

GAZİ UNIVERSITY
JOURNAL OF SCIENCE

PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY



e-ISSN 2147-9526

Editor-in-Chief

Ahmet GÜRAL, Gazi University

Assistant Editors

Hamit ÇINİCİ, Gazi University
Orhan KAPLAN, Gazi University

Layout Editor

Onur ALTUNTAŞ, Gazi University

Associate Editors

Hasan KÖMÜRCÜGİL, Eastern Mediterranean University,
Haitham Ebu-Rub, Texas A&M University at
Yousef Soufi, University Larbi Tebessi,
Alpaslan TURGUT, Dokuz Eylül University
Mustafa ŞAHMARAN, Hacettepe University
Necmi ALTIN, Gazi University
Sait ÖZDEMİR, Hacettepe University
Adem TATAROĞLU, Gazi University,
Ilyas ÇANKAYA, Ankara Yıldırım Beyazıt University,
Zeynel SEFEROĞLU, Gazi University
Metin İPEK, Sakarya University of Applied Science,
Çetin KARATAŞ, Gazi University,
Sabi ÖZTÜRK, Abant İzzet Baysal University,
Can Hacıoğlu, Sakarya University of Applied Science,
Saffet AYASUN, Gazi University,
Mustafa AKTAŞ, Gazi University,
Murat GÖK, Yalova University,
Mustafa ALTUNOK, Gazi University,
Nihat ÖZTÜRK, Gazi University,
Zafer BARLAS, Sakarya University of Applied Science,
Fecir DURAN, Gazi University,
Gökhan DURMUŞ, Gazi University,
Harmit SOLMAZ, Gazi University,
Uraz YAVANOĞLU, Gazi University,
Barak ERKAYMAN, Atılım University,
Tuğba TABANLIGİL CALAM, Gazi University

Advisory Board

Jian-Xin Shen, Zhejiang University, Hangzhou,
Ramazan BAYINDIR, Gazi University,
Bekir Sami YILBAŞ, King Fahd University,
Homer RAHNEJAT, University of Central Lancashire,
Nesimi ERTUGRUL, University of Adelaide,
Kraria HOCINE, Ferhat Abbas Saida University,
Mustafa ERSÖZ, Selçuk University,
Vladimir KATIC, University of Novi,
Yusuf ÖZTÜRK, San Diego State University,
H. Sendar YÜCESU, Gazi University,
Şemsettin ALTINDAL, Gazi University,
Ali Fuat BOZ, Sakarya University of Applied Science,
English Editor
Gizem Açelya AYHAN, Gazi University,

**GAZİ UNIVERSITY
JOURNAL OF SCIENCE****DESIGN AND ARTS**

İbrahim SEVİM, Yalova University,
İbrahim ÖZTÜRK, Pamukkale University,
Onur ALTUNTAŞ, Gazi University,
Nilaz DALDAL, Abant İzzet Baysal University,
Alper CALAM, Gazi University,
Şengül GÜVEN, Pamukkale University,
Sertaç BAYHAN, Qatar Environment and Energy Research Institute
Yunus DEMİR, Bursa Technical University,
Faraz AFSHARI, Erzurum Technical University,
Köksal ERENTÜRK, Atılım University,
Mete ÇELİK, Erziyes University,
Alper DEĞER, Gazi University,
M. ARANCA YÖN, Gazi University,
Cevdet Ferit KINCI, Gazi University,
Lehan KOYLU, Erziyes University,
Murat MAZMAN, Karabıyıklı Mehmetbey University,
Cemal KOÇAK, Gazi University,
Abdullah Cemil UĞLU, Abant İzzet Baysal University,
Mehmet DEMİRTAŞ, Gazi University,
Mehmet Rıza TÜR, Bartın University,
Başçavuş AVAR, Zonguldak Bulent Ecevit University,
Oruçalp ULUER, Gazi University,
M. Tamer AYDEMİR, Kadir Has University,
C. İzzet ÇAKIROĞLU, Gazi University,
Hamdi Taha Kalkan, Karadeniz Technical University,
Fatih Emre BORAN, Gazi University

İlhan M. KALYON, Stevens Institute of Technology,
İlhami ÇOLAK, Nişantaşı University,
Fulya ALTIPARMAK, Gazi University,
Mehmet Bayram YILDIRIM, Wichita State University,
Murat SAATÇIOĞLU, The University of Ottawa,
Mustafa İLBAŞ, Gazi University,
Mustafa M. ARAL, Georgia Institute of Technology,
Orhan RÜYÜKALACA, Cankaya University
Ali ŞEKER, Gazi University,
Behçet GÜLENC, Gazi University,
Sanjey Kumar PADMANABAN, Aalborg University,
Metin GÜRÜ, Gazi University,
Fujiyo KUROKAWA, Nagasaki University

Technical Editor

Çağrı SUIÇMEZ, Gazi University,
Onur POLAT, Gazi University,
Ahmet ERDAĞ, Gazi University

Volume 10 - Issue 1

Microstructure and Mechanical Properties of Silicon Carbide Containing Graphene Platelets Sonicated for Different Times

Sinem BAŞKUT
Research article

Investigation and voltammetric determination of the electrochemical behavior of 2-nitrophenol on a graphite pencil electrode surface modified with 4,4'-diaminobenzophenone molecule

Tuğba TABANLIGİL CALAM, Süleyman ÇALIŞKAN, Gülşen TAŞKIN, Zeynep TAŞKIN
Research article

The Effects of Cutting Parameters Used in Milling X153CrMoV12 Cold Work Tool Steel by End Mills on Surface Roughness and Hardness of The Workpiece

Ferhat CERİTBİNMEZ, Erdoğan KANCA
Research article

Thermal Characterization of Foam Concrete Panels Containing Expanded Perlite-Polystyrene Foam and an Aerogel Layer

Gökhan DURMUŞ, Hazal Cemile TOPUZ
Research article

Experimental Study on Cutting Force and Surface Roughness in Turning with CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN Coated Cutting Insert of Al-12Si-(0.02-1)Sr Alloys Manufactured by Permanent Mold Casting Method

Ali Paşa HEKİMOĞLU, Şenol BAYRAKCI
Research article

Experimental and Numerical Investigation of Innovative Air Duct Seat Design in Automobiles

Halil BAYRAM, Gökhan SEVİLEFEN, Ahmet İBİŞ
Research article

Investigation of the Effects of Processing Parameters on Measuring Accuracy in Electrical Discharge Machining of Ti-6Al-4V Alloy

Ramazan ÇAKIROĞLU
Research article

Investigation of Thermal Properties of Bi_{1-x}GaxPb_{0,2}Sr₂CaCu₂O_y Glass Ceramics

Şükrü ÇAVDAR, Durak BULUT, Selçuk İZMİRLİ, Neslihan TURAN, Tiabak KORALAY
Research article

Experimental Investigation on the Cooling Performance of a Counterflow Dew Point Evaporative Cooler

Ekrem ÖZDEN, Mahmut Sami BÜKER
Research article

Cloud Based WEB Application Design for Automatic Turkish Business Card Recognition and Its Performance Evaluation

İbrahim ŞAHİN, Mustafa Hikmet, Bilgehan UÇAR, Serdar SOLAK
Research article

Numerical Investigation Of Coke Oven Gas Combustion Characteristics In A Premixed Burner

Sezgin TAŞDEMİR, Serhat KARYEYEN, Mustafa İLBAŞ
Research article

The Effect of Horizontal Drainage Lengths on the Stability of a Homogeneous Earth-Fill Dam Under Seepage Conditions

Ahmet ERDAĞ, Pınar Sezin Öztürk KARDOĞAN
Research article

e-ISSN 2147-9526





Microstructure and Mechanical Properties of Silicon Carbide Containing Graphene Platelets Sonicated for Different Times

Sinem BAŞKUT^{1*} ¹Eskisehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Materials Science and Engineering, 26480, ESKISEHIR

Article Info

Research article
 Received: 23/11/2021
 Revision: 09/12/2021
 Accepted: 20/12/2021

Keywords

Graphene Platelets
 (GPLs)
 Sonication Time
 Fracture Toughness
 Silicon Carbide
 SPS

Abstract

Graphene platelets (GPLs) are widely preferred as a second phase to improve the properties of advanced technology ceramics thanks to their excellent mechanical properties. However, their agglomeration tendency requires the application of dispersion processes before mixing with matrix powders. Sonication is the most commonly used technique for the dispersion of GPLs. In this study, the effects of adding GPLs prepared at different probe-sonication times such as 1, 2, 4 and 6 h on the microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered (SPS) silicon carbide (SiC) were investigated. Scanning electron microscopy (SEM) examinations and size measurements revealed that the size of GPLs decreased with increasing sonication time. However, the reduction in the size of the GPLs was very low up to the 2 h sonication time and became more pronounced at the GPLs prepared at 4 and 6 h sonication times. Raman analyses indicated that dispersions of GPLs agglomerates increased as well as defects and/or disorders in their structures with increasing sonication time. However, the thickness of the well-dispersed GPLs obtained at the 2 h sonication time did not change when the sonication time was increased to 4 and 6 h. The highest increment in the fracture toughness of SiC matrix in both the through-plane (*//*) and in-plane (\perp) directions was achieved with the addition of GPLs sonicated for 2 h among the GPLs prepared at different sonication times. The higher contribution of 2 h sonicated GPLs to fracture toughness than non-sonicated and 1 h sonicated GPLs was associated with their more homogeneous distribution in the matrix microstructure, while higher toughness values they provided compared to 4 and 6 h sonicated GPLs could be explained by the positive effect of their higher lateral size and aspect ratio. GPLs have improved the fracture toughness of SiC matrix with the help of bridging and deflection toughening mechanisms.

1. INTRODUCTION

In recent years, graphene platelets (GPLs), a two-dimensional form of carbon, have been attracted attention as the second phase in improving the mechanical properties of advanced technology ceramics, thanks to their high surface area and superior mechanical properties (high fracture strength (~ 125 GPa) and Young's modulus (~ 1 TPa)) [1-3]. SiC as an important member of the advanced technology ceramics group, has a combination of excellent properties such as high hardness and strength, corrosion and oxidation resistance, chemical and thermal stability, and melting point. These properties of SiC have provided to be used in high temperature, wear resistant and cutting applications in many industrial areas such as automotive and aerospace industries [4-6]. However, the low fracture toughness of SiC restricts its usage areas.

It has been determined that the mechanical properties of matrix materials have increased significantly with the addition of GPLs [7-15]. In a study [7] in which GPLs-SiC composites were produced with the SPS technique at different temperatures, it was observed that the fracture toughness of SiC improved by approximately 5-20 % with the addition of 1 wt % GPLs. Li et al. [8], who sintered the SiC matrix composites containing 0.5, 1 and 1.5 wt % GPLs by using vacuum reaction sintering furnace, achieved the highest strength and fracture toughness at 1 wt % GPLs content with an increase of ~ 50 %. In a different study [9], the fracture toughness of SPSed SiC was improved by ~ 40 % with the addition of 2 wt % GPLs. Yang et al. [10], sintered the Si₃N₄ matrix composites containing 0.2, 0.5, 1, 2, 5 and 10 wt % GPLs using

the hot pressing technique determined that there was an improvement of ~ 10 and 3 % in the fracture toughness and strength of the Si₃N₄, respectively, at 0.2 wt % GPLs content.

The distribution of GPLs in the matrix microstructure is one of the critical parameters that affect the properties and performance of the final composites. For high mechanical performances, the GPLs should be homogeneously dispersed within the matrix microstructure without any agglomeration [16]. The fact that the GPLs tend to agglomerate due to weak van der Waals interactions between them indicates the importance of the applied dispersion techniques. It was determined that sonication is the most common and effective method used to dispersion of the GPLs before mixing with matrix powders. Sonication can be performed to the liquid containing GPLs in two ways, ultrasonic bath and probe-sonicator. The sound waves applied during sonication causes to agitate the GPLs in a liquid medium. In this way, the GPLs in the outer part of agglomerates peel off and become individual sheets [11]. Porwal et al. [12], who produces graphene reinforced alumina nanocomposites by using the SPS technique, have dispersed the GPLs for 2 h by sonication technique and then blended them with the alumina starting powders for 4 h using ball milling. In another study [13] which GPLs-aluminum nitride (AlN) composites were sintered by hot pressing technique and the mechanical properties of the products were measured, GPLs were first sonicated for 1.5 h and then mixed with AlN powders by using a planetary mill. To produce GPL-Si₃N₄ composites, Tapasztó et al. [14] applied 30 min of sonication to GPLs following the 30 min of planetary milling in the presence of melamine and blended the sonicated GPLs with Si₃N₄ powders by mechanical milling.

In all these studies, GPLs were dispersed for different sonication times before mixing with matrix powders. However, no study was found to determine the sonication time that would maximize the mechanical properties of the matrix to which GPLs were added. Additionally, it has been reported that the probe-sonication was more efficient in the dispersion of agglomerates than bath sonication [17]. Therefore, the motivation of this study was to determine the sonication time which GPLs can be successfully dispersed with minimal structural damage since the sonication process was known to cause defects/disorders in the structure and surface of the GPLs [18] and to investigate the effects of the addition of GPLs prepared at different sonication times on the microstructure and mechanical properties of SiC matrix such as hardness and fracture toughness. For this purpose, GPLs were prepared with probe-sonication technique for 1, 2, 4 and 6 h. SiC matrix and GPLs-SiC composites were sintered using the SPS technique. Microstructure, density, hardness, and fracture toughness measurements of the produced materials were carried out.

2. MATERIALS AND METHODS

Commercially available α -SiC powder (Saint Gobain Sika, DENSITEC 15) containing B₄C (CRS Chemicals, F2000 Grade) at a ratio of 1 wt % was used as starting material. Y₂O₃ (99.9% purity, H.C. Starck Berlin, Germany) and Al₂O₃ (Alcoa-A16SG) powders were used as sintering additives. The matrix material consists of the 93 wt % α -SiC, 5 wt % Y₂O₃ and 2 wt % Al₂O₃. ~ 12.2 μ m average lateral size, 5-8 nm thickness and 99.9 % purity were the properties of the commercial GPLs (Graph. Chem. Ind. Comp.) used during the study. The amounts of starting powders that form the SiC matrix and GPLs-SiC composites are given in Table 1.

Table 1. The amounts of starting powders that form the SiC matrix and GPLs-SiC composites.

| <i>Starting Powders</i> | <i>Compositions (g)</i> | |
|------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | <i>SiC Matrix</i> | <i>GPLs-SiC Composites</i> |
| <i>SiC</i> | <i>27.9</i> | <i>27.62</i> |
| <i>Y₂O₃</i> | <i>1.50</i> | <i>1.49</i> |
| <i>Al₂O₃</i> | <i>0.60</i> | <i>0.59</i> |
| <i>GPLs</i> | <i>-</i> | <i>0.3</i> |
| <i>Total</i> | <i>30</i> | <i>30</i> |

Probe-sonication was applied to GPLs in the isopropanol medium for 1, 2, 4 and 6 h under the conditions of successive vibration for 16 s and standby for 25 s, at the 20 kHz frequency, 40 % of amplitude. Sonication processes were carried out in an ice bath to avoid the negative effects of heat on the structure and surface of GPLs. The sizes of the GPLs were measured (Malvern Instruments, Hydro 2000) after each sonication process. The SiC, Y₂O₃ and Al₂O₃ powders were blended in the planetary ball mill by using the Si₃N₄ medium and Si₃N₄ balls for 1 h at 300 rpm. Non-sonicated GPLs and GPLs prepared at different sonication times were added to the matrix material composition at a rate of 1 wt %, and mixing was continued with planetary ball mill for 1 h at 120 rpm in the isopropanol medium. The evaporator removed the isopropanol in the slurries and the obtained GPLs-SiC composite powders were sieved. The SiC matrix and GPLs-SiC compositions were sintered using the SPS technique (HP 25D, FCT GmbH) at 1950 and 2000 °C, respectively. Sintering of all samples carried out at 50 MPa uniaxial pressure for 4 min under a vacuum atmosphere.

The samples' bulk density values were measured using the Archimedes method in the deionized water as the immersion medium. The relative density values were calculated by the rule of mixtures. The theoretical densities of SiC and GPLs were used as 3.21 and 2.26 gcm⁻³, respectively during the calculations. Samples were cut parallel and perpendicular to the SPS pressing axis since several studies have reported that the uniaxial pressure applied in the SPS causes the GPLs to be oriented within the matrix microstructure. The investigation and measurement directions were called through-plane (//, parallel to the SPS pressing axis) and in-plane (⊥, perpendicular to the SPS pressing axis) directions. The cutting and examination details were given elsewhere [19].

The cut samples were polished from coarse to fine with diamond polishing solutions and appropriate polishing cloths in the automatic polisher (STRUERS, TegraPol-25). XRD (Rigaku, RINT-2000) analyses were carried out in the through-plane (//) direction between 20 and 80° (2θ), at 40 kV accelerating voltage, 30 mA current, 2°/min scan speed and 0.02 step size since a distinctive graphene peak was obtained in this direction [19]. The Raman (WITec, alpha 300) analyses were performed to each GPLs prepared at different sonication times.

The hardness values of the samples were measured by using the Vickers indentation (Emco-Test) technique under the conditions of 5 kg load and 10 s dwell time. At least five measurements were performed for each sample, and average values were used to obtain statistical results. Furthermore, the fracture toughness values were calculated by using the equation 1 given below [20]:

$$K_c = 0.067 \left(\frac{E}{H_V} \right)^{0.4} H_V \alpha^{0.5} \left(\frac{c}{a} \right)^{-1.5} \quad (1)$$

While the morphologies of the GPLs were examined by secondary electron (SE-SEM) imaging technique, the polished and indented surfaces of the sintered samples were investigated by backscatter electron (BSE-SEM) imaging technique in the SEM (Zeiss, SUPRA 50 VP).

1. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows morphological SE-SEM images of the non-sonicated GPLs (a) and GPLs sonicated for 1 (b), 2 (c), 4 (d) 6 (e) h. Additionally, the GPLs platelet sizes, measured after each sonication process are given in Table 2. Morphological images and platelet size measurements were compatible with each other, and they demonstrated that the platelet size of GPLs decreased as the applied sonication time increased. Measurements indicated that the size of the non-sonicated GPLs, which was about 12.20 μm, reduced by ~ 2, 5, 25 and 30 to 11.90, 11.55, 9.10 and 8.50 μm with probe-sonication for 1, 2, 4 and 6 h, respectively (Table 2). This revealed that the GPLs undergo fragmentation as well as dispersion due to the generation of shear force caused by shock waves during the sonication process [18]. However, there was a very slight decrease in the average platelet sizes of GPLs sonicated for 1 and 2 h, while the decrease has become

evident when the sonication time was increased to 4 and 6 h. Although the size difference was large among the non-sonicated GPLs, GPLs sonicated for 6 h had a more uniform platelet size distribution (Fig. 1).

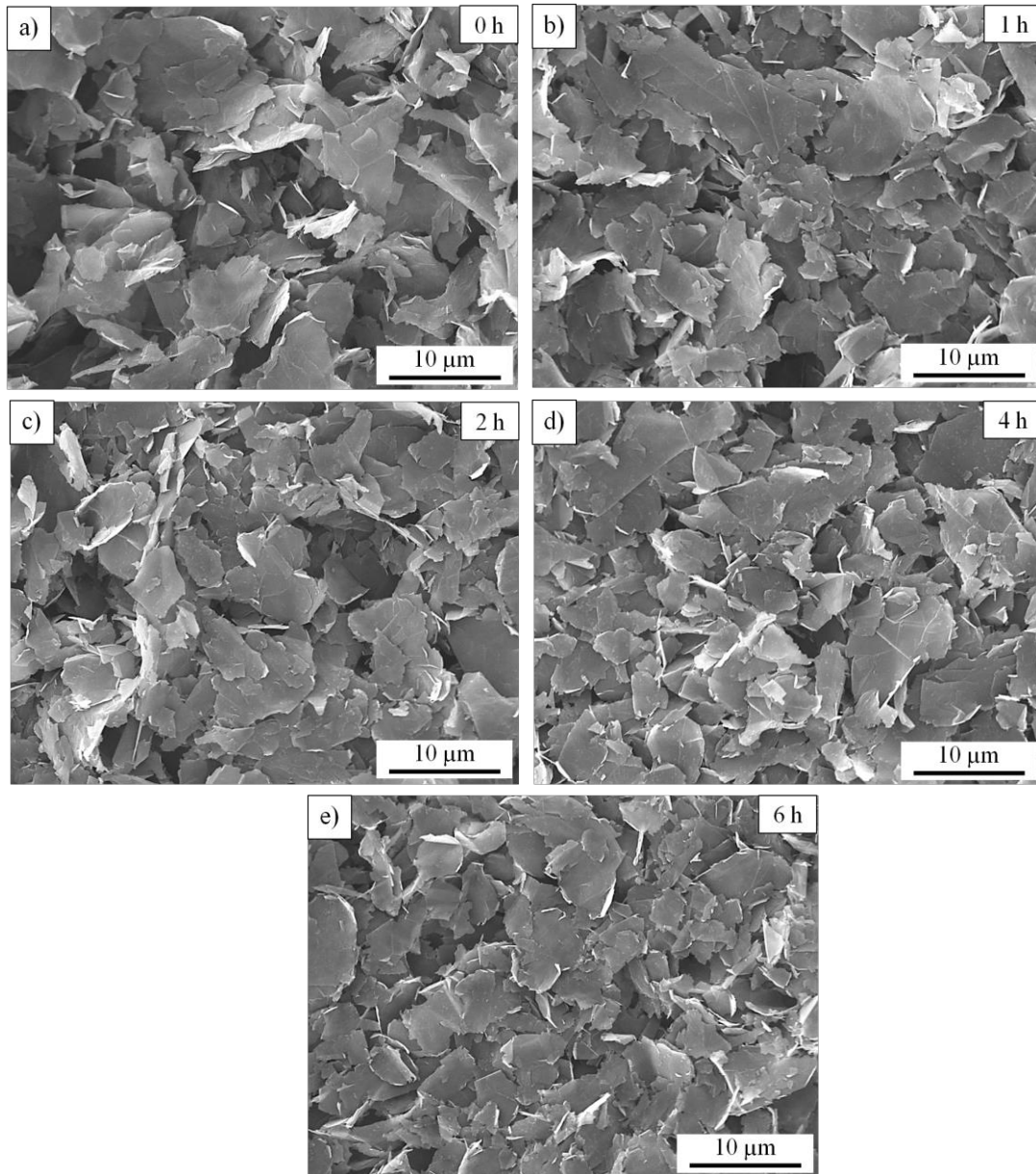


Figure 1. Morphological SE-SEM images of the (a) non-sonicated GPLs and GPLs sonicated for (b) 1, (c) 2, (d) 4 and (e) 6 h.

Figure 2 and Table 2 present the Raman spectra and Raman analysis results of non-sonicated GPLs and GPLs sonicated at different times, respectively. The single shape of the 2D band in the spectra of all GPLs (Fig. 2) confirmed the graphene phase [21]. 2D-band generally related to the thickness of the GPLs, and the ratio of the 2D-band intensity to the G-band intensity (I_{2D}/I_G) gives information about the number of layers [22, 23]. During the study, at least ten Raman analyses were performed to each GPLs, and the averages of the obtained values were given in Table 2. The average I_{2D}/I_G value (0.880) and measurement ranges (0.755–0.960) indicated that non-sonicated GPLs were multilayered in different thicknesses. With the application of probe-sonication for 1, 2, 4 and 6 h, the average I_{2D}/I_G value increased to 0.905, 0.937, 0.940, and 0.942, respectively. These results revealed that the stacked GPLs were de-agglomerated with sonication and that the thickness of the GPLs decreased with increasing processing time. The fact that the

lowest measured I_{2D}/I_G limit increased as the applied sonication time increased showed that the dispersion of GPL agglomerates continued with increasing sonication time. On the other hand, the upper I_{2D}/I_G limit remained the same as the time increased after 2 h of sonication (Table 2), indicating that the thinnest GPLs that could be obtained by sonication was achieved at this point, and no further thinning could occur as the process continued.

Table 2. The average sizes of the non-sonicated GPLs and GPLs sonicated at different times and also average I_{2D}/I_G , I_D/I_G values calculated by using at least ten Raman analyses. The values in brackets are for the measurements range

| Sonication Time (h) | Average Size (μm) | I_{2D}/I_G | I_D/I_G |
|---------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| 0 | 12.20 | 0.880 (0.755–0.960) | 0.847 (0.769–0.895) |
| 1 | 11.90 | 0.905 (0.782–0.967) | 0.855 (0.786–0.900) |
| 2 | 11.55 | 0.937 (0.855–0.981) | 0.870 (0.803–0.906) |
| 4 | 9.10 | 0.940 (0.870–0.981) | 0.884 (0.815–0.917) |
| 6 | 8.50 | 0.942 (0.890–0.982) | 0.892 (0.823–0.926) |

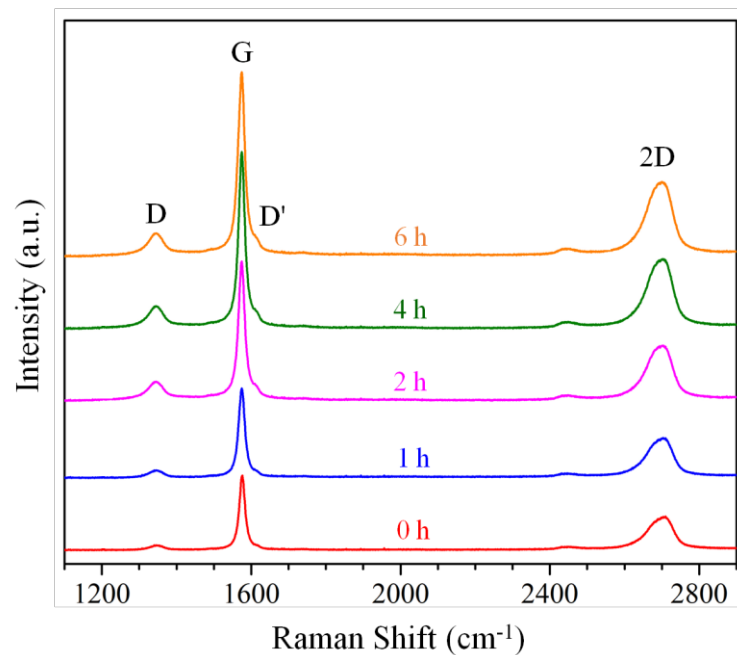


Figure 2. Raman spectra of the non-sonicated GPLs and GPLs sonicated for 1, 2, 4, 6 h.

The ratio of the D-band intensity to the G-band intensity (I_D/I_G) in the Raman spectra can be used to express the degree of defects and disorders in the GPLs structure [23]. As seen in Table 2, the ratio of I_D/I_G increased with increasing probe-sonication time. The fact that the increased degradation in the GPLs structure has a negative effect on their reinforcement strength [16] has shown the necessity of achieving maximum dispersion in short sonication times.

Table 3 gives the bulk and relative density values of SiC matrix and SiC matrix composites containing GPLs. The bulk and relative densities of the SiC matrix were determined as 3.205 gcm^{-3} and 99.8 %, respectively. This showed that the applied sintering conditions were suitable for obtaining highly dense SiC. On the other hand, with the addition of GPLs prepared at different times, the bulk density of SiC

decreased by about 2 %. Porosities that may occur in the composite microstructure and cracks formation in the layered structures caused by the thermal expansion and elastic modulus mismatch between GPLs and the matrix can be shown as the reasons for this decline in density [24, 25]. The relative densities of GPLs-SiC composites higher than 97 % showed that high-density composites were produced in themselves.

