing Processes*, 21:39-45, (2016).
- [9]. Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C., & Gu, P., "Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes With Locally Controlled Properties", *Journal of Manufacturing Processes*, 4(2): 129-141, (2002).
- [10]. Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., & Gu, P., "Effect of Processing Conditions on the Bonding Quality of FDM Polymer Filaments", *Rapid Prototyping Journal*, 14(2): 72-80, (2008).
- [11]. Faes, M., Ferraris, E., & Moens, D., "Influence of Inter-Layer Cooling Time on the Quasi-Static Properties of ABS Components Produced via Fused Deposition Modelling", *Procedia CIRP*, 42:748-753, (2016).
- [12]. Dul, S., Fambri, L., & Pegoretti, A., "Fused Deposition Modelling with ABS-Graphene Nanocomposites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 85: 181-191, (2016).
- [13]. Forest, C., Chaumont, P., Cassagnau, P., Swoboda, B., & Sonntag, P., "Generation Of Nanocellular Foams From ABS Terpolymers", *European Polymer Journal*, 65: 209-220, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Faz değiştiren malzemelerle termal enerji depolayan bir ısı değiştiricisinin sayısal analizi

Numerical analysis of a heat exchanger that stores thermal energy with phase change materials

Yazar(lar) (Author(s)): Meltem KOŐAN¹, Mustafa AKTAŐ²

ORCID¹: 0000-0001-7311-9342

ORCID²: 0000-0003-1187-5120

Bu makaleye řu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Koşan M. ve Aktaş M., “Faz değiştiren malzemelerle termal enerji depolayan bir ısı değiştiricisinin sayısal analizi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 403-409, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389594

Faz Değiştiren Malzemelerle Termal Enerji Depolayan Bir Isı Değiştiricisinin Sayısal Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Meltem KOŞAN^{1*}, Mustafa AKTAŞ¹

¹Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

ÖZ

Bu çalışmada, termal enerji depolama (TED) sistemlerinde kullanılan bir iç içe borulu ısı değiştiricisinde faz değiştiren malzemenin (FDM) erime sürecindeki ısıl davranışı, kanatçıklı ve kanatçıksız modeller ile sayısal analizi yapılarak incelenmiştir. Sayısal analizler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımını kullanan ANSYS Fluent ticari programı ile iki boyutlu ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle literatürde mevcut deneysel bir çalışma referans alınarak sayısal analiz kanatçıksız model için doğrulanmıştır. Bu modelde ısı transfer akışkanı (ITA)'nın sıcaklıkları 50 °C, 60 °C ve 70 °C alınarak ITA sıcaklığının FDM erime süresine etkisi değerlendirilmiştir. Daha sonra bu modele 6, 9, 12 ve 15 adet kanatçıklar eklenip, kanatçık sayısının da FDM'nin erime süresine etkisi araştırılmıştır. Yapılan sayısal çalışmada elde edilen sonuçlar, ITA sıcaklığı ve kanat sayısı arttıkça FDM'nin erime süresinin azaldığını, böylece FDM'nin daha hızlı bir şekilde ITA'dan ısıyı depoladığını göstermektedir. Kanat etkenlikleri sırasıyla 2,66, 3,49, 4,32 ve 5,15 olan 6, 9, 12 ve 15 kanatçıklı modellerin kanatçıksız modele göre erime süresini %72,5, %76,7, %78,4 ve %80 azalttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termal enerji depolama, faz değiştiren malzemeler, erime süresi.

Numerical Analysis of a Heat Exchanger That Stores Thermal Energy with Phase Change Materials

ABSTRACT

In this study, the thermal behavior of the phase change material (PCM) during melting process inside a shell-and-tube heat exchanger used in thermal energy storage (TES) systems has been investigated by numerical analysis with fin and without fin models. Two dimensional transient numerical analyzes have been carried out with the ANSYS Fluent commercial program using the computational fluid dynamics (HAD) approach. The study has been first validated for the without fin model with reference to an experimental study available in the literature. In this model, the effect of temperature of heat transfer fluid (HTF) on PCM melting time has evaluated by taking HTF's temperatures 50 °C, 60 °C and 70 °C. Then, 6, 9, 12 and 15 fins have been added to this model and the effect of the number of fins on the PCM melting time has been investigated. The results obtained in the numerical study show that as the HTF temperature and number of fins increase, the melting time of PCM decreases, so that PCM stores more rapidly the heat from HTF. It has been determined that the fin models with 6, 9, 12 and 15 which are 2,66, 3,49, 4,32 and 5,15 of fin effectiveness reduce the melting time by 72,5%, 76,7%, 78,4% and 80% respectively, according to without fin model.

Keywords: Thermal energy storage, phase change materials, melting time

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan küresel enerji talebiyle enerji şartları günden güne kötüye gitmektedir. Fosil yakıtlarının hem yetersiz olması hem de çevreye verdiği zararlar nedeniyle alternatif enerji kaynaklarının önemi giderek artmaktadır. Ancak güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları sürekli bir enerji kaynağı değildir. Termal enerji depolama (TED) ile güneş ışınının olduğu zamanlarda bu enerjiyi depolayan, enerji talebi ile arzı arasındaki uyumsuzluk ortadan kalkmaktadır.

Güneş enerjisini depolamanın en yaygın yöntemi duyulur enerji depolamadır. Fakat son yıllarda, istenilen sıcaklık aralığında eriyip katılaştıran faz değiştiren malzemeler ile gizli ısıyı depolayan bir yöntem olan gizli ısı depolama alternatif bir yöntem olmuştur. Duyulur

enerji depolama, sistemin korozyona uğrama ve sızıntı yapma, yüksek basınç, yalıtım gereksinimi ve yüksek ısı depolama boyutlarına ihtiyaç duyulmasından dolayı maliyetli olması gibi dezavantajları nedeniyle yerini yavaş yavaş gizli ısı depolamaya bırakmaktadır. Gizli ısı depolama, daha küçük sıcaklık aralıklarında ve daha küçük hacimlerde daha fazla ısı depolama kapasitesine sahip olduğundan güneş enerjisinden sıcak su eldesi ve mahal ısıtmasında maksimum seviyede faydalanmak için en uygun termal depolama yöntemidir [1].

Gizli ısı depolamada kullanılan FDM organik, inorganik ve ötektik olarak sınıflandırılmaktadır. Çizelge 1'de bu FDM'lerin avantaj ve dezavantajları özetlenmiştir.

Avantajlarından dolayı en çok tercih edilen FDM'ler organik FDM'lerdir. Bu organik FDM'leri parafinler ve yağ asitleri oluşturmaktadır. Parafinler kimyasal olarak kararlı, uzun ömürlü (~2000 döngüden sonra kararlı özelliklere sahip), erime gizli ısı yüksek, sabit

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mltmkosan@gmail.com

Çizelge 1. FDM'lerin karşılaştırılması [1,2,3]

FDMler	Avantajları	Dezavantajları
Organik FDM	İyi ısı kararlılık Aşırı soğuma olmadan donma Düşük buhar basıncı Özgün çekirdekleşme özelliği Reaktif ve zehirli değil Uyumlu eriyebilme Düşük hacim değişiklikleri Geleneksel yapı malzemeleri ile uyumluluk Geniş çalışma sıcaklık aralığı	Sıvı FDM'nin sızması Düşük termal iletkenliği (yaklaşık 0.2 W/mK) Yanıcı
İnorganik FDM	Yüksek hacimli gizli ısı depolama kapasitesi Yanıcı değil Düzenli faz değişimi Yüksek termal ısı iletkenlik	Aşırı soğumaya eğilimli Ayrışma Uyumlu eriyememe Yüksek hacim değişiklikleri Metalle korozif olma Tekrarlanan faz döngüleri üzerinde faz ayrılma
Ötektik FDM	Keskin erime noktaları Özellikleri özel isteklere göre yapılabilir	Yüksek maliyetli Termalfiziksel özelliklerinin sınırlı veriler

sıcaklıkta yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahip, faz değişimi boyunca istikrarlı, korozif ve toksik olmayan, hızlı bir şekilde faz değiştirmeyen, düşük maliyetli, bol miktarda bulunan ve kolay erişilebilen FDM olduklarından yaygın kullanılmaktadırlar [1,2,3].

Parafinlerin TED sistemlerindeki kullanımında en önemli problemi düşük termal (ısı) iletkenlik katsayısına sahip olmalarıdır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için literatürde pek çok çalışmalar mevcuttur. Isı transferinin iyileştirilmesi amacıyla hem deneysel hem de nümerik olarak Chow vd. [4], Velraj vd. [5] ve Marin vd. [6] çalışmalarında çözüm önerileri vermişlerdir. Bunlar; FDM'ye metal gömülerek, FDM'den daha yüksek ısı iletkenliğine sahip metal parçacıklar FDM'ye ekleyerek, FDM'yi mikro ve makro kapsülleyerek, grafit kompozit malzeme ile FDM'yi birlikte kullanarak yada diğer FDM kompozit malzemelerle kullanarak ve farklı tasarımlarda kanatçıklı ısı değiştiricisi kullanarak ısı transferinin iyileştirilebileceğidir.

Osterman vd. [7] binalardaki enerji tüketimini azaltmak için ısı depolamada FDM'leri bir çözüm olarak görmüşler ve çalışmalarında termal enerjiyi depolayarak hem ısıtma hem de soğutma sistemlerinde incelemişlerdir. Nümerik analizlerin sonuçlarını doğrulamak için parafin RT22 ile dolu 30 kanatçıklı plaka içeren termal depolama ünitesini deneysel olarak incelemişlerdir. Nümerik hesaplamalarda bir ticari HAD yazılımı olan FLUENT programı kullanarak iki boyutlu modelin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu ve 4mx3mx2,8m boyutlarındaki bir ofisin yıllık enerji tüketimini kışın ısıtma için % 8, yazın da soğutma için % 15 azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Tay vd. [8] TED sisteminin etkinliğinin artırılması için pimli-kanatçıklı ve düz bakır borulu ısı değiştiricilerinin nümerik analizlerini yapmışlardır. Pimli-kanatçıklı model ile düz bakır borulu ısı değiştiricilerinin tüp hacimleri aynı aralıkta kabul edilmiş ve pimli-kanatçıklı modelin ısı transfer alanı daha büyük olduğundan daha yüksek ısı transferi sağladığı, akışa bağlı olarak ortalama

etkinliğinin % 20-40 daha iyi ve faz değişim zamanının da % 25 daha kısa olduğunu gözlemlenmiştir.

Mat vd. [9] üç borulu tüplü (iç içe geçmiş üç tüp) ısı değiştiricisinde RT82 FDM kullanarak erime süresini ticari bir HAD yazılımı olan Fluent programında iki boyutlu nümerik modelde incelemişlerdir. Erime sürecinde ısı transferini üç borulu tüplü ısı değiştiricisinde içten kanatçıklı, dıştan kanatçıklı ve hem içten hem de dıştan kanatçıklı olarak üç modelde inceleyerek FDM erime oranlarında önemli bir fark olmadığını ve erime zamanının içten ve dıştan kanatçıklı üç borulu tüplü ısı değiştiricisi kullanarak erime süresinin % 43 azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Medrano vd. [10] TED sistemlerindeki FDM'lerin düşük termal iletkenlikleri yüzünden pratik uygulanabilirliğinin sınırlı olması gibi olumsuz özelliğini iyileştirebilmek için beş farklı küçük ısı değiştiricisi kullanarak, FDM'lerin erime ve katılma sırasında ısı transfer işlemini deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuçlar, bir grafit matris içine yerleştirilmiş FDM'ye sahip çift borulu ısı değiştiricisinin, ısı transfer katsayısı bakımından en yüksek değere sahip olduğunu göstermiştir.

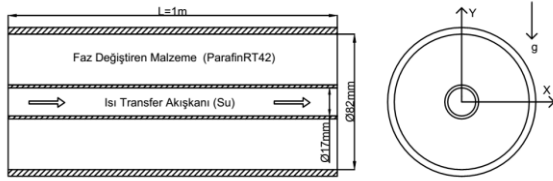
Hosseini vd. [11] çalışmalarında çift borulu ısı değiştiricisinde ticari bir parafinin termal davranışını ve ITA'nın giriş sıcaklığının ısı transferi üzerindeki etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. ITA giriş sıcaklığı 70 °C'den 80 °C'ye artırıldığında toplam erime süresinin de % 19'dan % 37'ye kadar azaltılabileceğini göstermişlerdir. Böylelikle erime süresini kısaltarak daha çok enerji depolama kapasitesi de artırılmış olmaktadır.

Li ve Kong [12] gövde borulu ısı depolama ünitesinde ITA olarak hava ve su kullanarak birbirleri ile kıyaslamışlar ve faz değişiminin termal performansını nümerik olarak incelemişlerdir. FDM olarak erime sıcaklığı 41 °C, gizli ısı 140 kJ/kg olan parafin kullanmıştır. Termal depolama ünitesi faz değişimi esnasında ITA olarak hava kullanıldığında ergime işleminin son aşamalarında; ısı transferinin çok düşük olduğu, istenilen hava sıcaklığı ve hızının yeterli

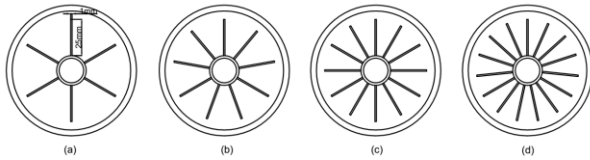
olmadığını gözlemlemişlerdir. Aynı şekilde ITA olarak su kullanıldığında suyun yoğunluğu ve özgül ısı kapasitesi büyük olduğundan ergime işleminin hızla artarak havaya göre çok kısa sürede gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Jmal va Baccar [13] iklimlendirme sistemleri için kanatçıklı ısı değiştiricisi içindeki FDM'nin katılaşma sürecini ve ısı transferi gelişiminde kanatçık sayısının etkilerini nümerik olarak çalışmışlardır. Kanatçıklı yapının olması ITA'ya FDM'den enerji aktarımını hızlandırdığı, deşarj zamanının azaldığı ve akışkanın çıkış sıcaklığının arttığını gözlemlemişlerdir.

Yukarıda verilen çalışmalar değerlendirildiğinde ve FDM'nin düşük ısı iletkenliği dikkate alındığında, FDM'nin ITA'dan kısa sürede ısı enerjisini alıp depolayabilmesi etkin bir TED sistemi için önemlidir. Bu çalışmadaki amaç, deneysel çalışılmış bir literatür çalışması referans alınarak Şekil 1'deki kanatçiksiz modelde nümerik çalışmayı doğrulamak, ITA'dan FDM'ye olan ısı transferinin etkisini farklı ITA sıcaklıkları için gözlemek ve tasarladığımız kanatçıklı modelde FDM'nin ısı davranışını ve erime süresine etkisini araştırmaktır.



Şekil 1.a. TED sistemlerinde kullanılan iç içe borulu ısı değiştiricisinin iki boyutlu fiziksel modeli



Şekil 1.b. TED sistemlerinde kullanılan iç içe borulu ısı değiştiricisinin iki boyutlu kanatçıklı fiziksel modelleri. (a) 6 kanatçık, (b) 9 kanatçık, (c) 12 kanatçık, (d) 15 kanatçık

2. SİSTEMİN TANITIMI (SYSTEM DESCRIPTION)

Fiziksel modelin şematik görünümü Şekil 1.a'da gösterilmektedir. Isı depolama ünitesi eş merkezli iki silindirik borudan oluşmaktadır. İçteki borudan ısı transfer akışkanı geçmekte, dıştaki boru ise FDM ile doludur. Paslanmaz çelikten yapılmış içteki borunun çapı 17 mm ve kalınlığı 3,5 mm, demirden yapılmış dıştaki borunun çapı 82 mm ve kalınlığı 8 mm'dir. İç borudan akan ısı transfer akışkanı olarak su, FDM olarak ise Çizelge 2'de özellikleri verilen Parafin RT42 seçilmiştir. Sayısal modeli doğrulamak için, sistemin boyutları ve malzemeler Cano vd. [14] tarafından deneysel olarak incelenen yatay gövde-borulu ısı değiştirici ile aynı

olacak şekilde seçilmiştir. FDM'nin erime sürecinde kanat sayısının ısı transferine etkisini incelemek için içteki boruya Şekil 1.b'de gösterildiği gibi 6, 9, 12 ve 15 adet ve kanat etkenlikleri sırasıyla 2,66, 3,49, 4,32 ve 5,15 olan 25 mm uzunluğunda ve 1 mm kalınlığında kanatçıklar eklenerek sayısal çalışmalar yapılmıştır.

Çizelge 2. Parafin RT42'nin Termofiziksel Özellikleri [14]

Özellikler	FDM
Erime sıcaklığı	38 - 42 [°C]
Yoğunluk (katı)	880 [kg/m ³]
Yoğunluk (sıvı)	760 [kg/m ³]
Özgül ısı	2000 [J/kg.K]
Isıl iletkenliği	0.2 [W/m.K]
Gizli ısı	165 [kJ/kg]
Hacimsel genleşme	12,5 [%]

3. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

3.1. Sayısal Yaklaşım (Numerical Approach)

Isı değiştiricisinde faz değişiminin sayısal analizi entalpi-gözeneklilik metoduna dayanmaktadır. Bu methoda FDM'nin katı-sıvı arayüz değişiminin her zaman adımında izlenmesine gerek yoktur ve yönetici denklemler tek fazlı denklemlere benzediğinden çok boyutlu problemlere kolaylıkla uygulanabilir. Ayrıca faz değişiminin hem sabit sıcaklıkta hem de bir sıcaklık aralığında meydana geldiği problemlerde yaygın kullanılmaktadır. Sayısal analizlerde sonlu hacimler yöntemini kullanan ANSYS Fluent programı, faz değişim problemlerinde entalpi-gözeneklilik metoduna göre çözümleri yapmaktadır [15]. Bu çalışmada sayısal analizi basitleştirmek için bazı kabuller yapılmıştır ve referans alınan deneysel çalışma [14] ile örtüşmektedir. Bunlar:

- FDM homojen ve izotropik yapıdadır.
- FDM'nin termofiziksel özellikleri katı ve sıvı faz için farklıdır fakat sıcaklıktan bağımsızdır.
- FDM'de faz değişim süreci izotermal kabul edilmiştir.
- Hem iletim hem de doğal taşınım ile ısı transferi olmaktadır.
- Sıvı durumunda FDM'nin hareketi laminar, süresiz ve sıkıştırılmazdır.

Bu kabullere göre iki boyutlu zamana bağlı laminar akış için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıda ifade edilmiştir.

Süreklilik Denklemi:

$$\Delta \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

Momentum Denklemi:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \frac{1}{\rho} \left(-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \beta (T - T_{ref}) \right) + \vec{S} \quad (2)$$

Enerji Denklemi:

$$\frac{\partial h_{duy}}{\partial t} + \frac{\partial h_{gizli}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} h_{duy}) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho c_p} \nabla h_{duy} \right) \quad (3)$$

Malzemenin entalpisi duyulur, h_{duy} , ve gizli ısı, h_{gizli} , entalpisinin toplamıdır [15]:

$$h_{top} = h_{duy} + h_{gizli} \quad (4)$$

burada,

$$h_{duy} = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (5)$$

çarpım durumundaki sabit olan c_p , integralden ayrılır. Gizli ısı içeriği malzemenin gizli ısısı cinsinden yazılabilir, L :

$$h_{gizli} = \sum_{i=1}^n \lambda_i L \quad (6)$$

burada h_{gizli} sıfır (katı hal için) ile L (sıvı hal için) arasında değişebilir. Toplam sembolü, toplam gizli ısının, her zaman adımında incelenen alana dahil edilen her hücrenin gizli ısısının bir toplamı yoluyla hesaplandığını ima eder. Sıvı oranı, λ , aşağıdaki gibi tarif edilir [15]:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{h_{gizli}}{L} = 0 \text{ ise } T < T_{katı} \\ \frac{h_{gizli}}{L} = 1 \text{ ise } T > T_{sıvı} \\ \frac{h_{gizli}}{L} = \frac{T - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}} \text{ ise } T_{katı} < T < T_{sıvı} \end{cases} \quad (7)$$

Eşitlik 2'deki \vec{S} , aşağıdaki eşitlikte tanımlanan kaynak terimidir. Bu parametre, konvektif ısı transferinde faz değişim etkilerini eklemek için momentum denklemine eklenir.

$$\vec{S} = \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3} A_{lapa} \vec{V} \quad (8)$$

Bu eşitlikteki A_{lapa} katsayısı lapa bölge sabitidir. Bu sabit genellikle 10^4 ile 10^7 arasında bir değer alır [16]. Bu çalışmada 10^6 alınmıştır.

Yönetici denklemler, ANSYS Fluent yazılımında süreksiz çözücüsünde (unsteady solver) sonlu hacim yöntemi ile ayrık hale getirilir. Erime/katılaşma modeli, entalpi-gözeneklilik tekniği kullanılarak laminer akış için Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesi ile incelenmektedir. ITA ve FDM için yönetici denklemler, Fluent'in çözücü ayarındaki Coupled (Birleşik) algoritmasıyla tüm hesaplama alanlarında aynı anda çözülür. Bu çalışmada, doğal taşınım için tavsiye edilen PRESTO (Pressure Staggering Option) basınç için ayrıklaştırma yöntemi olarak uygulanmıştır. Momentum ve enerji denklemlerini çözmek için ise Second Order Upwind (İkinci derece Upwind) metodu kullanılmıştır.

3. 2. Başlangıç ve Sınır Şartları (Initial and Boundary Conditions)

Başlangıçta FDM katı haldedir ve FDM başlangıç sıcaklığı 26 °C'dir. Isı transfer akışkanının geçtiği iç borunun tüm yüzeyi ise 60 °C sabit sıcaklıktadır. Başlangıç ve sınır şartları şu şekilde yazılabilir:

$$t = 0 \rightarrow T = T_i \quad (9)$$

$$r = r_i \rightarrow T = T_{ITA} \quad (10)$$

$$r = r_o \rightarrow \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

burada t , zaman, T , herhangi bir andaki sıcaklık, T_i , başlangıç sıcaklığı, T_{ITA} , ısı transfer akışkanının

sıcaklığı, r , yarıçap, r_i , ısı değiştiricisinin içteki borunun yarıçapı, r_o , dıştaki borunun yarıçapıdır [17].

3. 3. Isı Değiştiricisinde Kanat Etkenliği (Fin Efficiency in Heat Exchanger)

Bir ısı değiştiricisinde, ısı transferini iyileştirme yöntemlerinden biri olan etkin yüzey alanını arttıran kanatçıklar kullanılabilir. Kanatçıkların performansını, kanat etkenliği olarak adlandırılan, kanatçıklı halde olan ısı geçişinin kanatsız halde olan ısı geçişine olan oranı belirler. Etkin bir kanat tasarımı için gerekli kriter kanat etkenliğinin $\varepsilon \geq 2$ olması gereklidir [17]. Kanat etkenliği formülü aşağıda verilen eşitlik (12) ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{h A_c \Delta T} \quad (12)$$

Burada q_f , kanat ucundan akışkana toplam ısı geçişi, h , ısı taşınım katsayısı, A_c , alanı ve ΔT , sıcak ve soğuk akışkan arasındaki sıcaklık farkıdır. Kanat olması durumunda akışkana geçen ısı miktarı eşitlik (13)'de gösterilmiştir.

$$q_f = \sqrt{h P k A_c \Delta T} \frac{\sinh(mL) - h/k m \cosh(mL)}{\cosh(mL) + h/k m \sinh(mL)} \quad (13)$$

m katsayısı, P , kanadın çevre uzunluğu ve A_c , alanı ise aşağıda verilen eşitlik (14), (15) ve (16) ile hesaplanmaktadır.

$$m^2 = \frac{h P}{k A_c} \quad (14)$$

$$P = 2(t + z) \quad (15)$$

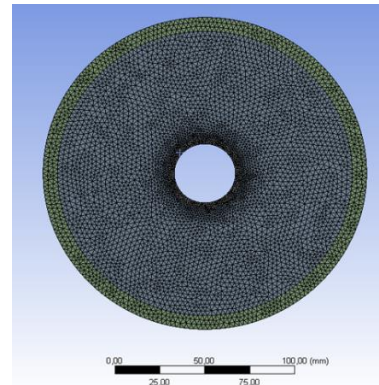
$$A_c = z * t \quad (16)$$

burada z , kanadın genişliği, t , kanadın kalınlığıdır [18].

3. 4. Eleman Sayısı ve Zaman Adımından

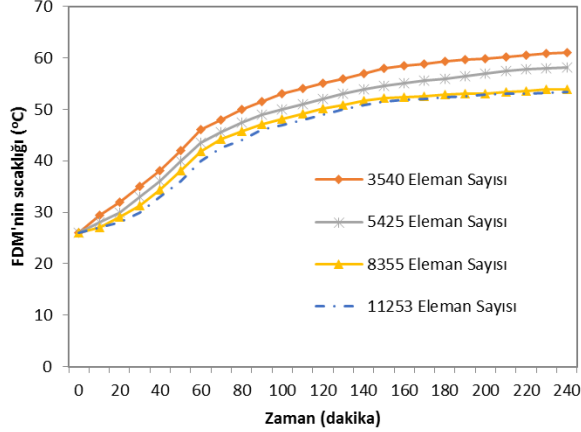
Bağımsızlık (Independence of Mesh and Time Step)

HAD analizlerinde hesaplama yapılacak bölge çok sayıda küçük elemanlara (hücrelere) bölünerek, her bir küçük eleman için yönetici denklemler uygulanır. Bu küçük elemanlar ne kadar küçük olursa çözüm hassasiyetide o kadar iyi olmaktadır. Fakat analizi yapılan modelin geometrisi ve boyutuna göre uygun bir ağ yapısı seçilmese, HAD analizi ya gereğinden fazla uzun sürebilir ya da daha yüksek kapasiteli bilgisayar kullanımını gerektirir. Zamana bağlı çözümlerinde zaman adımı küçüldükçe de hesaplama maliyeti artmaktadır [19]. Şekil 2'de 8355 elemandan oluşan iki boyutlu modelin ağ yapısı (mesh) gösterilmektedir.



Şekil 2. 8355 elemanlı oluşturulan ağ yapısı

İki boyutlu zamana bağlı yapılan bu çalışmada kanatçiksız model için dört farklı 3540, 5425, 8355 ve 11253 eleman sayısı (mesh); üç farklı 0,2, 0,1 ve 0,05 zaman adımı çalışılmıştır. Şekil 4’de eleman sayılarının FDM sıcaklık-zaman grafiği gösterilmektedir. 0,1 saniyelik zaman adımı ve 8355 eleman sayısı bu çalışma için yeterli bulunmuştur. Şekil 3’de de görüldüğü gibi 8355 eleman sayısından sonra eleman sayısı arttıkça önemli bir değişiklik olmamaktadır.



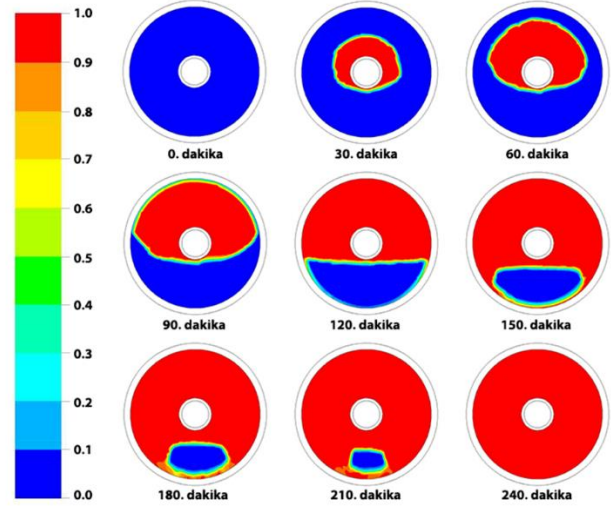
Şekil 3. FDM'nin sıcaklığına ve zamana bağlı sayısal çalışmanın eleman sayısından bağımsızlığı

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Cano vd. [14] dört farklı FDM ve üç farklı ITA akış oranlarıyla bir termal enerji depolayan ısı değiştiricisinin performansını incelemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Akış oranı 0,4 l/dk ve sıcaklığı 60 °C olan ısı transfer akışkanıyla FDM (Parafin RT42)'yi 240 dakikada eritmişlerdir. Bu çalışma ile aynı sınır şartları kullanılarak FDM'nin erime sürecindeki zamanla değişen sıcaklığa göre gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarının % 7,8 oranında bir farkla aynı sonuçlar elde edilmiştir ve bu çalışma referans olarak kullanılmıştır. Bu ısı değiştiricisinde ısı transfer akışkanının sıcaklığı ile eriyen (enerjiyi depolayan) FDM'nin ısıl davranışı zamana bağlı olarak ANSYS Fluent programında iki boyutlu modellenmiştir.

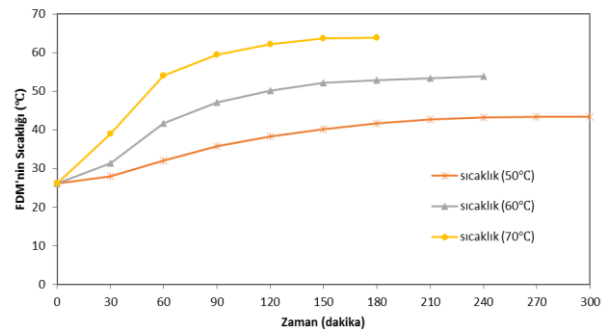
Şekil 4’de ITA sıcaklığı 60 °C olan iç içe borulu ısı değiştiricisindeki FDM'nin erime (şarj olma) sürecinde zamanla değişen sıvı oranları (liquid fraction) gösterilmektedir. Burada mavi renk (sıvı oranının 0 olduğu bölge) katı halde olan FDM miktarını, kırmızı renkte (sıvı oranının 1 olduğu bölge) sıvı halde olan FDM miktarını belirtmektedir. İki faz birbirinden ayıran katı-sıvı arayüzüne lapa bölge (mushy zone) denilmektedir. Katı-sıvı faz arasında oluşan yeşil-sarı renk ise (sıvı oranının 0 ile 1 arasında olduğu bölge) lapa bölgesini göstermektedir. Erime işleminin başlamasıyla, içteki sıcak duvardan katı FDM'ye olan ısı transferi, FDM'nin erimesine neden olur. Başlangıçta tüm bölgelerde iletim ile ısı transferi olmaktadır. Daha sonra FDM'nin erimesiyle doğal taşınım etkisini göstermeye

başlamaktadır. Isı, doğal taşınımın etkisiyle FDM ile dolu ısı değiştiricisinin üst bölgesine doğru yükselir ve eriyen sıvı FDM, yoğunluğu daha düşük olduğundan üst kısımlarda kalmaktadır. Başlangıçta erime oranı çok hızlıdır fakat zamanla yavaşlamaya başlamaktadır. FDM ısıyı, ITA'dan alır ve erimenin başlamasıyla depolar. FDM tamamen 240 dakika içerisinde erimektedir.



Şekil 4. Erime (şarj olma) sırasında ısı değiştiricisindeki FDM'nin zamanla değişen sıvı oranı

Erime süreci ısı transfer akışkanının sıcaklığına ve akış oranına (akışkanın debisine) bağlıdır. İki boyutlu kanatçiksız modelde ITA sıcaklığı 50 °C, 60 °C ve 70 °C ile yapılan çalışmanın grafiği Şekil 5’de verilmiştir. ITA sıcaklığı 50 °C iken FDM 300 dakikada, 60 °C iken 240 dakikada ve 70 °C iken ise 180 dakikada erimektedir. ITA sıcaklığı arttıkça akışın entalpiside arttığından ısı transferi daha hızlı gerçekleşmektedir ve FDM'nin erime süresi de önemli derecede azalmaktadır.



Şekil 5. ITA sıcaklıkları 50 °C, 60 °C ve 70°C olan ısı değiştiricisindeki FDM'lerin sıcaklık-zaman grafiği

FDM'nin erime süresi çok önemlidir ve bu konuda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu bu yöndedir. Erime süresinin azaltılmasının bir diğer yöntemi ise etkin bir ısı değiştiricisi tasarımıdır. Basitliği, kolay üretilmesi ve düşük maliyetli olmasından dolayı FDM'deki ısı transferini artırmanın en iyi yolu kanatçık kullanımındır [20]. Ayrıca FDM'nin düşük termal iletkenliğinden

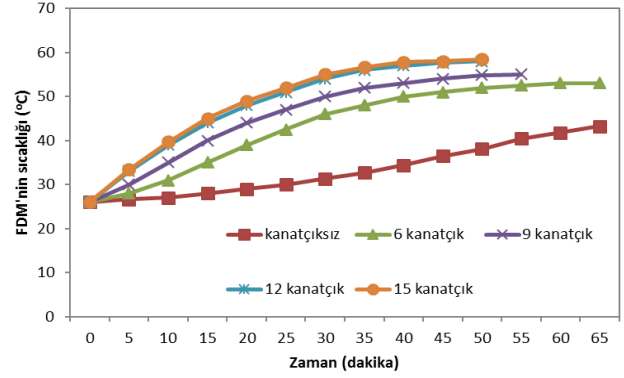
dolayı, ısı değiştiricisinde kanatçık kullanımı ısı transferini büyük oranda iyileştirmektedir.

Isı değiştiricilerinin kanat etkenliği bölüm 3.3'de verilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır. 6, 9, 12 ve 15 adet kanatçık için yapılan hesaplara göre kanat etkenlikleri sırasıyla 2,66, 3,49, 4,32 ve 5,15 bulunmuştur. Kanat etkenlikleri 2'nin üzerinde olduğu için bu tasarımlar uygun görülmüştür.

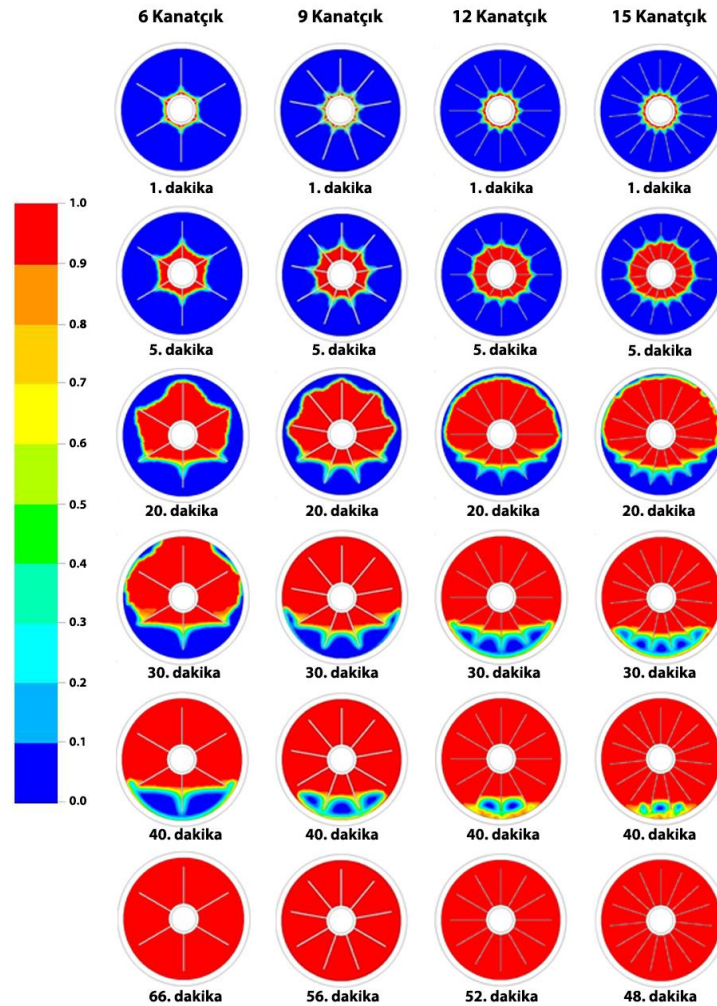
6, 9, 12 ve 15 adet kanatçık kullanılarak yapılan çalışmanın FDM sıcaklık-zaman grafiği Şekil 6'da, sıvı oranları ise Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil 7'de de görüldüğü gibi kanatçık sayısı arttıkça ısı transfer hızında önemli ölçüde artmıştır. Bu kanatçıklı modellerde kanatçiksız modele göre yüzey alanı arttığından iletimle olan ısı transferi daha fazladır. Kanatçıklardan iletimle olan ısı transferi FDM'yi daha hızlı bir şekilde eritmeye başlamıştır. Ayrıca FDM'nin erimeye başlamasıyla doğal taşınım ile olan ısı transferi, ısı değiştiricisinin hem üst hem de alt taraflarında kanatçiksız modele göre daha hızlı olmaktadır ve erime süresi oldukça kısalmıştır.

6 kanatçıklı modelin sıvı oranına bakıldığında 9, 12 ve 15 kanatçıklı modele göre FDM'nin biraz daha yavaş eridiği anlaşılmaktadır. Kanatçık sayısı arttıkça FDM daha hızlı

bir şekilde erimiştir. Fakat 12 ve 15 kanatçıklı modeller arasında sıvı oranları ve erime süreleri için büyük bir fark görülmemektedir. Şekil 7'de de görüldüğü gibi FDM, 6 adet kanatçıklı modelde 66 dakikada, 9 adet kanatçıklı modelde 56 dakikada, 12 adet kanatçıklı modelde 52 dakikada ve 15 adet kanatçıklı modelde ise 48 dakikada tamamen erimektedir. Kanatçiksız modele göre erime süreleri sırasıyla %72.5, %76.7, %78.4 ve %80 oranlarında azalmıştır.



Şekil 6. Kanatçiksız ve kanatçıklı ısı değiştiricisindeki FDM'lerin sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 7. Erime (şarj olma) sırasında 6, 9, 12 ve 15 kanatçıklı ısı değiştiricisindeki FDM'nin zamanla değişen sıvı oranları

5. BULGULAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada FDM olarak kullanılan Parafin RT42 için erime sürecinin, hem kanatçısız hemde kanatçıklı modelde sayısal çalışması yapılmıştır ve kanatçısız model literatürdeki deneysel bir çalışma ile doğrulanmıştır. Sayısal çalışmalar iki boyutlu, zamana bağlı olup ANSYS Fluent ticari yazılım paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen veriler kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- FDM ile dolu iç içe borulu ısı değiştiricisinin ITA sıcaklıkları 50 °C, 60 °C ve 70 °C olduğundaki termal davranışı ve FDM'nin erime süreci incelenmiştir. Isı transfer akışkanının sıcaklığı arttıkça FDM'ye olan ısı arttığı için daha kısa sürede erimekte ve yani daha hızlı ısıyı depolamaktadır (şarj olmaktadır).
- Isı değiştiricisinde kanat etkenliği 2,66, 3,49, 4,32 ve 5,15 olan 6, 9, 12 ve 15 adet kanatçık kullanılmasıyla ısı transfer alanı artırılmış ve iletimle olan ısı transferi de arttığı için FDM ciddi oranda hızla erimekte.
- Termal enerji depolama ünitesindeki ısı değiştiricisi tasarımlarında erime süresini %80'lere kadar azaltan kanatçıklı bir tasarım yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.
- Bu sayısal çalışmanın deneysel çalışması da yapılarak uygulanabilirliği detaylı olarak analiz edilebilir.
- Parafin dışındaki organik FDM'ler kullanılarak sayısal analizleri yapılabilir ve TED sistemindeki ısı davranışları incelenebilir.
- Bu çalışmadaki tasarım parametrelerinden farklı olarak FDM ile uyumlu yeni kanatçık tasarımları yapılarak FDM'nin erime ve katılma süreçleri incelenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Iten, M. and Liu, S., "A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air- TES systems", *Energy Conversion and Management*, 77: 608-627, (2014).
- [2] Khadiran, T., Hussein, M.Z., Zainal, Z. and Rusli, R., "Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57: 916-928, (2016).
- [3] Rathod, M.K. and Banerjee, J., "Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18: 246-258, (2013).
- [4] Chow, L.C., Zhong, J.K. and Beam, J.E., "Thermal conductivity enhancement for phase change storage media", *Heat and Mass Transfer*, 23: 91-100, (1996).
- [5] Velraj, R., Seeniraj, R.V., Hafner, B., Faber, C. and Schwarzer, K., "Heat transfer enhancement in a latent heat storage system", *Solar Energy*, 65: 171-180, (1999).
- [6] Marin, J.M., Zalba, B., Cabeza, L.F. and Mehling, H., "Improvement of a thermal energy storage using plates with paraffin-graphite composite", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48: 2561-2570, (2005).
- [7] Osterman, E., Butala, V. and Stritih, U., "PCM thermal storage system for 'free' heating and cooling of buildings", *Energy and Buildings*, 106: 125-133, (2015).
- [8] Tay, N.H.S., Bruno, F. and Belusko, M., "Comparison of pinned and finned tubes in a phase change thermal energy storage system using CFD", *Applied Energy*, 104: 79-86, (2013).
- [9] Mat, S., Al-Abidi, A.A., Sopian, K., Sulaiman, M.Y. and Mohammad, A.Y., "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins", *Energy Conversion and Management*, 74: 223-236, (2013).
- [10] Medrano, M., Yilmaz, M.O., Nogués, M., Martorell, I., Roca, J. and Cabeza, L.F., "Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems", *Applied Energy*, 86: 2047-2055, (2009).
- [11] Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A., Sedighi, K. and Rahimi, M., "A combined experimental and computational study on the melting behavior of a medium temperature phase change storage material inside shell and tube heat exchanger", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39: 1416-1424, (2012).
- [12] Li, W. and Kong, C., "Numerical study on the thermal performance of a shell and tube phase change heat storage unit during melting process", *Advances in Mechanical Engineering*, 6: 1-7, (2014).
- [13] Jmal, I. and Baccar, M., "Numerical study of PCM solidification in a finned tube thermal storage including natural convection", *Applied Thermal Engineering*, 84: 320-330, (2015).
- [14] Cano, D., Funéz, C., Rodriguez, L., Valverde, J.L. and Sanchez-Silva, L., "Experimental investigation of a thermal storage system using phase change materials", *Applied Thermal Engineering*, 107: 264-270, (2016).
- [15] ANSYS, Inc. Fluent Theory Guide, USA, November 28, Chp:21.1-14, (2008).
- [16] Pahamli, Y., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A. and Bahrampoury, R., "Analysis of the effect of eccentricity and operational parameters in PCM-filled single-pass shell and tube heat exchangers", *Renewable Energy*, 97: 344-357, (2016).
- [17] Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*", John Wiley Sons, New York, 303-577, (2003).
- [18] Halıcı, F. and Gündüz, M., "Örneklerle ısı geçişi", Birsan Yayınevi, İstanbul, 126-168, (2007).
- [19] Çengel, Y. A. and Cimbala, J. M. "Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları" (çev.T. Engin, H. R. Öz, H. Küçük ve Ş. Çeşmeci), Güven Bilimsel Yayınevi, İzmir, 818-830, (2006).
- [20] Eslamnezhad, H. and Rahimi, A.B., "Enhance heat transfer for phase-change materials in triplex tube heat exchanger with selected arrangements of fins", *Applied Thermal Engineering*, 113: 813-821, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlemin aşınma davranışları üzerindeki etkisi

The effects of the industrial cryogenic process on the wear behaviours of AISI D2 cold work tool steels

Yazar(lar) (Author(s)): Enes ERSÖZ¹, İsmail OVALI²

ORCID¹: 0000-0002-1159-9544

ORCID²: 0000-0002-8193-0060

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ersöz E. ve Ovalı I., “AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlemin aşınma davranışları üzerindeki etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 411-417, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.386960

AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğine Uygulanan Endüstriyel Kriyojenik İşlemin Aşınma Davranışları Üzerindeki Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Enes ERSÖZ*, İsmail OVALI

Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 30.05.2017 ; Kabul/Accepted : 26.07.2017)

ÖZ

Bu çalışmada, AISI D2 (DIN 1.2379) soğuk iş takım çeliğine, konvansiyonel ısı işlemlere takiben farklı bekletme sürelerinde (2 saat ve 6 saat) endüstriyel kriyojenik işlem uygulanmış olup bu işlemlerin aşınma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Abrasif aşınma testinde tüm grup numunelerine 5, 10 ve 15 N kuvvetleri uygulanmış olup, test kuru ortamda sabit kayma hızında (3,16 m/s) ve üç farklı aşınma mesafesinde yapılmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçları incelendiğinde kriyojenik işlemlerin AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin aşınma davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Kriyojenik işlemde artan bekleme süresi ile numunelerin aşınma dirençlerinin arttığı belirlenmiştir. En yüksek aşınma direnci altı saat bekleme süresine sahip numunede elde edilmiştir. Diğer taraftan en düşük aşınma direnci işlem uygulanmamış (dökülmüş halde) numunede elde edilmiştir. Kriyojenik işlem parametrelerinin kontrolü ile AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin aşınma davranışlarının optimize edilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI D2, DIN 1.2379, kriyojenik işlem, sertlik testi, aşınma testi.

The Effects of The Industrial Cryogenic Process on The Wear Behaviours of AISI D2 Cold Work Tool Steels

ABSTRACT

In this study, industrial cryogenic process after conventional heat treatment process for various holding time was applied to AISI D2 (DIN 1.2379) cold work tool steel. The effects of the industrial cryogenic process on the wear behavior was investigated. In the wear test 5,10 and 15 N forces were carried out to all group specimens at a constant shear rate (3,16 m/s) and three different wear distances. Experimental results show that cryogenic processing of AISI D2 cold work tool steels have a significant effect on wear behavior. It is determined that the cryogenic process increases the wear resistance of the samples with increasing sliding time. On the other hand, the lowest wear resistance was obtained in the as-cast sample. It has been determined that the wear behavior of the AISI D2 cold work tool steel can be optimized by controlling the cryogenic process parameters.

Keywords: AISI D2, DIN 1.2379, cryogenic process, hardness test, wear test.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AISI D2 çelikleri karbon ve krom oranı yüksek soğuk takım çelikleri olarak bilinirler. Endüstride Sverker 21 olarak geçen bu çeliklerin sertleştirilebilirlikleri yüksek olduğu için iyi bir aşınma direnci gösterirler.

Ayrıca yüksek tokluk değerlerine sahip olduğu da bilinmektedir. Isıl işlem yapıldığı takdirde 63-65 HRC sertliklerine ulaşabilmektedir.

Endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadırlar (derin çekme kalıplar 1, zimbalar, plastik kırma bıçakları vs.) [1]. Bu malzemenin aşınma dayanımı ve tokluk dışında birçok özelliği de içeriğinde bulundurmaktadır. Özelliklerinin geniş kapsamlı olmasının nedenlerinden biri de yapısında yüksek oranda karbon ve krom elementlerini

bulundurmasıdır. Diğer özellikleri ise yüksek basma dayanımı, yüksek tokluk, yüksek meneviş direnci, ısıl işlemlerde mükemmel boyutsal kararlılık, PVD işlemine uygunluk, ikincil sertlik özelliğidir [2].

Kriyojenik işlem malzemeye uygulanan konvansiyonel ısı işlemlerin ardından yapılan özel bir işlemdir. Bu işlem genel olarak aşınma dayanımını arttırmak için yapılmaktadır. Kriyojenik işlemde malzemeye su verildikten sonra, -196°C'ye kadar soğutulmaktadır. 0°C'nin altında yapılan bu soğutma işleminde malzemenin yapısının tamamen değişmesi beklenir. Su verme işleminden sonra mikroyapıda kalan kalıntı östenitler bu işlemle giderilir ve ardından soğutma ortamından çıkarılarak oda sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır [3]. Kriyojenik işlem derin ve sıg kriyojenik işlem olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Farklı alanlarda kullanılan birçok takım çeliğinde aşınma

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : iovali@pau.edu.tr

olayı meydana gelir. Bu çeliklerde östenitleme işleminin oda sıcaklığına kadar soğutma işlemi gerçekleştirilir, sert ve kırılabilir bir yapı olan martenzit oluşur. Oda sıcaklığına kadar soğutulmuş takım çeliklerinin mikroyapısında metastabil (yarı kararlı) faz olarak da bilinen kalıntı östenit kalır. Kalıntı östeniti ortadan kaldırmak için kriyojenik işlem uygulanır. Kriyojenik işlemin ardından temperleme ısıl işlemi yapılmaktadır. Bu ısıl işlem ile mikroyapıda ki eta karbürlerin çökmesi sağlanmaktadır. Eta karbürlerin çökmesi ve kalıntı östenitlerin yok edilmesi malzemenin aşınma dayanımının artmasına neden olmaktadır. Kriyojenik işlem özellikle havacılık ve otomotiv sektöründe kullanılmakla birlikte birçok sektörel faaliyette kullanılmaktadır [4,5].

Yamaoğlu çalışmasında, kriyojenik işleminde içinde olduğu 4 farklı işlem uygulamıştır. Aşınma deney numuneleri 800 mesh, 1000 mesh ve 1200 mesh zımpara üzerinde 10 N, 20N ve 30 N yük altında test edilmiştir. 800,1000 ve 1200 mesh zımparalarda uygulanan deneylerde en iyi aşınma dayanımı su verildikten sonra kriyojenik işlem uygulanarak elde edilmiştir. 800 mesh ve 1000 mesh zımparada en az aşınma kaybı 10 N yük altında, 1200 mesh zımparada ise 20 N yük altında görülmüştür. Malzemeye uygulanan yük arttıkça aşınma dayanımının azaldığı, aşınma kaybının ise arttığı gözlenmiştir [6].

D. Das ve arkadaşları çalışmalarında, AISI D2 soğuk takım çeliklerinde derin kriyojenik işlemin kalıntı östeniti belirgin bir biçimde azalttığını ve ikincil karbürlerin çökme davranışı gösterdiğini belirtmişlerdir. Kriyojenik işlem ile sertliğin arttığı gözlenmiştir. Kriyojenik işlemin AISI D2 soğuk takım çeliğinin aşınma dayanımını önemli ölçüde arttırdığını ancak artış oranının uygulanan yüke bağlı olduğu sonucuna varmışlardır [7].

Literatür çalışmaları incelendiğinde kriyojenik işlemin AISI D2 soğuk takım çeliğinin aşınma davranışları üzerindeki etkisini araştıran çalışmaların sınırlı olduğu, yapılan çalışmaların genel olarak malzemenin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada, AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlem parametrelerinin aşınma davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Deneyel çalışmalarda, kullanım alanı geniş olan ve endüstride Sverker 21 olarak da bilinen AISI D2 soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Kullanılmış olan malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. AISI D2 soğuk takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu (% Ağırlık) (Chemical composition wt %)

Kimyasal Kompozisyon (% Ağırlık)								
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Co
1,55	0,30	0,30	11,30	0,75	-	0,75	-	-

Isıl işlemler ve kriyojenik işlem parametreleri Çizelge 2 ve Çizelge 3’te verilmiştir. Kriyojenik işlemler sonrası temperleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

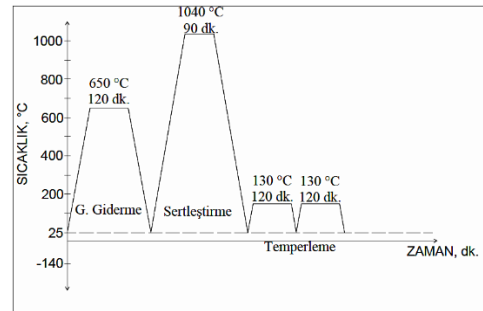
Çizelge 2. Isıl işlem parametreleri (Heat treatment parameters)

Isıl İşlem	Gerilim Giderme	Östenitleme + Su verme	Temperleme
SICAKLIK	650°C	1040°C	130°C

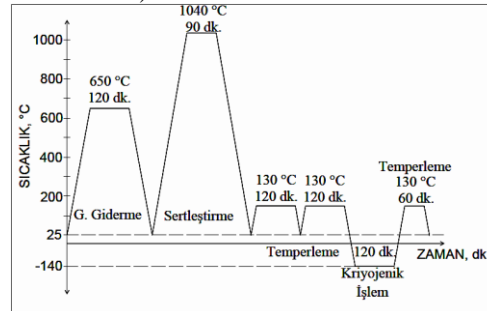
Çizelge 3. Kriyojenik işlem parametreleri (Cryogenic process parameter)

Numune Kodu	Uygulanan Isıl İşlemler	Kriyojenik İşlem (-140)	Temperleme
1	-	-	-
2	Gerilim Giderme	-	-
3	Su Verme	2 saat	130°C
4	Temperleme	6 saat	130°C

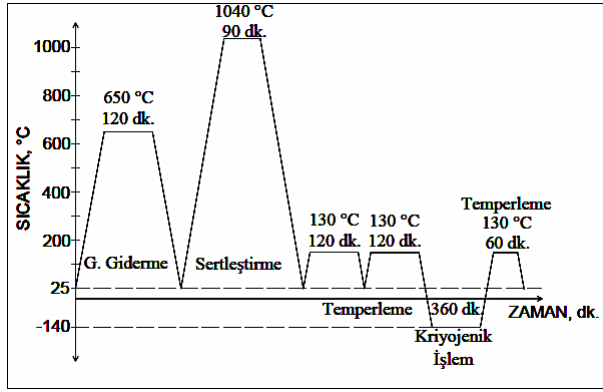
Numuneler işlem uygulanmamış (döküm halinde), konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış, konvansiyonel ısıl işlem + kriyojenik işlem uygulanmış (2 saat) + temperlenmiş, konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış + kriyojenik işlem uygulanmış (6 saat) + temperlenmiş olmak üzere dört gruba ayrılmıştır. Kriyojenik işlemler sıvı azot ortamında gerçekleştirilmiştir. Sertleştirme işlemleri vakum fırınında, kriyojenik işlemler ise PLC kontrole sahip mikro işlemcili kriyojenik kamara ünitelerinde yapılmıştır. Uygulanan işlemlerin sıcaklık-zaman grafikleri Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 1. Konvansiyonel ısıl işlem planı (Summary of heat treatments)



Şekil 2. Kriyojenik işlem (2 saat) planı (Summary of cryogenic process-2)

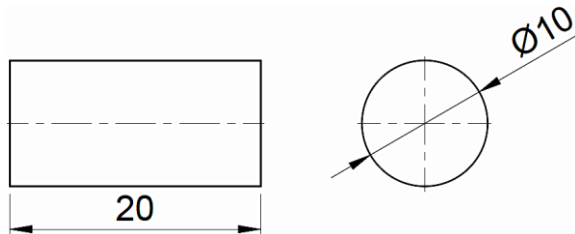


Şekil 3. Kriyojenik işlem (6 saat) planı (Summary of cryogenic process-6)

Deney numunelerinin yapısında talaşlı işlem sonrası gerilmeler oluşabilmektedir. Isıl işlemler sistematik bir sıra ile gerçekleştirilmiştir. 1. İşlem; Gerilmeleri en aza indirmek amacıyla 650°C’de gerilim giderme tavlaması yapılmıştır. Ardından numunelerde yüksek aşınma dayanımı ve yüksek sertlik istendiğinden dolayı vakum fırınlarında 1040°C’de su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. 2. İşlem; Bu işlemin ardından gevrekliği yani kırılabilirliği azaltmak ve tokluğu arttırmak amacıyla 130°C’de temperleme işlemi uygulanmıştır. 3. İşlem; Ardından -140°C’de 2 saat ve 6 saat bekletme sürelerinde iki ayrı endüstriyel kriyojenik işlem uygulanmıştır. 4. İşlem; Kriyojenik işlemin ardından numunelere 130°C’de 1 saat boyunca temperleme işlemi uygulanmış ve temperlemenin ardından havada soğutulmaya bırakılmıştır.

AISI D2 soğuk iş takım çeliği numunelerinin sertlik testi ASTM E18 standardında, Rockwell C (HRC) skalası cinsinden ölçülmüştür. Üç farklı bölgeden alınan ölçülerin ortalaması alınarak sertlikler hesaplanmıştır. Sertlik testi Meba MHT-150 sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır.

Numunelerin ön talaş kaldırma işlemlerinde işlemleri universal torna tezgahında, finish işlemleri ise Taksan CNC torna tezgahında yapılmış ve istenilen boyutsal ölçülere getirilmiştir. Ø10 x 20mm boyutlarında 12 adet numune hazırlanmıştır. Ardından numunelerin çapakları temizlenmiş ve testlere hazır hale getirilmiştir. Aşınma testi numunelerinin ölçüleri Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Aşınma testi numune şekli ve ölçüleri (Wear test specimen dimension)

Ø10 x 20 mm ölçülerinde hazırlanan AISI D2 soğuk iş takım çeliği numunelerinin aşınma testi, pin-on-disk aşınma cihazında yapılmıştır. Aşınma testi herhangi bir yağlayıcı kullanılmadan oda sıcaklığında yapılmıştır.

Teste başlamadan önce aşınma yapılacak tüm yüzeyler 220 mesh SiC zımpara ile zımparalanarak tüm yüzeylerde aynı yüzey kalitesi sağlanmıştır. Numuneler aşındırıcı zımpara yüzeyine dik hareket ettirilmiş ve sürekli olarak kullanılmamış yeni bir aşındırıcı yüzeyine temas sağlanmıştır. Numunelerin ağırlık kayıpları ± 0.001 g hassasiyette elektronik terazide ölçülmüştür. Ayrıca sürtünme katsayısını belirlemek amacıyla cihaza monte edilmiş yük hücre sensörü ile sürtünme kuvvetleri ölçülerek sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Aşınma test öncesi ve sonrasında numuneler etil alkol ile temizlenip kurutulmuştur.

Abrasif aşınma testinde tüm grup numunelerine 5, 10 ve 15 N yük uygulanmış olup kayma hızı 3,16 m/s ve test süresi 30,60 ve 90 s. olarak belirlenmiştir. Abrasif aşındırıcı olarak 220 mesh aşındırıcı zımpara kullanılmıştır. Test parametreleri Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 4. Abrasif aşınma parametreleri (Wear test parameters)

Numune Numaraları	Kayma Hızı (m/s)	Yük (N)	Kayma Mesafesi (m)
Dökülmüş Halde -1	3,16	5	95
Dökülmüş Halde -2	3,16	5	190
Dökülmüş Halde -3	3,16	5	285
Dökülmüş Halde -4	3,16	10	95
Dökülmüş Halde -5	3,16	10	190
Dökülmüş Halde -6	3,16	10	285
Dökülmüş Halde -7	3,16	15	95
Dökülmüş Halde -8	3,16	15	190
Dökülmüş Halde -9	3,16	15	285
Konven-1	3,16	5	95
Konven -2	3,16	5	190
Konven -3	3,16	5	285
Konven -4	3,16	10	95
Konven -5	3,16	10	190
Konven -6	3,16	10	285
Konven -7	3,16	15	95
Konven -8	3,16	15	190
Konven -9	3,16	15	285
Kriyojenik_2-1	3,16	5	95
Kriyojenik_2-2	3,16	5	190
Kriyojenik_2-3	3,16	5	285
Kriyojenik_2-4	3,16	10	95
Kriyojenik_2-5	3,16	10	190
Kriyojenik_2-6	3,16	10	285
Kriyojenik_2-7	3,16	15	95
Kriyojenik_2-8	3,16	15	190
Kriyojenik_2-9	3,16	15	285
Kriyojenik_6-1	3,16	5	95
Kriyojenik_6-2	3,16	5	190
Kriyojenik_6-3	3,16	5	285
Kriyojenik_6-4	3,16	10	95
Kriyojenik_6-5	3,16	10	190
Kriyojenik_6-6	3,16	10	285
Kriyojenik_6-7	3,16	15	95
Kriyojenik_6-8	3,16	15	190
Kriyojenik_6-9	3,16	15	285

Testlerde meydana gelen ağırlık kayıpları tespit edilmiş ve aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak aşınma testi diyagramları karakterize edilmiştir.

$$\text{Sürtünme Katsayısı } (\mu) = \left(\frac{F}{P} \right) \quad (1)$$

burada F yük hücresi (load cell) tarafından ölçülen sürtünme kuvveti ve P numunelere uygulanan normal yüküdür [8].

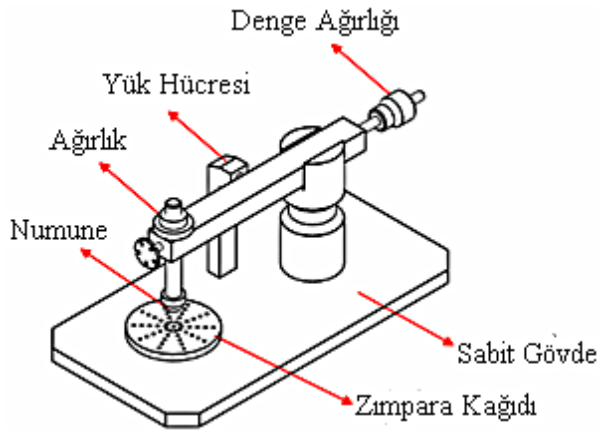
Hacim kaybı, ağırlık kaybından yararlanılarak aşağıdaki denklemden hesaplanmıştır [8]:

$$\text{HacimKaybı } (mm^3) = \left(\frac{\text{AğırlıkKaybı}(g)}{\text{Yoğunluk}(g/mm^3)} \right) \times 1000 \quad (2)$$

Aşınma testleri her numune için üç defa ölçüm gerçekleştirildi. Aşınma oranı aşağıdaki denklemden hesaplanır [8]:

$$\text{AşınmaOranı } (mm^3/m) = \left(\frac{\text{HacimKaybı}(mm^3)}{\text{KaymaMesafesi}(m)} \right) \times 1000 \quad (3)$$

Abrasif aşınma testi Pin-On-Disk aşındırma cihazında (Şekil 5) yapılmış, ağırlık ve yoğunluklar ise RADWAG elektronik terazi cihazında ölçülmüştür. Aşınma kuvvetleri takibi Esit Data Logger v1.1.9 programıyla sağlanmıştır.



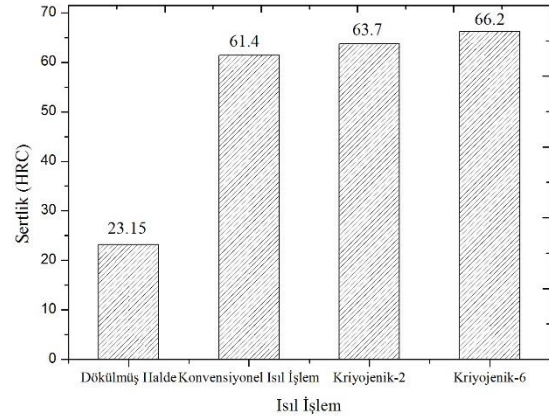
Şekil 5. Pin-on-disk aşındırma cihazı şematik gösterimi (Pin-on disk wear set-up)

Aşınma davranışını karakterize edebilmek için hacimsel kayba, aşınma oranına ve sürtünme katsayısına göre değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca kayma mesafesinin aşınma davranışına etkisini tespit edebilmek için 100 m, 200 m ve 300 m mesafelerinde testler gerçekleştirilmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

AISI D2 soğuk iş takım çelik numuneleri işlem uygulanmamış (Dökülmüş Halde) (D), konvansiyonel ısıtma işlemi uygulanmış (K), konvansiyonel ısıtma işlemi-kriyojenik işlem uygulanmış (iki saat)- temperlenmiş (K+KR+T), konvansiyonel ısıtma işlemi uygulanmış-kriyojenik işlem uygulanmış (altı saat)- temperlenmiş (K+KR+T) olmak üzere dört gruba ayrılmış ve sertlik

testi yapılmıştır. Tüm ısıtma işlemleri için üçer numune bulunmaktadır. Sertlik testi her bir numunenin üç farklı bölgesinden alınan sertliklerin ortalamasıyla yapılmıştır. 150 kg yük uygulanarak yapılan sertlik testi sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.

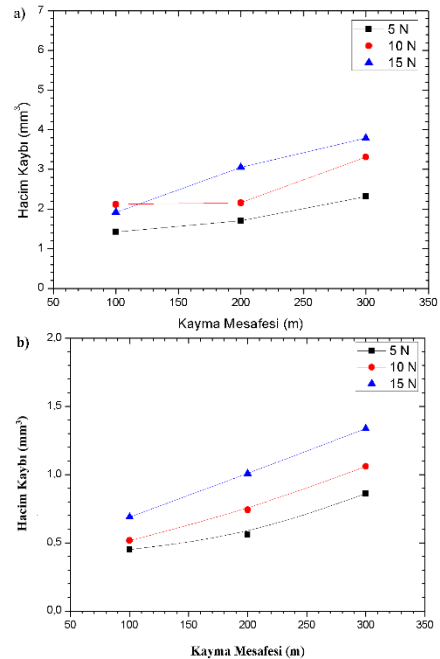


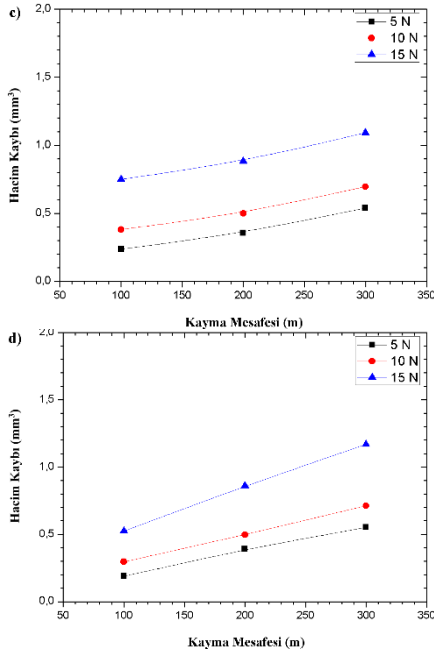
Şekil 6. Isıl işlemlerin sertlik üzerindeki etkisi (The effects of heat Treatments on the the hardness)

Yapılan sertlik testi sonuçları incelendiğinde, tüm ısıtma işlemi ve kriyojenik işlem süreçlerinde sertliklerin arttığı gözlemlenmiştir. Konvansiyonel ısıtma işlemlerinin AISI D2 soğuk iş takım çeliği numunelerinin sertliğini yaklaşık 38 HRC arttırdığı, konvansiyonel ısıtma işlemlerinin ardından uygulanan kriyojenik işlemlerinde, bekleme sürelerinden kaynaklı sertlik artışına (yaklaşık 3 HRC) neden olduğu görülmektedir.

Yapılan testlerde konvansiyonel ısıtma işlemleri sonucu elde edilen sertliklerin, iki ve altı saat bekleme sürelerinde yapılan kriyojenik işlemler sonrasında da arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bir malzemenin aşınma davranışlarını karakterize edebilmek için hacim kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı parametrelerinin etkileri araştırılmalıdır.





Şekil 7. Isıl işlemlerin hacim kaybı üzerindeki etkisi a) İşlem uygulanmamış, b) Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem (iki saat) uygulanmış, d) Kriyojenik işlem (altı saat) uygulanmış (The effects of the heat Treatments on the volume loss a)As-cast, b) Conventional Heat treatment, c) Cryogenic-2 d) Cryogenic-6)

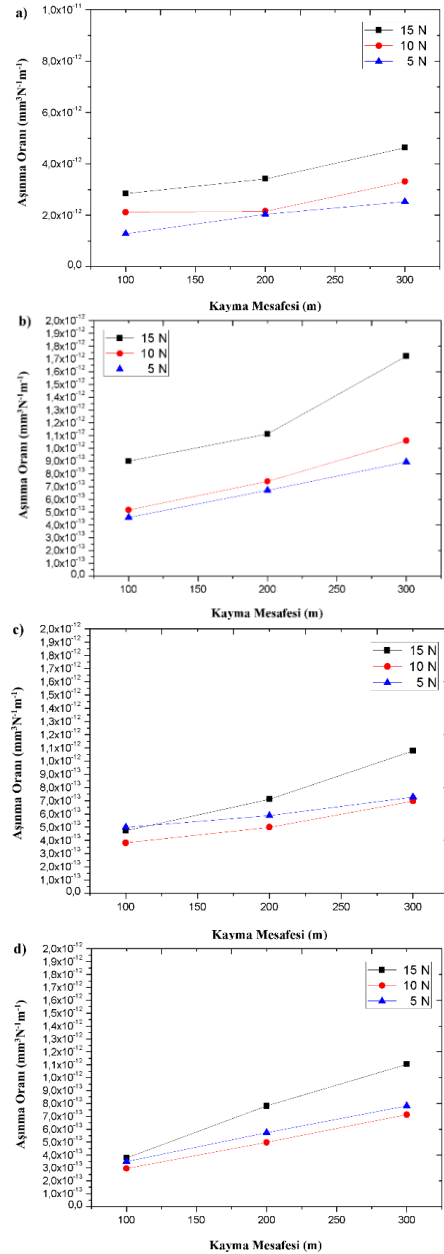
Yukarıda verilmiş olan Şekil 7’de ki grafiklerde, AISI D2 çeliğine farklı yükler (5,10 ve 15 N) altında uygulanmış aşınma testinde, kayma mesafelerine bağlı olarak hacim kaybı sonuçları görülmektedir.

Yapılan abrasif aşınma testinde kayma mesafesinin etkileri hacimsel kayıp grafiklerinden net bir şekilde fark edilmektedir. İşlem uygulanmamış (dökülmüş haldeki) numunelerin 200 m kayma mesafesine kadar ki 5 N yük altında hacim kaybı yaklaşık 0,2 mm³, 15 N yük altında yaklaşık 1 mm³’lük bir artış gösterirken, 10 N yük altında 0,2 mm³’lük bir azalma gözlenmiştir. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelerin 5,10 ve 15 N yükler altında 200 m kayma mesafesindeki hacim kaybı incelenecek olursa yaklaşık olarak (sırasıyla) 0,1 mm³, 0,2 mm³ ve 0,25 mm³’lük bir artış gözlenmiştir. İki saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5,10 ve 15 N yükleri altındaki hacim kaybı değerlerinde ise yaklaşık 0,1 mm³’lük bir artış gözlenmiştir. Ayrıca Altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin hacim kaybı yaklaşık (sırasıyla) 0,25 mm³, 0,2 mm³ ve 0,3 mm³’lük bir artış görülmüştür.

Benzer şekilde işlem uygulanmamış (dökülmüş haldeki) numunelerin 5 N yük altında ve 200-300 m kayma mesafesi aralığında ki hacim kaybında yaklaşık 0,4 mm³, 10 ve 15 N yük altında 1 mm³’lük bir artış gözlenirken, konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelerde 5,10 ve 15 N yükleri altında yaklaşık 0,3 mm³’lük bir artış gözlenmektedir. İki saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde 5 N yük altında hacim kaybında yaklaşık 0,1 mm³’lük bir artış gözlenirken, 10 ve 15 N yükleri altında 0,2 mm³’lük bir artış gözlenmektedir. Altı saat

kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde 5,10 ve 15 N yükleri altında hacim kaybında yaklaşık (sırasıyla) 0,15 mm³, 0,2 mm³ ve 0,3 mm³’lük bir artış gözlenmiştir. Şekil 3.2 ‘de görüldüğü üzere uygulanan yükün artmasıyla, hacim kaybının da buna bağlı olarak arttığı açıkça görülmektedir.

Konvansiyonel ısıl işlem ve kriyojenik işlem uygulanmış deney numunelerinin sertliği yüksek olduğu için aşınma direncini arttırmış ve hacim kaybını azaltıcı bir etki göstermiştir. İşlem görmemiş numuneler ise fazla aşındığı için hacim kaybı daha fazla gerçekleşmiştir.



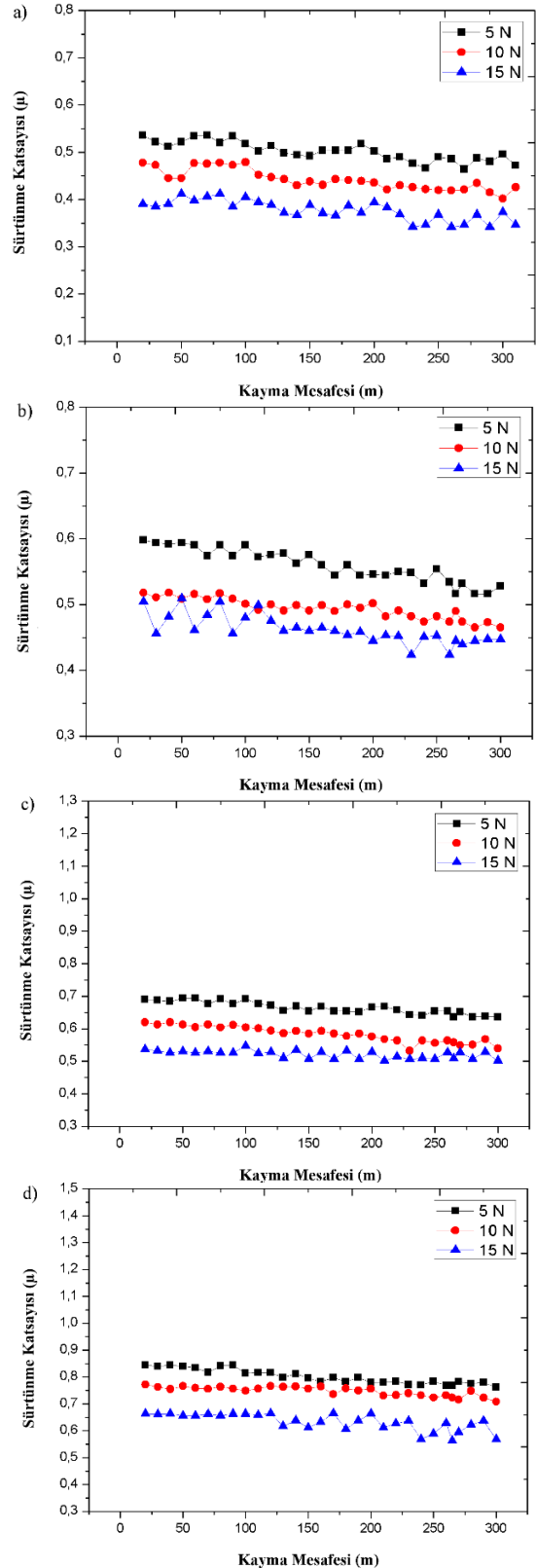
Şekil 8. Isıl işlemlerin aşınma oranı üzerindeki etkisi a) İşlem uygulanmamış, b) Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem (iki saat) uygulanmış, d) Kriyojenik işlem (altı saat) uygulanmış (The effects of the heat Treatments on the Wear rate a)As-cast, b) Conventional Heat treatment, c) Cryogenic-2 d) Cryogenic-6)

Yukarıda verilmiş olan Şekil 8’de ki grafiklerde, AISI D2 çeliğine farklı yükler (5,10 ve 15 N) altında uygulanmış aşınma testinde, kayma mesafelerine bağlı olarak aşınma oranı sonuçları görülmektedir.