Table 3. Bulk and relative density values of the SiC matrix and SiC matrix composites containing non-sonicated GPLs and GPLs prepared at different probe-sonication times.

| Sonication Time (h) | Bulk Density (gcm^{-3}) | Relative Density (%) |
|----------------------------|--|-----------------------------|
| SiC Matrix | 3.205 | 99.8 |
| 0 | 3.125 | 98.2 |
| 1 | 3.115 | 97.9 |
| 2 | 3.120 | 98.1 |
| 4 | 3.120 | 98.1 |
| 6 | 3.100 | 97.4 |

The through-plane ($//$) direction XRD pattern (Fig. 3) obtained from the SiC matrix and GPLs-SiC composites showed the presence of two main hexagonal polytypes of SiC, 6H-SiC and 4H-SiC. During sintering, the 6H-SiC structure was partially transformed to 4H-SiC [26]. The low intensity graphene peak determined at 26.6 degrees in the pattern of SiC matrix indicated that the free carbon contained in the initial SiC powder crystallized during SPS. The intensity of the graphene peak increased with the addition of GPLs.

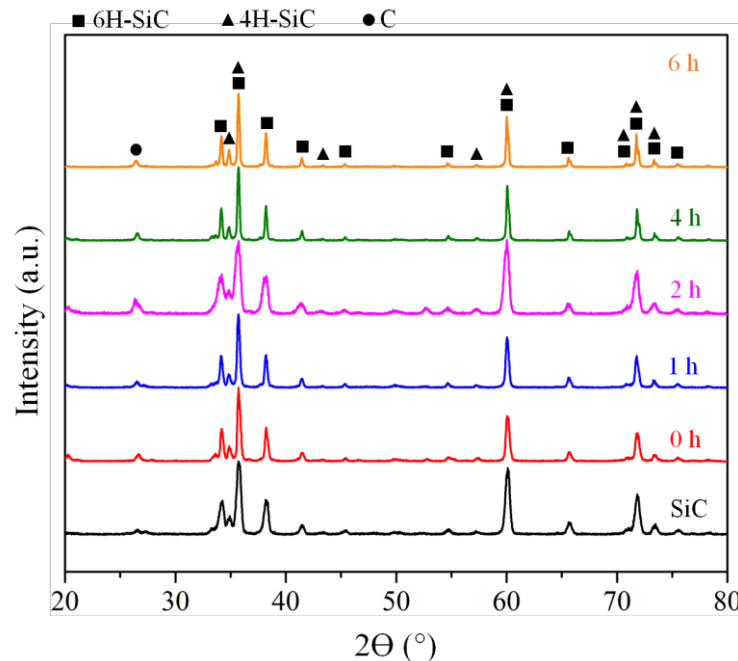
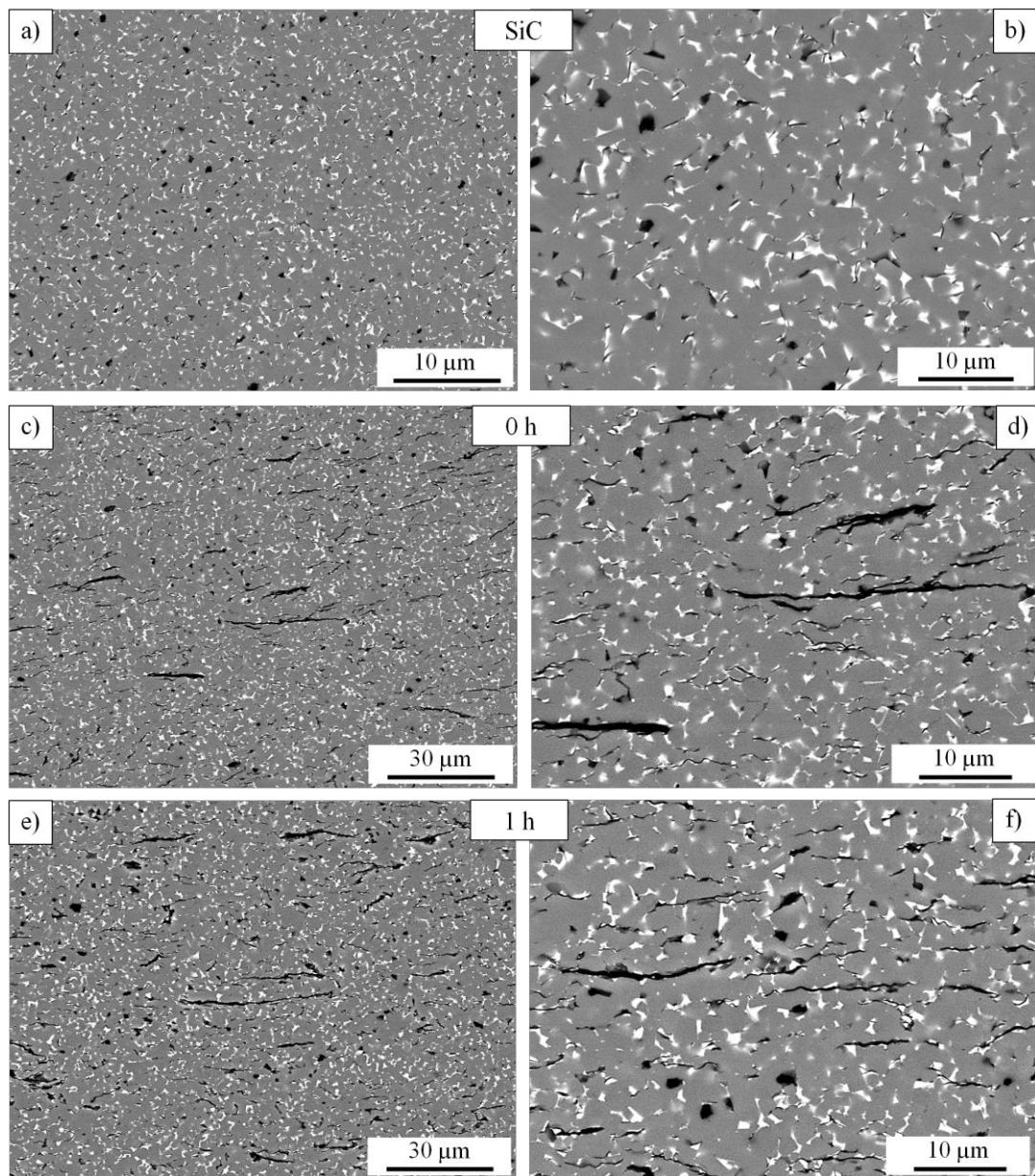


Figure 3. Through-plane ($//$) direction XRD pattern obtained from the SiC matrix and SiC matrix composites containing non-sonicated GPLs and GPLs sonicated for 1, 2, 4 and 6 h.

Figure 4 presents low (a, c, e, g, i, k) and high (b, d, f, h, j, l) magnification BSE-SEM images of SiC matrix (a, b) and GPLs-SiC composites (c-l) taken in the in-plane (\perp) direction. To investigate whether black phases that are needle and spherical like observed in the microstructure of SiC matrix are porosity or not, magnified BSE-SEM and in-lens-SEM images obtained from the same region are given in Figure 5 a and b, respectively. The in-lens-SEM image, a surface sensitive imaging technique, revealed that the phases marked with arrows in the BSE image were not porosities. The needle-like phase indicated by the blue arrows may be associated with the crystallized carbon identified in XRD, while the spherical-like phase (indicated with pink arrows) may be the crystallized carbon or B_4C phase whose source was B_4C powder contained at the small amount in the starting powder mixture. In addition, the regions indicated by yellow arrows demonstrated that some crystallized carbon or B_4C grains were pulled out from the surface during mechanical polishing. The homogeneous dispersion of the SiC grains, white liquid phase and black phase associated with crystallized carbon and/or B_4C without any porosity in the microstructure of the SiC matrix supported the density result by showing that a highly dense SiC matrix was produced.



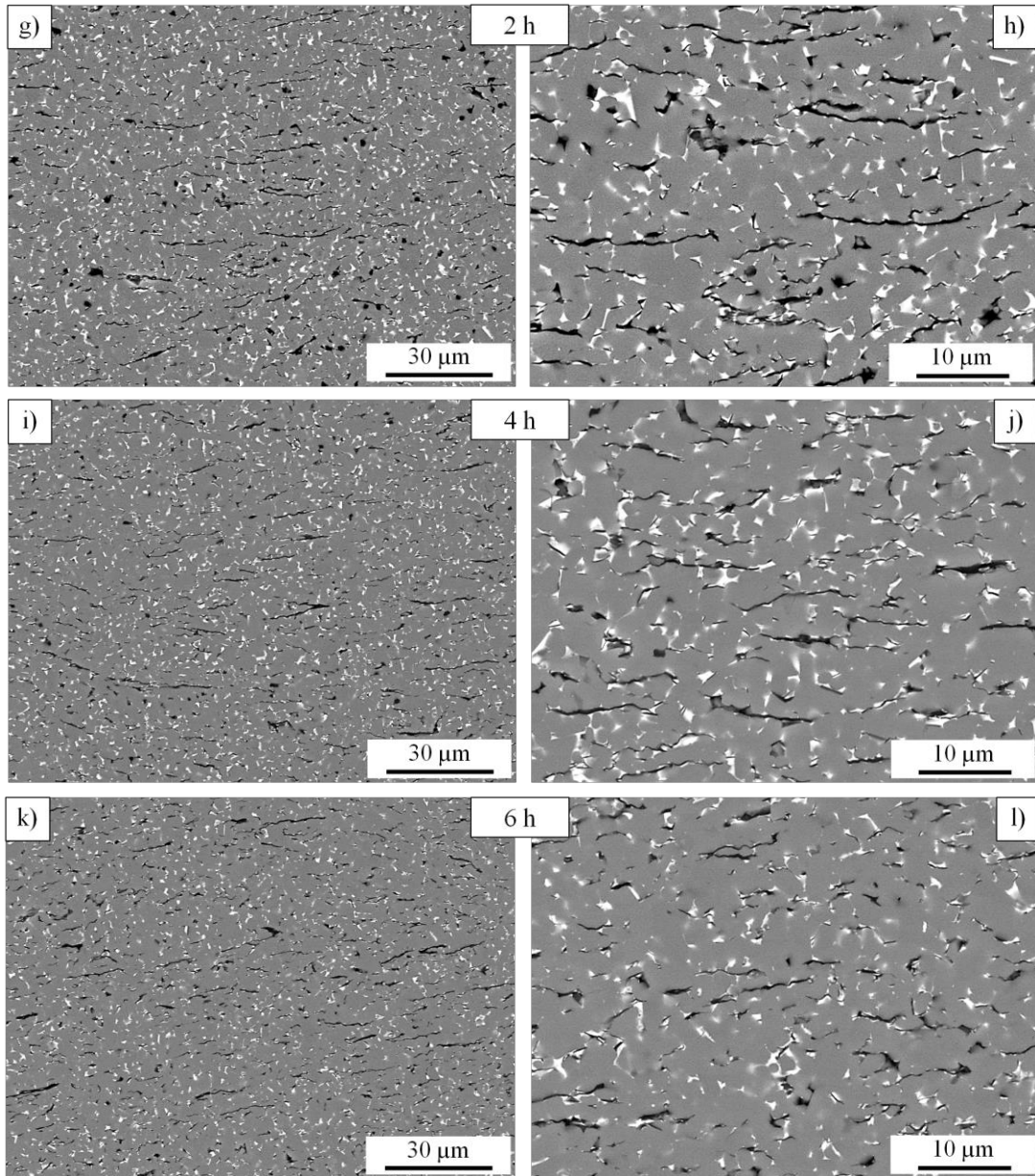


Figure 4. BSE-SEM images taken at low and high magnifications from (a, b) SiC matrix and SiC matrix composites containing (c, d) non-sonicated, (e, f) 1, (g, h) 2, (i, j) 4, (k, l) 6 h sonicated GPLs.

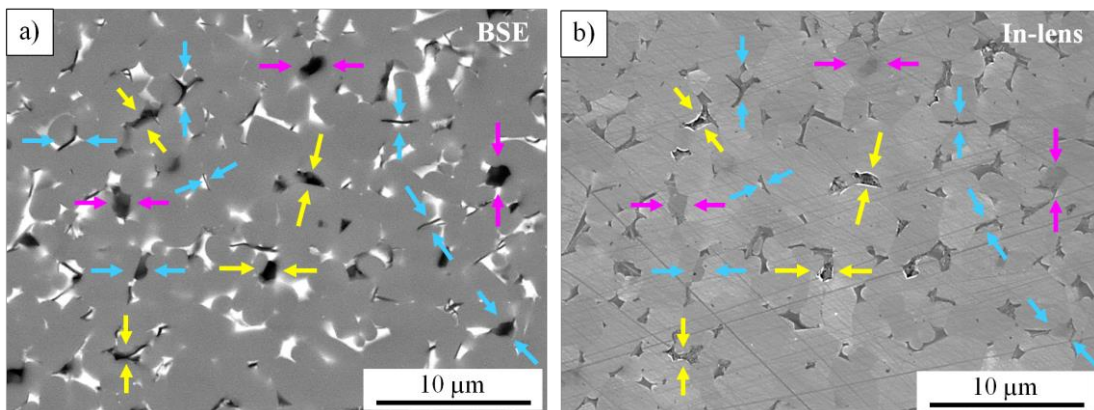


Figure 5. (a) BSE-SEM and (b) in-lens-SEM images obtained from the same region of the SiC matrix.

It was clear that the GPLs represented by black color were dispersed with orienting in the microstructure of the GPLs-SiC composites (Fig. 4 c-l) due to applied uniaxial pressure in the SPS. Additionally, while no significant change was observed in the size of the GPLs at the 1 and 2 h sonication times, a noticeable size reduction has occurred in the 4 and 6 h sonicated GPLs as consistent with size measurement results.

Besides, the microstructures demonstrated the presence of thick GPLs in non-sonicated and 1 h sonicated GPLs, and also showed that these stacked structures were highly dispersed in 2, 4 and 6 h sonicated GPLs. However, there was no significant difference in thickness between the GPLs sonicated for 2, 4 and 6 h. When the microstructures of all produced GPLs-SiC composites were evaluated together, it was determined that the presence of thicker GPLs in the non-sonicated GPLs limited their homogeneous distribution in the matrix microstructure compared to the sonicated GPLs. The applied sonication processes have enabled the dispersed GPLs to be homogeneously distributed in the SiC matrix microstructure. Measurements and microstructural studies have shown that GPLs could be effectively dispersed and retain their sizes without much fragmentation at 2 h sonication time. In addition to all these, microstructures have shown that high-density GPLs-SiC composites could be produced.

The effects of adding the GPLs dispersed at different probe-sonication times on the hardness and fracture toughness of the SiC matrix are shown in Figure 6. Since no significant difference was observed between the samples' through-plane and in-plane directions hardness values, the averages of the values measured in both directions were used. The hardness of the SiC matrix was reduced by ~ 8 and 7, 6, 5, 5 with the addition of 1 wt % non-sonicated GPLs and 1, 2, 4, 6 h sonicated GPLs, respectively. Weak interfacial bonding between GPL agglomerates and SiC grains could be accepted as a reason for this decline. As the applied sonication time increased, the degree of dispersion of the agglomerates also increased, and the decline in the hardness of SiC relatively decreased (Fig. 6 a).

The fracture toughness of the SiC matrix did not exhibit a noticeable difference between the through-plane and in-plane directions like the hardness value. GPLs sonicated at different times improved the fracture toughness of the SiC matrix at different degrees in both directions. The fracture toughness of the SiC matrix ($5 \text{ MPa m}^{1/2}$) increased by ~ 4, 12, 28, 26, 24 % and by ~ 12, 22, 38, 30, 28 % in the through-plane and in-plane directions, respectively, with the addition of non-sonicated, 1, 2, 4, 6 h sonicated GPLs. In both the through-plane and in-plane directions, the highest fracture toughness value was achieved with the GPLs sonicated for 2 h, while the non-sonicated GPLs provided the least enhancement (Fig. 6 b). Figure 7 shows the BSE-SEM images of the representatively selected cracks obtained by in-plane direction indentations in SiC matrix and 2 h sonicated GPLs-SiC composites. It was seen that black phases associated with crystallized carbon and/or B_4C also play an important role in the dissipation of the energy accumulated at the tip of the crack formed in the SiC matrix in addition to the grain boundaries (Fig. 7 a). Crystallized carbon and B_4C grains preserved the fracture toughness of the matrix mainly by the bridging mechanism (indicated with yellow arrows). On the other hand, the energy of the crack formed in SiC containing 1 wt % GPLs sonicated for 2 h (Fig. 7 b) decreased under the influence of the bridging and deflection toughening mechanisms (indicated with green arrows) provided by GPLs as well as the bridging mechanism of the black grains associated with crystallized carbon and B_4C (indicated by yellow arrows); thus, the crack has thinned and stopped.

The lowest toughness value of the SiC containing non-sonicated GPLs among the produced GPLs-SiC composites can be explained by the formation of GPLs-rich and GPLs-poor regions in the matrix microstructure due to undispersed GPLs agglomerates (Fig. 4 c). Since the contribution of GPLs to preventing or retarding crack propagation was limited in GPL-poor regions, the toughness values in the measurements corresponding to these regions were close to that of the SiC matrix. As a result of the dispersion of the GPLs by the applied sonication processes, their more homogeneous dispersion compared to the non-sonicated GPLs in the matrix microstructure led to more improvement on fracture toughness. The fracture toughness tended to increase up to the composite containing GPLs sonicated for 2 h, whereas it started to decrease when the sonication time was increased to 4 and 6 h. The increase in the toughness of SiC matrix by the GPLs sonicated for 2 h more than the 1 h sonicated GPLs can be explained by the fact

that the crack has a greater chance of encountering homogeneously distributed GPLs, thus the activation of more toughening mechanisms.

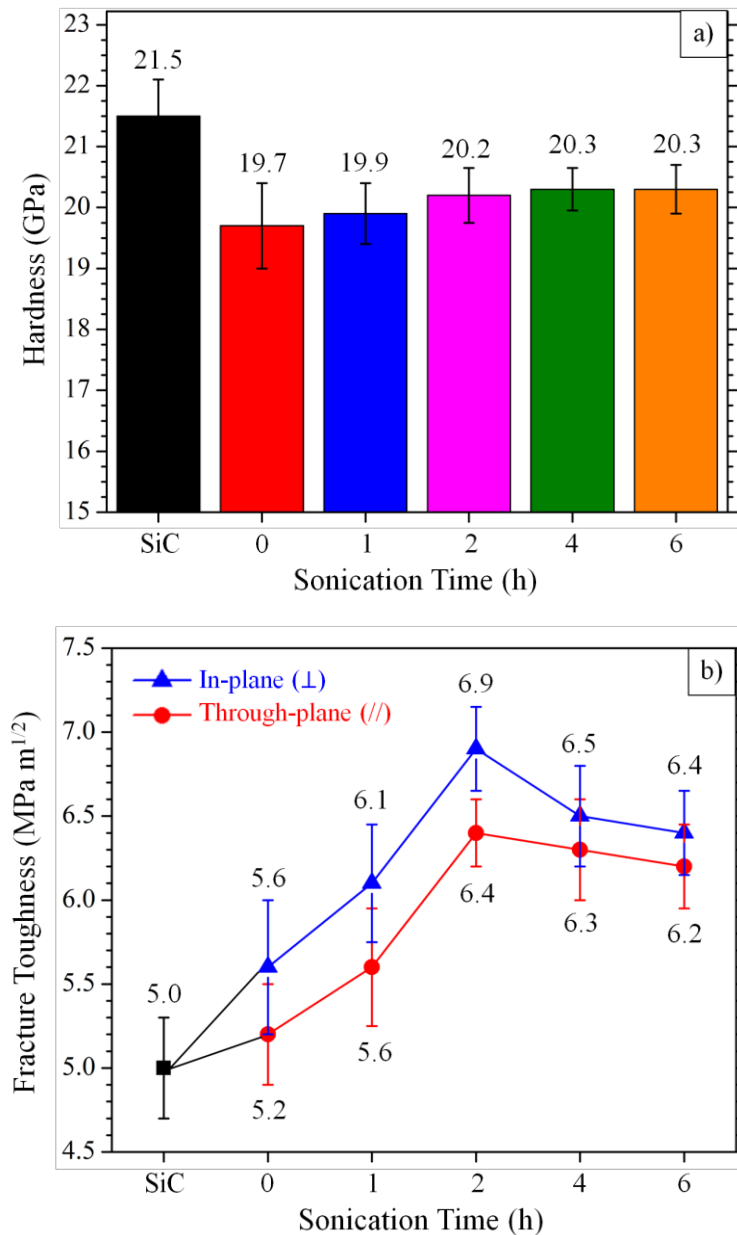


Figure 6. (a) Hardness and (b) fracture toughness values of the SiC matrix and GPLs-SiC composites.

The higher fracture toughness of SiC containing GPLs sonicated for 2 h compared to the SiCs containing GPLs prepared at 4 and 6 h indicated the positive effect of the large lateral size of GPLs on fracture toughness. Larger GPLs were more successful than smaller ones at retarding crack propagation by mechanisms such as deflection and bridging. This result was compatible with the study [27] in which the mechanical properties of polymer matrix composites containing two different GPLs with lateral sizes of 5 and 25 μm at the same thickness were measured. In that study, at the same GPLs contents, the fracture toughness and flexural modulus values of the composites containing GPLs having 25 μm lateral size were found to be significantly higher than those containing a GPLs with a size of 5 μm . Furthermore, this different fracture toughness behavior of SiCs containing GPLs sonicated for 2, 4 and 6 h can also be associated with the different aspect ratios of GPLs. As the Raman and microstructure analyses revealed that

there was no obvious thickness difference between GPLs sonicated for 2, 4 and 6 h and the platelet size of the 2 h sonicated GPLs was larger than the others, it can be assumed that the GPLs sonicated for 2 h had the highest aspect ratio among these three GPLs. GPLs with a high aspect ratio bond more strongly with the matrix than GPLs having a low aspect ratio, facilitating the transfer of load from the matrix to the GPLs [28, 29].

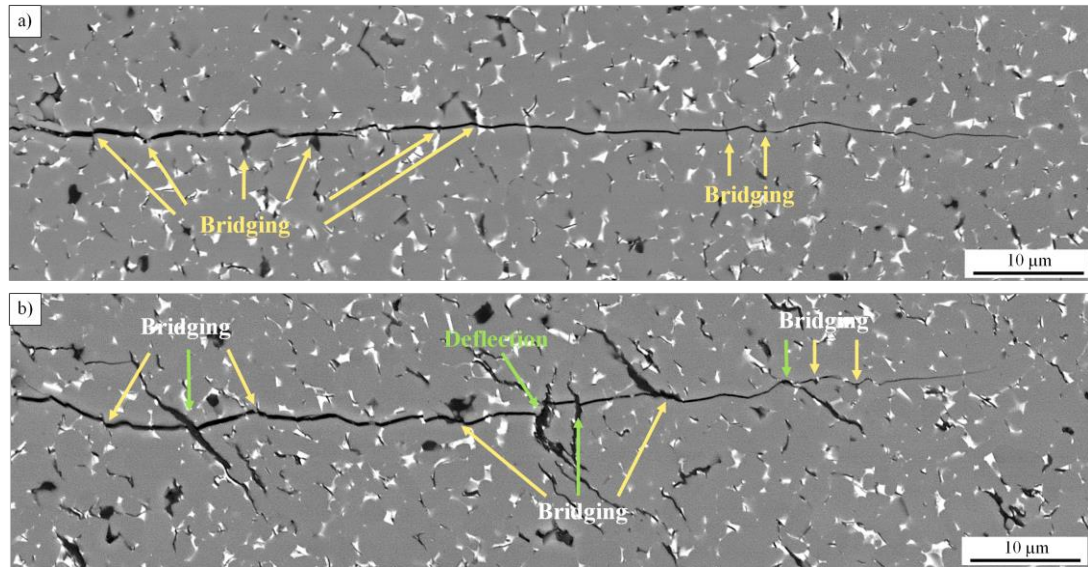


Figure 7. Representative toughening mechanisms occurred in the (a) SiC matrix and (b) SiC matrix composite containing GPLs sonicated for 2 h in the in-plane (\perp) direction.

It was determined that the fracture toughness values of all the GPLs containing SiC composites were higher in the in-plane direction than in the through-plane direction as consistent with studies on GPLs-ceramic matrix composites produced with SPS [19, 30]. However, the toughness differences between the two directions varied between ~ 8 and 3 %, indicating a slight anisotropy. The difference in toughness between the two directions decreased with increasing sonication time applied to the GPLs. This can be explained by the fact that it becomes more difficult for GPLs to be oriented in a particular direction in the matrix microstructure as their platelet size decreases.

2. CONCLUSION

The effects of adding the GPLs sonicated for 1, 2, 4 and 6 h on the microstructure and mechanical properties of SiC ceramics such as hardness and fracture toughness were investigated. Microstructural analyses showed that GPLs agglomerates dispersed, and the platelet size of GPLs decreased with increasing sonication time. Although this decrease in platelet size was minimal up to the 2 h sonication time, it became evident in the GPLs sonicated for 4 and 6 h. Raman analyses indicated that stacked GPLs dispersed and became thinner up to 2 h sonication time, and after this point, when the sonication time increased to 4 and 6 h, the GPLs agglomerates continued to be dispersed, but the thickness of the already thinned ones remained the same. Optimum dispersion was achieved with the least change in platelet size at 2 h of sonication. With the addition of GPLs sonicated at different times, the hardness of the SiC matrix decreased by about 5-8%. Among the GPLs sonicated at different times, the highest fracture toughness in both the through-plane and in-plane directions was obtained in the SiC containing GPLs sonicated for 2 h. The toughness of 2 h sonicated GPLs-SiC composite was higher than SiCs containing non-sonicated and 1 h sonicated GPLs because of their more homogeneous dispersion in the matrix microstructure. The higher degree of increase in fracture toughness of SiC matrix by GPLs sonicated for 2 h compared to GPLs sonicated for 4 and 6 h was due to the positive effect of larger platelet size and aspect ratio. GPLs have increased the fracture toughness of SiC matrix through bridging and deflection toughening mechanisms.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the Eskisehir Technical University Scientific Research Projects under the project numbers of 20ADP087. The author would like to thank to Prof. Dr. Servet Turan for providing all the raw materials for the production of materials and also to Furkan Buluç and Orhan Çetin for their contributions to the study.


REFERENCES

- [1] Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S.I., Seal, S. (2011). Graphene based materials: past, present and future. *Prog. in Mat. Sci.*, 56, 1178–1271. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.03.003>.
- [2] Mas-Balleste, R., Gomez-Navarro, C., Gomez-Herrero, J., Zamora, F. (2011). 2D materials: to graphene and beyond. *Nanoscale*, 3, 20-30. 10.1039/c0nr00323a.
- [3] Geim, A.K., Novoselov, K.S. (2007) The rise of graphene. *Nature Mat.*, 6, 183–191. 10.1142/9789814287005_0002
- [4] Abderrezak, H., Bel Hadj Hmida, E.S. (2011). Silicon Carbide: Synthesis and Properties in Properties and Applications of Silicon carbide. IntechOpen. ISBN: 978-307-201-2.
- [5] Kordina, O., Sadow, S.E. (2004). Silicon Carbide Overview in *Advances in Silicon Carbide Processing and Applications*. Artech House, Inc., Boston, 1-23. ISBN:1-58053-740-5.
- [6] Mukasyan, A.S. (2017). Silicon Carbide, in *Concise Encyclopedia of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, History, Theory, Technology, and Products*. Elsevier Science. ISBN: 9780128041888 336-338.
- [7] Bodis, E., Cora, I., Balazsi, C., Nemeth, P., Karoly, Z., Klebert, S., Fazekas, P., Keszler, A.M. (2017). Spark plasma sintering of graphene reinforced silicon carbide ceramics. *Ceram. Int.*, 43 (12), 9005-9011. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.042>.
- [8] Li, S., Luo, X., Wei, C., Gao, P., Wang, P., Zhou, L. (2020). Enhanced strength and toughness of silicon carbide ceramics by graphene platelet-derived laminated reinforcement. *J. of All. and Comp.*, 834, 155252. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155252>.
- [9] Rahman, A., Singh, A., Karumuri, S., Harimkar, S.P. (2015). Graphene reinforced silicon carbide nanocomposites—Processing and properties. *Comp., Hybrid, and Multifunc. Mat.*, 4, 165-176. 10.1007/978-3-319-06992-0_21.
- [10] Yang, Y., Li, B., Zhang, C, Wang, S., Liu, K., Yang, B. (2015). Fabrication and properties of graphene reinforced silicon nitride composite materials. *Mat. Sci. and Eng.:A*, 644, 90-95. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.062>.
- [11] Taylor, A.C. (2012). Processing of polymer nanocomposites. *Manufac. Tech. for Poly. Mat. Comp. (PMCs)* 95-119. <https://doi.org/10.1533/9780857096258.1.95>.
- [12] Porwal, H., Tatarko, P., Grasso, S., Khaliq, J., Dlouhý, I., Reece, M.J. (2013). Graphene reinforced alumina nano-composites. *Carbon*, 64, 359-369. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.07.086>.
- [13] Yun, C., Fenga, Y., Qiu, T., Yang, J., Li, X., Yu, L. (2015). Mechanical, electrical, and thermal properties of graphene nanosheet/aluminum nitride composites. *Ceram. Int.*, 41(7), 8643-8649. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.03.075>.

- [14] Tapasztó, O., Puchy, V., Horváth, Z.E., Fogarassy, Z., Bódis, E., Károly, Z., Balázs, K., Dusza, J., Tapasztó, L. (2019). The effect of graphene nanoplatelet thickness on the fracture toughness of Si₃N₄ composites. *Ceram. Int.*, 45(6), 6858-6862. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.180>.
- [15] Kandemir, S. (2018). Grafen Nanolevha Takviyesinin AlSi10Mg Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. *Gazi Üniv. Fen Bil. Derg. Part C: Tas. ve Tek.*, 6(1), 177-187. [10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.334577](https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.334577).
- [16] Markandan, K., Chin, J.K., Tan, M.T.T. (2017). Recent progress in graphene based ceramic composites: a review. *J. of Mat. Res.*, 32, 84-106. [10.1557/jmr.2016.390](https://doi.org/10.1557/jmr.2016.390).
- [17] Muthoosamy, K., Manickam, S. (2017). State of the art and recent advances in the ultrasound-assisted synthesis, exfoliation and functionalization of graphene derivatives. *Ultrasonics Sonochem.*, 39, 478-493. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.05.019>.
- [18] Zhang, B., Chen, T. (2019). Study of Ultrasonic Dispersion of Graphene Nanoplatelets. *Materials*, 12(11), 1757. <https://doi.org/10.3390/ma12111757>
- [19] Baskut, S., Cinar, A., Turan, S. (2017). Directional properties and microstructures of spark plasma sintered aluminum nitride containing graphene platelets. *J. of the Europ. Ceram. Soc.*, 37, 3759–3772. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.03.032>.
- [20] Rangel, E.R. (2011). Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture, Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry. InTech. ISBN:978-953-307-351-4.
- [21] Ferrari, A.C. (2007). Raman spectroscopy of graphene and graphite: disorder, electronphonon coupling, doping and nonadiabatic effects. *Solid State Comm.*, 143, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052>.
- [22] Li, C., Li, D., Yang, J., Zeng, X., Yuan, W. (2011). Preparation of single- and few-layer graphene sheets using Co deposition on SiC substrate. *J. of Nanomat.*, 2011, 319624. [doi:10.1155/2011/319624](https://doi.org/10.1155/2011/319624).
- [23] Childres, I., Jaureguib, L.A., Park, W., Cao, H., Chen, Y.P. (2013). Raman spectroscopy of graphene and related materials. *97*, 173109.
- [24] Ramirez, C., Garzon, L., Miranzo, P., Osendi, M.I., Ocal, C. (2011). Electrical conductivity maps in graphene nanoplatelets/silicon nitride composites using conducting force microscopy. *Carbon*, 49, 3873–3880. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.05.025>.
- [25] Turan, S., Knowles, K.M. (1995). High resolution transmission electron microscopy of the planar defect structure of hexagonal boron nitride. *Phy. Status Solidi (a)*, 150, 227-237. <https://doi.org/10.1002/pssa.2211500120>.
- [26] Moslemi, M., Razavi, M., Zakeri, M., Rahimpour, M.R., Schreiner M. (2018). Effect of carbon fiber volume fraction on 6H to 4H-SiC polytype transformation. *Phase Transitions*, 91 733–741. <https://doi.org/10.1080/01411594.2018.1481214>.
- [27] Chatterjee, S., Nafezarefi, F., Tai, N.H., Schlagenhaut, L., Nüesch, F.A., Chu, B.T.T. (2012). Size and synergy effects of nanofiller hybrids including graphene nanoplatelets and carbon nanotubes in mechanical properties of epoxy composites. *Carbon*, 50, 5380–5386. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.07.021>.
- [28] Halpin, J. (1969). Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites. *J. of Comp. Mat.*, 3(4), 732-734. <https://doi.org/10.1177/002199836900300419>.

- [29] Mori, T., Tanaka, K. (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metall*, 21(5) 571-574. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3).
- [30] Tapasztó, O., Puchy, V., Horváth, Z.E., Fogarassy, Z., Bódis, E. (2019). The effect of graphene nanoplatelet thickness on the fracture toughness of Si₃N₄ composites. *Ceram. Int.*, 45(6), 6858-6862. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.180>.

Investigation and voltammetric determination of the electrochemical behavior of 2-nitrophenol on a graphite pencil electrode surface modified with 4,4'-diaminobenzophenone molecule

Tuğba TABANLIGİL CALAM^{1,*}  Süleyman ÇALIŞKAN²  Gülşen TAŞKIN ÇAKICI³ 

¹Technical Sciences Vocational High School, Gazi University, ANKARA

²Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gazi Üniversitesi, ANKARA

³Yıldızeli Vocational High School, Sivas Cumhuriyet University, SİVAS

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 21.10.2021

Revision: 20.12.2021

Accepted: 25.12.2021

Highlights

- A cheap, sensitive and selective sensor was prepared.
- The detection of 2-NP, which has a toxic effect, was made.
- The sensor has a successful analytical application for 2-NP determination in real samples.

Keywords

Electropolymerization
Modification
2-nitrophenol
Toxic
Determination

In this study, a 44-DABP/PGE modified electrode was prepared by coating graphite pencil electrode (PGE) surface with 4,4'-diaminobenzophenone (44-DABP) molecule. The coating process was carried out using the cyclic voltammetry (CV) method, in 1×10^{-4} mol L⁻¹ 44-DABP solution, with the number of 10 cycles. The prepared 44-DABP/PGE electrode was characterized by electrochemical methods using CV and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques. In addition, the electrochemical behavior of 2-nitrophenol (2-NP) on the 44-DABP/PGE surface was investigated using CV and differential pulse voltammetry (DPV) techniques, and then the voltammetric determination was performed with the DPV technique. Under optimum conditions, it was determined that the current value of the reduction peak of 2-NP increased approximately 20 times by modifying the PGE electrode surface with 44-DABP.

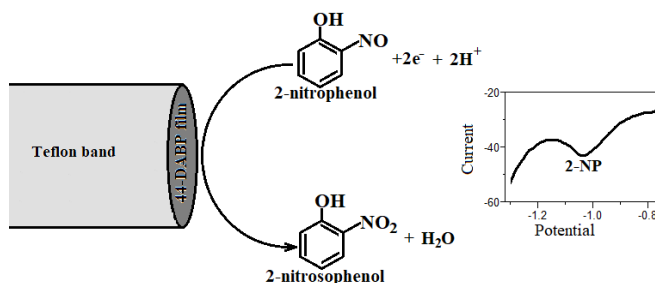


Figure A. Reduction reaction and reduction peak of 2-NP on the prepared 44-DABP/PGE surface

Purpose: The aim of this study to develop a new, cheap and applicable sensor in real samples used for the determination of 2-NP.

Theory and Methods: The modified electrodes have acquired wide applications in various physical, chemical and electrochemical methods are available for coating electrode surfaces with organic or inorganic materials. The modified electrodes are using in electrochemistry research due to their low cost, rapid response, low detection limit and high selectivity and high sensitivity.

Results: The working range for 2-NP with 44-DABP/PGE modified electrode was found as 0.75–15 μ M and the detection limit (LOD) was 0.23 μ M. It has been found that the 44-DABP/PGE electrode has good repeatability for the 2-NP determination. The determination of 2-NP in tap water by using the modified electrode has been successfully performed using the standard addition method with a good recovery and low relative standard deviation.

Conclusion: This study has indicated that the 44-DABP/PGE electrode exhibited highly electrocatalytic activity to 2-NP reduction. The prepared electrode was successfully used to the determination of 2-NP with no interference from common species present in real samples.



Investigation of Electrochemical Behavior and Voltammetric Determination of 2-Nitrophenol Using Modified Electrode Prepared by Electropolymerization of 4,4'-Diaminobenzophenone on Pencil Graphite Electrode Surface

Tuğba TABANLIGİL CALAM^{1,*} Süleyman ÇALIŞKAN² Gülşen TAŞKIN ÇAKICI³

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ANKARA

³Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Yıldızeli Meslek Yüksekokulu, SİVAS

Abstract

In this study, a 44-DABP/PGE modified electrode was prepared by coating graphite pencil electrode (PGE) surface with 4,4'-diaminobenzophenone (44-DABP) molecule. The coating process was carried out using the cyclic voltammetry (CV) method, in 1×10^{-4} mol L⁻¹ 44-DABP solution, with the number of 10 cycles between -1.5 V and +1.5 V with 0.1 Vs⁻¹ scan rate. The prepared 44-DABP/PGE electrode was characterized by electrochemical methods using CV and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques. In addition, the electrochemical behavior of 2-nitrophenol (2-NP) on the 44-DABP/PGE surface was investigated using CV and differential pulse voltammetry (DPV) techniques, and then the voltammetric determination was performed with the DPV technique. With the 44-DABP/PGE electrode, optimum conditions such as supporting electrolyte and pH suitable for 2-NP determination were determined. Under optimum conditions, it was determined that the current value of the reduction peak of 2-NP increased approximately 20 times by modifying the PGE electrode surface with 44-DABP. The working range for 2-NP with 44-DABP/PGE modified electrode was found as 0.75–15 µM and the detection limit (LOD) was 0.23 µM. It has been found that the 44-DABP/PGE electrode has good repeatability for the 2-NP determination. The determination of 2-NP in tap water by using the modified electrode has been successfully performed using the standard addition method with a good recovery and low relative standard deviation.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21.10.2021
Düzeltilme: 20.12.2021
Kabul: 25.12.2021

Keywords

Electropolymerization
Modification
2-nitrophenol
Toxic
Determination

Anahtar Kelimeler

Elektropolimerleşme
Modifikasyon
2-nitrofenol
Zehirli
Tayin

Grafit Uç Elektrot Yüzeyinde 4,4'-diaminobenzofenon'un Elektropolimerleşmesi ile Hazırlanan Modifiye Elektrot Kullanılarak 2-Nitrofenolün Elektrokimyasal Davranışının İncelenmesi ve Voltametrik Tayini

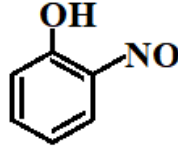
Öz

Bu çalışmada, 4,4'-diaminobenzofenon (44-DABP) molekülünün grafit kalem uç elektrot (PGE) yüzeyinde elektropolimerleşmesi ile 44-DABP/PGE modifiye elektrotu hazırlanmıştır. Elektropolimerleşme yöntemi ile kaplama işlemi, dönüşümlü voltametri (CV) yöntemi kullanılarak 1×10^{-4} mol L⁻¹ 44-DABP çözeltisi içerisinde, 10 çevrim sayısı ile -1,5 V ile +1,5 V arasında 0,1 Vs⁻¹ tarama hızıyla potansiyel taraması yapılarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan 44-DABP/PGE elektrotu CV ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) teknikleri kullanılarak elektrokimyasal yöntemlerle karakterize edilmiştir. Ayrıca, 44-DABP/PGE yüzeyinde 2-nitrofenolün (2-NP) elektrokimyasal davranışı CV ve diferansiyel puls voltametri (DPV) teknikleri kullanılarak incelenmiş ve ardından DPV tekniği ile voltametrik tayini yapılmıştır. 44-DABP/PGE elektrotu ile 2-NP tayini için uygun olan destek elektrolit ve pH gibi çalışma şartları belirlendi. Optimum şartlarda, PGE yüzeyinin 44-DABP ile modifiye edilmesiyle, 2-NP'nin indirgenme pikinin akım değerinde yaklaşık 20 kat artış olduğu belirlendi. odifiye elektrot ile 2-NP için çalışma aralığı 0,75–15 µM ve gözlenebilme sınırı (LOD) 0,23 µM olarak belirlendi. 44-DABP/PGE elektrodunun 2-NP tayininde iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip olduğu tespit edildi. Son olarak modifiye elektrotla, musluk

suyunda standart ekleme yöntemi kullanarak iyi bir geri kazanım ve düşük bağıl standart sapma (BSS) değerleri ile 2-NP tayini başarıyla gerçekleştirilmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fenoller en yaygın kirleticilerden olan kimyasal bileşiklerdir. Fenoller endüstriyel atık sularda yaygın olarak bulunurlar ve tüketilen suyun kalitesi açısından dikkat edilmesi gereken atık bileşiklerdir. Nitro grupları (-NO₂) içeren fenolik bileşikler nitrofenoller olarak bilinirler. Patlayıcı, çeşitli ilaçlar, böcek ve mantar öldürücü ilaçlar, endüstriyel kimyasallar ve organik boyaların üretimi sırasında kullanılırlar [1-3]. Ancak, atık olarak doğaya karışmakta ve kanserojen ve mutajen özelliklerinden dolayı canlılar için tehdit oluşturdukları için yüksek bir toksisiteye sahiptir. Endüstriyel atık sularda ve tarımsal bölgelerde bulunabilen ve bir nitrofenol türevidir olan 2-nitrofenol (2-NP) bileşiklerinin içme suyunda bulunabilecek düşük derişimleri bile istenmeyen koku ve tada yol açar [4]. Canlı sağlığı ve çevre ekosistemi açısından bu toksik etkileri sebebiyle 2-NP (Şekil 1) bileşikler, Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından öncelikli kirleticiler arasına alınmıştır [5]. Bu toksik etkisi nedeniyle 2-NP'nin çeşitli çevre numunelerindeki tayini önemlidir. Literatürde bildirilen bazı çalışmalarda 2-NP tayini, yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC) [6, 7], spektrofotometri [8, 9], floresans [10], kapiler elektroforez [11] ve gaz kromatografisi [12] teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmalara alternatif olarak 2-NP tayinini elektrokimyasal yöntemler kullanılarak da yapılan çalışmalar vardır [1, 2, 13-15]. Diğer tekniklerle kıyaslandığında elektrokimyasal yöntemlerin kullanımı, uygulamasının basit ve hızlı oluşunun yanı sıra düşük maliyetli, yüksek seçiciliğe ve duyarlılığa sahip oluşu nedeniyle çokca tercih edilmektedirler [16-19].



Şekil 1. 2-NP'nin kimyasal yapısı

Voltametrik yöntemler, analitik tayinlerde en yaygın kullanılan elektroanalitik metotlar arasındadır. Çünkü voltametrik yöntemler, yüksek duyarlılık ve seçiciliğe sahip olup, az miktar numunenin tayinine olanak sağlamaktadır. Ayrıca voltametrik yöntemlerle tayinlerde genellikle herhangi bir ön hazırlık işlemi gerekmediğinden, kısa sürede tayin mümkün olmaktadır. Tüm bunlara ek olarak diğer alternatif yöntemlere kıyasla, daha düşük maliyetle, düşük tayin sınırı, iyi bir tekrarlanabilirlik ve kararlılıkla tayini mümkün kılar [20-21].

Voltametri çalışmada çalışma elektrodu olarak altın, platin, gümüş gibi metal yüzeylerinin kullanımının yanı sıra, yüksek duyarlılık ve seçiciliğe ve geniş bir potansiyel aralığında çalışma yapılmasına olanak sağlaması nedeniyle karbon bazlı elektrotların kullanımı çok yaygındır [21, 22]. Son zamanlarda kullanılan karbon pasta elektrotlar (CPE), camsı karbon elektrot (GCE) ve kalem grafit elektrotlar (PGE) yaygın olarak kullanılmaktadır [23-25]. Çalışma elektrodu olarak kullanılan PGE, temin edilmesi çok kolay, maliyeti çok düşük olan bir materyaldir. Ayrıca PGE, tek kullanımlık olmasından dolayı elektrot temizleme sürecinde kaybedilen zamandan da tasarruf sağlamaktadır [21]. Literatürde 2-NP tayini için hazırlanan çeşitli modifiye elektrotlar mevcuttur. Rahman ve arkadaşları, camsı karbon elektrot kullanarak elektrokimyasal yöntemle 2-nitrofenol tayini yapmıştır [26]. Tabanlıgil Calam, camsı karbon elektrodu yüzeyini 1-Amino-2-naftol-4-sülfonik asit (ANSA) ile modifiye etmiş ve hazırlanan yeni yüzey ile 2-NP tayinini gerçekleştirmiştir [1]. Baysal ve arkadaşları, kalem uç elektrodu 3-amino-1,2,4-triazol-5-tiyol (3AT5T) molekülü ile modifiye etmişler ve hazırladıkları yeni yüzey ile 2-NP tayinini başarıyla gerçekleştirmişlerdir [2].

Bu çalışmada, PGE elektrodu yüzeyinde 4,4'-diamino benzofenon (44-DABP) molekülünün elektrokimyasal yolla polimerleştirilmesi ile yeni bir modifiye elektrot (44-DABP/PGE) hazırlanmıştır. Hazırlanan 44-DABP/PGE modifiye elektrodu CV ve EIS gibi elektrokimyasal yöntemlerle karakterize edilmiştir. 44-DABP/PGE modifiye elektrodu yüzeyinde 2-NP tayini için uygun destek elektrolit ve pH

değeri gibi optimum koşullar belirlenmiştir. Gerçek numune olarak kullanılan musluk suyunda standart ekleme yöntemi ile 2-NP tayini yapılarak modifiye elektrodun analitik uygulaması gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Kullanılan Kimyasallar (*Chemicals Used*)

Tüm kimyasallar analitik reaktif derecesindedir. Çalışmada kullanılan 4,4'-diaminobenzofenon, 2-nitrofenol, fosforik asit, potasyum klorür Sigma-Aldrich, Sodyum asetat, asetik asit, sodyum fosfat monobazik, sodyum fosfat dibazik, borik asit ve sodyum hidroksit Merck marka kullanılmıştır. 2-NP'nin stok çözeltisi, saf su kullanılarak 1×10^{-2} M derişimde hazırlanmıştır. PGE elektrodunu kaplamak için kullanılan 44-DABP çözeltisi 0.1 M KCl çözeltisi içerisinde çözülerek hazırlanmıştır.

2.2. Elektrokimyasal Ölçümler ve Cihazlar (*Electrochemical Measurements and Devices*)

Elektrokimyasal deneyler, bilgisayar kontrollü Ivium marka, compactstat model potansiyostat kullanılarak üç elektrotlu elektrokimyasal hücre sistemiyle gerçekleştirildi. Çalışma elektrodu olarak grafit kalem uç elektrot (Faber Castell marka, 3.15 mm çapında), karşı elektrot olarak platin tel (BAS, MW-1032) ve referans elektrot olarak Ag/AgCl/KCl (sat.) (BAS, MF-2052) kullanılmıştır. Elektrokimyasal ölçümlerde CV, elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve diferansiyel puls voltametri (DPV) teknikleri kullanıldı.

Tüm sulu çözeltiler, Nüve marka ND8 model su arıtma sistemi ile üretilen saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Elektrot yüzeylerinin temizliğinde Isolab marka ultrasonik banyo kullanılmıştır. Hazırlanan çözeltilerin pH ayarlamaları için Ezodo marka, PL-700PC model dijital pH metre kullanılmıştır.

2.3. 44-DABP/PGE modifiye elektrodun hazırlanması (*44-Preparation of DABP/PGE modified electrode*)

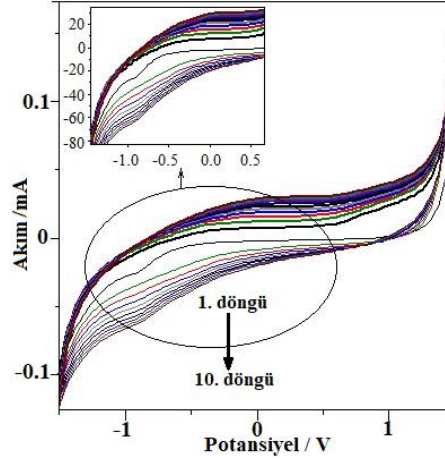
İlk olarak, PGE'nin yüzeyi 0,05 µm alümina bulamaçları ile mekanik olarak parlatılmış ve saf su ile durulanmıştır. Elektrokimyasal ölçümlerden önce, grafit kalem ucunun sadece alt ucu açık kalacak şekilde, çözeltilere temas eden yan yüzeyleri teflon bant ile sarılmıştır. Hazırlanan PGE, dikey olarak sabitlenerek elektrokimyasal hücre içindeki çözelti içine daldırılmıştır. Elektrot yüzey modifikasyonu, 0.1 M KCl çözeltisi varlığında 0,1 mM 44-DABP çözeltisi içinde, -1.5 ve +1.5 V potansiyelleri arasında 0.1 Vs^{-1} tarama hızıyla 10 döngü ile çoklu dönüşümlü voltametri tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (*CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS*)

3.1. Modifiye Elektrodun Hazırlanması (*Preparation of the Modified Electrode*)

İlk olarak, PGE'nin yüzeyi 0,05 µm boyutundaki alümina süspansiyonu ile mekanik olarak parlatılmış ve saf su ile durulandı. PGE gövdesi, sadece yuvarlak alt ucu açıkta olacak şekilde Teflon bantla sıkıca kaplandı. 44-DABP filmin yalın PGE üzerinde birikimi, 100 mVs^{-1} tarama hızı ile -1.5 ve + 1.5 V potansiyelleri arasında 10 döngü ile 0.1 mM 44-DABP ve 0.1 M KCl içeren sulu bir çözelti içinde dönüşümlü voltametri (CV) tekniği kullanılarak gerçekleştirildi. Hazırlanan modifiye elektrot (44-DABP/PGE), saf su kullanılarak durulanmış ve kullanıma hazır hale gelmiştir.

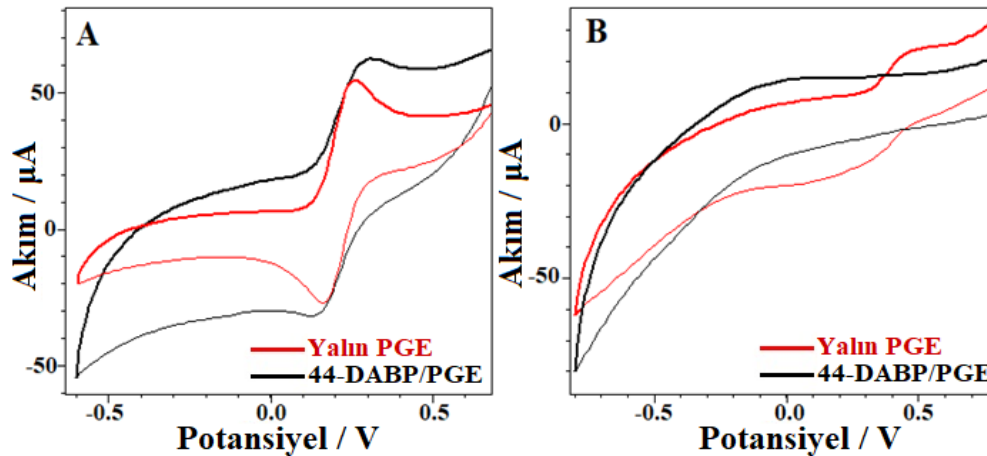
Şekil 2’de yalın PGE yüzeyinde 44-DABP filminin elektro-polimerleşmesi sırasında elde edilen çoklu dönüşümlü voltamogramlar (CVs) görülmektedir. Yaklaşık +0.17 V potansiyelde 44-DABP’a ait karakteristik tersinmez anodik pik gözlenmiştir. Döngü sayısının artması ile pik akımında kademeli bir artış gözlemlendi. Ayrıca ilk döngüde -0,9 V’da tersinmez katodik piki görülmektedir. Ancak artan döngü sayısı ile pik akımı giderek küçülmüştür. Bu sonuçlar, 44-DABP filminin PGE yüzeyi üzerinde elektropolimerize olduğunu gösterir.



Şekil 2. PGE yüzeyinde 0,1 M KCl varlığındaki 0,1 mM 44-DABP'nin -1,5 ile 1,5 V potansiyel aralığında 10 döngü için elektropolimerizasyonunu gösteren çoklu dönüşümlü voltamogramları. Tarama hızının değeri 100 mVs^{-1} 'dir.

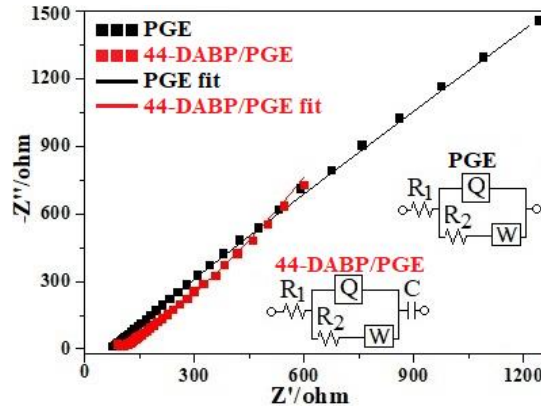
3.2. Modifiye Elektrodun CV ve EIS Teknikleri ile Karakterizasyonu (Characterization of Modified Electrode with CV and EIS Techniques)

Modifiye edilmiş yüzeyleri yalın yüzeyle karşılaştırmak ve elektrokimyasal tekniklerle karakterize etmek için, ferrosen ve $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-/4-}$ gibi redoks problemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [27]. Redoks problemlerinin yalın PGE ve 44-DABP/PGE yüzeylerindeki elektrokimyasal davranışları incelenmiştir. Susuz ortam olarak asetonitril içinde hazırlanan 0,1 M TBATFB ve 1,0 mM ferrosen (susuz ortam) içeren çözelti (Şekil 3A) ve sulu ortam olarak 0,1 M KCl çözeltisinde 1 mM $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6/\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ çözeltisi (Şekil 3B) varlığında modifiye elektrodun voltametrik karakterizasyonu CV tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PGE yüzeyinde 44-DABP filmi, $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6/\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ redoks çiftinin elektron transferini bloke etti ve ferrosenin elektron transferini azalttı. Bu durum, elektrot yüzeyinde olabilecek küçük boşluklardan kaynaklanıyor olabilir [28].