Yapılan abrasif aşınma testinde kayma mesafesinin etkileri aşınma oranı grafiklerinden net bir şekilde fark edilmektedir. İşlem uygulanmamış (dökülmüş haldeki) numunelerin 5,10 ve 15 N yükleri altında 200 m kayma mesafesine kadar ki aşınma oranında yaklaşık 1×10^{-12} mm³N⁻¹m⁻¹’lik bir artış gözlenirken, konvansiyonel ısıtma işlemde 5,10 ve 15 N yük altındaki aşınma oranında yaklaşık 2×10^{-13} mm³N⁻¹m⁻¹’lik bir artış gözlenmiştir. İki saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5,10 ve 15 N yük altındaki aşınma oranında yaklaşık olarak (sırasıyla) $2,5 \times 10^{-13}$, 1×10^{-13} ve $0,5 \times 10^{-13}$ mm³N⁻¹m⁻¹’lik bir artış gözlenmiştir. Ayrıca altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N yük altında aşınma oranında yaklaşık $3,5 \times 10^{-13}$ mm³N⁻¹m⁻¹’lik bir artış gözlenirken, 10 ve 15 N yük altında ise $1,5 \times 10^{-13}$ mm³N⁻¹m⁻¹’lik bir artış gözlenmiştir.

Benzer şekilde işlem uygulanmamış (dökülmüş haldeki) numunelerin 5 ve 10 N yük altında ve 200-300 m kayma mesafesi aralığında ki aşınma oranında yaklaşık $1,5 \times 10^{-12}$ mm³N⁻¹m⁻¹ ve 15 N yük altında $0,5 \times 10^{-12}$ mm³N⁻¹m⁻¹’lik bir artış gözlenirken, konvansiyonel ısıtma işlem uygulanmış numunelerde 5 N yük altında yaklaşık 6×10^{-13} mm³N⁻¹m⁻¹, 10 N yük altında yaklaşık 3×10^{-13} mm³N⁻¹m⁻¹ ve 15 N yük altında yaklaşık 2×10^{-13} mm³N⁻¹m⁻¹’lik bir artış gözlenmiştir. İki saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N yük altında yaklaşık 4×10^{-13} mm³N⁻¹m⁻¹, 10 N yük altında 2×10^{-13} mm³N⁻¹m⁻¹ ve 15 N yük altında 1×10^{-13} mm³N⁻¹m⁻¹’lik bir artış gözlenmiştir. Ayrıca altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde 5 N yük altında yaklaşık $2,5 \times 10^{-13}$ mm³N⁻¹m⁻¹, 10 ve 15 N yük uygulandığında ise yaklaşık 2×10^{-13} mm³N⁻¹m⁻¹’lik bir artış gözlenmiştir.

Deney sonuçlarında görüldüğü üzere genel olarak aşınma oranları, kullanılan zımpara ve uygulanan yüklerin etkisiyle artmıştır. Ayrıca kayma mesafesi arttıkça aşınma miktarı da artmaktadır. Grafiklerin genelinde görüldüğü üzere en fazla aşınmanın işlem uygulanmamış numunelerde, en az aşınmanın ise altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeninin ise numunelerin sertlik değerlerinin ciddi oranlarda artırılmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. İşlem uygulanmamış numunenin sertliği düşük olduğu için en yüksek aşınma sağlanmıştır. Kriyojenik işlem bekletme sürelerinin artmasıyla birlikte aşınma oranlarında azalma meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 9. Isıtma işlemlerinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi a) İşlem uygulanmamış, b) Konvansiyonel ısıtma işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem (iki saat) uygulanmış, d) Kriyojenik işlem (altı saat) uygulanmış (The effects of the heat Treatments on the Wear coefficient a)As-cast, b) Conventional Heat treatment, c) Cryogenic-2 d) Cryogenic-6)

Yukarıda verilmiş olan Şekil 9’da ki grafiklerde, AISI D2 çeliğine farklı yükler (5,10 ve 15 N) altında uygulanmış aşınma testinde, kayma mesafelerine bağlı olarak sürtünme katsayısı sonuçları görülmektedir.

İşlem uygulanmamış numunelerin en düşük sürtünme katsayısı, 15 N yük altında 0,35 μ değerinde olduğu belirlenirken, en yüksek sürtünme katsayısı 5 N yük altında elde edildiği ve 0,53 μ değerinde olduğu gözlenmiştir.

Konvansiyonel ısıtıl işlem uygulanmış numunelerde en düşük sürtünme katsayısı, 15 N yük altında gözlenmiştir ve değeri 0,43 μ ’dur. En yüksek sürtünme katsayısı ise 5 N yük altında gerçekleşmiştir ve değeri 0,6 μ ’dur.

İki saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde en düşük sürtünme katsayısı, 15 N yük altında 0,53 μ ’dur. En yüksek sürtünme katsayısının 5 N yük altında 0,7 μ değerinde olduğu belirlenmiştir.

Altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde en düşük sürtünme katsayısı, 15 N yük altında olduğu gözlenmiştir ve değeri 0,58 μ ’dur. En yüksek sürtünme katsayısı 5 N yük altında olduğu belirlenmiş ve değeri 0,85 μ ’dur.

Tüm grafiklerden elde edilen veriler doğrultusunda aşınmanın minimum sürtünme katsayısına sahip 15 N yük altındaki işlem uygulanmamış numunelerde yüksek olduğu gözlenirken, maksimum sürtünme katsayısının 5 N yük altında altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde olduğu tespit edilmiş ve en düşük aşınma bu parametrelerde gerçekleşmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere uygulanan yükün artırılmasıyla sürtünme katsayısının azaldığı ve aşınmanın arttığı görülmüştür. Ayrıca kayma mesafesinin artırılmasıyla sürtünme katsayısı azalmıştır ve buna bağlı olarak aşınma daha rahat bir şekilde gerçekleşmiştir.

Sürtünme katsayısının bir malzemeden parça koparmasını gerekli olan kuvvet ile ilişkilendirebiliriz. Malzeme yüzeyinden parça koparmak kolaylaştıkça sürtünme katsayısı azalırken, parça koparmak zorlaştıkça sürtünme katsayısı artmaktadır. Uygulanan kuvvet arttıkça daha kolay parça kopmaktadır.

Numunelerin konvansiyonel ısıtıl işlemden sonra sertlikleri artmaktadır. Sertlik sürtünme katsayısını artırıcı, aşınma üzerinde ise azaltıcı bir etki gösterir. Aynı şekilde numunelere farklı bekletme sürelerinde kriyojenik işlem uygulandığında bekletme süresine bağlı olarak sertliklerde yine artış görülmüştür.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlemin etkisi; sertlik ve abrazyon aşınma kriterleri açısından değerlendirilmiştir.

Deneyler sonucunda şu bulgulara ulaşılmıştır:

- AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sertliklerinde konvansiyonel ısıtıl işlemden itibaren yüksek oranda artış gerçekleşmiştir.

- En yüksek sertlik altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde sağlanmıştır.
- En düşük sertlik işlem uygulanmamış (döküm halinde) numunelerde görülmüştür.
- Maksimum sürtünme katsayısı 5 N yük altında, altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde elde edilmiştir.
- Minimum sürtünme katsayısı 15 N yük altında, işlem uygulanmamış (döküm halinde) numunelerde elde edilmiştir.
- En az hacim kaybının altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde gerçekleştiği belirlenmiştir.
- En fazla hacim kaybının işlem uygulanmamış (döküm halinde) numunelerde gerçekleştiği gözlenmiştir.
- Minimum aşınmaya maruz kalan numunelerin altı saat kriyojenik işlem uygulanmış numuneler olduğu tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada numunelerin ısıtıl işlem ve kriyojenik işlem operasyonlarının gerçekleştirilmesinde sağladıkları destekten dolayı Alper Isıl İşlem San. ve Tic. A.Ş. ‘ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yüksel M., Meran C., ‘‘ Malzeme Bilgisine Giriş’’, Cilt2, AnkaMat Matbaacılık San. Ltd. Şti., Yayın No:MMO/545/2, Ankara 453-460, (2013).
- [2] Ozkeklik, E., ‘‘TiN/TiAlN kaplanmış Sverker21 ile nitrasyon yapılmış ve TiAlN kaplanmış Toolox44 malzemelerin aşınma performanslarının karşılaştırılması’’, *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 35, (2013).
- [3] Stratton, P., Ugurtan, M., ‘‘Malzemelerin sıfıraltı işleme’’, BOC Industrial Gases, The Linde Group, İngiltere.
- [4] Jha, A. R., ‘‘Cryogenic technology and applications’’, USA: *Elsevier Academic Press*, 15-20, (2006).
- [5] Timmerhaus, K. D., Reed, R. P. ‘‘Cryogenic engineering’’, Fifty Years of Progress. USA: *Springer*, 20-25, (2007).
- [6] Yamanoglu, O., ‘‘ Soğuk iş takım çeliklerinin aşınma direnci üzerinde kriyojenik işlemin etkisi’’, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 33-59, (2015).
- [7] Das, D., Dutta, A.K., Ray K.K., ‘‘Effect of Deep Cryogenic Treatment on the Carbide Precipitation and Tribological Behavior of D2 Steel’’, *Materials and Manufacturing Processes*, 22: 474-480, (2007).
- [8] Ovalı, İ., ‘‘Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yüzeyinde Çil Oluşumu ve Östemperleme Isıl İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi’’, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (201



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Trafik ışığı tespiti yapan bir sürücü güvenlik destek sistemi

A driver safety support system which detects traffic lights

Yazar(lar) (Author(s)): Çağlar KILIKÇIER¹, Ersen YILMAZ²

ORCID¹: 0000-0001-7933-1643

ORCID²: 0000-0002-6620-655X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kılıkçier Ç. ve Yılmaz E., “Trafik ışığı tespiti yapan bir sürücü güvenlik destek sistemi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 419-426, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389606

Trafik Işığ ı Tespiti Yapan Bir Sürücü Güvenlik Destek Sistemi

Araştırma Makalesi / Research Article

Çağlar KILIKÇIER^{1*}, Ersen YILMAZ¹

¹Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Uludağ Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 09.06.2017 ; Kabul/Accepted : 08.09.2017)

ÖZ

Sürücü güvenlik destek sistemleri (SGDS) sayesinde trafik kazası sayıları azaltılabilmektedir. Bu çalışmada, trafik ışıklarını bularak sürücüyü uyararak bir sürücü güvenlik destek sistemi önerilmiştir. Önerilen SGDS sadece görsel bilgilerle çalışmakta ve trafik ışığı tespiti yapmaktadır. Sistem ilk olarak alınan imgeleri gri ölçekli imgelere dönüştürerek Otsu kriterine göre çok seviyeli eşiklemeye tabi tutmaktadır. Eşiklenmiş olan imgeler için sırasıyla bağlı bileşen analizi ve parça analizi yapılarak trafik ışığı olabilecek ilgi duyulan bölgeler bulunmaktadır. Bulunan bu bölgelerden renk bilgisini de içeren özellik vektörleri çıkartılmaktadır. Son olarak, Destek Vektör Makinesi (DVM) ile ilgi duyulan bölgelerin trafik ışığı olup olmadığına karar verilmektedir. Önerilen SGDS'nin başarımı şehir ortamından elde edilmiş imgeler üzerinde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: DVM, çok seviyeli eşikleme, pso, trafik ışığı.

A Driver Safety Support System Which Detects Traffic Lights

ABSTRACT

The number of traffic accidents can be decreased through driver safety support systems (DSSS). In this study, a driver safety support system is proposed in which the driver is warned by finding traffic lights. The proposed DSSS works on only visual information and detects traffic lights. The system primarily transforms the received images into gray scale images and subject them to multi-level thresholding with Otsu criteria. The regions of interest which can be traffic lights are found for the thresholded images by using connected component analysis and blob analysis, respectively. Feature vectors including the color information are extracted from the founded regions. Finally, it is decided if the regions of interest are traffic lights by using support vector machines (SVM). The performance of the proposed DSSS is examined on

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sürücüler yorgunluk veya dikkat dağılması sebebiyle trafik ışıklarını kaçırabilmektedir. Trafik ışıklarına uyulmaması ciddi kazalara sebep olmaktadır. Bunu engelleyebilmek için sürücülerin trafik ışıklarının varlığına karşı dikkatini çekmek gerekmektedir.

Trafik ışıklarının tespitine dayalı çalışmalar son dönemde yoğun ilgi görmektedir. Moises ve arkadaşları [1], gelişmiş sürücü destek sistemi (SDS) için bulanık öbekleme metoduyla bölütleme yaparak trafik ışıklarını ve mesafelerini bulan bir sistem önermiştir. Guo ve arkadaşları [2], otonom sürüş için HSV (renk, doygunluk ve parlaklık) renk uzayı, histogram temelli gradyan ile özellik çıkarma ve DVM metodlarını bir arada kullanarak trafik ışıklarını bulmaya çalışmıştır. Mark ve arkadaşları [3], SDS için öğrenme tabanlı bir sistem önermişlerdir. Nathaniel ve arkadaşları [4], önceden haritalanmış trafik ışıklarından ve farklı sensor bilgilerinden yararlanarak renkli parça analizi ile trafik ışıklarını tespit etmiştir.

Bu çalışmada trafik ışığı tespitine yönelik bir SGDS önerilmiştir [5]. Önerilen SGDS'nin görsel olarak ideal

olmayan ortamlarda ve koşullarda kullanılabilmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple trafik ışıklarının tespiti için düşük çözünürlüklü imgelerden oluşan açık bir veri [6] seti kullanılmıştır. Seçilen veri seti şehir trafiğinin yoğun olduğu gündüz saatlerinde çekilen imgelerden oluşmaktadır. Veri setindeki imgelerde trafik ışıklarının arka planlarında farklı özellikte nesnelere bulunmaktadır. Bu sayede gerçekçi koşullar altında imgeler üzerindeki bozucu etkilerin dinamik olarak değiştiği ve tespit edilemediği durumları barındıran görsel bir veri seti kullanılmıştır.

Bu veri seti literatürde çok sayıda çalışmada kullanılmaktadır [7-12]. Spot ışığı bulma ve uyarlanabilir trafik ışığı şablonuna dayanan bir trafik ışığı tanıma sistemi [7,8] çalışmalarında sunulmuştur. Siogkas ve arkadaşları Lab renk uzayında iyileştirmeler yaparak radial simetriye dayanan bir yaklaşımı trafik ışıklarının tespitinde kullanmışlardır [9]. Wang ve arkadaşları [10], morfolojik işlemler ve şekilsel özelliklerle imgeleri filtrelemiş ve şablon eşlemeye dayalı bir yöntem önermişlerdir. [11]'de Haltakov ve arkadaşları semantik bölütlemeye dayanan ve renk ile geometrik özellikler yardımıyla sınıflandırma yapan bir yöntemi trafik ışıklarının tespitinde kullanmışlardır. Jensen ve

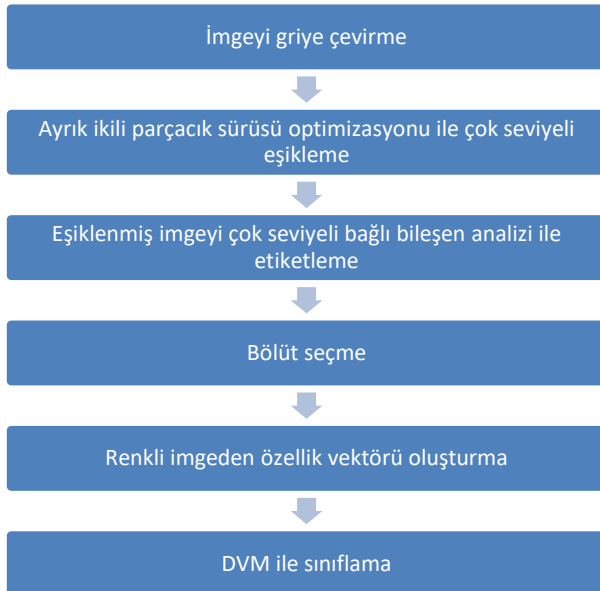
*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : caglar@uludag.edu.tr

arkadaşları ise ilgili literatürü detaylı biçimde özetleyen bir inceleme çalışmasını [12]'de sunmuşlardır.

Önerilen SGDS trafik ışıklarını bulma işlemini, imgeleri bölütledikten sonra belirli ölçütleri sağlayan bölütlerin trafik ışığı olup olmadığını sınıflandırıcı yardımcıyla kontrol ederek gerçekleştirmektedir. SGDS'nin başarımı şehir ortamından alınan düşük çözünürlüklü imgeler üzerinde benzetim çalışmaları ile incelenmiştir.

2. YÖNTEM (METHOD)

Önerilen SGDS'nin işlem adımları Şekil 1'de verilmiştir. Öncelikle imgeler gri ölçekli imgelere dönüştürülerek Otsu kriterine göre çok seviyeli eşiklemeye tabi tutulmaktadır. Eşiklenmiş olan imgeler üzerinde bağlı bileşen analizi ve parça analizi yöntemleri kullanılarak ilgi duyulan bölgeler bulunmaktadır. Bulunan bu bölgelerden renk bilgisini de içeren özellik vektörleri çıkartılmaktadır. Son olarak, Destek Vektör Makinesi (DVM) ile ilgi duyulan bölgelerin trafik ışığı olup olmadığına karar verilmektedir.



Şekil 1. SGDS akış diyagramı (DSSS flowchart)

2.1 Veriseti (Dataset)

Önerilen SGDS'nin başarım incelemesinde Robotics Centre of Mines ParisTech'te yayınlanan Traffic Lights Recognition (TLR) Urban Sequence 2 veri seti kullanılmıştır [6]. Veri setindeki imgeler sekiz bitlik RGB olarak 640x480 çözünürlükte kaydedilmiştir. İmgeler şehir içi trafikte ve gün ışığında insanlar, araçlar, ağaçlar ile ışıklı tabelalarının bulunduğu karmaşık ortamlarda kaydedilmiştir. İmgelerde trafik ışıklarına benzer araç fren lambaları ile farklı ışık kaynakları bulunmaktadır. İmgelerin sahip olduğu özellikler şehir içi trafiğini gerçekçi bir biçimde yansıttığından ve literatürde benzer çalışmalar tarafından da sıklıkla tercih edildiğinden bu çalışmada da kullanılmasına karar verilmiştir.

2.2 Çok Seviyeli Eşikleme (Multi-Level Thresholding)

Kullanılan veri setindeki imgelerin arka planları karmaşık ve farklı sayıda nesnelere oluştuğundan dolayı tek seviyeli eşikleme iyi sonuçlar vermemektedir. Daha iyi sonuçlar alabilmek için önerilen SGDS'de Otsu metoduna dayalı çok seviyeli eşikleme kullanılmıştır [13].

Eşik bulma işlemi için imgenin histogramının ortalaması, olasılıkları ve varyansları kullanılmıştır. Bu sayede eşik seviyelerini bulan denklem için önceden belirlenmiş eğitici parametrelere veya optimizasyona ihtiyaç duyulmamaktadır. Seçilen eşik seviyelerinin uygunluğu (1) denkleminde verilen λ ile bulunur. Hesaplanan λ değerini maksimum yapan eşik seviyeleri eşikleme için seçilir.

$$\lambda = \frac{(\omega_0\sigma_0^2 + \dots + \omega_n\sigma_n^2 + \dots + \omega_{ses}\sigma_{ses}^2)}{(\omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \dots + \omega_n(\mu_n - \mu_T)^2 + \dots + \omega_{ses}(\mu_{ses} - \mu_T)^2)} \quad (1)$$

Olası tüm eşik seviyesi aralıkları için μ ve σ değerleri denklem takımı (2) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$p_i = \frac{i \text{ değerine sahip piksel sayısı}}{\text{imgedeki bütün piksellerin sayısı}} \quad (1. \text{eşik seviyesi} - 1)$$

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^{((n+1). \text{eşik seviyesi} - 1)} \frac{i p_i}{\omega_0}$$

$$\mu_n = \sum_{i=n. \text{eşik seviyesi}}^{255} \frac{i p_i}{\omega_n}$$

$$\mu_{ses} = \sum_{i=son \text{ eşik seviyesi}}^{255} \frac{i p_i}{\omega_{ses}} \quad (2)$$

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{255} i p_i$$

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=0}^{(1. \text{eşik seviyesi})} \frac{(i - \mu_0)^2 p_i}{\omega_0}$$

$$\sigma_n^2 = \sum_{i=n. \text{eşik seviyesi}}^{(n. \text{eşik seviyesi} - 1)} \frac{(i - \mu_n)^2 p_i}{\omega_n}$$

$$\sigma_{ses}^2 = \sum_{i=son \text{ eşik seviyesi}}^{255} \frac{(i - \mu_{ses})^2 p_i}{\omega_{ses}}$$

En uygun eşik seviyelerini bulabilmek için denklem (1) tüm çoklu seviye grupları için hesaplanmalıdır. Bu problemin çözümü için eşik seviyelerinin belirlenmesinde tüm eşik seviyesi grupları denenmelidir, bu durum hesaplama yükünü oldukça artırmaktadır. Hesaplama yükünün azaltılması amacıyla, eşik seviyelerinin belirlenmesinde Chander'in önerdiği çok seviyeli eşikleme metoduna dayanan [14] tekrarsız parçacık sürüsü yaklaşımı kullanılmaktadır.

Chander'in metodunda eşik seviyeleri belirlenirken yeni eşikler teker teker aranmaktadır. Bulunan farklı sayıda

eşiğe sahip eşik seviye grupları içerisinde en iyisi seçilmektedir. Fakat, bu metotta Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) algoritmasındaki parçacıkların ve iterasyon sayısına göre denenebilecek olası tüm eşik değerler denememektedir.

Çalışmada, daha az iterasyon ve parçacık ile daha fazla çözüm uzayının tarandığı Parçacık-Tekrarsız Ayrık İkili PSO temelli bir yaklaşımın [15] çok seviyeli durumu kullanılmıştır.

2.3 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

(Particle Swarm Optimization)

Parçacık sürüsü algoritması Eberhart ve Kennedy tarafından reel sayılar uzayında bir optimizasyon tekniği olarak önerilmiştir [16]. PSO algoritmasında çözüm uzayında rasgele atanan parçacıklar optimize edilmek istenen fonksiyonda en iyi sonucu veren noktaya doğru ilerlemektedir. İlerleme iki çeşit hareketle tanımlanmıştır; ilki parçacıkların kendi tecrübelerine ve diğeri ise sürünün tecrübelerine dayanmaktadır. Parçacıkların hızı (3) denklemi ile yer değiştirmesi ise (4) denklemi ile hesaplanır:

$$v_i^t = v_i^{t-1} + c_1 * rand * (ps_i - x_i) + c_2 * rand * (ps_g - x_i) \quad (3)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (4)$$

Burada c_1 katsayısı ps_i parçacığının daha önceki kendi en iyi konumundan elde edeceği tecrübelerinden ne ölçüde faydalanacağını belirler. Global uygun değer olarak adlandırılan ps_g ise optimize edilmek istenen fonksiyonda en iyi sonucu veren konum bilgisidir. Bu konumun parçacıkların hızına katkısı c_2 katsayısı ile ayarlanır. Herhangi bir parçacığın yeni hızı hesaplanırken o parçacığın eski hızı da hesaba katılarak (4) numaralı denklemde kullanılır. c_1 katsayısından daha büyük c_2 katsayısı hareketin sürüdeki en iyi parçacığa doğru olmasına neden olurken tersi durumda parçacığın kendi eski en iyi konumuna doğru gitmesine neden olur. $rand$, sıfır ile bir aralığında rasgele değer üreten bir fonksiyondur. Parçacığın hızı v_i^t hesaplandıktan sonra denklem (4)'de parçacığın eski konumu olan x_i^{t-1} ile toplanarak parçacığın yeni konumu hesaplanır. Bu işlemler belirli bir döngü boyunca veya optimize edilmek istenen fonksiyonda parçacıkların iyileşmesi son bulana kadar tekrarlanır ve ps_g aranan en uygun değeri verir.

Tasarlanan SDGS'de tekrarsız Ayrık İkili PSO temelli bir yaklaşımın [15] çok seviyeli durumu kullanılmıştır.

2.4 Çok Seviyeli Bağlı Bileşen Analizi İle Etiketleme (Labeling With Multi-Level Connected Component Analysis)

İmgeler eşikleme metoduyla bölütlere ayrıldıktan sonra hedef tanıma işlemlerinde kullanılabilmesi için bölütlerin etiketlenmesi gerekmektedir. Etiketleme işlemi için genellikle bağlı bileşen etiketleme metodu kullanılmaktadır. Bağlı bileşen ile ilgili çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu çeşitlilik bağlılık ölçütünün seçiminden kaynaklanmaktadır. Bağlı bileşen etiketlemesinde kullanılan genel yaklaşım Rosenfeld tarafından [17] önerilmiştir. Rosenfeld'in yaklaşımında

iki seviyeli imgede yer alan bir piksel bağlı olduğu komşu pikseller ile aynı olacak şekilde etiketlenmektedir. Bu işlem sonucunda imge içerisinde ayrı bulunan tüm bölgeler farklı bir etiketle komşuluk kurallarına göre etiketlenir. Etiketleme yapılırken imgedeki pikseller i satır, j sütun olmak üzere $a_{i,j}$ olarak adlandırılır. Etiketleme işleminden geçmiş pikseller $a'_{i,j}$ ile gösterilirler. Eğer $a_{i,j} = 1$ ise $a'_{i,j} = 1$, eğer $a_{i,j} = 0$ ve $a'_{i-1,j-1} = a'_{i-1,j} = a'_{i-1,j+1} = a'_{i,j-1} = 1$ ise v_k yeni kullanılmamış etiket olmak üzere $a'_{i,j} = v_k$, eğer $a_{i,j} = 0$ ve $a'_{i-1,j-1}, a'_{i-1,j}, a'_{i-1,j+1}, a'_{i,j-1}, 1$ veya herhangi bir v_k ise $a'_{i,j}$ en küçük v_k 'nin değerine eşit olur. Bu işlemden sonra birbirine komşu olan v_k etiketleri en küçük etikete göre tekrar etiketlenip sonuca ulaşılır. Böylece, imgedeki bütün alanlar bölütlenmekle kalmayıp etiketlenmektedir. Etiketleme işleminin iyileştirilebilmesi için imge türüne ve aranılan nesneye uygun bir şekilde komşuluk kuralları ve eşikleme metodu seçimi yapılabilir. Etiketleme çok seviyeli imgeler için de kullanılabilir [18]. Gri ve renkli imgeler için alfa veya epsilon delta bağlı bileşenleri adı altında farklı komşuluk kontrolü ölçütleri içeren bağlı bileşen analizi metodları bulunmaktadır [19-21].

Problemimizdeki gri renkli imgelerin etiketlenmesi için seçilen metod ile eşik seviyeleri arasında kalan alanlar bağımsız olarak [17] değerlendirilmektedir. Eşik seviyeleri arasında kalan alanlar için ikili etiketleme yapılmaktadır. Etiketleme işlemi tamamlandığında bölütlerle ilgili sınır, alan ve ebat bilgileri kolaylıkla elde edilebilmektedir.

2.5 Bölüt Seçme (Segment Selection)

Bölüt seçimi işlemi ile trafik ışığı olma olasılığı yüksek olan bölütlerin sınıflandırma algoritmasına iletilmesi ve trafik ışığı olmayan bölütlerin sınıflandırma algoritması tarafından gereksiz olarak deneme olasılığının azaltılması amaçlanmaktadır. Bölüt seçimi için boyut, şekil, doluluk oranı gibi farklı ölçütler bulunmakta ve her problem için farklı ölçütler kullanılmaktadır.

Raoul ve arkadaşları [8] trafik lambalarının tanınması ile ilgili yaptıkları çalışmalarında bölüt olarak en boy oranını, bölütün içinde boşluk olup olmadığı ve bölütün dış bükey olup olmadığını ölçüt olarak almışlardır.

Problemimiz için farklı bölüt seçme ölçütleri kullanılmıştır. Bu ölçütler bölüt boyutu, oranı ve pencere boyutuna göre kapladığı alandır. Bölütler seçilirken genişliği en ve boy olarak en az dört piksel ve en fazla on dokuz piksel olan bölütler seçilmiştir. En boy oranı sıfır nokta sekiz ile bir nokta iki aralığı dışındaki bölütler elenmiştir. Son olarak, bölütün kapladığı pencere alanının boyutuna oranının %50'den fazla olması şartı aranmıştır.

2.6. Destek Vektör Makinesi (Dvm) İle Sınıflandırma (Classification With Support Vector Machine (Svm))

Bölüt seçimi işlemi ile muhtemel trafik ışıkları belirlendikten karar vermek için DVM sınıflandırıcısı kullanılmaktadır. DVM yapısına (5) bakıldığında çıkış

olarak iki değerin elde edilebileceği görülmektedir. Vapnik tarafından önerilmiş [22] olan DVM yöntemi farklı metotlarla birleştirilerek ikiden fazla sınıfın olduğu durumlar için de sınıflama amacıyla kullanılabilir. Denklem (5)'de x_i eğitim örneğini yani destek vektörlerini ve $K(x, x_i)$ çekirdek fonksiyonunu belirtmekte ve y_i ise destek vektörlerin sınıf bilgisini içermektedir. Sınıfların sınırlarının ötelenmesi işlemi ise b katsayısı ile gerçekleştirilmektedir.

$$f(x) = \text{sign}[\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i K(x, x_i) + b] \quad (5)$$

DVM yardımıyla örnekler yeni bir boyut eksenine taşınırlar, bu işlem sonucunda yeni boyuttaki eksenin pozitif tarafı bir sınıfı negatif tarafı ise diğer sınıfı ifade etmektedir.

Örneklerin yeni boyuttaki konumuna eşlenmesi işlemi belirleyen temel öğeler, eğitim için kullanılan örnekler yani x_i destek vektörleri, $K(x, x_i)$ çekirdek fonksiyonu ve α_i katsayılarıdır. Destek vektörleri için seçilen örneklerin örnek uzayın genelini temsil etmeleri işleme işlemi açısından önemlidir. Çekirdek fonksiyonu olarak Mercer koşulunu sağlaması şartıyla herhangi bir fonksiyon seçilebilir [22]. Genellikle lineer (6), polinom (7) veya Gauss radial baz fonksiyonlarından (RBF) (8) biri çekirdek fonksiyon olarak seçilmektedir.

$$K(x, x_i) = x * x_i \quad (6)$$

$$K(x, x_i) = ((x \cdot x_i) + 1)^d \quad (7)$$

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

Lineer fonksiyonların yetersiz kaldığı durumlarda polinomlar veya iç içe kümelenmiş grupları bile ayırabilen radial baz fonksiyonları kullanılmaktadır. Gerekli durumlarda farklı fonksiyonlar birleştirilerek Mercer koşullarını sağlaması şartıyla çoklu çekirdek fonksiyonları kullanılabilir. α_i Lagrange katsayılarının bulunması konveks bir optimizasyon problemidir (9) ve bu işlem için farklı metotlar kullanılabilir.

$$\begin{aligned} \max_{\alpha_i} &= \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \\ &\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0, 0 \leq \alpha_i \leq c \end{aligned} \quad (9)$$

Doğru sınıflandırmaların yapılabilmesi için (9) denklemini maksimum yapan ve belirtilen sınır koşullarına uyan α_i katsayıları bulunmalıdır. Denklemdaki c katsayısı eğitim hatasını sınırlamaya yarar.

Suyken (9) denklemini çözmek yerine bu problemi en küçük kareler yöntemi ile lineer bir denklem takımı çözmeye indirgemeyi önermiştir [23]. Katsayılar en küçük kareler yöntemiyle denklem (10) ile hesaplanmaktadır. Denklemdaki I birim matris ve Y destek vektörlerinin sınıf bilgisi matrisidir.

$$\begin{bmatrix} 0 & Y^T \\ Y & y_i y_j K(x_i, x_j) + c^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \rightarrow 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

DVM sınıflandırma başarısı sadece seçilen çekirdek fonksiyonu ve eğitim örneklerine bağlı değildir. DVM başarımı çekirdek fonksiyonunun parametreleri ve c hata katsayısının seçiminden etkilenmektedir.

3. BULGULAR (RESULTS)

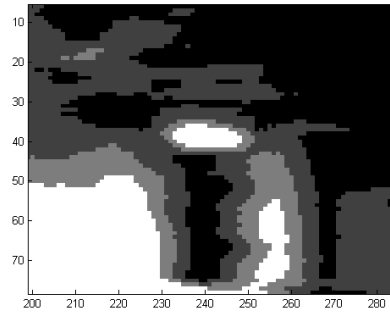
Sekiz bitlik gri tonlu bir imgede ton sayısı $n=256$ 'dır. Gri tonlu bir imgeye normal çok seviyeli eşikleme metodu uygulanırsa denklem (1)'in $n + (n * (n - 1)) + (n * (n - 1) * (n - 2)) + \dots + (n * (n - 1) * (n - 2) * \dots * 1)$ defa hesaplanması gerekmektedir. 1 ile 5 seviye arasındaki bütün durumları kontrol etmek için denklem takımı (1)'in 10^{12} defa hesaplanması gerekmektedir.

Kullandığımız metotta denklem (1)'in $n + (n - 1) + (n - 2) + \dots + 1$ defa çözülmesini yeterlidir. Benzer şekilde 1 ile 5 seviye arasındaki bütün durumları kontrol etmek için denklem takımı (1)'in 1265 defa çözülmesi yeterlidir. Bu metot sayesinde gereken işlem basamakları önemli ölçüde azaltılmaktadır. Fakat bulunan her eşik seviyesi daha önceki bulunan eşik seviyeleri dikkate alınarak arandığından, tüm eşik seviyeleri aynı anda dikkate alınmamaktadır. Yapılan aramada en iyi eşik seviyelerinin bulunacağı garantilenememekte fakat optimuma yakın değerler elde edilmektedir.

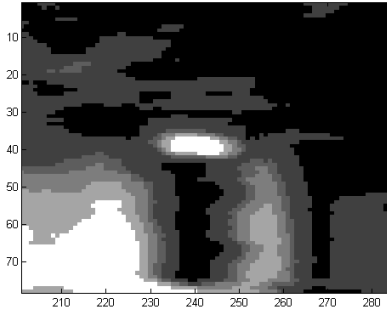
Bulunan seviye değerleri ile histogram aralıklarına göre komşuluk analizi yapıldığında 3 veya daha fazla eşikleme seviyesinden itibaren trafik ışıklarının bulunmaya başlandığı görülmüştür. Ancak 6 ve üstü seviye kullanıldığında trafik ışıklarının kendi içinde farklı seviyelere parçalandığı ve bölüt sayısında anlamsız bir artış olduğu görülmüştür. Seviye sayısının 5 olarak tutulduğunda bulanık resimlerde bile trafik ışıklarının sınırlarının arka plandan ayrılarak etiketlenildiği gözlemlenmiştir. Şekil 2'de bulanık bir imge için farklı sayıda seviyelerle çok seviyeli eşikleme işlemi sonucunda elde edilen bölütler gösterilmektedir



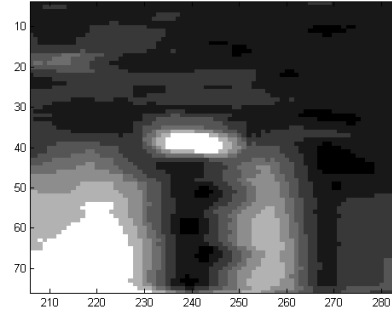
Orijinal resim



3 eşik seviyesi



5 eşik seviyesi



7 eşik seviyesi

Şekil 2. Sol üst: orijinal resim (ilgilenilen bölge sarı kutu içinde), sağ üst: 3 seviye için, sol alt: 5 seviye için, sağ alt: 7 seviye için eşikleme örneği (top left: original image (region of interest in yellow box), top right: for 3 levels, bottom left: for 5 levels, bottom right: thresholding sample for 7 levels)

Seviye sayısı 3 için trafik ışığı bulunabilmekte fakat sınırları doğru olarak yakalanamamaktadır. Seviye sayısı 5 olduğunda ise bulanık sınırlar daha kolay ayrılabilir. 7 seviyeli eşikleme için trafik ışığının bulunması açısından bir iyileşme gözlenmemiştir, imgede aşırı bölütlenme oluşmuştur.

Etiketlenmiş bölütler seçilirken eni ile boyu, bunların oranı ve boyutlarına göre kapladığı alan dikkate alınarak sadece muhtemel trafik ışıklarının olduğu alanların bulunmasına çalışılmıştır. Bulunan bu alanlar test ve eğitim için kullanılan 1110 imgede, imge başına ortalama 53 tanedir. Bulunan bölütlerin merkezi hesaplanarak 17x17 piksel boyutundaki kareler, renk bilgisi de kullanılarak (RGB) 867x1 uzunluklu vektörlere dönüştürülmüştür. Oluşturulan bu vektörler DVM için test ve eğitim amaçlı olarak kullanılmıştır.

555 imge DVM'in eğitilmesi için kullanılmıştır. Veri setinden imgeler 20'den başlayarak 11100'üncü imgeye kadar 20'şer aralıklı olacak şekilde seçilmiştir.

En küçük kareler DVM için farklı çekirdek fonksiyonları (Linear, polinom ve RBF) eğitim örneklerini %100 başarı oranı ile sınıflayabilmiştir. Fakat aşırı model (over fitting) öğrenmesinin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple farklı çekirdek fonksiyonları ve parametreleri denenmiş ve sonuç olarak RBF çekirdeğinin parametreleri sayesinde aşırı öğrenme karşısında daha gürbüz olduğu görülmüştür. RBF çekirdeğindeki σ parametresi ile modelin aşırı öğrenmesi kontrol

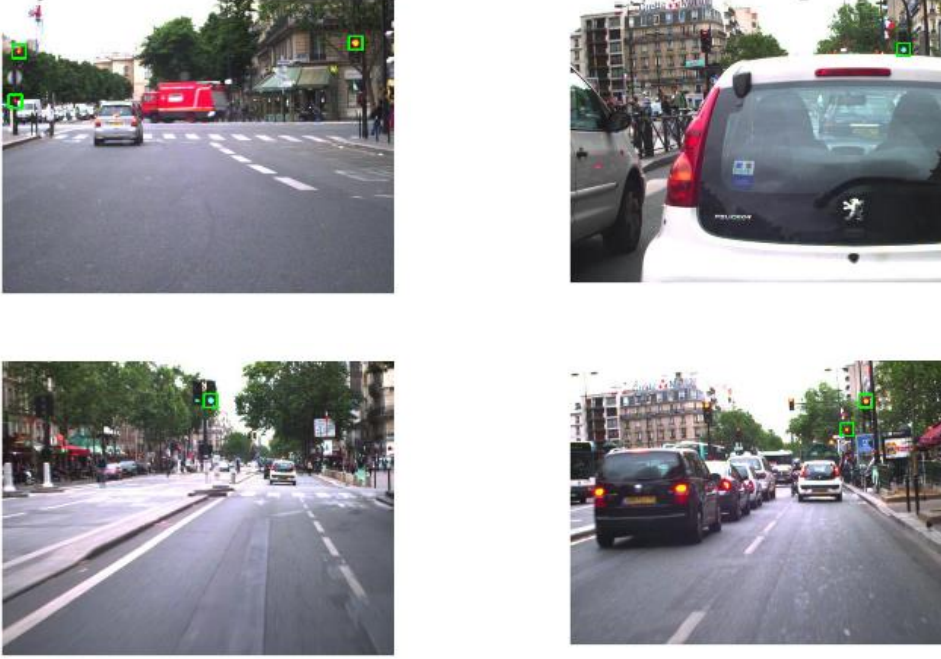
edilebilmiştir. Bu parametrenin 5 'ten büyük alınması durumunda tip 1 hatasının oluştuğu ve 20'den küçük alınması durumunda ise tip 2 hatasının arttığı gözlenmiştir.

DVM için kullanılan RBF çekirdeğinin σ parametresi 7 olarak alınmıştır. DVM'in başarımı 555 test imgesi için incelenmiştir. Başarım sonucu Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. DVM sınıflandırıcı için hata matrisi (Confusion matrix for SVM classification)

	Trafik ışığı değil	Trafik ışığı
	DVM ile Bulunan↓	
Trafik ışığı Değil	Gerçek→ 29217	5 (tip1 hata)
Trafik ışığı	Gerçek→ 87 (tip2 hata)	206

Test imgeleri için DVM'in başarımı %99,69 olarak gerçekleşmiştir. Sistem bir bütün olarak ele alınıp Charette'nin [8] önerdiği kriterler kullanıldığında, var olan trafik ışıklarının bulunma oranının %65,8 olduğu görülmektedir. 38 trafik ışığından 25 adeti doğru olarak bulunmuş, 2 adet nesne ise hatalı biçimde trafik ışığı olarak algılanmıştır. Doğru olarak bulunan trafik ışıkları şekil 3'te verilmiş ve ışıklar yeşil kutular içerisine alınmıştır.



Şekil 3. Doğru olarak bulunan trafik ışığı örnekleri (Samples for rightly detected traffic lights)



Şekil 4. Yakalanamayan trafik ışığı örnekleri (Samples for missed traffic lights)



Şekil 5. Yanlış bulunan nesnelere örnekler (Wrongly detected objects)

Şekil 4 ise yakalanamayan trafik ışıklarına ait örnekleri göstermektedir. Sol taraftaki resimde soldaki trafik ışığı, sağdaki resimde ise yeşil ışık bulunamamıştır. Bu tip imgelerde örneklerin yakalanamamış olmasının başlıca

sebepleri olarak imgelerin bulanık veya trafik ışığı boyutlarının standart dışı olmaları söylenebilir.

Önerilen SGDS'nin trafik ışıklarını tespit ederken kullanıcıları gereksiz yere uyarma olasılığının azaltmak

amacıyla metotların düşük tip 2 hatadan ziyade düşük tip 1 hataya sahip olmasına çalışılmıştır. Bu sayede tasarlanan sistem ile 555 test imgesi içinde sadece 2 nesne yanlışlıkla trafik ışığı olarak bulunmuştur. Yanlış bulunan bu nesnelere bir iş aracına ait turuncu ikaz lambalarıdır, Şekil 5.

Sonuç olarak tasarlanan sistem düşük yanlış uyarı oranına sahip olup sürücüyü gereksiz olarak uyarma olasılığı azdır. Bunun karşılığında trafik ışıklarının bulunması gecikmektedir. Test amaçlı örnekler saniye başına 1 resim alınarak değerlendirilmiştir. Test için saniye başına daha fazla örnek alınması durumunda trafik ışıklarının bulunması oranında artma görülecektir.

Önerilen metodun değerlendirmesinde veri kümesinin 20'de biri kullanılmıştır. Veri kümesinin tamamının kullanılması durumunda trafik ışığını kaçırma oranı azalacak ve anma oranı artacaktır.

Önerilen SGDS ile aynı veri setini kullanan çalışmaların, [7-9], başarımlarını karşılaştırmaları Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Kullanılan veri seti için başarımların sonuçları
(Performance results for the dataset used in the study)

Metot	Kesinlik	Anma
Önerilen	%95.00	%65.80
[8]	%90.48	%95.00
[7]	%75.00	%44.00
[9]	%61.22	%93.75

Başarımların sonuçları için [8]'de önerilen kriterler kullanılmıştır. Buna göre trafik ışıkları görüntüledikleri zaman diliminde bir kez yakalandığında doğru bulunmuş olarak sayılmıştır. [8]'de önerilen metotta spot ışığı bulma, şekil analizi ile şablon eşleme ve zamansal eşleme yöntemleri kullanılmıştır. [7]'de önerilen metotta ise Adaboost yöntemi kullanılmıştır. [9]'da ise renk, simetri ve zaman-uzamsal yöntemler kullanılmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, trafik ışıklarını bularak sürücüyü uyararak bir sürücü güvenlik destek sistemi önerilmiştir. Önerilen sistemde imgeler gri ölçeklemeyle eşiklenmektedir. Eşiklenen imgeler üzerinde bağlı bileşen ve parça analizi ile ilgi duyulan bölgeler çıkarılmakta ve bu bölgelerde de DVM yardımıyla trafik ışıklarının varlığı kontrol edilmektedir. Metodun başarımlarını şehir içinde çekilmiş görüntülerden oluşan açık erişim bir data seti kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, önerilen sistemin başarımlarını aynı veri setini kullanan diğer metotlarla karşılaştırılmıştır. Önerilen metodun trafik ışıklarını bulmadaki kesinliğinin diğer metotlardan daha iyi olduğu görülmüştür. Benzer şekilde trafik ışıklarını bulma oranı da saniye başına taranan imge sayısının artırılmasıyla yükseltilebilir. Yapılan deneysel çalışmalara ve karşılaştırma sonuçlarına dayanarak, bu çalışmada önerilen SGDS'nin yoğun şehir trafiğinde bile başarılı sonuçlar verebileceği görülmüştür.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

λ	Eşik seviyesi uygunluk parametresi katsayısı
ω_n	Piksel değerinin n. eşik seviyeleri aralığında bulunma olasılığı,
ω_{ses}	Piksel değerinin son eşik seviyesinden sonrabulunma olasılığı
p_i	İmgedeki bir pikselin i değerini alma olasılığı
μ_n	n. eşik seviyeleri aralığında bulunan piksellerin ortalaması
μ_{ses}	Son eşik seviyesinden sonra bulunan piksellerin ortalaması
μ_T	İmgedeki tüm piksellerin ortalama değeri
σ_n^2	n. eşik seviyeleri aralığında bulunan piksellerin varyansı
σ_{ses}^2	Son eşik seviyesinden sonra bulunan piksellerin varyansı
v_i^t	i. parçacığın güncel hızı
v_i^{t-1}	i. parçacığın eski hızı
c_i	Öğrenme katsayısı
ps_i	i. parçacığın bulunmuş olduğu en iyi konum
ps_g	Tüm parçacıklar dahilinde bulunmuş olan en iyi konum
x_i^t	i. Parçacığın konum bilgisi
$a_{i,j}$	İmgenin i. satır ve j. sütunundaki piksel
$a'_{i,j}$	İmgenin i. satır ve j. sütunundaki etiketleme işleminden geçmiş piksel
v_k	Etiket numarası
x_i	DVM eğitim örneği
$K(x, x_i)$	DVM çekirdek fonksiyonu
y_i	Eğitim örneklerinin sınıf bilgisi
N	Kullanılan eğitim örneklerinin sayısı
α_i	Eğitim örneklerinin ağırlık katsayısı
b	Yanlılık parametresi
I	Birim matris

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Diaz-Cabrera, M., Cerri, P., ve Medici, P., "Robust real-time traffic light detection and distance estimation using a single camera", *Expert Systems with Applications*, 42(8): 3911-3923, (2015).
- [2] Mu, G., Xinyu, Z., Deyi, L., Tianlei, Z., ve Lifeng, A., "Traffic light detection and recognition for autonomous vehicles", *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 22(1): 50-56, (2015).
- [3] Philipsen, M. P. , Jensen, M. B., Møgelmoose, A., Moeslund, T. B., ve Trivedi, M. M., "Traffic Light Detection: A Learning Algorithm and Evaluations on Challenging Dataset", *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Las Palmas, 2341-2345, (2015).

- [4] Fairfield, N., ve Urmson, C., "Traffic Light Mapping and Detection", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, 5421-5426, (2011).
- [5] Kılıkçier, Ç., "Hedef Tanıma Algoritmaları ve Bir DSP Kartı Üzerinde Gerçeklenmesi", **Yüksek Lisans Tezi**, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012), (Danışman: E. Yılmaz).
- [6] www.lara.prd.fr/benchmarks/trafficlightsrecognition (Erişim Tarihi: 21. 08.2017).
- [7] Charette, R. d., ve Nashashibi, F., "Traffic Light Recognition using Image Processing Compared to Learning Processes", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, 333-338, (2009).
- [8] Charette, R. d., ve Nashashibi, F., "Real Time Visual Traffic Lights Recognition Based on Spot Light Detection and Adaptive Traffic Lights Templates", *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Xian, Çin, 358-363, (2009).
- [9] Siogkas, G., Skodras, E., ve Dermetas, E., "Traffic Lights Detection in Adverse Conditions using Color, Symmetry and Spatiotemporal Information", *VISAPP-International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, Rome, 620-627, (2012).
- [10] Wang, C., Jin, T., Yang, M., Ve Wang, B., "Robust and Real-Time Traffic Lights Recognition in Complex Urban Environments", *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 4(6): 1383-1390, (2011).
- [11] Haltakov, V., Mayr, J., Unger, C., ve Ilic, S., "Semantic segmentation based traffic light detection at day and at night", *German Conference on Pattern Recognition*, Aachen, 446-457, (2015).
- [12] Jensen, M. B., Philipsen, M. P., Mogelmoose, A., Moeslund, T. B., ve Trivedi, M. M., "Vision for Looking at Traffic Lights: Issues, Survey, and Perspectives", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 99: 1-16, (2016).
- [13] Otsu, N., "A threshold selection method from gray-level histograms", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 9(1): 62-66, (1979).
- [14] Chander, A., Chatterjee, A., ve Siarry, P., "A new social and momentum component adaptive PSO algorithm for image segmentation", *Expert System with Applications*, 38(5): 4998-5004, (2011).
- [15] Kılıkçier, Ç., ve Yılmaz, E., "İmge Eşiklemede Ayrık İkili PSO Temelli Yeni Bir Yaklaşım", *ELECO'2012 Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 590-593, (2012).
- [16] Kennedy, J., ve Eberhart, C. R., "A discrete binary version of the particle swarm algorithm", *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*, Orlando, 4104-4108, (1997).
- [17] Rosenfeld, A., ve Pfaltz, J. L., "Sequential Operations in Digital Picture Processing", *Journal of the Association for Computing Machinery*, 13(4): 471-494, (1966).
- [18] Sonka, M., Hlavac, V., ve Boyle, R., "Image Processing, Analysis; and Machine Vision" Third Edition, Cengage Learning, Stamford, (2008).
- [19] Wang, Y., ve Bhattacharya, P., "A Theory of parameter-dependent connected components of gray images and segmentation", *International Conference on Image Processing*, Washington, DC, 69-72, (1995).
- [20] Westman, T., Harwood, D., Laitinen, T., ve Pietikainen, M., "Color Segmentation by Hierarchical Connected Component Analysis with image enhancement by symmetric neighborhood filter", *10th International Conference on Pattern Recognition*, Atlantic City, NJ, 796-802, (1990).
- [21] Soille, P., "Constrained Connectivity for Hierarchical Image Partitioning and Simplification", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(7): 1132-1145, (2008).
- [22] Burges, C. J. C., "A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition", *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2): 121-167, (1998).
- [23] Suykens, J., ve Vandewalle, J., "Least Squares Support Vector Machine Classifiers", *Neural Processing Letters*, 9(3): 293-300, (1999).



POLİTEKNİK DERGİSİ JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)
URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

Kurşun-çinko maden artığı kayaçlarla üretilen betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması

Investigation of mechanical and physical properties of concrete produced to lead-zinc mining waste rocks

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa ÇULLU

ORCID: 0000-0002-0454-7949

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çullu M., " Kurşun-çinko maden artığı kayaçlarla üretilen betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması", *Politeknik Dergisi*, 21(2): 427-435, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.374053

Kurşun-Çinko Maden Artığı Kayaçlarla Üretilen Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması

Araştırma Makalesi /Research Article

Mustafa ÇULLU*

Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

(Geliş/Received: 12.07.2017 ; Kabul/Accepted : 23.11.2017)

ÖZ

Bu çalışmanın amacı; kurşun-çinko maden işletmesinden elde edilen artık kayaçlardan (Pasa) üretilen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda işletmeden elde edilen artık kayaçların ilk olarak fiziksel, kimyasal, mineraloji-petrografik özellikleri belirlenmiştir. Artık kayaçlardan elde edilen agrega ve kireçtaşı agregaları ile %25, %50 ve %75 oranında yer değiştirilerek C16/20, C25/30 ve C35/45 beton dayanım sınıflarında örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan beton örneklerin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, kurşun-çinko maden artığı kayaçların beton agregası olarak kullanıldığında, kireçtaşına göre beton örneklerin görünür boşluk oranı ve su emme değerleri azalırken, yoğunluğu artmıştır. Fiziksel özelliklerdeki olumlu etkiye bağlı olarak, basınç ve eğilme dayanımı da artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Agrega, kurşun-çinko maden artığı, fiziksel özellik, mekanik özellik.*

Investigation Of Mechanical And Physical Properties of Concrete Produced to Lead-Zinc Mining Waste Rocks

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the physical and mechanical properties of concrete produced from lead-zinc mine waste (tallow) products. In this context, the physical chemical, mineralogical and petrography characteristics of rocks obtained from zinc-lead mine were analyzed first. Concrete strength classes of C16/20, C25/30 and C35/45 5 replaced with 25%, 50% and 75% rates of limestone were prepared with lead mine waste. The physical and mechanical properties of the prepared concrete samples were determined. As a result, when lead-zinc mine waste is used as concrete aggregate, while the porosity and the water absorption of prepared samples were decreased, the physical density were increased as compared to limestone. As the result of the positive effect of physical properties, compressive and tensile strength were increased.

Keywords: *Aggregate, lead-zinc mining waste, physical property, mechanical property.*

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Agrega, doğal olarak elde edilen belirli bir mineral bileşimi sergileyen ve genellikle 100 mm'ye kadar çeşitli tane büyüklüklerindeki iri taneler olarak tanımlanabilmektedir. Doğal malzemeler arasında yer alan agregalar, inşaat sektöründe ve alt yapıda kullanılması zorunlu olan ve yerine başka malzemenin kullanılmadığı temel girdi durumundadır [1]. Agregalar, doğadan doğrudan doğruya (akarsu yatakları, deniz kıyıları, çöl vb.) taneli olarak temin edilebildikleri gibi taşocağı işletmeciliği ile üretilen taş bloklarının kırılıp eleme işlemleri sonucunda da elde edilebilirler. Bu şekilde elde edilen taneli malzemeye "kırmataş", kırmataş tesislerinin atığı olan ince taneli malzemeye "kırmakum" (taşunu filler) denilmektedir [2].

Günümüzde insan nüfusunun hızla artması ve mevcut kaynakların tükenmeye başlamasıyla, meydana gelen

atıkların azaltılması, mevcut atıkların potansiyel bir hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesi, kullanılmış hammaddelerin yeniden kullanılması gibi atık yönetimi konuları giderek önem kazanmaya başlamıştır [3]. Doğal kaynakların daha az tüketilmesi, çevre kirliliğinin daha az indirilmesi ve enerji maliyetlerinin azaltılması amacıyla endüstriyel atık kullanımı gün geçtikçe daha fazla ilgi çeken bir konu olmaktadır [4]. Atıklar çevre sorununun yanı sıra birçok durumda depolanma zorunluluğundan dolayı ilave maliyet getirmektedir. Bu nedenle, birçok atık içeriğine bakılmaksızın ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Ancak, atık malzemelerin de bir değeri vardır ve atıklar katma değeri yüksek ürünlerin elde edilmesinde kullanılabilir. Günümüzde betonda kullanılacak birçok atık malzeme bulmak mümkündür. Bunların başında; Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu, Mermer atıkları, İnşaat ve yıkıntı atıkları, Lastik atıkları gelmektedir. Doğal ve atık agregaların betonda kullanımı ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Agregalar, geri dönüşüm agregası [5], traverten atıkları [6],

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mustafacullu@hotmail.com

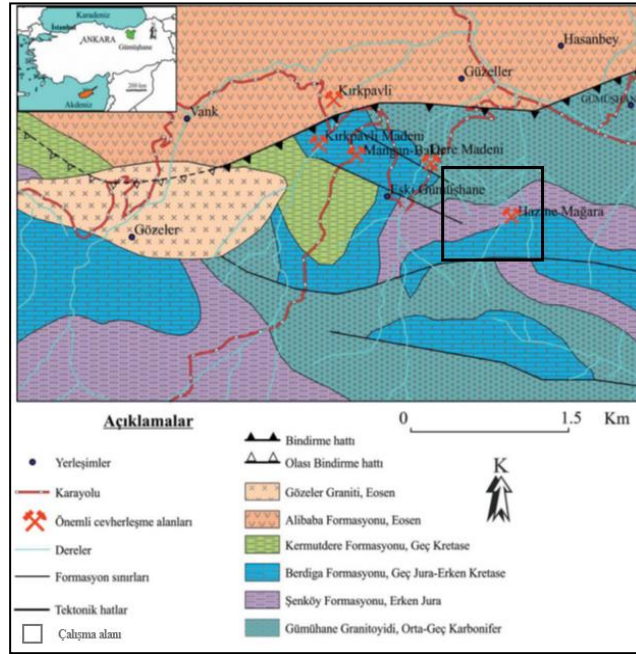
mermer ocağı atıkları [7], atık lastikler [8], erken yaşta ki atık betonlar [9], seramik atıkları [10] yapılan çalışmalardan bazılarıdır. Bu çalışmada da, kurşun-çinko madeni artığı kayalardan elde edilen agregalar ile üretilen betonların mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir.

1.1. Sahanın Jeolojisi (Geology Field)

Çalışma sahasının jeolojisi ve sahadaki cevherleşme şöyle özetlenebilir [11, 12, 13]. Çalışmaya konu kurşun çinko cevherleşmesi Pontid tektonik birliğinin doğusunda (Doğu Karadeniz Tektonik Birliği içinde) [14] Gü-

alır [22]. Tüm bu birimler özellik Gümüşhane-Trabzon yol güzergahında, çalışma sahası dışında geç Kretase plütonik kayaları [23] tarafından kesilir.

Gümüşhane yöresinde Geç Kretase volkanik ve/veya sedimanter kayaları Orta-Geç Eosen yaşlı denizel volkanotortullar uyumsuz olarak örtmektedir [24]. Alibaba formasyonu [22] olarak adlandırılan bu kayalar tabanda yersel olarak konglomeralar, kumtaşı ve tüfit ara katkılı nummulitli kireçtaşları ile başlayarak, üst seviyelere doğru andezit ve ilişkili piroklastikleri ile devam eder. Birim yer yer aşınmış olarak bulunan kireçtaşı, kumtaşı,



Şekil 1. Gümüştaş maden sahası jeolojik haritası (Gumustas mine site geological map) [27, 28]

müşhane ili sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 1). Bölgede, Geç Paleozoyik yaşlı temel kayalar ve Mesozoyik-Senozoyik örtü kayaları olarak yaşlandırabileceğimiz iki grup kaya yüzeylenmektedir. Temel kayalar Erken-Orta Karbonifer yaşlı Pulur-Kurtoğlu metamorfizmaları [15] ve metamorfize olmamış Orta-Geç Karbonifer yaşlı Gümüşhane granitoidiyle temsil edilir [16, 17]. Cevherleşme sahası içinde de gözlemlenen Gümüşhane granitoidi başlıca granodiyorit, kuvarşlı mikrodiorit, granit ve dasit porfirlerden oluşmaktadır [16, 18]. Sahada Mesozoyik istifin en alt kesimi, Variskan temel üzerinde uyumsuz olarak gelen Erken Jura yaşlı volkanotortul birimle temsil edilmektedir (Şenköy formasyonu) [19]. Bu birim taban konglomerası ile başlar; bazalt, diyabaz, çört ve dasitik tüf içeren türbiditik karakterli çakıltaşı, kumtaşı, siltaşı ve marınlar ile devam eder [20]. Bu birim üzerine Pelin (1977) tarafından Berdiga formasyonu olarak adlandırılan ve altaki birimle uyumlu olarak taban kesimi genelde masif karakterli platform nitelikli karbonatlardan oluşan Geç Jura-Erken Kretase yaşlı birim gelir [21]. Kireçtaşları üzerinde ise tabanda sarı renkli kumlu kireçtaşları ile başlayan, üste doğru kırmızı renkli kırıntılı karbonatlar ve gri renkli türbiditler ile devam eden Geç Kretase yaşlı Kermtudere formasyonu yer

marn, tüf ardalanmasıyla son bulur. Bu birimler yine aynı yaşlı intrüzif kayalar tarafından kesilmektedir (Gözeler graniti) [11]. Kuvaterner yaşlı traverten, yamaç molozları ve alüvyonlar ise bölgedeki en genç birimlerdir.

Gümüşhane yöresi Türkiye'nin önemli metalojenik kuşaklarından biri olup, çok sayıda kurşun çinko, bakır ve altın cevherleşmesine ev sahipliği yapmaktadır. Bölgede cevherleşmeler bölgeyi etkileyen tektonizma ile yakın ilişkilidir. Genç granitik intrüziflere bağlı olarak gelişen sülfür mineralizasyonları bu tektonik hatlar boyunca yerleşerek önemli bakır, kurşun, çinko, altın ve gümüş cevherleşmelerini oluşturmuştur [11, 25, 26]. Çalışmaya konu olan Hazine Mağara Pb-Zn-Au-Ag Maden sahası, Gümüşhane ilinin 2 km. güneyinde yer almaktadır. Sahada halihazırda madencilik faaliyetleri yürütülmektedir. Hazinemağara sahasında temel kayaç Paleozoyik yaşlı Gümüşhane Granitoidi ve granitoidin kenar zonu olan kuvars porfirlerdir [25]. Temel kayalar üzerine uyumsuz olarak Jura-Lias yaşlı volkanotortul kayalar, bu kayaların üzerinde uyumlu olarak Üst Jura-Alt Kretase masif kireçtaşları, Üst Kretase yaşlı filiş ve filiş üzerinde uyumsuz olarak Eosen yaşlı volkanotortul kayalar izlenmektedir. Sahadaki tektonizmaya ilişkili fay ve kırık zonları boyunca Cu-Pb-Zn-Au-Ag cevherleşmeleri gelişmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHOD)

Yapılan çalışmada beton üretiminde agrega (Kurşun-çinko madeni artığı kayaçlar “Pasa” ve Kireçtaşı), çimento ve Gümüşhane şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1. Materyal (Materials)

2.1.1. Agrega (Aggregate)

Çalışmada kullanılan kayaçlar, etrafında kil ve silt olmasından dolayı yıkanıp kurutulduktan sonra çeneli kırıcı ile kırılıp beton agregası boyutuna getirilmiş ve eleklerle elenerek 0-4, 4-11.2, 11.2-22.4 mm sınıflarında gruplandırılmıştır. Kırma ve eleme işleminde kullanılan cihazlar Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Çeneli kırıcı ve elek sarsma makinası (Jaw crushers and sieve shaking machine)

Maden sahasından temin edilen pasa çeneli kırıcıdan kırılarak 0-4, 4-11.2, 11.2-22.4 mm elek boyutlarına indirgenerek beton döküm işlemine hazır hale getirilmiştir. Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 3. Çeneli kırıcıda kırılmış ve sınıflandırılmış kurşun-çinko madeni artığı kayaç (Lead-zinc mining waste rock broken and classified in jaw crusher)



Şekil 4. Kireçtaşı agregası (Limestone aggregate)

Agregalara ait fiziksel özellikler Çizelge 1’de görülmektedir.

Çizelge 1. Agregalara ait fiziksel özellikler (Physical properties of aggregates)

Agrega türü	Agrega sınıfı	Fiziksel özellikler			
		Kuru tane yoğ. (g/cm ³)	DKY yoğ. (g/cm ³)	Su em. oranı (%)	Porozite (%)
Pasa	0-4	2.67	2.78	4.02	10.71
	4-32	2.78	2.81	1.10	3.06
Kireçtaşı	0-4	2.52	2.63	4.21	10.62
	4-32	2.54	2.59	1.93	4.89

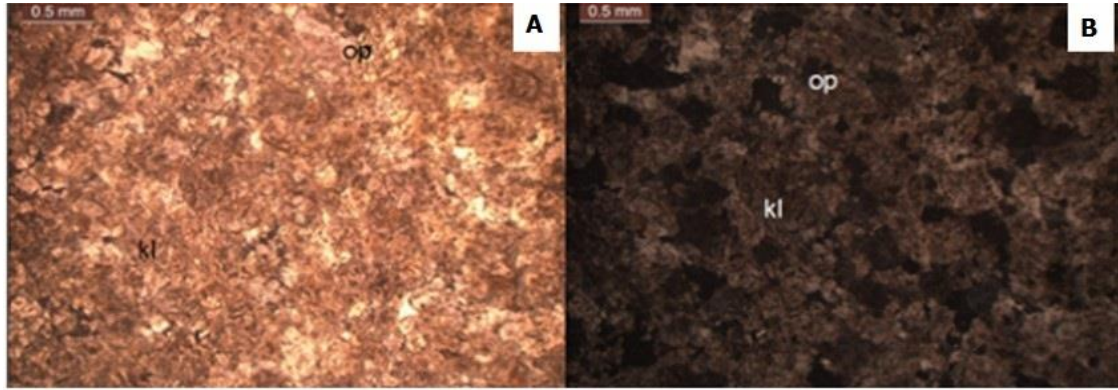
Agregaların kimyasal analizi Çizelge 2’de görülmektedir.

Çizelge 2. Agregaların kimyasal özellikleri (Chemical properties of aggregates)

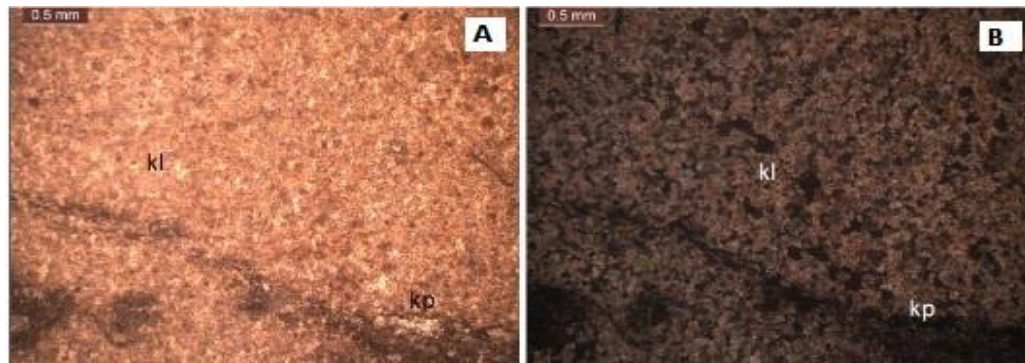
Element	Pasa	Kireçtaşı
SiO ₂		2.95
Al ₂ O ₃		0.43
Fe ₂ O ₃ *	4.65	0.46
MgO		-
CaO	34.6	73.93
MgCO ₃		22.24
Zn	1.11	
Pb	0.98	
Cu	<0.01	
H ₂ O	7.96	
Diğer		
Uçucular	50.74	
Ağırlıklı (CO ₂ , vb.)		
Toplam	100.04	100.01

*Toplam demir miktarı

Agreganın minerolojik-petrografik incelemesi, Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Pasa cevherleşmenin içinde geliştiği kayacın bir nevi ekonomik olarak cevher içermeyen, cevherleşmeden geriye kalan ve ekonomik olmayan kısmı olarak ifade edilebilir. Cevherleşme sahada kireçtaşları içinde gelişmiş olup, pasa olarak ifade edilen kısım ağırlıklı olarak kireçtaşı içermektedir. Metalik mineral olarak ise pirit, sfalerit, daha az oranda ise galenitler bulunmaktadır. Pasadan alınan el büyüklüğündeki örneklerden yapılan ince kesit incelendiğinde kalsitin ağırlıklı olduğu, bunun yanında opak olarak da pirit, sfalerit ve daha az oranda da galenitin olduğu tespit edilmiştir. Pasa örneğine ait ince kesit fotoğrafı Şekil 5’de görülmektedir



Şekil 6. Pasaya ait ince kesit fotoğrafı, a) tek nikol, b) çift nikol (kl:kalsit, op: opak mineral) (Photomicrograph of mining tailing, a) Nonpolarized light b) Crossed polars (kl:calcite, op: opaque mineral))



Şekil 5. Kireçtaşı örneğine ait ince kesit fotoğrafı. Mikritik dokulu kireçtaşı. a) Teknikol, b) Çift nikol (kp:kayaç parçası, kl:kalsit) Photomicrograph of limestone. Micritic limestone a) Nonpolarized light b) Crossed polars (kp:rocks fragment, kl:calcite)

Agrega olarak kullanılan kalsitler Gümüşhane yöresinde yaygın olarak rastlanan Berdiga Formasyonu'ndan (masif kireçtaşı) alınmıştır. Berdiga formasyonu, arazide açık gri rengeyle uzaktan tanınabilen bir kayaç topluluğu olup, arazide sert bir topoğrafya vermesi ile dikkat çekmektedir. Agregadan alınan örneklerin mikroskopik incelemelerinde; kayaç içinde bileşen olarak kalsit ve kayaç kırıntularına rastlanmıştır. Kayaçta çimentosunun mikritik (küçük kristalli) karakterde olduğu ve mineralojik ve dokusal özellikleri dikkate alındığında sığ denizel ortam ürünü olduğu sonucuna varılmış olup, kayaç mikritik kireçtaşı olarak adlandırılmıştır. Kireçtaşı örneğine ait ince kesit fotoğrafı Şekil 6'da görülmektedir

2.1.2. Çimento (Cement)

Üretilen betonlarda CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimento Gümüşhane'de bulunan Aşkale Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Çizelge 3'de çimentoya ait kimyasal analiz sonuçları verilmiştir

Çizelge 3. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (Chemical, physical and mechanical properties of cement)

Kimyasal Analizler		Fiziksel Testler	
SiO ₂	18.59	İncelik (45 µ elek üstü %)	8.58
Al ₂ O ₃	4.69	Özgül Ağırlık	3.08
Fe ₂ O ₃	3.04	Özgül Yüzey (cm ² /g)	4145
CaO	60.34	Priz Başlangıcı (saat-dk)	2saa-33dk
MgO	1.92	Priz Sonu (saat-dk)	3saa-18dk
SO ₃	2.89	Hacim Genişlemesi (mm)	0.7
Kızdırma Kaybı	7.19	Su İhtiyacı %	29.9
Na ₂ O	0.11	Basınç Dayanımı (MPa)	
K ₂ O	0.64		
CI	0.018	2.Gün	23.9
Ölçülemeyen	0.57	28.Gün	51.1
Toplam	100		
s.CaO	0.38		
Katkı%	17.87		

2.2. Metot (Method)

2.2.1. Beton örneklerin hazırlanması (Preparation of concrete samples)

Yapılan çalışmada betonların üretimi Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı ve Malzemeleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kurşun-çinko madeni artığı kayaçlardan elde edilen agregalar ve Kireçtaşı agregaları birbirleri arasında %25-%50-%75 oranlarında yer değiştirilmiştir. TS 802 referans alınarak C16/20, C25/30 ve C35/45 olmak üzere 3 farklı basınç dayanımı sınıfında karışım dizaynı yapılmıştır. Karışım dizaynı yapılan C16/20, C25/30 ve C35/45 beton dayanım sınıflarına ait karışım miktarları Çizelge 4'de görülmektedir.

Çizelge 4. 1m³ beton karışımında malzeme miktarı (The amount of material in 1 m³ of concrete mix)

Dayanım Sınıfı	Beton Türü	Su (lt)	Çimento (kg)	İnce Agrega (0-4 mm)		Kaba Agrega (4-22.4 mm)		Teorik Bir. Hac.Ağ. kg/m ³
				Artık Kayaç	Kireçtaşı	Artık Kayaç	Kireçtaşı	
C16/20	100KT	218	315	-	849	-	873	2255
	25P75KT			224	637	237	655	2286
	50P50KT			449	425	473	436	2317
	75P25KT			673	212	710	218	2347
	100P			898	-	947	-	2378
C25/30	100KT	218	411	-	810	-	831	2270
	25P75KT			214	608	226	624	2300
	50P50KT			428	405	451	416	2329
	75P25KT			642	203	677	208	2358
	100P			856	-	902	-	2387
C35/45	100KT	218	558	-	750	-	767	2292
	25P75KT			198	562	208	575	2319
	50P50KT			396	375	416	383	2346
	75P25KT			594	187	624	192	2373
	100P			792	-	832	-	2400

Beton karışımında kullanılan agrega türleri arasında %25, %50, %75 oranlarında yer değiştirme yapılmıştır. Oluşturulan beton türleri Çizelge 5'de görülmektedir.

Çizelge 5. Beton serilerinin kodlanması ve oransal değişimleri (Coding of concrete series and proportional changes)

Beton türü	% Agrega oranları
100P	%100 Pasa
100KT	%100 Kireçtaşı
75KT25P	%75 Kireçtaşı - %25 Pasa
50KT50P	%50 Kireçtaşı - %50 Pasa
25KT75P	%25 Kireçtaşı - %75 Pasa

2.2.2. Su emme oranı tayini (Identification of water absorption)

Su emme oranı (SEO) ASTM C642'de belirtilen esaslara göre yapılmıştır.

SEO hesaplanmasında;

$$m = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (1)$$

eşitliği kullanılmıştır.

Burada; m; Ağırlıkça su emme oranı, (%), A; Etüv kurusu ağırlık, (g), B; Doygun kuru yüzey ağırlığı, (g) ifade etmektedir [29].

2.2.3. Görünür boşluk oranı tayini (Identification of permeable pore space volume)

Boşluk oranı tayini ASTM C642'de belirtilen esaslara göre yapılmıştır.

Boşluk oranı tayini hesaplanmasında;

$$B_o = \frac{C-A}{C-D} \times 100 \quad (2)$$

eşitliği kullanılmıştır.

Burada; B_o; Görünür boşluk oranı, (%), A; Etüv kurusu ağırlık, (g), C; Su içinde kaynatma sonrası suya doymuş

ağırlığı, (g),D; Su içerisindeki ağırlığı, (g) ifade etmektedir [29].

2.2.4. Yoğunluk Tayini (Identification of density)

Yoğunluk tayini ASTM C642'de belirtilen esaslara göre yapılmıştır.

Yoğunluk, numunenin tayin edilen kütlesi ve hacmi kullanılarak, aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$g = \left[\frac{A}{A-D} \right] \cdot \rho \quad (3)$$

Burada; g; Numunenin yoğunluğu (g/cm³), A; Etüv kurusu ağırlık, (g), D; Su içerisindeki ağırlığı, (g), ρ; suyun yoğunluğu, 1 g/cm³ ifade etmektedir [29].

2.2.5. Basınç dayanımı tayini (Identification of compressive strength)

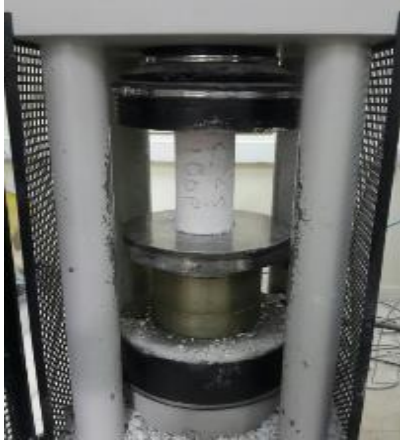
Basınç dayanımı, 100x200 mm ebadında silindirik beton örnek üzerinde TS EN 12390-3'de belirtilen esaslara göre yapılmıştır. Beton basınç dayanımının hesaplanması:

$$f_{c=} = \frac{F}{A_c} \quad (4)$$

eşitliği kullanılmıştır.

Burada; f_c ; Basınç dayanımı, MPa (N/mm^2), F ; Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N , A_c ; Numunenin, üzerine basınç uygulandığı en kesit alanı, (mm^2) ifade etmektedir [30].

Basınç dayanımın belirlenmesinde Şekil 7’de görülen basınç presi kullanılmıştır.



Şekil 7. Beton basınç presi (Concrete pressure press)

2.2.6. Eğilme dayanımı tayini (Identification of Bending Strength)

Eğilme basınç deneyi $10 \times 10 \times 40$ cm ebadında kiriş örnek üzerinde TS-EN 12390-5’te belirtilen esaslara göre yapılmıştır. Eğilme basınç dayanımı testleri, 28 günlük numunelere uygulanmıştır. Eğilme basınç presi (Şekil 8) TS-EN 12390-3’e uygun olarak ayarlanmış ve otomatik olarak kırılarak kırılma yükleri ve basınç gerilmeleri (eğilme basınç dayanımları) saptanmıştır.

$$f_{cf} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times d_1 \times d_2} \quad (5)$$

Burada; f_{cf} ; Eğilme Dayanımı, (MPa), F ; En büyük yük (N), d_1 ve d_2 ; Numunenin en kesit boyutları (mm), l ; Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm) ifade etmektedir [31].



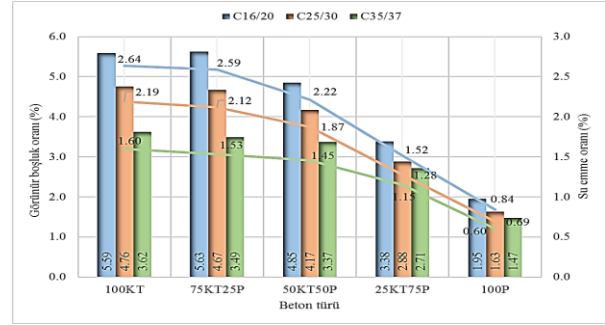
Şekil 8. Eğilme presi (Bending press)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Beton örneklerin fiziksel özellikleri “su emme oranı, görünür boşluk oranı, yoğunluğu” ve mekanik özellikleri “basınç dayanımı ve eğilme dayanımı” sonuçları değerlendirilmiştir.

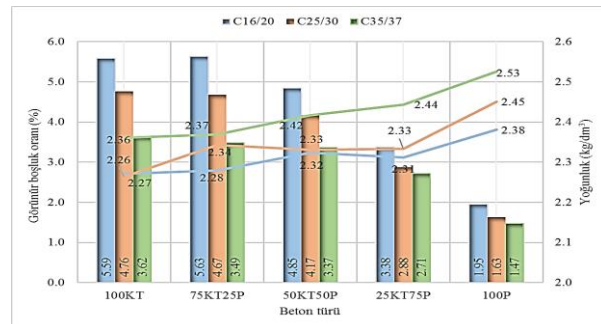
3.1. Betonun Fiziksel Özellikleri (Physical Properties of Concrete)

Beton örneklerin görünür boşluk oranı ve su emme oranı arasındaki ilişki Şekil 9’da görülmektedir.



Şekil 9. Beton örneklerin görünür boşluk oranı ve su emme oranı arasındaki ilişki (Relationship between permeable pore space and water absorption rate of concrete specimens)

En büyük görünür boşluk oranı %100 kireçtaşı ile üretilen beton türünde ve C16/20 dayanım sınıfındadır. C16/20 dayanım sınıfında hazırlanan beton örneklerin diğer dayanım sınıfındaki beton örneklerine göre Su/Çimento oranının fazla olmasından kaynaklı görünür boşluk oranı ve su emme değerleri artmaktadır. Beton içerisindeki pas oranının artışı ile görünür boşluk oranında azalma olmuştur. Görünür boşluk oranındaki azalmaya bağlı olarak su emme oranında da azalma olmuştur. Betonun boşluk oranında ki ve su emme oranındaki azalma dayanım sınıfının artışı ile de azalmıştır. Dayanım sınıfının artışı ile su emme oranında azalma beton içerisindeki boşluğun azalmasının yanında agrega olarak kullanılan pasanın da su emmesi oranının kireçtaşına göre düşük olmasından da kaynaklanmaktadır. Beton örneklerin görünür boşluk oranı ve yoğunluk arasındaki ilişki Şekil 10’da görülmektedir.



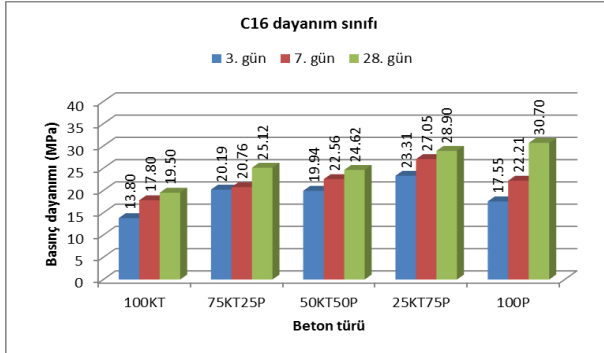
Şekil 10. Beton örneklerin görünür boşluk oranı ve yoğunluk arasındaki ilişki (Relationship between permeable pore space and density of concrete specimens)

Beton örneklerin görünür boşluk oranlarındaki azalma ile yoğunluk değerlerinde ki artış görülmektedir. Bu durum basınç dayanımının artışı ve beton içerisindeki pasanın

oranının artışı ile yoğunluk değerinin artmasına neden olmaktadır. En büyük yoğunluk değeri %100 Pasa ile üretilen beton örneklerde ve C35/45 dayanım sınıfında belirlenmiştir.

3.2. Betonun Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Concrete)

Beton örneklerin mekanik özelliklerinden basınç dayanımı değerlendirmeleri C16, C25 ve C35 dayanım sınıflarında yapılmıştır. Dayanım sınıflarına ve kür sürelerine ait grafikler Şekil 11-Şekil 13'de görülmektedir.

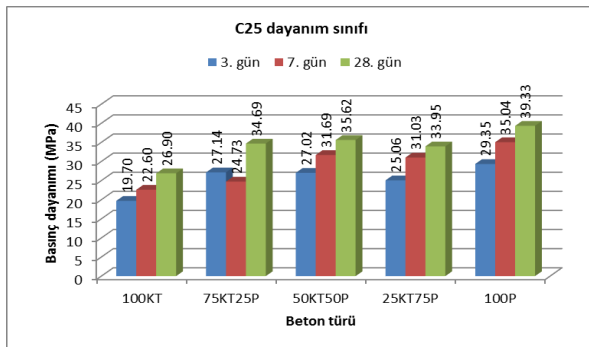


Şekil 11. Beton örneklerin C16 dayanım sınıfında 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri (The compressive strength values of 3, 7 and 28 days in C16 strength class of concrete samples)

C16 dayanım sınıfında Kireçtaşı-Pasa agrega karışımı ile hazırlanan beton örneklerin basınç dayanımı değerlendirmesinde;

- 3 günlük basınç dayanımında 100KT beton türünün 75KT25P, 50KT50P, 25KT75P ve 100P beton türlerine göre sırasıyla %46, %44, %69 ve %27 daha küçük basınç dayanımına sahip olduğu,
- 7 günlük basınç dayanımında 100KT beton türünün 75KT25P, 50KT50P, 25KT75P ve 100P beton türlerine göre sırasıyla %17, %27, %52 ve %25 daha küçük basınç dayanımına sahip olduğu,

28 günlük basınç dayanımında 100KT beton türünün 75KT25P, 50KT50P, 25KT75P ve 100P beton türlerine göre sırasıyla %29, %26, %48 ve %57 daha küçük basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

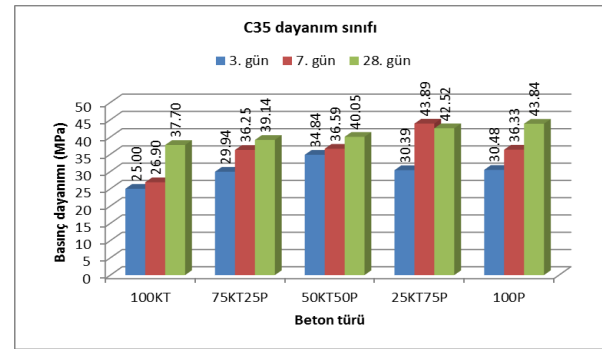


Şekil 12. Beton örneklerin C25 dayanım sınıfında 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri (The compressive strength values of 3, 7 and 28 days in C25 strength class of concrete samples)

C25 dayanım sınıfında Kireçtaşı-Pasa agrega karışımı ile hazırlanan beton örneklerin basınç dayanımı değerlendirmesinde;

- 3 günlük basınç dayanımında 100KT beton türünün 75KT25P, 50KT50P, 25KT75P ve 100P beton türlerine göre sırasıyla %38, %37, %27 ve %49 daha küçük basınç dayanımına sahip olduğu,
- 7 günlük basınç dayanımında 100KT beton türünün 75KT25P, 50KT50P, 25KT75P ve 100P beton türlerine göre sırasıyla %9, %40, %37 ve %55 daha küçük basınç dayanımına sahip olduğu,

28 günlük basınç dayanımında 100KT beton türünün 75KT25P, 50KT50P, 25KT75P ve 100P beton türlerine göre sırasıyla %29, %32, %26 ve %46 daha küçük basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 13. Beton örneklerin C35 dayanım sınıfında 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri (The compressive strength values of 3, 7 and 28 days in C35 strength class of concrete samples)

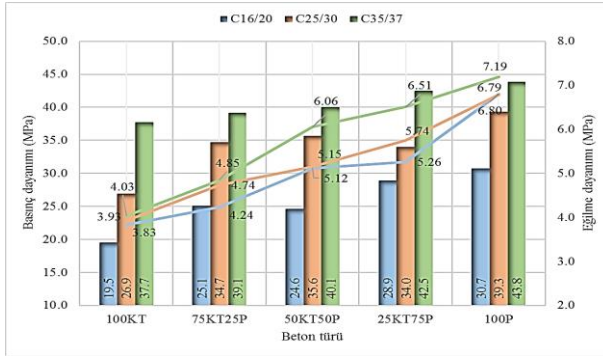
C35 dayanım sınıfında Kireçtaşı-Pasa agrega karışımı ile hazırlanan beton örneklerin basınç dayanımı değerlendirmesinde;

- 3 günlük basınç dayanımında 100KT beton türünün 75KT25P, 50KT50P, 25KT75P ve 100P beton türlerine göre sırasıyla %20, %39, %22 ve %22 daha küçük basınç dayanımına sahip olduğu,
- 7 günlük basınç dayanımında 100KT beton türünün 75KT25P, 50KT50P, 25KT75P ve 100P beton türlerine göre sırasıyla %35, %36, %63 ve %35 daha küçük basınç dayanımına sahip olduğu,
- 28 günlük basınç dayanımında 100KT beton türünün 75KT25P, 50KT50P, 25KT75P ve 100P beton türlerine göre sırasıyla %4, %6, %13 ve %16 daha küçük basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, agregaların yüksek yoğunluklu olması beton dayanımında yüksek olmasını etkilemektedir. Beton örneklerde pasa miktarının artması ile betonların basınç dayanımları artmaktadır. Agrega olarak kullanılan Pasa, madenden çıkarıldığı bölge ile değişiklik göstermektedir. Bu durum, içerisindeki kurşun miktarı ve kayacın yapısında da farklılığa neden olmaktadır. Bu nedenle beton örneklerin basınç dayanımlarında düzensizlikler görülmüştür. Basınç dayanımlarındaki düzensizliklerine rağmen pasa katkılı bütün beton

türlerinde referans beton türü olan %100 kireçtaşı ile üretilen beton türüne göre basınç dayanımları bütün dayanım sınıflarında yüksektir. Pasa ile hazırlanan betonların dayanımının kireçtaşı ile hazırlanan betonlara göre yüksek çıkmasının diğer bir nedeni ise; Kurşun-çinko madeninden elde edilen pasa, çıkarıldığı haliyle etrafı kil ve silt gibi ince malzemeler ile kaplı haldedir. Kayaçlardan elde edilen agrega kil ve silt ile kaplı haliyle beton yapmak mümkün değildir. Pasa, kırılıp granülometrisine göre gruplara ayrılmadan önce yıkanmış ve kurutulmuş olmasından dolayı agregada etrafında ince malzeme bulunmamaktadır. Agregalarda bulunan ince maddelerin, betonda aderansı azaltması, prize veya sertleşmeye etki etmesi, mukavemeti düşürmesi, çimento hamurunda zararlı kimyasal reaksiyonlara yol açabilmesi ve donatının korozyona karşı korunmasını azaltıcı etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, pasa'dan elde edilen agregalar kireçtaşı agregalarına göre kirlilik açısından daha temizdir. Bu durumda mekanik özellikleri etkilediği düşünülmektedir.

Beton örneklerin 28 günlük basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 14'de görülmektedir.



Şekil 14. Beton örneklerin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki (Relationship between compressive strength and bending strength of concrete specimens)

Beton örneklerin eğilme dayanımı değerleri, basınç dayanımına paralellik göstermektedir. Pasa eklenen beton türlerinde, basınç dayanımı değeri artarken benzer şekilde eğilme dayanımı değerleri de artmaktadır. En büyük basınç dayanımı ve eğilme dayanımı C35/45 dayanım sınıfında %100 Pasa ile üretilen beton türünde belirlenmiştir. Betonun mekanik özelliklerinden basınç dayanımı ve eğilme dayanımı bir biri ile doğrudan ilişkisi olan özelliklerdir. Beton karışımına pasa eklenmesi ile basınç dayanımında elde edilen olumlu artış eğilme dayanımında da benzer şekilde artışa neden olmuştur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

İçerisindeki kurşun miktarının işlenmesi ekonomik olmamasından dolayı atıl durumda olan kurşun-çinko maden artıkları "Pasa" ile hazırlanan beton örneklerin ile üretilen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, Pasa ve Kireçtaşı agregalarının değişik oranlarda (%25, %50, %75) karıştırılması ile

hazırlanan beton örnekler üzerinde sertleşmiş beton deney sonuçları belirlenmiştir. Buna göre;

Su emme oranı değerlerine göre, pasa oranının artışı ile su emme oranı değeri düşmektedir. Bütün beton türlerinde su emme oranı değerleri, beton dayanım sınıfının artışı ile azaldığı görülmüştür. %100 kireçtaşı ile üretilen beton türüne göre %100 Pasa ile üretilen betonlar yaklaşık %66 oranında daha az su emme değerine sahiptir.

Pasa oranının artışı ile hazırlanan örneklerde görünür boşluk oranı değeri düşmektedir. Bütün beton türlerinde görünür boşluk oranı değerleri, beton dayanım sınıfının artışı ile azaldığı görülmüştür. %100 kireçtaşı ile üretilen beton türüne göre %100 Pasa ile üretilen betonlar yaklaşık %63 oranında daha az görünür boşluk oranı değerine belirlenmiştir.

Kurşun-çinko maden artığından üretilen beton agregaları köken olarak kireçtaşı olmasına rağmen, çalışmada kullanılan kireçtaşı agregasına göre basınç dayanımı yüksek ölçülmüştür. Kireçtaşı agregaları ile karıştırılarak hazırlanan beton örneklerinde bütün dayanım sınıflarında artış gözlenmiştir.

Pasa'nın beton karışımına giren agrega içerisindeki oranının artışına bağlı olarak mekanik özelliklerine olumlu etkisi olduğu görülmüştür.

Pasa'nın beton içerisinde kullanımı ile madenden çıkarılıp depolama sahalarında depolanan ve çevresel etkilerle doğanın kirlenmesine neden olabilecek artık malzemeler ekonomiyeye kazandırılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazar, bu çalışmayı 113M317 proje numarası ile destekleyen TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu)'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Küleççi G. ve Yılmaz, A.O., "Trabzon volkanitlerinin dış cephe kaplaması olarak kullanılabilirliğinin araştırılması", *MSU Fen Bil. Dergisi*, 5(2): 459-464, (2017).
- Arıoğlu E., Arıoğlu N. ve Yılmaz, A.O., "Çözümlü beton agregaları problemleri", *Evrin Yayın Evi*, İstanbul, (1999).
- Akbulut H. ve Gürer, C., "Atık mermerlerin asfalt kaplamalarda agrega olarak değerlendirilmesi", *İmo Teknik Dergi*, 9: 26-29, (2006).
- Çelik Ö., "Uçucu kül, silis dumanı ve atık çamur katkılarının çimento dayanımlarına etkileri", *Hazır Beton Kongresi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 215, (2004).
- Oliveira M.B. and Vazquez, E., "The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete", *Waste Management*, 16(1-3): 113-117, (1996).
- Çobanoğlu İ., Çelik S.B., Çam O., Etiz H. ve Kurşun, M., "Denizli bölgesi traverten artıklarının beton agregası olarak

- kullanılabilirliğinin incelenmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3): 92-99, (2014).
7. Aslantaş B., “Karaburun kireçtaşı taşocakları atıklarının agrega kaynağı olarak kullanılmasının araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
 8. Emiroğlu M., Yıldız, S. ve Özgan, E., “Lastik agregalı betonlarda elastisite modülünün deneysel ve teorik olarak incelenmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 24(3): 469-476, (2009).
 9. Demirel C. ve Şimşek O., “Erken yaştaki atık betonların geri dönüşüm agregası olarak beton üretiminde kullanılabilirliği ve sürdürülebilirlik açısından incelenmesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3: 226-235, (2015).
 10. Gayarre F.L., Boadella I.L., Pérez C.L., López M.S. and Cabo A.D., “Influence of the ceramic recycled aggregates in the masonry mortars properties”, *Construction and Building Materials*, 132, 457-461, (2017).
 11. Vural A., “Biogeochemical characteristics of Rosa canina grown in hydrothermally contaminated soils of the Gümüşhane Province, Northeast Turkey”, *Environ. Monit. Assess.* 187: 486, (2015).
 12. Vural A., “Trace/heavy metal accumulation in soil and in the shoots of acacia tree, Gümüşhane-Turkey”, *MTA Dergisi*, 148: 85-106, (2014a).
 13. Vural A., “Assessment of metal pollution associated with an alteration area: Old Gümüşhane, NE Black Sea”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 3219-3228, (2014b).
 14. Ketin İ., “Anadolu’nun tektonik birlikleri”, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Dergisi*, 66: 20-34, (1966).
 15. Topuz G., Altherr R., Schwarz W.H., Dokuz A. and Meyer H.P., “Variscan amphibolitefacies metamorphic rocks from the Kurtoğlu metamorphic complex (Gümüşhane area, Eastern Pontides, Turkey)”, *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch)*, 96: 861-873, (2007).
 16. Yılmaz Y., “Petrology and structure of the Gümüşhane granite and surrounding rocks, North-Eastern Anatolia”, *Doktora Tezi*, Londra Üniversitesi, 260, (1972).
 17. Topuz G., Altherr R., Siebel W., Schwarz W.H., Zack T., Hasözbeç A., Barth M., Satır M. and Şen C., “Carboniferous high-potassium I-type granitoid magmatism in the Eastern Pontides: The Gümüşhane pluton (NE Turkey)”, *Lithos*, 116: 92-110, (2010).
 18. Çoğulu E., “Gümüşhane ve Rize granitik plutonlarının mukayeseli petrojeolojik ve jeokronolojik etüdü”, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, İstanbul, (1975).
 19. Kandemir R., “Gümüşhane ve yakın yöresindeki erken-orta jura yaşlı şenköy formasyonunun çökel özellikleri ve birikim koşulları”, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, (2004).
 20. Adamia S., Lordkipanidze M. and Zakariadze G., “Evolution of an active continental margin as exemplified by the Alpine history of the Caucasus”, *Tectonophysics*, 40: 183-199, (1977).
 21. Pelin S., “Alucra (Giresun) güneydoğu yöresinin petrol olanakları bakımından jeolojik incelemesi, K.T.Ü., *Doçentlik Tezi*, Yayın No: 87, Trabzon, (1977).
 22. Tokel S., “Stratigraphical and volcanic history of Gümüşhane region (Kuzeydoğu Türkiye)”, *PhD. Thesis*, University College London, (1972).
 23. Kaygusuz A., Wolfgang S., Şen C. and Satır M., “Petrochemistry and petrology of I-type granitoids in an arc setting: the composite Torul pluton, Eastern Pontides, NE Turkey”, *International Journal of Earth Sciences*, 97: 739-764, (2008).
 24. Aslan M. and Aliyazıcıoğlu İ., “Geochemical and petrological characteristics of the Kale (Gümüşhane) volcanic rocks: implications for the Eocene evolution of eastern Pontide arc volcanism, Northeast Turkey”, *International Geology Review*, 43: 595-610, (2001).
 25. Güner S., Er M., Gümüşel A. ve Boğuşlu M., “Gümüşhane-Eski Gümüşhane yöresindeki cevherleşmelere ait jeoloji raporu” Aslan N. ve Akçay M., “Mastra (Gümüşhane) Au-Ag yatağının jeolojik, mineralolojik ve jeokimyasal özellikleri”, *64. TJK Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, Ankara, (2011).
 26. Güven İ., “Doğu pontidlerin 1/25000 ölçekli kompilasyonu”, *MTA Genel Müdürlüğü Yayını*, 9: 16-17, (1993).
 27. Vural A., “Toprak ve akasya ağacı sürgünlerindeki iz/ağır metal dağılımı, Gümüşhane – Türkiye”, *MTA Dergisi*, 148: 85-106, (2014), *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Rapor No: 8029, 525*, Ankara, (1985)
 28. ASTM C642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Annual Book of ASTM Standards, (2004).
 29. TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deneysel numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, (2010).
 30. TS-EN 12390-5, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deneysel numunelerinin eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, (2010).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Mekanik olarak sentezlenen NiTi + Zn tozlarının karakterizasyonu ve sinterlenebilirliğinin araştırılması

Investigation of characterization and sinterability of mechanically synthesized NiTi + Zn powders

Yazar(lar) (Author(s)): Sinan AKSÖZ¹, Bülent BOSTAN²

ORCID¹: 0000-0003-4324-5043

ORCID²: 0000-0002-6114-875X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aksöz S. ve Bostan B., “Mekanik olarak sentezlenen NiTi + Zn tozlarının karakterizasyonu ve sinterlenebilirliğinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 437-443, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389617

Mekanik Olarak Sentezlenen NiTi + Zn Tozlarının Karakterizasyonu ve Sinterlenebilirliğinin Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Sinan AKSÖZ^{1*}, Bülent BOSTAN²

¹Teknoloji Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 05.08.2017; Kabul/Accepted : 15.09.2017)

ÖZ

Bu çalışmada; önalaşım NiTi tozları ve % 2, % 4, % 6, % 8 ve % 10 Zn toz oranları kullanılarak bilyeli değirmende 60 dakika mekanik öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Öğütülen NiTi + Zn toz karışımları 750 MPa basınç altında presleme sonrası 1000°C'de 60 dakika sinterlenmiştir. Öğütülen ve presleme sonrası sinterlenen numunelere mikroyapısal değişiklikleri tespit etmek için; Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Element Dağılım Spektrometresi (EDS), Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ve X-Ray (XRD) analizleri uygulanmıştır. NiTi + Zn toz karışımlarında artan Zn oranına bağlı olarak, toz morfolojisinde değişiklikler tespit edilmiş ve özellikle % 10 Zn ilave edilen tozlarda öğütme sonrası NiTi tozlarının yüzeyini homojen bir şekilde tamamen kapladığı tespit edilmiştir.

NiTi + Zn tozlarının 1000°C'de 60 dakika sinterleme sonrası Zn'nin sıvı faz sinterlenmesi ile yapıda NiTi tozlarının arasında bir bağ oluşmuş ve böylece düşük sıcaklıklarda sinterleme işlemi gerçekleştirilebilmiştir. Ayrıca; NiTi + % 10Zn içeriği ile homojen ve pürüzsüz bir mikro yapı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Önalaşım NiTi tozları, ŞBA, toz metalurjisi.

Investigation of Characterization and Sinterability of Mechanically Synthesized NiTi + Zn Powders

ABSTRACT

In this study; prealloyed NiTi powders and ball mills with 2%, 4%, 6%, 8% and 10% Zn powder ratios were subjected to mechanical milling for 60 minutes. The milled NiTi + Zn powder mixtures were pressed under 750 MPa pressurize and then sintered at 1000°C for 60 minutes. In order to determine the microstructural changes in the samples which were milled, pressed and then sintered samples; SEM, EDS, DSC and XRD analyses were applied, respectively. Changes in powder morphology were observed, depending of the increasing Zn content in the NiTi + Zn powder mixtures and it was determined that the powders containing 10% Zn completely covered the surface of the NiTi powders in a homogeneous manner after milling.

Zn content in the micro structure also provided the alloy to be sintered at low temperatures by completely filling the gaps and pores after the sintering process at 1000°C for 60 min. In addition, a homogenous and smooth microstructure was obtained with NiTi + 10Zn% content.

Keywords: Prealloyed NiTi powders, SMA, powder metallurgy.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nitinol olarak adlandırılan şekil bellekli alaşımlar (ŞBA), yaklaşık olarak eşit Ni ve Ti elementlerinin kimyasal olarak bileşiminden oluşur. Eşsiz şekil bellek özelliği ve iyi sönümlenme etkisi, mükemmel bir biyoyumluluk, aşınma ve korozyon dirençleri sayesinde bu alaşımlar çok sayıda endüstriyel ve tıbbi uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Ni-Ti alaşım sisteminden oluşan ŞBA'lar genellikle döküm yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. Ancak ergitme yöntemi ile üretilen numunelerde tatmin edici sünekliğe, kırılma direncine ve süperelastiklik gibi özelliklere

ulaşılamamaktadır [4,5]. Bu özellikleri üretim koşulları ve çevre şartlarından etkilenmektedir. NiTi alaşım sistemi ile parça üretiminde parametrelerin ve çevre koşullarının belirlenmesinde ise yapıda oluşması muhtemel hidrojen doğrudan etkilemektedir [6,7]. Bu sebeple çevre koşullarından kaynaklanan hidrojen içeriğinin giderilmesinde, yeni teknoloji ve uygulama alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanlardan toz metalurjisi (TM) yöntemi ise NiTi alaşımlarının üretilmesi ve şekillendirilmesinde sağladığı farklı metot ve yöntemlerle bu alanların başında gelmektedir [8, 9]. Bilinen TM yöntemlerinden; metal enjeksiyon kalıplama, kıvılcım plazma sinterleme ve sıcak izostatik presleme gibi uygulama alanları bu yöntemlerin başında gelmektedir [9-12].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : saksoz@pau.edu.tr

TM üretim yöntemlerinden mekanik alaşımlama (MA) yöntemi, hâlihazırda bulunan alaşım sistemi içerisine

farklı bir alaşım tozunun ilavesinde ve kompozisyonun değiştirilmesinde kullanılan en uygun yöntemlerin başında gelmektedir [13]. MA yöntemi NiTi ŞBA alaşım sisteminde yer alan Ni ve Ti oranlarının değiştirilmesinde ve yapıya farklı alaşım elementlerinin sentezlenmesinde sağladığı eşsiz verimliliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [14-17]. Uygulanan MA ile homojen bir yapının kolaylıkla elde edilebilmesi ve istenen malzeme özellikleri açısından malzeme sentezinin kolaylığı ve üretim süreçlerinin sağladığı kolaylıklar bu tekniğin ön plana çıkmasının başlıca nedenleri arasındadır. Bu tekniğin kullanılmasıyla istenilen partikül boyutunun elde edilebilmesi, hatta nano partiküllerin üretimi sayesinde, malzemelerde benzersiz fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler elde edilebilmektedir [18].

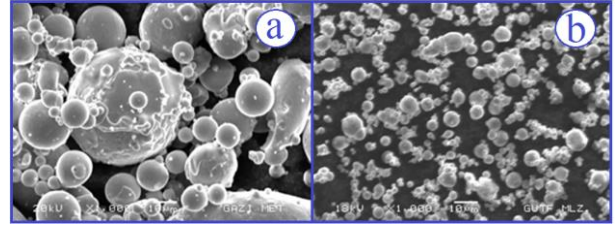
Bu çalışmada; önalışimli NiTi ŞBA tozları ve saf Zn (% 2, 4, 6, 8, 10) tozları, mekanik öğütme tekniği kullanılarak 60 dakika süre ile öğütülmüştür. Elde edilen NiTi-Zn toz karışımlarını karakterize etmek için; SEM, EDS, XRD ve DSC analizleri yapılmıştır. Çalışma ile; farklı oranlarda ilave edilen Zn içeriğinin NiTi alaşımında oluşturduğu etkiler ve NiTi alaşımının presleme ve sinterleme özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmalarda başlangıç malzemesi olarak önalışimli NiTi ŞBA tozları ve saf Zn tozları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan NiTi tozları, Nanoval (NANOVAL GmbH & Co. KG Kienhorststraße 61-65 D-13403 Berlin) adlı şirketten önalışimli olarak temin edilmiştir. NiTi ve Zn tozlarının üretiminde gaz atomizasyon yönteminin kullanılması tozların küresel yapıya sahip olmasını sağlamıştır (Şekil 1.). Küresel yapıdaki tozlar presleme ve sinterleme aşamalarında işlem kolaylığı sağlaması açısından önemli rol oynamıştır [19, 20]. Çizelge 1, kullanılan tozların atomik ve ağırlıkça yüzdeleri göstermektedir. Çizelge 2, sırasıyla mekanik alaşımlama çalışmalarında kullanılan NiTi ve Zn tozlarının ortalama parçacık boyutlarını göstermektedir. Çizelge 2 incelendiğinde, önalışimli NiTi tozlarının boyutu 35 µm iken, Zn tozlarının boyutu 5 µm'dir.

ŞBA'nın kullanım alanları açısından faz dönüşüm sıcaklıkları ve histerisiz eğrileri önemlidir. Çalışmada, önalışimli NiTi tozlarının dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için DSC analizi uygulanmıştır (Şekil 2).

Şekil 2'de önalışimli NiTi tozlarının DSC analizi incelendiğinde, östenit dönüşüm sıcaklığının yaklaşık -30°C'de başladığı ve +10°C'de tamamlandığı görülmektedir (Oda sıcaklığında dönüşüm tamamlanmaktadır). Bu değer çalışmanın yaklaşık oda sıcaklığında dönüşümünü tamamladığını göstermektedir.



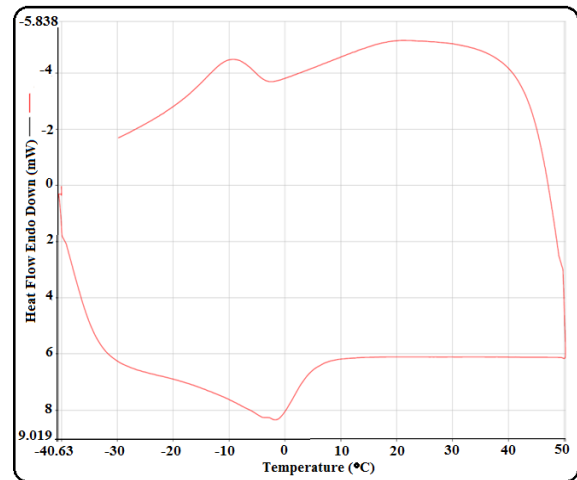
Şekil 1. a) Önalışimli NiTi ŞBA tozları ve b) saf Zn tozlarının SEM görüntüleri (SEM images of a) prealloyed NiTi powders and b) pure Zn powders)

Çizelge 1. Önalışimli NiTi tozlarının Ti ve Ni oranlarının atomik ve ağırlıkça yüzdeleri (Weight and atomic Ti and Ni % ratios of prealloyed NiTi powders)

Elementler	Ti	Ni
% Ağırlıkça	45,5	54,5
% Atomik	49,4	50,6

Çizelge 2. Önalışimli NiTi ve Zn tozlarının ortalama tane boyut dağılımları (The average particle size distribution of prealloyed NiTi and pure Zn powders)

Tozlar	Ortalama tane boyut dağılımı (µm)
NiTi	35
Zn	5



Şekil 2. Önalışimli NiTi tozlarının DSC analizi (DSC analysis of prealloyed NiTi powders)

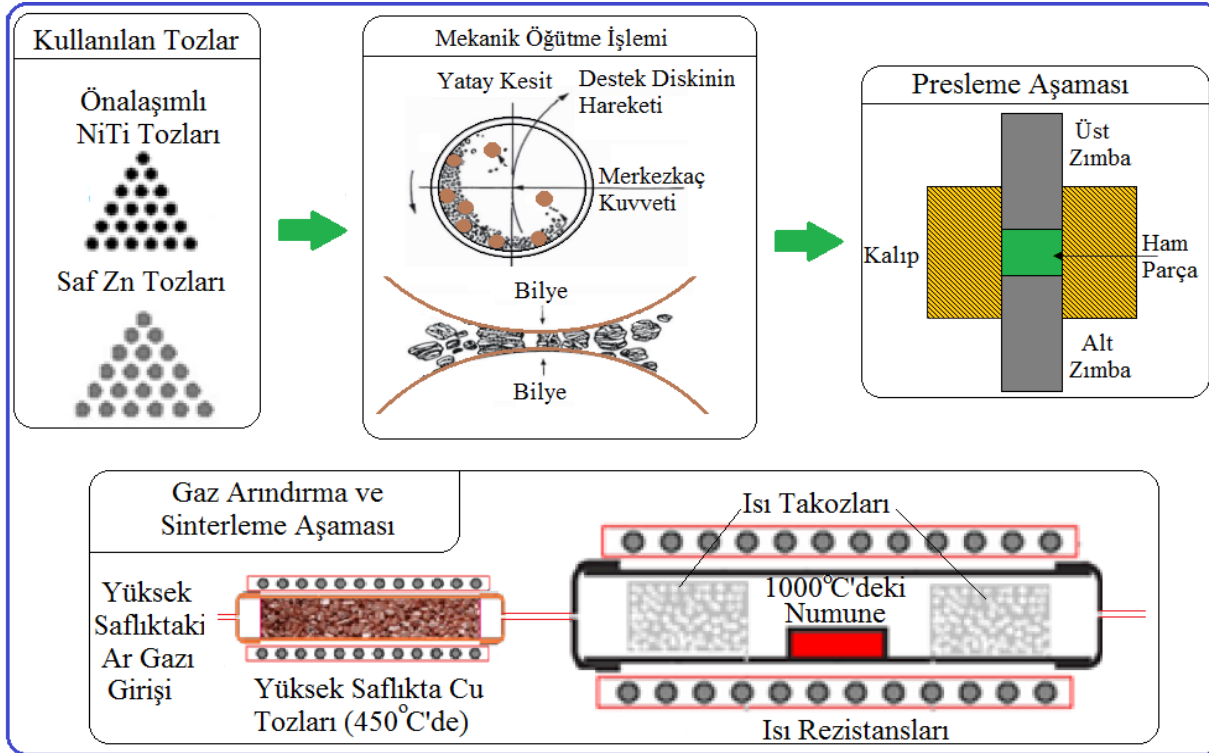
Şekil 3'te önalışimli NiTi ŞBA tozları ve Zn tozlarının mekanik olarak alaşımlanması için yapılan deneylerin şematik gösterimi yer almaktadır. Önalışimli NiTi tozları içerisine sırasıyla % 2, 4, 6, 8, 10 oranlarında saf Zn tozları ilave edilmiş ve klasik öğütme işlemleri [21], spex tipi değirmende 60 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te görülen sinterleme işlemi için yüksek saflıktaki argon gazı atmosferi altında (% 99,999), 1000°C sinterleme sıcaklığında 60 dakika sinterlenerek parçalar elde edilmiştir. Sinterleme işlemi esnasında Argon gazı;

safliğının korunması ve iyileştirilmesi için, 450°C'ye getirilmiş yüksek saflıktaki bakır talaşı tozu içeren fırın içinden geçirilmiştir. Sinterleme aşamasında kullanılan tüpün kuvars cam olması nedeniyle, oluşabilecek hidrojen ve oksijen gibi istenmeyen elementlerin önüne geçilebilmiştir [22]. Sinterleme aşamasında cam tüp içerisine yerleştirilen ısı takozları sayesinde, ısının bir bölgede muhafaza edilerek sinterlemenin aktif bir şekilde gerçekleşmesi sağlanmıştır. Üretilen numunelerin yoğunluk ölçümlerinin tespiti için Arşimet yoğunluk ölçümü kullanılmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 4'te 60 dakika mekanik olarak öğütülen NiTi + Zn (% 2, 4, 6, 8, 10) toz karışımlarının SEM görüntüleri yer almaktadır. MA ile öğütme işleminde üç temel mekanizma etkin olup bunlar; soğuk kaynaklanma, kırılma ve dengelenme mekanizmasıdır [23].

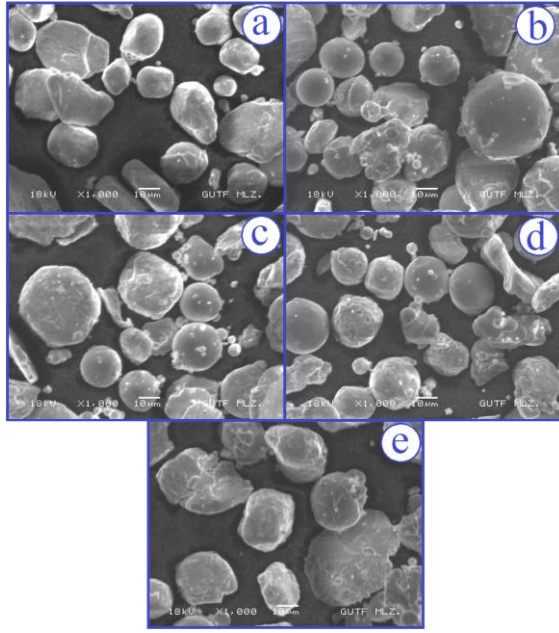
Şekil 4'te 60 dakika süreyle öğütme işlemine tabi tutulan önalaşım NiTi + Zn (% 2, 4, 6, 8, 10) toz karışımlarının



Şekil 3. NiTi - Zn parçalarının üretiminin şematik gösterimi (The schematic diagram about fabrication of NiTi-Zn parts)

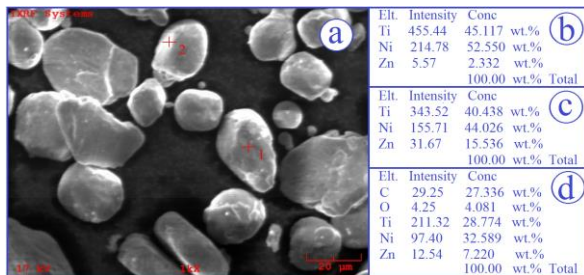
Numunelerin karakterize edilebilmesi için sinterleme işlemi öncesi ve sonrasında numunelere JEOL model JSM-6060LV Taramalı Elektron Mikroskobu ile SEM, Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS), X-ışını Kırınımı (XRD) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizleri gerçekleştirilmiştir. DSC analizleri, her numuneden 5-10 mg alınarak ve 5°C / dak'lık bir tarama oranında gerçekleştirilerek alaşımların faz yapısı, mikroyapı dönüşümleri ve parçacık morfolojilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. DSC analizlerinde Exstar S11 7300 model cihaz, soğutma maddesi olarak ise sıvı azot kullanılmış olup (numuneleri -40°C'ye soğutmak için), ölçümler için -40°C ile +50°C sıcaklık aralığı kullanılmıştır. XRD analizleri APD 2000 PRO XRD model Xray cihazında, 20-70° ve 2θ tarama aralığında, 0,04 adım ve bakır katot (CuKα) kullanılarak elde edilmiştir.

SEM görüntüleri incelendiğinde, NiTi alaşımının sahip olduğu yüksek sertlik nedeniyle tozlarda hafif düzleşme eğilimine sahip soğuk kaynak oluşumunun etkileri tespit edilmiştir. Bu durum NiTi + % 10Zn toz karışımında, özellikle artan Zn içeriğiyle birlikte açıkça fark edilmektedir. Şekil 4.e'deki SEM görüntüsü incelendiğinde, % 10Zn tozlarının önalaşım NiTi tozlarının yüzeyini tamamen kapladığı görülebilmektedir. Ayrıca, % 10Zn içeriğinin NiTi yüzeylerini kaplaması ile birlikte parçacık boyutunu genişlettiği gözlenmiştir. Bu nedenle, Zn içeriği önalaşım NiTi alaşımına sahip olan NiTi alaşımlarının üretim aşamasında, preslenebilirlik durumu ve sonrasındaki sinterleme işlemlerinde önemli bir rol üstlenmektedir. Malzemenin mikroyapı açısından; gözenektane etkileşimi ve yüksek yoğunluklu malzeme üretim süreçlerinde önemli bir rol üstlendiği söylenebilir.

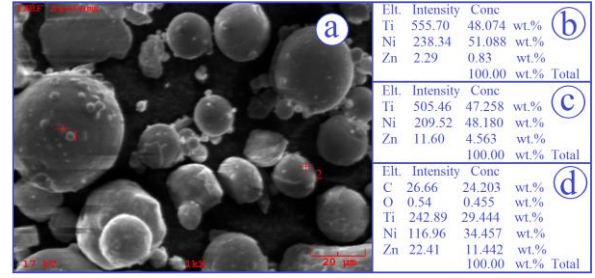


Şekil 4. NiTi – Zn tozlarının 60 dakika MA sonrası SEM görüntüleri; a) NiTi + % 2Zn, b) NiTi + % 4Zn, c) NiTi + % 6Zn, d) NiTi + % 8Zn, e) NiTi + % 10Zn, (SEM images of NiTi-Zn powders after milling for 60 min; a) NiTi + 2%Zn, b) NiTi + 4%Zn, c) NiTi + 6%Zn, d) NiTi + 8%Zn, e) NiTi + 10%Zn)

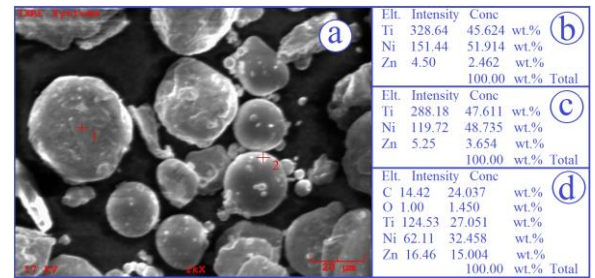
Şekil 5, 6, 7, 8 ve 9’da sırasıyla; NiTi + % 2Zn, NiTi + % 4Zn, NiTi + % 6Zn, NiTi + % 8Zn ve NiTi + % 10Zn toz karışımlarının, 60 dakika MA işlemine tabi tutulan numunelerinin SEM görüntüleri ve bu görüntüler üzerinden alınan EDS görülmektedir. Şekil 5, 6, 7, 8 ve 9’daki toz karışımlarına uygulanan EDS analizleri, farklı bölgelerdeki Ni, Ti, Zn, C ve O elementlerinin ve kompozisyonlarının dağılımını belirlemek için nokta ve genel analizleri içermektedir. NiTi + % 2Zn, NiTi + % 6Zn ve NiTi + % 8Zn (Şekil 5, 7 ve 8) EDS analizleri detaylı olarak incelendiğinde, NiTi tozlarının (parlak-beyazımsı taneler) yüzeyinde az miktarda Zn içeriği bulunduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, NiTi + % 10Zn toz karışımlarının (Şekil 9) EDS analizleri incelendiğinde, nokta ve genel EDS analizleri ile artan Zn içeriğinin NiTi tozlarının yüzeyine konsolide olmaya başladığı tespit edilmiştir.



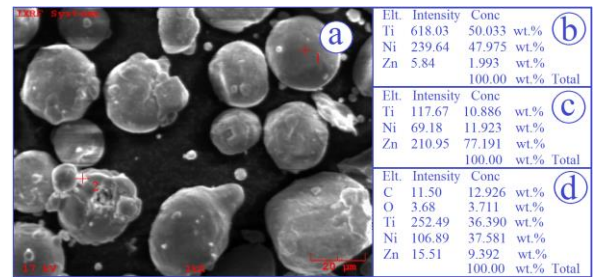
Şekil 5. NiTi tozlarına ilave edilen % 2Zn tozu ilavesi sonrası, a) SEM mikroyapı görüntüsü ve b, c, d) EDS analizleri (a) Microstructural image of SEM and b, c, d) EDS analyses of 2%Zn powder addition in NiTi powders)



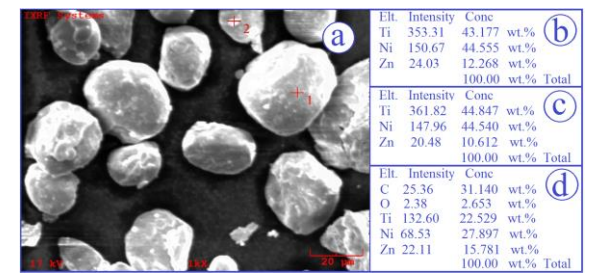
Şekil 6. NiTi tozlarına ilave edilen % 4Zn tozu ilavesi sonrası, a) mikroyapı görüntüsü ve b, c, d) EDS analizleri, (a) Microstructural image of SEM and b, c, d) EDS analyses of 4%Zn powder addition in NiTi powders)



Şekil 7. NiTi tozlarına ilave edilen % 6Zn tozu ilavesi sonrası, a) mikroyapı görüntüsü ve b, c, d) EDS analizleri, (a) Microstructural image of SEM and b, c, d) EDS analyses of 6%Zn powder addition in NiTi powders)



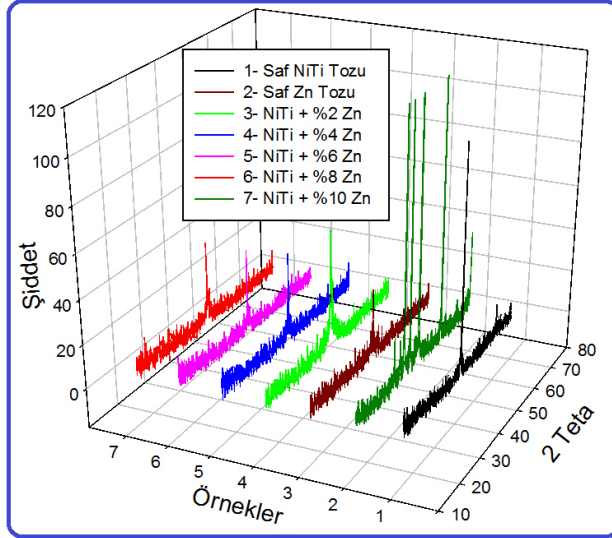
Şekil 8. NiTi tozlarına ilave edilen % 8Zn tozu ilavesi sonrası, a) mikroyapı görüntüsü ve b, c, d) EDS analizleri (a) Microstructural image of SEM and b,c, d) EDS analyses of 8%Zn powder addition in NiTi powders)



Şekil 9. NiTi tozlarına ilave edilen % 10Zn tozu ilavesi sonrası, a) mikroyapı görüntüsü ve b, c, d) EDS analizleri (a) Microstructural image of SEM and b, c, d) EDS analyses of 10%Zn powder addition in NiTi powders)

Şekil 10’da sırasıyla, önalaşım NiTi, saf Zn tozları ve 60 dakika öğütme işlemine tabi tutulan NiTi + Zn (% 2, 4, 6, 8, 10) tozlarının XRD analiz sonuçlarını yer almaktadır. Şekil

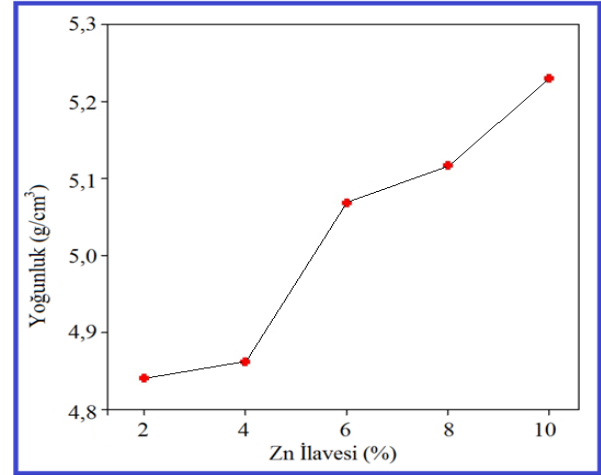
10'daki XRD analizleri detaylı olarak incelendiğinde, önalışım NiTi tozlarının B₂ ana fazına ait piklerden oluştuğu görülmektedir ($2\theta = 42.1^\circ$ ve $2\theta = 43.2^\circ$). Ayrıca Şekil 10 incelendiğinde, numune 3 ile 7 arasındaki XRD analizleri, sırasıyla 60 dakika süreyle MA prosesi sonucunda NiTi + Zn (% 2, 4, 6, 8, 10) toz karışımlarından alınan pik değerlerini göstermektedir. NiTi + Zn (% 2, 4, 6, 8, 10) toz karışımlarının XRD analiz sonuçları incelendiğinde, $2\theta = 42.1^\circ$ 'de en yüksek pik değerleri tespit edilmiştir. Öğütme sonrasında pik şiddetlerinin azalması ve genişlemesi, öğütme koşulları ve alaşım sistemine bağlı olarak amorf faz yapısının oluşmaya başladığını göstermektedir [14].



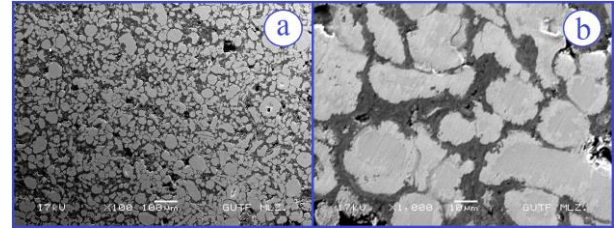
Şekil 10. Ham NiTi, Zn tozlarının ve 60 dakika öğütülen NiTi + Zn tozlarının XRD analizleri (XRD analyses of green NiTi, Zn and 60 min. milled NiTi + Zn powders)

Şekil 11'de 1000°C 'de 60 dakika sinterleme işlemine tabi tutulan NiTi alaşımındaki farklı Zn içeriğinin (% 2, 4, 6, 8, 10) numune yoğunluğuna etkisi görülmektedir. NiTi içerisine ilave edilen % Zn içeriğinin yoğunluğa etkisi incelendiğinde ise, artan Zn içeriğine bağlı olarak yoğunlukta da bir artış olduğu, en yüksek yoğunluk değeri ise NiTi + % 10Zn ilavesine ait numunede yaklaşık 5.25 g/cm^3 olarak tespit edilmiştir. Artan Zn içeriği ile birlikte yoğunluğun artması ise, 1000°C 'de 60 dakika sinterleme süresinde Zn'nin sıvı faza geçerek sıvı faz sinterlemenin oluşturmasıdır. Sıvı faz sinterleme sayesinde Zn tozları NiTi tozlarının etrafını sarma eğilimine geçerek, gözeneksiz homojen ve pürüzsüz bir yapı elde edilmesine imkân sağlamıştır [24].

Şekil 12'de, NiTi + % 10Zn içeriğinin 1000°C 'de 60 dakika sinterleme sonrası SEM görüntüleri yer almaktadır. SEM görüntüleri detaylı olarak incelendiğinde; Zn'nin NiTi tozlarının arasında oluşan sıvı faz sinterleme ile birlikte, homojen bir şekilde dağıldığı ve gözenekleri kapattığı görülebilmektedir.

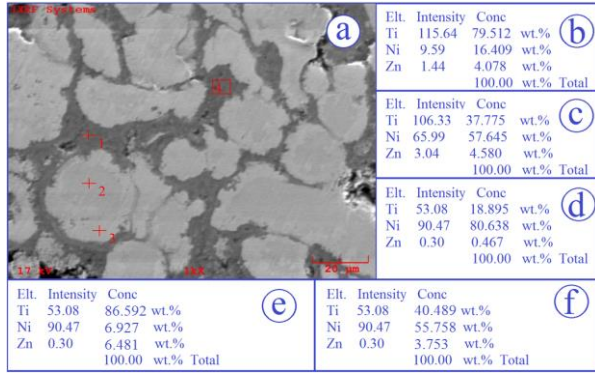


Şekil 11. 1000°C 'de 60 dakika sinterlenmiş NiTi-Zn alaşım sisteminde ilave edilen Zn oranına bağlı olarak yoğunluk değişimi (Density change depending on the ratio of Zn added in NiTi-Zn alloy system which sintered for 60 minutes at 1000°C)



Şekil 12. NiTiZn alaşımının 1000°C 'de 60 dakika sinterleme sonrası mikroyapı görüntüleri (Microstructure images of NiTiZn alloy after sintering at 1000°C for 60 minutes)

Şekil 12.a ve b'deki SEM görüntüleri incelendiğinde, açık ve koyu gri renkte mikro-yapısal farklılıklar olduğu görülebilmektedir. Bu farklılıklar NiTi ve Zn alaşımlarına ait fazları temsil etmektedir. Burada, Zn tozları oluşan sıvı faz sinterleme sayesinde, NiTi tozlarının arasındaki gözenekleri homojen bir şekilde doldurarak, NiTi + Zn sisteminin oluşmasını sağlamıştır. Bu sistem sayesinde NiTi alaşım tozlarının etrafını kapladığı ve yüksek sinterleme sıcaklık değerlerine ihtiyaç duyulan NiTi alaşımının, daha düşük sıcaklıklarda elde edilen sıvı faz sinterleme ile etkin bir sinterleme işlemi gerçekleştirildiği görülebilmektedir [25]. Böylece 60 dakika gibi kısa bir sinterleme süresinde gözenekler kapanmış ve homojen bir karışım elde edilmiştir. Burada kullanılan Zn oranının değiştirilmesi ile birlikte; NiTi alaşımlarındaki istenen bir durum olan gözenekli yapıların elde edilebilmesi ve gözeneklilik oranının değiştirilebilmesinde önemli bir yol kat edilmiş olacaktır [26]. Böylece implant malzeme üretim teknolojilerinde saf olarak kullanılan NiTi alaşımlarının [27] ve NiTi alaşımlarına ilave edilen diğer alaşım elementlerinin [28] etkisinin tespitinde önemli bir yer tuttuğu görülebilmektedir.



Şekil 13. NiTi - % 10Zn alaışımının 1000°C’de 60 dakika sinterleme sonrası; a) SEM görüntüsü, b, c ve d) 1. 2. ve 3. EDS nokta analizi, e) 4. EDS bölgesel analiz, f) Genel EDS analizi (a) NiTi - 10% Zn alloy after sintering at 1000°C for 60 minutes; a) SEM image, b, c and d) 1st, 2nd and 3rd EDS point analyses, e) 4th EDS regional analysis, f) General EDS analysis)

1000°C’de 60 dakika süreyle NiTi + % 10Zn toz karışımının sinterleme işleminden sonra, elemental, bölgesel ve genel olarak mikro-yapısal farklılıkların saptanması amaçlı SEM görüntüsü üzerinden EDS analizleri alınmıştır (Şekil 13). Şekil 13. a’daki sinterlenmiş NiTi + % 10Zn alaışımının EDS analizleri incelendiğinde (Şekil 13.b, c, d, e), açık renkli bölgelerin (2. ve 3. nokta analizleri) NiTi alaışımına ait bölgeyi temsil ettiği, ancak yapıda bölgesel olarak Zn’nin de olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, koyu gri renk ve diğer nokta analizlerinde ise (1. nokta ve 4. bölge analizleri) Zn fazının element yüzdesinin arttığı tespit edilmiştir. Burada, koyu gri renkte görülen bölgelerin NiTi alaışımını çevreleyen Zn fazını temsil ettiği ve bu fazın gözenekleri homojen bir şekilde kapattığı görülebilmektedir. SEM ve EDS analizleri sonucunda, TM kullanılarak şekil hafızalı NiTi alaışımının üretimi için gözeneklilik-yapı etkileşimi açısından preslenebilirlik ve takip eden proseslerde (sinterleme vb.) Zn fazının önemli rol oynadığı görülebilmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, önalaışımli NiTi ŞBA tozlarına MA yöntemiyle sırasıyla % 2, 4, 6, 8 ve 10 Zn ilavesinin ve NiTi + % 10Zn alaışımının 1000°C’de 60 dakika sinterlenmesi sonrasında sırasıyla aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- 60 dakika mekanik öğütme ile birlikte, ilave edilen % 10 oranındaki Zn alaışımı NiTi tozlarının üzerine tamamen kaplayarak, homojen bir mikro-yapısal oluşum ortaya koymuştur.
- 60 dakika boyunca öğütülen NiTi + Zn toz karışımlarında, XRD analizlerinde B₂ fazının daha baskın olduğu belirlenmiş ve oluşan amorf fazlar nedeniyle ve pik şiddetlerinde azalma ve 2 teta mesafesinde genişleme görülmüştür.

- Sinterleme işlemi 1000°C’de 60 dakika süreyle uygulandıktan sonra; artan Zn içeriğine bağlı olarak numunelerde yoğunluk değerinin arttığı ve böylece gözenekliliğin düştüğü tespit edilmiştir.
- Artan Zn içeriği ile birlikte yoğunluğun artması, 1000°C’de ve 60 dakika sinterleme süresinde Zn’nin sıvı faza geçerek, sıvı faz sinterlemenin oluşmasına ve bu sayede NiTi tozlarının etrafını sarma eğilimine geçerek, gözeneksiz homojen ve pürüzsüz bir yapı elde edilmesine imkân sağlamıştır.
- Noktasal ve bölgesel EDS analizleri ile; artan Zn içeriğinin NiTi toz tanelerini çevrelediği ve gözenekleri yoğunlaştırma açısından doldurduğu belirlenmiş, böylece NiTi alaışımaları için düşük sinterleme sıcaklıklarının (~ 1000°C), ilave edilen alaışım elementleri ile sağlanabileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERERNCES)

- [1] Cengiz E., Ozkendir O.M., Kaya M., Tirasoglu E., Karahan I.H., Kimura S., Hajiri T., “Alloying effect on K-shell fluorescence parameters of porous NiTi shape memory alloys”, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 192: 55–60, (2014).
- [2] Ota A., Yazaki Y., Yokoyama K. and Sakai J., “Hydrogen Absorption and Thermal Desorption Behavior of Ni-Ti Superelastic Alloy Immersed in Neutral NaCl and NaF Solutions under Applied Potential”, *Materials Transactions*, 50, 7 : 1843 - 1849, (2009).
- [3] Tosun G., Ozler L., Kaya M., Orhan N., “A study on microstructure and porosity of NiTi alloy implants produced by SHS”, *Journal of Alloys and Compounds*, 487 : 605–611, (2009).
- [4] Elahinia M.H., Hashemi M., Tabesh M., Bhaduri S.B., “Manufacturing and processing of NiTi Implants”, *Prog. Mater. Sci.* 57 : 911–946, (2012).
- [5] Thier M., Hühner M., Kobus E., Drescher D., Bouraue C., “Microstructure of As-cast NiTi alloy”, *Materials Characterization*, 27 :3, 133-140, (1991).
- [6] Ogawa T., Yokoyama K., Asaoka K. and Sakai J., “Hydrogen Embrittlement of Ni–Ti Superelastic Alloy in Ethanol Solution Containing Hydrochloric Acid”, *Mater. Sci. Eng. A*, 393 : 239–246, (2005).
- [7] Yokoyama K., Ogawa T., Asaoka K., Sakai J. and Nagumo M., “Degradation of Tensile Strength of Ni–Ti Superelastic Alloy due to Hydrogen Absorption in Methanol Solution Containing Hydrochloric Acid” : *Mater. Sci. Eng. A*, 360 : 153–159, (2003).
- [8] Aksöz S., “Microstructural and Mechanical Investigation of NiTi Intermetallics Produced by Hot Deformation Technique”, *Arab J Sci Eng*, 42: 2573, (2017).
- [9] Aksöz S., Bostan B., “Characteristic Properties of NiTi Shape memory Alloy Powders with Powder Injection Molding” *International Multidisciplinary Microscopy Congress. Springer Proceedings in Physics Switzerland*, 18: 129-142, (2014).
- [10] Krone L., Schüller E., Bram M., Hamed O., Buchkremer H.P., Stöver D., “Mechanical Behaviour of NiTi Parts Prepared by Powder Metallurgical Methods”, *Materials Science and Engineering A*, 378 : 185–190, (2004).

- [11] Shearwood C., Fu Y.Q., Yu L., Khor K.A., “Spark Plasma Sintering of TiNi Nano Powder”, *Scripta Materialia*, 52: 455–460, (2006).
- [12] Biswas A., “Porous NiTi by Thermal Explosion mode of SHS: Processing, Mechanism and Generation of Single Phase Microstructure”, *Acta Materialia*, 53 : 1415–1425, (2005).
- [13] Aksöz S., Özdemir A.T, Bostan B., “Alloyed AA2014 Aluminium Powders Synthesised With Carbon and Determined Properties” *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, Vol 27., No 1, 109-115, (2012).
- [14] Aksöz S., Demir Ü., Ada H., Gökmeşe H., Bostan B., “NiTi Şekil Bellekli Alaşım Tozlarına Mekanik Alaşımlama Yöntemi Kullanılarak Elementel Ni ve Ti Tozlarının İlavesinin Mikroyapısal İncelenmesi”, *GU J Sci, Part C*, 5 (1): 99-106, (2017).
- [15] Mousavi T., Karimzadeh F., Abbasi M.H., “Synthesis and characterization of nanocrystalline NiTi intermetallic by mechanical alloying”, *Mater. Sci. Eng. A*, 487 : 46 – 51, (2008).
- [16] Jiang X., Liu Q., Zhang L., “Electrochemical hydrogen storage property of NiTi alloys with different Ti content prepared by mechanical alloying”, *Rare Met.* 30 63 – 67, (2011).
- [17] Takasaki A., “Mechanical alloying of the Ti-Ni system”, *Phys. Stat. Sol.* 169A, 183 – 191, (1998).
- [18] Karolus M., Panek J., “Nanostructured Ni-Ti alloys obtained by mechanical synthesis and heat treatment”, *Journal of Alloys and Compounds*, 658 : 709 – 715, (2016).
- [19] German R.M., “*Sintering Science and Technology*”, R.M. German, G.L. Messing and R.G. Cornwall (eds.), Materials Research Laboratory, The Pennsylvania State University, University Park, PA, pp:259-264, (2000).
- [20] German R.M: “*Sintering Theory and Practice*”, ISBN: 978-0-471-05786-4, 1-568, 21st edition, April, Wiley-Interscience, (2008).
- [21] Suryanarayana C., “Mechanical alloying and milling”, *Prog. Mater. Sci.*, 46 1–184, (2001).
- [22] Nishida M., Hara T., Ohba T., Yamaguchi K., Tanaka K., and Yamauchi K., “Experimental Consideration of Multistage Martensitic Transformation and Precipitation Behavior in Aged Ni-Rich Ti-Ni Shape Memory Alloys”, *Materials Transactions*, 44(12) : 2631-2636, (2003).
- [23] Karabulut, H., Çıtak, R., Çinici, H., “Effect Of Mechanical Alloying Duration On Transverse Rupture Strength of Al+10% Al₂O₃ Composites”, *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 28(3): 635-643, (2013).
- [24] Özer A., Tür Y.K., “Tetragonal Zirkonya Katkılı Cr₃C₂-NiCr Sermet Kompozitlerin Karakterizasyonu ve Mekanik Özellikleri”, *AKU J. Sci. Eng.*, 14 : OZ5760, (375-380), (2014).
- [25] Liu B., Huang S., Humbeeck J.V., Vleugels J., “Rapid synthesis of dense NiTi alloy through spark plasma sintering of a TiH₂/Ni powder mixture”, *Materials Letters*, 191 : 89–92, (2017).
- [26] Li. D.S., Zhang Y.P., Eggeler G., Zhang X.P., “High porosity and high-strength porous NiTi shape memory alloys with controllable pore characteristics”, *Journal of Alloys and Compounds*, 470, L1–L5, (2009).
- [27] Zhang L., He Z.Y., Tan J., Zhang Y.Q., Stoica M., Prashanth K.G., Cordill M.J., Jiang Y.H., Zhou R., Eckert J., “Rapid fabrication of function-structure-integrated NiTi alloys: Towards a combination of excellent superelasticity and favorable bioactivity”, *Intermetallics*, 82: 1-13, (2017).
- [28] Wang L., Wang C., Lu W., Zhang D., “Superelasticity of NiTi–Nb metallurgical bonding via nanoindentation observation”, *Materials Letters*, 161: 255–258, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Fonksiyonel olarak kademelendirilmiş modüllü yapıştırıcı bağlantıların ısı gerilme analizi

Thermal stress analysis of functionally graded modulus adhesive joints

Yazarlar (Authors): Munise Didem DEMİRBAŞ¹, Mustafa Kemal APALAK²

ORCID¹: 0000-0001-8043-6813

ORCID²: 0000-0002-3263-5735

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Demirbaş M. D. ve Apalak M. K., "Fonksiyonel olarak kademelendirilmiş modüllü yapıştırıcı bağlantıların ısı gerilme analizi", *Politeknik Dergisi*, 21(2): 445-456, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389620

Fonksiyonel Olarak Kademelendirilmiş Modüllü Yapıştırıcı Bağlantıların Isıl Gerilme Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Munise Didem DEMİRBAŞ*, Mustafa Kemal APALAK

Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 11.08.2017 ; Kabul/Accepted : 06.12.2017)

ÖZ

Bu çalışma, farklı kompozisyonel gradyant üs değerleri için düzlem içi ısı akısı altında yapıştırıcı katmanının fonksiyonel olarak kademelendirildiği, bir boyutlu-fonksiyonel kademelendirilmiş içi boş dairesel plakaların (FKDP) termal artık gerilme analizini incelemektedir. İçi boşaltılmış dairesel plakaların malzeme özellikleri, güç yasası dağılımına göre değişmektedir. Kutupsal koordinatlardaki ısı transferi ve Elastisite denklemlerinden oluşan tek boyutlu termo-elastik model sonlu-farklar yöntemi ile ayrıştırılarak oluşturulan denklem setleri tekil değer ayrışımı yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Yapıştırıcı katmanının elastisite modülü 2000 MPa ve 6500 MPa' a ve 2000 MPa' dan 2000 MPa' a değişmektedir ve bu katmanın kademelendirilmesi üç farklı kompozisyonel gradyant üs değeri için yapılmıştır. Yapıştırıcı bölgesi ve her iki dairesel levha radyal yönde düzlem boyunca kademelendirilmiş ve her iki dairesel levhanın kompozisyonel gradyant üs değeri $m=1.0$ olarak göz önüne alınmış ve yapıştırıcı katmanındaki kademelendirilmenin sonuçlarının tespiti için bu değer sabit tutulmuştur.

Bu çalışma ile yapıştırıcı ile birleştirilmiş plakalarda eşdeğer gerilme dağılımlarının önemli ölçüde etkilendiği gösterilmiştir. Isıl sınır şartına bağlı olarak yapıştırıcı katmanın düşük elastisite modülünden yüksek elastisite modülüne doğru kademelendirilmesi (2000→6500 MPa) durumunda diğer duruma göre eşdeğer gerilme seviyelerinin %25 azaldığı vurgulanmıştır. Kompozisyonel gradyant üst değerinin $n=0.1$ ' den $n=1.0$ doğru artması ile maksimum seviyelerdeki eşdeğer gerilme tesir alanının daraldığı ifade edilmiştir.

Çalışmanın sonuçlarına göre fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka bağlantılarında optimum özelliklere ve performansa sahip yapıştırıcı katmanının kompozisyonel gradyant üst değeri $n=1.0$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca yapıştırıcı katmanındaki ve bağlantı ara yüzündeki ısı gerilmenin minimuma indirgenebilmesi için yapıştırıcı katmanının kademelendirilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel kademelendirilmiş modüllü yapıştırıcı, sonlu farklar yöntemi, fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar, ısı gerilme analizi.

Thermal Stress Analysis of Functionally Graded Modulus Adhesive Joints

ABSTRACT

This study examines the thermal residual stress analysis of one-dimensional functionally graded clamped hollow circular plates (FGCP) that are functionally graded on the adhesive layer under in-plane heat flux for different compositional gradient exponents. The material properties of the hollow circular plates were assumed in-plane according to a power-law distribution. The volume fraction of the constituent varies in the plane, not in the plate thickness direction. The transient heat condition and Navier's equations in polar coordinates describing the one-dimensional thermo-elastic model were discretized using finite-difference method, and the set of linear equations were solved using the pseudo singular-value method. The elasticity modulus in adhesive layers varied from 2000 MPa to 6500 MPa and from 6500 MPa to 2000 MPa, and the grading of this layer was performed for three different compositional grading exponents. The adhesive region and both circular plates are grading along the plane in the radial direction and the compositional gradient exponent of both circular plates is taken as $m = 1.0$ and this value is held constant for the determination of the results of the grading in the adhesive layer.

This study has shown that equivalent stress distributions are significantly influenced by adhesively bonded plates. It has been emphasized that depending on the thermal boundary condition, when the adhesive layer is graded from a low modulus of elasticity to a high modulus of elasticity (2000 → 6500 MPa), the equivalent stress level of the adhesive layer is reduced by 25% compared to the other case. It has been stated that the field of influence of the equivalent stress in the maximum levels shrinks by increasing the increase of the compositional gradient exponent $n = 0.1$ to $n = 1.0$.

According to the results of the study, the compositional grading upper limit of the adhesive layer with optimum properties and performance in functional graded circular plate joints was set to $n = 1.0$. It also emphasizes the necessity of grading the adhesive layer so that the thermal stress in the adhesive layer and the interface of the connection can be reduced to a minimum.

Keywords: Functionally graded modulus adhesive, finite difference method, functionally graded circular plates, thermal stress analysis

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin hızla gelişmesi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan makine ve elamanlarında, hem ısı direncinin yüksek olması, hem de yapının mekanik özelliklerinin beklentileri karşılayabilmesi için malzemelerde kademeli bir yapıya ihtiyaç duyulmuştur. Yüksek

sıcaklıklara maruz bir makine elemanında ileri teknoloji malzemesi olarak nitelendirilen Fonksiyonel Kademelendirilmiş Malzemeler (FKM) kullanılmıştır. Bu malzemeler ile iki farklı mikro yapının ve özelliklerin uygun bir şekilde değiştirilmesinden dolayı bağlanma yüzünde ortaya çıkan ara yüzey çatlakları ve kırılmalar önlenmiştir [1-3]. Makine ve elemanlarında FKM' ler kullanılarak sistemlerin çalışma sıcaklığı yükseltilmiş ve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mddemirbas@erciyes.edu.tr

malzemelerin; tokluk, aşınma direnci, sertlik ve korozyon dayanımı gibi özelliklerinin de artırılması sağlanmıştır. FKM' ler, uzay taşıtlarında yapısal ve enerji değişim malzemesi olarak, uçak parçalarında, roket motorların dış duvarlarında, kesici takım imalatında, gaz yalıtım anahartlarında, mikro ve opti-elektronik devrelerde, biyomalzemelerde ve yakıt pillerinde kullanılmaktadır [4-8]. FKM' ler ilk olarak yüksek sıcaklık uygulamalarında ısı bariyer olarak düşünülmüş ve bu uygulamalarda, meydana gelen gerilme ve deformasyonların en düşük seviyelerde olduğu en uygun malzeme kompozisyonu için araştırmalar yapılmıştır. Bu amaçla arzu edilen performans göre en uygun hacimsel orana sahip modeli geliştirmek ve ısı artırı gerilmelerin azaltılması için yapılması gerekenleri belirlemek araştırmaların hedefi olmuştur [9-12]. Yüksek sıcaklık malzemesi olarak düşünülen FKM'lerden yapılmış bağlantıların birleştirilmesinde yapıştırıcılar kullanılmıştır. Yapıştırıcı ile bağlantıda, ısı sınır şartı uygulanan bağlantı elemanındaki ısı yük tesirini üzerine alan ve diğer bağlantı elemanına aktarılan yükün azaltılmasında yapıştırıcının oldukça etkin rol oynadığı görülmüştür. Bundan dolayı hem bağlantı elemanı hem de yük tesirini üzerine alan yapı elemanı olarak kullanılan yapıştırıcı pek çok çalışmanın konusu olmuştur ve olmaktadır. Yapıştırıcının kullanıldığı pek çok alanda yapılan çalışmalarda ara yüzey ve yapıştırıcı uyumu, yapışma performansı üzerinde sıcaklığın tesiri, yapıştırıcının miktarı, vizkozitesi, bağlanma mukavemeti araştırılmıştır [13-20]. Isıl veya mekanik sınır şartları için yapıştırıcı ile birleştirilmiş FKM bağlantılarında ısı gerilme davranışlarının tespit edilebilmesi için plakaların kompozisyonel gradyant üst değerlerinin ve bağlantı kompozisyonunun belirlenmesine odaklanılmıştır. Yapılan çalışmalarda plakalara ve bağlantı ara yüzeyinde meydana gelen ısı gerilme dağılımı incelenirken yapıştırıcı katmanı homojen kabul edilmiştir [21-23].