Şekil 3. (A) Asetonitril ortamında 0,1 M TBATFB ve 1 mM ferrosenin ve (B) 0,1 M KCl varlığında 1 mM $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6/\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 'nin yalın PGE ve 44-DABP/PGE yüzeylerinde alınan CV'leri. Tarama hızının değeri 100 mVs^{-1} 'dir.

Yalın PGE ve 44-DABP/PGE yüzeyleri ile 0,1 M KCl ve 1 mM $K_3Fe(CN)_6/K_4Fe(CN)_6$ çözeltisi ortamında alınan elektrokimyasal impedans spektrumları (EIS) ve fitleme ile elde edilen eşdeğer devre modelleri Şekil 4'te verilmiştir. İlk eleman olan R_1 , hücre direncini ve R_2 , yük transfer direncini temsil eder. W, difüzyonu temsil eden Warburg elemanıdır. Q ve C, sırasıyla PGE ve 44-DABP film arayüzünde ve elektrot/çözelti arayüzünde yük ayrımını temsil eden sabit faz elemanlarıdır [29]. Bu elemanların yalın ve modifiye elektrot için değerleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Modifiye edilmiş elektrotun yük transfer direnci (48,33 ohm), yalın PGE'ninkinden (21,70 ohm) çok daha büyüktür. Bu durum, yüzeyin modifiye edilmesi ile, $K_3Fe(CN)_6/K_4Fe(CN)_6$ redoks çiftinin elektron transferine karşı direncinin arttığını göstermiştir. Bu sonuç Şekil 3B'de verilen CV'lerden elde edilen sonuçlar ile uyumludur. Ayrıca bu durum yüzeyin 44-DABP filmi ile kaplandığını göstermektedir.



Şekil 4. 0,1 M KCl içinde 1 mM $K_3Fe(CN)_6/K_4Fe(CN)_6$ 'nin yalın PGE ve 44-DABP/PGE elektrot yüzeylerinde elektrokimyasal impedans spektrumları. Uygulanan AC voltajı: 10 mV, frekans aralığı 0.1 Hz ile 100 kHz arasındadır.

Çizelge 1. Fitleme sonucunda yalın PGE ve 44-DABP/PGE elektrotları için elde edilen devre elemanlarının değerleri.

| Elektrot | R_1 (Ω) | R_2 (Ω) | W (s^{-1}/Ω) | Q (s^N/Ω) | N | C (F) |
|-------------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|-----|------------------------|
| Yalın PGE | 69,59 | 21,70 | $4,423 \times 10^{-5}$ | $1,115 \times 10^{-5}$ | 0,7 | - |
| 44-DABP/PGE | 45,52 | 48,33 | $1,784 \times 10^{-4}$ | $8,566 \times 10^{-9}$ | 0,9 | $6,185 \times 10^{-5}$ |

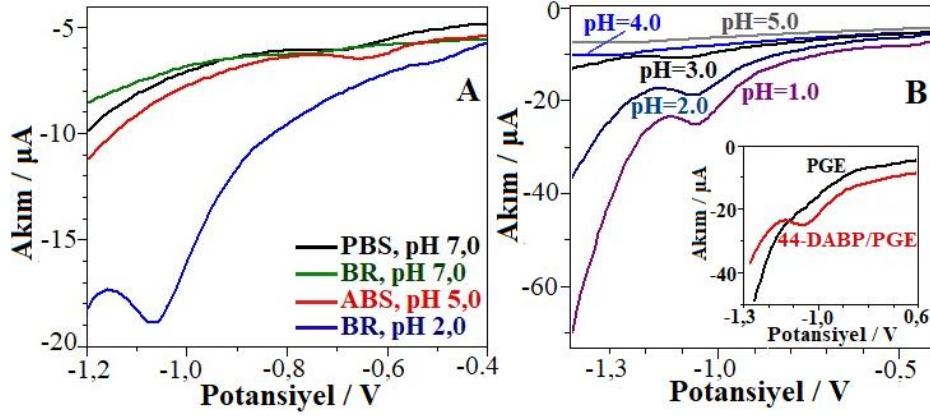
3.3. 2-NP'nin 44-DABP/PGE Modifiye Elektrot Yüzeyindeki Elektrokimyasal Davranışı (Electrochemical Behavior of 2-NP on 44-DABP/PGE Modified Electrode Surface)

3.3.1. Farklı destek elektrolit ve pH'nın 2-NP'nin indirgenme pikine etkisi (The effect of different supporting electrolyte and pH on the reduction peak of 2-NP)

Çeşitli elektroaktif türlerin voltametrik tayinlerinde destek elektrolitin cinsi ve pH değeri, türün pik akım değerini etkileyen en önemli parametrelerdir [30]. Bu amaçla, 2-NP'nin 44-DABP/PGE modifiye elektrot yüzeyinde fosfat tamponu (PBS, pH 7,0), asetik asit/asetat tamponu (ABS, pH 5,0) ve Britton-Robinson tamponu (BR, pH 2,0 ve pH 7,0) olmak üzere üç farklı tampon çözelti ortamında diferansiyel puls voltamogramları alınmıştır. Bu ortamlarda alınan voltamogramlar Şekil 5A'da verilmiştir. pH 7,0 PBS, pH 5,0 ABS ve pH 2,0 ve pH 7,0 BR tamponu ortamlarında 10 μ M 2-NP'ye ait indirgenme pik potansiyelleri sırasıyla -0,69, -0,65, -0,46 ve -0,76 V şeklindedir. Bu ortamlarda pik akımları ise sırasıyla 0,34, 0,47, 3,37 ve 0,10 μ A olarak elde edilmiştir. En yüksek katodik pik akım değeri pH 2,0 BR tamponu ortamında elde edildiği için, uygun olan destek elektrolit ortamı olarak BR tamponu seçilmiştir.

Hazırlanan modifiye elektrot yüzeyinde 2-NP tayini için uygun olan destek elektrot ortamı olarak BR tamponunun seçilmesinin ardından, pH değeri 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 ve 5,0 olarak hazırlanan BR tamponu

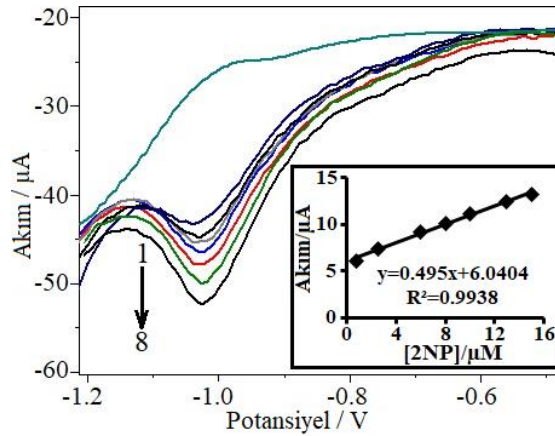
ortamlarında $10 \mu\text{M}$ 2-NP'nin diferansiyel puls voltametri ile katodik pikleri elde edilmiştir (Şekil 5B). pH değeri 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 ve 5,0 olan BR tamponu ortamlarında 2-NP'nin katodik pik akımları sırasıyla 4,30, 3,37, 1,14, 0,73 ve 0,39 μA olarak elde edilmiştir. En yüksek pik akımı pH değeri 1 olan BR tamponu ortamında elde edildiği için bu ortam devam eden çalışmalarda en uygun olan destek elektrolit ortamı olarak kullanılmıştır. Ayrıca, pH 1,0 BR tamponu ortamında yalın PGE ve 44-DABP/PGE elektrot yüzeylerinde $10 \mu\text{M}$ 2-NP'nin diferansiyel puls voltamogramları alınmıştır. Bu voltamogramlar Şekil 5B'de verilmiştir. PGE yüzeyinin 44-DABP molekülü ile modifiye edilmesi ile 2-NP'nin yüzeydeki indirgenme pik akım değerinde yaklaşık 20 kat artış olmuştur. Bu durum, 44-DABP/PGE modifiye elektrodunun 2-NP'nin düşük derişimlerde tayini için avantaj sunduğunu göstermektedir.



Şekil 5. A. Farklı destek elektrolit ortamlarında $10 \mu\text{M}$ 2-NP'nin diferansiyel puls voltamogramları. B. Farklı pH değerlerindeki (1,0, 2,0, 3,0, 4,0 ve 5,0) BR tamponu ortamlarında 2-NP'nin diferansiyel puls voltamogramları.

3.4. Sensörün Analitik Uygulaması, Çalışma Aralığı ve Tayin Sınırı (*Analytical Application of the Sensor, Operating Range and Limit of Detection*)

44-DABP/PGE elektrodunun 2-NP tayinindeki analitik performansının incelenmesi amacıyla içerisinde destek elektrolit bulunan elektrokimyasal hücreye bilinen hacim ve derişimlerde 2-NP ilaveleri yapılmış ve elde edilen voltamogramlar Şekil 6'da verilmiştir. Voltamogramlardan okunan indirgenme pik akım değerleri 2-NP derişimine karşı grafiğe geçirilerek kalibrasyon grafiği oluşturulmuştur (Şekil 6-ek). Kalibrasyon grafiğinde, 2-NP'nin $0,75\text{-}15 \mu\text{M}$ derişim aralığında tek bir eğim değerine sahip bir doğrusal çalışma aralığı elde edilmiştir. Bu çalışma aralığının elde edildiği doğrusal bölgenin denklemi $I(\mu\text{A})=0,495[2\text{-NP}](\mu\text{M})+6,0404$ ($R^2=0,9938$) şeklindedir. Ayrıca 2-NP sensörünün çalışma aralığının kalibrasyon hassasiyetleri sırasıyla yaklaşık olarak $6,04 \mu\text{A}/\mu\text{M}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. pH 1,0 BR tampon ortamında 2-NP ilaveleri ile elde edilen diferansiyel puls voltamogramları ve kalibrasyon grafiği, (1) $0 \mu\text{M}$; (2) $0,75 \mu\text{M}$; (3) $2,5 \mu\text{M}$; (4) $6 \mu\text{M}$; (5) $8 \mu\text{M}$; (6) $10 \mu\text{M}$; (7) $13 \mu\text{M}$; (8) $15 \mu\text{M}$ 2-NP.

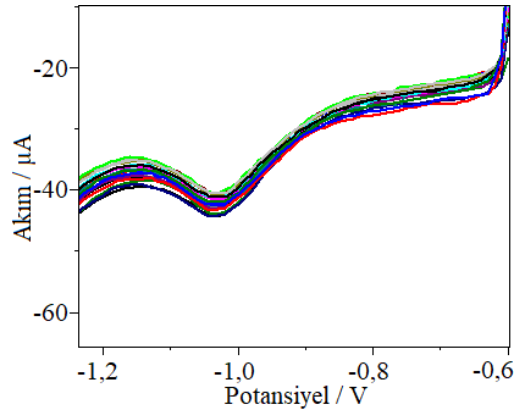
Bu iki çalışma aralığı için gözlenebilirlik sınırları (LOD) ve tayin sınırları (LOQ) değerleri sırasıyla Eş. 1 ve 2 ile hesaplanmıştır. Bu eşitliklerde S_b , standart sapmayı, m ise kalibrasyon grafiğinden elde edilen doğrunun eğimini ifade eder. Buna göre hazırlanan 44-DABP/PGE modifiye elektrodu ile 2-NP tayini için LOD ve LOQ değerleri sırasıyla $0,23 \mu\text{M}$ ve $0,77 \mu\text{M}$ olarak hesaplanmıştır.

$$C_{LOD} = \frac{3S_b}{m} \quad \text{Eş. 1}$$

$$C_{LOQ} = \frac{10S_b}{m} \quad \text{Eş. 2}$$

3.5. Tekrarlanabilirlik Çalışması (Repeatability Study)

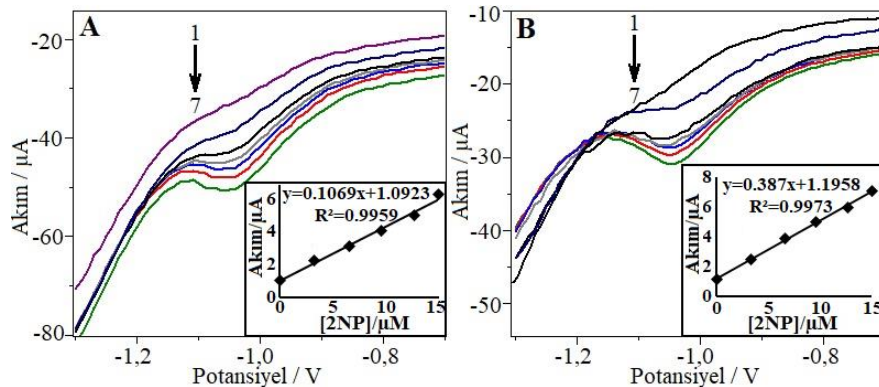
Hazırlanan bir modifiye elektrodun tekrarlanabilirliği, analitik performansı açısından önemli bir parametredir [30-32]. Bu amaçla pH 1,0 BR tampon ortamında ve 44-DABP/PGE modifiye elektrodu ile $10 \mu\text{M}$ 2-NP'nin 20 kez tekrarlanan diferansiyel puls voltamogramları elde edilmiştir. Voltamogramlar Şekil 7'de verilmiştir. Elde edilen voltamogramlardan okunan katodik pik akımları için hesaplanan %bağıl standart sapma (BSS) değeri %3,87 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu %BSS değeri, 2-NP tayininde hazırlanan sensörün iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 7. 44-DABP/PGE modifiye elektrodu ile pH 1,0 BR tampon ortamında $10 \mu\text{M}$ 2-NP'nin alınmış diferansiyel puls voltamogramları

3.6. Sentetik ve Gerçek Numune Analizi

2-NP sensörü olarak hazırlanan 44-DABP/PGE modifiye elektrodunun analitik performansını incelemek amacıyla, standart ekleme yöntemi kullanılarak sentetik numune ve gerçek numunedeki 2-NP tayini yapılmıştır. Sentetik numune laboratuvar ortamında $10 \mu\text{M}$ 2-NP içerecek şekilde pH 1,0 BR tampon destek elektroliti kullanılarak hazırlanmıştır. Bu sentetik numune üzerine, derişimi bilinen 2-NP çözelti ilaveleri yapılmıştır. Elde edilen voltamogramlar Şekil 8A'da verilmiştir.



Şekil 8. Sentetik numune (A) ve musluk suyunda (B) 2-NP tayini için elde edilen diferansiyel puls voltamogramları ve 2-NP derişimine karşı katodik pik akım grafiği

3 kez tekrarlanan ölçüm sonucunda elde edilen (Çizelge 2, satır 2) %geri kazanım değeri %102,2, %bağlı standart sapma değeri (%BSS) %3,59 ve ölçümün doğruluğu ile ilgili bilgi veren %bias değeri %2,2 olarak elde edilmiştir. Gerçek numune olarak musluk suyu kullanılmıştır. Musluk suyu numunesi, eşit hacimde musluk suyu ve destek elektrolit çözeltilerinin karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Gerçek numune analizinde öncelikle ortama 2-NP eklenmeden voltamogram alınmış ve bu voltamogramda 2-NP'nin pikine rastlanmamıştır (Şekil 8B). Bunun üzerine, musluk suyu numunesinde 2-NP derişimi 10 µM olacak şekilde 2-NP ilavesi yapılmış ve bu çözelti üzerine derişimi bilinen 2-NP çözelti ilaveleri yapılmıştır. Elde edilen voltamogramlar Şekil 8B'de verilmiştir. 44-DABP/PGE elektrodu ile gerçek numune 2-NP analizinde, %geri kazanım değeri %102,6, %BSS %4,47 ve %bias değeri %2,6 olarak elde edilmiştir (Çizelge 2, satır 3). Elde edilen bu deneysel sonuçlar, 44-DABP/PGE modifiye elektrodunun 2-NP tayini için iyi bir analitik performans sergilediğini göstermiştir.

Çizelge 2. Sentetik ve gerçek numune analizi

| Numune | Eklenen [2-NP] (µM) | Bulunan ^a [2-NP] (µM) | %Geri kazanım ^b | %BSS ^c | %Bias ^d |
|-----------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|
| Sentetik numune | 10 | 10,22 | 102,2 | 3,59 | 2,2 |
| Musluk suyu | 10 | 10,26 | 102,6 | 4,47 | 2,6 |

^an=3,

^b%BSS= (S/X)×100,

^c%Bias=[(Bulunan[2NP]-Eklenen[2NP])/Eklenen[2NP]×100,

^d%Geri kazanım= (Bulunan[2NP]/Eklenen[2NP])×100.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, grafit kalem uç elektrot yüzeyi 44-DABP filmi ile modifiye edilerek 2-NP tayini için bir sensor olarak kullanılmıştır. 2-NP, çevre ekosistemi ve canlı sağlığı açısından zehirli etkiye sahip olduğundan, 2-NP'nin doğru bir şekilde tayini için metot geliştirilmesi önemlidir. Hazırlanan sensör, literatürdeki alternatif metotlarla hazırlanan elektrokimyasal sensörlere kıyasla geniş bir doğrusal çalışma aralığı göstermiştir. Ayrıca, elektropolimerleşme yöntemi ile sensör hazırlanması basit ve hızlı bir işlem olmasının yanında, kullanılan grafit kalem ucun çok düşük maliyetle temin edilmesi nedeniyle oldukça ucuzdur. Önerilen sensör hazırlama kolaylığı, düşük maliyet, kısa ölçüm süresi ve yüksek hassasiyetle iyi bir doğruluk ve iyi bir analitik performans sağlamıştır. Hazırlanan 2-NP sensörü ile gerçek numunede 2-NP tayini başarıyla uygulanmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Araştırma Projesi Birimi (Proje No: 65/2020-01, ID:5853) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Tabanlıgil Calam T., Electrochemical Behavior and Voltammetric Determination of 2-Nitrophenol on Glassy Carbon Electrode Surface Modified with 1-Amino-2-Naphthol-4-Sulphonic Acid, Engineering Perspective, 1(1), (2021) 1-5. doi: 10.29228/sciperspective.48525

- [2] Baysal G., Uzun D., Hasdemir, E., The fabrication of a new modified pencil graphite electrode for the electrocatalytic reduction of 2-nitrophenol in water samples, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 860, (2020), 113893.
- [3] Aksu Z., Yener J., Investigation of the biosorption of phenol and monochlorinated phenols on the dried activated sludge, *Process Biochemistry*, 33(6), (1998), 649-655.
- [4] Asadpour-Zeynali K., Najafi-Marandi P., Bismuth modified disposable pencil-lead electrode for simultaneous determination of 2-nitrophenol and 4-nitrophenol by net analyte signal standard addition method, *Electroanalysis*, 23(9), (2011), 2241-2247.
- [5] U.S. Environmental Protection Agency, Health and Environmental Effects, Ambient Water Quality Criteria for Nitrophenols. EPA 440/5-80-063, Washington, DC, 1980.
- [6] Thompson M.J., Ballinger L.N., Cross S.E., Roberts M.S., High-performance liquid chromatographic determination of phenol, 4-nitrophenol, β -naphthol and a number of their glucuronide and sulphate conjugates in organ perfusate, *J Chromatogr. B Biomed. Appl.*, 677, (1996), 117–122.
- [7] Hofmann D., Hartmann F., Herrmann H., Analysis of nitrophenols in cloud water with a miniaturized lightphase rotary perforator and HPLC-MS, *Anal. Bioanal. Chem.*, 391, (2008), 161–169.
- [8] Xuan C.S., Wang Z.Y., Song J.L., Spectrophotometric Determination of Some Antibacterial Drugs Using p- Nitrophenol, *Analytical Letters*, 31(7), (2006), 1185-1195.
- [9] Niazi A., Yazdanipour A., Spectrophotometric simultaneous determination of nitrophenol isomers by orthogonal signal correction and partial least squares, *J. Hazard. Mater.*, 146, (2007), 421–427.
- [10] Zhang W., Wilson C.R., Indirect fluorescent determination of selected nitro-aromatic and pharmaceutical compounds via UV-photolysis of 2-phenylbenzimidazole-5-sulfonate, *Talanta*, 74, (2008), 1400–1407.
- [11] Guo X., Wang Z. Zhou S., The separation and determination of nitrophenol isomers by highperformance capillary zone electrophoresis, *Talanta*, 64, (2004), 135–139.
- [12] Padilla-S´anchez, J.A., Plaza-Bolanos P., Romero-Gonz´alez R., Garrido-Frenich A., Vidal J.L.M., Application of a quick, easy, cheap, effective, rugged and safe-based method for the simultaneous extraction of chlorophenols, alkylphenols, nitrophenols and cresols in agricultural soils, analyzed by using gas chromatography–triple quadrupole-mass spectrometry/mass spectrometry, *J. Chromatogr. A*, 1217, (2010), 5724–5731.
- [13] Hernández L., Hernández P., Vicente J., Voltammetric determination of methyl parathion, ortho, meta and para nitrophenol with a carbon paste electrode modified with C 18, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 345 (11), (1993), 712-715.
- [14] Rodriguez I.N., Zamora M.B., Salvador J.M.B., Leyva J.A.M., Hernandez-Artiga M.P., de Cisneros, J.L.H.H., Voltammetric determination of 2-nitrophenol at a bentonite-modified carbon paste electrode, *Microchimica Acta*, 126 (1), (1997), 87-92.
- [15] Rodríguez I.N., Leyva J.A.M., Hidalgo J., de Cisneros H., Use of a carbon paste modified electrode for the determination of 2-nitrophenol in a flow system by differential pulse voltammetry, *Analytica chimica acta*, 344 (3), (1997), 167-173.
- [16] Calam T.T., Voltammetric determination and electrochemical behavior of vanillin based on 1H-1, 2, 4-triazole-3-thiol polymer film modified gold electrode, *Food Chemistry*, 328, (2020), 127098. Doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127098

- [17] Tabanlıgil Calam T., Yılmaz, E.B., Electrochemical determination of 8-hydroxyquinoline in a cosmetic product on a glassy carbon electrode modified with 1-amino-2-naphthol-4-sulphonic acid, *Instrumentation Science & Technology*, 49(1), (2021), 1-20. Doi: 10.1080/10739149.2020.1765175
- [18] Gorla F.A., Duarte E.H., Sartori E.R., Tarley C.R.T., Electrochemical study for the simultaneous determination of phenolic compounds and emerging pollutant using an electroanalytical sensing system based on carbon nanotubes/surfactant and multivariate approach in the optimization, *Microchemical Journal*, 124, (2015), 65–75. doi: 10.1016/J.MICROC.2015.07.021.
- [19] Calam T.T., Uzun D., Rapid and Selective Determination of Vanillin in the Presence of Caffeine, its Electrochemical Behavior on an Au Electrode Electropolymerized with 3-amino-1, 2, 4-triazole-5-thiol, *Electroanalysis*, 31(12), (2019), 2347-2358.
- [20] Calam T.T. Investigation of the electrochemical behavior of phenol using 1H-1, 2, 4-triazole-3-thiol modified gold electrode and its voltammetric determination, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), (2020), 835-844.
- [21] Uzun D. Determination of paracetamol based on 3-amino-4H-1,2,4-triazole coated glassy carbon surface in pharmaceutical sample, *Electroanalysis*, 33(7), (2021), 1699-1706. Doi: 10.1002/elan.202100002
- [22] Saadi Ali S., Abdullah AA., Talay Pınar P., Yardım Y., Şentürk Z., Simultaneous voltammetric determination of vanillin and caffeine in food products using an anodically pretreated boron- doped diamond electrode: Its comparison with HPLC-DAD, *Talanta* 170, (2017), 384–391.
- [23] Talay Pınar P., Yardım Y. Katyonik Surfaktan Varlığında Kalem Grafit Elektrot Yüzeyinde Epirubisin'in Sıyırma Voltametri ile Miktar Tayini. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(1), (2020), 19-29. Doi: 10.35414/akufemubid.621530.
- [24] Calam T.T., A modified pencil graphite electrode with 2-thiobarbituric acid for the efficient and cheap voltammetric sensing of 4-aminophenol in water samples and child syrup sample, *Journal of Food Composition and Analysis*, 98, (2021), 103809. Doi: 10.1016/j.jfca.2021.103809
- [25] Svancara I., Vytras K., Kalcher K., Walcarius K., Wang J., Carbon Paste Electrodes in Facts, Numbers, and Notes: A Review on the Occasion of the 50-Years Jubilee of Carbon Paste in Electrochemistry and Electroanalysis, 21(1), (2008), 7-28. Doi: 10.1002/elan.200804340.
- [26] Rahman M.M., Alam M.M., Asiri Abdullah M., 2-Nitrophenol sensor-based wet-chemically prepared binary doped Co₃O₄/Al₂O₃ nanosheets by an electrochemical approach, *RSC Adv.*, 8, (2017), 960-970. Doi: 10.1039/c7ra10866d.
- [27] Tabanlıgil Calam T., Analytical application of the poly (1H-1, 2, 4-triazole-3-thiol) modified gold electrode for high-sensitive voltammetric determination of catechol in tap and lake water samples, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 99 (13), (2019), 1298-1312.
- [28] Tatli F., Tabanlıgil Calam T., Uzun D., Hasdemir E., The determination of uric acid in the presence of ascorbic acid and dopamine using [(1H1,2,4-triazole-3-ylimino)methyl]naphthalene-2-ol modified platinum electrode, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), (2020), 2013-2022. Doi: 10.17341/gazimmfd.525552
- [29] Chan D., Barsan, M.M., Korpan, Y., Brett, C.M., L-lactate selective impedimetric bienzymatic biosensor based on lactate dehydrogenase and pyruvate oxidase. *Electrochimica Acta*, 231, (2017), 209-215.

- [30] Calam T.T., Selective and sensitive determination of paracetamol and levodopa with using electropolymerized 3,5-diamino-1,2,4-triazole film on glassy carbon electrode. *Electroanalysis*, 33 (4), (2021), 1049-1062.
- [31] Demir, E., Silah, H., Development of a new analytical method for determination of veterinary drug oxytetracycline by electrochemical sensor and its application to pharmaceutical formulation, *Chemosensors*, 8(2), (2020), 25.
- [32] Demir, E., İnam, O., Silah, H., Karimi-Maleh, H., Studies of mechanism, kinetic model and determination of bupivacaine and its application pharmaceutical forms, *Microchemical Journal*, 159, (2020), 105531.