Fonksiyonel kademelendirmenin pek çok uygulamada kullanılması ile malzeme geçişleri arasında meydana gelen uyumsuzluklar ortadan kaldırılmıştır. Bundan dolayı yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mukavemetinin ve ömrünün artırılması için yapıştırıcı ile bağlantı yüzeyi arasında malzeme geçiş bölgesinin düzenlenmesinde de fonksiyonel kademelendirmenin kullanılabileceği son teknik literatürde düşünülmüş ve bunun ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [24]. Fonksiyonel kademelendirilmiş modüllü yapıştırıcı (FGMA/FKMY) katmanının yapılması ile üst üste binme bağlantılarda gerilme konsantrasyonunun azaltılmasının sağlanabileceği ve gerilme dağılımının bütün bağlanma yüzeyi boyunca düzgün bir şekilde dağıtılabileceği ifade edilmiştir. Böylece gerilme yığılmalarından kaynaklanan ayrılma bölgelerinin azaltılacağı ve önemli ölçüde iyileştirilebileceği vurgulanmıştır. Bu konu ile ilgili güncel olarak yapılan teknik literature aşağıda detaylandırılmıştır [25].

Stapleton ve diğerleri [26] fonksiyonel olarak kademelendirilmiş malzeme özelliklerine sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılardaki ayrılmalara neden olan gerilme yığılmalarının azaltılmasının mümkün olacağını

ifade etmişlerdir. Onlar pratik olarak yapıştırıcı katmanının kademelendirilmesinin artan imalat komplikasyonları, imalat sırasında yapışkan akış nedeniyle kademelendirmedeki değişiklikler ve yüklem koşullarının değiştirilmesinin kademelendirmenin etkiliği üzerindeki tesirini göstermişlerdir. FKMY' ların kullanılması ile gerilme dağılımının daha uniform olduğunu ve bu şekilde hasar görmeden yayılma potansiyeline sahip olduğunu vurgulamışlardır. Carbas ve diğerleri [27] fonksiyonel olarak modifiye edilmiş bir yapıştırıcı katmanında, bağlantı boyunca eşit bir gerilme dağılımı oluşturmak için analitik ve sayısal analizler yapmışlardır. Böylece daha güçlü ve verimli yapıştırıcı bağlantılarının yapılabileceğini vurgulamışlar ve yapıştırıcı katmanındaki gerilme dağılımlarını, yapıştırıcı sertliğinin bağlantı boyunca değiştiği farklı kompozisyonel gradyant üs değerleri için incelemişlerdir. Fonksiyonel kademelendirilmiş yapıştırıcı katmanlarının, homojen özelliklere sahip yapıştırıcı katmanları ile kıyaslandığında daha yüksek bağlanma mukavemetine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Carbas ve diğerleri [28] yapıştırıcı katmanının fonksiyonel olarak kademelendirilmesinde indüksiyon ısıtmanın tesirini araştırmışlardır. Böylece bağlantı bölgesinde yapıştırıcının düşük sıcaklık veya yüksek sıcaklıkta düzgün şekilde kürlendiği durumlara kıyasla daha yüksek bir birleştirme mukavemeti bulunduğunu vurgulamışlardır.

Spaggiari ve Dragoni [29] fonksiyonel olarak kademelendirilmiş yapıştırıcı katmanlı boru şeklindeki bağlantıların burulma tesirindeki gerilme dağılımlarını analitik olarak incelemişler ve yapıştırıcı katmanında kayma gerilmelerinin sabit tutulabildiği uygun sertlik kompozisyonunu önermişlerdir. Yapıştırıcı teknolojisi ile yığılma problemlerinin üstesinden gelmek için polimer içinde dağılan nanoparçacıklar ile FKMY önermişler ve gerilmeleri düzenli hale getirmek için yapıştırıcı katmanının uygun bileşimini belirlemişlerdir. Kumar [30] yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mukavemetinin ve ömrünün artırılmasının, üst üste binme uçlarındaki gerilme konsantrasyonunun azaltılması ve gerilmelerin tüm birleşme yüzeyinde düzgün bir şekilde dağıtılması ile mümkün olacağını vurgulamış ve bunu başarmanın en ideal yolunun FKMY olduğunu belirtmiştir. Yapıştırıcının bağ uzunluğu boyunca değişen modülünü pürüzsüz ve sürekli olan uygun fonksiyonlarla ifade etmiş ve eksenel simetrik elastik analiz için bağlantıların ayrılma ve kayma gerilmelerinin oldukça azaldığını göstermiştir. Farklı geometrik özelliklere ve malzeme dağılımlarına sahip bağlantılar için değerlendirmeler yapmıştır. Stein ve diğerleri [31] yapıştırıcı katmanı fonksiyonel olarak kademelendirilmiş bağlantıların gerilme analizi için yeni bir model önermişlerdir. Bu modelin tek bindirme, L ve T bindirmeler, takviye yamaları, köşe veya dengeli çift kat bindirme gibi çeşitli bağlantılar veya geçerli olduğunu vurgulamışlardır. Çeşitli yapıştırıcı elastisite modülü varyasyonları ile birçok yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı tasarımlarını araştırmış ve yapıştırıcıdaki gerilme dağılımlarını, sonlu elemanlar analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Yapıştırıcı bölgesindeki maksimum gerilme

seviyelerinin, yapıştırıcının fonksiyonel kademelendirilmesi ile önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermişlerdir. Stein ve diğerleri [32] tek bindirme bağlantılarında, fonksiyonel kademelendirilmiş yapıştırıcı katmanını analitik olarak modellemişlerdir. Tek bindirme bağlantılarında uygun modelin tercih edilmesi için yapıştırıcı katmanının ara yüzeyi boyunca elastiklik modülü dağılımlarını sunmuş ve elastisite modülü ve gerilme dağılımı arasındaki ilişkiyi tanımlamışlardır. Stein ve diğerleri [33] mekanik ve termal yük altındaki yapıştırıcı ile birleştirilmiş ve yapıştırıcı katmanı kademelendirilmiş bağlantıların optimizasyonunu yapmışlar ve en uygun yapıştırıcı kompozisyonunu sunmuşlardır. Guin and Wang [34] yapıştırıcı katmanının serbest kenarlarındaki gerilmelerin, bağlantının bütünlüğü açısından kritik olduğunu ifade etmiş ve bu amaçla FKMY ile birleştirilmiş tek katlı bir bağlantı için analitik bir model önermişlerdir. Yapıştırıcı arayüz gerilmelerini ve iç kuvvetleri kapalı madel ile ifade etmiş ve sonlu elemanlar analiz simülasyonları ile sonuçlarını doğrulamışlardır. Okkalıoğlu ve diğerleri [35] yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bağlantılarda yapıştırıcı ara yüzey bölgesinde takviye elemanı kullanarak bağlantı dayanımının optimum olduğu türü belirlemişlerdir. Akpınar ve Aydın [36] yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozitlerin iki ve üç boyutlu gerilme analizlerini deneysel ve nümerik olarak yapmışlardır. Yapıştırıcı katmanındaki kayma gerilmelerinin bağlantı mukavemeti açısından büyük öneme sahip olduğunu vurgulamışlardır. Turan [37] yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bağlantılarda yama fiber takviye açısı tesirini araştırmıştır. Statik çekme etkisindeki kompozit bağlantıların bağlantı mukavemetinin yama fiber açısı ile önemli oranda değiştiğini vurgulamıştır. Alyanak ve Şen [38] üç boyutlu karma bağlantılı yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların farklı çekme yükleri için gerilme analizlerini sonlu elemanlar nümerik çözümü ile yapmışlardır. Çekme yükünün miktarı ile gerilme seviyelerinin ve dağılımlarının etkilendiğini vurgulamışlardır. Bu parametrik çalışmalarda, yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı sertliği ve fonksiyonel kademelendirme konfigürasyonunun tek bindirme bağlantılarındaki gerilme dağılımlarını önemli ölçüde etkilediğini vurgulamışlardır. Ayrıca yapıştırıcı katmanının kalınlığını artırarak, yapıştırıcı katmanının elastisite modülünü düşürerek ve/veya sert malzemenin yapıştırıcı katmanını yakınına sağlayarak gerilme konsantrasyonlarının bağlantı kenarlarında azaltılabileceğini ifade etmişlerdir.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, FKMY bağlantıları ile gerilme konsantrasyonlarının homojen hale getirilebileceği ve azaltılabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca yapıştırıcı katmanının malzeme kompozisyonunun ayarlanması, yapıştırıcıda ve yapıştırıcı bağlantısının birleşme bölgesinde daha düzgün kesilme veya ayrılma gerilme dağılımlarına yol açtığından, fonksiyonel kademelendirilmiş yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantıların pratik olarak önemi artmıştır. Bu çalışmada, farklı kompozisyonel gradyant üs değerleri için yapıştırıcı katmanı düzlemde kademelendirilerek dairesel plaka bağlantıları-

nın sonlu farklar yöntemi ile ısı gerilme analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar hem yapıştırıcı hem de plaka ile yapıştırıcı ara yüzeyi için detaylandırılmıştır.

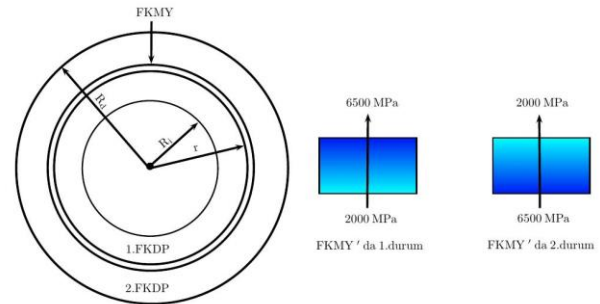
2. MATEMATİKSEL MODEL (MATHEMATICAL MODEL)

Mevcut çalışmada, FKDP'lar seramik ve metal bileşimden oluşan bir malzeme kompozisyonuna sahiptir ve malzeme kompozisyonun değişimi plaka düzleminde tek yönlüdür. FKDP'ların her noktası için malzeme özellikleri matematiksel olarak modellenmiş ve bu model kullanarak ısı transferi ve ısı gerilme analizleri için yapılan çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ (MATERIAL PROPERTIES)

İç (R_i) ve dış (R_d) yarıçaplarına sahip fonksiyonel olarak kademelendirilmiş içi boş bir disk, radyal doğrultu boyunca üç bölgeye ayrılmıştır. Şekil 1' de görüldüğü gibi ilk bölgede kalınlığı $R_i = 48$ mm olup, iç kısımdaki dairesel plaka fonksiyonel olarak kademelendirilmiştir (1. FKDP). Yapıştırıcı katman kalınlığı ise $R_{adv} = 4$ mm olup fonksiyonel olarak kademelendirilmiştir (FKMY). Son bölgenin kalınlığı ise ilk bölge ile aynıdır ve fonksiyonel olarak kademelendirilmiş dışdaki dairesel plakadan (2.FKDP) oluşmaktadır.

Fonksiyonel kademelendirilmiş bölgelerde malzeme bileşimi 2. FKDP için seramikten-metale (S \rightarrow M) ve 1. FKDP için metalden-seramiğe (M \rightarrow S) olacak şekilde düzenlenmiştir[22]. Analizlerdeki içi boş dairesel plaka dış seramik kenarı boyunca radyal doğrultuda düzlem içi ısı akısına maruzdur ve iç kenarda ısı akısı sıfır kabul edilmiştir.



Şekil 1. Yapıştırıcı tabakası fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka bağlantıları (Functionally graded adhesive layered circular plate connection)

Bu akı $q(t, R_d, \theta) = 200 |\sin(0.5\theta)|$ kW/m² olarak alınmıştır. Ayrıca yapıştırıcı katmanının kompozisyonel gradyant üs değerleri radyal yönde $n=0.1, 0.5$ ve 1.0 , olarak alınmıştır. Yapıştırıcı katmanının elastisite modülü 6500 MPa ve 2000 MPa' a ve 2000 MPa' dan 6500 MPa' a kademelendirilmiştir [27]. Ayrıca yapıştırıcı olarak Epoksi tercih edilmiş ve

kademelendirilmenin yapılmadığı durum içinde eşdeğer gerilme dağılımları incelenmiştir.

Dairesel plaka kalınlığı 't' diğer boyutlara göre çok incedir. Bu nedenle kalınlık boyunca tüm gerilme değişimleri ihmal edilebilir. Dairesel plaka iç ve dış kenarları boyunca tamamen sabitlenmiştir, yani $u(R_i, \theta) = 0$, $v(R_i, \theta) = 0$ ve $u(R_d, \theta) = 0$, $v(R_d, \theta) = 0$ alınmıştır. Dairesel plakaların dış kenarı seramik (Al_2O_3) ve iç kenarı metal (Ni) olup, dairese plakada radyal yönde güç karışım kuralına göre seramiğin hacimsel oranı

$$V_c(\bar{r}) = \left(\frac{\bar{r}}{l_R}\right)^n \quad (1)$$

Metalin hacim oranı,

$$V_m(\bar{r}) = 1 - V_c(\bar{r}) \quad (2)$$

burada r, radyal yöndeki koordinat bileşenleridir ve $\bar{r}=r-R_i$ ' dir. Dairesel plaka bağlantısının iç kenarından itibaren mesafe ve $l_R=R_d-R_i$ dairese plaka radyal yöndeki uzunluğudur (Şekil 1). R_i ve R_d sırasıyla dairese plakanın iç ve dış yarı çaplarıdır, ve 'p' periyodik fonksiyonun periyodu olup '0.5' alınmıştır. Analizlerde kullanılan metal ve seramik ve yapıştırıcı malzelerin ısı, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 1' de verilmiştir. Malzeme özelliklerinin değişimi lineer karışım kuralına göre yapılamaktadır ve her bir nokta için radyal yöndeki malzeme özelliklerinin değişimi 'P' ile gösterilmiş olup Lineer karışım kuralı

$$P(r) = V_c(r)P_c(r) + V_m(r)P_m(r) \quad (3)$$

olarak verilmiştir. Elastisite modülü (E) için ise karışım kuralı Tomota et al. [39] tarafından önerilmiştir ve şeklinde,

$$E(r) = \left[\left(\frac{q+E_c}{q+E_m} \right) V_m E_m + (1 - V_m) E_c \right] \left[\left(\frac{q+E_c}{q+E_m} \right) V_m E_m + (1 - V_m) \right]^{-1} \quad (4)$$

kabul edilmiştir, burada E_c ve E_m sırasıyla seramik ve metal bileşenlerin elastisite modülüdür ve q ise gerilme-şekil değiştirme geçiş oranı olup metal- Al_2O_3 için $q=500$ GPa olarak alınmıştır [40]. Isıl genleşme katsayısı (α) ve hacim modülünün (K) değişiminde sırasıyla Wakashima-Tsukamoto [41] ve Levin [42] eşitlikleri kullanılmıştır.

$$\alpha(r) = \alpha_m + \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_m} \right) \frac{(\alpha_c - \alpha_m)}{\left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_m} \right)} \quad (5)$$

$$K(r) = K_m + \frac{aV_c K_m (K_c - K_m)}{V_m K_c + aV_c K_m} \quad (6)$$

Kayma modülü (μ) ise

$$\mu(r) = \mu_m + \frac{bV_c \mu_m (\mu_c - \mu_m)}{V_m \mu_c + bV_c \mu_m} \quad (7)$$

olarak kabul edilmiştir ve burada a ve b ifadeleleri aşağıda verilmiştir.

$$a = \frac{K_c(3K_m + 4\mu_m)}{K_m(3K_c + 4\mu_c)} \quad b = \frac{(1+e)\mu_c}{\mu_m + e\mu_c} \quad e = \frac{9K_m + 8\mu_m}{6K_m + 12\mu_m} \quad (8)$$

Çizelge 1. Seramik (Al_2O_3), yapıştırıcı (Epoksi) ve metal (Ni), termal, fiziksel ve mekanik özellikleri (Ceramic

(Al_2O_3), adhesive (Epoxy) and metal (Ni), thermal, physical and mechanical properties) [43].

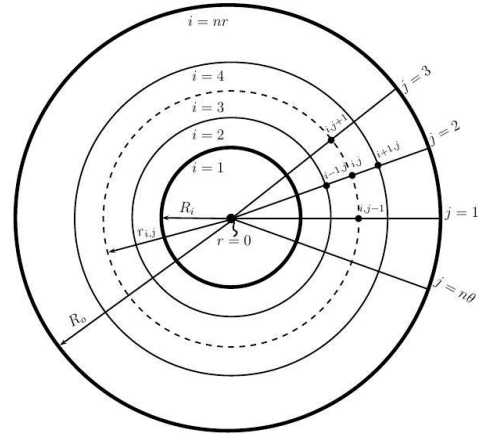
Özellik	Seramik Al_2O_3	Yapıştırıcı Epoksi	Metal Ni
Yoğunluk ρ (kg/m^3)	3960	1640	8880
Isıl iletkenlik katsayısı λ ($W/m \cdot K$)	46	8.121	60.5
Isıl kapasite katsayısı c_p ($Wh/kg \cdot K$)	0.21	0.16	0.11
Elastiklik modülü E (GPa)	370	4.391432	207
Kayma modülü G (GPa)	150	1.638594	76
Bulk modülü K (GPa)	172	4.5744	180
Poisson oranı (ν)	0.22	0.34	0.31

Poisson's oranı (ν) değişimi ise

$$\nu(r) = \frac{3K-2\mu}{2(3K+\mu)} \quad (9)$$

olarak kabul edilmiştir.

4. ISI TRANSFERİ VE ISIL SINIR ŞARTLARI (HEAT TRANSFER AND THERMAL BOUNDARY CONDITIONS)



Şekil 2. Sonlu farklar ağı (Finite difference grids)

İki boyutlu ısı iletim denklemi,

$$\frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

burada, ' λ ' ısı iletim katsayısı ρ , yoğunluk ve c_p , özgül ısı kapasitedir. Her (r, θ) koordinatındaki ve 't' zamanındaki (i, j) noktasındaki sıcaklığı temsil eden fonksiyon $T(r, \theta, t)$ olmak üzere ısı iletim denkleminin (10) sonlu fark eşitlikleri ile ifadesi

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{\lambda_{i,j} \Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} r_{i,j} \Delta r} (T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k) + \frac{\lambda_{i,j} \Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} (\Delta r)^2} (T_{i+1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i-1,j}^k) + \frac{\lambda_{i,j} \Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} (r_{i,j})^2 (\Delta \theta)^2} (T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k) \quad (11)$$

şeklinde yazılır. Burada ' $r_{i,j}$ ' her (i, j) naktasındaki radyal mesafe ve Δr , $\Delta \theta$ ve Δt , sırasıyla radyal yerdeğiştirme, teğetsel yerdeğiştirme ve zaman artırımlarıdır. Sonlu farklar yöntemi ile çözüm için plaka radyal yönde n_r , teğetsel yönde n_θ parçaya ayrılmıştır. n_r , radyal yönde 3 bölge bulunduğu için sırasıyla 36, 8, 36 parçaya, teğetsel

yönde ise 240 parçaya ayrılmıştır. Bölüntü sayılarının belirlenmesinde, diferansiyel eleman büyüklükleri göz önüne alınmıştır. Buna göre (11) eşitliği iç noktalarda (i= [2: nr-1] ve j= [2: nw-1]) kullanılmaktadır. (11) eşitliğini dış sınırlara uygulamak için iç ve dış kenarda sırasıyla kenarda i=1 ve j= [1: nw] yazılarak ve (12) eşitliği yazılır,

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} r_{i,j} \Delta r} (T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k) + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} (\Delta r)^2} (-T_{i+3,j}^k + 4T_{i+2,j}^k - 5T_{i+1,j}^k + 2T_{i,j}^k) + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} (r_{i,j})^2 (\Delta \theta)^2} (T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k) \quad (12)$$

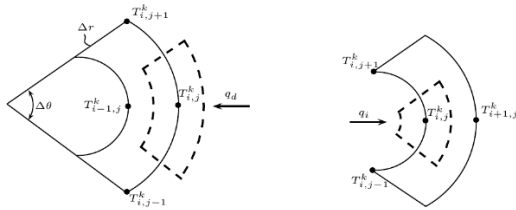
i=nr and j= [1: nw] tüm noktalarda,

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} r_{i,j} \Delta r} (T_{i,j}^k - T_{i-1,j}^k) + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} (\Delta r)^2} (-T_{i-3,j}^k + 4T_{i-2,j}^k - 5T_{i-1,j}^k + 2T_{i,j}^k) + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} (r_{i,j})^2 (\Delta \theta)^2} (T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k) \quad (13)$$

i=nr and j= [1: nw] tüm noktalarda. Plakaların teğetsel doğrultularının sonlu fark eşitliklerinin bulunması için ise (11) eşitliğinde i= [2: nr-1] ve j=1 de j-1 yerine nw, j=nw' da ise j+1 yerine '1' yazılarak sırasıyla (14) ve (15) eşitlikleri elde edilmektedir.

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} r_{i,j} \Delta r} (T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k) + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} (\Delta r)^2} (T_{i+1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i-1,j}^k) + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} (r_{i,j})^2 (\Delta \theta)^2} (T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,nw}^k) \quad (14)$$

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} r_{i,j} \Delta r} (T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k) + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} (\Delta r)^2} (T_{i+1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i-1,j}^k) + \frac{\lambda_{i,j}\Delta t}{(\rho c_p)_{i,j} (r_{i,j})^2 (\Delta \theta)^2} (T_{i,1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k) \quad (15)$$



Şekil 3. Dairesel plaka kenarlarındaki sınır şartları (Boundary conditions at the edges of the circular plate)

Başlangıç şartı t=0' da T₀=298 K ve ısıl sınır şartları dairesel plakasının iç ve dış kenarları boyunca uygulanmıştır (Eş. 16 ve 17)

$$q_i = q(R_i, \theta, t) = 0 \quad (16)$$

$$q_d = q(R_d, \theta, t) 200|\sin(0.5\theta)| \quad (17)$$

Plakanın iç kenarında adyabatik sınır şartı kabul edilmiştir. Burada q_i ve q_d (KW/m²) sırasıyla radyal yöndeki iç ve dış kenardan uygulanan ısı akırlarıdır (Şekil 3).

Isı transferi eşitliğinde bir (i, j) noktasına giren ve çıkan enerji dengesi kullanılarak sınır şartları için sonlu fark denklemleri elde edilmiştir. İlk sınır şartı olan adyabatik sınır şartı plaka kenarı (r_{1,j}= R_i) için, i=1' de j= [1: nw] boyunca (j=1' de j-1 yerine nw, j=nw' da ise j+1 yerine '1') yazılarak 1. plaka kenarı için (18) eşitliği elde edilmiştir.

$$\frac{(\rho c_p)_{i,j}}{\lambda_{i,j}\Delta t} (T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k) = \frac{2q_i}{\lambda_{i,j}\Delta r} + \frac{2}{(\Delta r)^2} (T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k) + \frac{1}{r} \frac{1}{(\Delta \theta)^2} (T_{i,1}^k - T_{i,j}^k) + \frac{1}{r} \frac{1}{(\Delta \theta)^2} (T_{i,nw}^k - T_{i,j}^k) \quad (18)$$

ikinci sınır şartı olan ısı akışı sınır şartı için plaka kenarı (r_{n,j}= R_d) için, i=nr' de j= [1: nw] boyunca (j=1' de j-1 yerine nw, j=nw' da ise j+1 yerine '1') yazılarak 1. plaka kenarı için (19) eşitliği elde edilmiştir.

$$\frac{(\rho c_p)_{i,j}}{\lambda_{i,j}\Delta t} (T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k) = \frac{2q_d}{\lambda_{i,j}\Delta r} + \frac{2}{(\Delta r)^2} (T_{i-1,j}^k - T_{i,j}^k) + \frac{1}{r} \frac{1}{(\Delta \theta)^2} (T_{i,1}^k - T_{i,j}^k) + \frac{1}{r} \frac{1}{(\Delta \theta)^2} (T_{i,nw}^k - T_{i,j}^k) \quad (19)$$

5. ELASTİSİTENİN NAVIER DENKLEMLERİ VE SONLU FARK ÇÖZÜMLEMESİ (NAVIER EQUATIONS OF ELASTICITY AND FINITE DIFFERENCE EQUATIONS)

İki boyutlu Navier denklemleri radial (Eş.20) ve teğetsel (Eş.21) doğrultular için sıcaklık farkı T=T (r, θ, t)-T₀ olmak üzere yazılır ise

$$\left(r^2 \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + r \frac{\partial u}{\partial r} - u \right) - \frac{(\lambda+3\mu)}{(\lambda+2\mu)} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{(\lambda+\mu)}{(\lambda+2\mu)} r \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} + \frac{\mu}{(\lambda+2\mu)} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{(3\lambda+2\mu)}{(\lambda+2\mu)} r^2 \alpha \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{(\lambda+3\mu)}{(\lambda+2\mu)} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{(\lambda+\mu)}{(\lambda+2\mu)} r \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} + \frac{\mu}{(\lambda+2\mu)} \left(r^2 \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + r \frac{\partial v}{\partial r} - v \right) - \frac{(3\lambda+2\mu)}{(\lambda+2\mu)} r \alpha \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \quad (21)$$

burada u ve v sırasıyla r ve θ ve doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenleri ve λ= λ(r), μ = μ (r), α= α(r)' dir. Sınır şartları r = R_i ve r=R_d için sırasıyla u= (r, θ) =0 ve v= (r, θ) =0' dir. İç noktalarda (i= [2: nr-1] ve j= [2: nw-1]) Navier eşitliklerinin sonlu fark denklemleri,

$$\left(r_{i,j}^2 \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{(\Delta r)^2} + r_{i,j} \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta r} - u_{i,j} \right) - \frac{(\lambda+3\mu)_{i,j}}{(\lambda+2\mu)_{i,j}} \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{\Delta \theta} + \frac{(\lambda+\mu)_{i,j}}{(\lambda+2\mu)_{i,j}} r_{i,j} \frac{v_{i+1,j+1} - v_{i+1,j} - v_{i,j+1} + v_{i,j}}{\Delta r \Delta \theta} + \frac{\mu_{i,j}}{(\lambda+2\mu)_{i,j}} \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{(\Delta \theta)^2} - \frac{(3\lambda+2\mu)_{i,j}}{(\lambda+2\mu)_{i,j}} \alpha_{i,j} r_{i,j}^2 \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta r} = 0 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & \frac{v_{i,j+1}-2v_{i,j}-v_{i,j-1}}{(\Delta\theta)^2} + \frac{(\lambda+3\mu)_{i,j} u_{i,j+1}-u_{i,j}}{(\lambda+2\mu)_{i,j} \Delta\theta} + \\ & \frac{(\lambda+\mu)_{i,j}}{(\lambda+2\mu)_{i,j}} r_{i,j} \frac{u_{i+1,j+1}-u_{i+1,j}-u_{i,j+1}+u_{i,j}}{\Delta r \Delta\theta} + \\ & \frac{\mu_{i,j}}{(\lambda+2\mu)_{i,j}} \left(r_{i,j}^2 \frac{v_{i+1,j}-2v_{i,j}+v_{i-1,j}}{(\Delta r)^2} + r_{i,j} \frac{v_{i+1,j}-v_{i,j}}{\Delta r} - v_{i,j} \right) - \\ & \frac{(3\lambda+2\mu)_{i,j}}{(\lambda+2\mu)_{i,j}} \alpha_{i,j} r_{i,j} \frac{T_{i,j+1}-T_{i,j}}{\Delta\theta} = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

elde edilmiştir. $\xi=\xi(r, \theta)$ fonksiyonu, sonlu fark eşitliklerinde, yerdeğiştirme ve sıcaklık fonksiyonlarını ifade etmek üzere, Eşitlik (22) ve (23)' de (24) eşitliği ikinci mertebeden türev yerine yazılır ise plakanın iç kenarı için sonlu fark denklemleri elde edilmiştir.

$$\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2}\right)_{i,j} = \frac{-\xi_{i+3,j}+4\xi_{i+2,j}-5\xi_{i+1,j}+2\xi_{i,j}}{(\Delta r)^2} \quad (24)$$

Benzer olarak, birinci ve ikinci mertebeden türev yerine (25) ve (26) eşitlikleri yazılır ise plakanın dış kenarı için sonlu fark denklemleri elde edilmiştir.

$$\left(\frac{\partial \xi}{\partial r}\right)_{i,j} = \frac{\xi_{i,j}-\xi_{i-1,j}}{\Delta r} \quad (25)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial r \partial \theta}\right)_{i,j} = \frac{\xi_{i,j+1}-\xi_{i,j}-\xi_{i-1,j+1}+\xi_{i-1,j}}{\Delta r \Delta \theta} \quad (26)$$

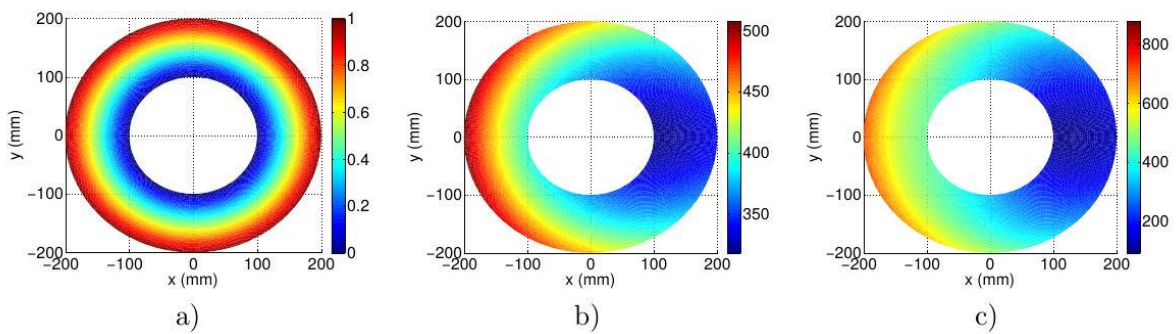
iç ve dış plaka için sonlu fark denklemlerinde $j=1$ ' de $j-1$ yerine nw , $j=nw$ ' da ise $j+1$ yerine '1' yazılmıştır. Dairesel plakanın iç bölgelerinde ve kenarlarında her bir düğüm noktası için uygun sonlu fark denklemleri ifade edilmiştir. Bu sonlu fark denklemleri kullanılarak dairesel plakaların her bir düğüm noktası çözüme dahil edilmiştir. Dairesel plakanın her düğüm noktası için yer değiştirme matrisi elde edilmiştir. Elde edilen bu matris $[A][X] = [B]$ şeklinde tanımlanan lineer denklemler sistemine dönüştürülmüştür. Bilinmeyenler matrisi olan $[X]$, $u(r, \theta)$ ve $v(r, \theta)$ bilinmeyenlerini içerir. Ancak

6. SAYISAL ANALİZ (NUMERICAL ANALYSES)

Mevcut çalışmada, FKDP' lar, seramik ve metalden oluşan malzeme bileşimlerine sahiptir ve kademelendirme plaka düzleminde tek yönlüdür. Her noktada FKDP'nın ve FKMY' nin malzeme özelliklerinin modellenmesi ve ısı gerilme analizi sonuçlarının elde edilmesi için matematiksel model oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Matematiksel model de her nokta için $u(r, \theta)$ ve $v(r, \theta)$ yerdeğiştirme bileşenleri bulunmuştur. Yerdeğiştirme bileşenleri yerdeğiştirme-şekil değiştirme ve şekil değiştirme-gerilme bağıntılarında yerine yazılarak eşdeğer gerilme seviyeleri ve dağılımları hem yapıştırıcı hem de dairesel plaka bağlantıları için ayrı ayrı elde edilmiştir.

Çizelge 2. Farklı kompozisyonel gradyant üst değerleri için FKDP bağlantılarında ve FKMY' da sıcaklık ve eşdeğer gerilme seviyelerinin minimum ve maksimum değerleri (Minimum and maximum values of temperature and equivalent stress levels for different composition gradient upper values at FGCP connections and FGMA)

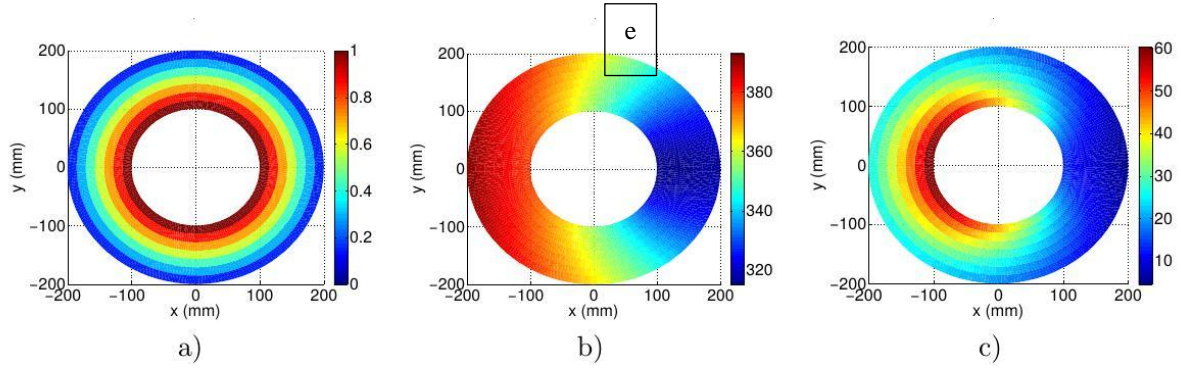
		T (K)		σ_{eqv} (MPa)	
		min	max	min	max
1. FKDP (1.durum) FKMY	m = 1.0	310.3	376.7	52	227.65
	n = 0.1	314.9	393	4.4	61.41
	n = 0.5	314.9	393	4.5	60.34
	n = 1.0	314.9	393	4.6	60.27
2.durum) FKMY	n = 0.1	314.9	393	3.99	76.63
	n = 0.5	314.9	393	3.97	76.8
	n = 1.0	314.9	393	3.97	76.9
	2. FKDP	m = 1.0	317.7	507.5	92



Şekil 4. $n=1.0$ kompozisyonel gradyant üst değerine sahip 2. FKDP' da 1. durum için a) seramik hacim oranının, b) sıcaklığın (K) ve c) eşdeğer gerilmenin (MPa) dağılımları (In the 2. FGCP with $n = 1.0$ compositional gradient exponent for the case 1, a) ceramic volume fraction, b) temperature (K) and c) equivalent stress (MPa) distributions)

daireysel plaka kenarlarının sabit olması nedeniyle katsayılar matrisi $[A]$, pozitif tanımlı değildir. Bu nedenle denklem sisteminin çözümü için Tekil Değer Ayrıştırması metodu ile çözüm yapılmıştır. Hem ısı transferi analizindeki açık çözüm için hem de gerilme analizindeki kapalı çözüm için MATLAB [44] programı kullanılmıştır.

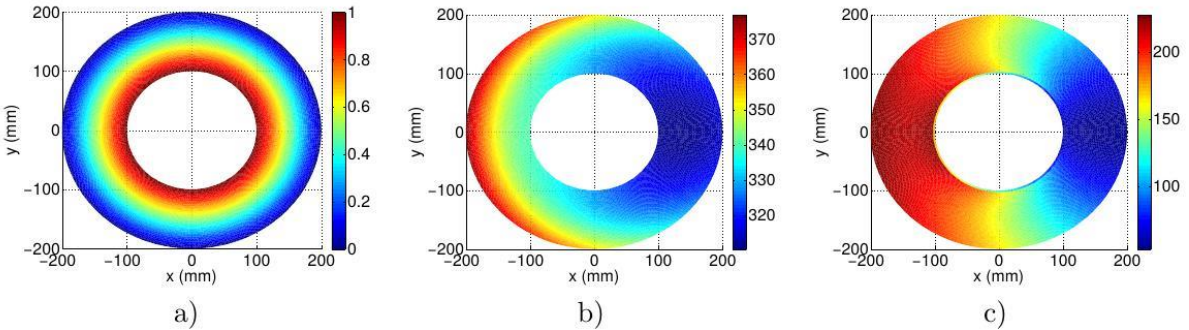
Şekil 4.-a), yapıştırıcının elastisite modülünün dıştan iç doğru 2000 MPa→6500 MPa' a (1. durum) değişmesi halinde, aynı kompozisyonel gradyant üst değerine sahip yapıştırıcı katmanının seramik hacim oranının dağılımını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi 2. FKDP seramikden metale kademelendirilmiştir. Maksimum



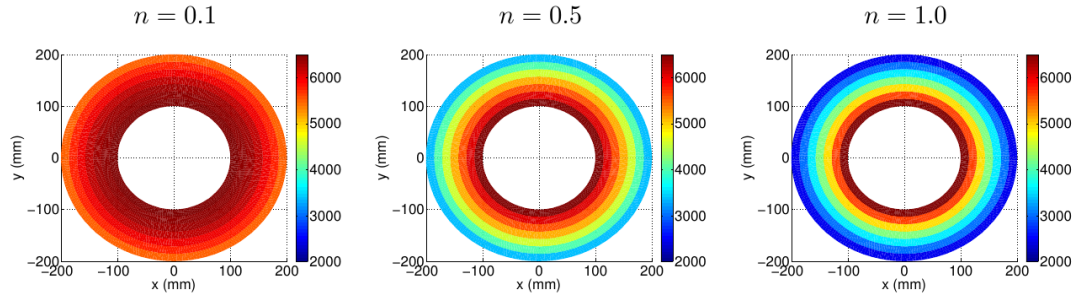
Şekil 5. $n=1.0$ kompozisyonel gradyanta sahip yapıştırıcı katmanı için 1. durumunda a) seramik hacim oranının, b) sıcaklığın (K) ve c) eşdeğer gerilmenin (MPa) dağılımları (In the adhesive layer with $n = 1.0$ compositional gradient exponent for the case 1, a) ceramic volume fraction, b) temperature (K) and c) equivalent stress (MPa) distributions)

sıcaklık ise akının verildiği bölge boyunca tesir etmekte ve 507.5 K olmaktadır (Şekil 4-b)).

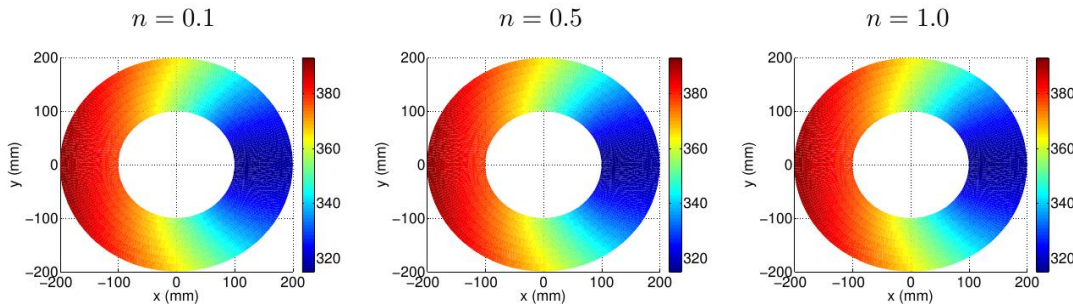
Şekil 4-c)' de eşdeğer gerilme bileşeninin akının verildiği bölgede maksimum seviyelerde tesir ettiği



Şekil 6. $n=1.0$ kompozisyonel gradyanta sahip 1. FKDP için 1. durumunda, a) seramik hacim oranının, b) sıcaklığın (K) ve c) eşdeğer gerilmenin (MPa) dağılımları (In the 1. FGCP with $n = 1.0$ compositional gradient exponent for the case 1, a) ceramic volume fraction, b) temperature (K) and c) equivalent stress (MPa) distributions)



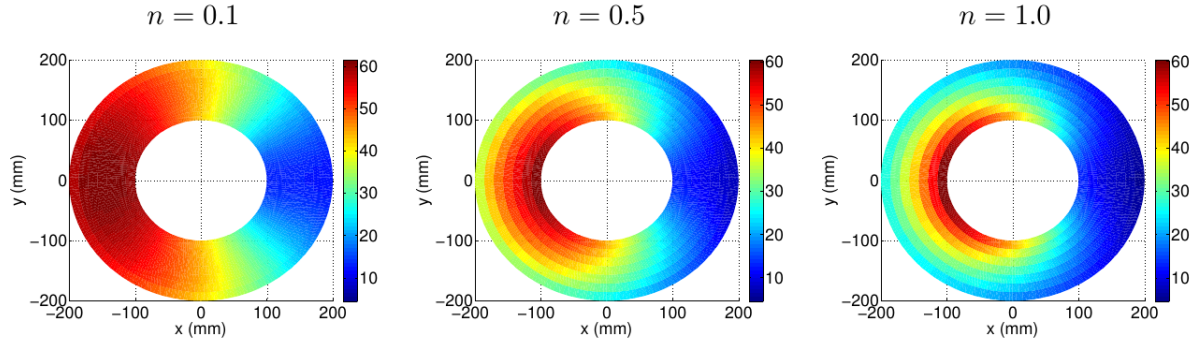
Şekil 7. 1. durum için farklı kompozisyonel gradyant üs değerlerinde elastisite modülünün FKMY katmanı boyunca dağılımları (Distributions of different composition gradient exponents of the elasticity modulus along the FGMA layer for Case 1)



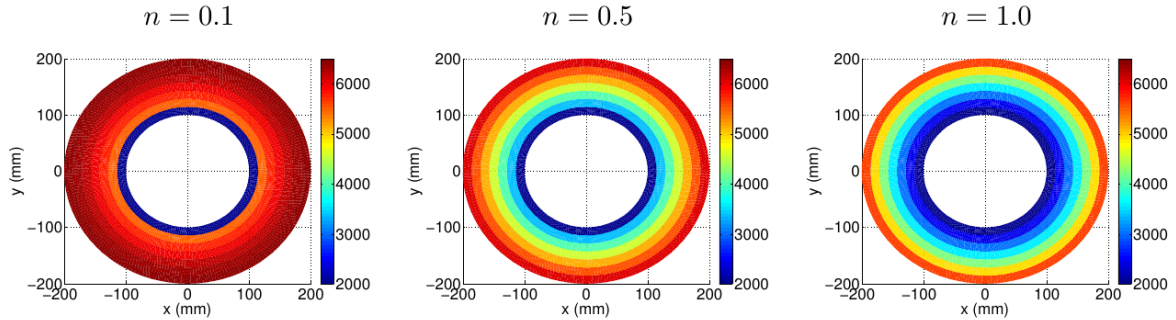
Şekil 8. 1. durum için farklı kompozisyonel gradyant üs değerlerinde sıcaklığın FKMY katmanı boyunca dağılımları (Distributions of different composition gradient exponents of the temperature along the FGMA layer for Case 1)

görülmekte olup maksimum eşdeğer gerilme seviyesi 875.5 MPa olmaktadır (Çizelge 2).

Şekil 5'de, $n=1.0$ için yapıştırıcı katmanının seramik hacim oranının değişimini göstermektedir. Yapıştırıcı katmanının tek değişen malzeme özelliği elastisite modülü olduğu için bu dağılım aynı zamanda elastisite modülünün dağılımıdır. (Şekil 5-a)). Yapıştırıcı katmanındaki sıcaklık dağılımı ise 2. FKDP'da yüksek seviyelerde sıcaklık bölgeleri ile temas eden kısımlarda maksimum seviyelerdedir.



Şekil 9. 1. durum için farklı kompozisyonel gradyant üs değerlerinde eşdeğer gerilmenin FKMY katmanı boyunca dağılımları (Distributions of different composition gradient exponents of the equivalent stress along the FGMA layer for Case 1)



Şekil 10. 2. durum için farklı kompozisyonel gradyant üs değerlerinde elastisite modülünün FKMY katmanı boyunca dağılımları (Distributions of different composition gradient exponents of the elasticity modulus along the FGMA layer for Case 2)

Yapıştırıcı boyunca bu sıcaklığa yakın seviyeler etkin olmaktadır ve yapıştırıcının maksimum sıcaklığı 393 K, minimum sıcaklığı ise 314.9 K'dir (Şekil 5-b)).

Şekil 5-c)'de ise yapıştırıcı katmanındaki eşdeğer gerilme seviyesi, maksimum 60.27 MPa, minimum 4.6 MPa olarak görülmekte olup 1. FKDP'ya yakın, ısı akısının verildiği bölge civarında maksimum seviyelerde tesir etmektedir (Çizelge 2).

Şekil 6-a)'da 1. FKDP'nın seramik hacim oranı incelendiğinde dışdan içe doğru metalden-seramiğe değişmektedir ve $n=1.0$ olarak alınmıştır. Şekil 6-b)'de görüldüğü gibi maksimum sıcaklık seviyelerinin etkin olduğu bölgeler akının verildiği kenara bağlı olarak $\theta=\pi$ civarında tesir etmekte ve büyüklüğü 376.7 K olmaktadır.

Şekil 6-c)'de ise eşdeğer gerilme dağılımının ise $\theta=\pi$ civarında maksimum seviyelerde tesir ettiği görülmektedir ve maksimum eşdeğer gerilme seviyesi 227.65 MPa'dır (Çizelge 2).

Şekil 7, farklı kompozisyonel gradyant üs değerleri için elastisite modülünün FKMY katmanı boyunca dağılımını göstermektedir.

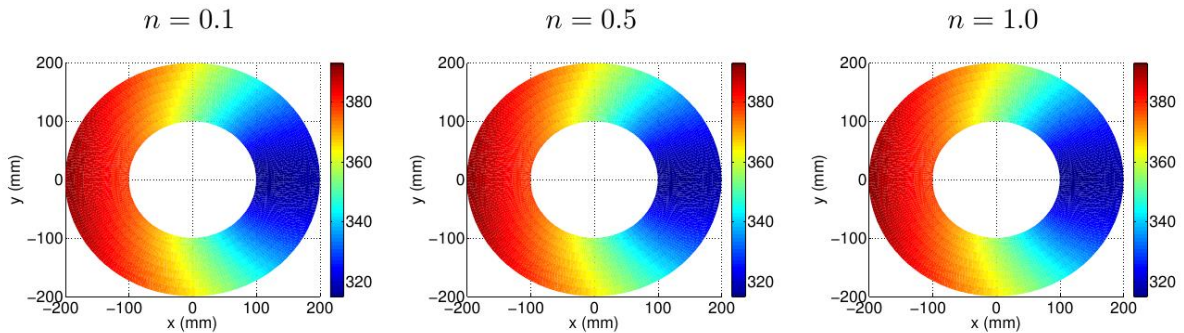
Burada $n=0.1$ için yapıştırıcının plaka boyunca elastisite modülünün 6500 MPa yakın seviyelerinde tesir ettiği görülmektedir. $n=0.5$ için ise yapıştırıcının dış kısmından iç kısmına doğru elastisite modülünün arttığı görülmektedir. $n=1.0$ için, yapıştırıcının iç kısmında elastisite modülü 6500 MPa iken, bu kenar dışında 2000 MPa yakın değerlerde lineer olarak değişmektedir.

Şekil 8' de yapıştırıcı katmanındaki sıcaklık dağılımları görülmektedir. Burada yapıştırıcı katmanının sadece elastisite modülüne göre kademelendirilmesinden dolayı, yapıştırıcı katmanının sıcaklık dağılımları ve seviyeleri benzer olmaktadır.

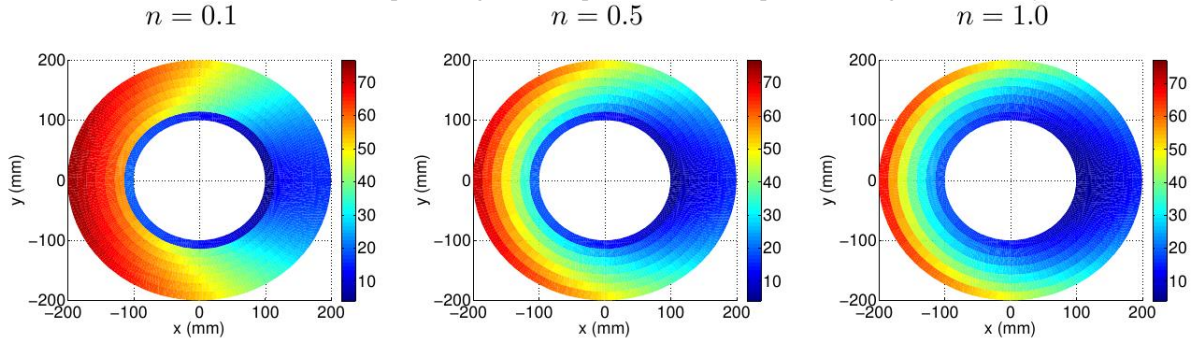
Şekil 9, farklı kompozisyonel gradyantlar için yapıştırıcı katmanındaki eşdeğer gerilme dağılımlarını göstermektedir. Burada $n=0.1, 0.5$ ve 1.0 için sırasıyla

maksimum eşdeğer gerilme seviyeleri 61.41, 60.34 ve 60.27 MPa olmaktadır (Çizelge 2). Seviyeler birbirine oldukça yakın iken eşdeğer gerilme dağılımı kompozisyonundan önemli ölçüde etkilenmektedir. Eşdeğer gerilmenin dağılımı incelendiğinde ise $n=0.1$ için yapıştırıcıdaki maksimum ve maksimuma yakın seviyelerdeki eşdeğer gerilme $\theta=\pi$ civarında bu katmanın alt ve üst kısımlarına doğru geniş bir bölgede tesir etmektedir, $n=0.5$ için ise $\theta=\pi$ civarından yapıştırıcının iç kenarından, orta kısımlarına doğru tesir etmektedir, $n=1.0$ iken $\theta=\pi$ civarından yapıştırıcının iç kısmında oldukça dar bir bölgede tesir etmektedir.

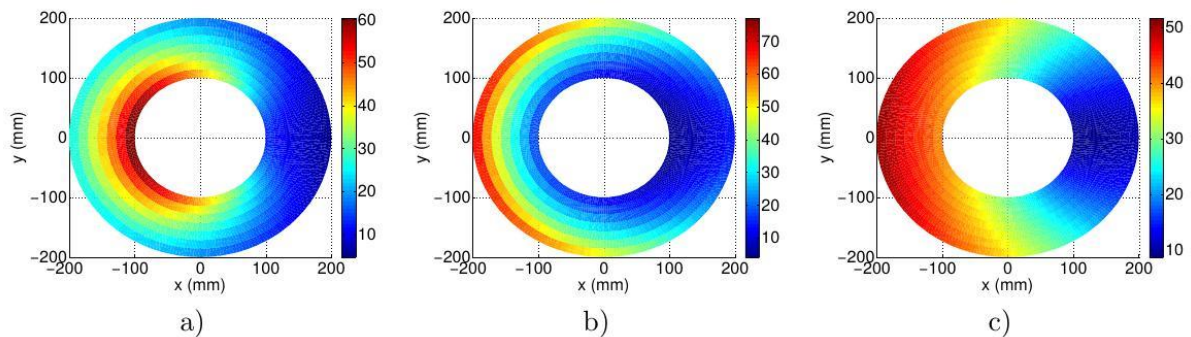
Şekil 10' da, $n=0.1$ ' de yapıştırıcı katmanının elastisite modülünün dağılımı incelendiğinde tüm yapıştırıcı katmanlarında 6500 MPa' yakın seviyelerinde tesir etmekte iken plakanın iç kısmında oldukça dar bir bölgede 2000 MPa ile tesir etmektedir. $n=0.5$ için, yapıştırıcının dış kısmından iç kısmına doğru elastisite modülünün azaldığı görülmektedir. $n=1.0$ için ise yapıştırıcının iç bölgelerinde 2000 MPa→6500 MPa' a doğru lineer olarak değişmektedir ve dış katmanda ise 6500 MPa değerini almaktadır



Şekil 11. 2. durum için farklı kompozisyonel gradyant üs değerlerinde sıcaklığın FKMY katmanı boyunca dağılımları (Distributions of different composition gradient exponents of the temperature along the FGMA layer for Case 2)



Şekil 12. 2. durum için farklı kompozisyonel gradyant üs değerlerinde eşdeğer gerilmenin FKMY katmanı boyunca dağılımları (Distributions of different composition gradient exponents of the equivalent stress along the FGMA layer for Case 2)



Şekil 13. $n=1.0$ için FKMY katmanının elastisite modülünün a)2000→6500 MPa, b) 6500→2000 MPa ve c)4391.4 MPa değerleri için FKMY katmanındaki eşdeğer gerilme dağılımları (For $n = 1.0$ values of a)2000→6500 MPa, b) 6500→2000 MPa ve c)4391.4 MPa of the modulus of elasticity of the FGMA layer, the equivalent stress distributions in the FGMA layer)

Şekil 11' de ise yapıştırıcı katmanındaki sıcaklık dağılımları görülmektedir. Burada yapıştırıcı katmanının ısı özellikleri kademelendirilmediği için, yapıştırıcı katmanının sıcaklık dağılımları ve seviyeleri benzer olmaktadır.

Şekil 12' de, $n=0.1$, 0.5 ve 1.0 için sırasıyla maksimum eşdeğer gerilme seviyeleri 76.63 , 76.8 ve 76.9 MPa olmaktadır (Çizelge 2). Seviyeler birbirine yakın iken dağılım kompozisyonel gradyant üst değerinin değişiminden önemli ölçüde etkilenmektedir. $n=0.1$ için maksimum ve maksimuma yakın seviyelerdeki eşdeğer gerilme bölgeleri, $\theta=\pi$ civarından yapıştırıcının dış kenarına yakın kısımlarına doğru geniş bir bölgede tesir etmekte, ve plakanın iç bölgelerine doğru azalmaktadır. $n=0.5$ iken, $\theta=\pi$ civarında yapıştırıcının dış plakaya yakın kısımlarında maksimum seviyelerde tesir etmektedir. $n=1.0$ iken $\theta=\pi$ civarından yapıştırıcının dış kenarında ve bu kenara yakın bölgelerde maksimum seviyelerde tesir etmekte, plakanın iç kısmına yakın bölgelerde ise gerilme seviyeleri belirgin azalmaktadır.

Şekil 13, $n=1.0$ için elastisite modülünün a) $2000 \rightarrow 6500$ MPa, b) $6500 \rightarrow 2000$ MPa ve c) 4391.4 MPa iken eşdeğer gerilme dağılımlarını göstermektedir. Yapıştırıcı katmanındaki maksimum eşdeğer gerilme seviyesi sırasıyla 60.27 , 76.96 ve 51.60 MPa olmaktadır. Yapıştırıcı katmanı boyunca dağılımlar incelendiğinde ise kademelendirme yapıldığında maksimum seviyelerdeki eşdeğer gerilme bölgelerinin belirgin azaldığı görülmektedir. Yapıştırıcı katmanının kademelendirilmemesi durumunda yapıştırıcının ısı akısına maruz bölgelerinde maksimum eşdeğer gerilme tesiri belirgin artmıştır.

7. Sonuçlar (Results)

- Yapıştırıcı katmanı sadece elastisite modülüne göre kademelendirildiği için yapıştırıcı katmanının elastisite modülünün $2000 \rightarrow 6500$ MPa'a ve $6500 \rightarrow 2000$ MPa'a kademelendirilmesi durumunda sıcaklık dağılımları ve seviyeleri benzer olmaktadır. Bunun nedeni yapıştırıcı katmanının ısı özelliklerinin değiştirilmemesidir.
- 1.duruma göre elastisite modülünün değiştiği yapıştırıcı katmanındaki eşdeğer gerilme seviyeleri farklı kompozisyonlar için ortalama 2. FKDP' da 875 MPa iken 1. FKDP' da 228 MPa olmaktadır. 2. duruma göre elastisite modülünün değiştiği yapıştırıcı katmanındaki eşdeğer gerilme seviyeleri farklı

kompozisyonlar için ortalama 2. FKDP' da 875 MPa iken 1. FKDP' da 226 MPa olmaktadır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş olan 2. ve 1. FKDP' daki eşdeğer gerilme seviyeleri benzer olmakta ancak dağılım önemli ölçüde değişmektedir.

- Yapıştırıcının elastisite modülünün 1. duruma göre değiştiği bağlantılarda maksimum eşdeğer gerilme seviyeleri 61 MPa olmakta iken 2. duruma göre değiştiği bağlantılarda maksimum eşdeğer gerilme seviyeleri 76 MPa olmaktadır. Yapıştırıcı katmanının düşük elastisite modülünden yüksek olan modüle doğru kademelendirilmesi ile eşdeğer gerilme seviyeleri %25 azalmaktadır.
- Eşdeğer gerilmenin yapıştırıcı boyunca dağılımı incelendiğinde ise maksimum seviyelerdeki eşdeğer gerilme bölgeleri kompozisyonel gradyant üst değeri $n=0.1$ ' den $n=1.0$ doğru arttıkça azalmaktadır. Ayrıca yapıştırıcı katmanının kademelendirildiği durumda, kademelendirilmediği duruma göre maksimum eşdeğer gerilme seviyeleri artmaktadır. Yapıştırıcının kompozisyonunun 1. duruma ve 2. duruma göre kademelendirildiğinde sırasıyla 8.67 MPa ve 25.36 MPa artmaktadır. Ayrıca kademelendirmenin yapılmadığı durumda maksimum gerilme seviyelerinin tesir ettiği bölge, diğerlerine göre oldukça geniştir.
- Fonksiyonel olarak kademelendirilmiş modüllü yapıştırıcı bağlantılarında ısı gerilme seviyelerinin yapıştırıcıda meydana gelen ayrılmaların azaltılabilmesi için elastisite modülü düşük olandan yüksek olana doğru kademelendirme yapılmalıdır. Kompozisyonel gradyant üst değeri için ise hem maksimum eşdeğer gerilme bölgelerini azalttığı için hem de üretiminin kolay olmasından dolayı $n=1.0$ tercih edilmelidir.
- Sonuç olarak yapıştırıcı burada tampon bölge oluşturarak eşdeğer gerilme seviyelerini önemli oranda azaltmakta ve gerilme tesirini diğer plakaya düşük seviyelerde aktarmaktadır. Bu bölgenin fonksiyonel olarak kademelendirilmesi ile plakalar ile yapıştırıcı arasındaki ara yüzeydeki ve bağlantıyı sağlayan yapıştırıcı katmanındaki eşdeğer gerilme seviyeleri ve dağılımları düzenlenebilir. Bundan dolayı yapıştırıcı katmanının fonksiyonel kademelendirilmesi önem arz etmekte ve

üzerine araştırmalar yapılması gereken bir alan olmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Koizumi, M., "FGM activities in Japan". *Composites Part B: Engineering*, 28(1-2): 1-4, (1997).
- [2]. Suresh, S., and Mortensen, A., "*Fundamentals of Functionally Graded Materials*", The Institute of Materials, London, (1998).
- [3]. Suresh, S., Olsson, M., Giannakopoulos, A.E., Padture, N.P. and Jitcharoen, J., "Engineering the resistance to sliding-contact damage through controlled gradients in elastic properties at contact surfaces", *Acta Materialia*, 47(14): 3915-3926, (1999).
- [4]. Anonim,2009. http://FGMdb.nal.go.jp/e_whatsFGM.html.
- [5]. Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A., and Zhou, X. Y., "A review of numerical modeling of solid oxide fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(7): 761-786, (2007).
- [6]. Ruys, A., Popov, E., Sun, D., Russell, J., and Murray, C., "Functionally graded electrical/thermal ceramic systems", *Journal of the European Ceramic Society*, 21(10-11): 2025-2029, (2001).
- [7]. Koizumi, M. and Niino, M., "Overview of FGM research in Japan", *MRS Bulletin*, 20(1): 19-21, (1995).
- [8]. Natali, M., Romanato, F., Napolitani, E., Salvador, D.D. and Drigo, A.V., "Lattice curvature generation in graded In_xGa_{1-x}As/GaAs buffer layers", *Physical Review B*, 62(16): 11054-11062, (2000).
- [9]. Noda, N., "Thermal stresses in functionally graded plates", *International Journal of Thermal Stresses*, 22(4-5): 477-512, (1999).
- [10]. Shabana, Y.M. and Noda, N., "Thermo-elastic-plastic stresses in functionally graded materials subjected to thermal loading taking residual stresses of the fabrication process into consideration", *Composites Part B: Engineering*, 32(2): 111-121, (2001).
- [11]. Praveen, G.N. and Reddy, J.N., "Nonlinear transient thermoelastic analysis of functionally graded ceramic-metal plates", *International Journal of Solids and Structures*, 35(33): 4457-4476, (1998).
- [12]. Şen, F., Üçkardaş, A., "Dönen ve sıcaklık etkisindeki termoplastik matrisli kompozit diskteki ısıl gerilmeler", *Politeknik Dergisi*, 16(3): 97-104, (2013).
- [13]. Altınok, M., "Ahşap tutkalı birleşmelerde yapışma performansına sıcaklık artışının etkileri", *Politeknik Dergisi*, 5(4): 341-345, (2002).
- [14]. Atar, M., "PVAc tutkalında viskozite değişiminin baz ağaç malzemelerde yapışma direncine etkileri", *Politeknik Dergisi*, 10(1): 85-91, (2007).
- [15]. Efe, H., Deniz, E., Kasal, A. and Kuşkun, T., "Ahşap ve plastik kavelalı kutu mobilya köşe birleştirmelerinin moment kapasitelerinin karşılaştırılması", *Politeknik Dergisi*, 15(3): 151-159, (2012).
- [16]. Çağatay, K., Efe, H., Kasal, A. and Kuşkun, T., "T-tipi mobilya birleştirmelerinde ağaç türü ve birleştirme yönteminin moment taşıma kapasitesi ve elastikiyet üzerindeki etkileri", *Politeknik Dergisi*, 15(3): 161-169, (2012).
- [17]. Söğütü, C., "Ceviz ve armut odunlarında yapışma direncinin belirlenmesi", *Politeknik Dergisi*, 19(4): 513-518, (2016).
- [18]. Altun, S. and Esmer, M., "Isıl işlemin bazı ağaç malzemelerde yüzey pürüzlülüğü ve vernik yapışma direncine etkisi", *Politeknik Dergisi*, 20(1): 231-239, (2017).
- [19]. Ozer, K., "Alüminyum-bakır boruların yapıştırma yöntemi ile birleştirilmesi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1: 121, (2008).
- [20]. İscan, B., Adin, H. And Turgut A., "Bazı yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi", *Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2): 119-126, (2012).
- [21]. Apalak, M.K. and Demirbaş, M.D., "Thermal residual stresses in adhesively bonded in-plane functionally graded clamped plates subjected to an edge heat flux", *Journal of Adhesion Science And Technology*, 25(15): 1861-1908, (2012).
- [22]. Apalak, M.K. and Demirbas, M.D., "Thermal residual stresses in adhesively bonded in-plane functionally graded clamped circular hollow plate", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(14): 1590-1623, (2013).
- [23]. Apalak M.K. and Demirbaş M.D., "In-plane thermal residual stresses in adhesively bonded functionally graded plates", *The sixteenth European Conference for Composite Materials (ECCM16)*, Seville, Spain, 1-10, (2014).
- [24]. Editorial, "Special issue on functionally graded adhesively bonded systems", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 76: 1-2, (2017).
- [25]. Durodola, J.F., "Functionally graded adhesive joints - A review and prospects", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 76: 83-89, (2017).
- [26]. Stapleton, S.E., Anthony M.W. and Arnold, S.M., "Functionally graded adhesives for composite joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 35: 36-49, (2012).
- [27]. Carbas, R.J.C., Da Silva, L.F.M., Madureira, M.L. and Critchlow, G.W., "Modelling of functionally graded adhesive joints", *The Journal of Adhesion*, 90: 698-716, (2014).
- [28]. Carbas, R.J.C., Da Silva, L.F.M. and Critchlow, G.W., "Adhesively bonded functionally graded joints by induction heating", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 48: 110-118, (2014).
- [29]. Spaggiari, A. and Dragoni, E., "Regularization of torsional stresses in tubular lap bonded joints by means of functionally graded adhesives", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 53: 23-28, (2014).
- [30]. Kumar S., "Analysis of tubular adhesive joints with a functionally modulus graded bondline subjected to axial loads", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29: 785-795, (2009).
- [31]. Stein, N., Weißgraeber, P. and Becker, W., "Stress solution for functionally graded adhesive joints", *International Journal of Solids and Structures*, 97-98: 300-311, (2016).
- [32]. Stein, N., Felger, J. and Becker, W., "Analytical models for functionally graded adhesive single lap joints: A comparative study", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 76: 70-82, (2017).
- [33]. Stein, N., Rosendahl, P.L. and Becker, W., "Homogenization of mechanical and thermal stresses in functionally graded adhesive joints", *Composites Part B*, 111: 279-293, (2017).
- [34]. Guin, W.E. and Wang, J., "Theoretical model of adhesively bonded single lap joints with functionally graded adherends", *Engineering Structures*, 124: 316-332, (2016).

- [35]. Okkalıoğlu, M., Pekbey, Y. and Aktaş, A., “Yapıştırıcı ile birleştirilmiş L tipi kompozit köşe bağlantılarında çekme dayanımının artırılması”, *Mühendis ve Makina*, 55(649): 50-57, (2014).
- [36]. Akpınar, S. and AYDIN, M.D., “Yapıştırıcıyla birleştirilmiş T-bağlantı tipinin iki ve üç boyutlu gerilme analizi”, *EÜFBED - Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2): 229-214, (2012).
- [37]. Turan K., “Kompozit malzemelerde yapışma bağlantılarının mukavemeti üzerine yama fiber takviye açısı etkisi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(1): 129-138, (2016).
- [38]. Alyanak, İ. and Şen, F., “Paralel çift pim uygulanmış ve yapıştırılmış karma bağlantılı kompozit plakaların çekme yükü altında gerilme analizi”, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2: 11-23, (2015).
- [39]. Tomota, Y., Kuroki, K., Mori, T. and Tamura T., “Tensile deformation of two-ductile-phase alloys: flow curves of $\alpha \rightarrow \gamma$ Fe-Cr-Ni alloys”, *Mater. Sci. Eng.*, 24: 85-94, (1976).
- [40]. Cho J.R. and Ha D.Y., “Averaging and finite-element discretization approaches in the numerical analysis of functionally graded materials”, *Mater. Sci. Eng. A.*, 302: 187-196, (2001).
- [41]. Wakashima, K. and Tsukamoto, H., “Mean-field micromechanics model and its application to the analysis of thermomechanical behavior of composite material”, *Mater. Sci. Eng. A*, 146: 291-316, (1991).
- [42]. Levin, V.M., “On the coefficients of thermal expansion of heterogeneous material”, *Mech. Solids.*, 2: 88-94, (1967).
- [43]. Materials Information Resource MatWeb [Online]. Available: <http://www.matweb.com>.
- [44]. MATLAB. Mathematical software, version 2009a, TheMathWorks.Available: <http://www.mathworks.com>.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Süt endüstrisi atıksuyunun biyometanizasyon potansiyelinin incelenmesi

Investigation of biomethane potential of dairy industry wastewater

Yazar (Author): Afşın Yusuf ÇETİNKAYA

ORCID: 0000-0001-8071-6444

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çetinkaya A. Y., “Süt endüstrisi atıksuyunun biyometanizasyon potansiyelinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 457-460, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.403974

Süt Endüstrisi Atıksuyunun Biyometanizasyon Potansiyelinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Afşın Yusuf ÇETİNKAYA

Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Çevre Koruma Kontrol Programı, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 17.09.2016 ; Kabul/Accepted : 29.01.2017)

ÖZ

Enerji kaynakları günümüzde yaygın olarak fosil yakıtlar üzerine çalışan sistemlerden oluşurken özellikle artan nüfus, fosil yakıtların tükenme riskinin olması, çevreye vermiş oldukları zarar nedeniyle yerini alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına bırakmaya başlamıştır. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir potansiyele sahip olan biyogaz, organik bazlı atıkların, oksijensiz ortamda anaerobik fermantasyon sistemi uygulanarak parçalanması sonucu ortaya çıkan ve bileşiminde yanıcı metan gazı bulunan bir karışımdır. Yapılan bu çalışmada süt endüstrisi atıksuyunun biyometanizasyon potansiyeli ölçülmüş ve 35 günde 410 ml biyogaz üretilmiş olup deneysel sonuçlar eğri oluşturularak sayısallaştırılmıştır. Farklı derecelerde çeşitli polinom denklemleri veri setine uygulanmıştır. Beşinci derece polinom denklemi en iyi uyumu vermiş olup denklemi $y = 0.98x$ olarak elde edilmiştir. Doğru uyumun istatistiksel iyiliği SSE, RMSE ve belirleme katsayısına göre değerlendirilmiş olup SSE, RMSE ve belirleme katsayısı sırasıyla 3130, 9.89 ve 0.99 olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Süt endüstrisi atıksuyu, biyometanizasyon, enerji.

Investigation of Biomethane Potential of Dairy Industry Wastewater

ABSTRACT

While energy sources are now commonly found in systems that work on fossil fuels, they have begun to relocate to alternative and renewable sources of energy, especially due to the growing population, the risk of exhaustion of fossil fuels, and the damage they have caused to the environment. Biogas, which has an important potential among renewable energy sources in Turkey, is a mixture of organic-based wastes, resulting from the disintegration of an anaerobic fermentation system in an anaerobic environment, with combustible methane gas. In this study, the biomass potential of the wastewater of the dairy industry was measured and 410 ml biogas were produced in 35 days and the experimental results of the biogas production were digitized by creating a curve. Various polynomial equations are applied to the data set at different grades. The fifth order polynomial equation is the best fit. The equation was obtained as $y = 0.98x$. The SSE, RMSE and the discriminant coefficient were determined as 3130, 9.89 and 0.99, respectively.

Keywords: Dairy industry wastewater, biomethanation, energy.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Konvansiyonel enerji üretim sistemlerinin hem çevreye zarar vermesi hem de maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılması ve enerji üretim planlamasında bu enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir [1,2].

Yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik, rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütle, biyogaz (çöp gazı dahil), dalga,akıntı enerjisi ve gel git gibi fosil olmayan enerji kaynaklarıdır. Biyokütle, yeşil bitkilerin güneş enerjisini fotosentez yoluyla kimyasal enerjiye dönüştürerek depolaması sonucu meydana gelen ve canlı organizmaların kökeni olarak ortaya çıkan organik madde kaynakları olarak tanımlanmaktadır [2,3,4]. AB'nin yıllık toplam enerji tüketiminin yaklaşık %6'sı biyokütleden sağlanmaktadır. Biyokütlenin bir kolu olan biyogaz organik bazlı atık ve artıkların, enerji bitkilerinin oksijensiz ortamda (anaerobik fermantasyon)

parçalanması sonucu ortaya çıkan reksiz, kokusuz bir gazdır [5]. Katı atıklardan ve atıksulardan biyometanizasyon yoluyla biyogaz geri kazanımı, çevresel boyutun yanı sıra ekonomik olarak da önem arz etmektedir [6]. Biyogaz üretiminde hammadde sorunu yoktur. Biyogaz üretiminde atıklar ve atıksuların içindeki organik hammaddeler esas alınır. Biyogaz; organik bazlı atıkların oksijensiz ortamda fermentasyonu sonucu oluşan reksiz-kokusuz, havadan hafif, parlak mavi bir alevle yanan ve bileşiminde organik maddelerin bileşimine bağlı olarak yaklaşık; %40-70 metan, %30-60 karbondioksit, %0-3 hidrojen sülfür ile çok az miktarda azot ve hidrojen bulunan bir gaz karışımıdır [7].

Son yıllarda artan atık sorunlarına çözüm bulunması konusunda yapılacak olan adımlar; az atık üretimi, atıkları geri kazanma, yeniden kullanma ve geri kazanılamayan atıkları çevreye en az zarar verecek şekilde bertaraf etme adımlarını içermelidir [8,9]. Süt endüstrisi, ham sütü işleyerek içme sütü ve diğer yan ürünleri üreten bir gıda endüstrisinin dalıdır. Endüstrinin ana maddesi süttür [7]. Süt içerisinde bir çok kimyasal

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : afsincetinkaya@gmail.com

bileşik bulunan kompleks bir sıvıdır. Süt vitaminler, asitler, enzimler protein, inorganik tuzlar ve enzimler içerir. Bileşenler sütü veren memelinin metabolik prosesine, genetik ve çevresel etkilere bağlı olarak değişir [10,11,12].

Süt endüstrisi birçok farklı prosese sahip olan bir endüstridir. Endüstrinin uyguladığı prosese göre atıksu karakterizasyonu değişmektedir. Bu nedenle ülkemizde ve tüm dünyada süt endüstrisi atıksularının karakterizasyonu değişkenlik göstermektedir [13,14]. Süt endüstrisi atıksuları yüksek oranda biyolojik parçalanabilir özelliğe sahiptirler [15,16]. Atıklardan ve atıksulardan biyogaz üretimi, dünya genelinde yenilenebilir enerji sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. Biyokimyasal Metan Potansiyeli (BMP) testleri, sürekli deneylerden daha kolay gerçekleştirildiğinden, atıkların metan verimi belirlenmesinde yenilikçi teknolojiler olarak düşünülmektedir [17]. Çakır ve diğ. (2005) biyometanizasyon sonucunda ortaya çıkan metan gazı uygun şartlar altında enerjiye çevrilerek önemli boyutlarda ekonomik kazanç sağlanabildiğini ve elde edilen metan gazı bulunduğu tesisteki işletme maliyetini önemli ölçüde düşürebildiğini ve bir biyometanizasyon tesisinden elde edilen biyogazın tesisteki enerji maliyetlerini %28 oranında azaltabildiği tespit etmişlerdir [18]. Bu çalışmada süt endüstrisi atıksuyunun biyoparçalanabilme oranı yüksek olduğundan dolayı biyometanizasyon potansiyeli incelenmiş ve üretilen metan değerleri ile model yapılarak tahminde bulunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1 Besiyeri Hazırlanması (Preparation of Media)

Uygun anaerobik bakteri kültürü ile yapılan şişe deneyi süt endüstrisi atıksuyu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Besiyerine fosfat tampon çözeltilerine ilave olarak anaerobik bakterilerin ihtiyacı olan mineral, vitamin ve mikronütrientler de eklenmiştir.

BESİYERİ: Besiyerinin bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir. Tablodaki değerlere ilaveten mikronütrient olarak $FeCl_2 \cdot 4H_2O$, H_3BO_3 , $ZnCl_2$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$, $MnCl_2 \cdot 2H_2O$, $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$, $AlCl_3$, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$, EDTA'dan oluşmaktadır. Besiyerine ayrıca, Pyridoxamine ($C_8H_{12}N_2O_2 \cdot 2H_2O$), Nicotinic acid ($C_6H_5NO_2$), Nicotinamide ($C_6H_5N_2O$), DL-panthothenic acid ($C_9H_{16}NO_5$, 1/2Ca), Vitamin B12, p-aminobenzoic acid ($C_7H_7NO_2$), Pyridoxine.HCl (B6; $C_8H_{11}NO_3 \cdot HCl$), D Biotin, Riboflavin, Thiamine.HCl vitamin çözeltilerine ek olarak $Na_2SeO_3 \cdot 5H_2O$ ve $NaWO_4 \cdot 2H_2O$ eklenmiştir. Besiyerine son olarak maya özütü (2g/L) ve besiyerinde olabilecek oksijeni bağlayarak anaerobik koşulları sağlayan sistein HCl (0,5 g/L) ilave edilmiştir.

AŞI (INOCULATE): Deney seti süresince aşı olarak anaerobik granül çamur kullanılmış olup, çalışmada öncelikle granül çamurun uçucu miktarı (VS) değeri

belirlenmiştir. Yapılan analizler neticesinde granül aşı çamurunun VS miktarı 7570 mg/L olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 1. Deney setlerinde kullanılan besiyerinin bileşimi (Composition of the media used in the experimental sets)

Kimyasal	Konsantrasyon
$NaH_2PO_4 \cdot H_2O$	10,7 g/L
Na_2HPO_4	3,20 g/L
NH_4Cl	0,6 g/L
KH_2PO_4	0,125 g/L
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0,11 g/L
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	0,1 g/L
$NaHCO_3$	0,2 g/L

Çizelge 1.'de deney setlerinde kullanılan besiyerinin bileşimi verilmiştir. Süt endüstrisinden alınan atıksular toplam hacmi 100 mL olan BMP şişelerine konulmuştur. Ardından BMP şişelerine granül aşı çamurundan 5 g eklenmiş ve oksijeni uzaklaştırmak için 5 dakika azot gazı geçirilerek şişelerin ağzı kapatılmıştır. Bütün deney setleri için kontrol amaçlı şahit şişeleri de hazırlanmış olup, şahit şişelerine yalnızca besiyeri ve granül aşı çamuru eklenmiştir. Hazırlanan deney şişeleri GALLENKAMP Inkübatöre yerleştirilmiş ve sıcaklığı $35^\circ C$ 'de sabit tutularak ve sürekli çalkalanarak $35^\circ C$ 'de inkübe edilmiştir. Tüm testler üçer kez gerçekleştirilmiş olup BMP testleri 20 şişe ile 35 gün sürmüş ve biyogaz üretimi her gün takip edilmiştir. Deney şişelerinde biriken gazlar şırınga yardımıyla alınmıştır. Şırıngaların analiz öncesi pistonu çıkarılıp, enjektörlerin uç kısmında bulunan ve gaz transferinde kullanılan silikon hortumlara plastik klipsler takılmıştır. Enjektörlerin pistonlarına, analiz esnasından gaz kaçırmasını önlemek amacıyla, alttan ve üstten 1'er parmak boşluk kalacak şekilde vazelin sürülmüştür. Her bir numune ve şahidin düzenli olarak gaz miktarları ölçülmüş ve gaz üretiminin en iyi olduğu dönemde gaz bileşeni (CH_4 , CO_2) analizleri "SHIMADZU GC-2014 Gas Chromatograph" cihazı ile yapılmıştır. Şekil 1'de inkübe edilen deney setleri gösterilmiştir. Kullanılan süt endüstrisi atıksuyunun karakteristiği; KOI, 3400 mg L⁻¹; BOI, 2100 mg L⁻¹; pH 7; NH_4^+ 820 mg L⁻¹; SO_4^{-2} 835 mg L⁻¹'dir.



Şekil 1. İnkübe edilen deney setleri (Incubated experimental sets)

2.2. Analizler (Analysis)

Hazırlanan deney şişeleri GALLENKAMP Incubators'a yerleştirilmiş ve sıcaklığı 35°C'de sabit tutularak ve sürekli çalkalanarak 35°C'de inkübe edilmiştir. Gaz bileşeni (CH₄, CO₂) analizleri "SHIMADZU GC-2014 Gas Chromatograph" cihazı ile yapılmıştır. Kullanılan cihazlarının özellikleri Çizelge 2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan Cihazların Özellikleri (Properties of Used Devices)

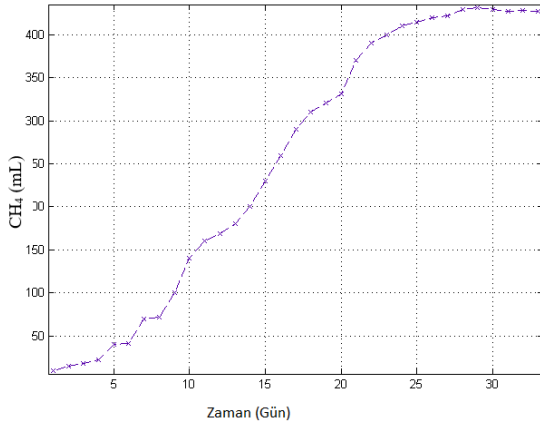
Ölçülen Değişken	Cihaz	Aralık	Belirsizlik
CH ₄ , CO ₂	Gaz Kromatografi ^a	-60 °C - 280 °C	±% 0,4
Sıcaklık	İnkübatör ^b	25 °C - 110 °C	±% 0,3

^a Referanstan alınan Gaz Kromatografi Özellikleri [19].

^b Referanstan alınan İnkübatör Özellikleri [20].

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Metan üretiminin deneysel sonuçları, eğri oluşturularak sayısallaştırılmıştır. Eğri uydurma uygulamasından önce, deney sonuçları hareket eden ortalamalara göre düzeltilmiştir. Şekil 2.'de süt endüstrisinden alınan atıksuyun zamana bağlı olarak metan üretimi gösterilmiştir.



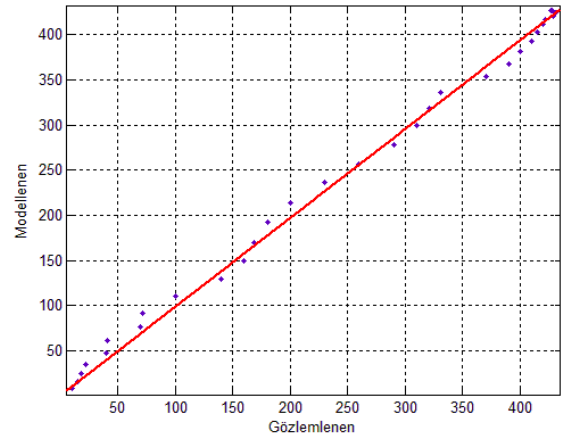
Şekil 2. Metan üretim miktarının zamanla değişimi (Change in the amount of methane production over time)

Farklı derecelerde çeşitli polinom denklemleri veri setine uygulanmıştır. Beşinci derece polinom denklemi en iyi uyumu vermiştir. Şekil 3.'de kırmızı renkli bir çizgi ile elde edilen denklem gösterilmiştir. Eğrisinin fonksiyonu denklem 1'de verilmiştir.

$$f(t) = 4.48 \times 10^{-5} \times t^5 - 3.27 \times 10^{-3} \times t^4 + 0.05 \times t^3 + 0.47 \times t^2 + 5.66 \times t + 2.51 \quad (1)$$

Denklemde t ifadesi güne karşılık gelmektedir. Uygun iyiliği bazı istatistiksel göstergelerle değerlendirilmiştir. SSE 11.52, RMSE 0.65 ve belirleme katsayısı > 0.999 olarak tespit edilmiştir. Denklem 1 ile hesaplanan veriler ile ve gözlemlenen deneysel veriler kullanılarak yeni bir korelasyon eğrisi

oluşturulmuştur. Tahmin edilen ve gözlemlenen çizimi Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Gözlemlenen/modellenen dağılım grafiği (Observed/modeled distribution graph)

Doğru, $y = m \cdot x$ fonksiyonuna uyacak şekilde oluşturulmuştur. Denklemi $y = 0.98 \cdot x$ olarak elde edilmiştir. Şekil 3.'te olduğu gibi, doğru uyumun istatistiksel iyiliği SSE, RMSE ve belirleme katsayısına göre değerlendirilmiştir. SSE, RMSE ve belirleme katsayısı sırasıyla 3130, 9.89 ve 0.99 olarak tespit edilmiştir. Zeytin atıksuyu ile yapılan BMP analizi sonucunda 25 gün içerisinde 335 ml metan açığa çıkmış olup [21], Şarap endüstrisi atıksuyu ile yapılan diğer çalışmada 256 ml metan açığa çıkmıştır [22]. Bu çalışmada üretilen metan miktarı literatürde diğer atıksularla yapılan çalışmalara kıyasla göre daha yüksektir.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), atıkların organik madde miktarını ölçmek ve biyogaz üretimi potansiyelini tahmin etmek için kullanılır. Süt endüstrisi atıksuyunun KOİ'si diğer atıksulara nazaran yüksek olduğundan biyogaz üretimi için çok iyi bir adaydır. Bu çalışmada süt endüstrisi atıksularının biyometanizasyon potansiyelleri incelenmiştir. Yapılan gaz analizi sonuçlarına göre model oluşturulmuştur. Çeşitli denemelerin sonucunda 5. Derece polinomun en iyi tahmin modelini ürettiği görülmüştür. Deneysel sonuçlar elde edilen modele girdi olarak verildiğinde tahmin kapasitesinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. SSE, RMSE ve belirleme katsayısı sırasıyla 3130, 9.89 ve 0.99 olarak hesaplanmıştır. Daha önce yapılan çalışmalar atıkların biyometan potansiyelinin incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak bu çalışma ile süt endüstrisi atıksuyundan, biyogaz elde etme çalışmaları hızlandırılıp, çevre üzerinde yarattıkları olumsuz etkiler önlenirken, bu atıkların yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilerek bir an önce uygulamaya geçilmesi; uygulamada ki eksiklikler ve aksaklıklar tespit edilip, optimum koşulların belirlenmesi ülkemizin geleceği ile ilgili olarak önem arz edecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Andrade, L.H., Motta, G., Amaral, M., "Treatment of dairy wastewater with a membrane bioreactor", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30(4): 759-770, (2013).
- [2] Porwal, J., Manea, A.V., Velhal, S.G., "Biodegradation of dairy effluent by using microbial isolates obtained from activated sludge", *Water Research*, 9: 1–15, (2015).
- [3] Manh, L.D., "Bioremediation of vegetable oil and grease from polluted wastewater in dairy factory", *Journal of Science National Science Technology*, 24: 56–62, (2008).
- [4] Garcha, S., Kaur, N., Brar, S.K., "Aerobic granulation strategy for the treatment of dairy waste water", *Indian Journal of Dairy Science*, 67: 1–5, (2014).
- [5] Vishakha, S.S., Kulkarni, S.W., Minal, W., "Physicochemical characterization of dairy effluents", *International Journal Life Science and Pharma Research*, 2: 2250–3137, (2013).
- [6] Schwarzenbeck, N., Borges, J.M., Wilderer, P.A., "Treatment of dairy effluents in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor", *Applied Microbiology Biotechnology*, 66 (6): 711–718, (2005).
- [7] Kushwaha, J.P., Srivastava, V.C., Mall, I.D., "Organics removal from dairy wastewater by electrochemical treatment and residue disposal", *Separation and Purification Technology*, 76: 198–205, (2010).
- [8] Sarkar, B., Chakrabarti, P.P., Vijaykumar, A., Kale, V., "Wastewater treatment in dairy industries-possibility of reuse", *Desalination*, 195: 141–152, (2006).
- [9] Hamdani, A., Mountadar, M., Assohei, O., "Comparative study of the efficacy of three coagulants in treating dairy factory waste water", *International Journal of Dairy Technology*, 8: 58–83, (2005).
- [10] Adhikari, U., Harrigan, T., Reinhold, D.M., "Use of duckweed-based constructed wetlands for nutrient recovery and pollutant reduction from dairy wastewater", *Ecological Engineering*, 78: 6–14, (2015).
- [11] Gavala, H.N., Kopsinis, H., Skiadas, I.V., Stamatelatos, K., Lyberatos, G., "Treatment of dairy wastewater using an upflow anaerobic sludge blanket reactor". *Journal Of Agricultural Engineering Research*, 73: 59-63, (1999).
- [12] Neto, S.A., Magri, T.C., Silva, G.M., Andrade, A.R., "Treatment of waste dye by electroflocculation: an experiment for undergraduate in chemistry". *Quimica Nova*, 34: 1468-1471. (2011).
- [13] Garcha, S., Kaur, N., Brar, S.K., "Aerobic granulation strategy for the treatment of dairy waste water", *Indian Journal of Dairy Science*, 67: 1–5, (2014).
- [14] Manh, L.D., "Bioremediation of vegetable oil and grease from polluted wastewater in dairy factory", *Journal of Science Education Technology*, 24: 56–62, (2014).
- [15] Janczukowicz, W., Zielinski, M., Debowski, M., "Biodegradability evaluation of dairy effluents originated in selected sections of dairy production", *Bioresource Technology*, 99: 4199–4205, (2007).
- [16] Garcha, S., Verma, N., Brar, S.K., "Comparative study on pollution potential of dairy wastewater generated by organized and unorganized sector", *Asian Journal of Microbiology Biotechnology Environment Science*, 16: 1051–1056, (2014).
- [17] Koch, K., Drewes, J.E., "Alternative approach to estimate the hydrolysis rate constant of particulate material from batch data", *Applied Energy*, 120: 11-15, (2014).
- [18] Çakir, F., Stenstrom, M., "Greenhouse gas production: A comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology", Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, 39: 4197-4203, (2005).
- [19] Henriksen, M., Bjerketvedt, D., Vaagsaether, K., Gaathaug, A. V., Skjold, T., Middha, P., "Accidental hydrogen release in a gas chromatograph laboratory: A case study". *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11): 7651-7656, (2017).
- [20] Østgaard, K., Kowarz, V., Shuai, W., Henry, I. A., Sposob, M., Haugen, H. H., Bakke, R., Syringe test screening of microbial gas production activity: Cases denitrification and biogas formation. *Journal of Microbiological Methods*, 132: 119-124, (2017).
- [21] Martín, A., Borja, R., García, I., & Fiestas, J. A., "Kinetics of methane production from olive mill wastewater", *Process Biochemistry*, 26(2): 101-107, (1991).
- [22] Riaño, B., Molinuevo, B., García-González, M. C., "Potential for methane production from anaerobic co-digestion of swine manure with winery wastewater", *Bioresource Technology*, 102(5): 4131-4136, (2011).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

The corpus based approach to sentiment analysis in modern standard Arabic and Arabic dialects: a literature review

Modern standart Arapça ve Arap lehçelerinde duygu analizine külliyyat (korpus) temelli yaklaşım: bir literatür incelemesi

Yazar(lar) (Author(s)): Anwar ALNAWAS¹, Nursal ARICI²

ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0001-9181-9377>

ORCID²: <https://orcid.org/0000-0002-4505-1341>

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Alnawas A. and Arıcı N., “The corpus based approach to sentiment analysis in modern standard Arabic and Arabic dialects: a literature review”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 461-470, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.403975

The Corpus Based Approach to Sentiment Analysis in Modern Standard Arabic and Arabic Dialects: A Literature Review

Review Article / Derleme Makalesi

Anwar ALNAWAS^{1,3}, Nursal ARICI^{2*}

¹Graduate School of Natural and Applied Sciences, Computer Engineering, Gazi University, Turkey

²Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Turkey

³Nasiriyah Technical Institute, Southern Technical University, Iraq
(Geliş/Received : 13.10.2016; Kabul/Accepted : 21.02.2017)

ABSTRACT

Sentiment Analysis, is the analysis of ideas, emotions, evaluations, values, attitudes and feelings about products, services, companies, individuals, tasks, events, titles and their characteristics. With the increase in applications on the Internet and social networks, Sentiment Analysis has taken a considerable place in the field of text mining research and has since been used to explore the opinions of users about various products or topics discussed over the Internet. When the literature on Sentiment Analysis is examined, it is seen that the natural language of the Internet information sources that form the basis of the analysis is mostly English. Developments in the fields of Natural Language Processing and Computational Linguistics have contributed positively to Sentiment Analysis studies made from natural languages other than English. The purpose of this study is to examine the literature of Sentiment Analysis conducted in Arabic internet information sources. The literature review includes studies based on the corpus approach, which is made up of Arabic Internet information sources. Studies are being carried out on the works which constitute their own corpora for both Modern Standard Arabic and Arabic dialects and on which sentiment analysis is performed.

Keywords: Sentiment Analysis, corpora, feature extraction, Arabic Language, NLP.

Modern Standart Arapça ve Arap Lehçelerinde Duygu Analizine Külliyyat (Korpus) Temelli Yaklaşım: Bir Literatür İncelemesi

ÖZ

Duygu analizi; kişilerin ürünler, servisler, firmalar, bireyler, görevler, olaylar, başlıklar ve bunların özellikleri üzerine fikirleri, duyguları, değerlendirmeleri, değer biçmeleri, tutumları ve hislerini analiz edilmesidir. İnternet ve sosyal ağlardaki uygulamaların artmasıyla birlikte, Duygu Analizi (DA), metin madenciliği araştırma alanında dikkate değer bir konuma gelmiş ve o zamandan beri, kullanıcıların İnternet üzerinden tartışılan çeşitli ürünler veya konular hakkındaki görüşlerini keşfetmek için kullanılmaktadır. Duygu Analizi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde analize temel oluşturan İnternet bilgi kaynakları doğal dilinin çoğunlukla İngilizce olduğu görülmektedir. Doğal Dil İşleme ve Hesaplamalı Dil Bilim alanlarındaki gelişmeler İngilizce dışındaki doğal dillerden yapılan Duygu Analizi çalışmalarına olumlu katkıları olmuştur. Bu çalışmanın amacı, Arapça içerikli İnternet bilgi kaynaklarından gerçekleştirilen Duygu Analizi literatürü incelemektir. Literatür incelemesi, Arapça İnternet bilgi kaynaklarından oluşturulan külliyyat (corpus) yaklaşımına dayanan çalışmaları kapsamaktadır. Hem Modern Standart Arapça, hem de Arap lehçeleri için kendi külliyyatlarını(corpora) oluşturan ve bu metinler üzerinden duygu analizi yapılan çalışmalar incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Duygu analizi, külliyyat, özellik çıkarma, Arapça, doğal dil işleme

1. INTRODUCTION

The Internet has become an important source of user generated content such as text, pictures and emoticon in different sectors including business, health, politics and education. For that user with every login to Social Networks generate content in deferent form like unstructured text, login registration, video streaming and other forms. The generated content from users is gaining considerable attention because of its importance in

various sectors like businesses, governmental, political etc. Understanding what people are thinking and their views are essential for decision-making on the subject especially when these comments are combined in one area and on a single topic.

For the importance of the generated content; Web Contents Mining (WCM) is being used by organizations to take advantage of this content. Opinion mining and Sentiment Analysis (SA) are the sub research area of WCM appeared to be witnessing increasing research in the Natural Language Processing (NLP) community.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : nursal@gazi.edu.tr

SA aims to analyze the contents generated by the user, whether positive or negative feelings about a specific topic [1, 2]. SA is applied at different levels: document, sentence and aspect with different techniques. In general there are two main techniques for SA; lexical and machine learning approaches. Lexical approach, a dictionary is prepared to store the polarity values of each lexicons. For each word of the text present in the dictionary, polarity score calculating by adding to get an 'overall polarity score'[3].

Arabic content has grown on the Internet, especially with the expansion of Social Networks [4]. For example Twitter has about 11.1 million active users for each month in Arabic region until March 2017 [5], and Facebook is the most popular social media platform with 156 million users [6]. In general, textual data available on the Internet are in both; Modern Standard Arabic (MSA) and dialects. The dialects of Arabic are very varied, with five dialects; Gulf (Khaliji), Iraqi, Levantine, Egyptian and Maghrebi. There is a difference between the dialects. Some native dialects cannot communicate with speakers of different dialects, Therefore, MSA is used for communication and understanding [7, 8]. Standard phonological, morphological and lexical does not exist in Arabic dialects like MSA [9]. Therefore, preprocessing is difficult with dialects because it is not based on fixed rules [10].

In general, many studies on English and some other languages are widely available, as opposed to Arabic. The lack of a database of Arabic dialects and studies on the nature of the acoustic-phonetics are the most important reasons for natural language processing [11]. A limited number of reviews dealt with Arabic SA. The study of [12] a comprehensive overview of the latest updates in the field of SA algorithms and applications. On the other hand, this work reviewed the Arabic SA along with the other languages. In [13], reviewed works on Arabic SA and characteristics of the Arabic language. The work also reviewed three of SA approaches; supervised, unsupervised and hybrid.

The proposed paper is a survey on SA of the Arabic content in various social networks, news or commercial especially that created its own corpus. As well as the presentation of the techniques that used to extract sentiment and corpus building with a review of the most important challenges to the SA in Arabic language.

This paper is organized as follows: Section 2 provides the overview of the SA and Arabic language. Section 3 illustrates the works done using corpora for both MSA and dialects. Section 4 discusses the main issues of Sentiment Analysis and Arabic language derived from previous studies. Section 5 concludes the manuscript.

2. BACKGROUND

2.1. Arabic Language

Arabic is an important language, MSA and dialects are spoken by approximately 422 million people [14]. Arabic is one of morphology rich language [8]. Arabic consists of 28 letters, including three letters of long vowel and 25

consonants letters. Arabic is written from right to left alignment. The Arabic letter shape changes according to its position from the word, unlike English. Arabic also contains short vowels, or diacritics that change the meaning of the word such as "كُتِبَ" which means "wrote" and "كُتُبٌ" which means "books". Arabic is a Semitic language and contains many dialects depending on different regions. MSA used in education, news and official websites.

Arab world describing as an important player in international politics and the global economy. It is therefore a focus of attention for multinationals, interest groups and analysts who want to decipher sentiment on various issues such as oil prices, stock market movement and foreign policy. There is a large amount of Arabic language on the Internet and this quantity needs to analyze the natural language to extract the required sentiments [15].

SA for the Arabic language is complex for several reasons, including characteristics of Arabic language and lack of SA work for the Arabic language. [4] review the most important characteristics of the Arabic language that effect on SA as follow:

- Multiply the root of the Arabic word depending on the context such as (يكتب, كتاب, كتابة).
- Punctuation affects the meaning of words, meaning that two words have the same spelling but different meanings such as (جد) which means grandfather and (جد) which means fined.
- Some linking words can make the sentence carry two conflicting feelings such as (لكن).

In additional to these points there are different dialects in each Arabic country or region and this complicates SA because of different texts that carry feelings.

2.2. Sentiments Analysis

SA is a new field of research uses advanced techniques to mining texts. Machine learning techniques, information retrieval and NLP used to handle large amount of unstructured content that generated by Internet users, especially social networking sites [16].

SA can be defined as the process of determining the semantic orientation of the text that holds the opinion. This semantic orientation can be positive, negative or natural. SA deals with the text in several ways. Either deal with a full document as having only one opinion or the document holds more than one opinion. In general, there are three levels of SA; document-level, sentence-level and aspect-based level [17].

- Document-level: at this level, the analysis considers that the entire document has only one opinion.
- Sentence-level: This level deals with each sentence as containing one opinion. The polarization of the whole document depends on the polarization of the sentence.
- Aspect-based level: Sometimes it is called (feature-based sentiment analysis). A single sentence can contain more than one aspect and each has its own special opinion. At this level the desired aspect is determined and then the polarity of this is set. SA process used two main

approaches: Machine Learning Approach and Linguistics Based Approach. Figure 1 show the main approaches.

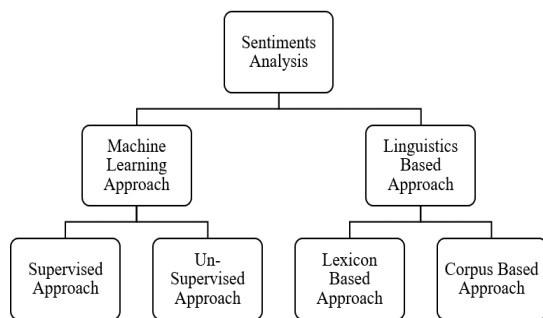


Figure 1: Sentiment classification techniques.

3. CORPORA OF PREVIOUS WORKS

Because of the multitude of dialects in the Arabic language there's no corpus containing all dialects.

Create comprehensive corpus requires great abilities that must be gathered around all dialects in the Arab region. In general, the texts on the Internet are unorganized and contain a lot of noise and repetition in the letters. So it needs to preprocess.

SA of the Arabic language and dialects works, some of them used the old corpora and the other created new corpora. In this section we review the works that created own corpus and how to collect data, source, and method of preprocess.

3.1. Sentiments Analysis of MSA

In recent years, there has been a marked increase in the volume of shared data on daily activities of Internet users. This data contains many information, including user opinions. The large volume of data requests the appearance of a new research field called Sentiment analysis or opinion mining [18].

[19] used the TripAdvisor site to collect 625 review comments. Comments are categorized manually into five categories. Comments are categorized into five categories excellent; very good; middling; weak and horrible. The final data set contains 250 positive comments and 250 negative comments. Tokenization and stemming are applied. They proposed a new mathematical approach to determine polarity of opinion. A linear program was designed to calculate the weights and then calculate the label of each comment. To evaluate the model, used two terms: Root Mean Square Error (RMSE) and Average of Margins (AM).

Some researchers has used part of data set previously collected like in [20], where used large-scale Arabic Book Reviews Dataset (LABR) that collected by [21] as a source for Human Annotated Arabic Dataset (HAAD). HAAD used as annotated corpus for aspect-based sentiment analysis of Arabic text. To classification of the comments that selected out of LABR, they used seven groups of students that studying the course of Natural Language Processing at Jordan University of Science and Technology. Each group contains seven students and was

given a task rating of 400 comments. The second phase of auditing work was conducted by native Arabic speaker and holds a Ph.D. degree in computer science. The annotated contains information related to the four tasks: Aspect Term Extraction (T1), Aspect Term Polarity (T2), Aspect Category Identification (T3) and Aspect Category Polarity (T4). Finally, HAAD contains 1513 comments classified in to positive and negative polarity Aspect terms. In order to evaluate T1 and T3, the F1 is measured, where the results were 0.233945 for T1 and 0.151815 for T3. To evaluate T2 and T4, the accuracy of approach is measured. The accuracy of T2 and T4 was 0.297064 and 0.425743.

[22] used the TripAdvisor site to compile 625 reviews about hotels. They divided the reviews manually into five categories: excellent, very good, middling, weak and horrible. The normalization process was applied, including the deletion of repeated characters in the word, delete comments that do not represent an opinion. Some comments appear in more than one category, in order to solve this problem, if the comment appears in a category of 80% it is classified into this category. The proposed approach used two of ML algorithms: SVM and K-NN. In first step SVM used to classify in to five classes. To improve the classification process K-NN used in the second step to obtain satisfying results. The hybrid approach showed good results of F-measure up to %97 in average.

[23] used Facebook as a data source. The case study was related to the Israel Gaza conflict 2014. Most of the news on this topic was posted on "breaking news from Gaza" page. As a first stage, about 10,000 posts were collected. After the exclusion of the irrelevant posts, remain 2265 posts. Second stage posts were manually annotated to three classes (positive, negative and neutral) by a group of three member's: graduate student and two senior researchers. BRAT web based annotation tool from [24] also used. AraNLP tool from [25] used to preprocessing text that include: tokenization, stemming, segmentation, part of speech (POS), punctuation and stop word removal N-Gram. For Name entity recognition (NER) feature extraction a web service based tool from [26] was used. The first two tasks T1 and T2 from [20] was applied. The baseline results for T1 was $F1=3762\%$ and for T2 was Accuracy= 61.47%.

[27] created corpus using data from Twitter and Facebook. In the beginning 10,000 tweets were collected from Twitter and classified and examined carefully. Some problems have been addressed including repetition in tweets and empty tweets. 500 comments were manually collected from Facebook. Many of these comments have been excluded because they were written in Latin characters or contain only emoticons symbols. As a final result the corpus has 2591 comments and tweets (1073 positive, 1518 negative). Tweets classified using the tool in [28]. Either Facebook comments classified manually by the authors of the paper themselves. Using RapidMiner; Tokenize, Stemming, Filter Stop-words, and Generate-n-Grams (Terms) operators were applied to

the data. The researchers presented an SA of the Arabic language from the perspective of Machine Learning (ML). Three supervised methods of classification (Naïve Bayes, SVM and K-Nearest Neighbor classifiers) were built using RapidMiner. To split the data into training and testing sets 10-fold cross validation was used. SVM achieved the best precision it equals to 75.25%.

[29] collected about 350,000 tweet using Twitter's Application Interface (API) by writing PHP script. To facilitate the classification process, a tool was built to help the manual classification of tweets. This tool show

and links remover. Three of ML algorithms used to access proposed framework: NB, SVM and K-NN. The experimental of work show a good performance of NB compared to the other.

[21] introduced Large-scale Arabic Book Reviews (LABR) corpus for SA of the Arabic language. About 220000 review have been downloaded from "www.goodreads.com". Approximately 70% of the review were undesirable because they are not written in Arabic or not related to Arabic books. After deleting unwanted contents, the corpus has 63,257 Arabic

Table 1: The sentiments analysis for MSA

Studies	Level	Feature extraction	Data set source	Classifier	Tool	Evaluation	
						Criteria	Result
[19]	Sentences	Low level Light stemming	TripAdvisor website.	SVM	N/A	RMSE	83.5%
						AM	57.6%
[20]	Aspect-based	N-Grams	LABR	T1;T2; T3;T4	BRAT	F1-	23.39% T1 15.18% T3
						Accuracy	29.7% T2 42.57% T4
[22]	Sentences	Light-stemming	TripAdvisor website	SVM+KNN	N/A	Av. F1	97%
[23]	Aspect-based	N-Grams, POS, NER	Facebook	CRF, J48	AraNLP	F1	37.62% T1 61.47% T2
[27]	Sentences	N-Grams,	Twitter and Facebook	NB, SVM K-NN	RapidMiner	Macro-Precision	66.2%NB 75.2%SVM 70.9%KNN
[29]	Sentences	N-Grams,	Twitter	NB, SVM K-NN	RapidMiner	Accuracy	75.4%NB 71.6%SVM 51.5% K-NN
[21]	Sentences	N-Grams,	book readers social network www.goodreads.com	MNB, NB, SVM	Scikit-learn	F1	42.6% MNB 21.1 NB 41.0% SVM
[31]	Sentences	Did not extracted	PATB, WTP, WF	SIMP, LG	Manual annotation	Kappa (k)	82.0% ATB 79% WTP 79.3% WF
[33]	Sentences	N-Grams,	Movies webpages	NB, SVM	RapidMiner	Accuracy	90.6% SVM 89% NB

to the user each tweet individually and the possibility to choose the category (positive, negative, neutral and not applicable). The tweets filtering process was based on specific criteria like: each tweet contains at least 100 characters, does not contain more than 4 Hashtag, free of mentions and links and not duplicate or retweets. In the last stage, more than 25,000 tweets were rated. They developed RapidMiner extension to match the task of work. This extension include: Emoticons convertor, repetitions remover, negation detection, and dialect (Jordanian dialect) to MSA convertor, Arabizi convertor

reviews. Reviews submitted by users with a rating of 1-5. The researchers assumed reviews those with ratings 4 or 5 as positive, those with ratings 1 or 2 as negative and reviews with rating 3 are considered neutral and not included in the polarity classification. To rating classification two settings used: a balanced and unbalanced split of reviews number. Different features: unigrams, bigrams, and trigrams with/without Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF) weighting also used in experiments phase. Scikit-learn used to implement experiments phase with Python [30].

Multinomial Naive Bayes (MNB), NB (for binary counts), and SVM used as classifiers. With unbalanced setting SVM does much better, while in the balanced setting MNB is slightly better than SVM.

[31] show how to create AWATIF, which represents a multi-genre corpus of MSA for SA. The dataset that used were taken from three sources; Penn Arabic TreeBank (PATB)[32], About 5342 sentences are taken classified from Wikipedia Talk Pages (WTP) and 2532 of interrelated conversations taken from 7 Web forum (WF). To label AWATIF, Identify two types of labeling guidelines; simple (SIMP) and linguistically-motivated and genre nuanced (LG). For SIMP, to classify the sentence to one of three categories (positive, negative, or natural), they prepared two examples for each of these species to help annotators. For LG, expose annotators to a linguistics background and explain the nuances of the genre to which each data set belongs. With those two types of guidelines the annotators can classify sentences under three conditions; GH-LG, GH-SIMP and AMT-SIMP. GH-LG, Here they use the expertise of students specializing in linguistics (Referred as Gold Human (GH)) to classifying sentences using the LG guidelines. GH-SIMP, Where the GH team works under SIMP conditions. AMT-SIMP, using Amazon Mechanical Turk (AMT) as crowd-sourced with SIMP conditions.

[33] collected data from movies web pages in order to create Opinion Corpus for Arabic (OCA). OCA contains 500 reviews; 250 positive and 250 negative. The process of OCA creating included the collection of reviews from several Arabic blog sites and web pages using a simple bash script for crawling. Manually deleted HTML tags and special characters, and corrected spelling mistakes. Tokenizing, removing Arabic stop words, and stemming and filtering those tokens whose length was less than two characters also applied using RapidMiner. To evaluate OCA many of the experiments have been accomplished. They used cross-validation, Unigram, Bigrams, Trigrams and TF-IDF, to compare the performance of two of machine learning algorithms: SVM and NB. Their results were promising. Table 1 summarizes the sentiments analysis for MSA which are described above.

3.2. Sentiments Analysis of Arabic Dialects.

Arabic dialects vary according to criteria such as geography and social class. The following list is only part of many that covers the main Arabic dialects [34]:

- Gulf Arabic (GLF) includes: of Saudi Arabia Kuwait, Qatar, Bahrain, Oman, and United Arab Emirates dialects.
- Iraqi Arabic (IRQ) includes Iraq dialect..
- Sham Arabic (SHM) includes: the of Lebanon, Syria, Jordan, and Palestine dialects.
- Egyptian Arabic (EGY) includes: Egypt and Sudan dialects.
- Maghrebi includes: covers the of Morocco, Algeria, Tunisia, Mauritania and Libya dialects.
- Yemeni dialect.

[35] create two dialects corpora: one for news; and another for art. The news corpus contains 1000 posts

collected from “Al Arabiyya” news Facebook page. The corpus of art also contains 1000 posts collected from “The Voice” page on Facebook. They used three stages of preprocessing for posts; removing redundancies, time stamps and Likes. In order to classify the posts manually, four experts in the Arabic language and dialects were employed. Five rules applied for classification; Negative, Positive, Dual, Spam and Neutral. The corpus was validated, the result of performance was ranging between 73% and 96%.

[36] create a corpus of Mubasher products review using a small program developed in C # and Twitter’s API. Over a period of 57 days, 2051 tweets were collected from Mubasher company Twitter’s website in Saudi Arabia wrote in MSA and local Saudi Arabian dialects. Two experts rated tweets manually into three classis (positive, negative and neutral), where labeled positive tweets as “1”, negative as “-1” and neutral as “0”. After deleted unreverent tweets, the corpus remains 1331 tweets. In the normalization phase, a set of signs, codes and Arabic words taken to different forms and English words were replaced standard Arabic equivalents using RapidMiner. Tokenization, Removal stop word, Light stem and Filter token by length. NB and SVM are applied with two feature selection schemes TF-IDF and BTO (Binary-Term Occurrence) create the word vector. The analysis showed good results with SVM.

[37] classified 3700 tweets manually to create their own corpus. During the classification process, only 1550 tweets appeared related to the specific topic. Users’ names, pictures, hashtags, URLs, emoticons, emoticons, and all non-Arabic words deleted from Tweets. To overcome spelling mistakes and to standardize word-writing formulas in tweets, the normalization process was applied. Extract feature was based on unigrams, bigrams, and trigrams. Two classifiers were used to test corpus: NB and SVM using Weka Suite Software. Researchers noted that the best results were achieved for both the NB and SVM classifiers in the unigram language model.

[38] created corpus to predict sentiment in the commercial sector. The dataset are manually collected from several web pages like: reviewzat1, jawal1232 and jumia3. Those data were reviews about five products: Camera, notebook PC, mobile phone, tablet and television. Three experts were hired to classify 250 reviews manually, 125 positive and 125 negative were obtained. Also in this work, they have developed a small (symbol to word) converter to convert emoticon and symbol to the corresponding words that match it. Stop words, special characters, non-Arabic words, and numbers were deleted in normalization phase. Unigram, bigrams, trigrams used to extract features. Three of ML algorithms were used: SVM, NB and K-Nearest Neighbor (KNN). They realized that the use of SVM and NB algorithms detecting the polarity of opinions, gives higher performance than the use of the KNN algorithm.

Table 2: The sentiments analysis for dialects Arabic.

Studies	Level*	Features extraction	Dialect	Data set source	Classifier	Tool	Evaluation	
							Criteria	Result
[35]	Sent	Did not extracted	Multi dialects	Facebook	Manual tagging	Manual tagging	Accuracy	73-96
[36]	Sent	TF-IDF and BTO	Saudi Arabian	Twitter	NB, SVM	RapidMiner	Accuracy	83.6% NB
								79.6% SVM
							Precision	78.2% NB
								98.0% SVM
[37]	Sent	N-Grams	Multi dialects	Twitter	NB, SVM	Weka	Accuracy	84.2% NB
								84.13% SVM
							F1	83% NB
								84% SVM
[38]	Sent	N-Grams	Multi dialect	reviewzat1, jawal1232, jumia3 web sites	NB, SVM	Weka	Precision	946% NB
								948% SVM
							F1	939% NB
								948% SVM
[39]	Sent	N-Grams	Egyptian Dialect	Twitter	ML+SO	Weka	Accuracy	80.9%
							F1	80.6%
[40]	Sent	POS N-Grams	Egyptian dialectal	tweets, product review, hotel reservation comments and TV program comments	Manual annotation	N/A	Kappa	97%
[41]	Sent	Unigram, Bigram	Jordanian dialect	Twitter	SVM; NB; D-Tree; and KNN	RapidMiner	Accuracy	87.2% SVM
								81.3% NB
								51.45% D-T
								50% KNN
[42]	Sent	Unigram, Bigram	Egyptian dialect	Twitter	NB; SVM	Weka	Accuracy	65% NB
								72% SVM
							F1	65% NB
								72% SVM

* Sent= Sentence

[39] used Twitter to create corpus for the Egyptian dialect. Retrieved 20,000 tweets using Twitter’s API. Among the retrieved tweets, they used 4800 tweets (1600 positive 1600 negative and 1600 neutral) which every tweet contained only one opinion. To classify tweets benefited from two raters. In the initial processing the images, non-Arabic words, hash tags and URLs were deleted. To apply preprocessing, the tweets must pass through the tokenization “is a process of cutting the document units into small pieces called tokens”. Stemming and stop-word removal were applied. Stemming is the process of returning the word to its root form; and stop-word removal is remove words that have little meanings such as "في" (in), " على " (on), " من " (of), etc.. Feature selection was based three different N-Grams models. The hybrid classifier used a new feature set combining the ML (NB and SVM) and the semantic orientation (SO) features. The combination done by adding the SO score as feature in the feature vector built using the ML approach; each sentiment word found is multiplied by the inverse of its SO weight. The results obtained by proposed hybrid approach showed better performance than using either ML or SO approaches.

[40] created MIKA corpus consisting of 4000 subjects of different types of data (tweets, product reviews, hotel reservation comments and TV program comments) written in MSA and the Egyptian dialect. Normalization phase also applied. With the assistance of three Arabic specialists, the data were classified into three categories; positive (PO), negative (NG) and neutral (NU) sentiment. During the classification process, give a power of sentiment to each topic ranging from 1 to 10 for the positive, and (-1 to -10) for the negative, and 0 for the natural.

Several studies have been conducted about SA for English and two main approaches have been used: corpus-based and lexicon-based for this purpose. [41] address both approaches to Arabic starts by create corpus using Twitter data where the corpus contained 2000

tweets (1000 positive and 1000 negative). The tweets written in MSA and the Jordanian dialect for different subjects. The tweets were manually classified by three experts. Repeated letters and stop-words are removed. Also normalization for the letters is done by their tool. They used four supervised methods of classification using RapidMiner; SVM, NB, D-Tree, and KNN. For testing and validation, they applied the 5-fold cross validation. Different stemming techniques tested (root-stemming, light-stemming and no stemming) on each classifier. The results show best accuracy with apply light-stemming for SVM by 87.2%.

[42] use Twitter data to create corpus. Retrieved approximately 4000 tweets, after extracting tweets containing only one opinion 1000 tweets were collected; 500 positive and 500 negative. With the help of three experts, tweets were classified as positive and negative. Normalization also applied by deleting the user name, pictures, hash tags, the URLs and all non-Arabic words. They used Weka Suite Software to extract feature and apply classifier. Unigrams and bigrams used extract feature, NB and SVM used as classifier. The results of the study showed that SVM more accurate than NB, because NB depends on the possibilities therefore is suitable for large training dataset. Table 2 summarizes the sentiments analysis of Arabic dialects that reviewed.

4. DISCUSSION

Social media has become one of the most important of online activities, and began to attract attention in the Arabic-speaking countries. Recently, the Arabic language has begun to raise interest. A lot of the researches have dealt with the Arabic language within the field of NLP with current concerns and SA. The most important issues facing the analysis of feelings for the Arabic language is the lack of annotated data set. This is due to several reasons: Arabic has many dialects; morphological complexity of the Arabic language;

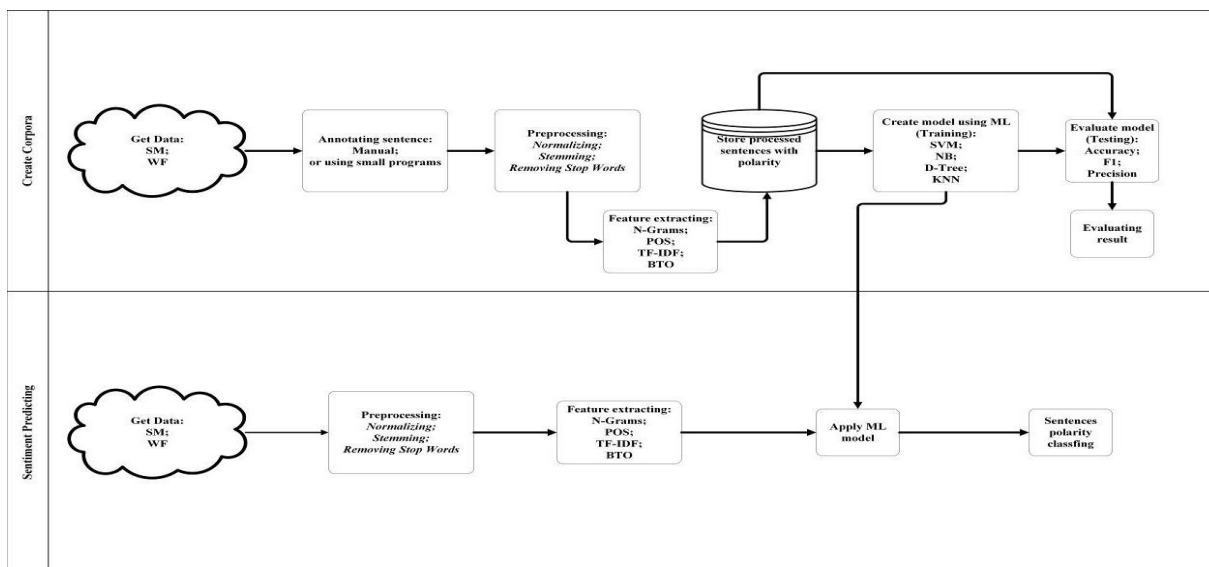


Figure 2: The general framework for corpus based sentiments analysis

Arabic dialects differs from MSA phonologically, morphologically, and lexically.

The dialects included in the previous studies are the Saudi dialect and the Egyptian dialect with a clear lack of other dialects. Previous work showed that there were only two studies [20], [14] that reviewed SA at aspect-level. While, other studies focused on SA at the sentence level. From previous studies, we can summarize the basic steps needed to Arabic SA. Figure 2 show main steps in general framework for SA.

The general framework for corpus based sentiments analysis consists of two parts; the first part represents the establishment of the corpus, model and testing Model. Corpus creation is done by collecting textual data from sources such as Facebook or Twitter, then classify these data manually into the appropriate categories such as negative and positive. Classified text data is not normalized (that means writing one word or one letter in several forms or writing extra characters in the word or repeating letters within the word) Therefore, the process of normalization is applied in preprocessing to unify these different forms.

The preprocessing also contains the delete stop-words process because these words do not effect on the classification process. Most of words contains prefix and suffix and when delete the prefix and suffix we get a large set of single-root words that improve model.

Using a feature set with low representation of text instead of full-size text will perform the required task, therefore input data must be converted to set of features and carefully extract the features. There are many approaches to extract features like POS, TF-IDF and N-Gram.

To create SA classification model based on created corpus, one of the classification algorithms is used or by using a hybrid method of more than one algorithm.

The created model must be tested to determine its validity. They are many criteria's to validate the model such as F1, accuracy and precision.

The second part of the general framework consists of collecting the text data from sources, applying preprocessing and extracting the features as mentioned in the first part.

5. CONCLUSION

In this work, we reviewed the works related to the Sentiments Analysis of the Arabic language for both dialects and Modern Stander Arabic. We provided a detailed analysis of the methods used and the results obtained. In the evaluation, it is found that the most popular methods used to evaluate are NB AND SVM. In general, the dialects included in the previous studies are the Saudi dialect and the Egyptian dialect with a clear lack of other dialects. Also we found that there are environments that offer support for the Arabic language such as RapidMiner and Weka. The nature of Arabic was one of the most important challenges facing Sentiments Analysis with clear lack of datasets availability.

REFERENCES

- [1] Aliane A., Aliane H., Ziane M., and Bensaou N., "A Genetic Algorithm Feature Selection Based Approach for Arabic Sentiment Classification", *2016 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA)*, Agadir, Morocco, 1-6, (2016).
- [2] Ravi K. and Ravi V., "A Survey on Opinion Mining and Sentiment Analysis: Tasks, Approaches and Applications", *Knowledge-Based Systems*, 89: 14-46, (2015)
- [3] Bhadane C., Dalal H., and Doshi H., "Sentiment Analysis: Measuring Opinions", *Procedia Computer Science*, 45: 808-814, (2015)
- [4] Alhumoud S. O., Altuwajri M. I., Albuhairi T. M., and Alohaideb W. M., "Survey on Arabic Sentiment Analysis in Twitter", *International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering* 9: 364-368, (2015)
- [5] Internet: WEEDOO, *Twitter Arab World – Statistics Feb 2017*, 2017, Available: <https://weedoo.tech/twitter-arab-world-statistics-feb-2017/>, Accessed: 29 July 2017
- [6] Internet: WEEDOO, *Facebook Arab World – Statistics Feb 2017*, 2017, Available: <https://weedoo.tech/facebook-arab-world-statistics-feb-2017/>, Accessed: 29 July 2017
- [7] Al-Kabi M. N., Gigieh A. H., Alsmadi I. M., Wahsheh H. A., and Haidar M. M., "Opinion Mining and Analysis for Arabic Language", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 5: 181-195, (2014)
- [8] Hamed O. and Zesch T. "The Role of Diacritics in Designing Lexical Recognition Tests for Arabic", *In: Proceedings of the 3rd International Conference on Arabic Computational Linguistics, ACLing 2017*, Dubai, United Arab Emirates, 119-128, (2017).
- [9] Biskri I., Berrakem F.-Z., and Jebali A. "The Applicative Combinatory Categorical Analysis of Arabic", *In: Proceedings of the 3rd International Conference on Arabic Computational Linguistics, ACLing 2017*, Dubai, United Arab Emirates, 199-207, (2017).
- [10] Abuata B. and Al-Omari A., "A Rule-Based Stemmer for Arabic Gulf Dialect", *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 27: 104-112, (2015)
- [11] Alshutayri A. and Atwell E., "Exploring Twitter as a Source of an Arabic Dialect Corpus", *International Journal of Computational Linguistics (IJCL)*, 8: 37-44, (2017)
- [12] Medhat W., Hassan A., and Korashy H., "Sentiment Analysis Algorithms and Applications: A Survey", *Ain Shams Engineering Journal*, 5: 1093-1113, (2014)
- [13] Boudad N., Faizi R., Thami R. O. H., and Chiheb R., "Sentiment Analysis in Arabic: A Review of the Literature", *Ain Shams Engineering Journal*, (2017)
- [14] Internet: UNESCO, *Unesco World Arabic Language Day*, 2012, Available: <http://www.unesco.org/new/en/unesco/events/prizes-and-celebrations/celebrations/international-days/world-arabic-language-day>, Accessed: 23 March 2017
- [15] Al-Kabi M. N., Abdulla N. A., and Al-Ayyoub M. "An Analytical Study of Arabic Sentiments: Maktoob Case Study", *In: Proceedings of the 2013 8th International*

- Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST)*, London, UK, 89-94, (2013).
- [16] Sharma A. and Dey S. "A Comparative Study of Feature Selection and Machine Learning Techniques for Sentiment Analysis", *In: Proceedings of the Proceedings of the 2012 ACM research in applied computation symposium*, San Antonio, Texas, USA, 1-7, (2012).
- [17] Awwad H. and Alpkocak A. "Performance Comparison of Different Lexicons for Sentiment Analysis in Arabic", *In: Proceedings of the 2016 Third European Network Intelligence Conference (ENIC)*, Wrocław, Poland, 127-133, (2016).
- [18] Ibrahim M. A. and Salim N., "Opinion Analysis for Twitter and Arabic Tweets: A Systematic Literature Review", *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 56: (2013)
- [19] Cherif W., Madani A., and Kissi M. "A New Modeling Approach for Arabic Opinion Mining Recognition", *In: Proceedings of the 2015 Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, Fez, Morocco, 1-6, (2015).
- [20] Al-Smadi M., Qawasmeh O., Talafha B., and Quwaider M. "Human Annotated Arabic Dataset of Book Reviews for Aspect Based Sentiment Analysis", *In: Proceedings of the 2015 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, Rome, Italy, 726-730, (2015).
- [21] Aly M. A. and Atiya A. F. "Labr: A Large Scale Arabic Book Reviews Dataset", *In: Proceedings of the 51st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, Sofia, Bulgaria, 494-498, (2013).
- [22] Cherif W., Madani A., and Kissi M., "Towards an Efficient Opinion Measurement in Arabic Comments", *Procedia Computer Science*, 73: 122-129, (2015)
- [23] AL-Smadi M., Al-Ayyoub M., Al-Sarhan H., and Jararweh Y. "Using Aspect-Based Sentiment Analysis to Evaluate Arabic News Affect on Readers", *In: Proceedings of the 2015 IEEE/ACM 8th International Conference on Utility and Cloud Computing (UCC)*, Limassol, Cyprus, 436-441, (2015).
- [24] Stenetorp P., Pyysalo S., Topić G., Ohta T., Ananiadou S., and Tsujii J. i. "Brat: A Web-Based Tool for Nlp-Assisted Text Annotation", *In: Proceedings of the 13th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics*, Avignon, France, 102-107, (2012).
- [25] Althobaiti M., Kruschwitz U., and Poesio M. "Aranlp: A Java-Based Library for the Processing of Arabic Text", *In: Proceedings of the Ninth International Conference on Language Resources and Evaluation*, Reykjavik, Iceland, (2014).
- [26] Al-Rfou R., Kulkarni V., Perozzi B., and Skiena S. "Polyglot-Ner: Massive Multilingual Named Entity Recognition", *In: Proceedings of the Proceedings of the 2015 SIAM International Conference on Data Mining*, British Columbia, Canada, 586-594, (2015).
- [27] Duwairi R. and Qarqaz I. "Arabic Sentiment Analysis Using Supervised Classification", *In: Proceedings of the 2014 International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, Barcelona, Spain 579-583, (2014).
- [28] Duwairi R., Marji R., Shaban N., and Ershaidat S., "Sentiment Analysis", **B.S. thesis**, Jordan University of Science and Technology, (2012).
- [29] Duwairi R., Marji R., Sha'ban N., and Rushaidat S. "Sentiment Analysis in Arabic Tweets", *In: Proceedings of the 2014 5th international conference on Information and communication systems (ICICS)*, Irbid, Jordan, 1-6, (2014).
- [30] Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., *et al.*, "Scikit-Learn: Machine Learning in Python", *Journal of Machine Learning Research*, 12: 2825-2830, (2011)
- [31] Abdul-Mageed M. and Diab M. T. "Awatif: A Multi-Genre Corpus for Modern Standard Arabic Subjectivity and Sentiment Analysis", *In: Proceedings of the eighth international conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*, Istanbul, Turkey, 3907-3914, (2012).
- [32] Maamouri M., Bies A., Buckwalter T., and Mekki W. "The Penn Arabic Treebank: Building a Large-Scale Annotated Arabic Corpus", *In: Proceedings of the NEMLAR conference on Arabic language resources and tools*, Cairo, Egypt, 466-467, (2004).
- [33] Rushdi-Saleh M., Martín-Valdivia M. T., Ureña-López L. A., and Perea-Ortega J. M., "Oca: Opinion Corpus for Arabic", *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 62: 2045-2054, (2011)
- [34] Biadsy F., Hirschberg J., and Habash N. "Spoken Arabic Dialect Identification Using Phonotactic Modeling", *In: Proceedings of the Proceedings of the eacl 2009 workshop on computational approaches to semitic languages*, Athens, Greece, 53-61, (2009).
- [35] Itani M., Roast C., and Al-Khayatt S. "Corpora for Sentiment Analysis of Arabic Text in Social Media", *In: Proceedings of the 2017 8th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*, Irbid, Jordan, 64-69, (2017).
- [36] Al-Rubaiee H., Qiu R., and Li D. "Identifying Mubasher Software Products through Sentiment Analysis of Arabic Tweets", *In: Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems (CIICS)*, Sharjah, United Arab Emirates, 1-6, (2016).
- [37] Hathlian N. F. B. and Hafezs A. M. "Sentiment-Subjective Analysis Framework for Arabic Social Media Posts", *In: Proceedings of the Saudi International Conference on Information Technology (Big Data Analysis) (KACSTIT)*, Riyadh, Saudi Arabia, 1-6, (2016).
- [38] Sghaier M. A. and Zrigui M. "Sentiment Analysis for Arabic E-Commerce Websites", *In: Proceedings of the International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, Agadir, Morocco, 1-7, (2016).
- [39] Shoukry A. and Rafea A. "A Hybrid Approach for Sentiment Classification of Egyptian Dialect Tweets", *In: Proceedings of the 2015 First International Conference on Arabic Computational Linguistics (ACLing)*, Cairo, Egypt, 78-85, (2015).
- [40] Ibrahim H. S., Abdou S. M., and Gheith M. "Mika: A Tagged Corpus for Modern Standard Arabic and Colloquial Sentiment Analysis", *In: Proceedings of the 2015 IEEE 2nd International Conference on Recent*

- Trends in Information Systems (ReTIS)*, , Kolkata, India, 353-358, (2015).
- [41] Abdulla N. A., Ahmed N. A., Shehab M. A., and Al-Ayyoub M. "Arabic Sentiment Analysis: Lexicon-Based and Corpus-Based", *In: Proceedings of the 2013 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*, Amman, Jordan, 1-6, (2013).
- [42] Shoukry A. and Rafea A. "Sentence-Level Arabic Sentiment Analysis", *In: Proceedings of the 2012 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, Denver, CO, USA, 546-550, (2012).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Çelik elemanlar ile güçlendirilen tuğla duvarların kayma davranışının araştırılması

Research on the shear behavior of masonry walls strengthened with steel members

Yazar(lar) (Author(s)): Yağmur KOPRAMAN¹, Rüçhan Emir ÖZMEN², Anıl ÖZDEMİR³, Ali ÖZGEDİK⁴

ORCID¹: 0000-0001-9552-3039

ORCID²: 0000-0002-0086-5616

ORCID³: 0000-0001-6563-5144

ORCID⁴: 0000-0003-4964-4264

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kopraman Y., Özmen R. E., Özdemir A. ve Özgedik A., “Çelik elemanlar ile güçlendirilen tuğla duvarların kayma davranışının araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 471-476, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389634

Çelik Elemanlar ile Güçlendirilen Tuğla Duvarların Kayma Davranışının Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Yağmur KOPRAMAN^{1*}, Rüçhan Emir ÖZMEN¹, Anıl ÖZDEMİR¹, Ali ÖZGEDİK²

¹Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 27.10.2017 ; Kabul/Accepted : 29.10.2017)

ÖZ

Betonarme taşıyıcı elemanların bulunmadığı yapılarda tuğla duvarlar, statik yükler altında düşey taşıyıcı olarak yeterli dayanım sağlayabilmektedir. Ancak deprem, patlama veya çarpma yükleri altında, tuğla duvarlar yetersiz yatay dayanım ve rijitlik sergiledikleri için hasar görme olasılıkları oldukça yüksektir. Ekonomik olması, kolay inşa edilmesi ve doğal malzemelerin kullanımı gibi avantajları bulunan duvarlara yeterli yatay dayanım kazandırılması amacı ile mantolama, katman ekleme vb. birçok yöntem üzerinde uzun zamandan bugüne dek deneysel olarak çalışılmıştır. Ancak bu yöntemler etkin oldukları oranda, uzun bir yapım süresi gerektirmesi, yapıda işlev kayıplarına yok açması ve mimari estetiğin bozulması gibi nedenlerden dolayı yeni bir tekniğin geliştirilmesi oldukça yararlıdır. Yapılan çalışmada, çelik şerit ve/veya levha kullanılarak tuğla duvarların kolay temin edilebilir malzeme ile hızlı bir biçimde güçlendirilmesi sağlanmıştır. Çalışma kapsamında, boşluklu yığma tuğla (BT) kullanılarak üretilen toplam 4 adet duvardan 3'ü simetrik biçimde 3 farklı (A, B ve C Tipi) çelik eleman deseni kullanılarak güçlendirilmiştir. Deneyler sonucunda; elemanların güçlendirme yöntemleri arasındaki kayma dayanımı performansı, deformasyon ve enerji sönmüleme kapasitesi karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tuğla duvar, kesme dayanımı, güçlendirme, çelik eleman.

Research On The Shear Behaviour Of Masonry Walls Strengthened With Steel Members

ABSTRACT

Masonry brick wall may provide adequate gravitational strength under static load as vertical load carrying member even if the building has no reinforced concrete structural elements. However, in case of earthquake, explosion or under impact loads because of their insufficient lateral strength and rigidity the brick walls are vulnerable to damage. Such advantages as low cost, easy to build and use of natural materials of the masonry wall, many methods such as jacketing and adding of layers etc. have been studied experimentally for many years in order to improve lateral resistance of masonry walls. These methods are effective however they, require a long construction period, may cause loss of architectural functionality and deteriorate structural aesthetics. Therefore the development of a new technique is quite useful. In this study, masonry walls are strengthened with steel strips or steel plates which is cheap to provide and easy to obtain. Presented experimental study covers the results of 4 walls built with hollow clay masonry unit (BT), of which 3 of them were strengthened symmetrically using three different (A, B and C) steel member schemes. The results of the experiments were discussed with regard to shear strength improvement, deformation and energy dissipation capacity and the performance of the strengthening schemes.

Keywords: Masonry wall, shear strength, strengthening, steel membe

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tuğla dolgulu çerçevelerin güçlendirilmesi oldukça güncel bir araştırma konusudur. 2007 yılında günümüzdeki şeklini alan Türk Deprem Yönetmeliği (TDY) [1] tuğla dolgulu çerçeveler için güçlendirilme yöntemlerini önermekte ve hesaplama ve uygulamaya yönelik bilgiler sunmaktadır. Çerçeve taşıyıcı sistemlerin aksine, taşıyıcı sistemi yığma olan binalarda tuğla duvarlar, düşey yüklere karşı belirli bir dayanım sağlaması üzere yapıya destek veren taşıyıcılardır. Bu tür yapıların yatay yönde etkiyen sismik kuvvetlere karşı performansı, yığma taşıyıcı sistemin ağır olması ve

eksenel yüklere göre tasarlanan taşıyıcı duvarların kayma davranışının vasat olması nedeniyle oldukça düşüktür. Yığma taşıyıcı sisteme sahip binalar, yüksek deprem riski içeren bölgelerde artık üretilmeseler bile ülkemiz yapı stokunun yaklaşık olarak halen %60'ının yığma taşıyıcı sisteme sahip binalardan oluştuğu bilinmektedir. Ayrıca, ülkemiz yapı stokunun %60'ında tuğla malzemesinin kullanıldığı da 2000 yılı bina sayımında [2] tespit edilen bir gerçektir. Taşıyıcı sistemine bakılmaksızın deprem riski bakımından can kayıplarının engellenebilmesi için tuğla malzemesi ile üretilen duvarların yatay yükler karşısındaki dayanımlarının artırılması, yapıların yatay yükler karşısındaki performansının iyileştirilmesi gerekmektedir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : yağmur@gazi.edu.tr

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Deneysel Elemanlar ve Malzemeler (Test Specimens and Materials)

Tuğla duvar, birden çok tuğla biriminin bağlayıcı ile birleştirilmesi sayesinde imal edilir. Ancak bir bütün gibi görünen duvarlar, taşıyıcılık adına sürekli ortama sahip değildir. Yükler altındaki davranışlarının sayısal yöntemler ile ortaya konulması oldukça güçtür. Bu nedenle bu yapıların yükler altındaki davranışlarının deneysel yöntemler ile ortaya konulması daha uygun yöntemdir. Bununla birlikte mevcut çalışmada incelenen kompozit duvarların davranışı daha da karmaşıktır. Çalışmanın amacı, yeterli yatay rijitliğe ve kesme güvenliğine sahip olmayan boşluklu tuğla (BT) ile imal edilmiş duvarlar için hızlı uygulanabilen ve etkili bir güçlendirme tekniğinin geliştirilmesidir. Deneysel elemanları ülkemizde pratik uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan malzeme ve standart işçilik kalitesi ile üretilmiştir.

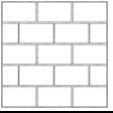

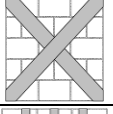

Deneysel çalışma kapsamında 1 adedi referans olmak üzere toplam 4 deneysel elemanı test edilmiştir. Deneysel çalışmada, tuğla duvar üzerine yapıştırılan çelik şerit veya levhalar ile tuğla duvarların kesme kapasitesinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, deneysel elemanı üzerine 3 farklı desen sahip çelik eleman, test duvarının ön ve arka yüzlerine simetrik olarak yapıştırılmıştır. Deneysel elemanı güçlendirmek üzere uygulanan ilk desen yüzeyin tümünü kaplayan çelik levhadır. İkinci desen, 4 adet şerit ile oluşturulan X desendir. X desenini oluşturan şeritlerin boyutları, Smith ve Carter [3]

tarafından çalışmada bahsedilen duvar eşdeğer diyagonalini kapsayacak biçimde seçilmiştir. Smith ve Carter'ın çalışmada verilen (1) denklemi yardımı ile mevcut duvar elemanların etkin diyagonal genişliği 110 mm olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu bölgeyi tümüyle kapsaması amacıyla duvar üzerine diyagonal doğrultuda 120 mm genişliğinde şerit yapıştırılmıştır. Böylece, çelik malzemeden %59 oranında tasarruf sağlanmıştır.

$$\lambda h = h \times \sqrt[4]{\frac{E_{\text{dolgu}} \times t}{4 \times E_{\text{kolon}} \times I_{\text{kolon}} \times h'}} \times \sin(2\theta) \quad (1)$$

Eş. 1'de sunulan λh , duvarın etkin diyagonalinin çaprazının genişliği olarak adlandırılmaktadır. Seçilen 3. desen ise, bir önceki X deseni ile özdeş olarak duvar yüzey alanının %41'ini kaplamaktadır. Fakat güçlendirme yüzey alanına eşit olarak dağıtılmış düşey ve yatay ince şeritlerle oluşturulmuştur. Toplamda 60 mm genişliğinde 12 adet şerit kullanılmıştır. Deneysel çalışma kapsamındaki deneysel elemanlarının isimlendirme ve güçlendirme biçimi Çizelge 1'de sunulmuştur. Deneysel sonuçlarında elde edilen çıktılar kullanılarak, önerilen güçlendirme tekniğinin deneysel elemanlarının genel davranışı, dayanımı ve rijitliğine etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda, ülkemiz ve uluslararası literatürde bir eksik kapatılacağı gibi, diğer yandan önerilen teknik kullanılarak güçlendirilecek duvarlar gerçek binaların tasarım ilkeleri hakkında bilgi eksikliğinin kapatılacağı düşünülmektedir.

Çizelge 1. Deneysel çalışma kapsamında üretilen ve adlandırılan deneysel elemanları ve güçlendirme biçimleri (Identification and schematic presentation of test specimens included in the experimental study)

<u>Malzeme</u>	<u>Deneysel Eleman Tanımı</u>	<u>Güçlendirme Biçimi</u>	
		<i>Açıklama</i>	<i>Resim</i>
Boşluklu tuğla (BT)	Referans (BT-REF)	<i>Güçlendirilmemiş duvar elemanı</i>	
	A.Tipi Güçlendirme (BT-A)	<i>Tüm yüzeyi çelik levha ile kaplanmış duvar elemanı</i>	
	B.Tipi Güçlendirme (BT-B)	<i>Çapraz doğrultuda çelik şerit ile güçlendirilen deneysel elemanı</i>	
	C.Tipi Güçlendirme (BT-C)	<i>Düşey ve yatay çelik şeritlerle güçlendirilen duvar elemanı</i>	

Deneysel çalışmada kullanılan boşluklu tuğlanın ortalama boyutları 135x190x290 mm'dir. Boşluklu tuğlanın dış ve iç duvarlarındaki et kalınlığı 7 mm olarak ölçülmüştür. Ancak, doğal bir malzeme kullanılarak üretilen boşluklu tuğlanın kurutulması esnasında

meydana gelen engellenemeyen değişikliklerden dolayı, laboratuvar envanterinde üretim amacıyla satın alınan tuğlaların boyutlarında ± 5 mm fark oluşabileceği tespit edilmiştir. Bu farkın hesaplamalarda ihmal edilebileceği ve ortalama değerlerin kullanılabilceği ön

görülmektedir. Elde edilen boyular ışığında envanterdeki tuğlanın boşluk oranı, yaklaşık olarak %60'dır. Boşluklu tuğlanın basınç dayanımı ASTM E447'de [5] önerilen standart test prosedürü uygulanarak, 2,84 MPa olarak hesaplanmıştır. Üretilen deney elemanları tek seferde, aynı üreticiden temin edilen tuğla birimi kullanılarak üretilmiştir. Tuğla birimleri ile örülen duvar elemanlarında bağlayıcı harç olarak, ASTM C270'de [3] normal harç (N tipi) olarak tanımlanan duvar harcı kullanılmıştır. Harç karışımında hacim olarak çimento, kireç, kum ve su oranı sırasıyla 1:1:6:1,5'tir. İmal edilen tüm duvar harçlarından, 3 adet 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde standart silindirik numuneler alınmış ve 28 günlük kür ardından beton numuneler aksel basınç

altında test edilmiştir. Yapılan malzeme testi sonucunda, üretimlerin tümünün ortalama basınç dayanımı yaklaşık olarak 5,2 MPa olarak hesaplanmıştır. Güçlendirilen deney elemanları, akma ve kopma dayanımı sırasıyla 230 ve 504 MPa olan 2 mm kalınlığındaki St-37 kalitesinde çelik şerit veya levhanın üç farklı biçimde duvar yüzeyine epoksi reçine ile yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Kullanılan yapıştırıcı, üretici firma kullanım kılavuzundaki karışım oranına ve hazırlama adımlarına uygun olarak deney elemanlarına uygulanmıştır [6]. Harcın tam dayanımına ulaşması için 10 gün beklenmiştir. Çizelge 2' de iki bileşenli epoksi reçinesinin üretici kataloğundan alınan dayanım özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 2. Çelik elemanların deney elemanına yapıştıran epoksi reçinenin mekanik özellikleri (Mechanical properties of epoxy resin adhesive used for bonding steel members to test specimens)

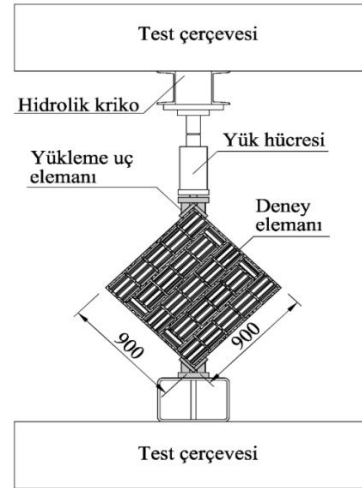
Mekanik Özellik	Dayanım* (MPa)
Eksenel basınç	65
Doğrudan çekme	20
Betona yapışma	3,5
Çeliğe yapışma	15

* Dayanım değerleri doğrudan üretici kataloğundan [6] alınmıştır. Kataloğa göre 10 gün sonunda yaklaşık olarak ulaşılabilen değerleri göstermektedir.

2.2. Test ve Ölçüm Düzenegi (Test and Measurement Setup)

Basit çizimi ve test öncesi görünümü, Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiş olan test çerçevesi içerisinde, deney elemanları monotonik aksel basınç kuvveti altında test edilmişlerdir. Deney numuneleri, ASTM E591 [7] standart deney prosedürü gereği, çerçeve içine 45 derece eğik olarak yerleştirilmiştir. Böylece yüklü diyagonale dik doğrultuda meydana gelen çekme gerilmesi altında deney elemanının çekmedeki göçme kapasitesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yükleme, 750 kN aksel yük kapasiteli çerçeve içerisinde, çift etkili hidrolik kriko ve el ile kumanda edilen hidrolik pompa ile uygulanmıştır.

Deney elemanına yükün köşe noktada etki ettirilmesi ve yükün uygulandığı uç noktalarda bölgesel ezilme gerçekleşmemesi için, detayları ASTM E591'de verilen yükleme uç elemanı kullanılmıştır. Yükleme uç elemanı ile uygulanan aksel basınç yükünün ölçüm bölgesi dışında ezilme oluşturmadan deney elemanlarını dolaylı olarak çekme göçmesi ile kırması sağlanmıştır. Yükleme yük kontrollü olarak yapılmış olup, yükleme hızının tüm testlerde özdeş olması sağlanmıştır. Elemanın taşıma gücüne ulaşır kırılmanın gerçekleşmesi ile yüklemeye son verilmiştir.



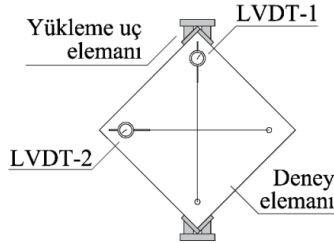
Not : Ölçüler mm cinsindedir.

Şekil 1. Yükleme düzenegine ait basit çizim (Schematic presentation of load setup)

Deney elemanı üzerinden, Şekil 3'de gösterildiği gibi, eş zamanlı olarak çapraz doğrultularda iki adet deformasyon ölçümü ve aksel yük ölçümü alınmıştır. Ani kırılma olacağı bilindiğinden, 1 saniyede de 8 adet okuma yapılarak, kırılma anında ölçüm alınması sağlanmıştır.



Şekil 2. Test öncesi BT-REF elemanı ve test çerçevesine ait görünüm (Photo of specimen BT-REF and actual loading frame)



Şekil 3. Test elemanı üzerinde deplasman ölçerlerin yerleştirilişi (Orientation of displacement transducers on the test specimen)

Deplasman ve yük ölçümlerindeki ölçüm kapasitesi ve hassasiyeti sırasıyla $50 \text{ mm} \pm 1 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ve $1000 \text{ kN} \pm 5 \times 10^{-1} \text{ kN}$ 'dur. Deney süresince alınan sayısal ölçümler, deney sonrasında bilgisayar ortamına aktarılarak, deney elemanlarının deneysel parametre değişimine karşı gösterdiği davranış yorumlanmıştır.