The Effects of Cutting Parameters Used in Milling X153CrMoV12 Cold Work Tool Steel by End Mills on Surface Roughness and Hardness of The Workpiece

Ferhat CERİTBİNMEZ^{1*} Erdoğan KANCA²

¹Haier Europe, Candy - Hoover Group, Research and Development Center, 26010, Odunpazarı/ESKİŞEHİR

²Iskenderun Technical University, Department of Mechanical Engineering, 31200, İskenderun/HATAY

Article Info

Research article

Received: 1.11.2021

Revision: 19.12.2021

Accepted: 29.12.2021

Keywords

Milling

Surface Roughness

Surface Hardness

Microhardness

Abstract

The goal of this project is to investigate the effect of the spindle speed and feed rate used in milling X153CrMoV12 cold work steel by X5070 blue coated solid carbide end mill on surface roughness and hardness of the workpiece. For this purpose, 0.2 mm material was removed in one pass without using refrigerant with the machining parameters of 2000, 2500, 2800, 3000 rpm spindle speed and 160, 180, 200, 240 mm/min feed rate. As a result of the tests, the topographic structure, surface roughness, surface hardness and microhardness of the machined surfaces were determined by Leica DMS300, Mitutoyo SJ 210, HRS-150 digital rockwell hardness tester and microhardness tester Future-Tech FM-700, respectively. As the feed rate increased at a constant 2800 rpm spindle speed, the surface roughness (SR) increased as the amount of metal removed per unit time increased. As the spindle speed increased at a constant feed rate of 180 mm/min, the amount of chips for the next cutting decreased, as the cutting blade removed more chips with each turn, and therefore the surface roughness decreased. The effects of spindle speed and feed rate machining parameters on the surface hardness were not much, and the hardness value before and after the process was measured between 60-62 HRC. However, it was determined that the microhardness value decreased due to the use of heat-hardened steel as well as the heat generated by the milling parameters in the regions 50-350 µm deep from the machined surface.

1. INTRODUCTION

The End Milling is a method of material removal by dipping a hard cutting tool into a material with a lower hardness than itself in circular motions. Many materials such as heat treated steel, plastic, casting, composite, alloy with different properties and shapes can be processed with very high productivity and accuracy by the end milling method containing flat and/or ball end mills [1]. It is widely used in aerospace, defense, military sectors due to it can achieve high surface quality in casting materials at low cost, as well as precision processing of many materials [2-3]. The parts used in the aviation industry and the molds used in the production of these parts must be processed precisely and with a good surface quality [4]. High quality machining of X153CrMoV12, which is the most common cold work tool steel used in these molds, is also important. The Cold work steel (X153CrMoV12) is widely used in the industry, particularly in sheet metal dies for cold forming, deep drawing die as well as in rolling machines such as roller, knife, comb [5-8]. It is preferred in cutting and crushing applications due to its features such as high wear resistance and high toughness. Additionally, its hardness up to 62 ± 2 HRC makes it charming to use [9]. However, tool wear and cost are encountered in the processing of hard materials with traditional methods, and it is difficult to obtain good surface quality [10-12]. Lima et al. focused on the turning of hardened AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work steels (58HRC) using a coated carbide insert and a polycrystalline cubic boron nitride insert cutting tools. They reported that when machining AISI 4340 steel selecting nominal feed rates and depths of cut, the forces were higher

when machining the softer steel and that SR of the machined part was improved as cutting speed was elevated and deteriorated with feed rate. They also found that the surface roughness increased with the increase in the feed rate and decreased with the increase in the cutting speed [13]. Campos et al. used Response Surface Methodology to determine the optimal values of the machining parameters on the turning of AISI 52100 steel with Al₂O₃/TiC tool with wiper geometry through the development of a mathematical model of tool life, surface roughness and profile surface roughness parameters [14]. Vardhan et. al. used Artificial Neural Networks (ANN) to estimate material removal rate (MRR) and SR in CNC milling of P20. In the experiments, they used the Taguchi's L50 orthogonal array to design the experiments by selecting cutting speed, feed, axial depth of cut, radial depth of cut and nose radius as the input parameters MRR and SR as the output parameters. They reported that the effect of cutting speed (mm/min) on MRR and SR was minimal, on the other hand, the effect of feed rate (mm/tooth) was significant [15]. Shokrani et al. investigated the effects of cryogenic cooling using liquid nitrogen (LN₂) as a coolant on the surface integrity of Ti-6Al-4V titanium alloy in end milling operations using solid carbide tools. They reported that cryogenic cooling significantly improved surface integrity when milling Ti-6Al-4V, reducing surface roughness by 39% and 31%, respectively, compared to dry and flood cooling. They notified that the microhardness of surfaces treated using cryogenic processing increased more than the dry and flood cooling method; nevertheless, in cryogenic and dry machining, the depth of the heat-affected zone is lower than in flood cooling [16]. Xu et al., emphasized that minimal lubrication is beneficial in machining metallic materials. They also studied the effects of thrust force and delamination in the drilling of CFRP/Ti6Al4V composite materials with dry or minimal lubrication. They reported that dry machining without the use of oil benefits the reduction of thrust force and delamination [17]. Various cutting fluids are commonly used in this manufacturing process in order that decrease friction and minimize the heat generated between the workpiece and the cutting tool, and to enhance the workpiece surface and cutting quality [18]. Also Kulkarni et al. have expressed that the metal cutting operation unrealizable exactly in the absence of coolants/cutting fluids [19]. But use of the dry cutting method has gained importance due to its negative effects such as the high expenditure of using cutting fluids and harm to the health of the machine operators [20].

In this study, experiments were carried out without using any coolant in order to eliminate the negative environmental effects of fluids such as cutting oil used in cutting and chip removal processes, their harm to operators and usage costs. There is not enough work in the literature on the milling of hard materials with high surface quality without using coolants/cutting fluids. Hence, in this study, high hardness cold work tool steel X153CrMoV12 was processed using the end milling method and different machining parameters without the use of refrigerant thereby surface roughness, macro hardness as well as micro hardness of the processed steel surfaces were analyzed.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Selected Test Materials

In this work, 1.2379 (X153CrMoV12) steel used in cold work applications, a ledeburitic steel containing 12% chromium, hardened up to 60-62 HRC hardness with a dimensions of 118 x 20 x 20 mm was used as the workpiece. This steel is preferred for analysis since it has high wear resistance and high toughness and is also widely used in cold forming molds. The workpiece was supplied with heat treatment from the Sağlam Metal company. The chemical composition as well as mechanical and physical characteristics of X153CrMoV12 are given in Table 1 and 2, respectively.

Table 1. Chemical Composition of X153CrMoV12

| Carbon (C) | Chrome (Cr) | Molybdenum (Mo) | Vanadium (V) |
|---------------|----------------|--------------------|-----------------|
| 1.55 | 12 | 0.8 | 0.9 |

Table 2. Mechanical and physical properties of X153CrMoV12

| Usage Hardness (HRC) | Thermal expansion coefficient $(^{\circ}\text{K})^{-1} \times (10)^{-6}$ | Heat conductivity (W/mK) | Density g/cm^3 | Yield strength (MPa \geq) |
|----------------------|--|--------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 60 - 62 | 10.5 - 13.00 | 16.7 | 7.85 | 420 |

YG X5070 (4 Flute 30° Helix Stub End mill) was used for milling hardened 1.2379 cold work steel. The X5070 blue – coated solid carbide end mills are preferred to machining high hardened mold & die steels with high speed cutting & dry cutting. The dimensions and shapes of G8A02080 X5070 were taken from YG catalogs; (D1:8) x (D2:8) x (L1:8) x (L3:20) x (L2:65) mm with 4 flute as well as h5 shank diameter tolerance as shown in figure 1.

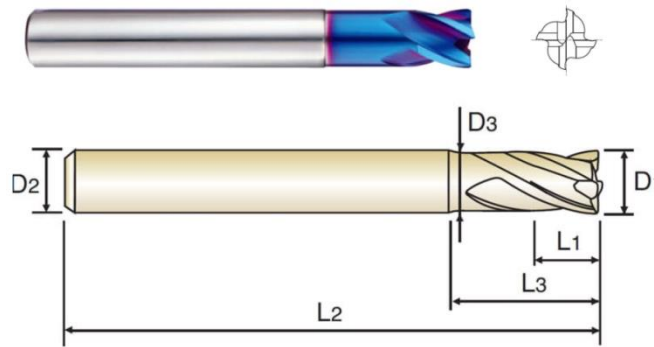


Figure 1. The G8A02080 X5070 End mill technical drawing [21].

X153CrMoV12 Cold work steel and X5070 blue – coated solid carbide end mills that used in milling operations are shown in figure 2. All surfaces of the cold work tool steel were ground.

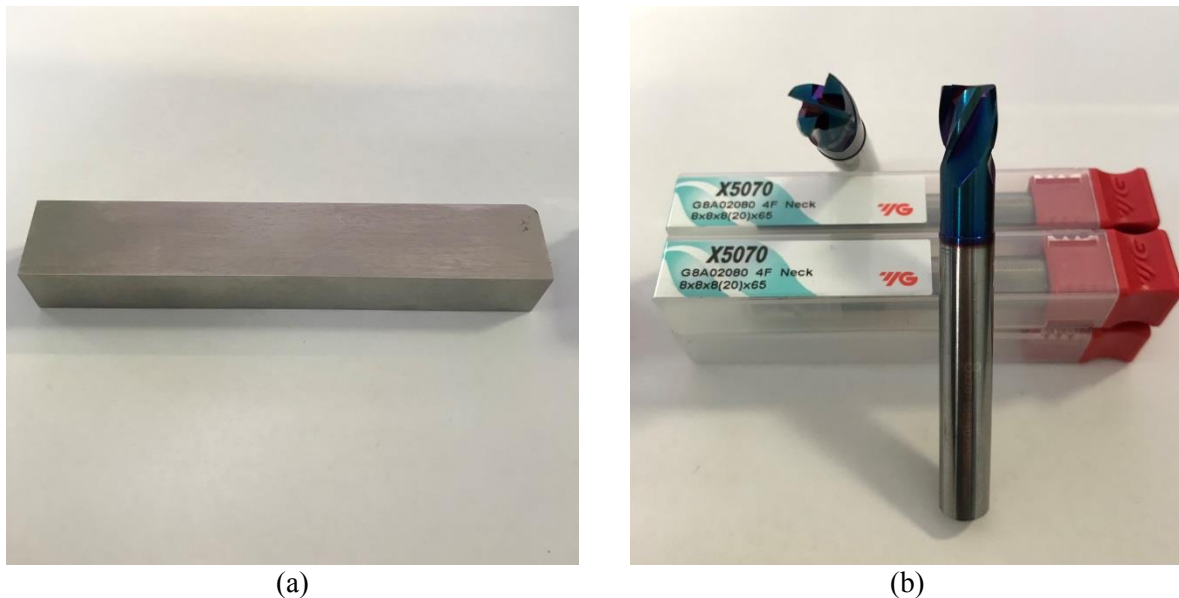


Figure 2. Materials: (a) The X153CrMoV12) Cold work steel, (b) G8A02080 X5070 End mills

2.2. Machining Methods

The acquisition time was changed to test whether the total counts obtained from both MCAs were compatible with each other. So, it was adjusted to 50, 100, 200 and 300 s. Each measurement was repeated three times to sensitively determine the number of counts for each time value. The counts from both MCAs were accumulated, and their averages were compared with each other.

In this study, vertical machining was performed using Makino S33 CNC machine with different machining parameters as shown in figure 3. In this figure, the milling process is shown in figure (a), while

the dashboard where process parameters are controlled shown in figure (b). The cold work tool steel was carefully fixed to the vise and then the milling cutter was attached to the spindle and zeroing was made for each milling cutter. In each test process, only air was used as the coolant and milling operations were carried out by removing 0.2 mm of chips in one pass. Before each experiment, the workpiece was cleaned using compressed fresh air and a new milling cutter was used for each slot.



Figure 3. Machining centers MAKINO S33 CNC : (a) Vertical milling (b) Dashboard

2.3. Analysis Methods of Milled Parts

After the completion of the surface milling studies, surface examination with macro analysis, then surface roughness and hardness measurements were made, respectively. Surface controls were performed under high light and resolution using the digital microscope system Leica DMS300 as shown in figure 4: (a). After taking microscopic images, the surface roughness of each milled slot was determined using Mitutoyo SJ 210 as shown in figure 4 (b). Finally, surface hardness of all milled surfaces were measured using HRS-150 digital rockwell hardness tester as shown in figure 4 (c). The arithmetic mean of all measurements made was calculated and reported.

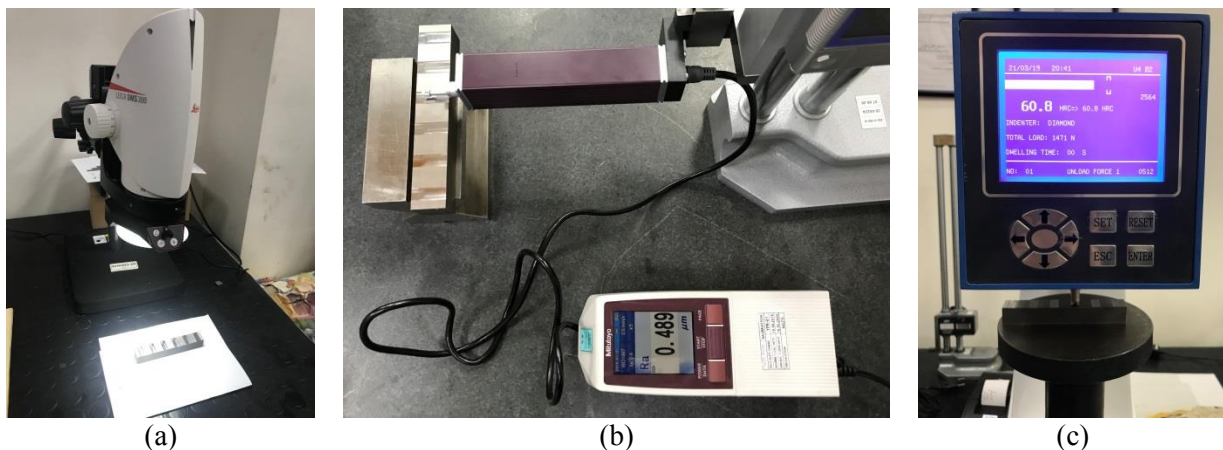


Figure 4. Measurement analysis: (a) microscopical examination, (b) surface roughness, (c) hardness measurement

All measurements after face milling were made in laboratories of Truva Makina Kalıp and Tel Erozyon San. Tic. Ltd. Şti.

3.RESULTS

3.1. Milling Parameters and Experimental Findings

The machining parameters used in the surface milling of steels and the numerical values of the effects of these parameters are given in Table 3. The machining parameters used in the experiments were chosen by considering the safe working parameters of the CNC machine, the cutting regimes of the cutting tool and industrial applications. The results of the cutting operations using these parameters were recorded and the average values of the results obtained were reported. These values reflect the average values of 3 different tests for each procedure. The X5070 dry cutting high performance blue coated nanograin carbide end mills were used as the cutting tool in each experiment. Some features of this milling cutter; made of high hardness raw carbide material, high endurance and power. Its nano blue coating enables it to cut materials up to 65 HRC hardness at high speed.

Table 3. *Experimental set-up and milling parameters*

| <i>Test No</i> | <i>Spindle Speed (rpm)</i> | <i>Feed Rate (mm/min)</i> | <i>Depth of Cut (mm)</i> | <i>Surface Roughness (Ra)</i> | <i>Surface Hardness (HRC)</i> |
|----------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 2800 | 240 | 0.2 | 0.772 | 59.60 |
| 2 | 2800 | 200 | 0.2 | 0.497 | 60.50 |
| 3 | 2800 | 160 | 0.2 | 0.480 | 60.40 |
| 4 | 3000 | 180 | 0.2 | 0.489 | 60.80 |
| 5 | 2500 | 180 | 0.2 | 0.686 | 60.40 |
| 6 | 2000 | 180 | 0.2 | 0.692 | 61.00 |

According to the results of the analysis, it was obtained that the spindle speed and feed rate cutting parameters had a remarkable effect on the roughness of the machined surfaces. On the other hand, the surface hardness of the machined surfaces was measured in the range of 60-62 HRC values, which was the steel hardness before machining. The topographic structure of the steels processed with different processing parameters was examined with a digital microscope system Leica DMS300 and shown in figure 5. Here, the cutting tool marks, which also affect the surface roughness, are clearly visible.

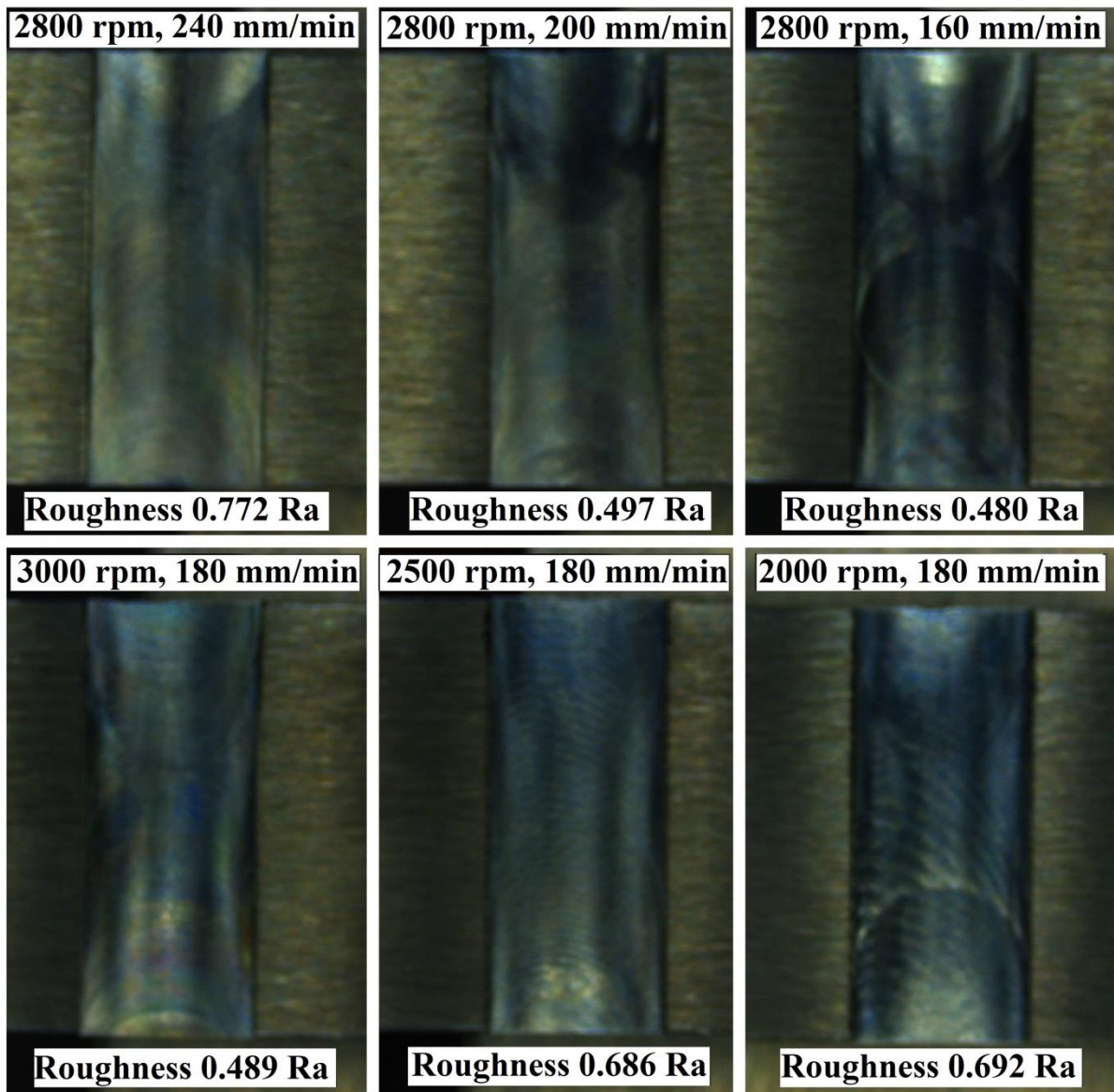


Figure 5. Optical microscope images of test samples

Surface roughness is an important parameter that affects the mechanical performance and machining cost of a machined part [22]. The most considered Ra surface roughness measurement parameter is mostly used to characterize or assign a finishing grade (ISO 1302) to a machined surface or a surface about to be machined [23]. In operations with a lower depth of cut, the surface roughness is generally lower [24]. For this reason, in this study, the cutting depth was chosen as 0.2 mm and the chip was removed. As a result, as the feed rate increased at a constant 2800 rpm spindle speed, the surface roughness increased as the amount of chip removed per unit time increased as shown in figure 6. Similarly, Brezocnik et al. reported that the SR was commonly affected by the feed rate in their study on the estimation of surface roughness by genetic programming [25]. As the spindle speed increased at a constant feed rate of 180 mm/min, the amount of chips for the next cutting decreased, as the cutting blade removed more chips with each turn, and therefore the surface roughness decreased as shown in figure 6. Kalidass and Palanisamy made a study on a regression and artificial neural network model to estimate SR in terms of helix angle, spindle speed, feed rate and depth of cut. They reported that enhancement in feed rate, depth of cut and spindle speed increases the SR. Additionally, increasing the helix angle decreases the SR [26].

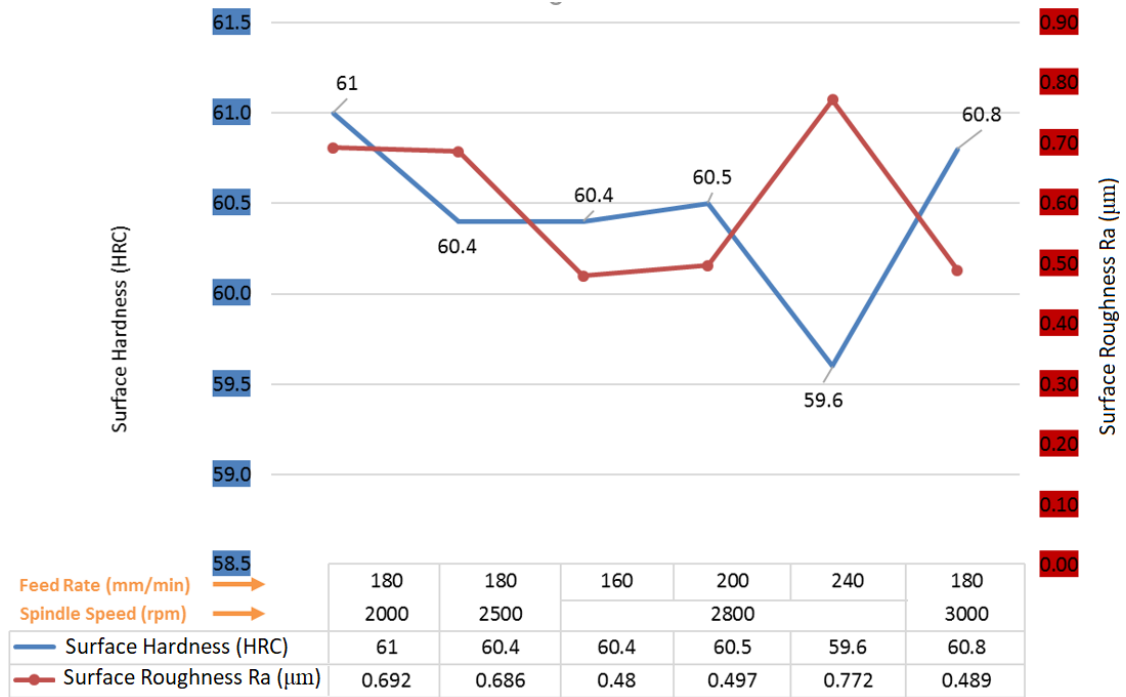


Figure 6. Graphical display of test results

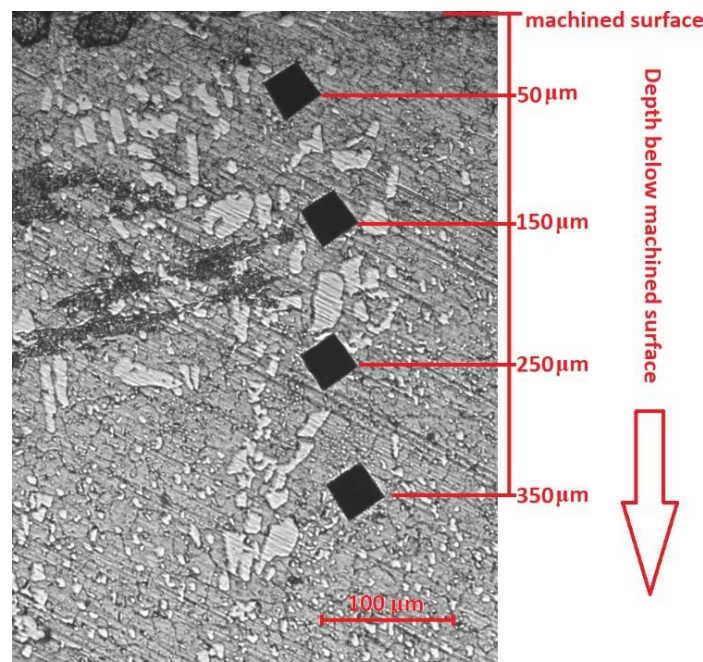


Figure 7. Microhardness measuring points

Microhardness values were taken from the cross-section of each treated sample by using microhardness tester Future-Tech FM-700. Values were measured from 4 different regions starting from the machined surface, approximately 50 µm, 150 µm, 250 µm and 350 µm as shown in figure 7. It was observed that the microhardness values in these regions were different from each other. There are findings in the literature that the microhardness of machined surfaces of hard steels is affected by machining parameters such as cutting speed, feed rate, axial depth of cut and radial depth of cut [27]. It is known that cutting speed and feed rate are the parameters that affect the microhardness the most [27-28]. Pereira et al. reported that increase cutting speed and feed per tooth lead to higher microhardness values near the surface of AISI 4340 steel; the former probably due to the presence of untempered martensite and the latter owing to work hardening [29].

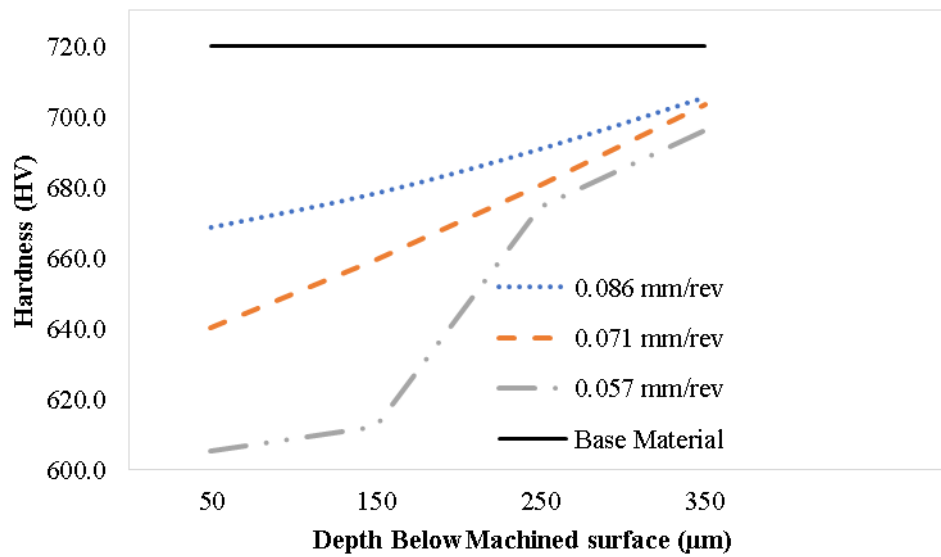


Figure 8. Change of microhardness with increasing spindle speed at constant feed rate value

It is seen in figure 8 that the microhardness reduction as the spindle speed increases. It was determined that the microhardness value, especially in the areas close to the machined surface, was lower than the machined surface. Lu et al. reported that the microhardness of micromilled Inconel 718 decreased with increasing spindle speed and increased with increasing axial depth of cut. The effect of size has an extraordinary impact on micro-hardness when the feed per tooth increases, which at first increases micro-hardness but then decreases it after the feed per tooth reaches the minimal cutting thickness [30]. The increase in plastic deformation rate with increasing cutting speed causes this situation, resulting in a narrower initial deformation zone. In addition, the yield strength increases as the plasticity of the workpiece material decreases. These conditions produce a reduced degree of plastic deformation. Moreover, as the cutting speed increases, the contact time between the cutting tool and the workpiece decreases, which leads to a decrease in the thermal time. All these cases affect the reduction of surface microhardness with increasing spindle speed [30]. Shokrani et al. determined that the depth of the affected area is lower in dry machining and cryogenic machining than in flood cooling [16]. In this study, microhardness change was determined in the region between 50-350 µm by dry machining. In addition, as the feed rate per revolution of the milling cutter decreased at a constant cutting speed of 2800 rpm, the microhardness value decreased. This decrease was greater near the treated surface as shown in figure 9.