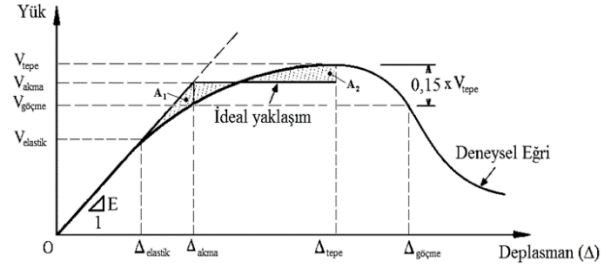
3. DENEY SONUÇLARI (TEST RESULTS)

Tuğla duvarlar malzeme doğası gereği sünek değildir. Bu nedenle, basınç veya çekme esnasında belirgin bir elastik davranış limiti gözlenmek mümkün olamamaktadır. Deney elemanlarının enerji tüketim kapasitesini ve kırılma yükünü yük-deplasman eğrisi üzerinden yorumlayabilmek için deney sonuçları kullanılarak Şekil 4' te gösterildiği gibi idealize edilmiş bir deneysel yük-deplasman grafikleri oluşturulmuştur. İdealize grafikte eleman davranışı bakımından önemli olan akma noktası, tepe noktası ve göçme noktası olmak üzere üç yük seviyesi tanımlanmıştır. Deney numunesinin ulaşabildiği en yüksek kapasite V_{tepe} , ulaşılan bu kapasiteden %15'lik yük kaybını meydana geldiği ve artık deney elemanının yük taşıyamaz hale geldiği ve elemanın göçtüğü kabul edilen noktada $V_{göçme}$ kapasitesi tanımlanmıştır. Deney elemanında elastik sınır Maheri [8] tarafından tanımlandığı şekilde

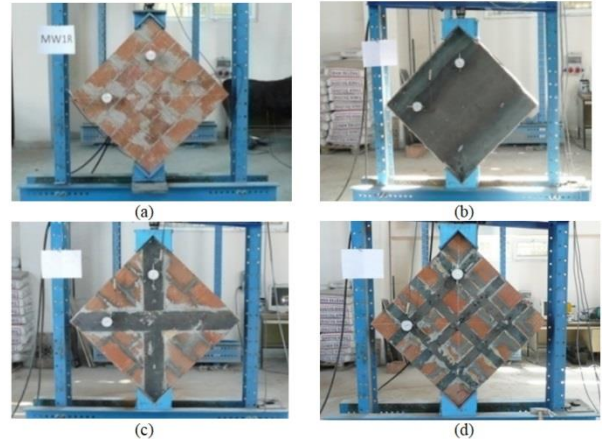
benimsenmiştir. Deney elemanlarının deneyler öncesi fotoğrafları Şekil 5'de gösterilmiştir.

3.1. Yük-Deplasman Davranışı (Load-Displacement Behavior)

Şekil 6'da deney elemanlarının yük deplasman grafikleri verilmiştir. Çizelge 3'de ise grafiklere esas teşkil eden sayısal sonuçlara yer verilmiştir.

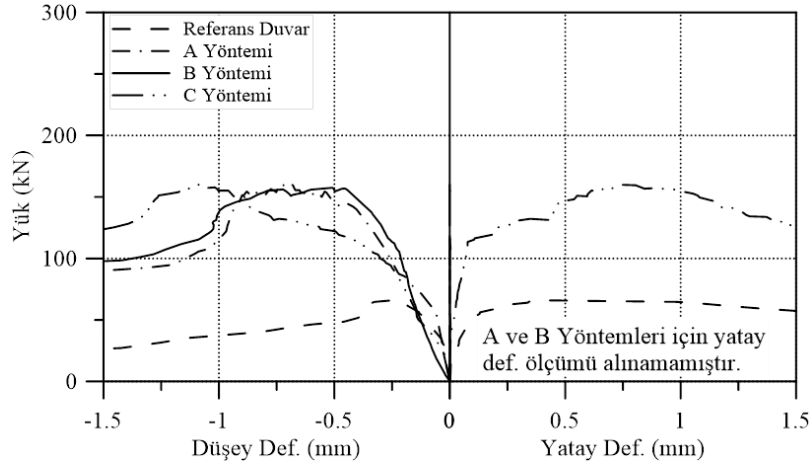


Şekil 4. İdeal yük-deplasman eğrisi (Idealized load-displacement curve)



Şekil 5. (a) BT-REF ve (b) BT-A, (c) BT-B, (d) BT-C güçlendirilmiş boşluklu yığma tuğla elemanlarının test görünümü (Photo of specimens during test)

Bu grafik ve çizelgenin birlikte yorumlanması ile görülebileceği gibi, boşluklu tuğla referans elemanı 66 kN diyagonal yük taşımıştır. Güçlendirilen deney numunelerinin üçünde de taşıma gücü seviyeleri birbirine yakın gerçekleşmiştir. En başarılı yük taşıma kapasitesi sergileyen deney elemanı 162 kN ile BT-A olmuştur. Güçlendirilmiş yöntemi ile sağlanan ortalama taşıma gücü kazanımı yaklaşık olarak %142'dir. B ve C desenleri ile sağlanan %59'luk çelik eleman tasarrufuna karşın, taşıma gücü seviyesinde %2,2'lik bir kayıp oluşmuştur. Yüzey alanları eşit olan B ve C desenlerinin taşıma gücü seviyeleri arasında %1,9 fark gözlenmiştir. Deney numunelerinde göçme, yapıştırılan çelik plakaların tuğlalardan parça koparması suretiyle gerçekleşmiştir. B deseninde az bir alanda sık güçlendirme yapıldığı için bu durum diğerlerine oranla daha az gözlenmiştir. Artan deplasman seviyelerinde çelik elemanlar burkulmaya başlamıştır. Duvarlar deney sonuna kadar bütünlüklerini korumuşlardır.



Şekil 6. Boşluklu yığma tuğla ile imal edilen deney elemanlarına ait yük-deplasman grafiği (Load-displacement curves of hollow clay tile wall specimens)

Çizelge 3. Deney elemanlarının idealize grafiklerindeki karakteristik noktalar (Characteristic points on the idealized load-displacement curves)

Deney Elemanı	Deplasman Doğrultusu	Akma Noktası		Tepe Noktası		Göçme Noktası	
		Deplasman (mm)	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Yük (kN)
BT-REF	Düşey	-0,10	61	-0,25	66	-0,38	56
	Yatay	0,10		0,43		1,64	
BT-A	Düşey	-0,15	133	-0,73	162	-0,94	137
	Yatay	*		*		*	
BT-B	Düşey	-0,38	154	-0,51	157	-1,01	134
	Yatay	*		*		*	
BT-C	Düşey	-0,27	132	-1,09	160	-1,32	136
	Yatay	0,08		0,74		1,28	

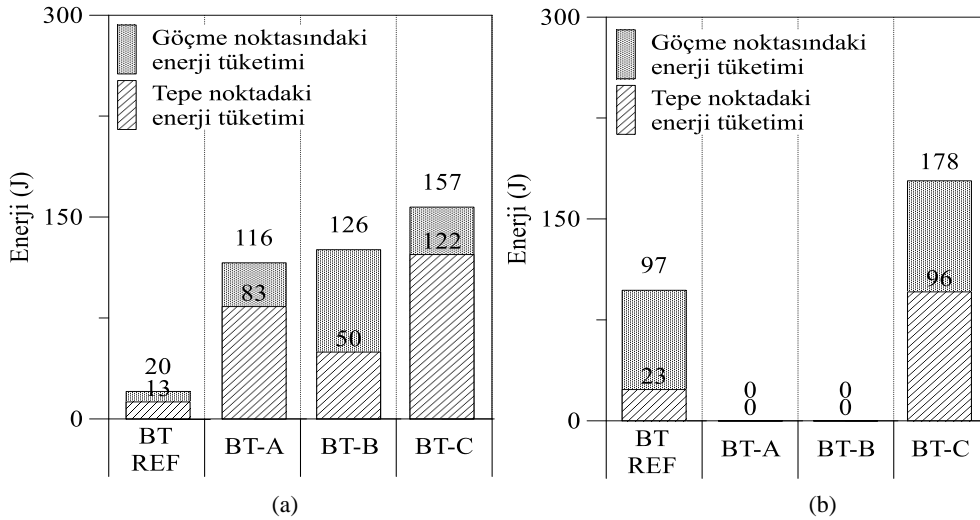
3.2. Enerji Kapasitesi Davranışı (Energy Dissipation Behavior)

Test edilen BT-A ve BT-B deney elemanlarında ölçüm bölgesinin diyagonal şerit içinde kalmasından dolayı yatayda ölçüm alınamamıştır. Bu nedenle bu bölümde sadece düşey yöndeki deplasman ölçümleri üzerinden yorumlar yapılmıştır. Şekil 7’de deney elemanlarının enerji tüketimini gösteren grafikler sunulmuştur. Çizelge

4’de ise grafiklere esas teşkil eden sayısal sonuçlara yer verilmiştir. Enerji tüketimi bakımından dikkat çekici ilk önemli sonuç, deney elemanlarının tepe ve göçme noktasına kadar tükettikleri enerjilerin kıyaslanmasıdır. Çizelge 4’den görülebileceği gibi, referans elemanla karşılaştırıldığında boşluklu yığma tuğla ile imal edilen duvarlarda tepe noktasında tüketilen enerji ortalama %576; göçme noktasında tüketilen enerji ortalama %552 düzeyinde gerçekleşmiştir.

Çizelge 4. Deney elemanlarının enerji tüketim değerleri (Energy dissipation of test specimens)

Deney Elemanı	Deplasman Doğrultusu	Tepe Noktasında Tüketilen Enerji (J)	Göçme Noktasında Tüketilen Enerji (J)
BT-REF	Düşey	12,6	20,4
	Yatay	23,2	97,0
BT-A	Düşey	83,5	116,0
	Yatay	---	---
BT-B	Düşey	49,7	125,8
	Yatay	---	---
BT-C	Düşey	122,2	157,4
	Yatay	95,8	178,4



Şekil 7. Deneysel elemanlarına ait (a) düşey, (b) yatay enerji tüketimlerine ait grafik gösterim (Graphical presentation of energy dissipation along (a) vertical (b) directions of test specimens)

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Deneysel çalışma kapsamında üretilen ve test edilen 4 adet deneysel elemandan elde edilen sonuçlar bu bölümde toplanmış ve özetlenmiştir. Deneysel sonuçları ışığında aşağıdaki yargılara varılmıştır.

- 1) Önerilen güçlendirme yöntemi, kullanılan yapı malzemesi ile üretilen duvarlar üzerinde başarılı olmuştur. Deneysel olarak amaçlanan kayma taşıma gücünde artış ve enerji tüketiminde iyileşme önerilen güçlendirme yöntemi ile sağlanmıştır.
- 2) Duvarların ayrıca kırılma sonrasındaki hasar düzeyleri önerilen güçlendirme biçimi ile kontrol altına alınmıştır. Duvar elemanları gelişen kesme çatlağı ile top yekün göçmeden deney sonunda tek parça kalabilmiştir. Yöntemin uygulanması ile duvarın parçasal veya toptan göçmesi engellenmiş, böylece taşıyıcı olmayan elemanlardan dolayı yapılarda görülebilen yaşamsal risk de, önerilen güçlendirme yöntemi ile ortadan kaldırılmıştır.
- 3) Önerilen güçlendirme yönteminde, denenen 3 farklı tipteki desenler arasında pratikte %2'lik bir taşıma gücü farkı olabileceği, ancak gerek işçilik ve üretim maliyeti gerekse de inşaat hızında edinilen kazanımlar dikkate alındığında en uygulanabilir yöntemin B veya C olabileceği kanısına varılmıştır.
- 4) Yapışma performansı, önerilen güçlendirme yönteminde oldukça önemlidir. Yazarlar, deneyler sırasında, yapıştırıcının yüzey gözenekliliği daha düşük olan tuğla üzerinde daha etkili olduklarını gözlemiştir. Bu noktadan hareketle, gözenekli olmayan malzemeler ile yapılan uygulamalarda daha olumlu sonuçlar elde edilmesi mümkün görünmektedir.
- 5) Ayrıca, yüzeyi gevşek ve tozlu olan eski duvarlarda bu yöntemin uygulanması sırasında henüz daha araştırılmayan etkiler olabileceğinden, bu tip duvarlarda yapıştırma ile birlikte mutlaka yüzey

iyileştirme metotları veya mekanik ankrajlar gibi önlemler birlikte düşünülmelidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu deneysel çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 07/2012-24 nolu proje altında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, "Türk Deprem Yönetmeliği", Ankara, (2007).
- [2] T.C. Başbakanlık Devlet İstatistik Enstitüsü, "Bina Sayımı", Ankara, (2000).
- [3] American Society for Testing and Materials, "ASTM C270 - Standard Specification for Mortar for Unit Masonry", (2012).
- [4] Smith, B., S., Carter, C. "A Method of Analysis for Infilled Frames", *Proc. ICE*, 44: 31-48, (1969).
- [5] American Society for Testing and Materials, "ASTM E447 - Test Methods for Compressive Strength of Laboratory Constructed Masonry Prisms", (1998).
- [6] Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., "Epoksi Esaslı Harçlar - Sikadur 31" <http://tur.sika.com/dms/getredirect.get/tr01.webdms.sika.com/143>, (2013).
- [7] American Society for Testing and Materials, "ASTM E591 - Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages", (1981).
- [8] Maheri M. R. and Hadjipour A., "Experimental investigation and design of steel brace connection to RC frame", *Engineering Structures*, 25(13): 1707-14, (2003).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Yerleşik ve gömülü uygulamalarda kontrol işlemleri ve PC’de yazı yazmak için kullanabilen düşük maliyetli genel amaçlı bir konuşma tanılama sistemi

A low cost general purpose speech recognition system used to control processes in the embedded and stationary system and write texts on the PC

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa BURUNKAYA¹, Melek DİJLE²

ORCID¹: 0000-0002-3971-0590

ORCID²: 0000-0002-0900-7968

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Burunkaya M. ve Dijle M., “Yerleşik ve gömülü uygulamalarda kontrol işlemleri ve pc’de yazı yazmak için kullanabilen düşük maliyetli genel amaçlı bir konuşma tanılama sistemi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 477-488, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389641

Yerleşik ve Gömülü Uygulamalarda Kontrol İşlemleri ve PC’de Yazı Yazmak İçin Kullanabilen Düşük Maliyetli Genel Amaçlı Bir Konuşma Tanılama Sistemi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mustafa BURUNKAYA^{1*}, Melek DİJLE²

¹Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Düzce Borsa İstanbul Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Merkez Düzce, Türkiye

(Geliş/Received : 11.12.2016 ; Kabul/Accepted : 04.01.2017)

ÖZ

Bu çalışmada yeni bir düşük maliyetli, mikrodenetleyici kullanılan, konuşmacı bağımlı ses tanıma sistemi tasarlanarak yüksek doğrulukla konuşma tanımayı etkileyen parametreler araştırılmış ve genel amaçlı olarak kullanılacak bir sesli kontrol sistemi elde edilmiştir. Gerçekleştirilen sistemde konuşma ile yazı yazabilmek için veriler bir bilgisayara (PC) aktarılmıştır. Bu amaçlarla sistem engelli insanlar veya sağlıklı insanlar tarafından kullanılabilir. Konuşma tanımlama devresi kullanılarak, alfabeyle ait harfler ve kontrol işlemleri için önceden seçilen bazı kelimeler eğitilebilen sisteme kayıt edilmiştir. Sistemde mikrofon tarafından algılanan sesler karşılığı olan sayısal sinyallere çevrilir. Tanınan seslere ait veriler birer mikrodenetleyici kullanılarak karşılaştırıldıktan sonra, RS232 ve PS/2 iletişimi kullanılarak PC’ye aktarılır. Sistemin esnek yapısı ve gerektiğinde PC den bağımsız olarak da kullanılabilmesi kullanışlılığı artırmaktadır. Sistem gürültüsüz ortamda ve farklı gürültü seviyelerinde, harfler, eşsesli ve eşsesli olmayan kelimeler ile test edilmiştir. Elde edilen veriler SPSS paket programı kullanılarak istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Deneyler sırasında gürültü ölçümleri için Rion NL-21 cihazı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Konuşmacı bağımlı, yazı yazma, RS232, PS/2, kontrol.

A Low Cost General Purpose Speech Recognition System Used to Control Processes in The Embedded and Stationary System and Write Texts on The PC

ABSTRACT

In this study, a low cost, microcontroller based speaker dependent speech recognition system was designed and parameters affecting speech recognition with high accuracy were investigated and a speech control system which can be used as a general purpose was obtained. In the realized system, the relevant data is transferred to a computer (PC) in order to write text. For these purposes, the system can be used by people with disabilities or healthy people. Using the speech recognition circuit, the letters of the alphabet and some selected words for control operations are recorded in advance in this system which can be trained. Speech voices detected by the microphone in the system are converted into digital signals corresponding to them. Once the data for the recognized voices are compared using a microcontroller, they are transferred to the PC using RS232 and PS2 communication protocol. The flexible structure of the system and the ability to be used stand-alone without PC when necessary also improves its usability. The system has been tested in noiseless environment and with different noise levels, with letters, homophones and non-homophones words. The obtained data were analyzed statistically by using SPSS package program. During the experiments, Rion NL-21 instrument was used for noise measurements.

Keywords: Speaker dependent, texting letter, RS232, PS/2, control

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomatik konuşma tanıma, bir bilgisayarın bir akustik konuşma sinyalini metne eşleştirmesi işlemi olarak tanımlanabilir [1]. Ses tanıyıcı sistemler 1960’lı yılların başlarında ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu konuda IBM firması, “Shoebbox” adı verilen öncü ses tanıma sistemlerini geliştirmiştir. 16 kelimeyi tanıyabilen bu sistemde

elektromekanik devre elemanlarına yer verilmiştir [2]. Başlangıçta düşük performanslı sayılabilecek olan bu gibi çalışmalar zamanla hızla gelişmişlerdir. Günümüzde de bu gelişimleri devam etmekte olup, uygulama alanları da gittikçe yaygınlaşmaktadır.

Ses tanıma sistemleri sağlık, askeri, otomasyon, robotik, iletişim, eğlence, biyometrik uygulamalar, müzik vb. çok çeşitli alanlarda ve amaçlarla kullanılabilir. Bu sistemler felçli, görme ve zihinsel engelli, konuşma sorunları olan vb. insanların iletişimleri, tedavi ve terapileri için veya

*Mustafa Burunkaya (Corresponding Author)
e-posta : bmustafa@gazi.edu.tr

ihtiyaç duydukları çeşitli cihazları kontrol edebilmelerine olanak sağlamak için de kullanılabilir [3-15].

Bu amaçlar için kullanılacak yüksek performans gerektiren sistemlerde ses tanıma işlemleri daha çok bir PC ve bu amaçla geliştirilen yazılımlar yolu ile yapılmaktadır. Bu sistemlerde PC uyumlu ses kartları gerekli olup, yazılımlar işletim sisteminin arkasında sürekli olarak çalışmaktadır. Bu tür sistemlerde tanılama işlemleri için karmaşıklık, maliyet, PC gereksinimi, sürekli çalışan yazılımlar vb. bazı önemli olabilen dezavantajlar olarak değerlendirilebilir [16,17].

Bu tür yazılımların geliştirilmesi açısından konuşma tanıma tipleri, konuşmacı bağımlı ve konuşmacı bağımsız yazılımlar olmak üzere gruplandırılabilir. Konuşmacı bağımlı yazılımlar genellikle yazılı hale getirilmek üzere sözcükleri yüksek sesle söyleme işlemleri (dictation) için kullanılmaktadır. Konuşmacıya bağımlı yazılım, ses tanıma benzer şekilde, bilgisayarda tek bir kişinin sesinin benzersiz özelliklerini öğrenerek çalışır. Yeni kullanıcılar için, önce yazılımla konuşularak eğitilmeleri gereklidir. Geliştirilmesi kolay, ucuz ve daha doğru tanıma yapabilir [18]. Fakat bunlar konuşmacı uyumlu (adaptif) olarak da sınıflandırılabilen sistemler veya bağımsız sistemler kadar esnek değildir.

Konuşmacı bağımsız sistemler ise kişiye bağlı olmadığından eğitilmesi gerekli değildir. Daha çok telefon uygulamalarında vb. kullanılmaktadır. Esnek olmalarına karşın, pahalı ve doğruluğu konuşmacıya bağımlı sistemlerden daha düşüktür [1,18].

Bazı çalışmalarda, konuşmacı bağımsız sistemlerde konuşma motoruna hangi seslerin matematiksel olarak benzediğini hesaplayan bir veri tabanı kullanılmaktadır [18]. Konuşmacı uyumlu sistemler ise operasyonlarını yeni konuşmacıların özelliklerine uyarlamayabilmektedirler [1].

Konuşma tanıma sisteminin kelime dağarcığı, karmaşıklığı vb. işleme gereksinimlerini ve sistemin doğruluğunu etkiler. Bazı uygulamalarda yalnızca birkaç kelimenin tanınması yeterli olabilirken, örneğin dikte makineleri gibi bazıları çok daha fazlasını gerektirebilir. Kelime tanıma sayısına göre konuşma tanıyıcılar şu şekilde gruplandırılabilir:

- Küçük kelime - onlarca kelime
- Orta kelime - yüzlerce kelime
- Büyük kelime - binlerce kelime
- Çok büyük kelime - on binlerce kelime.

Konuşma tanıma sistemleri kelimeler arasındaki boşluk açısından izole edilmiş ve sürekli konuşma sistemi olarak da gruplandırılabilir.

İzoleli sistemde kelimeler arasında duraklamalar olup, ayrı ayrı söylenen kelimeler tanınabilir. Bu sistemde bir sözcüğün telaffuzu diğerlerini etkilememe eğiliminde olduğundan, sözcüklerin ortaya çıkışı daha tutarlı olup, tanınması daha kolaydır. Sürekli konuşma sistemi, sözcükler arasında duraklarla ayrılmayan konuşmaların tanınmasında kullanılır. Bu sistemin, konuşmadaki çeşitli etkiler, ortak oluşum, her bir ses biriminin üretiminin

çevresindeki fonemlerden etkilenmesi, sözcüklerin başlangıç ve bitişi, önceki ve sonraki sözcüklerden, konuşma hızından etkilenmesi vb. sebeplerle tanıma doğruluğu düşüktür [1].

Bu çalışmada bütün bunlara göre yerleşik ve gömülü uygulamalarda daha ucuz ve doğru tanıma yapabileceği göz önüne alınarak konuşmacı bağımlı bir tanıma ve kontrol sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir [18]. Sistemin görme ve bazı ilaveler ile duyma, konuşma ve bazı diğer engellilerin yaşamlarını kolaylaştırabileceği düşünülmektedir. Bilindiği gibi görme engelliler Braille Alfabeti olarak adlandırılan kabartma noktalar ile karakterize edilen bir yazı kullanılmaktadırlar [19]. Bu durum bazı açılardan çözümler sunsa da, bu şekilde yazı yazmanın bazı zorlukları ve yazılmış yazının diğer insanların anlayabilmeleri yönünden kullanışlı olmadığı düşünülebilir. Konuşma ve ses tanıma yöntemleri kullanılarak bu tür bazı sorunların üstesinden gelinmesi mümkün olabilir [3,4,20]. Gerçekleştirilen sistem kullanılarak onlar için de PC ortamında yazı ve çeşitli metinlerin konuşma ile yazdırılması hem mümkün hem de daha kolay ve hızlı olabilir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen sistem bazı değişiklikler ile endüstri, biyomedikal sistemler, güvenlik, robotik, günlük hayattaki cihaz vb. alanlarda ses ile kontrol işlemleri için de kullanılabilir. Böylece insan rahatı ve konforunun artırabileceği, pratiklik sağlanabileceği ve verim artışı sağlanabileceği düşünülmektedir [6,20,21]. Sistem modüler ve yazılım yolu ile kontrol edilebilen esnek bir yapıya sahip olup, gerektiğinde tasarımcıların ihtiyacına göre farklı amaçlarla birçok uygulamalarda kullanılabilir.

Geliştirilen sistemde önceden hafıza birimine kaydedilen sesler kullanılarak, daha sonraki konuşmalar mikrofonla algılanarak tanınmakta ve bu sesin karşılığı olan sayısal elektrik sinyal elde edilmektedir. Elde edilen sinyaller bilgisayara farklı yöntemler ile gönderilebilir [22]. Bu çalışmada kullanımı en yaygın yöntemlerden olan RS232 ve PS/2 iletişimi yöntemleri kullanılarak veri iletişimi yapılmıştır. Bu çalışmada veri iletişimde her iki yöntemde de ayrı birer mikrodenetleyici (MCU: Microcontroller) kullanılmaktadır. RS232 metodunda önce bir RS232 dönüştürücüsü kullanılarak MCU ile PC arasındaki lojik voltaj seviyeleri uyumlu hale getirilmiştir. Görüntüleme işlemleri için PC' de geliştirilebilecek olan bir kullanıcı ara yüzü veya işletim sisteminde bulunan Hyper Terminal kullanılabilir. Ayrıca ilgili port, baudrate hızı, kaç bit gönderileceği, verilerin hangi pin ile gönderileceği ve alınacağı belirlenmelidir. PS/2 metodunda, MCU donanımı ve yazılımı ile veriler PS/2 girişinden gönderilmektedir. Mikrofon ile algılanan seslere ait veriler önceden açılan bir text dosyasına yazdırılabilir [22-25]. Bu çalışmanın devam eden kısımlarında önce Material ve metod verilmekte, akabinde gerçekleştirilen sistem açıklanmaktadır. Daha sonra sırası ile yapılan testler, ulaşılan sonuçlar ve kaynaklara yer verilmektedir.

2. MATERYAL METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Ses Tanılama (Speech Recognition)

Giriş bölümünde de ifade edildiği gibi, yüksek performanslı ses tanıma işlemleri çoğunlukla bir PC ve bu amaçla geliştirilen yazılımlar yolu ile yapılmaktadır. Bu sistemlerde ilave olarak PC uyumlu ses kartları da gerekli olabilmekte ve yazılımlar işletim sisteminin arkasında sürekli çalışmaktadır. Bu tür sistemlerde minyatürizasyon, ağırlık, maliyet ve tanılama işlemleri için ise karmaşıklık vb. durumları göz önüne alındığında PC gereksinimi ve sürekli çalışan yazılımlar bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir [16,17].

Taşınabilir ve gömülü uygulamalarda düşük maliyet, doğru tanıma vb. tür sorunlara çözüm getirebilmek için konuşmacı bağımlı tanıma işlemi gerçekleştirebilen sistemler, yazılımlar ve donanımsal ve yazılımsal çözümler sunan ses sentezleyici entegre (IC: Integrated Circuit) devreler vb. çalışmaları yapılmaktadır. Şekil 1' de verilen HM2007 ses sentezleyici IC kullanılarak geliştirilecek devreler ile 0.96 s'lik 40 kelime ya da 1.92 s'lik 20 kelime tanımlanabilir. Hafıza için devrede 8k x 8 Statik RAM kullanılmaktadır. Bu IC' nin iki çalışma modu vardır: manuel mod ve CPU modu. CPU modu ile bir ana bilgisayar kontrolünde çalışması da sağlanabilir. Burada verilen devrede manuel modda çalışma gerçekleştirilmektedir. İşlemci ile iletişim kurmak için tasarımda tuş takımı ve 2 digit sayısal göstergeye yer verilmiştir. Böylece hem ses kaydı ve testi yapılabilir ve hem de silinebilir veya hata kodları görülebilir.

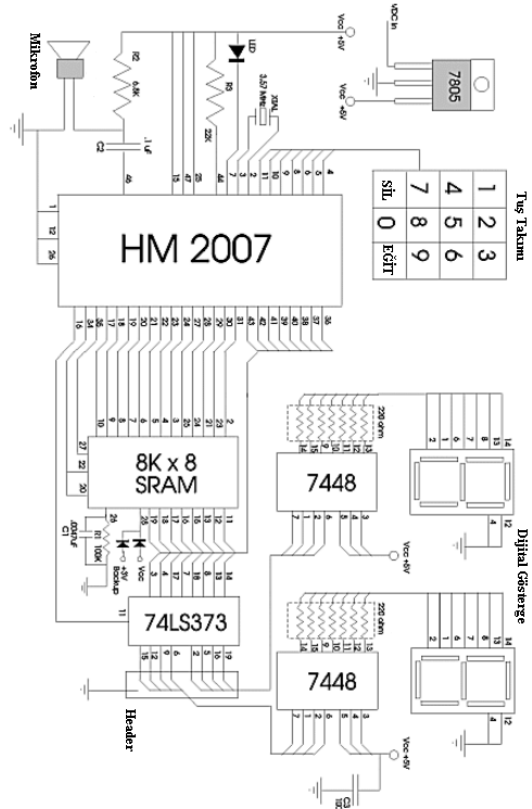
Bu devreye ilk enerji verildiğinde statik RAM hafıza kontrol edilir. Ekranda "00" görülür ve kırmızı LED ışık verir. Bu devrenin yukarıdaki işlemler için hazır olduğunu gösterir. Örneğin bir ses kaydı için önce TRN (Train: Eğitim) butonuna basılır. Sonra 1 ile 40 arasında ses kaydının yapılacağı bir dizin numarası girilir. Eğer LED yanıp sönerse kayıt başarılıdır. Tekrar TRN butonuna basılarak işlem bitirilir. Arzu edilen sayıda ses kayıt edildikten sonra test yapılabilir. Ses mikrofona konuşulduğunda, sayısal ekranda kayda ait dizin adresi görüntülenir [17,18,26,27].

2.2. Seri ve Paralel İletişim (Serial and Parallel Communication)

MCU ve diğer cihazlar ile PC arasında veri transferi için seri ve paralel iletişim yöntemleri kullanılabilir. Paralel veri iletişimde kullanılan hat sayısı fazla ve maliyeti daha yüksektir. Seri veri iletişimde ise hız düşük olmasına karşın, sadece 2 hat kullanılır.

Seri haberleşme protokolü senkron ve asenkron iletişim olmak üzere ikiye ayrılır:

Senkron iletişim: Senkron iletişimde bir saat işareti kullanılarak senkronize iletişim yapılır.



Şekil 1. HM2007 IC işlemci kullanılan ses tanıma devresi (Speech recognition circuit used HM 2007 IC processor)

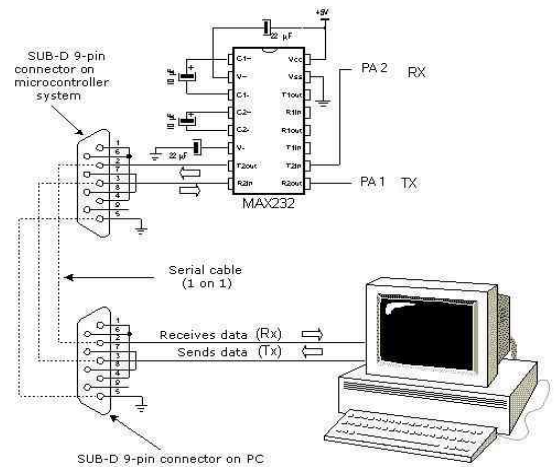
Asenkron İletişim: Asenkron iletişimde, saat işareti yerine başlangıç, bitiş bitleri kullanılır. Senkron iletişime göre daha yavaştır. Seri iletişimin 3 metodu vardır:

Full-duplex seri iletişim: Bu yöntemde her iki taraf da alıcı ve verici olarak çalışır.

Half-duplex seri iletişim: Bu yöntemde de her iki taraf alıcı ve verici olarak çalışabilir.

Simplex seri iletişim: Bu yöntemde bir taraf verici, diğer taraf ise alıcıdır.

2.3. RS232 Sürücü ve MAX232 Entegre Devresi (RS232 Driver and MAX232 Integrated Circuit)



Şekil 2. RS232 seri veri iletişimde kullanılan MAX232 IC bağlantısı (MAX232 IC connection in the RS232 circuit using serial communication)

RS232 seri asenkron veri iletişimi için geliştirilen bir standarttır. Veri hatlarında tipik gerilim seviyeleri +12 V ve -12V'dur. MCU'lar ise TTL Lojik 1 (+5V) veya Lojik 0 (0V) seviyelerinde çalışırlar. Bu değerleri PC ve denetleyici arasında her iki yönde de uygun seviyeye getirmek için MAX232 IC kullanılabilir (Şekil 2). 25 pinli DB25 veya 9 pinli DB-9 konnektörü kullanılabilir [22,23,28,29].

2.4. Hyper Terminal (Hyper Terminal)

Hyper Terminal alınan verileri görüntülemek için kullanılabilen bir ara yüzdür. PC'de (Start>Programs>Accessories>Communications>Hyper terminal) yolu ile ulaşılabilir. Veriler PC'ye seri veya paralel olarak iletebilir. RS232'nin bağlanacağı port ve seri iletişim hızının belirtilmesi, yazılımda bit sayısı ve baud rate hızının ayarlanması gereklidir [25,28].

2.5. PS/2 İletişimi ve PC Klavye (PS/2

Coomunication and PC Keyboard)

Klavyelerin en çok kullanılan bağlantı şekilleri DIN ve PS/2' dir. Klavye haberleşmesinde her bir byte veri için 11 bit gönderilir. 1 bit start biti, 8 bit data biti, 1 bit parity biti ve stop bitidir. PS/2 portu mouse ve klavye bağlantısı için üretilen, 6 pinli konektörden oluşan, düşük hızlı bir seri porttur. Herhangi bir tuşa basıldığında klavyeden PC'ye 8 bitlik özel tuş verileri data ve clock hatları kullanılarak yani senkron seri iletişim protokolü ile gönderilir. Bir tuşa basıldığında 1 Byte'lık, aynı tuş bırakıldığında 2 Byte'lık bir Hex kodu gönderilir. Böylece PC tarafından basılan veya bırakılan tuş belirlenir. Örneğin klavyede "A" tuşuna basıldığında "1C" hex kodu, basma işlemi sona erdiğinde önce "F0" sonra da "1C" hex kodları üretilir [24,30].

3. GERÇEKLEŞTİRİLEN SİSTEM (REALIZED SYSTEM)

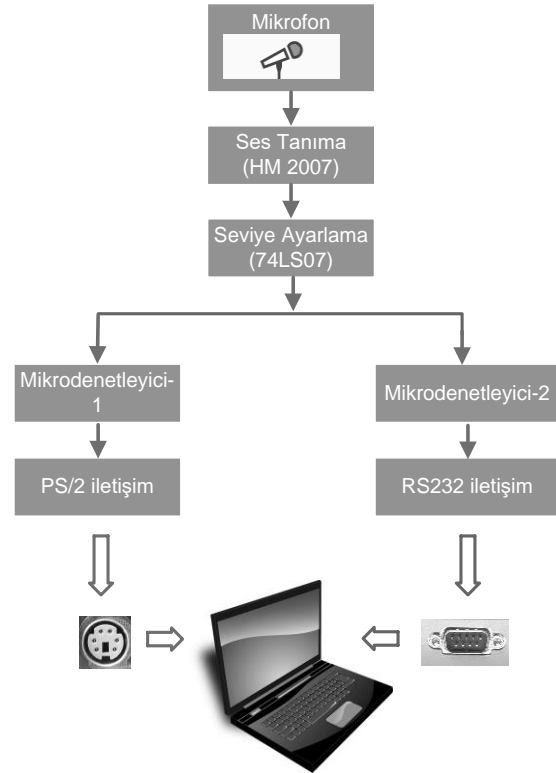
Bu çalışmada ses tanılama işlemi yapılarak, bir sesli kontrol sistemi ve PC' de yazı yazılabilen bir sistem tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Sistemin temel blok yapısı ve genel görünümü Şekil 3 ve Şekil 4' de görülmektedir. Tasarıma ait donanım, yazılım, bunların açıklamaları ve testleri izleyen bölümlerde verilmiştir.

Gerçekleştirilen sistem temel olarak altı donanım birimi ve ilgili yazılımlardan oluşur. Bunlar şöyle sıralanabilir:

- Ses tanılama birimi,
- Seviye düzenleme ve izolasyon birimi [26],
- MCU birimi,
- RS232 veri iletişim birimi,
- PS/2 veri iletişim birimi.

Bu sistemde mikrofon ile algılanan sesler HM2007 IC ile işlenir ve veriler harici bir 8K x 8 SRAM IC'de daha önceden kaydedilip saklanan seslere ait veriler ile karşılaştırılarak eşleşen ses bulunur ve ses tanılama işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra voltaj seviyesi ayarlanarak veriler iki ayrı MCU'ya uygulanır. Burada verilerin karşılaştırması yapılarak ilgili karakter kodu elde edilir. Bu sistem yazılım yolu ile kontrol edilen bir birim olduğundan, sunulan esneklik sayesinde gerektiğinde ses ile kontrol amaçları içinde kullanılabilir. Bu MCU'lar ile tanılama işlemi yapılmış olan sese ait

veriler PC' ye biri RS232 diğeri ise PS/2 iki iletişim yöntemi kullanılarak aktarılır.



Şekil 3. Sistemin temel blok yapısı (Basic block structure of the system)



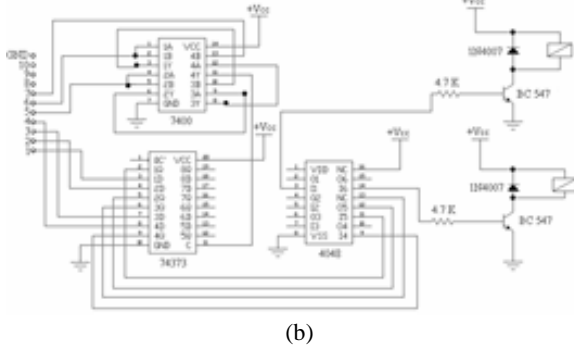
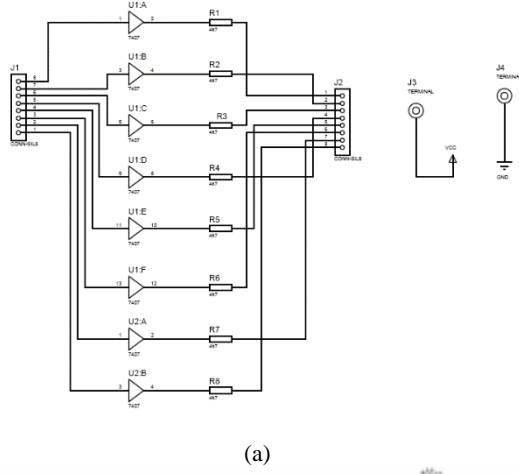
Şekil 4. Sistemin genel görünümü (Overview of the system)

3.1. Voltaj Seviye Düzenleme ve İzolasyon Birimi (Level Regulation of Voltage and Isolation Circuit)

Ses tanıma devresinde yüksek çıkış 2.5 V, düşük çıkış 0.5 V civarında ölçülmüştür. Ses tanılama işleminden sonra elde edilen sayısal işaretin MCU' ya uygulanmadan önce Lojik Seviyesini TTL uyumlu hale getirmek için 74LS07 buffer IC kullanılarak, sinyal ihtiyaç duyulan TTL H(5V) ve L(0V) seviyelerine elektriksel bir izolasyon sağlanarak çekilmiştir (Şekil 5-a) [26, 28].

Ses tanıma devresi kullanılarak elektrikli cihazların kontrolü Şekil 5-b' de verilen sürücü devre ile gerçekleştirilir. Bu devrenin girişi ses tanıma devresinin sayısal gösterge için de kullanılan 10 pinli çıkışına bağlanmaktadır. Ses tanındığında, ilgili çıkış yüksek seviyeye çekilir. Bu şekilde 10 farklı yük sürülebilir.

Sistemde kelimenin tanınması ile rölenin enerjilenmesi arasındaki süre yaklaşık 0.25 s'dir [26].



Şekil 5. (a) Voltaj seviye düzenleme ve izolasyon birimi (b) Sürücü devre (a) Voltage regulation and isolation circuit (b) Driver circuit

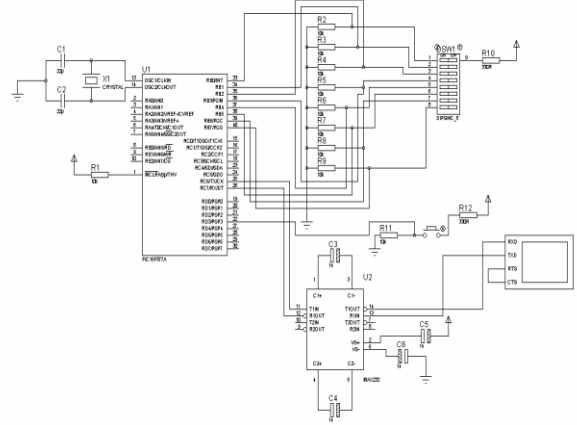
3.2. PC ile İletişim (Communication with the PC)

PC ile MCU kullanılan kontrol devresi arasında veri iletişimi iki yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar RS232 ve PS/2 yöntemleridir:

3.2.1. RS232 sürücü ve MCU kullanılan kontrol devresi (RS232 driver and control circuit used MCU)

Birinci yöntem asenkron veri iletişiminin kullanıldığı RS232 standardıdır. Bu yöntemde -12V ve +12V "Lojik 1", "Lojik 0" değerine karşılık gelir. Bu voltajlar ile TTL seviye uyumunu her iki yönde de sağlayabilmek için MAX232 IC kullanılmıştır [22,23,28,29]. MAX232 ve MCU arasında sadece veri gönderme işlemi yapıldığı için tek yönlü iletişim (Simplex Seri İletişim) kullanılmıştır. RS 232 iletişimini gerçekleştirmek için kullanılan donanım ve yazılımın akış şeması Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Devrede görülen 8x1 DIP Switch ses tanımlama devresinin çıkışındaki sayısal işareti sembolize eder ve bir PIC16F877A denetleyicinin girişine uygulanmıştır [29, 31]. Gerçekleştirilen sistemde ses tanımlama işleminin nasıl gerçekleştiği şöyle açıklanabilir: Örneğin "ALI" sesleri için ses tanımlama devresine önceden kayıtlar yapılır. "A" sesi şayet 01. adrese kayıt edilmiş ise, mikrofon "A" sesini algıladığında ses tanıma devresi çıkışında 01 in 8 Bit'lik

karşılığı olan sinyal elde edilir ve Seven Segment Display' da "01" yazar.



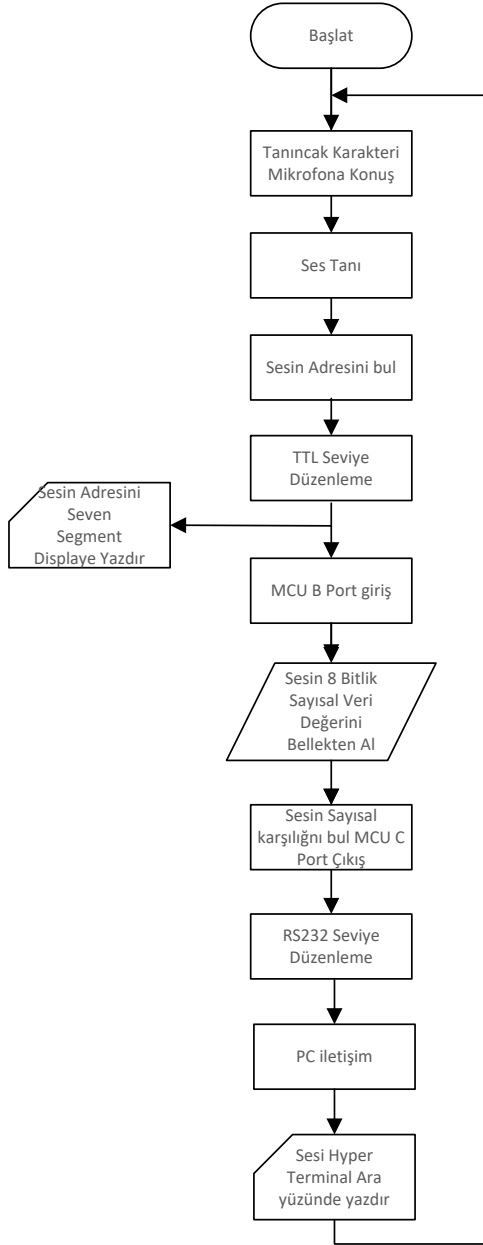
Şekil 6. RS232 sürücü ve MCU kullanılan kontrol devresi (RS232 driver and control circuit used MCU)

Bu veri aynı zamanda denetleyicinin B portuna giriş olarak uygulanır ve kayıtlı olan diğer verilerle karşılaştırılarak "A" harfinin karşılığı olan veri C portundan alınır, MAX232 IC ile gerilim seviyesi düzenlenerek RS232 portundan PC'ye gönderilir. PC işletim sisteminde bulunan Hyper terminalde ise gönderilen "A" harfi gözlemlenir. Daha sonra aynı işlemler "L" ve "I" sesleri içinde yapılır. Devrede kullanılan buton açıkken hiçbir işlem yapılmaz. "A" harfi yazdırılmak istendiğinde buton basılı iken konuşma yapılır. Eğer buton sürekli basılı kalırsa "A" yazmaya sürekli devam eder.

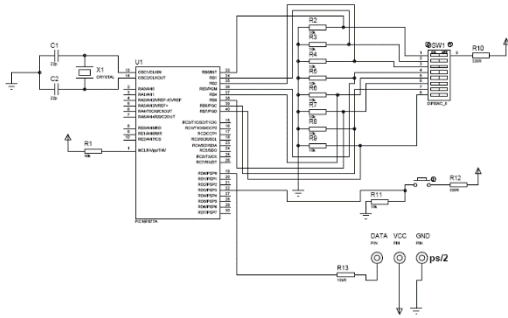
3.2.2. PS/2 klavye sürücü ve MCU kullanılan kontrol devresi (PS/2 keyboard driver and control circuit used MCU)

Gerçekleştirilen sistemde ses tanıma devresi ile PC arasında veri iletişimi için kullanılan ikinci yöntem PS/2 yöntemidir. RS232 veri iletişimine benzer biçimde yine HM2007 ses tanıma devresi çıkışından alınan veriler "Seviye Düzenleme ve İzolasyon Birimi" devresi kullanılarak TTL uyumu sağlanmış ve daha sonra 2. MCU kontrol birimine verilmiştir (Şekil 8). Burada farklı olarak, daha önce MCU'ya kaydedilen PC ASCII kodları [28] ile, gelen ses tanıma verisi Şekil 9'da akış şeması verilen yazılım ile karşılaştırılmaktadır. Örneğin mikrofondan "A" algılandığında MCU'ya "A" verisinin kodları gelir. MCU ile gelen bu kod "A" harfinin ASCII kodu olan Dec "97" ile karşılaştırılarak PS/2 girişine gönderilir.

Daha önce Bölüm 2.5'te açıklanan her bir klavye tuş kodu, burada verilen PIC MCU kullanılan kontrol birimi ile tekrar ölçülerek kontrol edilmiş ve kontrol işlemleri bunlara göre yapılmıştır. Gerçekleştirilen sistemde PIC MCU devresi ile 10 kHz değerinde bir clock sinyali üretilmiş ve veriler, bu sinyalin düşen kenarlarında gönderilmiştir.

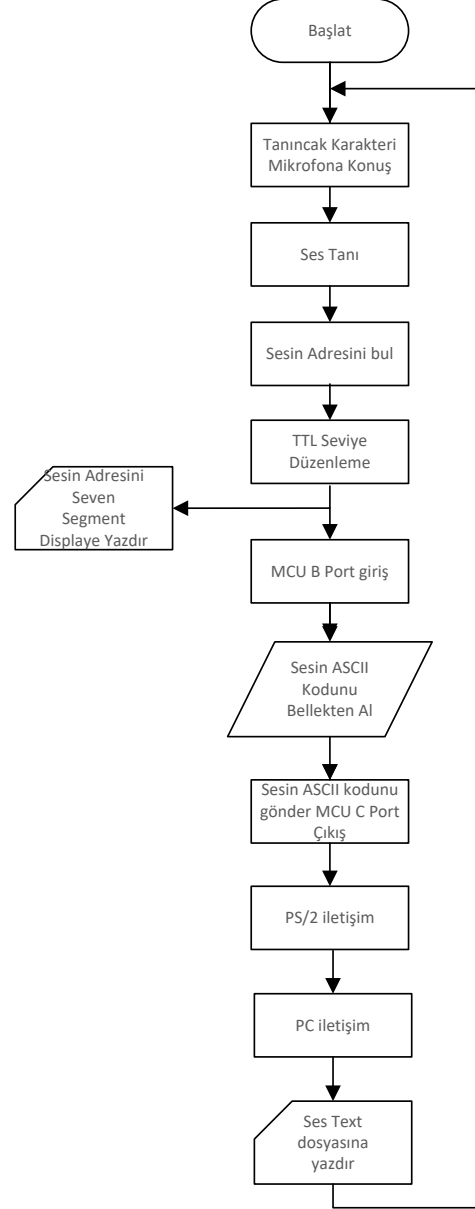


Şekil 7. Gerçekleştirilen sistemde ses tanıma ve RS232 seri iletişimin akış şeması (The flow chart of speech recognition and RS232 serial communication).



Şekil 8. PS/2 klavye sürücü ve MCU kullanılan kontrol devresi (PS/2 keyboard driver and control circuit used MCU)

Gerçekleştirilen devrede klavye tuşlarının 275mA'den fazla akım çekmesi nedeni ile, 7805 IC kullanılan ilave bir regüleli güç kaynağı tasarlanmış ve gerilim önerilen +4.5V ile +5.5V aralığında tutulmuştur. Klavyenin data ve clock uçları açık kollektör (open collector) yapısı nedeni ile 4k7 değerinde Pull-Up dirençleriyle Lojik 1 (+5V) seviyesine çekilmiştir [24].



Şekil 9. Gerçekleştirilen sistemde ses tanıma ve PS/2 iletişim akış şeması (Flow chart of speech recognition and PS/2 communication)

4. TESTLER (TESTS)

Gerçekleştirilen sistemde temel olarak iki grup altında testler yapılmıştır. Birincisi bu çalışmada yazı yazma işlemi harf tanıma temelli olduğu için Harf Tanıma Temelli Testler, diğeri ise Kelime Tanıma Temelli Testlerdir. Testlerde örneklem gruplarında 3 bayan 6 kişi yer almıştır. Testler değişik gürültü değerlerinde, % 38 bağıl neme sahip, 28 °C sıcaklıkta ve

ortam basıncındaki 5x4x3 m boyutlara sahip bir ortamda yapılmıştır [32]. Elde edilen veriler SPSS paket programı (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) kullanılarak istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Gürültü ölçümleri için 1/3 oktav bant filtresine sahip, Rion NL-21 cihazı kullanılmış [33] ve alınan sonuçlar aşağıda verilmiştir:

4.1. Harf Tanıma Temelli Testler (Character Recognition Based Testing)

Harf tanıma temelli testler yapılırken Çizelge 1' de verilen Türkçe konuşma seslerinin özellikleri göz önüne alınarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Çizelge 1. Türkçe konuşma sesleri (Turkish speech letters)

Ünlüler	Geniş	Dar	Geniş	Dar
Kalın	a	ı	o	u
İnce	e	i	ö	ü
Ünsüzler	Sürtünme	Patlamalı	Burunsal	Kaygan
Nefesli	c,j,v,z	b,d,g	m,n	ğ,l,r,y
Nefessiz	ç,f,h,s,ş	t,k,p	-	-

Ses tanıma sisteminde mikrofon aracılığı ile algılanan harflere ait sesler, bunların tanınma yüzdeleri ve grafikleri sırası ile Çizelge 2 ve Şekil 10' da verilmiştir. Burada elde edilen sonuçlara göre, ünlü sesler, ses tellerinin titreşmesi ile üretilen ve ses yolunda bir engelle uğramayan sesler olduğu için tanınma oranlarının daha yüksek olduğu düşünülmektedir. En düşük %95, en yüksek %100 ve ortalama %99.375 tanınma oranı elde edilmiştir. Ünsüz seslerin ise ses yolunda karşılaştıkları engeller nedeni ile tanınma oranlarının düştüğü değerlendirilmektedir (%93.4). Ünlü ve ünsüz harfler için ortalama %95.2 doğrulukla tanıma gerçekleştirilmiştir.

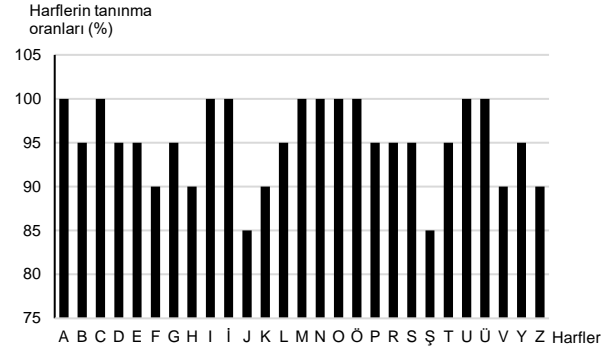
Çizelge 2. Harflere ait sesler ve bunların tanınma yüzdeleri (Speech recognition of the letters and their percentages)

Harf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	İ
Tanınma Oranı(%)	100	95	100	95	95	90	95	90	100	100
Harf	J	K	L	M	N	O	Ö	P	R	S
Tanınma Oranı(%)	85	90	95	100	100	100	100	95	95	95
Harf	Ş	T	U	Ü	V	Y	Z			
Tanınma Oranı(%)	85	95	100	100	90	95	90			

Yine bu sonuçlara göre düzenli sesbirimi geçişleri olmayan, gürültü faktörünün mevcut olduğu patlamalı ünsüzler ve sürtünmeli ünsüzler için tanınma oranlarının nispeten düşük bulunduğu, ağızın tamamen kapatılması ile oluşan ünsüzlerde telaffuzun zorlaşması nedeni ile tanınma doğruluğunun düştüğü değerlendirilmektedir. Ayrıca kaygan ünsüz harflerin ise bazı ünlü harflere benzemesi sebebi ile ayırt etme doğruluğunun azaldığı düşünülmektedir.

4.2. Kelime Tanıma Temelli Testler (Word Recognition Based Testing)

Kelime Tanıma Temelli olan testlerde sistem tarafından daha yüksek performansta tanıma sağlanabilmesi için,



Şekil 10. Harflerin ortalama tanınma oranları grafiği (Graph of the speech recognition of the letters and their percentages)

sisteme eğitilecek olan kelimelerin sahip olması gerekli olan özelliklerine ilave olarak konuşmacının ses özellikleri de araştırılmıştır. Yazı yazma işlemi harf temelli olduğundan, bu testler girişten MCU kullanılan kontrol biriminin çıkışına kadar olan birimler için yapılmıştır. Bu testlerde sağlanan verilerin yorumlanması ile aynı zamanda yeni çalışmalarda kullanılması düşünülen bu sistemin güvenilirliği de belirlenmeye çalışılmıştır. Sistemin performans testleri, eş sesli olan ve eş sesli olmayan ve Çizelge 3 ve Çizelge 4' de sırası ile verilen eğitim verileri kullanılarak gürültülü ve gürültüsüz ortamda yapılmıştır.

Çizelge 3. Eşsesli kelime tanıma için seçilen eğitim verileri (Selected training data for homonym word recognition)

Eğitim veri No	Eğitim verileri
1	ileri
2	geri
3	ısıt
4	ışık
5	kapı
6	kapat
7	dvd
8	vcd
9	televizyon
10	müzik

Çizelge 4. Eşsesli olmayan kelime tanıma için seçilen eğitim verileri (Selected training data for non homonym word recognition)

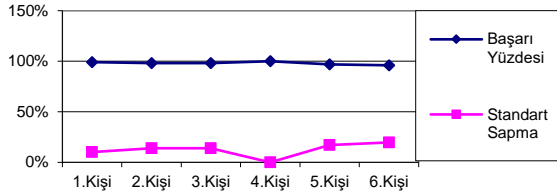
Eğitim veri No	Eğitim verileri
1	perde
2	radio
3	telefon
4	bilgisayar
5	klima
6	sağ
7	lamba
8	aç
9	ısıtıcı
10	garaj

Çizelge 5 ve Şekil 11' de gürültüsüz ortamda eş sesli olmayan kelimelerle gerçekleştirilen tanıma sonuçları, Çizelge 6 ve Şekil 12' de ise gürültüsüz ortamda eş sesli olan kelimelerle gerçekleştirilen tanıma sonuçları verilmiştir. Ayrıca bu iki testin karşılaştırmalı sonuçları

Çizelge 7 ve Şekil 13'te beraber sunulmuştur. Gürültülü ortam testleri ise daha sonraki kısımlarda verilmiştir.

Çizelge 5. Gürültüsüz ortamda eşesli olmayan kelime tanıma oranları (Non-homophones word recognition rates in noiseless environment)

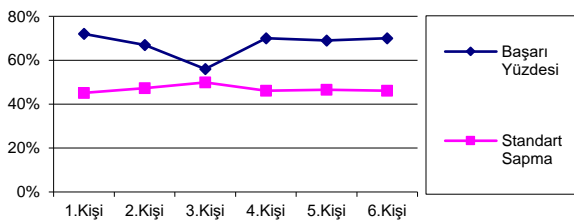
Konuşmacı Ses Örnekleri	Toplam Örnek Kelime Sayısı	Toplam Tekrar Sayısı	Doğru Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Yanlış Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Başarı Yüzdesi	Standart Sapma
#1	10	10	99	1	%99	,10000
#2	10	10	98	2	%98	,14071
#3	10	10	98	2	%98	,14071
#4	10	10	100	0	%100	,00000
#5	10	10	97	3	%97	,17145
#6	10	10	96	4	%96	,19695



Şekil 11. Gürültüsüz ortamda eşesli olmayan kelime tanıma oranları (Non-homophones word recognition rates in noiseless environment)

Çizelge 6. Gürültüsüz ortamda eşesli olan kelime tanıma oranları (Homophones word recognition rates in noiseless environment)

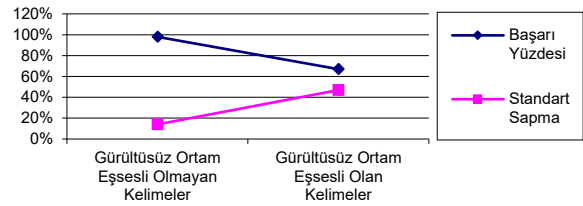
Konuşmacı Ses Örnekleri	Toplam Örnek Kelime Sayısı	Toplam Tekrar Sayısı	Doğru Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Yanlış Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Başarı Yüzdesi	Standart Sapma
#1	10	10	72	28	%72	,45126
#2	10	10	67	33	%67	,47258
#3	10	10	56	44	%56	,49889
#4	10	10	70	30	%70	,46057
#5	10	10	69	31	%69	,46482
#6	10	10	70	30	%70	,46057



Şekil 12. Gürültüsüz ortamda eşesli olan kelime tanıma oranları (Homophones word recognition rates in noiseless environment)

Çizelge 7. Gürültüsüz ortamda eşesli olan ve eşesli olmayan kelimeler için genel yüzde ve ortalama kelime tanıma oranları (Overall percentage and average word recognition rates for homonyms and non-homonyms in noiseless environments)

Koşullar	Toplam Tekrar Sayısı	Doğru Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Yanlış Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Başarı Yüzdesi	Standart Sapma
Gürültüsüz Ortam Eşesli Olmayan Kelimeler	600	588	12	%98	,14012
Gürültüsüz Ortam Eşesli Olan Kelimeler	600	404	196	%67	,46939



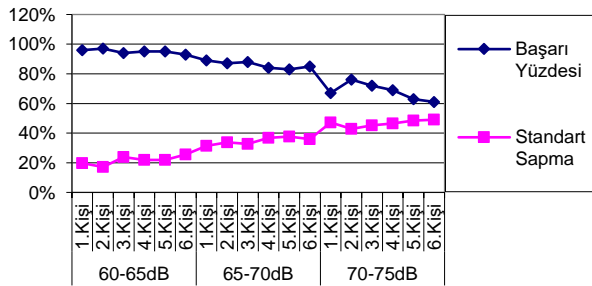
Şekil 13. Eşesli olan ve eşesli olmayan kelimeler için gürültüsüz ortamda genel yüzde ve ortalama kelime tanıma oranları (Overall percentage and average word recognition rates for homonyms and non-homonyms in noiseless environments)

Eşesli olan ve olmayan seslerin gürültüsüz ortamda 1200'e yakın ölçümle elde edilen sonuçları genel olarak incelendiğinde, kelimeler neticede harflerden oluştuğu için, bunların bir önceki aşamada gerçekleştirilen harf temelli testlerin sonuçları ile uyumlu olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda, eş sesli olmayan kelimelerle gerçekleştirilen ses tanımadaki başarının, aynı şartlarda eş sesli olan kelimelerle gerçekleştirilen tanımayla göre daha yüksek olmasının temel sebebinin, söylenişleri birbirine benzer olan eğitim verileri olduğu değerlendirilmektedir. Eşesli olmayan kelimeler nerede ise %100 oranında tanınırken, eş sesli olan kelimelerde bu oran %55-%72 arasındadır. Genel olarak tanınma oranı daha fazla olan harfleri barındıran kelimelerin daha yüksek doğrulukla tanınması beklenmektedir [26,34,35]. Bu sonuçlar üzerinde eğitim verilerinin farklı olmasının da etkili olduğu düşünülebilir.

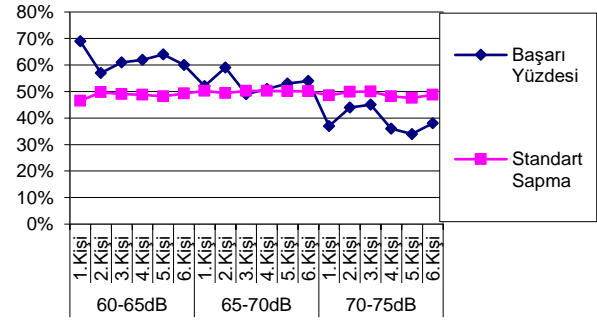
Eşesli olan ve olmayan seslerin farklı gürültü seviyelerine sahip ortamda tanınmalarına ait ölçümler, ölçüm sayıları ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak Çizelge 8 ve 9 ile Şekil 14 ve 15' de verilmiştir. Ayrıca bu testlerin karşılaştırmalı sonuçları Çizelge 10 ve Şekil 16'da beraber sunulmuştur. Bu testlerde Gürültü ölçümleri için RION NL 21 cihazı kullanılmıştır [33].

Çizelge 8. Gürültülü ortamda eşesli olmayan kelime tanıma oranları (Non-homonym word recognition rates in noisy environment)

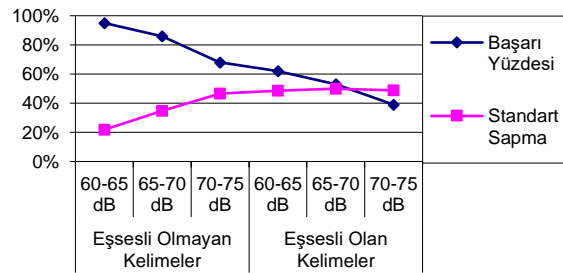
Eşesli Olmayan Kelimeler İçin dB Aralıkları	Konuşmacı Ses Örnekleri	Toplam Örnek Kelime Sayısı	Toplam Tekrar Sayısı	Doğru Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Yanlış Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Başarı Yüzdesi	Standart Sapma
60-65dB	1.Kişi	10	10	96	4	96%	0,19695
	2.Kişi	10	10	97	3	97%	0,17145
	3.Kişi	10	10	94	6	94%	0,23868
	4.Kişi	10	10	95	5	95%	0,21904
	5.Kişi	10	10	95	5	95%	0,21904
	6.Kişi	10	10	93	7	93%	0,25643
65-70dB	1.Kişi	10	10	89	11	89%	0,31447
	2.Kişi	10	10	87	13	87%	0,338
	3.Kişi	10	10	88	12	88%	0,326
	4.Kişi	10	10	84	16	84%	0,36845
	5.Kişi	10	10	83	17	83%	0,37753
	6.Kişi	10	10	85	15	85%	0,35887
70-75dB	1.Kişi	10	10	67	33	67%	0,47258
	2.Kişi	10	10	76	24	76%	0,42923
	3.Kişi	10	10	72	28	72%	0,45126
	4.Kişi	10	10	69	31	69%	0,46482
	5.Kişi	10	10	63	37	63%	0,48524
	6.Kişi	10	10	61	39	61%	0,49021

**Şekil 14.** Gürültülü ortamda eşesli olmayan kelime tanıma oranları (Non-homonym word recognition rates in noisy environment)**Çizelge 9.** Gürültülü ortamda eşesli olan kelime tanıma oranları (Non-homonym word recognition rates in noisy environment)

Eşesli Olan Kelimeler İçin dB Aralıkları	Konuşmacı Ses Örnekleri	Toplam Örnek Kelime Sayısı	Toplam Tekrar Sayısı	Doğru Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Yanlış Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Başarı Yüzdesi	Standart Sapma
60-65dB	1.Kişi	10	10	69	31	69%	0,46482
	2.Kişi	10	10	57	43	57%	0,49757
	3.Kişi	10	10	61	39	61%	0,49021
	4.Kişi	10	10	62	38	62%	0,48783
	5.Kişi	10	10	64	36	64%	0,48242
	6.Kişi	10	10	60	40	60%	0,49237
65-70dB	1.Kişi	10	10	52	48	52%	0,50212
	2.Kişi	10	10	59	41	59%	0,49431
	3.Kişi	10	10	49	51	49%	0,50242
	4.Kişi	10	10	51	49	51%	0,50242
	5.Kişi	10	10	53	47	53%	0,50161
	6.Kişi	10	10	54	46	54%	0,50091
70-75dB	1.Kişi	10	10	37	63	37%	0,48524
	2.Kişi	10	10	44	56	44%	0,49889
	3.Kişi	10	10	45	55	45%	0,5
	4.Kişi	10	10	36	64	36%	0,48242
	5.Kişi	10	10	34	66	34%	0,4761
	6.Kişi	10	10	38	62	38%	0,48783

**Şekil 15.** Gürültülü ortamda eşesli olan kelime tanıma oranları (Homonym word recognition rates in noisy environment)**Çizelge 10.** Gürültülü ortamda eşesli olan ve eşesli olmayan kelimeler için genel yüzde ve ortalama kelime tanıma oranları (Overall percentage and average word recognition rates for homonyms and non-homonyms in noisy environments)

Gürültülü Ortamda Genel Yüzde ve Ortalama Sonuçlar	Koşullar	Toplam Tekrar Sayısı	Doğru Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Yanlış Tanınan Örnek Kelime Sayısı	Başarı Yüzdesi	Standart Sapma
Eşesli Olmayan Kelimeler	60-65 dB	600	570	30	95%	0,21813
	65-70 dB	600	516	84	86%	0,34728
	70-75 dB	600	408	192	68%	0,46687
Eşesli Olan Kelimeler	60-65 dB	600	372	228	62%	0,48579
	65-70 dB	600	318	282	53%	0,49952
	70-75 dB	600	234	366	39%	0,48816

**Şekil 16.** Eşesli olan ve eşesli olmayan kelimeler için gürültülü ortamda genel yüzde ve ortalama kelime tanıma oranları (Overall percentage and average word recognition rates for homonyms and non-homonyms in noisy environments)

Ölçümler 60-65 dB, 65-70 dB ve 70-75 dB aralığında gürültü seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Bu Çizelge ve şekiller ve Çizelge 10 ve Şekil 16' da kıyaslamalı olarak görüldüğü gibi, eşesli olmayan kelimeler için 60-65 dB seviyelerinde gürültülü ortamda %95, 65-70 dB gürültülü ortamda %86 ve 70-75 dB gürültülü ortamda %68 tanıma oranına ulaşılmıştır. Eşesli olan kelimeler için ise 60-65 dB seviyelerinde gürültülü ortamda %62, 65-70 dB gürültülü ortamda %53 ve 70-75 dB gürültülü ortamda %39 tanıma oranı sağlanmıştır.

Bu ölçümlerde alınan sonuçlara göre, eşsesli olmayan kelimeler 65 dB gibi daha düşük gürültülü ortamlarda %95 oranında tanınırken, eş sesli olan kelimelerde aynı şartlarda bu oran %62 seviyelerindedir. Bu durum gürültülü ortamların tanınma oranının düşmesine neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca genel olarak tanınma oranı daha fazla olan harfleri barındıran kelimelerin daha yüksek doğrulukla tanınması beklenen bir durumdur [26,34,35]. Bu sonuçlar üzerinde eğitim verilerinin farklı olmasının da etkili olduğu düşünülebilir. Bu sebeple, bu test sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, bunların daha önceki aşamalarda gerçekleştirilen harf temelli testlerin ve gürültüsüz ortamda elde edilen testlerin sonuçları ile uyum sağlamakta olduğu görülmektedir. Bu bağlamda çıkarılan diğer bir sonuç ise eş sesli olmayan kelimelerle gerçekleştirilen ses tanımadaki başarının, aynı şartlarda eş sesli olan kelimelerle gerçekleştirilen tanımaya göre daha yüksek olmasının temel sebebinin, söylenişleri birbirine benzer olan eğitim verileri olduğu düşünülebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTIONS)

Bu çalışmada gerek yerleşik ve gerekse gömülü sistem uygulamalarında kullanılabilecek, düşük maliyetli, yeni bir konuşmacı bağımlı ses tanıma ve kontrol sistemi tasarlanmış, daha yüksek doğrulukla konuşma tanımayı etkileyebilen parametreler araştırılmış ve PC' de yazı yazabilmek için veriler bir bilgisayara aktarılmıştır. Veri iletişimi için birer mikrodenetleyici (MCU) ile kontrol edilen PS/2 ve RS232 veri iletişimi yöntemleri kullanılmıştır.

Sistemin performansını belirlemek için gürültülü ve gürültüsüz ortamlarda testler yapılmıştır. Bu çalışmada yazı yazma işlemi harf tanıma temelli olduğu için Harf Tanıma Temelli Testler ve diğer testler olan Kelime Tanıma Temelli Testler gerçekleştirilmiştir. Testler yapılırken Türkçe konuşma seslerinin özellikleri araştırılmış ve elde edilen sonuçlar bu özellikler göz önüne alınarak yorumlanmıştır.

Harf tanıma temelli testlerde, ünlü sesler, ses tellerinin titreşmesi ile üretilen ve ses yolunda bir engelle uğramayan sesler olduğu için tanınma oranlarının daha yüksek olduğu düşünülmektedir. En düşük %95, en yüksek %100 ve ortalama %99.375 tanınma oranı elde edilmiştir. Ünsüz seslerin ise ses yolunda karşılaştıkları engeller nedeni ile tanınma oranlarının düştüğü değerlendirilmektedir (%93.4). Ünlü ve ünsüz harfler için ortalama %95.2 doğrulukla tanıma gerçekleşmiştir.

Yine bu sonuçlara göre düzenli sesbirimi geçişleri olmayan, gürültü faktörünün hakim olduğu patlamalı ünsüzler ve sürtünmeli ünsüzler için tanınma oranlarının nispeten düşük bulunduğu, ağızın tamamen kapatılması ile oluşan ünsüzlerde telaffuzun zorlaşması nedeni ile tanınma doğruluğunun düştüğü değerlendirilmektedir. Ayrıca kaygan ünsüz harflerin ise bazı ünlü harflere benzemesi sebebi ile ayırt etmede güçlüklerle karşılaşıldığı düşünülmektedir.

Kelime Tanıma Temelli olan testlerde ise sistem tarafından daha yüksek performansta tanıma sağlanabilmesi için, kelimelerin sahip olması gerekli olan özelliklerine ilave olarak konuşmacının ses özellikleri de araştırılmıştır. Bu testler aynı zamanda yeni çalışmalarda kullanılması düşünülen bu sistemin güvenilirliğini belirlemek için de yapılmıştır.

Kelime tanıma temelli olan testler gürültülü ve gürültülü olmayan ortamda eşsesli olan ve olmayan sesler için ayrı ayrı yapılmıştır.

Gürültüsüz ortam için yaklaşık 1200 ölçümle elde edilen veriler genel olarak incelendiğinde, kelimeler neticede harf temelli olduğundan, bir önceki aşamada gerçekleştirilen harf temelli testlerin sonuçları ile uyum sağlamakta olduğu değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, eş sesli olmayan kelimelerle gerçekleştirilen ses tanımadaki başarının, aynı şartlarda eş sesli olan kelimelerle gerçekleştirilen tanımaya göre daha yüksek olmasının temel sebebinin, söylenişleri birbirine benzer olan eğitim verileri olduğu düşünülmektedir. Eşsesli olmayan kelimeler nerede ise %100 oranında tanınırken, eş sesli olan kelimelerde bu oran %55-%72 arasındadır.

Eşsesli olan ve olmayan kelimelerin farklı gürültü seviyelerine sahip ortamda tanınmalarına ait ölçümler 60-65 dB, 65-70 dB ve 70-75 dB arasındaki gürültü seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Eşsesli olmayan kelimeler için 60-65 dB seviyelerinde gürültülü ortamda %95, 65-70 dB gürültülü ortamda %86 ve 70-75 dB gürültülü ortamda %68 tanıma oranına ulaşılmıştır. Eşsesli olan kelimeler için ise 60-65 dB seviyelerinde gürültülü ortamda %62, 65-70 dB gürültülü ortamda %53 ve 70-75 dB gürültülü ortamda %39 tanıma oranı sağlanmıştır.