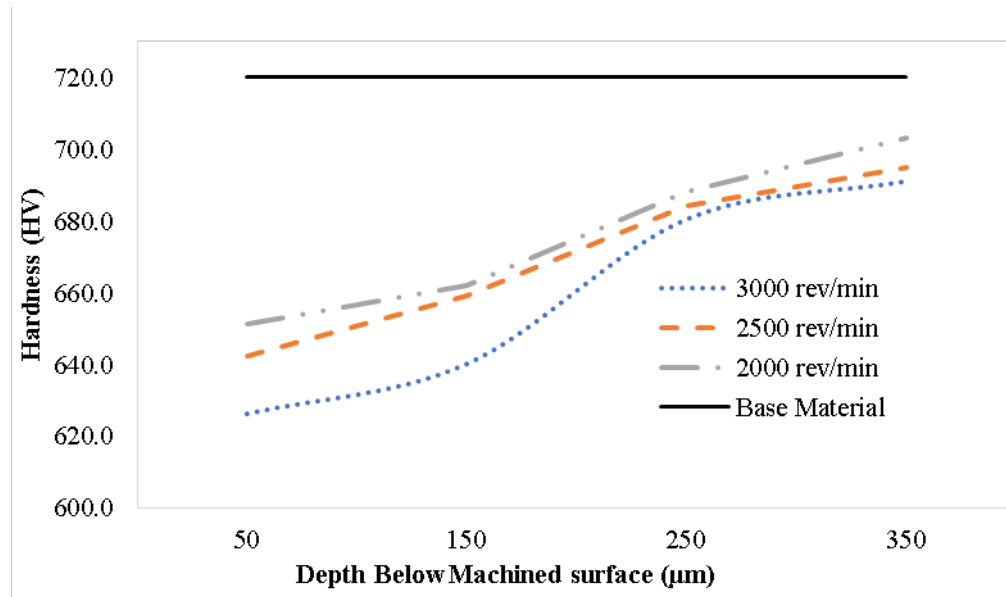


Figure 9. Microhardness at different feed rates at constant cutting speed

A well milled surface significantly improves fatigue strength and corrosion resistance [25, 31]. In this work, successful results were obtained by reaching a surface roughness of 0.480 Ra by processing X153CrMoV12 Cold Work Tool Steel with 60-62 HRC hardness using 2800 rpm Spindle Speed and 160 mm/min Feed Rate processing parameters without the need for refrigerant fluid.

4.CONCLUSIONS

In this work, the following results were obtained about the effects of machining parameters on the surface roughness and hardness by processing high hardness cold work tool steel without using coolant;

- As the spindle speed increased at a constant feed rate of 180 mm/min, the amount of chips for the next cutting decreased, as the cutting blade removed more chips with each turn, and therefore the surface roughness decreased.
- As the feed rate increased at a constant 2800 rpm spindle speed, the surface roughness increased as the amount of chip removed per unit time increased.
- The increase in spindle speed caused a decrease in microhardness. It was determined that the microhardness value, especially in the areas close to the machined surface, was lower than the machined surface.
- As the feed rate per revolution of the milling cutter decreased at a constant cutting speed of 2800 rpm, the microhardness value decreased. This decrease was greater near the treated surface.

DECLARATION OF CONFLICTING INTERESTS

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

FUNDING

The author(s) received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

REFERENCES

- [1] Agarwal, A., & Desai, K. A. (2020). Effect of workpiece curvature on axial surface error profile in flat end-milling of thin-walled components. *Procedia Manufacturing*, 48, 498-507. doi:10.1016/j.promfg.2020.05.074
- [2] Gowthaman, S., & Jagadeesha, T. (2021). Experimental study on the surface and interface phenomenon changes by means of contact angle measurement on slot milled nimonic 263 alloy. *Materials Letters*, 285, 129122. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.129122>
- [3] Han, J., Hao, X., Li, L., Liu, L., Chen, N., Zhao, G., & He, N. (2020). Investigation on surface quality and burr generation of high aspect ratio (HAR) micro-milled grooves. *Journal of Manufacturing Processes*, 52, 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.041>
- [4] Tamura, S., & Matsumura, T. (2020). Cutting force simulation in milling of tapered wall with barrel end mill. *Procedia Manufacturing*, 47, 466-471. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.337>
- [5] Tröber, P., Weiss, H. A., Kopp, T., Golle, R., & Volk, W. (2017). On the correlation between thermoelectricity and adhesive tool wear during blanking of aluminum sheets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 118, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.03.005>
- [6] Cao, J., Brinksmeier, E., Fu, M., Gao, R. X., Liang, B., Merklein, M., ... & Yanagimoto, J. (2019). Manufacturing of advanced smart tooling for metal forming. *CIRP Annals*, 68(2), 605-628. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.001>
- [7] Abraham, T., Bräuer, G., Flegler, F., Groche, P., & Demmler, M. (2020). Dry sheet metal forming of aluminum by smooth DLC coatings—a capable approach for an efficient production process with reduced environmental impact. *Procedia Manufacturing*, 43, 642-649. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.140>
- [8] Rathmann, L., & Vollertsen, F. (2020). Determination of a contact length dependent friction function in micro metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 286, 116831. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116831>
- [9] Lenz, B., Hasselbruch, H., Großmann, H., & Mehner, A. (2020). Application of CNN networks for an automatic determination of critical loads in scratch tests on aC: H: W coatings. *Surface and Coatings Technology*, 393, 125764. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125764>
- [10] Vellingiri, S., Soundararajan, R., Mohankumar, N., Nithyananthakumar, K., & Muthuselvam, K. (2020). Exploration on WEDM process parameters effect on LM13 alloy and LM13/SiC composites using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2020.03.050
- [11] Johny, A., & Thiagarajan, C. (2021). Investigation of surface integrity and its optimization on pure titanium using molybdenum wire by reciprocated travelling WEDM—A review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 2581-2584. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.251>
- [12] Pramanick, A., Mandal, S., Dey, P. P., & Das, P. K. (2021). Comparative analysis for the prediction of WEDM responses for machining spark plasma sintered boron carbide ceramic sample by RSM and ANFIS. *Materials Today: Proceedings*, 41, 1089-1095. doi:10.1016/j.matpr.2020.07.582
- [13] Lima, J. G., Avila, R. F., Abrao, A. M., Faustino, M., & Davim, J. P. (2005). Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(3), 388-395. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.04.082
- [14] Da Silva Campos, P. H., de Carvalho Paes, V., de Carvalho Gonçalves, E. D., Ferreira, J. R., Balestrassi, P. P., & da Silva, J. P. D. T. (2019). Optimizing production in machining of hardened steels using response surface methodology. *Acta Scientiarum. Technology*, 41, e38091-e38091. doi:10.4025/actascitechnol.v41i1.38091

- [15] Vardhan, M. V., Sankaraiah, G., & Yohan, M. (2018). Prediction of surface roughness & material removal rate for machining of P20 steel in CNC milling using artificial neural networks. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18376-18382. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.177>
- [16] Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2016). Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 21, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.12.002>
- [17] Xu, J., Ji, M., Davim, J. P., Chen, M., El Mansori, M., & Krishnaraj, V. (2020). Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills. *Composite Structures*, 234, 111727. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111727>
- [18] Peña-Parás, L., Maldonado-Cortés, D., Rodríguez-Villalobos, M., Romero-Cantú, A. G., & Montemayor, O. E. (2020). Enhancing tool life, and reducing power consumption and surface roughness in milling processes by nanolubricants and laser surface texturing. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119836. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119836
- [19] Kulkarni, H. B., Nadakatti, M. M., Kulkarni, S. C., & Kulkarni, R. M. (2020). Investigations on effect of nanofluid based minimum quantity lubrication technique for surface milling of Al7075-T6 aerospace alloy. *Materials Today: Proceedings*, 27, 251-256. doi:10.1016/j.matpr.2019.10.127
- [20] Zahaf, M. Z., & Benghersallah, M. (2021). Surface roughness and vibration analysis in end milling of annealed and hardened bearing steel. *Measurement: Sensors*, 13, 100035. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2020.100035>
- [21] YG-1E-Catalog, Smart tool recommendation, YG-1 TM Xpert https://www.yg1.kr/toolselection/milling/view.asp?MachiningShape=Side+Milling&MachiningShape_Lang=Side+Milling&BrandName=X5070&BrandName_view=X5070&Series=G8A02&EDPNo=G8A02010&UnitSelect=Metric&LangSelect=ENG, Accessed: 22/03/2021.
- [22] Correia, A. E., & Davim, J. P. (2011). Surface roughness measurement in turning carbon steel AISI 1045 using wiper inserts. *Measurement*, 44(5), 1000-1005. doi:10.1016/j.measurement.2011.01.018
- [23] Festas, A. J., Pereira, R. B., Ramos, A., & Davim, J. P. (2021). A study of the effect of conventional drilling and helical milling in surface quality in titanium Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb alloys for medical applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(3), 2361-2369. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05047-8>
- [24] Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Figueira, L., & Davim, J. P. (2009). Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27(4), 754-763. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.12.007>
- [25] Brezocnik, M., Kovacic, M., & Ficko, M. (2004). Prediction of surface roughness with genetic programming. *Journal of materials processing technology*, 157, 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.004>
- [26] Kalidass, S., & Palanisamy, P. (2014). Prediction of surface roughness for AISI 304 steel with solid carbide tools in end milling process using regression and ANN models. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(11), 8065-8075. doi:10.1007/s13369-014-1346-6
- [27] Hassanpour, H., Sadeghi, M. H., Rasti, A., & Shajari, S. (2016). Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*, 120, 124-134. doi:10.1016/j.jclepro.2015.12.091
- [28] Zheng, G., Cheng, X., Dong, Y., Liu, H., & Yu, Y. (2020). Surface integrity evaluation of high-strength steel with a TiCN-NbC composite coated tool by dry milling. *Measurement*, 166, 108204. doi:10.1016/j.measurement.2020.108204

- [29] Pereira, J. C. C., Rodrigues, P. C. M., & Abrao, A. M. (2017). The surface integrity of AISI 1010 and AISI 4340 steels subjected to face milling. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(10), 4069-4080. doi:10.1007/s40430-017-0870-1
- [30] Lu, X., Jia, Z., Wang, H., Feng, Y., & Liang, S. Y. (2019). The effect of cutting parameters on micro-hardness and the prediction of Vickers hardness based on a response surface methodology for micro-milling Inconel 718. *Measurement*, 140, 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.037>
- [31] Lou, M. S., Chen, J. C., & Li, C. M. (1999). Surface roughness prediction technique for CNC end-milling, *Journal of Industrial Technology*, 15 (1), 1-6.



Thermal Characterization of Foam Concrete Panels Containing Expanded Perlite-Polystyrene Foam and an Aerogel Layer

Gökhan DURMUŞ^{1,*} Hazal Cemile TOPUZ¹

¹Gazi University of Technology Faculty Department of Civil Engineering, 06500, Teknikokulla/ANKARA

Article Info

Research article
Received: 4.11.2021
Revision: 22.12.2021
Accepted: 29.12.2021

Keywords

Foam concrete,
Expanded perlite,
Polystyrene foam,
Aerogel,
Thermal conductivity

Abstract

For our country, which has few renewable energy supplies, energy sustainability is becoming increasingly vital. Foam concrete is a porous building material having air spaces created by foaming agents, as well as a high energy efficiency due to its pores. The goal of this research is to produce high-insulating building materials by using expanded perlite and granular polystyrene foam as aggregates and an aerogel layer on the concrete surface in foam concrete. Thermal conductivity, physical and mechanical properties of samples produced using various cement types and aggregate ratios were analyzed. Thermal conductivity values and mechanical properties were found to be better in foam concrete samples made with Portland composite cement. The use of Portland composite cement resulted in the lowest thermal conductivity coefficient of (λ) 0.09848 W/m.K. The use of less expanded perlite in foam concrete, likewise polystyrene foam, increased the thermal conductivity coefficient. It has been discovered that using silica aerogel as a layer has no major effect on the change in the thermal conductivity coefficient, and more extensive studies should be conducted on its use in foam concrete.

1. INTRODUCTION

Energy loss in buildings accounts for over 40% of global energy usage. In order to use energy consumption more efficiently and reduce it to lower levels, construction materials, particularly those employed in insulation, must be developed. In most cases, building insulation is applied to the structure's outside walls. When the construction materials used on the external walls reduce the enormous quantity of energy loss/leakage, it is expected that significant support for energy efficiency and the country's energy strategy will be supplied. With this in mind, creating innovative construction materials is critical in order to reduce losses and increase the material's thermal efficiency [1].

Raw perlite is widely available in our country, although it can only be used effectively in a few regions. To generate a highly low-density, very small porous construction material, raw perlite stone is kept at a high temperature of roughly 800 to 1100 °C [2]. It is known as expanded perlite (EP) because it expands by roughly 20±5 times in volume and possesses insulating characteristics. Although expanded perlite is most commonly used in agriculture, it is also employed in the construction industry as an insulation-based construction material [3,4]. Perlite has a low thermal conductivity value, making it an excellent material for improving the thermal qualities of external walls. Furthermore, the non-flammability of expanded perlite can be considered as a significant benefit [2].

Foam concrete is a construction material that is classified as light concrete and can be used for high energy efficiency in many definitions [5, 6] where the gaps formed by foam agents are trapped in the grout and have low thermal conductivity and sound values [1] and it is effective in reducing the dead load of the structure. With the ability to adjust the densities of cement-based foam concretes (density of 400-1850

kg/m³ [7]), it may be employed mainly in structural partition walls and places where high thermal insulation values are required [8]. In addition, foam concrete has superior strength and fire resistance when compared to organic insulation materials [7, 9-11].

Since its invention in 1950, numerous investigations on cement-based cellular foam concrete have been done [12]. In order to increase the durability of plastic concrete, synthetic and protein-based foaming agents that create stable air bubbles in the concrete were developed, particularly in 1990. In addition, thanks to the hybrid foam agents created, foam concretes are used on a broad scale [13]

There are different studies on the rheological and mechanical properties [14, 15] of the different cements that make up foam concrete, the contributions of fly ash and blast furnace slag [16, 17], the history of foam concrete, the materials used and the properties of these materials [18], the fresh properties of foam concrete, its properties related to fire resistance, thermal conductivity [19, 20] and its uses [21].

Granular polystyrene foam is a material that is widely used material in construction, automotive sector and marine fields with good properties such as moisture resistance, chemical resistance, lightness and low cost [22]. Especially due to its light weight, when used as aggregate in concrete, it creates a decrease in concrete density and also contributes to the durability characteristics of concrete [11].

Aerogel is a very light material with a density of three times the density of air, three-dimensional nanopores, 95% of its structure can be porous. With its high surface area and surface porosity, it also has low thermal conductivity, making it an important material for aerogel energy efficiency. Aerogel can be produced hydrophilic or hydrophobic with materials such as carbon and silica [23, 24]. Silica aerogels, which were first used in different sectors such as electronics, chemistry and automotive [25], are very good thermal insulation material with nano pores with low density of 0.003-0.015 g/cm³ and thermal conductivity of 0.013-0.02 W/m.K [26, 27]. Aerogels with a low degree of toughness are known as highly fragile materials at a high hardness/density ratio. Recent studies on the application of aerogel composite materials are of great importance in terms of improving energy efficiency in structures [23, 24].

Hydrophobic silica aerogels benefit from low conductivity as well as increased moisture resistance in foam concrete, but the mixing process during the preparation of foam concrete requires that the aerogel used be hydrophilic. The use of hydrophobic silica aerogels during mixing causes a serious decomposition in the matrix of foam concrete and deterioration of the foam structure created by foam agents [28]. This allows new methods to be investigated for the use of hydrophobic silica aerogel, which is intended to be used in foam concrete.

In this study, it is aimed to produce foam concrete that can provide both energy sustainability and building lightness. The thermal conductivity, physical and mechanical effects of the cement type and the changes in the aggregate ratios used on the foam concrete were investigated. It is aimed to produce foam concrete by using two different cement types, expanded perlite aggregate, granular polystyrene foam, nano-silica aerogel and synthetic-based foaming agent, and to obtain optimum thermal insulation values by using different proportions of ingredients.

2. EXPERIMENTAL PRODUCERE

2.1 RAW MATERIALS AND MIXTURE RATIO

For the fabrication of foam concrete samples, two types of cement were employed as binders: CEM I 42.5 R Portland Cement and CEM II A-M (V-L) 42.5 R Portland Composite Cement (BASTAS). The tras and limestone in Portland composite cement cause the strong long-term resistance and low water supply. Since Portland composite cement is expected to have stronger strength than Portland cement, its impacts on thermal conductivity values have also been researched. Table 1 contains the technical specifications for both binders.

Table 1. Properties of CEM I and CEM II Portland cement I

| Mechanical and Physical Properties | | |
|---|--------------|---------------|
| | CEM I | CEM II |
| Specific surface area (cm ² /g) | 3600 | 4200 |
| Initial setting (min) | 160 | 130 |
| Final setting (min) | 210 | 200 |
| Volume expansion amount (mm) | 0-2 | 0-2 |
| Compressive strength 2 Days (N/mm ²) | 29 | 30 |
| Compressive strength 28 Days (N/mm ²) | 48 | 58 |

The aggregates in the batch are powder expanded perlite (PEP) and granulated expanded perlite (GEP), blended between 0.1 and 4 mm. In Table 2, the technical characteristics for both expanded perlite aggregates are listed. EPS (expanded polystyrene) was also added to the mix in various percentages. EPS added to the mixture has a density of 18.9 kg/m³ and a thermal conductivity value of 0.031 W/m.K, in addition EPS particles in granular form are between 2 and 4 mm in size.

Table 2. Properties of expanded perlite aggregate

| Physical Property | Powder Expanded Perlite | Granular Expanded Perlite |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Color | White | White |
| Hardness | 5.15 | 5.23 |
| pH | 7.26 | 7.08 |
| Dry density, kg/m ³ | 51.48 | 112.45 |
| Water absorption (%) | 55 | 66 |
| Structural degradation | 885 | 900 |
| Melting point | 1075 | 1150 |
| Fire resistance | Non-flammable | Non-flammable |
| Thermal conductivity, mW/m.K | 43.321 | 47.982 |

Additionally, nano-silica aerogel (NSA) was put in a layer of ~5 mm thick on surface of the foam concrete samples, to improve the thermal properties of the produced panel. The density of the NSA is 1.3 g/cm³, with a silica content of 40% (by weight), a pH of 9.4, and a viscosity of 6 cP. To create the requisite air bubbles in produced panels, a foaming agent containing calcium stearate, sodium nitrate, and acrylate polymer emulsion was preferred as a stabilizer. Table 3 contains further technical standards for a synthetic-based foam agent, as well as limit conditions. The water used to prepare the tests came from the Ankara Metropolitan Municipality's tap. The network values have been found to be within TS 266 and EPA limitations.

Table 3. Properties of Lightcon-28 foam agent

| Property | Value |
|------------------|--------------------------|
| Density | 1.03±0.02 kg/l (ISO 758) |
| pH | 5.0±1 (TS 6365 EN 1262) |
| Chlorine content | <0.1% (TS EN 480-10) |
| Alkaline content | <5.0% (TS EN 480-12) |
| Freezing point | -5°C |

At +20°C, it was obtained under 50% relative humidity conditions.

2.2 TEST INSTRUMENT

2.2.1 Preparation Technology and Experimental Method of Foam Concrete

The following processes are used to prepare EPS-added foam concrete samples in accordance with the chemical foam concrete model performance and molding technology.

- Eps-added particles make up 10% of the entire volume of the system.
- The dry density of foam concrete samples has been adjusted to a maximum of 480 kg/m³.
- CEM I and CEM II cements were mixed dry in order, and mortar was mixed with water. According to the design data, the foam agent was foamed at a rate of 38/1 with water for 5.48 minutes in a separate container. Gradually, grout was added and stirred until the mixture is homogenized.
- After the samples were created, ~5 mm thick layer of nano-silica aerogel was applied to the top (open) area of the sample.
- The cement ratios in the samples were kept constant, and the W/B ratio is 0.45 for all mortars.

Table 4 lists the quantities of expanded perlite aggregate and granulated polystyrene foam used in the foam concrete samples, which total 18 mixes.

Table 4. *The mixing ratio*

| Sample | Materials used (kg) (for 1 m ³ foam concrete) | | | | |
|------------|--|------------------|---------------------------|-------|---------------|
| | Cement | Expanded perlite | Granular polystyrene foam | Water | Foaming agent |
| CGp100Pk75 | 250 | 130 | 100 | 115 | 80 |
| CGp100Pk50 | 250 | 130 | 65 | 115 | 80 |
| CGp100Pk30 | 250 | 130 | 40 | 115 | 80 |
| CGp75Pk75 | 250 | 100 | 100 | 115 | 80 |
| CGp75Pk50 | 250 | 100 | 65 | 115 | 80 |
| CGp75Pk30 | 250 | 100 | 40 | 115 | 80 |
| CGp50Pk75 | 250 | 65 | 100 | 115 | 80 |
| CGp50Pk50 | 250 | 65 | 65 | 115 | 80 |
| CGp50Pk30 | 250 | 65 | 40 | 115 | 80 |

The fresh foam concrete obtained was kept in molds for 24 hours in a laboratory environment at 20±2°C and 55-65% relative humidity. After 24 hours, it was taken out of the molds and kept in natural cure for 28 days. Experiments were applied to determine dry density, water absorption, flexural strength and thermal conductivity coefficient.

2.2.2 Experimental Methods

Each batch of samples consisted of 30×300×300 mm prism samples and 100×100×100 mm cubic specimens. For foam concrete samples, tests were carried out to determine dry density and water absorption in accordance with the TS EN 12390-7 standard, to determine the bending strength in accordance with the TS EN 12390-5 standard, and to find the thermal conductivity coefficients in accordance with TS EN 12664 and TS EN 12667 standards. According to ASTM C518, JIS A1412, ISO 8301, and DIN 12667 standards, the thermal conductivity coefficient of the samples was determined using LINSEIS HFM300. The heat flow is measured by inserting the sample between the hot and cold plates and measuring the heat flow. The

temperature difference between the device's plates is 20°C, with the top plate at 30°C and the bottom plate at 10°C.

3. RESULT AND DISCUSSION

Fig. 1 depicts the dry densities of the foam concrete samples prepared as part of the research.

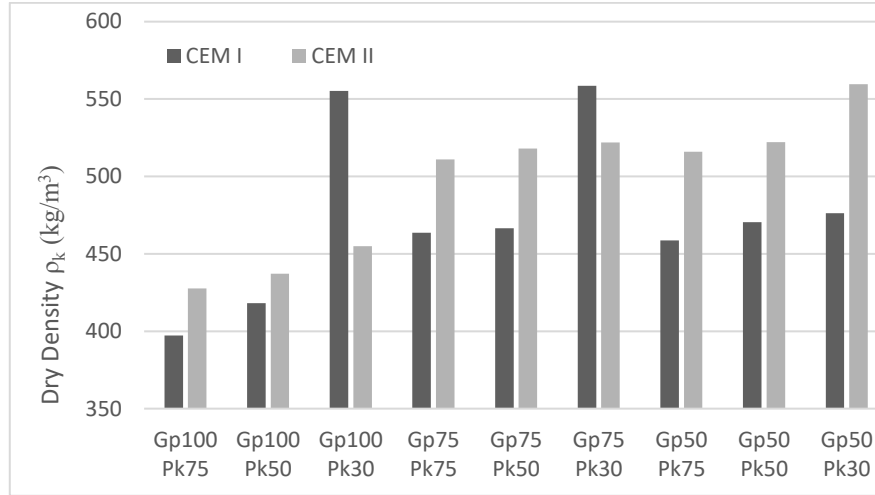


Figure 1. Dry Density values of foam concrete samples

The density of foam concrete varies depending on the density of the foam, the time it takes to mix the concrete grout, the proportions of the ingredients used, and the volume weights of the materials.

When the graph in Fig. 1 is examined, it is observed that when the amount of granular polystyrene foam decreases the dry density of foam concrete increases in the same way that the amount of expanded perlite aggregate is reduced, the dry density of foam concrete increases. This can be attributed to the fact that the unit volume weights of the expanded perlite aggregate and granular polystyrene foam have a value lower than the unit volume weight of the cement that replaces it when the amount decreases.

When the influence of cement type on dry density is investigated, it is discovered that the dry density of foam concrete samples made with CEM I Portland cement is lower than that of foam concrete samples made with CEM II Portland composite cement. The foam concrete mixture with the lowest dry density in Gp100Pk75 using CEM I Portland cement is 397.16 kg/m³, while the combination with the maximum dry density is 559.5 kg/m³ in Gp100Pk75 using CEM II Portland composite cement. Foam concrete samples are classified as lightweight concrete with all dry density values obtained [7].

The amount of aggregate and kind of cement used in foam concrete samples were utilized to determine water absorption values by volume (Fig. 2).

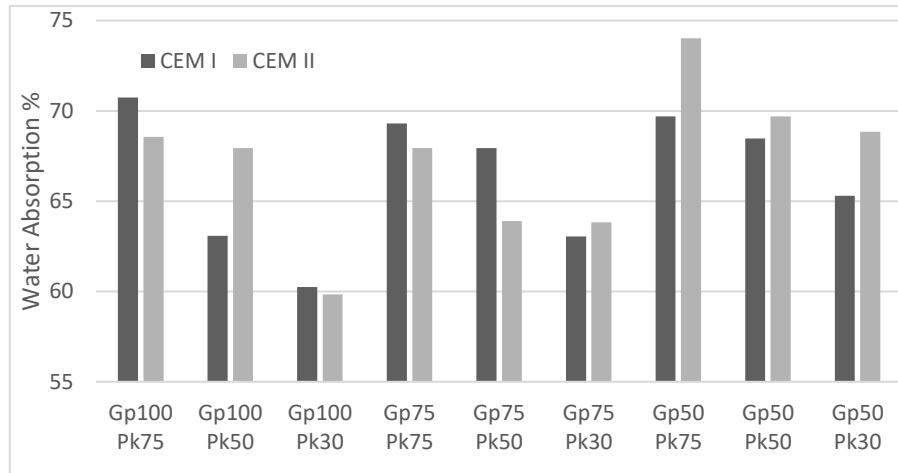


Figure 2. Volume water absorption values of foam concrete samples (%)

The water absorption values of foam concrete vary greatly, ranging from 59 to 74%. Concretes with high porosity have high water absorption values. The water absorption rates in foam concrete are related to the mortar structure rather than the foams formed [8]. The foam concrete sample with the highest water absorption value is 74% in the sample with the CEM II type cement numbered Gp50Pk75, which contains 50% expanded perlite aggregate of the aggregate used in foam concrete design and 75% granular polystyrene foam.