Gürültülü ortamda yapılan ölçümlerde eşsesli olmayan kelimeler 65 dB gibi nispeten daha düşük gürültülü ortamlarda %95 oranında tanınırken, eş sesli olan kelimelerde aynı şartlarda bu oran %62 seviyelerindedir. Bu durum gürültülü ortamların tanınma oranının düşmesine neden olduğunu göstermektedir.

Bu test sonuçları hem eş sesli olan ve olmayan eğitim verileri için ve hem de gürültülü ve gürültüsüz ortamın sonuçları için genel olarak değerlendirildiğinde, genel olarak tanınma oranı daha fazla olan harfleri barındıran kelimelerin daha yüksek doğrulukla tanınması beklenmektedir [26,34,35]. Ayrıca bu sonuçlar üzerinde eğitim verilerinin farklı olmasının da etkili olduğu düşünülebilir. Bu bağlamda çıkarılan diğer bir sonuç ise eş sesli olmayan kelimelerle gerçekleştirilen ses tanımadaki başarının, aynı şartlarda eş sesli olan kelimelerle gerçekleştirilen tanımaya göre daha yüksek olmasının temel sebebinin, söylenişleri birbirine benzer kelimelerin kullanıldığı eğitim verileri olduğu yorumlanabilir.

Ayrıca bu çalışmanın amaçlarından birisi olan ses tanımadaki başarıyı artırmak için yapılan testlere göre de çıkarımı yapılan ve ayrıca bunlardan bazılarının ölçümleri yapılmasına rağmen açıklamasının çok uzun olması gerektiği için zor olan durumlardan bazıları aşağıda sunulmaya çalışılmıştır:

1-Eğitilen kelime örneklerinin konuşma ve iletim ortamına duyarlılığı fazladır. Bu sebeple test örneklerinin kayıtları sırasında oluşan gürültü kelime tanıma oranının düşmesine neden olmaktadır.

2-Sesin kalitesi gürültülü ortamda dönüşüm (kayıt) aşamalarında bozulabileceğinden, gürültüsüz ortamda eğitilen sistemde kelimeler daha yüksek performansla tanınmaktadır.

3-Sistemin performansı eğitilecek kelime sayısına da bağlı olduğundan, sisteme kaydedilen eğitilen kelime örneklerinin sayısı azaldıkça, performansın arttığı gözlemlenmiştir.

4- Kullanıcı doğru ses verdiği takdirde ses tanıma devresinde bay ve bayan konuşmacı ses tanıma oranında bir farklılık oluşmamaktadır.

5-Telaffuz farklılıkları, konuşma hızı, ton, vurgu, stres ve heyecan vb. sebepler ile her seferinde aynı ses çıkarılmadığı için sesler arasında farklı tanıma oranları meydana geldiği görülmüştür.

6-Kelimelerin sürelerinin kayıttaki gibi olması tanıma performansını olumlu etkilemektedir.

7-Sistemin hızı kelimelerin söyleniş süresiyle ters orantılıdır.

8-Hafızaya eğitilen kelimelere rasgele erişim özelliği nedeni ile sistemin performansı azalmaktadır. Bu durum, hafızaya yeni kelimeleri tekrar gerekli olan sıra ile yükleyerek belirli ölçülerde düzeltilebilir.

9- Ağızdan önceki bölgelerde de meydana gelen ses değişimlerinden dolayı sistemde her kişide farklı tanıma oranları meydana gelmektedir. Bunlar kontrol edilmeye çalışılarak performans artırılabilir.

10- Eğitilecek kelimelerdeki ses birimlerinin iyi bir şekilde seçilmesinin tanıma performansını olumlu etkilediği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada kelime tanıma için eşsesli olmayan kelimeler için gürültüsüz ortamda %98, 60-65dB gürültülü ortamda %95; eşsesli olan kelimeler için ise gürültüsüz ortamda 67, 60-65dB gürültülü ortamda %62 doğruluk elde edilmiştir. Bu duruma göre sistem gürültülü ve gürültüsüz ortamda ortalama olarak %80,5 tanıma oranı sağlamaktadır. Bu çalışmanın temel konularından birisi olan ünlü ve ünsüz harf tanıma ile PC'ye yazı yazma işlemleri için doğruluk ortalama %95.2 bulunmuştur. Şimdiye kadar ifade edilmeye çalışılan tanıma performansına etki eden sınırlamalara dikkat edilmesinin olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan testlerin sonuçları, hafıza ve performansın artırılması ile doğrudan konuşmaların, bu çalışmadaki gibi gömülü sistemler ile doğrudan tanınabileceğini ve çeşitli cihazların kontrolünde kullanılabileceğini göstermektedir. İleride, sistemde ilave olarak Yapay Zeka veya Fuzzy Logic algoritmaları kullanılarak daha doğru tanıma sağlanabilmesi için çalışmalar yapılabilir veya daha önceki konuşma verileri kullanılarak kestirimler yapılmaya ve böylece daha akıllı ve öğrenen bir sistem elde edilmeye çalışılabilir [36-38]. Ayrıca sistem müzik eğitim setlerine adapte edilerek müzik eğitimin kalitesi artırılmaya çalışılabilir veya müzik

enstrümanlarının akord işlemlerinde kullanılabilir. Ses izi biyometrik bir özellik olduğundan, sistem güvenlik amaçlı uygulamalarda kullanılabilir [26,14,15].

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. <http://www.speech.cs.cmu.edu/comp.speech/Section6/O6.1.html>, 05.10.2017.
- [2]. https://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/specialprod1/specialprod1_7.html, 16.08.2016.
- [3]. Alsaka Y.A., Doll S.A., Davis S., "Portable speech recognition for the speech and hearing impaired", *Southeastcon '97. Engineering new New Century., Proceedings. IEEE*, Blacksburg, VA, USA, 151-153, (1997).
- [4]. Thiang, "Implementation of speech recognition on MCS51 microcontroller for controlling wheelchair", *International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, Kuala Lumpur, Malaysia, 1193-1198, (2007).
- [5]. Mosbah B.B., "Speech recognition for disabilities people", *Information and Communication Technologies, 2006. ICTTA '06. 2nd*, Damascus, Syria, 864-869, (2006).
- [6]. <http://download.springer.com/static/pdf/>, 19.08.2016, "Chapter 9, Speech Technology In Military Application", Springer, fulltext, pp:289-330.
- [7]. McCallum M.C., Cambell J.L., Richman J.B., Brown J.L., "Speech recognition and in-vehicle telematics devices: potential reductions in driver distraction", *International Journal of Speech Technology*, 7(1): 25-33, (2004).
- [8]. Lin P.C., Wang J.F., Lin S.C., Mo M.H., "An embedded system design for ubiquitous speech interactive applications based on a cost effective SPCE061a micro controller", *UIC 2006, Ubiquitous Intelligence and Computing*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, LNCS 4159: 83-92, (2006).
- [9]. Rabenja R., Amine S., Davrdson J., "Speech recognition for game control", *IEEE, Poster Session 1 : System Level Design, 0-7803-8322-2/04/\$20.00 02004 IEEE*, 97-99, (2004).
- [10]. Haleem M. S., "Voice controlled automation system", *Proceedings of the 12th IEEE International Multitopic Conference*, 508-512, December, 23-24, (2008).
- [11]. Ferrando F., Nouveau G., Philip B., Pradeilles P., Soulenq V., Van-Staen G., Courmontagne P., "A voice recognition system for a submarine piloting", *OCEANS 2009 - EUROPE*, Bremen, Germany, (2009).
- [12]. Türk O., Arslan L.M., "Speech recognition methods for speech therapy", *Signal Processing and Communications Applications Conference, 2004. Proceedings of the IEEE 12th*, 410-413, (2004).
- [13]. Fezari M., Salah M.B., "A voice command system for autonomous robots guidance", *IEEE, AMC'06-Istanbul, Turkey*, pp:261-265, (2006).
- [14]. <http://www.teknoloji.com/2015/06/ses-izi-ve-nefes-izi-parmak-izinin.html>, 06.10.2016.
- [15]. Burunkaya M., Yorulmaz F., "Mikrodenetleyici tabanlı elektronik nota eğitim seti tasarımı ve yapımı", *IATS '09, 5. International Advanced Technologies Symposium*, Karabük, Türkiye, sayfa: 556 – 561, May 13-15, (2009).
- [16]. Ruiz C.B., Tapias F.E.G., del-Brio B.M., Nuez A.B., Marques N.J.M., "Microcontroller implementation of a voice command recognition system for human-machine

- interface in embedded systems”, *IEEE*, 0-7803-9402-X/05/\$20.00©, pp:587-591, (2005).
- [17]. <http://www.imagesco.com/speech/HM2007.pdf>, 19.08.2017.
- [18]. <https://www.lumenvox.com/resources/tips/types-of-speech-recognition.aspx>, 05.10.2017.
- [19]. https://tr.wikipedia.org/wiki/Braille_alfabesi, 16.08.2016.
- [20]. Chan F.Y., Khalid H.M., “Is talking to an automated teller machine natural and fun?”, *Ergonomics*, 46(13-14): 1386–1407, (2003).
- [21]. Yuanyuan S., Jia L., Runsheng L., “Single-chip speech recognition system based on 8051 microcontroller core”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 47(1): 149-153, (2001).
- [22]. https://en.wikipedia.org/wiki/Data_transmission, 19.08.2016.
- [23]. http://www.camiresearch.com/Data_Com_Basics/RS232_standard.html, 19.08.2016.
- [24]. <http://www.computer-engineering.org/ps2protocol/>, 19.08.2016.
- [25]. <http://www.elektrotekno.com/about1660.html>, 19.08.2016.
- [26]. Yıldır M., Burunkaya M., “Ses sentezleyici kullanılan ses tanıma düzeni tasarımı ve yapımı”, *UMES’07*, Kocaeli, 1: 395-398, (2007).
- [27]. <http://www.imagesco.com/speech/SR-07.pdf>, 19.08.2017.
- [28]. <http://320volt.com/rs232-seri-portun-pic-mikro-deneticiler-ile-kullanimi/>, 19.08.2016.
- [29]. Burunkaya M., Yıldız S., Karataş İ., “Öğrenci proje çalışmalarında kullanılabilir düşük maliyetli ve genel amaçlı bir veri toplama sisteminin (VTS) gerçekleştirilmesi”, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 4(3): 21-28, (2011).
- [30]. http://www.lima.com.tr/Support/Lima/PS2Keyboard_TR.PDF 15.08.2016, 12:09.
- [31]. <http://320volt.com/mikrodenetleyici-uygulamaları-bilgiler-pic-c-pic16f877/>, 19.08.2016.
- [32]. <http://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/laboratuvarlarımız/laboratuvar-ortam-kosullari-1> 15.08.2016, 17:11.
- [33] NL-21/NL-31 Sound Level Meter, Rion Co., Ltd., Tokyo, Japan.
<http://www.noisemeasurement.com.au/downloads/NL-21.pdf>, 14.08.2017.
- [34] Ertaş F., Eskidere Ö., “Yazılım tabanlı sözcük sentezleyici”, *DEÜ Müh. Fak. Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(1): 1-27, (2001).
- [35]. Efendioğlu S., İşcan A., “Türkçe ses bilgisi öğretiminde ses olaylarının sınıflandırılması”, *A.Ü. Türkiyat Araştırmaları Enstitüsü Dergisi (TAED)*, Erzurum, 43: 121-143, (2010).
- [36]. Goktas, H.H., Yucel, M., "A fuzzy logic based device for the determination of temperature dependence of EDFAs", *Microwave and Optical Technology Letters*, 50(9): 2331-2334, (2008).
- [37]. Celebi, F. V., Yucel, M., Goktas, H.H., “Fuzzy logic based device to implement a single CAD model for a laser diode based on characteristic quantities”, *Optik*, 123(6): 471-474, (2012).
- [38]. Celebi, F. V., Yucel, M., Goktas, H.H., Danisman, K., “Intelligent modelling of alpha (α) parameter; comparison of ANN and ANFIS cases”, *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, 7(5-6): 470–474, (2013).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Analysis of welding groove configurations on strength of S275 structural steel welded by FCAW

Yazar(lar) (Author(s)): Bekir ÇEVİK

ORCID: 0000-0002-1209-5364

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Çevik B., “Analysis of welding groove configurations on strength of S275 structural steel welded by FCAW”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 489-495, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389642

Analysis of Welding Groove Configurations on Strength of S275 Structural Steel Welded by FCAW

Araştırma Makalesi / Research Article

Bekir ÇEVİK*

Gümüşova Vocational School, Department of Welding Technology, Düzce University, Turkey

(Geliş/Received : 14.12.2016 ; Kabul/Accepted : 18.01.2017)

ABSTRACT

The quality of welded joints depends on many factors such as welding current, voltage, welding speed, shielding gas type, and welding position. One of these factors is the welding groove design. This is because different stresses (tensile, compression, bending, etc.) can occur on the weldments. For this reason, while designing welded constructions, it is important to join them with the most appropriate welding groove configuration by considering the stresses the welded joints can be exposed to. In this study, the effect of the welding groove configuration on the mechanical and metallurgical properties of S275 structural steel joined by flux cored arc welding (FCAW) method was investigated. For this purpose, different welding groove configurations were formed for structural steel sheets. Tensile, bending, and hardness tests were performed to determine the mechanical properties of the weldments. In addition, metallographic investigations were carried out to determine the metallurgical properties of the weld zones. As a result of the tests, the effect of the welding groove configuration on the mechanical and metallurgical properties of the welded joints was determined. As a result of the microstructure studies, different structures such as grain boundary ferrite, widmanstatten ferrite and acicular ferrite were determined to form in the weld metal and coarse grained zone. It was determined that hardness of the weld metal was higher than HAZ and base metal in all welding groove configurations. As a result of the tensile and bending tests, the highest tensile and bending strengths were obtained from the samples welded by X₂ type welding groove configuration after the base metal. Furthermore, the X-type welding groove configurations showed better mechanical properties than the K-type welding groove configurations.

Keywords: Flux cored arc welding (FCAW), welding groove, mechanical properties, microstructure.

ÖZ

Kaynaklı birleştirmelerin kalitesi, kaynak akımı, voltaj, kaynak hızı, koruyucu gaz türü, kaynak pozisyonu gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden birisi de kaynak ağız tasarımıdır. Çünkü kaynaklı çelik konstrüksiyonlar üzerinde farklı gerilmeler (çekme, basma, eğilme v.s) oluşabilmektedir. Dolayısıyla kaynaklı konstrüksiyonlar tasarlanırken, kaynaklı bağlantıların maruz kalabileceği gerilmeler dikkate alınarak en uygun kaynak ağız konfigürasyonu ile birleştirilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, özlü tel ark kaynak (ÖTAK) yöntemi ile birleştirilen S275 yapı çeliğinin mekanik ve metalurjik özelliklerine kaynak ağız konfigürasyonunun etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla yapı çeliği levhalara farklı kaynak ağız konfigürasyonları oluşturulmuştur. Kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, eğme, sertlik testleri yapılmıştır. Ayrıca, kaynak bölgelerinin metalurjik özelliklerinin belirlenmesi için metalografik incelemeler yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda kaynak ağız konfigürasyonunun kaynaklı bağlantıların mekanik ve metalurjik özelliklerine etkisi belirlenmiştir. Mikroyapı çalışmaları sonucunda kaynak metali ve iri taneli bölgede tane sınırı ferriti, widmanstatten ferrit ve asiküler ferrit gibi farklı yapılar oluştuğu tespit edilmiştir. Bütün kaynak ağız konfigürasyonlarında, kaynak metali sertliğinin HAZ ve esas metalden yüksek olduğu belirlenmiştir. Çekme ve eğme testleri sonucunda en yüksek çekme ve eğme dayanımı esas metalden sonra X₂ tip kaynak ağız konfigürasyonu ile yapılan kaynaklı numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca X tip kaynak ağız konfigürasyonları K tip kaynak ağız konfigürasyonlarına göre daha iyi mekanik özellikler göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Özlü tel ark kaynağı (ÖTAK), kaynak oluşu, mekanik özellikler, mikro yapı

1. INTRODUCTION

Welding technology has developed rapidly over the last fifty years. This has led to increasingly widespread use of welded joints in sectors of machine manufacturing, automotive, construction (steel construction), energy (steel oil and gas pipelines, natural gas and petroleum exploration platforms), and pressure vessel production etc. Currently, studies on the weldability of these alloys with the development of new metal alloys continue intensively. However, welding consumables (electrode and powder, etc.) appropriate for each metal or metal

alloy are not available yet. Therefore, welding consumables that can be used in welded joints of these alloys are also developed and produced in parallel with the development of new metal alloys [1]. In the gas metal arc welding (GMAW) methods, filled welding wires are used and alloy elements in these wires can only be used during the production of steel ingots used as the starting material in the production of wires. Therefore, the alloying and strengthening of the weld metal by means of the cover material of the electrodes used in the manual metal arc welding (MMAW) method cannot be performed by using the GMAW methods. In addition, since the weld zone is protected only by one shielding gas atmosphere, it is difficult to use it in open areas with air flows. A flux cored wires have been developed to solve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : bekircevik@duzce.edu.tr

this problem encountered in GMAW methods [2,3]. Thanks to the developed flux cored wires, the FCAW method combining the superiorities of the GMAW method and eliminating the negative effects of submerged arc welding (SAW) methods and covered electrodes (with MMAW) and has been used particularly in shipbuilding industry has started to be used widely [3,4].

Flux cored arc welding (FCAW) method is the same as GMAW welding method in principle. Although these methods are the same in terms of machine hardware, they are defined by different names according to the type of welding wires used [2,4]. While solid welding wires are used in the GMAW methods, wire electrodes filled with slag forming and gas generating alloy elements and deoxidation elements are used in FCAW method [3]. These elements placed in the wire perform the same function as the cover of the electrodes used in the MMAW method, thus they allow the FCAW method to be used in open areas under the air atmospheres [2,3].

In the FCAW method, the heat required for welding is produced through the arc formed between a melting and continuously fed wire electrode and the workpiece, and by the heating of resistance formed by the welding current flowing through the electrode. The welding wire is automatically sent to the arc zone, melts and forms the weld metal [5-7]. In the FCAW method, metal molten in the weld zone is protected by an externally applied shielding gas (such as GMAW) and a shielding gas atmosphere (such as MMAW) emerging as a result of a flux-core composition. When an arc is formed, these elements form welding smoke by burning and increase weld strength by alloying the weld metal [3,4,8]. Various gas combinations are used in GMAW and FCAW methods. Pure argon (Ar), pure helium (He) and CO₂ gases can be used as shielding gas alone and also as a mixture. In addition, by adding oxygen (O₂), hydrogen (H₂) and nitrogen (N₂) gases at different ratios into these gases, different gas compositions (Ar-He-CO₂, Ar-H₂, Ar-N₂, Ar-CO₂, Ar-CO₂-N₂, and Ar-He) are formed and welding processes can be performed. The types and compositions of the selected gases have a significant effect on the microstructure and mechanical properties of the joint material [6,8,9]. In addition to the shielding gas type, numerous factors affect the quality of the welded joint. These are the welding current, voltage, mechanical properties and chemical composition of the joined metal and welding wire, welding position, and welding groove configuration etc. [4,8].

S275 structural steels are widely used as structural steel tubes, construction pipe, foundation pipe, piling tube, sheet, and profiles especially in structural engineering applications and steel constructions. These steels are usually joined by arc welds during erection. Welding groove preparation is required in order to ensure the optimum mechanical properties especially in thick section steels before the welding process. Welding groove configuration facilitates welding process, provides deeper penetration, controlled cooling of the

weld zone, and prevents greatly distortion during welding especially in thick pieces [10]. Studies on the effect of welding groove configuration on welding quality of the steels and other metals joined with different welding methods have been ongoing. In a study İpek and Elaldi [11] joined high-strength armor steel with different welding angles and investigated the effect of angle and geometry of the welding groove on tensile, compression, and bending strength of the welded samples. In their study, they obtained the highest tensile strength at the welding angle of 54° and the V-welding groove geometry. They also determined that the highest compression strength was obtained at the welding angle of 48° and the X-welding groove geometry. In a study, Li et al. [12] welded a 7075-T6 Al alloy using V-welding groove at different angles (0°, 25°, 50°, 75°, and 90°) by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) method and examined the effect of welding groove angle on mechanical properties of the joints. In their study, they found that the weld groove angle had a significant influence on the mechanical properties and the highest tensile strength was obtained at 0° welding groove angle. In their study, Ling et al. [13] joined JIS SS400 structural steel sheets in three different welding groove configurations and examined mechanical and microstructure properties of welded joints. In their study, the highest tensile strength was obtained in the joint made with a double half-rooted V-groove (K-groove) having 35° welding groove angle and 2-mm root width. They determined the highest impact strength in half-V welding groove configuration with 35° angle having a 9 mm root width.

In this study, the effect of different welding groove configurations on mechanical and metallurgical properties of the S275 structural steel joined by using the FCAW method was investigated. Tensile, bending and hardness tests were applied to determine the effect of welding groove configurations on mechanical properties of welded joints. In addition, the microstructures and grain morphology occurred in the weld metal and the heat affected zone (HAZ) which is under the effects of the weld metal and heat were evaluated.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Materials

In this study, four different welding groove configurations were formed in a milling machine on the S275 construction steel sheets with sizes of 200×80×10 mm and joined with the FCAW method. Table 1 shows chemical compositions of S275 structural steel and welding wire, Table 2 shows their mechanical properties, and Figure 1 shows the microstructure image of the base metal.

Table 1. Chemical composition of the base metal and the welding wire (wt. %)

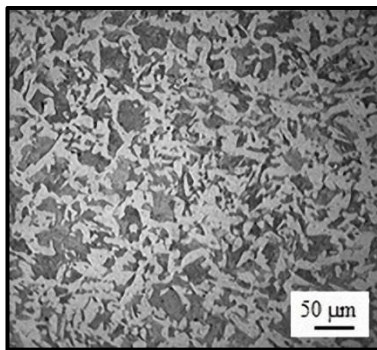
	C	Si	Mn	P	S
S275 structural steel	0.21	0.3	1.5	0.045	0.045
Rutile flux cored wire	0.04	0.6	1.4	0.015	0.015

Table 2. Mechanical properties of the base metal and the welding wire

	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	% Elongation
S275 structural steel	min. 245	612	34
Rutile flux cored wire	420	500-640	min. 22

Table 3. Welding parameters

Welding current	Welding voltage	Wire speed	Welding speed	Gas flow rate
150 A	24 V	5 m·min ⁻¹	5 mm·s ⁻¹	12 lt·min ⁻¹

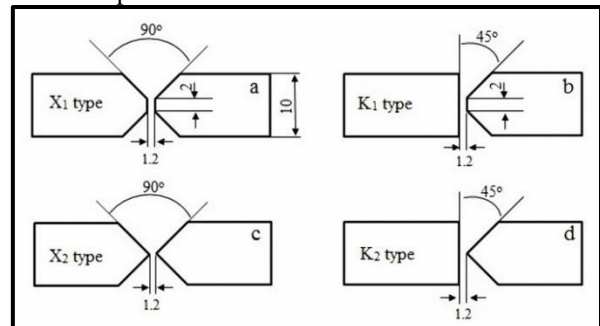
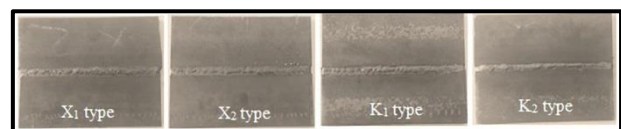
**Figure 1.** Microstructural image of the base metal

2.2. Methods

Welding grooves were opened on the steel sheets as seen in Figure 2 and they were centered by leaving a 1.2 mm root gap. The welded samples were coded as X₁ type, X₂ type, K₁ type and K₂ type. Mixed gas (Ar 86%, CO₂ 12%, O₂ 2%) was used as a shielding gas in welding processes. Rutile flux-cored wire (EN ISO 17632-A) with a diameter of 1.2 mm was used as the welding wire. In the production of welded samples, GKM 420-2W type gas metal arc welding machine was used. The welding processes were performed in the horizontal position by using the welding parameters in Table 3. Values of the welding parameters used in the study were decided as a result of the performed preliminary studies. The welding processes were carried out bidirectionally in two passes and they were left themselves to cool. Figure 3 shows the welded samples.

In addition to the metallographic tests, the joined samples were also subjected to mechanical tests such as hardness, tensile and bending tests. Three tensile samples, three bending samples, and one microstructure and hardness sample were prepared from welded samples. Tensile test samples were prepared according to ASTM-E8 standard. The bending test samples were produced according to TS EN ISO 5173 standard. Tensile tests were performed by using the BME-T series universal tensile tester with 100

kN capacity. Three-point bending tests were performed by using a 50 kN Instron 3369 tensile/bending tester at a test speed of 10 mm·min⁻¹ and a 60-mm support opening. Grinding, polishing, and etching processes were applied to the microstructure and hardness samples by using standard methods. The samples were etched with a 2% nital solution and examined by using a Metkon Inverted Type metal optical microscope. Moreover, the fracture surfaces of sample after tensile tests were examined by a scanning electron microscope (FEI Quanta FEG 250). The hardness distribution of the welded samples was determined in Rockwell B (HR_B) by using an universal hardness tester. The hardness processes were carried out with a 1/16" steel ball under a load of 100 kgf for 10 s and in 21 points with 2 mm intervals.

**Figure 2.** Welding groove configurations**Figure 3.** Images of welded samples

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Microstructure

Figure 1 shows the microstructure image of the base metal. When the microstructure of the base metal was examined, it was observed that it had generally coaxial grain structure. Figure 4 shows welding metal

microstructures of the welded samples. The microstructure of the weld metal of all samples consisted of fine acicular grains. When the microstructures of the weld metal were examined, it could be determined that various structures such as acicular ferrite, ferrite, bainite and perlite occurred during solidification. Sönmez and Ceyhan [4], Ling et al., [13], and Kaya et al., [14] reported that grain boundary ferrite, widmanstatten ferrite, acicular ferrite, polygonal ferrite, bainite, and perlite may be present in the weld metal. Percentages of those phases changes depending on the cooling rate after the fusion welding of low carbon and low alloy steels.

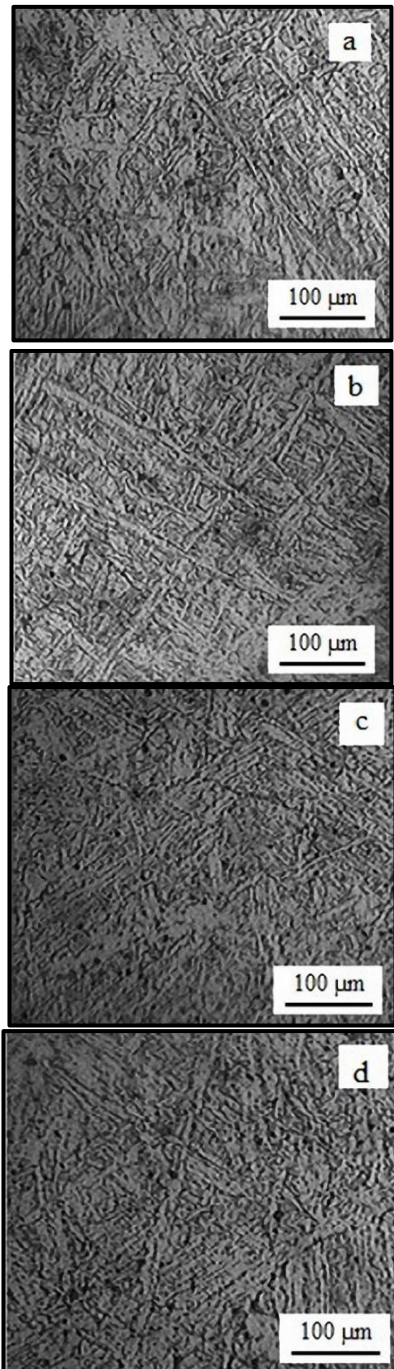


Figure 4. Microstructure of the weld metal, a) X₁ type, b) X₂ type, c) K₁ type, d) K₂ type

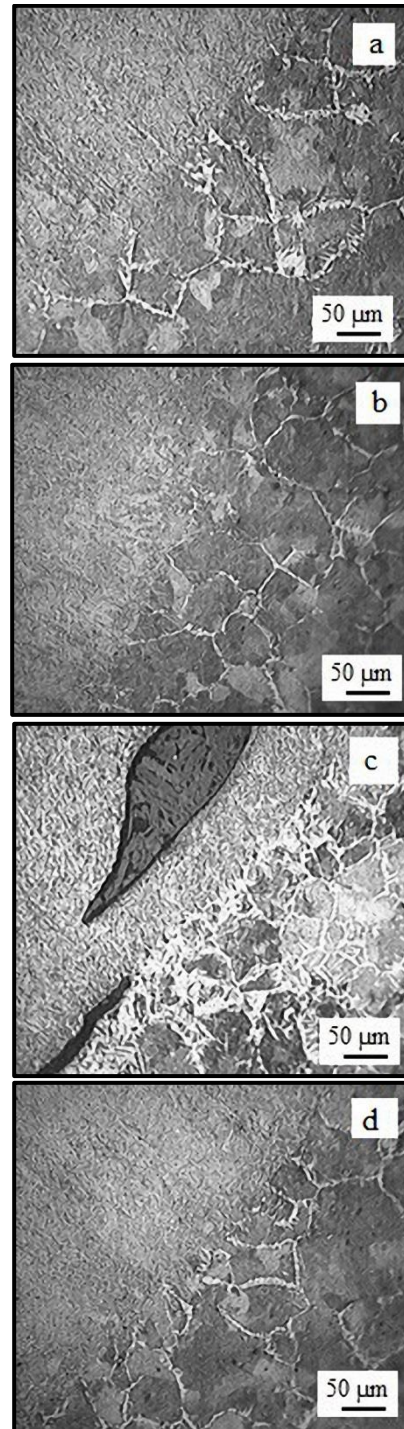


Figure 5. Microstructure of HAZ, a) X₁ type, b) X₂ type, c) K₁ type, d) K₂ type

Figure 5 shows microstructures of the heat affected zone (HAZ) of the welded samples. When the microstructures were examined, it was observed that various structures such as grain boundary ferrite and Widmanstätten ferrite occurred during solidification in the weld metal and transition region. It was found that micro-void defect occurred in the weld metal in joint with K₁ type welding groove configuration. In addition, a joint defect (insufficient penetration) were occurred in the weld metal-HAZ transition zone of the same sample. Grain

coarsenings occurred at HAZ in all samples. Kaya et al., [14] and Durgutlu et al., [15] stated that coarse grains formed with the effect of heat input in the zones nearest to the weld metal in the arc welding methods.

3.2. Hardness Measurements

Figure 6 shows the hardness distribution of the weld zone (base metal, HAZ, weld metal) of the samples joined in different welding groove configurations by using the FCAW method. In welded samples, the highest hardness values were measured in the weld metals, which was followed by HAZ and base metal, respectively. The mean hardness of the base metal was determined as ~ 84 HR_B. When the mean hardness values of the weld metal were compared, it was found as 95 HR_B in X₁ sample, 95 HR_B in X₂ sample, 98 HR_B in K₁ sample, and 99 HR_B in K₂. According to the obtained results, the welding groove form affected the weld metal hardness. When the hardness values of the welded samples measured in HAZ were compared, they were obtained as 95 HR_B in X₁ sample, 92 HR_B in X₂ sample, 92 HR_B in K₁ sample, and 93 HR_B in K₂ sample. The fact that the hardness values measured from different regions were close to each other is thought to be caused by the fact that the temperature and welding parameters between passes were appropriately selected and were under control [3]. Kaya et al., [14] stated that the hardest zone was the weld metal in the joining of steels with carbon content less than 0.22% via arc welding and the hardness values decreased from the weld metal to the base metal. Similarly, in the study conducted by and Kılınçer and Kahraman [16], Aksöz et al., [17] through arc welding they reported that the highest hardness values in the weld zone were obtained in the weld metal, which was followed by HAZ and base metal, respectively. In the literature [14-18], the hardness is recommended not to exceed 350 HV (~ 109 HR_B) as a measure against cracking in HAZ in welding of low-carbon low alloy steels. Hardness distributions of welded samples were observed to be below this critical value. In the macro and micro examinations made on welded samples, no crack defect was found in the weld seams and weld zone.

3.3. Tensile Strength

Figure 7 shows the tensile test results of the samples joined with different welding groove configurations by using the FCAW method. As a result of the tensile test, it was found that the tensile strength of the base metal was 612 MPa and the % elongation was 34%, and it fractured near to clutch part of the base metal. When the tensile test results obtained from welded joints were compared, the highest tensile strength was obtained from the welded samples joined with X₂ welding groove configuration. 589 MPa tensile strength was obtained in the sample joined with the X₂ welding groove configuration. When the tensile strength performance of this sample was compared with the base metal, a decrease of 3.8% was observed.

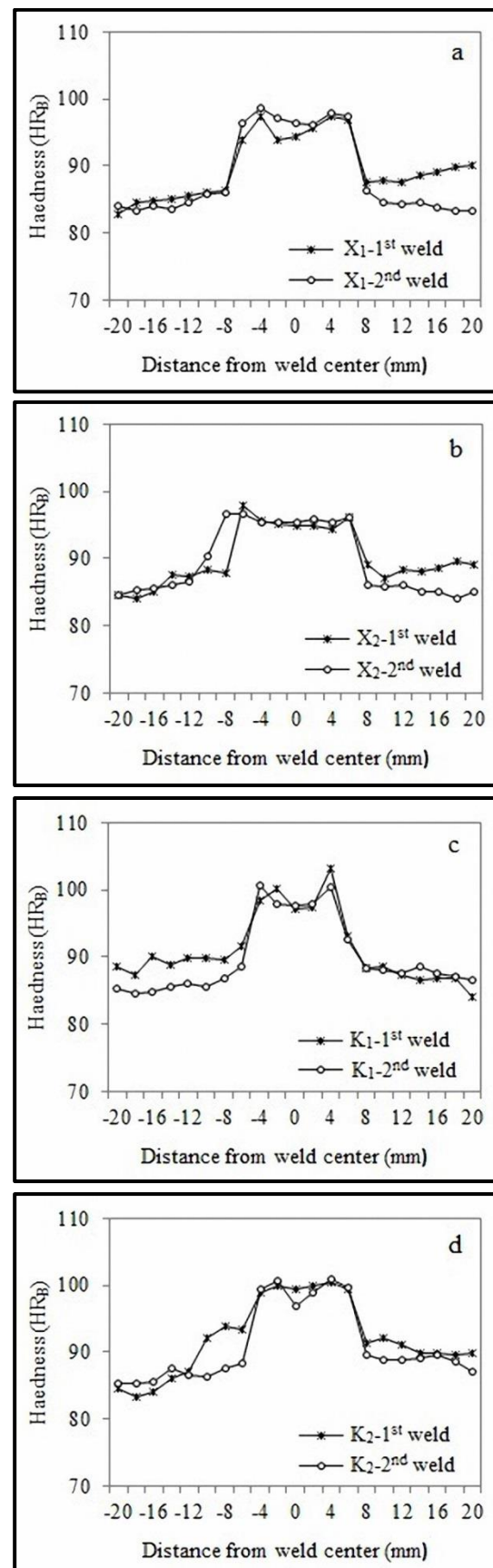


Figure 6. Hardness distribution of the welded samples, a) X₁ type, b) X₂ type, c) K₁ type, d) K₂ type

When the % elongation of the sample joined with the X₂ welding groove configuration was compared with % elongation of the base metal, a decrease of 9.7% was observed. In the tensile strengths of the welded samples joined with the K₂ and X₁ welding groove configurations, decreases of 12.4% and 14.2% occurred, respectively. When the % elongations of these samples were compared, it was determined that while there was a decrease of 19.7% in the sample joined with K₂ welding groove configuration, this decrease was 14.2% in X₁ welding groove configuration. The lowest tensile strength was obtained in the joint made by the K₁ welding groove configuration and in this sample the tensile strength performance value reduced at the rate of 30.7% compared to the base metal and was 424 MPa. When the % elongation amount of the sample joined with the K₁ welding groove configuration was compared with the % elongation amount of the base metal, a decrease of 38.2% occurred. Fracture behavior of welded samples occurred in ductile style. In addition, the fracture surfaces of the welded samples was observed that the microporosity. The decrease of tensile properties was caused by micro defects in the weld seam (Fig. 8). Kaya et al., [14] stated that the first property sought in the welded joints should have the strength of joint to be the same as or close to that of the base metal. In the study, it was determined that the welding groove configuration was effective in the tensile strength of the welded samples and the tensile strength nearest to the base metal was obtained in the joint performed with the X₂ welding groove configuration. İpek and Elaldi [11] stated that the welding groove geometry and angle were effective on the tensile strength of the high-strength armor steel joined with the GMAW method and they obtained the highest tensile strength in the V-welding groove geometry at the welding angle of 54° in their study. The fracture occurring in the welded samples as a result of the tensile test was usually associated with the base metal-weld metal transition zone. HAZ and weld metal-base metal transition zone are the most critical region of welded joints.

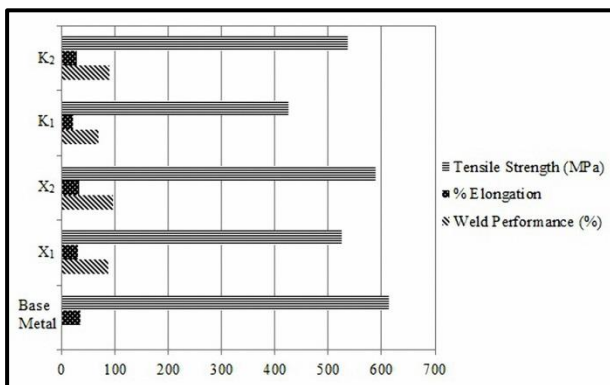


Figure 7. Tensile test properties of the welded samples.

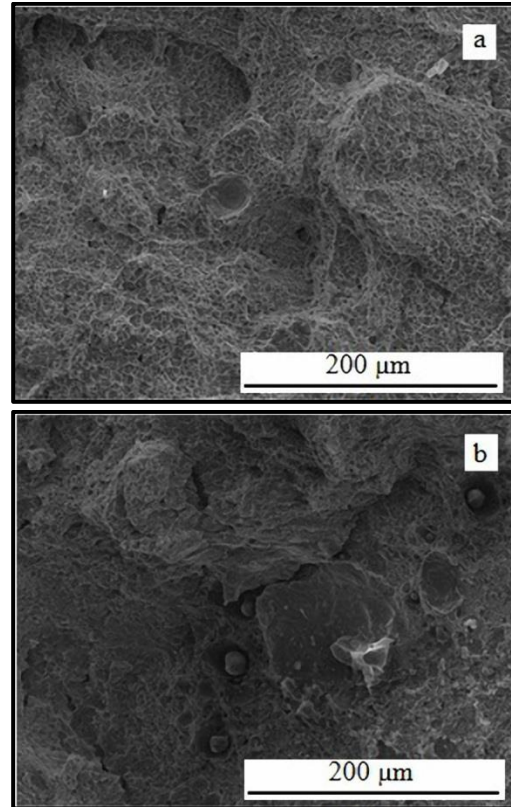


Figure 8. Fracture behaviour of the welded samples, a) X₂, b) K₁

3.4. Bending Strength

Figure 9 shows the bending test results of the welded samples joined with the base metal and different welding groove configurations. When the bending test results were examined, the maximum bending strength of the base metal was determined to be 1247 MPa. The bending strength of the welded samples was found to be lower than the base metal. When the bending test results obtained from the welded joints were compared, the highest bending strength was obtained from weldments prepared with X₂ type welding configuration. In a sample joined with such welding groove configuration, a bending strength of 1068 MPa was obtained. When the bending strength performance of this sample was compared with the base metal, a decrease of 14.3% was determined. Decreases of 20% and 23.6% were determined in the bending strengths of the welded samples joined with the X₁ and K₂ type welding configurations, respectively. The lowest bending strength was obtained in the joint made with the K₁ type welding configuration. The bending strength performance of the sample joined with this type of welding groove configuration decreased by 30% compared to the base metal and was determined as 874 MPa. In the bending test results, it was observed that fractures occurred in all samples. In all welded samples, the fracture occurred mainly near to the base metal-welding metal transition zone.

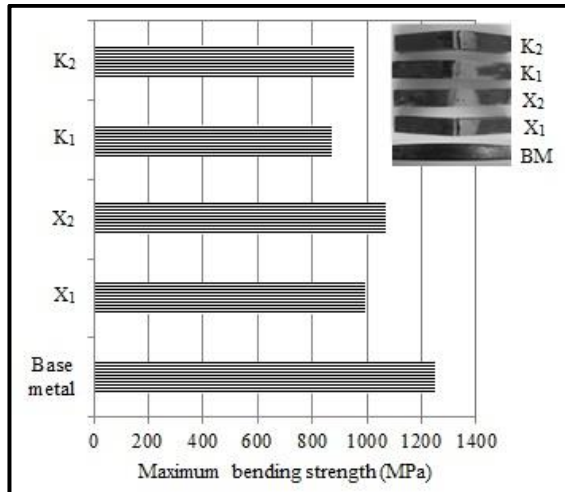


Figure 9. Bending test properties of welded weldments.

4. CONCLUSION

The S275 structural steel sheets were joined in different welding groove configurations by using FCAW method and the microstructure and mechanical properties of the welded joints were investigated and the results obtained are summarized below.

1. The study firstly shows that due to fact that various stresses such as tensile, compression, bending, etc might be occurred on most steel constructions during welding joint, choosing and determination the most appropriate welding groove configuration is very important.
2. Experimental results show that welding groove configuration has great influence on the mechanical and microstructure properties of the weldments.
3. As a result of microstructure studies, it is seen that different structures such as ferrite, widmanstatten ferrite, and acicular ferrite were formed in the weld metal and coarse-grained region.
4. It is observed that hardness of the weld metal was higher than HAZ and base metal in all joints.
5. Some defects were seen in the weldments with K₁ type welding groove configuration causing to obtained lower values of mechanical properties.
6. The highest tensile and bending strengths were obtained from the welded samples with X₂ type welding groove configuration.

REFERENCES

- [1] Kahraman, N. and Gülenç, B., "Modern Kaynak Teknolojisi", *Eta-Mat Basım Yayın Ltd. Şti.*, Ankara, (2013).
- [2] Çevik, B., "Investigation of mechanical and microstructure properties of S275 structural steel joined by using different flux cored wire", *Journal of Polytechnic*, 20(3): 675-680, (2017).
- [3] Morimoto T., "Developments in flux-cored wire for gas-shielded arc welding" *Kobelco Technology Review*, 26: 49-56, (2005).
- [4] Sönmez U., Ceyhan V., "Investigation of mechanical and microstructural properties of S 235 JR (ST 37-2) steels welded joints with FCAW", *Kovove Materialy-Metallic Materials.*, 52: 57-63, (2014).
- [5] Ghazvinlo, K.R. and Honarbakhsh, A., "Effect of gas-shielded flux cored arc welding parameters on weld width and tensile properties of weld metal in a low carbon steel", *Journal of Applied Science*, 10: 658-663, (2010).
- [6] Gülenç, B., Develi, K., Kahraman, N., Durgutlu, A., "Experimental study of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in MIG welding of austenitic stainless steel", *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(13): 1475-1481, (2005).
- [7] Praven, P., Yarlagaadda, P.K.D.V., Kang, M.J., "Advancements in Pulse Gas Metal Arc Welding", *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164-165, pp. 1113-1119.
- [8] Karadeniz E., Ozsarac U., Yildiz C., "The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes", *Material and Design*, 28: 649-656, (2007).
- [9] Katherasan D., Sathiya P., Raja A., "Shielding gas effects on flux cored arc welding of AISI 316L (N) austenitic stainless steel joints", *Materials and Design*, 45: 43-51, (2013).
- [10] Oğuz, B., Arc Welding, *Oerlikon-Erdini Basım ve Yayınevi*, İstanbul, 1989.
- [11] İpek, N.E. and Elaldi, F., "Analysis of welding groove angle and geometry on strength of armor steel", *Materials and Manufacturing Processes*, 27: 1437-1441, (2012).
- [12] Li, L., Orme, K., Yu, W., "Effect of joint design on mechanical properties of Al7075 weldment", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 14: 322-326, (2005).
- [13] Ling, K.H., Fuh, Y.K., Wu, K.L., Kuo, T.C., Huang, C.Y., "Groove configurations of a flux-cored arc welding process used in critical structures of precision mechanical presses—mechanical and metallurgical studies", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78: 1905-1916, (2015).
- [14] Kaya, Y., Kahraman, N., Durgutlu, A., Gülenç, B., "Investigation of the mechanical properties of different thickness of the Grade A ship plates joined by submerged arc welding", *e-Journal of New World Science Academy*, 5: 348-352, (2010).
- [15] Durgutlu, A., Kahraman, N., Gülenç, B., "Investigation of effect of fluxes on microstructure and mechanical properties in submerged arc welding", *The Journal of the Industrial Arts Education Faculty of Gazi University*, 10: 1-8, (2002).
- [16] Kılınçer S., Kahraman N., "MIG welding of AISI 409 and Ç1010 steel using an austenitic electrode and investigation of their mechanical properties", *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 24 (1): 23-31, (2009).
- [17] Aksöz, S., Ada, H., Özer, A. "Tozaltı ark kaynak yöntemiyle üretilen API 5L x70 kalite çelik boruların mikroyapı ve mekanik özellikleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(1): 55-64, (2017).
- [18] Akay, A.A., Kaya, Y., Kahraman, N., "Joining of materials with different properties through submerged arc welding process and destructive and non-destructive testing of the joints", *Sakarya University Journal of Science*, 17: 85-96, (2013).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Design and implementation of a Thrust Vector Control (TVC) test system

Bir İtke Vektör Kontrol (İVK) test sistemi tasarımı ve uygulaması

Yazar(lar) (Author(s)): Ahmet ÜNAL¹, Kemal YAMAN², Emre OKUR³ ve Mehmet Arif ADLI⁴

ORCID¹: 0000-0001-5483-3188

ORCID²: 0000-0003-3063-391X

ORCID³: 0000-0002-3101-9041

ORCID⁴: 0000-0002-3223-064X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ünal A., Yaman K., Okur E. ve Adlı M.A., "Design and implementation of a Thrust Vector Control (TVC) test system", *Politeknik Dergisi*, 21(2): 497-505, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.404009

Bir İtki Vektör Kontrol (İVK) Test Sistemi Tasarımı ve Uygulaması

Araştırma Makalesi / Research Article

Ahmet ÜNAL^{1*}, Kemal YAMAN¹, Emre OKUR¹, Mehmet Arif ADLI²

¹ The Scientific and Technological Research Council of Turkey-Defense Industries Research and Development Institute, (TÜBİTAK SAGE) 06261, Ankara, Turkey

² Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, 06500, Turkey
(Geliş/Received : 25.01.2017 ; Kabul/Accepted :25.02.2017)

ÖZ

Roket motorları, üretilen itki kuvvetine bağlı olarak performanslarının değerlendirilmesi için statik olarak test edilmektedir. Roket motoru statik test değerlendirmesinin en önemli parametrelerinden biri motorun ürettiği itki değeridir. Üretilen itki, yük hücreleri ile donatılmış bir yapısal eleman olan İtki Vektör Kontrol (İVK) Ölçüm Sistemi kullanılarak ölçülür. Bu çalışmada, katı yakıtlı roket motorunun itki performansını ölçmek için bir yük sensörü sistemi tasarlanmıştır. Test sisteminde, altı serbestlik derecesine göre roket motorunun ateşleme boyunca üretmiş olduğu kuvvetler ve momentler ölçülmüştür. Elde edilen deneysel sonuçların ve analiz sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Tasarlanan stand, 50 [kN]'a kadar eksenel itki üreten roket motorların eksenel itkisini, yanal (yanlış hizalanmış) itki bileşenlerini ve yuvarlanma momentini ölçebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İtki vektör kontrol, itki ölçümü, roket motoru, test standı, sonlu elemanlar.

Design and Implementation of a Thrust Vector Control (TVC) Test System

ABSTRACT

The rocket engines are tested statically to evaluate the performance of engine based upon thrust produced. One of the most important parameters of the rocket engine static testing evaluation is to measure the thrust produced by the engine. The thrust produced is measured using a Thrust Vector Control (TVC) test system which is a structural element equipped with load cells. In this study, a load sensor system was designed to measure the propulsion performance of a solid propellant rocket motor. The forces and moments of the rocket motor with respect to the six degrees of freedom of the test system were measured during firing. It is seen that the obtained experimental results and the analysis results are compatible with each other. The designed stand is capable of measuring axial thrust and lateral (misaligned) thrust components, and the rolling moment for rocket motors producing axial thrust up to 50 [kN].

Keywords: Thrust vector control, thrust measurement, rocket motor, test stand, finite elements

1. INTRODUCTION

Measurements related to performance and reliability of thrust systems are necessary at the stages of development, evaluation and verification of design are required. One of the tests done in this context is static firing test. The main variables measured during the static firing tests are the thrust force, the combustion chamber pressure and various temperature data [1-3]. There are various methods for thrust measurement such as direct force measurement, measurement of exit properties of exhaust gases and momentum balance establishment. The most common feature of these methods is using direct force measurement that requires a special mechanism. The mechanisms for measuring force which are called "Thrust Measurement System" are basically composed of a fixed lattice, a mobile carrier system, support columns, load cells and a calibration system. In the literature Brimhall [4, 5] et al. developed a six degree

of freedom (DOF) solid rocket test stand. The plant is used by university groups and commercial companies who want to stay in the Cape Canaveral Air Force Station, and primarily, to acquire approval of their engines for a government approved shuttle flight. This thrust stand has been developed by the Florida Institute of Technology to provide reliable static motor testing for solid rockets with the collaboration of Florida and US Air Force 45th Spacewalk (45th SW). By using this device, the torque of the stand, axial thrust, orthogonal (misaligned) thrust components and solid motors that produce a thrust force of up to 44500 N (10000 lb) can be measured. The data collection system of the thrust stand consists of five sensors for both thrust categories. The Thrust Category 1 consists of 4,45 [kN] (1000 lb) engines. The Thrust Category 2 consists of larger engines producing a thrust of 4,45 [kN] (1000 lb) to 44,5 [kN] (10000 lb).

Gligorijevic et al. [6] constructed a special TVC system in order to measure the side thrust force. They reported that the results obtained from the developed system are

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ahmet.unal@tubitak.gov.tr

consistent with the numerical (CFD) results. Wekerle et al. [7], present a new TVC system for new Brazilian launch vehicles. They develop a high performance, closed-loop servo hydraulic actuator controlled TVC system. The dynamic responses of TVC system were determined experimentally and its mathematical model was derived. Experimental results show a satisfactory consistence with the proposed model. However, the models have to be verified with non-linear joint stiffness of the flexible nozzle. Unlike classical TVC design, some studies similar to the 6-DOF hexagon mechanism are also found in the literature [8]. The results show that a TVC system, which can accurately measure the thrust of a rocket motor, requires at least 3-DOF degrees of freedom. In the work of Milos et al., the designed hexagon-shaped TVC platform can be used to test very low thrust systems, but considering the high thrust case it does not yield reliable results due to low strength of frame.

Nowadays, solid propellant rocket engines have been replaced by hybrid systems [9-11]. In the Prince et al's [9] study "L" type ground test system was used to measure the thrust of a hybrid rocket. The ground test was performed in an "L" configuration. That is, the oxidant tank was suspended in an S-load cell to measure the oxidant mass flow rate, and the oxidizer passed through a smooth 90-degree curve to pass horizontally through the flight ball valve to the combustion chamber. Thus, the combustion chamber was bolted to the floor with a load cell around the front of the combustion cell for propulsion measurement, supported by a horizontal structure. The cold flow tests were continued until the desired mass flow rate was reached and then the actual hot fire occurred. Wright et al. [10] developed a laboratory scale, 6-DOF, hybrid-TVC system. The thrust stand proved to be stable during calibration tests. Thrust force vector components and roll, pitch, and yaw moments were calculated for test firings with an oxygen mass flow rate in the range of 0,0174–0,0348 kg s⁻¹.

In micro scale, under the vacuum condition a new micro thrust test stand was developed by Wang et al. [11]. Similarly, a new test stand with a very high sensitivity, which can feel a small push at 0,1N, was designed by Lugini and Romano [12]. According to the ballistic pendulum principle, the test system is suspended in the air. Acceleration is measured precisely according to the amount of movement back and forth and right to left during the experiment.

The test ramps developed on the macro scale [13, 14] as opposed to the micro scale are mostly used in in space shuttle design research. Smiley et al. [13] developed a macro scale TVC for a rocket system (Dream Chaser/Atlas V) to launch into space. This test program was included in the Dream Chaser design process. As a result of the test, the information that will have critical preliminaries in the overall development of the thrust system architecture is gained.

In this study, a TVC Performance Test System has been developed to determine axial and lateral thrust of a rocket motor with thrust vector control. The data obtained from the TVC Performance Test System shall be used as input to the guidance control of the ammunition used by the solid propellant rocket motor. Therefore, improving the sensitivity of the test system plays a critical role. A dynamic model of the system with computer aided PATRAN-NASTRAN and MATLAB software have been created. The dynamic model will, in real terms, be influential inputs to the TVC Performance Test System. Outputs of the dynamic model will be compared to the static firing test data. As a result of comparison, findings for improvement will be reflected in the real system. Here some theoretical relation will be given with respect to static loads for conceptual design of TVC test system shown in Fig. 1.

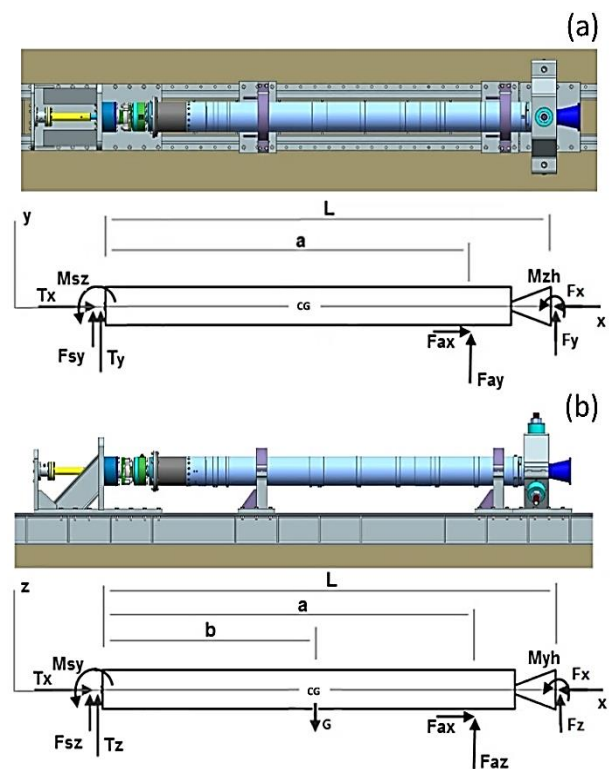


Figure 1. TVC test system static loading boundary conditions in (a) z-x plane and (b) x-y plane

In x-y plane the static equilibrium equations can be written as follows:

$$\sum F_x = 0: T_x + F_{ax} - F_x = 0 \tag{1}$$

$$\sum F_y = 0: T_y + F_{sy} + F_{ay} + F_y = 0 \tag{2}$$

$$\sum M_z = 0: M_{sz} + a F_{ay} + L F_y + M_{zh} = 0, (M_{sz} = 0, M_{zh} = 0) \tag{3}$$

In $x-z$ plane,

$$\sum F_z = 0: T_z + F_{sz} + F_{az} - G + F_z = 0 \quad (4)$$

$$\sum M_z = 0: M_{sz} - bG + aF_{az} + LF_z + M_{zh} = 0, \quad (M_{sz} = 0, M_{zh} = 0) \quad (5)$$

The horizontal and lateral forces on sensors (F_{ay} and F_{az}) can be determined by the following equations:

$$F_{ay} = -(F_{left} \cos 30^\circ - F_{right} \cos 30^\circ) \quad (6)$$

horizontal lateral force on sensors and,

$$F_{az} = -(F_{right} \sin 30^\circ + F_{left} \sin 30^\circ - F_{top}) \quad (7)$$

vertical lateral force on sensors.

Lateral thrust measurement is mainly based on the data and calculations obtained from reaction forces. For the lateral thrust component occurring in the $x-y$ plane the Eq. (3) is used and for the component formed in the $x-z$ plane the Eq. (5) is used. The unknown reaction forces of F_{ay} and F_{az} are determined from the measurements of sensors placed at an angle of 120 degrees using Eq. (6)

and Eq. (7). The moment values of the friction generated in the joint are neglected because they are very small. Other unknown parameters are taken from the results of rocket engine combustion analysis as fuel weight G and location of fuel center of gravity b .

2. MATERIALS AND METHOD

The thrust stand given in Fig. 2 is designed to test a wide range of rocket motors, including engines with diameters up to 290 mm and lengths up to 3,5 m. The concrete pad has to be at least 3,5 m long to adjust the largest engine and to fixed a set of threaded bars. In this way, the back of structure can be carried to any of the holes, in which all motor spacings are provided. On top of the concrete base there are two basic structures: backward sensor structure and forward sensor structure (Fig. 2).

The forward structure is designed to withstand the axial thrust of the solid propellant rocket motor.

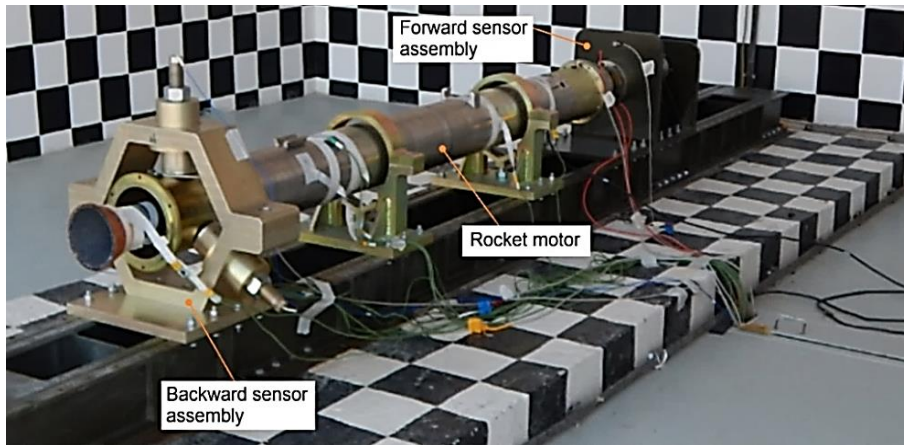


Figure 2. Instrumented final test Stand assembly

Moving plates in the forward direction allow small adjustments to the motor alignment in the x and y directions. The universal joint used in the system eliminates measurement errors caused by possible angular misalignment between the motor and forward structure. In other words, by using this connection, load measurement is always provided in the axial load, but

moment load is prevented. It also provides ease of installation (See Fig. 3).

A loadcell and a torque sensor is installed between the front end of the engine and the forward structure to measure axial thrust and torque. The measuring devices and sensors used in the tests are listed in Table 1

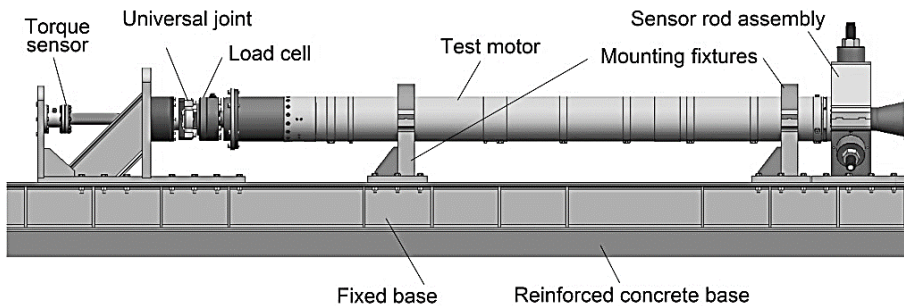
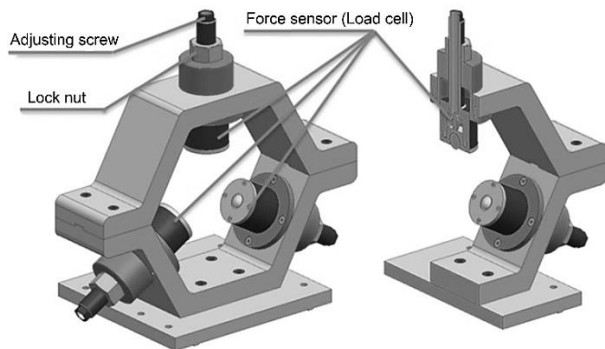


Figure 3. CAD model of TVC test system and its components

Table 1. Measuring devices and equipment used in experiments

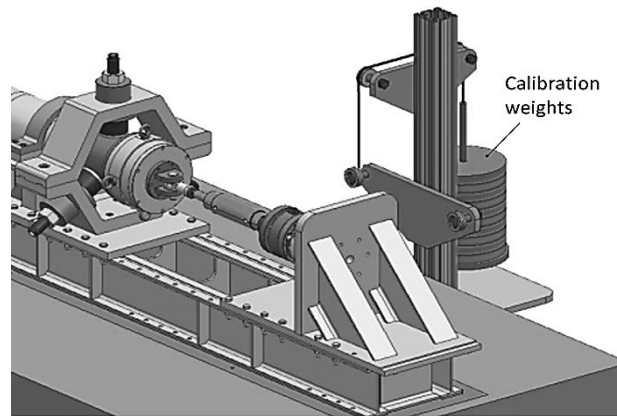
Device and equipment	Brand-Model	Type	Capacity	Precision	#
Load cell	HBM-U10M	Strain-gage	50 [kN]	2 [mV/v]	1
Force sensor	PCB 208-A14	ICP type	4,448 [kN]	1124 [mV/kN]	3
Data acquisition system	NI_PXIe-1073 CHASSIS and NI_PXI-4462 module	AC/DC coupling	with 4 canals	-	1

The backward sensor structure consists of a steel plate and a fixed base. The back structure is floated in the guideways as the moving part of the shoe while the forward structure has a permanent mounting. The fixed support acts like a collar holding the motor. The three devices (Sensing arms), which are placed at 120° intervals in the fixed rest, can be adjusted to the center of the station and allow it to be centered between 50 mm and 290 mm diameter as shown in Figure 4.

**Figure 4.** CAD model of sensing rods assembly

The arms include a single axis piezoelectric force sensor that measures the motor thrust misalignment. The use of bearings in this frame provides a relatively frictionless contact surface between the back structure and the motor.

The coefficient of friction of spherical transfer elements at the beginning of motion is generally in the range of 0,01-0,015 [15]. If it is assumed that the side impact is 10 times lower than the axial thrust, the spherical transfer element and the axial load measurement can be made with about 0,1% uncertainty. A sensing and data acquisition system is used in the thrust stand to obtain thrust and moment data. The detection system consists of five sensors or transducers placed in such a way as to allow six degrees of freedom. Remember from the design review, a force transducer and torque converter are fixed between the front-end section of the motor and the adjustment plates of the front structure.

**Figure 5.** Calibration setup

The calibration test setup is a measurement system in which the TVC system equipped with all gauges is calibrated with static loads before testing. This calibration system also should be checked for performing the verification properly before the test. The calibration adapter and other auxiliary parts according to the dimensions of the motor body which will be used for calibration purposes are shown in Fig. 5. Axial thrust is simulated by means of a hydraulic piston, and both lateral thrust and rolling moment can be created with the help of hooks. Thus, the system is verified by comparing the forces and moments applied to the system with the data obtained from the test system.

For preparing the dynamic model PATRAN® and NASTRAN® finite element analysis software were used. Before the analysis, the mass-spring models of whole system were drawn. The rocket motors and adapters models are defined as a one-dimensional beam element. In Figure 6a CAD model and applied boundary condition of sensing rod assembly and in Figure 6b its FEM mesh model is given respectively. In the finite element model, 467707 10-node TET10 solid elements and 48 RBE2-type multi-point constraint rigid elements for bolts and rigid connections are used. In addition, one RJOINT multi-point delimited element is used to model the articulated model.

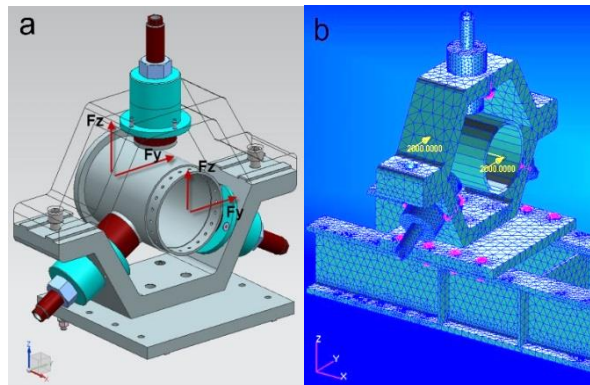


Figure 6. (a) CAD and (b) FEM-mesh model of sensing rods assembly

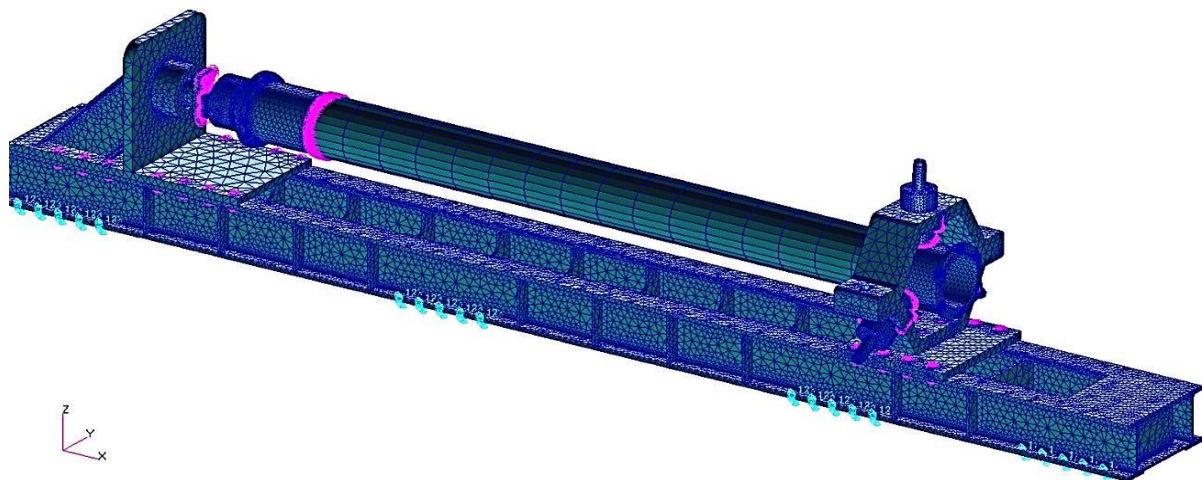


Figure 7. FEMs of TVC system

Table 2. Material properties used in analyzes [16]

Materials	Elasticity, E [GPa]	Poisson ratio, ν	Density [kg/m ³]	Yield stress [MPa]	Components
Aluminum (AA 6061)	68,3	0,33	2710	241	Sensor rod assembly
Steel (AISI/SAE 4140)	207	0,30	7830	1210	Test motor fitting parts
Steel (S235XX)	210	0,30	7850	235	Fixed base, torque sensor assembly, mounting fixtures

The test motor is modeled as a one-dimensional beam element (Fig. 7)

TVC performance test assembly parts consist of steel and aluminum material. In the analyzes, the materials are

modeled as linear elastic. Table 2 gives the materials and their properties used in the analyzes.

3. RESULTS

Axial and lateral thrust is measured during static firing test. Angles of horizontal, vertical and lateral force are

computed using gained test results. These angles are used for input as thrust vector into the program. In Fig. 8 the high-speed camera image of rocket motor plume is given during the thrust test.



Figure 8. High-speed camera image of rocket nozzle plume during the test

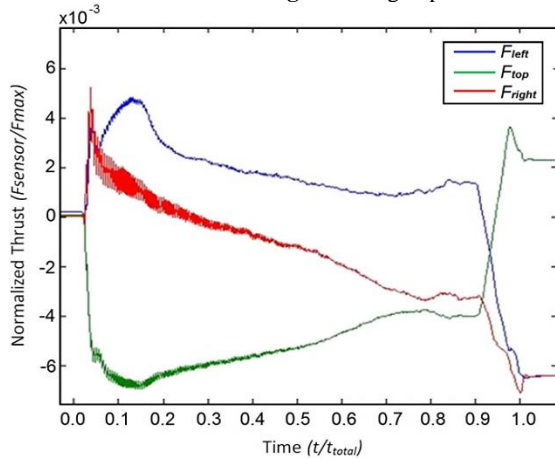


Figure 9. Thrust variation with time obtained from lateral thrust sensors

According to the data acquired from the sensors given in Figure 9. The reaction forces coming from the support point A formed vertically and horizontally were calculated using Eq. (6) and Eq. (7) using the data given in Fig. 9. In Fig. 10a shows a normalized curve from the x -axis longitudinal load cell mounted to the front end. And in Figure 10b, the compared lateral thrust components obtained using Eq. (3) and Eq (5) (See in Section 1).

In the normalization procedure, the instant thrust value read during the process is divided by the maximum thrust (x axis) value. As can be clearly seen from the thrust-time graphs, the thrust reaches its maximum value in a short time, i.e. about 0,05 unit time from the zero-thrust level and remains approximately horizontal for about one-unit time at this peak value. At about 0,9 unit time, thrust value suddenly falls back to zero. The similar results were obtained with Smiley et al. [13].

As a consequence of this, the rocket motor produced a stable thrust during combustion. It can be easily seen in Fig. 10b that, F_x is about 100 times greater than F_z and 250 times greater than F_y . Therefore, the most significant parameter that effect the TVC test stand design is the axial force.

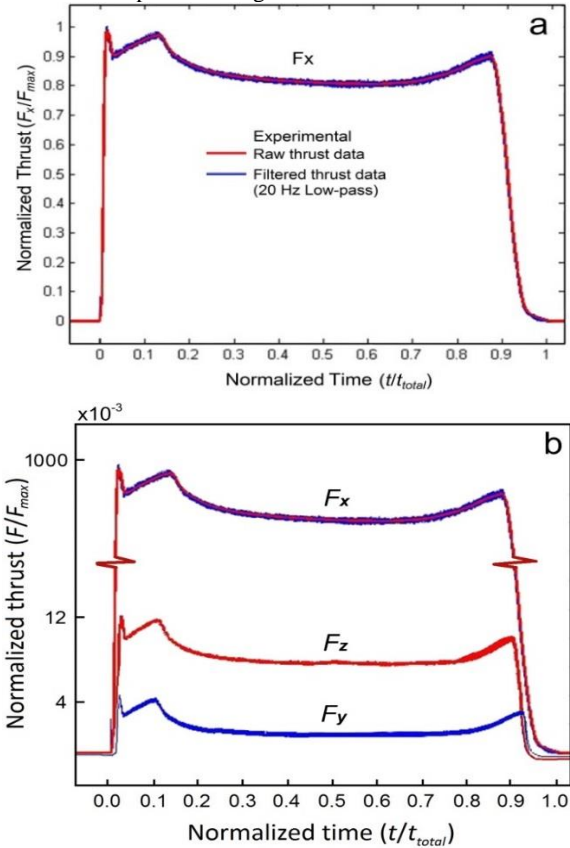


Figure 10. Thrust variation with time for (a) axial force (F_x) and (b) comparison of lateral-y (F_y) and lateral-z (F_z) with axial force (F_x)

In normalization procedure, the instant thrust value read during the process is divided by the maximum thrust (x axis) value. As can be clearly seen from the thrust-time graphs, the thrust reaches its maximum value approximately 0,05 unit time from the zero-thrust level and remains horizontally between 0,2 and 0,8 normalized time at this peak value. At about 0,9-1,0 normalized time interval, thrust value suddenly falls back to zero. The similar results were obtained with Smiley et al. [13]. As a consequence of this, the rocket motor produced a stable thrust during combustion. It can be easily seen in Fig. 10b that, F_x is about 100 times greater than F_z and 250 times greater than F_y . Therefore, the most significant parameter that effect the TVC test stand design is the axial force.