The flexural strength of foam concrete samples was measured after they had been water-cured for 28 days. Fig. 3 in the graph shows the obtained flexural strength values.

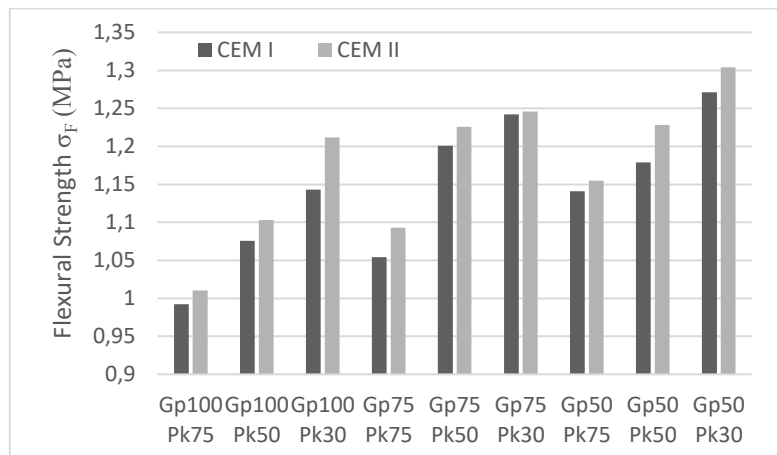


Figure 3. Flexural strength values of foam concrete samples σ_F (MPa)

The compressive strengths of foam concrete vary according to their density ($360-1400 \text{ kg/m}^3$) and range between 1-10 MPa. The ratio of the bending strength value to the compressive strength is in the range of 0.25-0.35 [8,16]. The flexural strengths of foam concrete samples made with type CEM I cement range from 0.99216 MPa to 1.27101 MPa. The sample number Gp50Pk30 has the maximum flexural strength of 1.27101 MPa (50 percent expanded perlite aggregate and 30 percent granule polystyrene foam). In foam concrete samples with 1.01049 MPa and 1.3039 MPa values, CEM II type cement is used. In the foam concrete samples using CEM II type cement, the highest flexural strength value is 1.3039 MPa in the sample numbered Gp50Pk30 (50 percent expanded perlite and 30 percent granular polystyrene foam), which is similar to the sample using CEM I type cement.

With more granulated polystyrene foam and expanded perlite aggregate in the mortar, the flexural strength of foam concrete samples decreases. It has been observed that the fractures occur at the aggregate-mortar

interface (Fig 4). The flexural strength of foam concrete samples made with CEM II Portland composite cement was higher than that of CEM I Portland concrete samples. This is due to the fact that the pozzolanic elements in cement have an impact on strength.



Figure 1. Sample of foam concrete after flexural strength test

Normal concrete (ρ : 2200 kg/m³) has a conductivity coefficient of 1.6 W/m.K. In foam concrete, these values are between 0.06 and 0.66 W/m.K at densities of 200-1600 kg/m³ [7]. The produced foam concrete samples' thermal conductivity coefficient (λ) values are listed in W/m.K in Table 5.

Table 5. Thermal conductivity of CEM I and CEM II cement types λ (W/m.K)

| Sample | CEM I | | CEM II | |
|-----------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Aerogel layerless | Aerogel layered | Aerogel layerless | Aerogel layered |
| Gp100Pk75 | 0.10777 | 0.115 | 0.09848 | 0.12059 |
| Gp100Pk50 | 0.13595 | 0.12 | 0.1144 | 0.12839 |
| Gp100Pk30 | 0.156 | 0.13294 | 0.116952 | 0.13176 |
| Gp75Pk75 | 0.11483 | 0.13063 | 0.10985 | 0.12937 |
| Gp75Pk50 | 0.11511 | 0.135 | 0.12114 | 0.13447 |
| Gp75Pk30 | 0.138 | 0.137 | 0.12201 | 0.13511 |
| Gp50Pk75 | 0.11373 | 0.12293 | 0.11106 | 0.134 |
| Gp50Pk50 | 0.11676 | 0.12304 | 0.11214 | 0.138 |
| Gp50Pk30 | 0.12003 | 0.124 | 0.11572 | 0.139 |

The lowest thermal conductivity coefficient is 0.09848 W/m.K in the Gp100Pk75 mixture, in which CEM II Portland composite cement is used, expanded perlite aggregate at the same rate as the aggregate amount in the foam concrete design calculation, and granular polystyrene foam used by reducing it by 0.25, according to the given chart. Reduced foam granule polystyrene increased the coefficient of thermal conductivity in the foam concrete samples, whereas increased use of expanded perlite aggregate decreased the coefficient of thermal conductivity. It is thought that the low thermal conduction coefficients of the expanded perlite aggregate and granular polystyrene foam are the cause of the decrease in the thermal conduction coefficient of the foam concrete sample if the ratio increases in the concrete mixture.

When the cement type was examined in foam concrete samples without an aerogel layer, mixtures containing CEM II composite Portland cement had a lower thermal conductivity coefficient. In this case, the thermal conductivity coefficient was improved using pozzolanic elements in the CEM II composite Portland cement.

The addition of aerogel layer to the collected samples increased the thermal conductivity coefficient, contrary to predictions. This could be owing to the hydrophobic nature of the nano-silica aerogel employed in the mixture, which prevents it from fully adhering to the concrete surface.

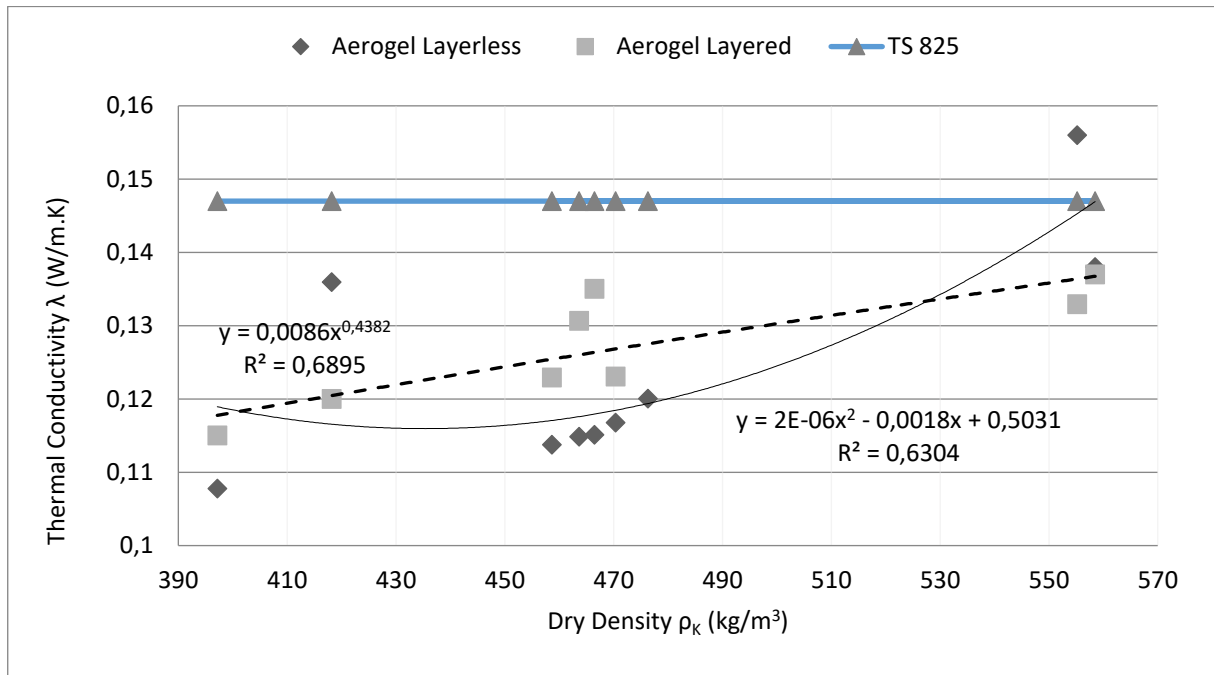


Figure 5. Density-thermal conductivity coefficient comparison of CEM I cement type

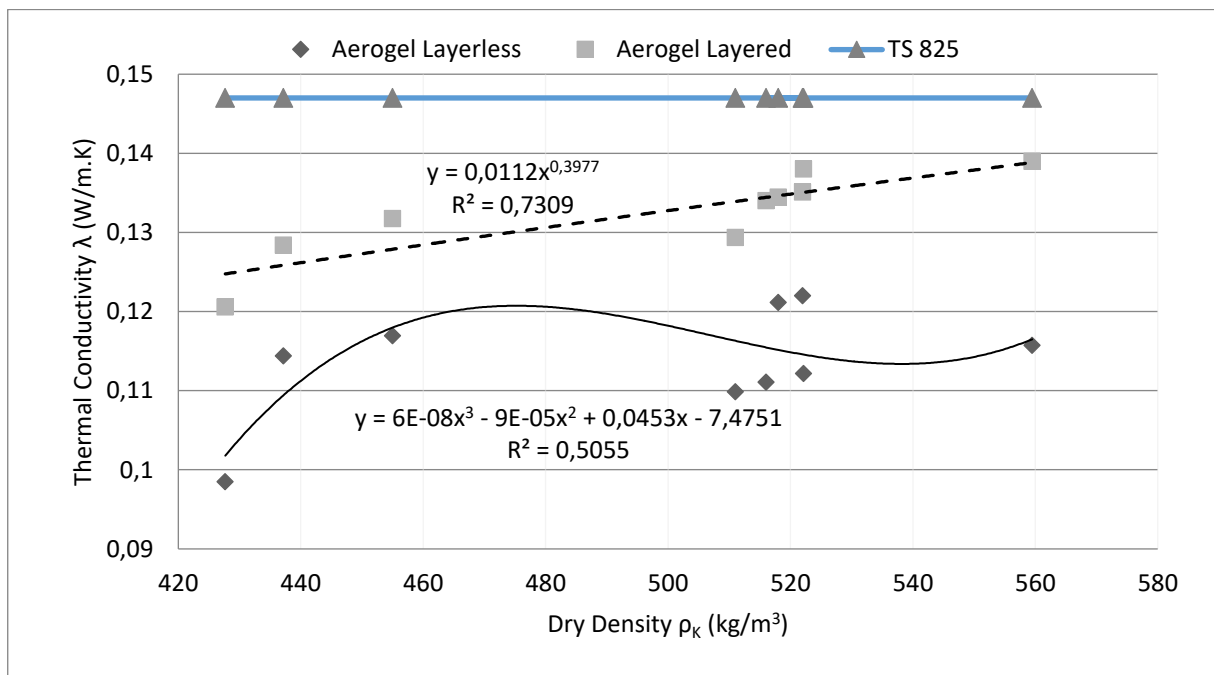


Figure 2. Density-thermal conductivity coefficient comparison of CEM II cement type

In the graphs given in the figure, the thermal conductivity coefficient obtained from the TS 825 standard according to the dry density data of the sample and the thermal conductivity coefficients of the foam concretes were examined comparatively. According to TS 825, the design density was taken as a basis on the concrete, which should have a thermal conductivity coefficient of 0.1-0.49 W/m.K at the density values of 300-1600 kg/m³. It was observed that the value of the thermal conductivity coefficient decreased with the low dry density in the foam concrete. Expanded perlite aggregate and granular polystyrene foam, both

of which are employed at a high rate in low dry density foam concrete, have been shown to have a favorable effect on the thermal conductivity coefficient.

4. CONCLUSION

In this study, the change of thermal conductivity coefficient of various real density and proportions in foam concretes with expanded perlite aggregate, granular polystyrene and nano-silica aerogels, which were created with a dry density of 480 kg/m³, was examined.

In foam concrete samples prepared with a dosage of 250 kg/m³ and a ratio of 0.45 W/B, the dry density values found range from 397.16-559.5 kg/m³. These values were approximately $\pm 18\%$ different from the targeted value. This is due to the fact that the dry densities of the materials employed in different ratios in each mixture vary.

Foam concrete absorbs a lot of water due to its high void rate. The percentages of water absorption in the foam concrete samples varied from 59 to 74 percent. Because the foam ratio is constant and the materials used to fill the gaps in foam concrete, these numbers vary.

Increased perlite aggregate and granulated polystyrene foam rate in the content reduces the flexural strength of foam concrete samples. Flexural strength values for foam concrete using CEM I and CEM II type cement range from 0.99216 MPa to 1.3039 MPa. After the flexural test, cracks were discovered within the interface area. Among the results collected, it was revealed that reinforcement the surface connection of the granular polystyrene foam used in foam concrete can improve flexural strength.

In foam concrete samples, values of thermal conductivity coefficient (λ) range from 0.09848-0.156 W/m.K. Compared to the limit value of TS 825, it was observed that the foam concretes other than the Gp100Pk30 sample of CEM I type cement were below the desired value.

The addition of hydrophobic nano-silica aerogel in layers on the concrete surface has improved foam concrete's thermal conductivity values. The hydrophobicity of silica aerogels could not prevent heat passage by creating heat bridges on the concrete surface and caused the coefficient of thermal conductivity to increase. In this case, new ideas are produced for the method of use of silica aerogels used and provides the basis for further research.

In this study to investigate a method that can be used to increase energy sustainability in structures it was concluded that foam concrete produced using the expanded perlite aggregate and polystyrene foam which is abundant in our country may be one of these methods.

REFERENCES

- [1] Liu, P., Gong, Y.F., Tian, G.H., and Miao, Z.K., (2021). Preparation and experimental study on the thermal characteristics of lightweight prefabricated nano-silica aerogel foam concrete wallboards. *Construction and Building Materials*.272.
- [2] Uluer, O., Karaağaç, İ., Aktaş, M., Durmuş, G., Ağbulut, Ü., Khanlari, A., and Çelik D., (2018). Genleştirilmiş perlitin ısı yalıtım teknolojilerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.24(1):p.36-42.
- [3] Topcu, I.B. and Isikdag, B., (2007) Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite. *Building and Environment*.42(10):p.3540-3546.
- [4] Lanzon, M. and Garcia-Ruiz, P.A., (2008). Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability. *Construction and Building Materials*.22(8):p.1798-1806.

- [5] Valore, J. and C., R., (1954). Cellular concretes part 1 composition and methods of preparation. *Journal Proceedings*.50(5):p.773-796.
- [6] Laukaitis, A., Zurauskas, R., and Keriene, J., (2005). The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement & Concrete Composites*.27(1):p.41-47.
- [7] Amran, Y.H.M., Farzadnia, N., and Ali, A.A.A., (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*.101:p.990-1005.
- [8] Ramamurthy, K., Nambiar, E.K.K., and Ranjani, G.I.S., (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement & Concrete Composites*.31(6):p.388-396.
- [9] Shi, J.Y., Liu, Y.C., Liu, B.J., and Han, D., (2019). Temperature Effect on the Thermal Conductivity of Expanded Polystyrene Foamed Concrete: Experimental Investigation and Model Correction. *Advances in Materials Science and Engineering*.2019.
- [10] Jones, M.R. and McCarthy, A., (2005). Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research*. 57(1):p.21-31.
- [11] Ravindrarajah, R.S., (1999). Bearing strength of concrete containing polystyrene aggregate. *Durability of Building Materials and Components 8, Vols 1-4, Proceedings*.p.505-514.
- [12] Gencil, Oguz, M., Gholampour, A., and T., O., (2021). Recycling waste concretes as fine aggregate and fly ash as binder in production of thermal insulating foam concretes. *Journal of Building Engineering*.38.
- [13] Chica, L. and Alzate, A., (2019). Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials*.200:p.637-647.
- [14] Sang, G.C., Zhu, Y.Y., Yang, G., and Zhang, H.B., (2015). Preparation and characterization of high porosity cement-based foam material. *Construction and Building Materials*.91:p.133-137.
- [15] Chen, X.M., Yan, Y., Liu, Y.Z., and Hu, Z.H., (2014). Utilization of circulating fluidized bed fly ash for the preparation of foam concrete. *Construction and Building Materials*.54:p.137-146.
- [16] Oren, O.H., Gholampour, A., Gencil, O., and Ozbakkaloglu, T., (2020). Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*.238.
- [17] Jiang, J., Lu, Z.Y., Niu, Y.H., Li, J., and Zhang, Y.P., (2016). Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement. *Materials & Design*.92:p.949-959.
- [18] Koksall, F., Sahin, Y., and Gencil, O., (2020). Influence of expanded vermiculite powder and silica fume on properties of foam concretes. *Construction and Building Materials*.257.
- [19] Markin, V., Nerella, V.N., Schrofl, C., Guseynova, G., and Mechtcherine, V., (2019). Material Design and Performance Evaluation of Foam Concrete for Digital Fabrication. *Materials*.12(15).
- [20] Canbaz, M., Dakman, H., Arslan, B., and Buyuksungur, A., (2019). The effect of high-temperature on foamed concrete. *Computers and Concrete*.24(1):p.1-6.
- [21] Short, A.a.W.K., *Lightweight concrete*. 1963.

- [22] Wang, L.Y., Wang, C., Liu, P.W., Jing, Z.J., Ge, X.S., and Jiang, Y.J., (2018). The flame resistance properties of expandable polystyrene foams coated with a cheap and effective barrier layer. *Construction and Building Materials*.176:p.403-414.
- [23] Al Zaidi, A.K.A., Demirel, B., and Atis, C.D., (2019). Effect of different storage methods on thermal and mechanical properties of mortar containing aerogel, fly ash and nano-silica. *Construction and Building Materials*.199:p.501-507.
- [24] Liu, S.J., Zhu, K.M., Cui, S., Shen, X.D., and Tan, G., (2018). A novel building material with low thermal conductivity: Rapid synthesis of foam concrete reinforced silica aerogel and energy performance simulation. *Energy and Buildings*.177:p.385-393.
- [25] Huang, Y. and Niu, J., (2015). Energy and visual performance of the silica aerogel glazing system in commercial buildings of Hong Kong. *Construction and Building Materials*.94:p.57-72.
- [26] Cuce, E., Cuce, P.M., Wood, C.J., and Riffat, S.B., (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*.34:p.273-299.
- [27] Kim, S., Seo, J., Cha, J., and Kim, S., (2013). Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel. *Construction and Building Materials*.40:p.501-505.
- [28] Yoon, H.S., Lim, T.K., Jeong, S.M., and Yang, K.H., (2020). Thermal transfer and moisture resistances of nano-aerogel-embedded foam concrete. *Construction and Building Materials*.236.

Experimental Study on Cutting Force and Surface Roughness in Turning with CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN Coated Cutting Insert of Al-12Si-(0.02-1)Sr Alloys Manufactured by Permanent Mold Casting Method

Ali Paşa HEKİMOĞLU¹  Şenol BAYRAKTAR^{1,*} 

¹Recep Tayyip Erdoğan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 53100, RİZE

Graphical/Tabular Abstract

In this study, machinability properties were investigated for optimum Sr ratio in machining Al-12Si-Sr alloys.

Article Info:

Research article
Received: 18.11.2021
Revision: 28.12.2022
Accepted: 3.01.2022

Highlights

- Effects of different Sr additions on machinability properties
- BUE formation on cutting tool
- Effects of cutting speed and feed rate on cutting force, surface roughness and tool wear.

Keywords

Al-Si Alloy
Cutting Force
Surface Roughness
Built Up Edge

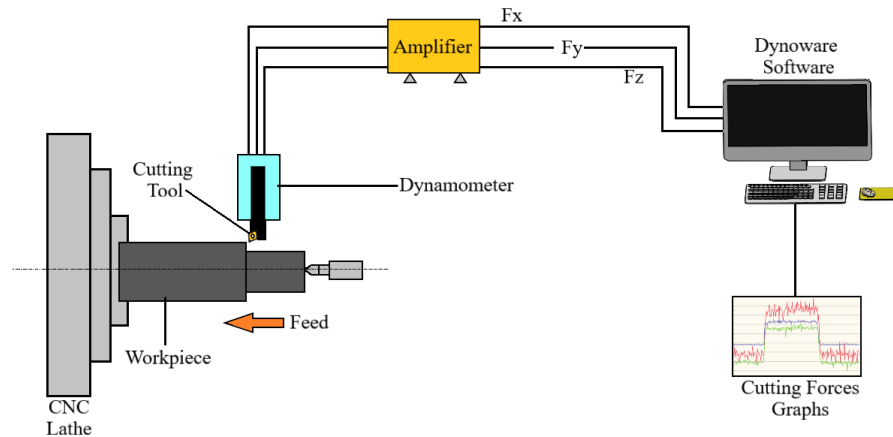


Figure A. Experimental setup for cutting force measurement

Purpose: In this study, it was aimed to investigate the effect of strontium (Sr) additions at different rates (0.02; 0.1 and 1%) on the cutting force, surface roughness and BUE (Built up edge) formation in Al-12Si-Sr alloy.

Theory and Methods: Al-12Si-Sr alloys were produced by permanent method. Machining experiments of the produced alloys were carried out in CNC vertical machining center. Hardness and tensile strength of the experimental alloys were measured by conventional methods. Kistler dynamometer and Mahr perthometer M1 roughness measuring devices were used for cutting force and surface roughness measurement, respectively. Microstructure and BUE images were obtained with optical and digital microscopes, respectively.

Results: Highest hardness and tensile strength values were obtained from Al-12Si-0.1Sr alloy. The elongation to fracture value of the alloys decreased continuously with increasing Sr ratio. It was determined that the cutting force, surface roughness and BUE formation decrease with the increase in cutting speed, and these values increase in case of an increase in feed rate. The lowest cutting force and surface roughness values were measured in the machining of the Al-12Si-0.1Sr alloy, while the highest values were measured in the Al-12Si-0.02Sr alloy. The least BUE formation was observed in the machining of the Al-12Si-0.1Sr alloy, while the highest BUE formation was observed in the Al-12Si-0.02Sr alloy.

Conclusion: It was determined that a combination of maximum cutting speed and minimum feed rate should be used for minimum cutting force, surface roughness and BUE. It was observed that the optimum results in terms of mechanical and machinability properties were obtained with the addition of 0.1 Sr.



Experimental Study on Cutting Force and Surface Roughness in Turning with CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN Coated Cutting Insert of Al-12Si-(0.02-1)Sr Alloys Manufactured by Permanent Mold Casting Method

Ali Paşa HEKİMOĞLU¹ Şenol BAYRAKTAR^{1,*}

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 53100, Merkez/RİZE

Abstract

In this study, three Al-12Si-Sr alloys containing different ratios (0.02; 0.1 and 1%) strontium (Sr) were manufactured by the permanent mold casting method. The microstructures of the manufactured alloys were determined by standard metallographic methods, and the hardness and tensile strength values were stated by the Brinell method and tensile test, respectively. The effects of different Sr ratios and cutting parameters on the cutting force and surface roughness during turning of these alloys were investigated using CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN coated carbide inserts under the different cutting speeds (200, 300 and 400 m/min), feed rate (0.05; 0.1 and 0.15 mm/rev) and constant depth of cut (1.5 mm) conditions. Metallographic examinations revealed that the microstructure of the Al-12Si-0.02Sr alloy consists of α , eutectic aluminum-silicon, Al-Fe-Si (δ) phases and primary silicon particles, while the Al-12Si-0.1Sr contains Al-Sr-Si phase in addition to the phases observed in the Al-12Si-0.02Sr alloy. In these investigations, it was also observed that as the Sr ratio increased, the Al-Sr-Si phase grew and/or the number of these phase particles increased. The highest hardness and tensile strength values were obtained from Al-12Si-0.1Sr alloy among the produced alloys. The elongation to fracture value of the alloys decreased continuously with increasing of Sr ratio. It was seen that the cutting force and surface roughness decreased with the increase of cutting speed, whereas increased with the increase of feed rate in the machining tests. The lowest cutting force and surface roughness values were measured in the machining of Al-12Si-0.1Sr alloy, while the highest values were measured in Al-12Si-0.02Sr alloy in turning tests. Built-up edge (BUE) formation was observed during the turning of the alloys. It was revealed that BUE formation could be reduced by using a combination of high cutting speed and low feed rate. While the least BUE formation was observed in the Al-12Si-0.1Sr alloy at the cutting tool rake face, the highest BUE formation was observed in the Al-12Si-0.02Sr alloy. The findings obtained from the turning tests were discussed in based on the structural and mechanical properties of the alloys.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18.11.2021
Düzeltilme: 28.12.2022
Kabul: 3.01.2022

Keywords

Al-Si Alloy
Cutting Force
Surface Roughness
Built Up Edge

Anahtar Kelimeler

Al-Si Alaşımı
Kesme Kuvveti
Yüzey Pürüzlülüğü
Yığıntı Talaş

Kokil Kalıba Döküm Yöntemi ile Üretilmiş Al-12Si-(0,02-1)Sr Alaşımlarının CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN Kaplamalı Kesici Uç ile Tornada İşlenmesinde Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Deneysel Çalışma

Öz

Bu çalışmada, farklı oranlarda (%0,02; 0,1 ve 1) stronsiyum (Sr) içeren üç adet Al-12Si-Sr alaşımı kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımların içyapıları standart metalografik yöntemlerle, sertlik ve çekme dayanımı değerleri ise sırasıyla Brinell ölçüm yöntemi ve çekme deneyi ile belirlendi. Farklı Sr oranları ve kesme parametrelerinin bu alaşımların tornada işlenmesi esnasındaki kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri, farklı kesme hızı (200, 300 ve 400 m/dak), ilerleme (0,05; 0,1 ve 0,15 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (1,5 mm) koşullarında CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN kaplamalı karbür kesici uç kullanılarak araştırılmıştır. Metalografik incelemeler, Al-12Si-0,02Sr alaşımının içyapısının α , ötektik alüminyum-silisyum, Al-Fe-Si (δ) fazları ile primer silisyum parçacıklarından, Al-12Si-0,1Sr alaşımının içyapısının ise Al-12Si-0,02Sr alaşımında gözlenen fazlara ilave olarak Al-Sr-Si fazından oluştuğunu göstermiştir. Bu incelemelerde ayrıca Sr oranı arttıkça Al-Sr-Si fazının büyüdüğü ve/veya bu faz parçacıklarının sayısının arttığı gözlenmiştir. Üretilen alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve çekme dayanımı değeri Al-12Si-0,1Sr alaşımından elde edilmiştir. Alaşımların kopma uzaması değeri ise artan Sr oranı ile sürekli azalmıştır. İşleme testlerinde kesme hızının artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ilerlemenin artması durumunda ise bu değerlerin de arttığı tespit edilmiştir. Tornalama testlerinde en düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri, Al-12Si-0,1Sr alaşımının işlenmesinde ölçülürken, en yüksek değerler ise Al-12Si-0,02Sr alaşımında ölçülmüştür. Alaşımların tornalanması esnasında yığıntı talaş (YT) oluşumu gözlenmiştir. YT oluşumunun yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme kombinasyonları kullanılarak azaltılabileceği ortaya konulmuştur. Kesici uçta en az YT oluşumu, Al-12Si-0,1Sr alaşımında gözlenirken, en fazla YT oluşumu ise Al-12Si-0,02Sr alaşımında gözlenmiştir. İşleme deneylerinden elde edilen bulgular, alaşımların yapısal ve mekanik özelliklerine dayandırılarak irdelenmiştir.