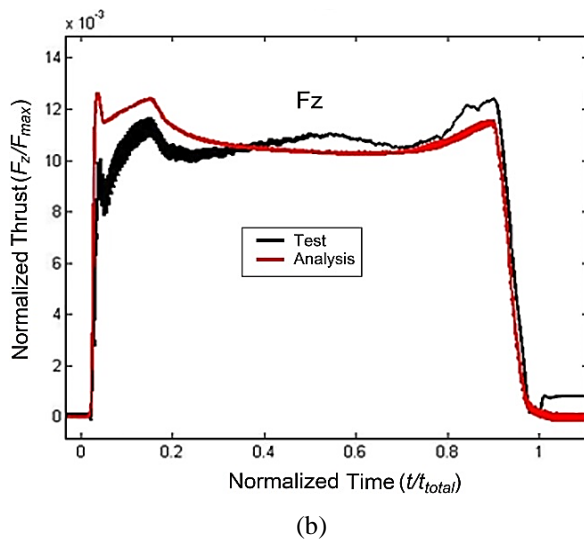
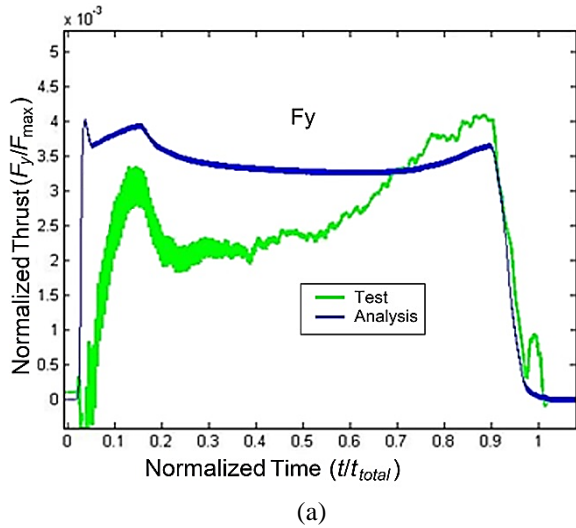


Figure 11. Comparison of the measured thrust to the results obtained from the analysis for (a) F_y and (b) F_z

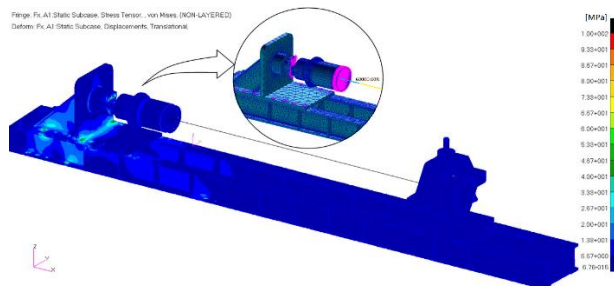


Figure 12. Von Mises stress distribution results of TVC test assembly according to axial thrust BC

In Figure 11a and 11b lateral-y and lateral-z thrust loads are shown respectively. The measured axial load value is used as input in analysis. The lateral thrust values in the directions of y and z are calculated by finite element

analysis. The FEA results and experimental measurement results are close to each other. The sources of systematic error in these tests and any test on the thrust stand were due to the uncertainties of the sensors, the distortion of the signal due to the discharge time constant, the drift in

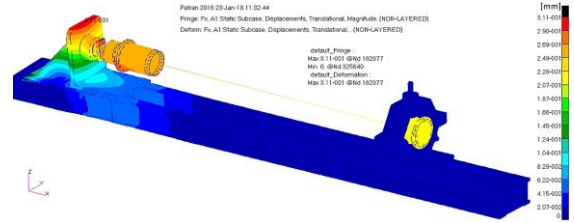


Figure 13. Deformation distribution results of TVC assembly according to axial thrust BC (x100 magnification)

the signal and the uncertainty in the load cell. All sensors have an uncertainty of one percent of the applied load. The test has shown an uncertainty of only 0,00001 percent; which can be neglected.

The TVC performance test system was subjected to strength analyzes using the axial force of 50 [kN], the lateral thrust forces of 4 [kN] (See Fig. 1), the boundary conditions and the finite element models are given in Fig. 6 and Fig. 7. The stress values observed in the front support subjected to axial reinforcement are around 60 [MPa] (Fig. 12).

The deformation values of the front support when the axial thrust is applied are also shown (Fig. 13). The tensile values of the whole lateral thrust sensor and the base plate exposed to the lateral thrust are very low as expected, i.e. 25 [MPa] (Fig. 14). No structural failures are observed in these tensile strengths

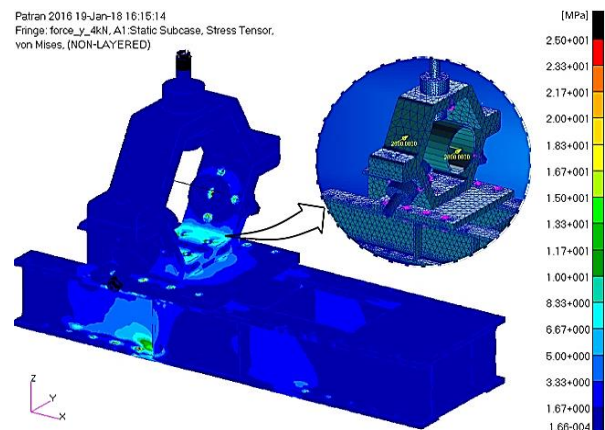


Figure 14. Von Mises stress distribution results of TVC test assembly according to lateral thrust BC

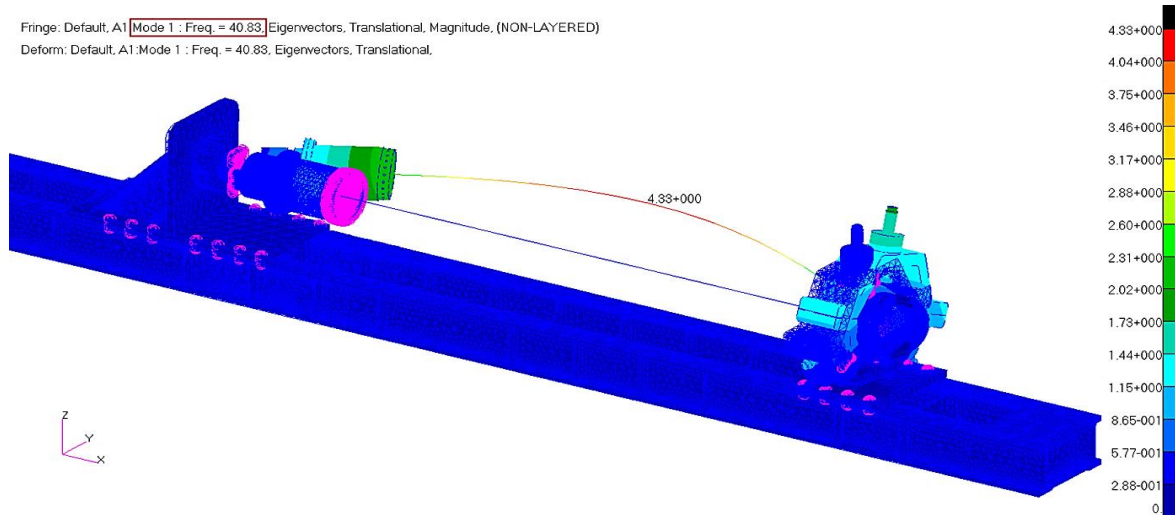


Figure 15. Modal analysis results of TVC assembly

Moreover, in the modal analyzes performed together with the whole test motor, the first natural frequency of the test stand is seen around 40 [Hz] (See Fig 15). This value is taken into account when filtering the test data.

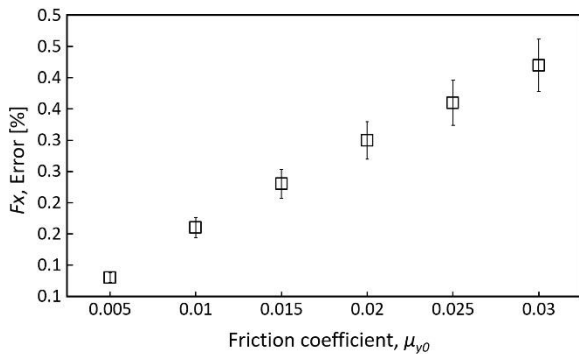


Figure 16. Change of the axial thrust measurement error by the spherical transfer element friction coefficient

The measurement uncertainty which may occur in the axial thrust measurement is calculated to be in the interval of friction coefficient $\mu_{yo}=0,00-0,03$ using Eq. (1), the maximum measurement uncertainty was obtained as 0,45% (Fig. 16)

4. CONCLUSION

In this study, a new six degree-of-freedom thrust sensor system was designed, constructed, calibrated and tested using TÜBİTAK SAGE rocket motor infrastructure in Ankara. The thrust stand proved to be stable during firing tests. The results indicate that, thrust misalignment increase due to the nonhomogeneous wear of nozzle throat. Thrust force vector components and roll, pitch, and yaw moments were calculated during the test. The test results showed that the designed and manufactured TVC test system can be easily and reliably used for accurate measuring of the rocket motor thrust for all six

degrees of freedom. Experimental results and analysis results are found to be in harmony with each other. On the other hand, it was also found that the thrust-time relationship observed in experiments was consistent with the literature and the thrust behavior of the tested rocket motor was stable.

SYMBOLS

- F_x : True axial thrust
- T_x : Measured axial thrust
- F_{ax} : The frictional force generated at the support A
- μ_{yo} : The frictional coefficient of the spherical transfer element
- T_y : Horizontal reaction force in front support
- F_{sy} : Horizontal force generated from friction by joint
- F_{ay} : Lateral force at the support A
- F_y : Lateral thrust (y-axis) component
- M_{sz} : Moment generated from friction (z-axis) in joint
- a : Distance between the reference point (joint center) and point A support
- L : Distance between reference point and reference point of thrust vector
- M_{zh} : Hinge moment (z-axis) component on the jet wings
- T_z : Vertical reaction force on front support
- F_{sz} : Vertical force originating from friction in joint
- F_{az} : Vertical reaction force at the point A support
- F_z : Lateral thrust force z-axis (vertical) component
- G : Rocket motor fuel weight
- b : The distance of the rocket motor fuel center of gravity to the reference point

M_{sy} :Moment generated from friction (y-axis) in joint
 M_{yh} :Hinge moment (y-axis) component on the jet wings

ACKNOWLEDGMENTS

Special thanks to TÜBİTAK SAGE for providing the Rocket Motor Test Infrastructure.

REFERENCES

- [1] Runyan R.B., Rynd J.P., Seely J.F., “Thrust stand design principles”, *AIAA 17th Aerospace Ground Testing Conference*, July 6-8, Nashville, TN, USA, (1992).
- [2] Turner M.J.L., *Rocket and spacecraft propulsion. Principles, Practice and new development* (Third edition), *Springer-Praxis Publishing Co.*, U.K, (2009).
- [3] Mattingly J.D., *Elements of propulsion: Gas turbines and rockets*, *AIAA Publishing Inc.*, Virginia, USA, (2006).
- [4] Brimhall Z.N., Atkinson J.P., Kirk D.R., Peebles H.G., “Design of a novel six degree of freedom solid rocket motor test stand”, *AIAA 2007-5331 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, July 8-11, Cincinnati, OH, USA, (2007).
- [5] Brimhall Z.N., Divitotawela N., Atkinson J.P., Kirk D.R., Peebles H.G., “Design of a novel six degree of freedom solid rocket motor test stand”, *AIAA 2007-5331 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, July 21-23, Hartford, CT, USA, (2008).
- [6] Gligorijevic N., Zivkovic S., Subotic S., Kozomara S., Nikolic M., Citakovic S., “Side force determination in the rocket motor thrust vector control system”, *Scientific Technical Review*, 63(1): 27-38, (2013).
- [7] Wekerle T., Barbosa E.G., Batagini C.M., Costa L.E.V.L., Trabasso L.G., “Closed-loop actuator identification for Brazilian Thrust Vector Control development”, *IFAC-PapersOnLine*, 49(17): 468–473, (2016).
- [8] Milos P., Davidovic N., Jojic B., Milos M., Todici I., “A novel 6 DOF thrust vector control test stand”, *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 22(5): 1247-1254, (2015).
- [9] Prince E.R., Krishnamoorthy S., Ravlich I., Kotine A., Fickes A.C., Fidalgo A.I., Freeman K., Anderson K., Gerson D., “Design, analysis, fabrication, ground-test, and flight of a two-stage hybrid and solid rocket”, *AIAA 49th Joint Propulsion Conference*, July 14-17, San Jose, CA, USA, (2013).
- [10] Wright A.M., Wright A.B., Born T., Strickland R., “A six degree-of-freedom thrust sensor for a lab-scale hybrid rocket”, *Meas. Sci. Technol.*, 24: 125104 (10 pp), (2013). DOI:10.1088/0957-0233/24/12/125104.
- [11] Wang A., Wu H., Tang H., Liu Y., Liang X., “Development and testing of a new thrust stand for micro-thrust measurement in vacuum conditions”, *Vacuum*, 91: 35-40, (2013).
- [12] Lugini C., Romano M., “A ballistic-pendulum test stand to characterize small cold-gas thruster nozzles”, *Acta Astronautica*, 64: 615-625, (2009).
- [13] Smiley M., Veno M., Bell R., “Commercial crew development—round one, milestone 3: Overview of Sierra Nevada Corporation’s hybrid motor ground test”, *AIAA 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 31 July-03 August, San Diego, CA, USA, (2011).
- [14] Sunakawa H., Kobayashi T., Okita K., “Development status of electrical valve control system for LE-9 engine”, *AIAA Propulsion and Energy Forum*, 10-12 July, Atlanta, GA, USA, (2017).
- [15] Always Engineering Ball Transfer Unit Catalogue, <https://www.always.co.uk/brochures/CAT14August2015Revisions.pdf>, website visit date: 15.08.2015.
- [16] Granta-mi, Material Library, <https://www.grantadesign.com/products/mi/index.htm>, website visit date: 03.07.2016.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Nükleer tıp merkezlerinde kullanılan radyoizotop kalibratörlerinde kalite sağlanması üzerine bir uygulama-lineerite testi

An application study (Linearity test) about maintaining quality in radioisotope calibrators which are used in nuclear medicine centers

Yazar (Author): Kemal KOÇ

ORCID: 0000-0003-2141-7537

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Koç K., “Nükleer Tıp merkezlerinde kullanılan radyoizotop kalibratörlerinde kalite sağlanması üzerine bir araştırma-lineerite testi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 507-511, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.418256

Nükleer Tıp Merkezlerinde Kullanılan Radyoizotop Kalibratörlerinde Kalite Sağlanması Üzerine Bir Uygulama-Lineerite Testi

Araştırma Makalesi / Research Article

Kemal KOÇ*

Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Başkent Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 26.02.2017 ; Kabul/Accepted : 25.03.2017)

ÖZ

Radyoizotop Kalibratörleri, Nükleer Tıp Merkezlerinde hastalara verilecek radyoaktif madde miktarının ölçülmesinde kullanılmaktadır. Yapılacak incelemelerde istenen sonuçların alınabilmesi hastaya verilecek bu radyoaktif madde miktarının mümkün olduğunca az hata ile ölçülmesine bağlıdır. Burada hastaya bilerek ve isteyerek radyoaktif madde verildiğinden verilen radyasyonun çok iyi ölçülmesi gerekmektedir. Bu ise verilen bu radyoaktif maddenin ölçülmesini sağlayan radyoizotop kalibratörlerin performanslarının çok iyi olması ile mümkündür. Bu performansın sağlanması ise ancak bir takım kalite çalışmalarının rutin olarak yapılması ile mümkündür. Bu amaca ulaşmak için, çalışmada bir Nükleer Tıp Merkezinde bulunan; Capintec 15 R[(Seri no:159083)-1 nolu kalibratör] ve Biodex ATOM LAB-500 [(Seri no:9100052)-2 nolu kalibratör] markalı iki farklı radyoizotop kalibratör ile; lineerite testlerine yönelik ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerde kısa yarı-ömürlü bir radyoizotop (Tc-99m) kullanılarak; azalan kaynak, artan kaynak ve numune-hacim etkisi yöntemleriyle cihazların lineerite testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda her iki kalibratör için de yapılan testler hata sınırları içinde kalmış (%5), her iki cihaz da oldukça yüksek performans göstermiş ancak 1 nolu kalibratörün performansının test sonuçlarına göre çok küçük farkla da olsa daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler:Nükleer Tıp, doz kalibratörü, doğruluk, hassasiyet, lineerite.

An Application Study (Linearity Test) About Maintaining Quality in Radioisotope Calibrators Which Are Used in Nuclear Medicine Centers

ABSTRACT

Radioisotope calibrators are used to measure the amount of radioactive substance to be given to patients in Nuclear Medicine Centers. Achieving the desired results in the analyses to be made depends on measuring the amount of radioactive substance to be given to patients with the least possible error. The radiation, which is intentionally given to patients, must be measured well. This can be possible with the condition that radioisotope calibrators that enable measuring the radioactive substance must have proper performances. In order to achieve this target, measurement for linearity tests were performed with two different radioisotope calibrators, ; Capintec 15 R [(Seri no:159083)-number one calibrator] and Biodex ATOM LAB-500 [(Seri no:9100052)-number two calibrator] in a Nuclear Medicine Center. By using a short half-life radioisotope (Tc-99m) in these measurements, linearity tests of devices have been performed by using the method of decreasing source, increasing source and sample-volume effect. In consequence of these tests, tests, which is done for both calibrators are within the error limits (%5), but according to the test results of the performance of number one calibrator, it is better than with a very small difference.

Keywords: Nuclear Medicine, dose calibrators, accuracy, precision, linearity

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Birçok disipline dayanan “Nükleer Tıp” çalışmalarında “Radyasyon Fiziği” önemli bir yer tutar. Özellikle temel nükleer fizik, radyofarmasi ve klinik uygulamalar nükleer tıp faaliyetlerinin ana çalışma alanlarıdır. Nükleer tıp görüntüleme en büyük sorun görüntü kalitesidir.

Hem görüntü kalitesini artırmak, hem de hastaya minimum radyasyon vermek bu açıdan önemlidir ve bu da ancak başlangıçta hastaya verilecek radyasyonun doğru ölçümü ile mümkündür. Radyasyon fiziğinin tıp uygulamalarında temel ilke, minimum radyasyon ile en iyi sonucu alacak radyasyon miktarı ile çalışmalarını gerçekleştirmektir. Genel olarak tedaviden çok bir teşhis alanı olan nükleer tıp (“%95’i tanı ve %5’i tedavi) çalışmalarında iki önemli özellik ön plana çıkmaktadır.

1. Radyasyonun uygun enerjisi
2. Radyasyonun küçük yarı-ömrü

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : kemalk@baskent.edu.tr

Bu iki özelliği aynı anda taşıması nedeniyle nükleer tıp merkezlerinde en fazla kullanılan radyofarmasötik Tc-99m (140 keV enerjili ve 6 saat yarı-ömürlü) olmakla birlikte, nükleer tıpta kullanılan diğer radyoizotoplar ve bazı özellikleri Tablo 1’ de verilmiştir [1]. Genel olarak nükleer tıp uygulamalarında temel amaç en az ve doğru ölçülmüş radyasyonla en iyi görüntüyü alabilmektir. Bu nedenle hastaya verilecek radyasyonun ilk ölçümünün yapıldığı “Doz Kalibratörleri” bu amaç için büyük öneme sahiptir.

2. DOZ KALİBRATÖRLERİ (DOSE CALIBRATORS)

İyonlayıcı radyasyon ile yapılan tüm tıbbi uygulamalarda en yüksek radyasyon dozunu tetkiki yapılan hasta almaktadır. Toplum ışınlanmaları dikkate alındığında, bu ışınlanmalarda en büyük katkı tıbbi ışınlama kaynaklıdır ve bu kapsamda nükleer tıp uygulamaları radyolojik tetkiklerden sonra ikinci sırayı almaktadır. Bu tıbbi uygulamalar sonucu alınan radyasyon dozunun en az miktarının bile zararlı olduğu ilkesinden hareketle hastaya verilen bu doz miktarlarının en az ve sonucun en verimli olacak şekilde tespiti için nükleer tıp merkezlerinde doz kalibratörlerinin bulundurulması ve düzenli kalite testlerinin yapılması IAEA gereklerindedir [2].

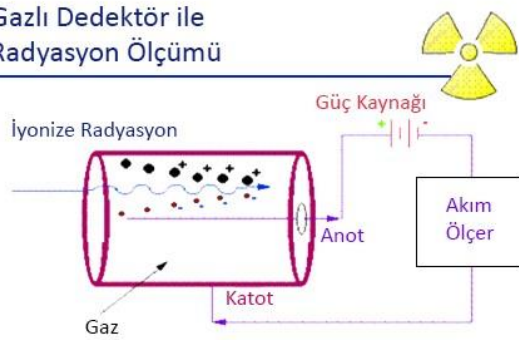
Radyoaktif maddelerin aktivite ölçümlerinde kullanılan doz kalibratörleri kuyu şeklinde tasarlanmış iyon odalarıdır (Şekil 1). Bu odalar, gelen radyasyonun meydana getirdiği iyonizasyon sonucu oluşan akımı işleyerek kaynak aktivitesinin Curie (Ci) veya Becquerel (Bq) olarak okunmasını sağlar. Ancak iyon odalarının farklı tür ve enerjideki radyasyonlara karşı davranışları aynı değildir. Bu nedenle iyon akımını oluşturan voltajda bazı düzeltmeler yapılarak farklı izotopların ayırt edilebilmeleri sağlanır. Bunun için cihazın yapımı sırasında klinik uygulamalarda kullanılan izotoplarla aynı özellikte olan standart kaynaklardan yararlanır. Nükleer Tıp uygulamalarında hasta sağlığı açısından hatasız çalışması istenen doz kalibratörlerinin, aktiviteleri doğrulukla ölçülmesi, fabrikada yapılan ayarlamaların zamanla değişimini düzeltmek için seçilen standart kaynaklarla gerçekleştirilen kalibrasyona bağlıdır. Nuclear Regulatory Commission (NRC)' ye göre doz kalibratörlerinin kalite kontrol testleri için cihazın kurulması sırasında yapılan "geometri testi" dışında bazı standart ölçümlerin yapılması gerekmektedir [3]. Bu gerekliliğin bir sonucu olarak; uzun yarı-ömürlü standart kaynaklarla kesinlik, doğruluk testleri ve kısa yarı-ömürlü radyoizotoplarla da lineerite testleri yapılmaktadır.

Tablo 1. Nükleer Tıpta Kullanılan Radyoizotoplar [1]
(Radioisotopes Used in Nuclear Medicine)

Radyoizotop	Bozunma Tipi	Yarılanma Süresi	Foton Enerjisi (keV)
C- 11	β+	20.3 dakika	511
F- 18	β-	109.8 dakika	511
P-32	β-	14.3 gün	Yok
Cr-51	EC	27.7 gün	320
Co-57	EC	271.7 gün	122 136
Co-58	EC, β-	70.9 gün	811 511
Fe-59	β-	45.0 gün	1099 1292
Ga-67	EC	78.1 saat	93 185 300
Se-75	EC	120.0 gün	121 136 265 280 401
Kr-81m	IT	13.0 saniye	191
Mo-99	β-	65.9 saat	740 778
Tc - 99m	IT	6.0 saat	140
In - 111	EC	2.8 gün	172 247
In-113m	IT	99.4 dakika	392
1-123	EC	13.0 saat	159 27 (X ışımı)
1-125	EC	60.0 gün	35 27 (X ışımı)
Xe-127	EC	36.4 gün	172 203 375
1-131	β-	8.1 gün	364 637
Xe-133	β-	5.3 gün	81
Hg-197	EC	65.0 saat	77
Hg - 203	β-	46.5 gün	279
Tl-201	EC	73.0 saat	69 (X ışımı) 71 (X ışımı) 80 (X ışımı)

Radyofarmasötiklerin hasta için belirlenen doğru aktivite miktarlarının hastaya verilmesi, bu hastaları daha başlangıçta gereksiz ışınlanmalardan korumak kadar tanı ve tedavinin etkinliği açısından da son derece önemlidir ve bu doz kalibratörleri ile sağlanır [4].

Gazlı Dedektör ile Radyasyon Ölçümü

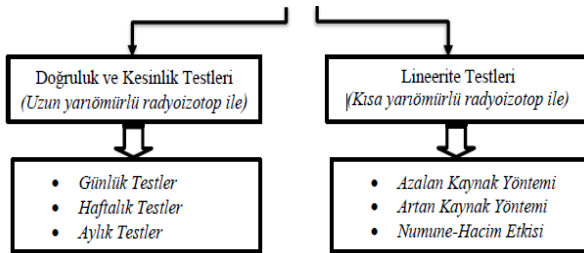


Şekil 1. Bir Doz Kalibratörü Şematik Gösterimi
(Schematic Illustration of a Dose Calibrator)

Klinik uygulamalarda istenen amaca ulaşabilmek bu cihazların sürekli doğru ölçüm yapmasını sağlamak ile mümkündür. Bu ise bir takım kalite çalışmalarını ve çalışmalar sonucunda gerekli ise yapılacak kalibrasyonları zorunlu kılar.

Bu kalite çalışmaları ve kalibrasyonlar için yapılması gerekenler ise NRC (Nuclear Regulatory Commission) tarafından belirlenmiştir. Buna göre bu kalite kontrol testleri kapsamında bazı standart testlerin yapılması bir zorunluluktur. Bu testlerin bir kısmı uzun yarı-ömürlü standart kaynaklarla bir kısmı ise çok kısa yarı-ömürlü izotoplarla yapılmaktadır [5-6]. Bu testlerden; kesinlik-doğruluk testleri uzun yarı-ömürlü standart kaynaklar kullanılarak (Örneğin Cs137) kendine özgü yöntemlerle gerçekleştirilirken, lineerite testleri ise kısa yarı-ömürlü (örneğin Tc99m) radyoizotoplar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu testlere ait uygulamalar şematik olarak Şekil 2' de verilmiştir.

Radyoizotop Doz Kalibratörleri Kalite Testleri



Şekil 2. Radyoizotop Kalibratörler Kalite Uygulamaları
(Quality Applications of Radioisotope Calibrators)

3. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Nükleer Tıp uygulamalarında hastaya çok küçük miktarlarda dozlar uygulanmasına rağmen bu küçük dozların da tam bir doğrulukla hastaya verilmesi gerekmektedir. Bunun için ise; bir elektronik sistemin fabrika ayarlarının sürekli değişebileceği gerçeğinden hareketle doğru zamanlarda doğru testlerin yapılması hasta sağlığı ve tetkikteki başarı için bir zorunluluktur. Çalışma bu amaca hizmet etmek üzere yoğun hasta kabulünün yaşandığı bir nükleer tıp merkezinde gerçekleştirilmiştir, Merkezde bulunan; Capintec CRC-12R(1 nolu kalibratör) ve Biodex(2 nolu kalibratör)

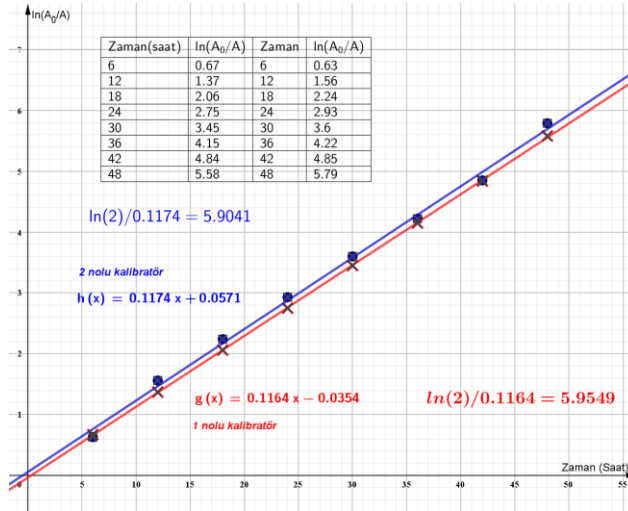
markalı iki farklı radyoizotop kalibratör ile; lineerite testlerine yönelik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Doz kalibratörleri bir kuyu tipi iyon odasıdır ve çalışmada kullanılan kalibratörlerde kuyu yaklaşık 2.5 inç çapında ve 11 inç derinliğindedir. Çalışmada NRC' nin yapılmasını istediği kalite testlerinden "Lineerite Testleri", "Azalan Kaynak", "Artan Kaynak" ve "Numune-Hacim Etkisi" yöntemleriyle yapılan ölçümlerle gerçekleştirilmiştir [5-6]. Her üç ayda bir yapılması gereken "Lineerite Testi" doz kalibratörlerinin radyasyona karşı tepkisinin gerçekten lineer olup olmadığını saptamak için yapılır ve diğer testleri destekleyici özelliktedir.

Doz kalibratörlerinin lineeritesini belirlemek için farklı yöntemler bulunmakla birlikte en iyi sonuç alınan yöntemlerden birisi "Azalan Kaynak" yöntemidir [7]. Bu test için kısa yarı-ömürlü radyoaktif maddenin azalmasına bağlı olarak ölçüm alınacağı gibi, kurşun blokların kullanımına dayanan ve çok daha hızlı sonuç veren "soğurma yöntemi" de kullanılabilir [8]. NRC bu test için Tc-99m izotopunu önermektedir ve bu test için hata sınırları $\pm\%5$ dir [9]. Bu testi gerçekleştirmek üzere istendiği gibi düşük yarı-ömürlü bir radyoizotop olan Tc-99m kullanılmış ve "Azalan Kaynak", "Artan Kaynak" ve "Numune-Hacim Etkisi" ile "Lineerite Testleri" gerçekleştirilmiştir. Bu testler ile hem kalibratörlerin performanslarının NRC' nin belirlediği sınırlar içinde olup olmadığına bakılmış hem de daha lineer performans gösteren kalibratörün tespiti yapılmıştır.

Azalan kaynak yönteminde her bir kalibratör için belli bir aktivitedeki Tc-99m (1.Kalibratör için $A_0=289$ mCi, 2.Kalibratör için $A_0=328$ mCi) için Tc-99m 'in yarı-ömrüne uygun olarak 6 saat ara ile ölçümler alınmış ve veriler bir grafiğe aktarılarak elde edilen doğrunun eğiminden radyoizotopun yarı-ömrü elde edilmiştir. Bu yarı-ömür Tc-99m 'in bilinen yarı-ömrü ile karşılaştırılarak hem % 5'lik hata sınırı karşılaştırılmış hem de performansı yüksek olan kalibratör tespit edilmiştir. Artan kaynak yönteminde, artan aktivite değerlerine karşılık kalibratörlerin lineeritesine bakılarak, numune-hacim etkisinde artan hacimlere karşılık kalibratörlerin lineeritesini gözlemlenmiştir. Numune-hacim etkisi incelenirken sabit bir aktivite hacmi belli bir vialle konulmalı, daha sonra uygun miktarlarda su veya izotonik solüsyon eklenmeli ve her bir arttırmadan sonra vial hafifçe sallanarak aktivitenin uniform olarak dağılması sağlanmalıdır. Numune-hacim etkisini görmek için çalışmada yaklaşık 5 Ci' lük aktivite sabit kalarak(sadece zamana karşı azalarak) 1cc' lik su ilaveleri 10 cc' ye kadar yapılmış ve her defasında ölçüm alınmıştır. Kalibratörlere ait tüm bu sonuçlar değerlendirilerek kalibratörlerin lineerite testleri sonuçlandırılmış ve daha yüksek performans gösteren kalibratör tespit edilmiştir.

4. BULGULAR (RESULTS)

Kalibratörlerin lineeritesini tespit etmek amacıyla “Azalan Kaynak” yöntemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 3’ de verilmiştir.



Şekil 3. Azalan Kaynak Yöntemiyle Kalibratörlerin Lineeritesi (Linearity of Calibrators with Decreasing Source Method)

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{ve} \quad A = A_0 e^{-(\ln 2 / T_{1/2}) t}$$

$$\ln A = \ln A_0 - (\ln 2 / T_{1/2}) t \quad \text{ve} \quad \ln A_0 - \ln A = (\ln 2 / T_{1/2}) t$$

Eğim = $\ln 2 / T_{1/2}$ ve $T_{1/2} = \ln 2 / \text{Eğim}$ ile her kalibratör için yarı-ömür değerleri hesaplanmış ve bu değerler $T_c - 99m'$ in olması gereken değeri 6 saat ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen değerler ile gerçek değer birbirine ne kadar yakın ise lineerite o kadar yüksek olacaktır. Hesaplanan yarı-ömür değerleri aşağıdadır:

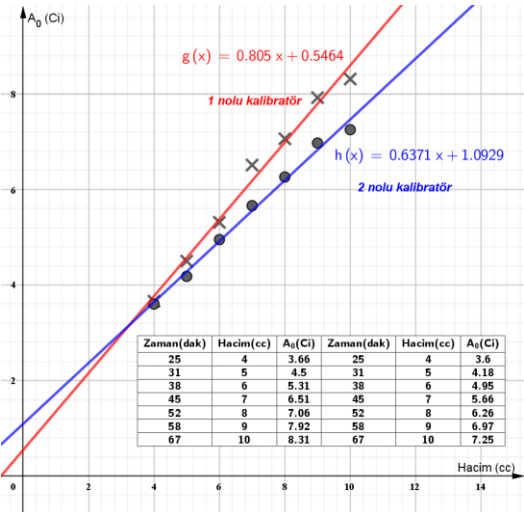
1. kalibratör için $T_{1/2} = 5.9549$ saat
2. kalibratör için $T_{1/2} = 5.9041$ saat

Bu yöntem için, grafikten her iki kalibratöre için de korelasyon katsayıları hesaplanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1 nolu kalibratör için : $r = 0.99997$
2 nolu kalibratör için : $r = 0.99839$

Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi her iki kalibratör için de oldukça yüksek bir ilişki vardır ancak 1 nolu kalibratör küçük bir farkla da olsa daha yüksek bir ilişkiye sahiptir. “Artan Kaynak Yöntemi” ile kalibratörlerin elde edilen lineerite testleri sonuçları Şekil 4’ de verilmiştir.

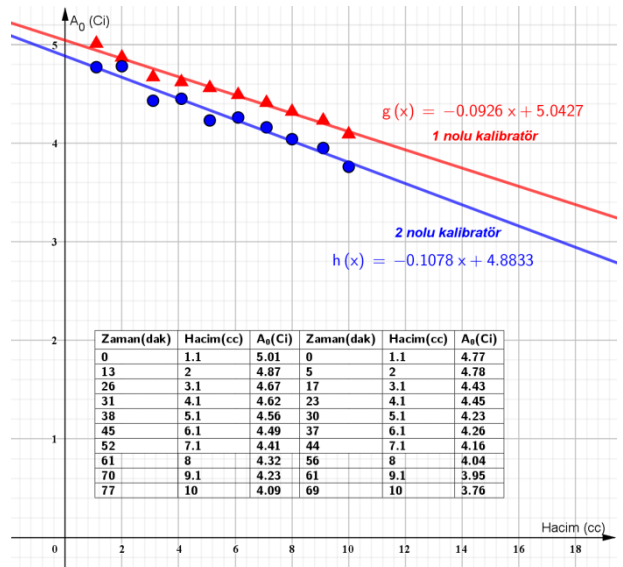
Bu yöntem için, grafikten her iki kalibratöre için de korelasyon katsayıları hesaplanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4. Artan Kaynak Yöntemi ile Kalibratörlerin Lineeritesi (Linearity of Calibrators with Increasing Source Method)

- 1 nolu kalibratör için : $r = 0.99364$
2 nolu kalibratör için : $r = 0.99583$

Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi her iki kalibratör için de oldukça yüksek bir ilişki vardır ancak 2 nolu kalibratör küçük bir farkla da olsa daha yüksek bir ilişkiye sahiptir. “Numune-Hacim Etkisi Yöntemi” ile kalibratörlerin elde edilen lineerite testleri sonuçları Şekil 5’ de verilmiştir.



Şekil 5. Numune-Hacim Etkisi Yöntemi ile Kalibratörlerin Lineeritesi (Linearity of Calibrators with the Method of Sample-Volume Effect)

Bu yöntem için, grafikten her iki kalibratöre için de korelasyon katsayıları hesaplanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir

- 1 nolu kalibratör için : $r = -0.98814$
2 nolu kalibratör için : $r = -0.97700$

Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi her iki kalibratör için de oldukça yüksek bir ilişki vardır ancak 1 nolu kalibratör küçük bir farkla da olsa daha yüksek bir ilişkiye sahiptir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Çalışma; çok yoğun hasta kabulünün olduğu bir nükleer tıp merkezinde Capintec 15 R[(Seri no:159083)-1 nolu kalibratör] ve Biodex ATOM LAB-500 [(Seri no:9100052)-2 nolu kalibratör] markalı iki farklı radyoizotop kalibratör ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihazların kurulumu, nükleer tıp merkezlerinde hastaya verilecek radyoaktif maddenin ölçümü için bir zorunluluktur ve bu nedenle cihazların kalite kontrolleri hastaya minimum radyasyonun verilmesi açısından son derece önemlidir. Çalışma ile bu kalite çalışmalarının bir kısmı olan “lineerite testleri” farklı üç yöntemle gerçekleştirilmiş ve her iki kalibratörün performansları tespit edilmeye çalışılmıştır.

Lineerite testleri; “Artan Kaynak”, “Azalan Kaynak” ve “Numune-Hacim Etkisi” yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler ile yapılan ölçümler sonucunda merkezde bulunan her iki kalibratörün de performanslarının belirlenen sınırlar içinde ve oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Cihazların bu yüksek performansının hiç aksatılmadan yürütülen kalibrasyon çalışmaları olduğu düşünülmektedir. İki kalibratörden 1. kalibratör olarak adlandırılan kalibratörün diğerine göre çok küçük bir farkla da olsa daha yüksek bir lineerite gösterdiği tespit edilmiştir. Bu yöntemlerden; “Azalan Kaynak Yöntemi” ile hesaplanan yarı-ömrler karşılaştırıldığında, 1. kalibratör için $T_{1/2}=5.9549$ saat ($Tc-99m$ için yarı-ömür 6 saat) 2. kalibratör için ise $T_{1/2}=5.9041$ saat olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar her iki kalibratörün de performansının çok yüksek olduğunu göstermektedir ancak 1 nolu kalibratör yaklaşık %1 kadar daha iyi bir performansa sahiptir. Ayrıca değişkenler için her iki cihaz için hesaplanan korelasyon katsayıları da bu durumu desteklemektedir (1 nolu kalibratör için $r = 0.99997$ ve 2 nolu kalibratör için $r = 0.99839$). “Artan Kaynak Yöntemi” ile elde edilen sonuçlar da her iki cihazın oldukça yüksek lineerite gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu yöntem için hesaplanan korelasyon katsayıları; 1 nolu kalibratör için $r = 0.99364$ ve 2 nolu kalibratör için $r = 0.99583$ şeklindedir. Sonuçlar her iki kalibratör için de oldukça yüksek bir ilişkiyi göstermektedir ve bu yöntemle elde edilen sonuçlar açısından çok küçük bir farkla da olsa 2 nolu kalibratörün daha iyi bir performans gösterdiği söylenebilir. Son yöntem olan, “Numune-hacim Etkisi Yöntemi” için hesaplanan korelasyon katsayıları, 1 nolu kalibratör için $r = -0.98814$ ve 2 nolu kalibratör için $r = -0.97700$ şeklindedir. Yine oldukça yüksek bir ilişki söz konusudur ve çok küçük bir farkla da olsa bu yöntemle 1 nolu cihaz daha iyi bir performans göstermiştir. Sonuçlar topluca değerlendirildiğinde, her iki kalibratörün de oldukça yüksek bir performansa sahip

olduğu görülmektedir. Ancak iki testten ve özellikle “Azalan Kaynak Yöntemi” ile yarı-ömür tespitinde daha iyi performans gösteren 1 nolu kalibratörün diğerine göre çok küçük bir farkla da olsa daha iyi performans gösterdiği söylenebilir.

Nükleer tıp merkezlerinde başlangıçta hastaya doğru radyasyon miktarının verilmesi bu işlemi yapan kalibratörlerin doğru ölçümler yapması ile mümkündür. Bu ise ancak hiç aksatmadan yapılması gereken kalite testleri ile mümkündür. Bu çalışmada bu kalite testlerinden birisi olan “Lineerite Testleri” farklı üç yöntemle incelenmiştir. Ancak bu testlerin Şekil 2’ de verilen “Doğruluk ve Kesinlik Testleri” ile birbirini destekler şekilde yapılması gerektiği de unutulmamalıdır. Bu testlerin tamamı belirlenen sürelerde hiç aksatmadan gerçekleştirilmeli ve tespit edilen aksaklıklar cihaz kalibrasyonları ile giderilmelidir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kowalksy J.R.. Radiopharmaceuticals in Nuclear Medicine Practice, *Appleton&Lange*, California, 1987.
- [2] “TEC-DOC 1113, Safety Assessment Plans and Inspection of Radiation Sources”, International Atomic Energy Agency, *Vienna*, 1999.
- [3] Atak E.,İ., “Türkiye’ de Radyofarmasi Laboratuvarlarının Mevcut Durumu, İyi Radyofarmasi Uygulamaları’na(GRP) ve Kalite Yönetim Sistemlerine Uygunlukları”, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004.
- [4] Orepesa P., Hernandez A.T., Serra R., Martinez E., Varela C, “Comparisons of Activity Measurements with Radionuclide Calibrators”, *Applied Radiation and Isotopes*, 59: 383-387, 2003.
- [5] “U.S. Nuclear Regulatory Commission Code of Federal Regulations. Title 10, Part 35”, *Washington D.C.*, April 1987, Updated January 24, 2018.
- [6] “U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide for the Preparation of Applications for Medical Program, 10.8 Revision”, *Washington D.C.*, August 1987.
- [7] Chu R.Y.L., “Accuracy of Dose Calibrator Linearity Test”, *Health Phys.*, 55: 95-96, 1988.
- [8] Dydek G.J., Blue P.W., Tyler H.N.J., “Comparison of Attenuators for Linearity Testing of The Dose Calibrator”, *J.Nucl.Med. Technol.*, 16: 111-115,1988.
- [9] Özkırlı M., Bor D., Meriç N., Büğet N., Bayhan H., “Doz Kalibratörlerinin Performans Özelliklerinin Karşılaştırılması”, *Tur.J.of Nuc.Med.*, 4: 143-153, 1995



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Şehir içi asfalt kaplamaların kayma potansiyelinin değerlendirilmesi - bir durum çalışması

Evaluation of skid potential of urban asphalt coatings - a case study

Yazar(lar) (Author(s)): Kürşat YILDIZ

ORCID: 0000-0003-2205-9997

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yıldız K., " Şehir içi asfalt kaplamaların kayma potansiyelinin değerlendirilmesi - bir durum çalışması", *Politeknik Dergisi*, 21(2): 513-518, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.407259

Şehir İçi Asfalt Kaplamaların Kayma Potansiyelinin Değerlendirilmesi - Bir Durum Çalışması

Araştırma Makalesi / Research Article

Kürşat YILDIZ*

Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 05.03.2017 ; Kabul/Accepted : 10.03.2017)

ÖZ

Mühendisliğin en önemli parametrelerinden olan güvenlik, karayollarında sürüş güvenliği açısından da kaçınılmaz bir parametredir. Sürüş güvenliğini etkileyen üç ana faktör insan, taşıt ve yol faktörüdür. Bu faktörlerden yol faktörü çalışmamıza konu olmakla beraber, bu faktörün servis ömrü süresince azalan kayma direnci değeri, çalışmamızın ana konusu olmuştur. Karayolunda güvenli bir sürüşün sağlanabilmesi için de taşıt tekerlek bandajı ile yol yüzeyi arasında meydana gelen kayma direncinin belli bir seviyede olması gerekmektedir. Bu alandaki çalışmalar kayma direncinde meydana gelen düşüş ile trafik kazalarının artışı arasında anlamlı bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışma kapsamında dünyada en iyi bilinen ve araştırma çalışmalarında yaygın olarak kullanılan, İngiliz pandül test "British Pendulum Test" (BPT) ile Ankara ili Keçiören ilçesinde ölçümler yapılmıştır. Belirlenen caddeler üzerinde elde edilen sonuçlar Keçiören ilçesi şehir içi asfalt kaplamalarının kayma potansiyeli değerlerinin literatür sınır değerleri içerisinde kaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kayma potansiyeli, ingiliz pandül test, kaplama dokusu.

Evaluation of Skid Potential of Urban Asphalt Coatings – A Case Study

ABSTRACT

Security, one of the most important parameters of engineering, is an inevitable parameter in terms of driving safety on roads. The three main factors that affect driving safety are people, vehicles and roads. The skid factor value decreased during the service life of road factor has become the main topic of our study while road factor among these factors is mentioned in this study. In order to ensure safe driving on the road, the skid resistance between the vehicle wheel bandage and the road surface must be at a certain level. Studies in this area have shown that there is a significant relationship between the decrease in skid resistance and the increase in traffic accidents.

In this study, measurements were made with British Pendulum Test (BPT), which is the best known in the world and widely used in research studies, in the city of Keçiören in the province of Ankara. The results obtained from the determined streets have been shown that skid potential values of urban asphalt coatings for Keçiören Municipality are within the limits of the literature.

Keywords: Skidpotential, british pendulum test, pavement texture.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gerek ülkemizde gerekse dünyada ulaştırma modlarından birisi ve en önemlisi olan karayoludur. Karayollarında sürüş güvenliği ve kayma direnci arasındaki ilişki geçmişten günümüze bilim adamlarının araştırmalarına konu olmuştur.

Karayolu yüzey özellikleri ekonomiyi, konforu ve motorlu taşıtların güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Yol yüzeyinin aşırı pürüzlülüğü, konforu, aşırı gürültü çıkararak etkilerken lastik aşınmasını da beraberinde getirmektedir. Bunun yanı sıra aşırı pürüzlülük yol yüzeyinin ışık yansıtma karakteristiğini etkilerken, ıslak havalarda kayma direncini de olumsuz etkilemektedir [1]. Yol yüzeyinin Kayma direnci arzulanan seviyenin

altına düşerse kaza risk artışına yol açabilir [2]. Tekerlek ile yol yüzeyi arasında meydana gelen yetersiz sürtünme, enerjinin işe dönüşümün de azalma (patınaj yaparak), aracın kurba girerken merkezkaç kuvvetine karşı koyamaması (savrulma), olarak adlandırılmaktadır. Tekerleğin yuvarlanarak eriştiği çevresel hız eğer taşıt hızından farklı ise, bu iki hızın farkının büyük olan hıza oranına ise (kayma) denmektedir. Bu durum durma mesafesinde potansiyel artışa yol açabilir [3,4]. Bu bakımdan yoğun trafik çeşitliliğine ve yüklerine maruz kalan şehir içi yol kaplamalarının sürtünme dirençlerinde zaman içinde meydana gelebilecek değişimlerin gözlemlenmesi, gerekli ölçümlerin yapılması ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde çoğunlukla maddi olmakla beraber ölümlü sonuçlanan kazalar da kaçınılmaz olacaktır.

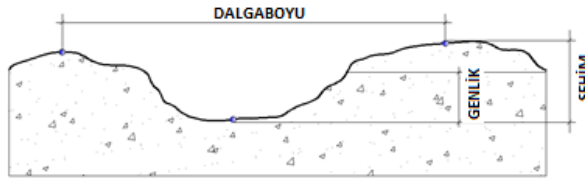
*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : kursaty@gazi..edu.tr

Bu çalışma kapsamında dünyada en iyi bilinen ve araştırma çalışmalarında yaygın olarak kullanılan, İngiliz pandül test "British Pendulum tester" (BPT) ile Ankara ili Keçiören ilçesinde ölçümler yapılmıştır. Durum tespiti gerçekleştirilmiş ve ileriye yönelik tahmin ve önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ (LITERATURE SUMMARY)

Konuyla ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, yol yüzey dokusunun kayma direnci üzerinde aktif rol aldığı görülmektedir.

Yol yüzey dokusu, yol yüzeyinin gerçek bir düzlemsel yüzeyden sapması olarak tanımlanmakla beraber Şekil 1.'de şematik olarak verilen yüzey dokusu dalga boyu, genlik ve sehim gibi bileşenlerle açıklanmaya çalışılmıştır [5].



Şekil 1. Yol yüzey dokusunun geometrik şeması (Geometrical scheme of road surface texture)

Bu tanımın netlik kazanması için yol yüzeyinin geometrik özelliğine ilişkin bir takım tanımlamalar gerekir. Yol yüzey özellikleri, yolun gerçek profilinin, yolun teorik profilinden sapmaları olarak belirtilmiştir. Yol yüzey özellikleri, bu sapmaların dalga boyuna (λ) bağlı olarak, yol yüzey dokusu ve geometrik düzgünlüğü olmak üzere iki ana kısma ayrılmıştır

Çizelge 1. Dalga boyuna bağlı yüzey özellikleri (Wavelength dependent surface properties)

Yüzey özelliği	Doku türü	Dalga boyu (λ)
Yol yüzey dokusu	Mikro doku	$\lambda < 0.5\text{mm}$.
	Makro doku	$0.5\text{ mm.} < \lambda < 50\text{ mm}$
	Mega doku	$50\text{mm.} < \lambda < 500\text{ mm}$.
Geometrik düzgünlük	Boyuna Geometrik Düzgünlük	$0.5\text{ m.} < \lambda < 50\text{ m}$.
	Enine Geometrik Düzgünlük	$0.5\text{ m.} < \lambda < 50\text{ m}$.

Sürtünme direncini doğrudan etkileyen mikro ve makro doku, düşük hızlarda mikro doku ile açıklanırken, yüksek hızlarda suyun iyi bir şekilde drenajını sağlayan yol yüzey özelliği makro doku olarak açıklanmaktadır [6]. Açıklanan bu kavramlardan yol yüzey dokusunun optimum bir pürüzlülüğe, yani hem mikro dokunun hem de makro dokunun sürtünme ve su drenajı açısından önemini ortaya koymaktadır.

Yol yüzey dokusu ve sürtünme direnci başlıkları altında çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar yüzey dokusu türleri, tekerlek yüzey ilişkileri, sürtünme katsayısı ve bunu ilişkin tahmin modelleri, ilgili standartlar dahilinde gerçekleştirilen değişik test metodları ile kayma direnci ölçümleri, laboratuvar ve

arazi bazlı kayma direnci çalışmaları, son zamanlarda bazı yol araştırma merkezleri ve üniversiteler tarafından, teknoloji gelişmelere paralel olarak optik tarayıcılar ve lazerli yol yüzey dokusu ölçüm teknikleri geliştirilmiştir [7-15].

Standartlaştırılmış sürtünme direnci ölçüm cihazları yüksek hızlarda ölçüm yapabilenler ve düşük hızlarda ölçüm yapabilenler olarak sınıflandırılırken, esasında makro ve mikro doku ölçümü yapmaya yönelik olarak sınıflandırılmışlardır [16]. Sürtünme direnci ölçümüne yönelik geliştirilen standartlaştırılmış deney metodları arasında harmonize tutarlılığı oluşturulması açısından 1990'lı yılların başında PIARC uluslararası kayma indeksi (International Friction Index-IFI) kavramını ortaya çıkartarak farkı deney cihazları arasında bir harmonizasyon oluşturmuştur [6]. Yüzey dokusu ülkemizde ise kum yama yöntemi kullanmak suretiyle 2013 yılında karayolları teknik şartnamesine girmiş ve sürtünme direnci konusu daha etkili bir şekilde göz önüne alınmıştır [17].

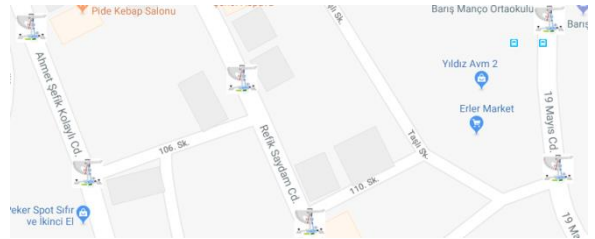
Bu bilgi ve belgeler ışığında Ankara ili Keçiören ilçesi sınırlarında bulunan üç adet cadde üzerinde İngiliz pandülü deneyleri standartlar kapsamında yapılmış ve elde edilen veriler kendi ve birbirleri arasında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3. MATERYAL ve METOT (MATERIAL AND METHOD)

3.1. Materyal (Material)

Kayma direnci ölçümleri Şekil 2'de verilen Ankara ili Keçiören ilçe sınırlarında bulunan Ahmet Şefik Kolaylı caddesi, Refik Saydam caddesi ve 19 Mayıs caddesi

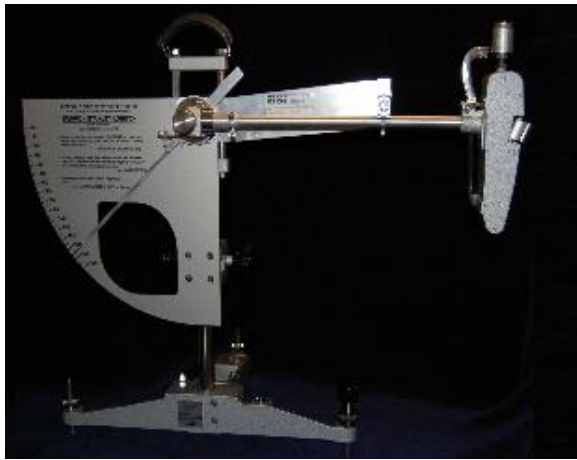
olmak üzere üç ana cadde üzerinde yapılmıştır. Cadde yüzeyleri taş mastik asfalt olup 1mm pürüz (ortalama doku derinliği)'ne sahiptir.



Şekil 2. İngiliz pandül deneyinin yapıldığı caddeler (Streets of British pendulum)

Belirtilen caddeler üzerinde pandül deneyinin gerçekleştirilmesi için, yüzeyin tozlardan arındırılması için el fırçası ve içilebilir su gerekiyken, yol yüzey sıcaklık ölçümü için -20 ... +400 ° C aralığında ölçüm yapabilen pirometre, deney sürecinde hava (rüzgar) hız ölçümünü 1,4 ... 108 km/h aralığında ölçüm yapabilen anemometre, su terazisi ve çelik şerit metre ye ihtiyaç duyulmaktadır.

Kayma ve/veya kızaklama direnci ölçüm cihazı olarak bilinen İngiliz pandülü, pandül koluna monte edilmiş bir sürtünme parçası yardımıyla, arazi ve laboratuvar ortamında ölçüm alınmasına imkân verir. Bu cihaz, kaydırıcı ile deney yüzeyi arasındaki sürtünmeyi ölçmek ve kayma direncine ait standart bir değer tayin etmek üzere tasarlanmıştır. (Şekil 3).



Şekil 3. İngiliz Sarkacı deney aleti (British Pendulum experimental instrument)

3.2. Metot (Method)

Şekil 2’de belirtilen caddelerin taş mastik asfalt kaplama yüzeyleri üzerinde, İngiliz standardı “CSN

Çizelge 2. Kayma potansiyelinin sınıflandırılması (Classification of skid potential)

Sınıflama	Pandül değeri	Cof (μ)	Kayma olasılığı	Kayma Potansiyeli
Z	< 24	<0.25	20 de 1 (1/20)	Çok yüksek
Y	25-34	0.25-0.34	200 de 1(1/200)	Yüksek
X	35-44	0.36-0.46	10,000 de 1(1/10,000)	Orta
W	45-54	0.47-0.59	100,000 de 1 (1/100,000)	Düşük
V	>54	>0.59	Milyon da 1 (1/milyon)	Çok düşük

EN 13036-4” Amerikan Standardı “ASTM E303” ve Türk Standardı “TS EN 13036-4” te tarif edilen “British Pendulum”-İngiliz Sarkacı testi yapılmıştır [18-20].

Ölçüm alınacak yol yüzeyi fırçalanarak yıkanmıştır. Sürtünme ölçer deney aletinin pandül kolu trafik yönünde salınım yapacak şekilde maksimum eğimin %10’nu aşmayacak noktaya sabitlenmiştir. Yol yüzeyi ve pandül sürtünme parçasının sıcaklığı pirometre ile

ölçülmüştür. Yol yüzey sıcaklığı ile ıslatılma suyu sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının 15 °C’yi aşmamasına dikkat edilmiştir. Okumalar geniş sürtünme parçası kullanılmış ve yüzey homojen kabul edildiğinden değerler C skalasından alınmıştır. C skalası okumaları direkt kayma direnci değeri “Pandulum Test Value” (PTV) olarak kaydedilmiştir. Pandül Deney Değeri (PTV) beş salınımın ortalaması olarak, aşağıdaki bağıntı kullanılmak suretiyle hesaplanır.

$$PTV = \frac{\sum(v_1+v_2+v_3+v_4+v_5)}{5} \quad (1)$$

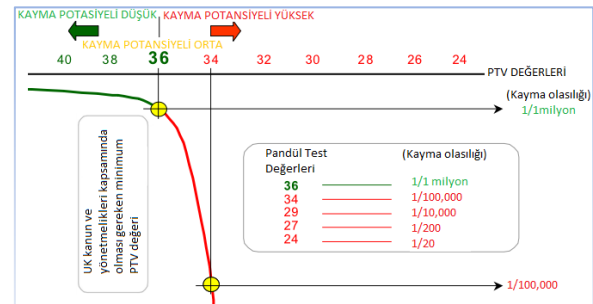
v1 , v2 , v3, v4, v5 : her salınıma ait değerleri ifade etmektedir.

Elde edilen PTV değerleri aşağıdaki formül yardımıyla sürtünme katsayısına “Coefficient Friction” (Cof) çevrilmiştir.

$$\mu = \left[\frac{110}{PTV} - \frac{1}{3} \right] - 1 \quad (2)$$

Pandül test işleminden elde edilen kayma direnci değerlerinin kayma potansiyeline göre sınıflamasında (Çizelge 2) dikkate alınmaktadır [20-21].

Ayrıca pandül test değerlerine bağlı olarak kayma olasılığı ilişkisi Şekil 4.’de verilmiştir [22].



Şekil 4. Pandül değerleri - kayma olasılığı ilişkisi (Pendulum values – skid probability relation)

Çizelge 3. Sıcaklık düzeltme değerleri (Temperature correction values)

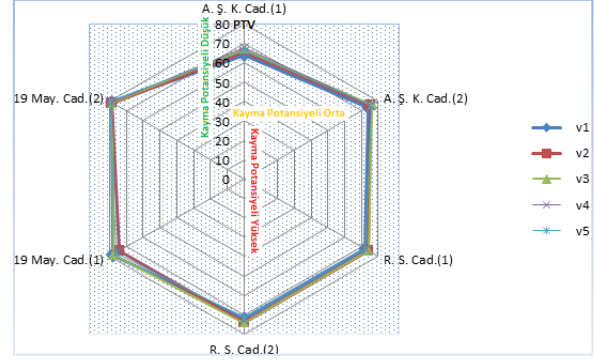
Sürtünme parçasının sıcaklığı	PTV düzeltme değeri
36-40	+3
30-35	+2
23-29	+1
19-22	0
16-18	-1
11	-2
11-15	-2
8-10	-3
5-7	-4

4. BULGULAR ve DEĞERLENDİRME (FINDINGS AND EVALUATION)

Kayma direnci ölçümleri Şekil 2’de belirtilen caddeler üzerinde, sağ ve sol şeritlerden ıslak ve kuru ölçümler ikişer noktadan trafik yönüne paralel olarak ölçülmüş ve arazi föylerine işlenmiştir. Türk Standardı “TS EN 13036-4” te tarif edilen British Pendulum-İngiliz Sarkacı testi, Şekil 2’de belirtilen caddeler üzerinde kuru ve ıslak ölçüm değerleri alınmıştır (Şekil 5).

**Şekil 5.** Cihaz kurulumu ve ölçüm (Device setup and measurement)

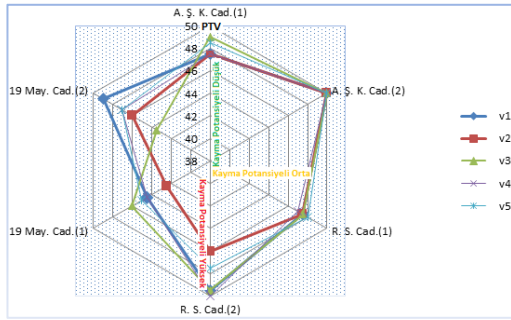
Ankara ili Keçiören ilçe sınırlarında bulunan Ahmet Şefik Kolaylı caddesi (A.Ş.K. Cad), Refik Saydam caddesi (R. S. Cad.) ve 19 Mayıs caddesi (19 May. Cad.) olmak üzere üç ana cadde üzerinden, iki adet şerit faktörü (Sağ ve Sol) her iki şeritte iki adet ölçüm noktası, her bir ölçümden beş adet salınım değeri (v1 , v2 , v3 , v4 , v5) ile alınan kuru ve ıslak okumalar radar grafik yöntemi ile Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir.

**Şekil 6.** Beş salınım değerine ait kuru PTV değerleri (Dry PTV values of five oscillation values)

Kayma direnci açısından durum çalışması yapılan caddelere ait düzeltilmemiş kuru ham salınım PTV değerleri radar grafiği ile Şekil 6’da verildiği gibidir. Radar grafik incelendiğinde caddeler üzerinde iki noktadan alınmış olan salınım değer ortalamaları yol yüzeyinin genel kayma direnci karakteristiğini yansıtmaya amacıyla sağ ve sol şerit ortalamaları A.Ş.K. (1), aynı yol yüzeyinden farklı bir noktadan aynı mantıkla A.Ş.K. (2) değerleri alınmıştır. A.Ş.K. Caddesi üzerindeki farklı iki nokta salınım değeri okumalarının (60-70 PTV) ve (70-80 PTV) radar bandında gözlemlendiği, R. S. Caddesi üzerindeki farklı iki nokta salınım değeri okumalarının her iki noktada da (70-80 PTV) radar bandında benzerlik gösterdiği, 19 May. Caddesi üzerindeki farklı iki nokta salınım değeri okumalarının (70-80 PTV) radar bandında benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

Sürtünme parçasının sıcaklık değeri dikkate alınmadan salınım (v1 , v2 , v3 , v4 , v5) değerleri üzerinden kayma direnci ve buna bağlı olarak kayma potansiyeli değerlendirilmesi doğru olmayacaktır. Fakat bu radar grafiği değerleri bize genel bir fikir olarak, caddeler üzerinde sağ ve sol şerit ortalama salınım değerleri kendi arasında her bir caddedeki kayma potansiyelinin benzer davranış sergilediği söylenebilir.

Yağış yol yüzey dokusunda makro ve mikro boşlukları doldurmak suretiyle lastik bandajı ile yol yüzeyi arasında yağlayıcı bir etki yapmaktadır. Bu durum düşük hızlarda (30 km/s) ihmal edilirken yüksek hızlarda (60 km/s) kayma direnci açısından önemli rol oynamaktadır. [5,13]. Bu bağlamda İngiliz pandül deneyi, durum çalışması yapılan caddelerde ıslak olarak yapılmıştır. Caddelere ait düzeltilmemiş ıslak ham salınım PTV değerleri radar grafiği ile Şekil 7’de verildiği gibidir.



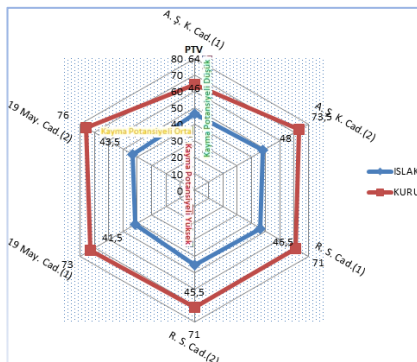
Şekil 7. Beş salınım değerine ait ıslak PTV değerleri (Wet PTV values of five oscillation values)

Radar grafik incelendiğinde yukarıda ifade edildiği gibi sonuçlar literatürü destekler nitelikte sergilenmiştir. Islak pandül test değerleri PTV ler kuru PTV değerlerine göre bir hayli düşük çıkmıştır. Caddeler bazında PTV değerleri incelendiğinde; A.Ş.K. (1) Cad., R. S. (2) Cad. ve 19 May. (1) ve (2) Caddeleri üzerinde alınan ıslak ölçümler farklı radar bantlarında yer almıştır. Bu na karşın A.Ş.K. (2) Cad. ve R. S. (1) Caddeleri üzerinde alınan ıslak ölçümler aynı radar bandında yer almıştır.

Bu durum makro ve/veya mikro yapının su ile karşılaştığında sürtünme direncini tekrarlayan denemelerde ne derece etkili olduğunu ortaya koymuştur. Fakat ıslak ölçümlerde elde edilen değerleri sadece suya bağlamak da doğru değildir. Operatör, ortam sıcaklığı, su filminin kalınlığı, rüzgar hızı gibi bir çok değişken Şekil 7'deki gibi bir veri çeşitliliğinin ortaya çıkmasına sebep olabilir.

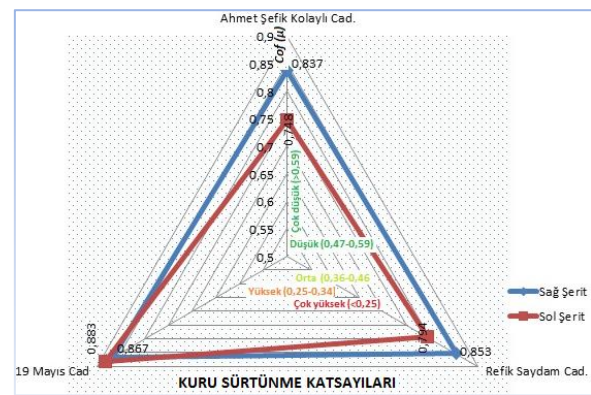
Tekrarlı ölçümler neticesinde elde edilen ıslak ve kuru salınım (v1 , v2 , v3, v4, v5) PTV değerleri formül 1 kullanılarak ortalama PTV değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler Çizelge 3'deki ölçülen sıcaklık değerleri kullanılarak ilgili aralıklarda PTV değerleri düzeltilmiş ve ortalama PTV değerleri elde edilmiştir. (Şekil 8)

Düzeltilmiş ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde ıslak kayma direnci değerleri ile kuru kayma direnci ölçümleri arasında hemen hemen benzer bir değişkenlik göstermiştir. (Şekil 8) Bu değişkenlik literatüre bakıldığında kuru kayma direnci değerlerine göre, kayma potansiyelinin çok düşük olduğu, ıslak kayma direnci değerlerine göre ise, kayma potansiyelinin orta ve düşük radar bandında seyrettiği gözlemlenmiştir.



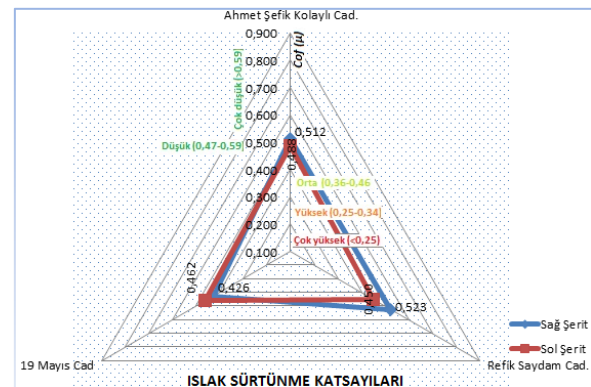
Şekil 8. Düzeltilmiş ortalama PTV (Adjusted average PTV)

Düzeltilmiş ortalama PTV değerlerinden (Formül 2) esas alınarak kuru ve ıslak sürtünme katsayıları sağ ve sol şeritler için ayrı ayrı hesaplanmış ve Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Daha önce verilen ve değerlendirilen grafikler ilgili caddeler de sağ ve sol şeritlerin ortalaması alınarak yol yüzeyinin tamamını temsili amaçlanmıştır. Sürtünme katsayıları değerlendirilirken şeritler ayrı ayrı değerlendirilerek farklılığın önemli seviyede olup olmadığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda özellikle A.Ş.K. Cad. ve R. S. Caddelerinde sağ şeride nazaran sol şeritte sürtünme katsayıları daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum hızlanma ve ani manevra şeridi görevini üstlendiği için olabileceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra bütün caddelerde sağ ve sol şeritler sürtünme katsayısı (Cof) bakımından çizelge 2'ye göre (V) kayma potansiyeli sınıfına dâhil olmuş kayma potansiyeli bakımından çok düşük seviye de seyretmiştir.



Şekil 9. Kuru sürtünme katsayısı (Cof) kayma potansiyeli ilişkisi (Dry friction coefficient (Cof) skid potential relationship)

Kuru sürtünme katsayılarında olduğu gibi, ıslak sürtünme katsayılarında da sol şerit sürtünme katsayıları bakımından az da olsa farklılık göstermiştir. Bunun yanı sıra sol şerit çizelge 2'ye göre (X) sınıfına orta derecede kayma potansiyeline dahil olurken, sağ şerit (W) sınıfında yer almış ve düşük kayma potansiyeline sahip olmuştur.



Şekil 10. Islak sürtünme katsayısı (Cof) kayma potansiyeli ilişkisi (Wet friction coefficient (Cof) skid potential relationship)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION and SUGGESTIONS)

Araştırma konusu olarak ele alınan Ankara ili Keçiören ilçesi şehir içi asfalt kaplamalarının kayma potansiyeli araştırılmıştır. Araştırma neticesinde belirlenen caddeler üzerinde elde edilen kayma potansiyeli sonuçları yorumlanmıştır. Her bir cadde kendi içerisinde kıyaslandığı gibi birbirleriyle de kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar neticesinde Keçiören ilçesini temsil niteliğinde olabilecek caddelerde kayma potansiyeli bazında literatürün ön gördüğü sınırlar içinde güvenli bölgede kaldığı görülmüştür.

Bu durum tek başına kızaklama eksenli kazalar için bir gösterge olsa da yeterli değildir. Şöyle ki yol yüzeyinde bölgesel yamalar, su drenajı için gerekli eğim ve suyun uzaklaştırılmasında önemli rolü olan mazgallar ve alt yapı yeterli olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra tekerlek bandajının aşınma açısından düzenli kontrolü, fren sistemlerinin bakımı ve sürücü psikoteknik açıdan durumu kızaklama eksenli kazaların girdileri olarak düşünülmektedir. Ayrıca yol yüzeyinin düşük hızlarda ki kayma kaza riskinin mikro yapıya ve yüksek hızlarda makro yapıya bağlı olduğu göz önünde bulundurularak daha gelişmiş elektronik ölçüm “optik lazer tarayıcılar” vb cihazlarıyla bozulma sürecinin takip edilmesi gerekmektedir.

Keçiören ilçesinin kayma direnci potansiyeli çalışma kapsamında her ne kadar güvenli bölgede kalsa da ilgili ölçümlerin belediye yol şubesi tarafından belirli periyotlarda ölçülmesi, yol yüzeylerinin toz ve kirlerden arındırılması farkındalığının artırılması önerilebilir. Bunun yanı sıra çalışmanın daha fazla cadde üzerinde yapılması ve hatta diğer ilçelerde de yürütülmesi Ankara için kayma potansiyeli anlamında çalışmanın anlamlılık düzeyini artıracaktır. Bu çalışma ilçe belediyeler, büyükşehir belediyesi, trafik yoğunluğunun belirlenmesi kapsamında Emniyet Genel Müdürlüğü (EGM) Trafik şube müdürlüğü ve üniversite işbirliği ile kapsamlı bir çalışma ile ele alınmalıdır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Arazi çalışmalarında desteklerinden ötürü Lisans öğrencimiz Mehmet GÖKTÜRK’e teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Harish H.S., Avinash N.P., and Harikeerthan M.K., “Field Evaluation of Longitudinal Skid Resistance on Pavement Surface in Bangalore City - A Case Study”, *The International Journal Of Engineering And Science*, 2(6): 10-18 (2013)
- [2] Xiao J., Kulakowski B.T., El-Gindy, M., “Prediction of risk of wet-pavement accidents: Fuzzy logic model”, *Transportation Research Record: Transportation Research Board*, 1717: (2000).
- [3] Ergun, M., “Road surface micro and macro influence on skid resistance”, *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1997).
- [4] <http://web.itu.edu.tr/~akalin/class/mak461e/tkfren.pdf>
- [5] “Permanent International Association of Road Congresses, Report of the Committee on Surface Characteristics”, *Proceedings of the 18th World Road Congress, World Road Congress, Brussels, Belgium*, 1-43, (1987).
- [6] “PIARC-Permanent International Association of Road Congresses, International PIARC experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurements”, *Permanent International Association of Road Congresses, Brussels, Belgium*, (1995).
- [7] Britton S.C., Ledbetter W.B., Gallaway B.M., “Estimation of skid numbers from surface texture parameters in the rational design of standard reference pavements for test equipment calibration”, *Journal of Testing and Evaluation*, 2: 73-83, (1974).
- [8] Moore D.F., “The friction of pneumatic tires”, *Elsevier Scientific Publishing, Amsterdam, Netherland*, (1975).
- [9] Ergun M., İyınam, S İyınam, A. F., “Prediction of road surface friction coefficient using only macro and micro texture measurements”, *Journal of Transportation Engineering*, 131: 311-319, (2005).
- [10] Bond R., Katekhda I.E.D., Lees G., “Williams, A.R., Tire/Road surface interaction”, *Journal of the Institution of Highway Engineers*, 13: 72-79, (1976).
- [11] Leu, M.C., Henry, J.J., “Prediction of skid resistance as a function of speed from pavement texture”, *Transportation Research Record: Transportation Research Board*, 666: 7-13, (1978).
- [12] Şengöz B., Topal A., Tanyel S., “Comparison of pavement surface texture determination by sand patch test and 3D laser scanning”, *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*, 56/1: 73-78, (2012).
- [13] Kaçmaz B., Topal A., Şengöz B., Tanyel S., “Farklı Tip Esnek Kaplamaların Yol Yüzey Özelliklerinin Arazi Ölçümleriyle Değerlendirilmesi”, *İMO Teknik Dergi*, 436: 7115-7137, (2015)
- [14] Jayawickrama P.W., Prasanna R., Senadheera S.P., “Survey of state practices to control skid resistance on hot-mix asphalt concrete pavements”, *Transportation Research Record: Transportation Research Board*, 1536: 71-80, (1996)
- [15] Walker R.S., Payne L.D., “Use of selcom laser for pavement texture and skid resistance measurement”, , Transportation Instrumentation Laboratory, *Research Project 1290*, University of Texas, Texas, USA, (2003).
- [16] Ergun M., İyınam Ş., İyınam F., “Kayma direnci için uluslararası indeks oluşturma çabaları”, *3. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 368-377, (2004).
- [17] *Karayolları Teknik Şartnamesi*, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, (2013).
- [18] CSN EN 13036-4 “Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 4: Method for measurement of slip/skid resistance of a surface”: The pendulum test, (2011).
- [19] E303 – 93 “Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester”, (2013).
- [20] TS EN 13036-4 “Yol ve hava alanı yüzey karakteristikleri - Deneysel yöntemleri - Bölüm 4: Yüzeyin kayma/kızaklama direncinin ölçülmesi yöntemi”: Pandül deneyi, (2014).
- [21] Bowman R., (2004) Practical Aspects of Slip Resistance of Stone, see <http://www.discoveringstone.com> (accessed 29/05/2011).
- [22] <http://www.floorslip.co.uk/probability-of-floor-slip-in-relation-to-pendulum-test-value.html>