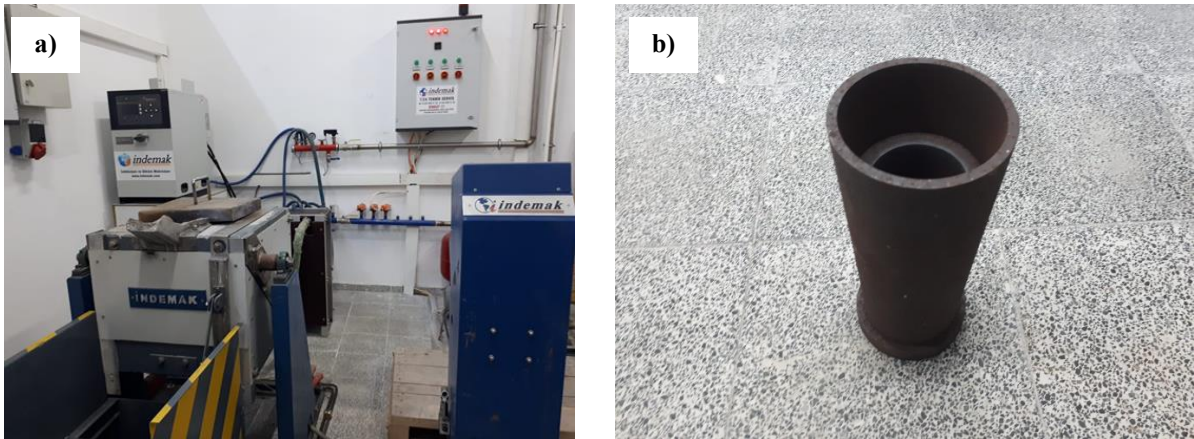
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Al-Si esaslı alaşımlar, ağırlıklı otomotiv endüstrisinde içten yanmalı motorların ve yüksek özgül mukavemet gerektiren bazı parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Farklı döküm teknikleri ile üretilebilmesi, yüksek özgül mukavemet ve düşük ergime derecelerine sahip olması bu alaşımların önemli avantajlarından [1]. Bu alaşımların mekanik sistemlerde hassas bileşen olarak kullanılabilmesi için tornalama, delme ve frezeleme gibi talaşlı imalat işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, bu alaşımların işlenebilirliği farklı nedenlerden dolayı zordur. Düşük Si içeriğine sahip Al-Si alaşımlarının işlenmesinde kesici takım malzemelerine alüminyum fazın yapışması veya yığıntı talaş oluşumu, özellikle kuru işleme şartlarında ana sorundur. Yüksek Si içerikli alaşımlar ise genellikle kesici takımın serbest yüzey aşınmasına neden olmaktadır. Bu nedenle Al-Si alaşımların işlenmesinde hem YT hem de takım aşınması, Si içeriğine bağlı olarak kesici takım geometrisinin bozulmasına ve takım ömrünün azalmasına sebep olmaktadır [2-4]. Diğer taraftan bu durum, işleme esnasında kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü çıktılarını arttıran bir etkidir. Bu bağımlı değişken çıktılarının işleme üzerindeki verimliliği, kesme parametreleri, kesici takım geometrisi, kesici takım malzemesi ve soğutma teknikleri gibi bağımsız değişkenlerin kontrol altına alınması artırılabilir. Buna göre bu alaşımların istenilen hassasiyette üretilebilmesi için kesme parametrelerinin optimum seçimi son derece önem taşımaktadır. Al-Si esaslı alaşımların işlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda; Kuczmaszewski vd., Al10SiMg alaşımının iki ağızlı kaplamasız, TiB₂ ve TiAlCN kaplamalı kesiciler ile frezelenmesinde TiAlCN kaplamalı kesicilerin daha iyi işleme performansı sergilediğini [5], Barooah vd., basınçlı döküm yöntemi ile üretilen Al-12Si alaşımının kaplamasız HSS ile vida açma işleminde, YT ve abrasif aşınma mekanizmalarının etkili olduğunu ve Al fazı içerisindeki sert silisyum parçacıklarının abrasif aşınmaya neden olduğunu belirtmişlerdir [6]. Bayraktar ve Demir, kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilen Al-12Si-0.6Mg alaşımının tornada işlenmesinde, kesme hızının artması ile kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve YT'nin azaldığını ve ilerlemenin artması ile arttığını tespit etmişlerdir. Kaplamasız kesici uçların TiCN/TiN ve TiAlN/TiN kaplamalı kesicilere göre daha iyi performans sergilediği ve T6 ısıtma işleminin işlenebilirlik özelliklerini iyileştirdiği ortaya konulmuştur [7]. Bayraktar ve Afyon, kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilen Al-7Si alaşımında Zn ve Cu ilavelerinin delme işleminde kaplamasız karbür matkap kullanarak sabit kesme parametreleri şartları altında işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. En düşük ilerleme kuvveti, tork, yüzey pürüzlülüğü ve YT'nin sırasıyla Cu ve Zn ilaveli alaşımlarda ölçüldüğünü ortaya koymuşlardır [8]. Steininger vd., AlSi9Cu3 alaşımının kaplamasız, TiCN, CrN, SiCN-TiCN, TiB₂ and DLC kaplamalı kesiciler ile vida açma işleminde YT oluşumunun gözlemlendiği ve bunun kesme hızına ve sıcaklığa bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. YT oluşumunun düşük kesme hızının etkisi ile arttığı ve DLC kaplamalı karbür kesiciler ile daha iyi yüzey kalitesi, minimum YT ve kesme torkunun elde edildiğini ortaya koymuşlardır [9]. Wain vd., Al-Si-Cu (A319) alaşımının kuru delinmesinde düşük sürtünmeli Dymon-iC, Graphit-iC, MoST ve MoS₂ esaslı kaplamaların performansını inceledikleri çalışmada, Graphit-iC kaplamalı kesicilerin en uzun takım ömrüne sahip olduğu ve en az YT sergilediğini tespit etmişlerdir [10]. Marani vd., kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmiş Al-Si-Cu alaşımının tornada işlenmesinde stronsiyum (Sr), Bizmut (Bi) ve Antimon (Sb) ilavelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sr ilavesi ile kesme kuvveti artarken Bi ilavesi ile kesme kuvvetinin azaldığını ve ANFIS (Adaptive neuro-fuzzy inference system) ile optimum kesme şartları olarak maksimum kesme hızı (250 m/dak) ve minimum ilerleme (0,05 mm/dev) kombinasyonunun kullanılmasını gerektiğini tespit etmişlerdir [11]. Kumaran vd., Al-Si₇-Cu₄ alaşımının sementit karbür kesici uç ile farklı kesme hızı (800, 8500 ve 9000 dev/dak), ilerleme (0,6125; 0,634 ve 0,645 mm/dev), kesme derinliği (0,4; 0,6 ve 0,8 mm) ve uç yarıçapı (0,5; 0,75 ve 1 mm) kullanarak frezelenmesinde kesme parametrelerini yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı, artık gerilme ve talaş kalınlığı performans kriterlerine göre optimize etmişlerdir. Taguchi-TOPSIS ile optimum kesme şartları 8000 dev/dak kesme hızı, 0,6125 mm/dev ilerleme, 0,5 mm kesme derinliği ve 0,5 mm uç yarıçapı olarak belirlenmiştir [12]. Döküm yöntemi ile üretilen alaşımların mekanik sistemlerde optimum tolerans aralıklarında nihai ürün olarak kullanılabilmesi için talaşlı imalat operasyonlarına tabi tutulması gerekmektedir. Ayrıca, bu alaşımların mekanik sistemlerdeki servis ömürleri, talaşlı imalat operasyonları esnasında ölçülen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü çıktıları ile yakından ilişkilidir. Bu çıktılarının performansı, optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi ile kontrol altına alınabilmektedir. Optimum kesme parametreleri ise alaşımların yapısal ve mekanik özellikleri ile yakından ilişkilidir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda içyapı modifikasyonu ve mukavemet artırma amacıyla Al-Si alaşımlarına stronsiyum elementi ilave edilmiş ve belli oranlardaki stronsiyum katkılarının bu alaşımların içyapısındaki

ötektik silisyum parçacıklarını inceltip küreselleştirdiği ve bunun sonucunda da mukavemetlerinde artışa yol açtığı belirlenmiştir [13-15]. Ancak stronsiyum ilavelerinin bu alaşımların tornalama işlemi sırasında kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini ortaya koyan bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu nedenle; bu çalışmada, Al-12Si esaslı alaşıma farklı oranlarda Sr ilaveleri ile birlikte farklı kesme hızı, ilerleme ve sabit kesme derinliği parametrelerinin tornalama işlemi esnasında kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin ortaya konulması hedeflenmiştir.

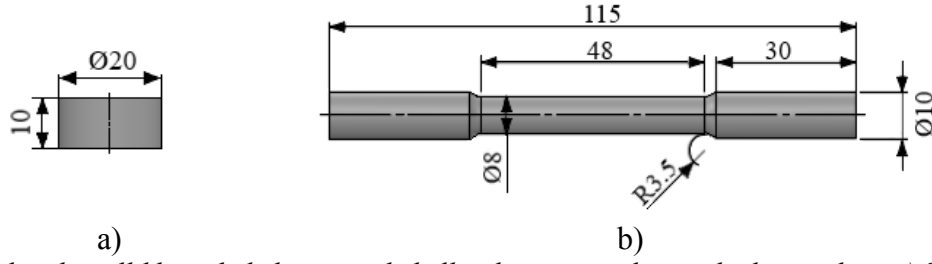
2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Al-12Si-0,02Sr, Al-12Si-0,1Sr ve Al-12Si-1Sr alaşımları, kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen Al-Si-Sr alaşımlarının kimyasal bileşimi, literatürden [13-15] faydalanılarak belirlendi ve üretimlerinde yüksek saflıkta ticari alüminyum, silisyum ile Al-15Sr alaşımı kullanıldı. Belirtilen kimyasal bileşimleri sağlayacak şekilde 1gr hassasiyetine sahip bir terazide tartılan alaşım bileşenleri, fotoğrafı Şekil 1a'da verilen orta frekanslı bir indüksiyon ocağında ergitildi. Homojen karışımın sağlanabilmesi amacıyla ergimiş durumdaki sıvı metale 670 ± 5 °C'lik döküm sıcaklığında üçer dakika ara ile 30'ar saniye karıştırma işlemi uygulandı. Bu işlem beş kez tekrarlandı ve ayrıca alaşım bileşimlerinin difüzyonuna zaman vermek amacıyla sıvı metal döküm sıcaklığında 20 dakika bekletildi. Ergimiş durumdaki alaşım karışımları yukarıda belirtilen döküm sıcaklığından oda sıcaklığında tutulan, 60 mm taban ve 110 mm ağız çapına sahip 260 mm yüksekliğindeki bir kokil kalıba [13-15] dökülerek katılaştırıldı. SAE 8620 çeliğinden yapılmış olan bu kalıbın fotoğrafı, Şekil 1b'de verilmektedir.



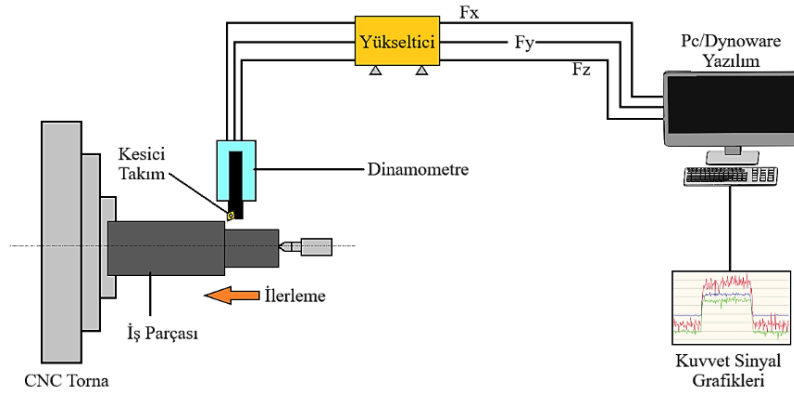
Şekil 1. Alaşımların üretiminde kullanılan ekipmanlar, a) İndüksiyonlu ergitme ocağı ve b) Alaşımların katılaştırılmasında kullanılan kalıp

Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri, indüktif olarak eşleşmiş plazma emisyon spektrometrisi-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) tekniği ile iç yapıları ise standart metalografik yöntemlerle hazırlanan numunelerin optik mikroskopta incelenmesi yoluyla belirlendi. İçyapı numuneleri, $\text{Ø}20 \times 10$ mm boyutlarında talaşlı imalat ile alaşım külçelerinden elde edildi. Bu numunelerin incelenecek yüzeyleri, ilk aşamada sırasıyla 300, 600, 800, 1200 ve 2000 numaralı zımparalar ile zımparalandı. Zımparalama işleminden sonra ise söz konusu yüzeyler, sırasıyla 9 ve 3 μm 'lik elmas ve 0,05 μm 'lik SiO_2 süspansiyonlar ile parlatıldı. Numunelerin parlatılmış yüzeyleri, dağlama işlemi uygulanmadan mikroskopik incelemeye tabi tutuldu ve fotoğraflandı. Üretilen alaşımların sertlik değerleri, Brinell sertlik ölçme yöntemiyle belirlendi. Bu ölçümler, teknik resmi Şekil 2a'da verilen numuneler üzerinde $62,5 \text{ kg} \times \text{f}$ yük altında 2,5 mm çapında bilye uç kullanılarak gerçekleştirildi. Her bir alaşım örneği üzerinde en az on beş adet ölçüm gerçekleştirilerek elde edilen ölçülerin aritmetik ortalaması alınmak suretiyle alaşımların sertlik değerleri belirlendi. Çekme deneyleri, $\text{Ø}8 \times 40$ mm'lik ölçü boyutlarına sahip silindirik iş parçaları üzerinde 10^{-3} s^{-1} 'lik deformasyon hızı şartları altında gerçekleştirildi (Şekil 2b). Her bir alaşım için altı adet örnek üzerinde ölçüm gerçekleştirildi ve ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak alaşımın akma ve çekme mukavemeti ile kopma uzaması değerleri belirlendi.



Şekil 2. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan numunelerin teknik resimleri, a) Sertlik ve b) Çekme deney numunesinin teknik resmi (Ölçüler mm'dir)

Üretilen alaşımların işlenmesi esnasında kesme kuvvetinin ölçülmesi için kullanılan deneysel düzenek Şekil 3'te verilmiştir. Bu düzende, F_x , F_y ve F_z kuvvet sinyalleri Kistler dinamometre ile alınarak yükseltece ve Dynoware yazılımı ile grafiklere aktarılmaktadır. Her üç kuvvet bileşeninin bileşkesi alınarak kesme kuvveti tespit edilmektedir.



Şekil 3. Kesme kuvveti ölçümü için deneysel düzenek

İşleme deneylerinde Tablo 1'de teknik özellikleri verilen Sandvik marka DCMT 11T304-MM kodlu kesici uç kullanılmıştır. İşleme testleri için iş parçası ölçüleri $\varnothing 58 \times 200$ mm olarak kullanılırken kesme şartları için kesici takım üretici firma değerleri dikkate alınarak Tablo 2'de verilen parametre ve seviyeler kullanılmıştır.

Tablo 1. Kesici uç teknik özellikleri

| Kaplama türü | Kaplama metodu | Kaplama sertliği (HV) | Kaplama kalınlığı (μm) | Tane boyutu | Bağlayıcı |
|--|----------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------|-----------|
| TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN | CVD | 1500 | 4,5 | M | L |

Tablo 2. Kesme parametreleri

| Kesme hızı (m/dak)- V | İlerleme (mm/dev)- f | Kesme derinliği (mm)- a_p |
|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 200, 300, 400 | 0,05; 0,1; 0,15 | 1,5 |

İşlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü, ISO 4287 standardında belirtilen kriterlere göre ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ölçülerek tespit edilmiştir. Mahr Perthometer izleyici uçu pürüzlülük cihazı kullanarak her bir yüzey için farklı noktalardan beş adet ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması ile R_a değerleri belirlenmiştir. Kesici uçlarda oluşan aşınmalar ise Dino-Lite marka ve AM4113ZT model dijital mikroskop ile tespit edilmiştir.

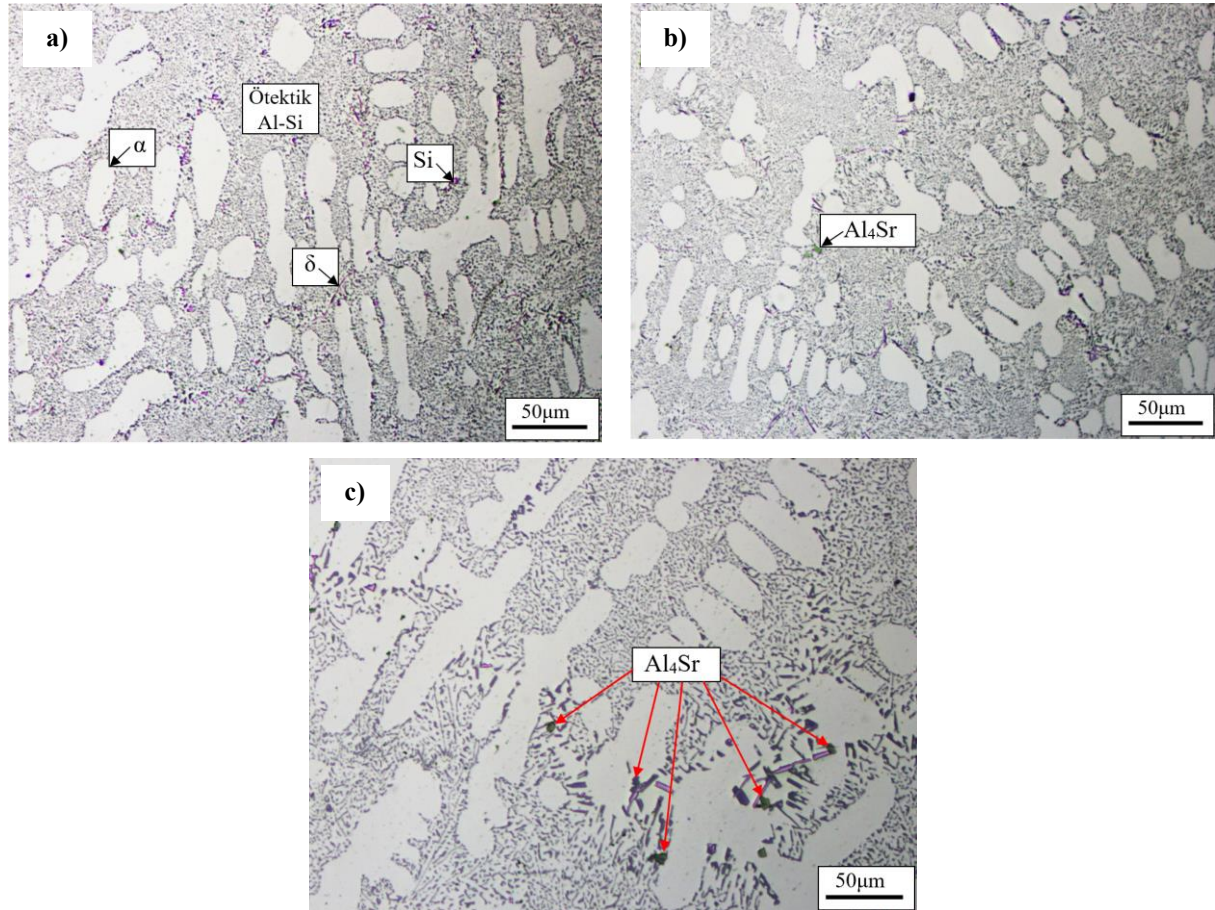
3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Al-12Si-0,02Sr, Al-12Si-0,1Sr ve Al-12Si-1Sr alaşımlarının kimyasal bileşimleri, Tablo 3'te, alaşımların içyapısını gösteren mikrograflar ise Şekil 4'te verilmektedir.

Tablo 3. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri

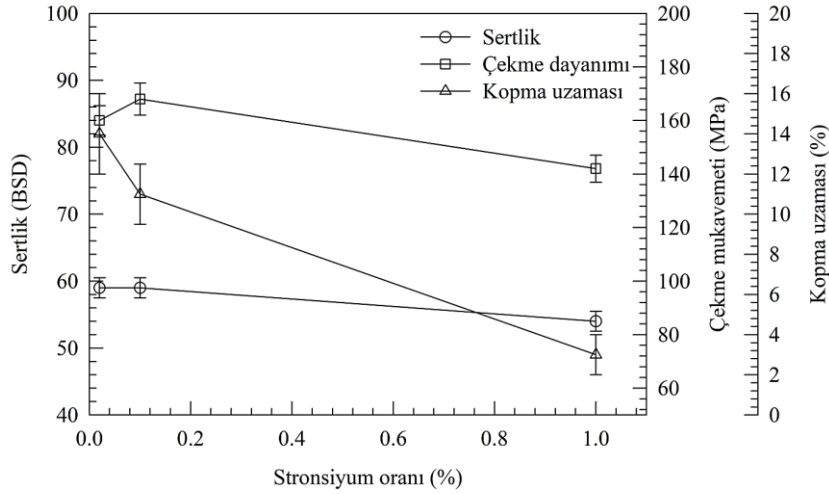
| Alaşım | Alaşım Kodu | Kütlece element oranı (%) | | | |
|----------------|-------------|---------------------------|------------|---|-----------|
| | | Silisyum | Stronsiyum | Fe, P, V, Zn, vb. (safsızlık elementleri) | Alüminyum |
| Al-12Si-0,1Sr | A | 12,4 | 0,02 | 0,30 | Kalan |
| Al-12Si-0,02Sr | B | 12,3 | 0,11 | 0,31 | |
| Al-12Si-1Sr | C | 12,1 | 1,02 | 0,35 | |

Şekil 4'teki mikrograflar, *B* alaşımının içyapısının alüminyumca zengin α fazı, ötektik silisyum parçacıklarının ince küresel şekilli olduğu ötektik alüminyum-silisyum faz bölgesi ve intermetalik Al-Fe-Si (δ) fazı ile primer silisyum parçacıklarından oluştuğunu göstermektedir (Şekil 4a). *A* alaşımının içyapısında ise *B* alaşımında gözlenen fazlara ilave olarak Al-Sr-Si fazı ortaya çıkmıştır (Şekil 4b). Kütlece %1 oranında Sr içeren *C* alaşımında ise *A* alaşımından farklı olarak sadece Al-Sr-Si (Al_4Sr) fazının büyüdüğü ve/veya bu faz parçacıklarının sayısının arttığı gözlenmiştir (Şekil 4c). Al-Si-Sr alaşımlarının içyapısında bu fazların oluşumu daha önceki çalışmalarda alaşımların soğuma davranışlarına dayandırılarak detaylı bir şekilde ortaya koyulmuştur [13-20]. Alaşımların içyapılarının incelenmesinden elde edilen bulguların bu konuda daha önceden yapılmış çalışmalar ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.



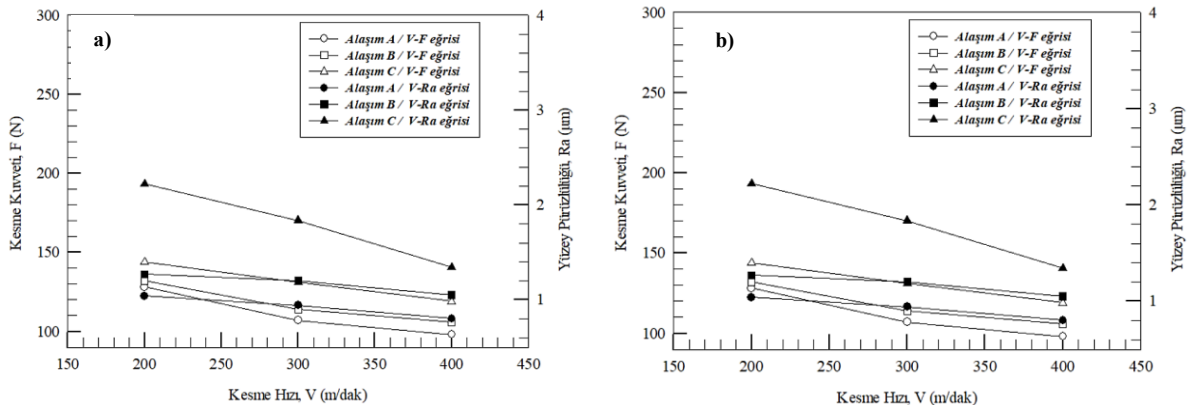
Şekil 4. Al-12Si-Sr alaşımlarının içyapısını gösteren mikrograflar, a) Al-12Si-0,02Sr (*B* alaşımı), b) Al-12Si-0,1Sr (*A* alaşımı) ve c) Al-12Si-1Sr (*C* alaşımı)

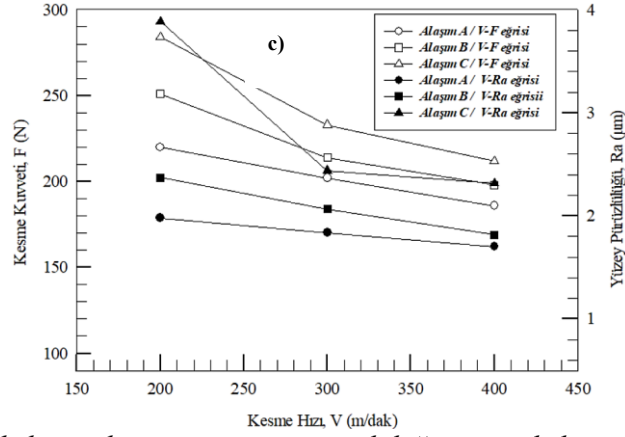
Üretilen alaşımların sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri ile bu değerlerin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler Şekil 5'te verilmektedir. *A* alaşımı, *B* alaşımından azda olsa sertlik bakımından yüksek bir değer sergilerken, *C* alaşımı bu iki alaşımdan daha düşük sertlik değeri sergilemiştir. Üretilen alaşımlar içerisinde en yüksek çekme mukavemeti değeri *A* alaşımından, en düşük çekme mukavemeti değeri ise *C* alaşımından elde edilmiştir. Al-12Si-Sr alaşımlarının kopma uzaması değerleri ise artan stronsiyum oranı ile sürekli azalmıştır (Şekil 5). Sertlik ölçme ve mekanik deneylerden elde edilen bulgular, daha önce bu konuda yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Al-12Si-Sr alaşımlarının sertlik, mukavemet ve kopma uzaması değerleri üzerinde stronsiyumun etkisini ifade eden daha önce yapılan çalışmalarda [13-20] detaylı olarak irdelenerek ortaya koyulmuştur. Literatürdeki bu çalışmalarda; söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemetinde stronsiyum katkılarının neden olduğu artış, ötektik silisyum parçacıklarının küçülüp küreselleşerek alaşımın içyapısında daha homojen bir şekilde dağılmasına, %0,1 Sr oranından sonra bu değerlerde gözlenen azalma ise δ fazının morfoloji değiştirmesi ve/veya içyapıdaki intermetalik Al_4Sr fazının miktarının artmasına dayandırılarak açıklanmıştır. Literatürde [21-26], alaşımların kopma uzaması bir başka deyişle süneklik değerlerinde meydana gelen azalma da alüminyumca zengin dendritlerdeki morfoloji değişikliğine ve dendritler arası bölgelerde oluşan intermetalik Al_4Sr fazının etkisine dayandırılmıştır.



Şekil 5. Al-12Si-Sr alaşımlarının sertlik, çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerlerinin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler

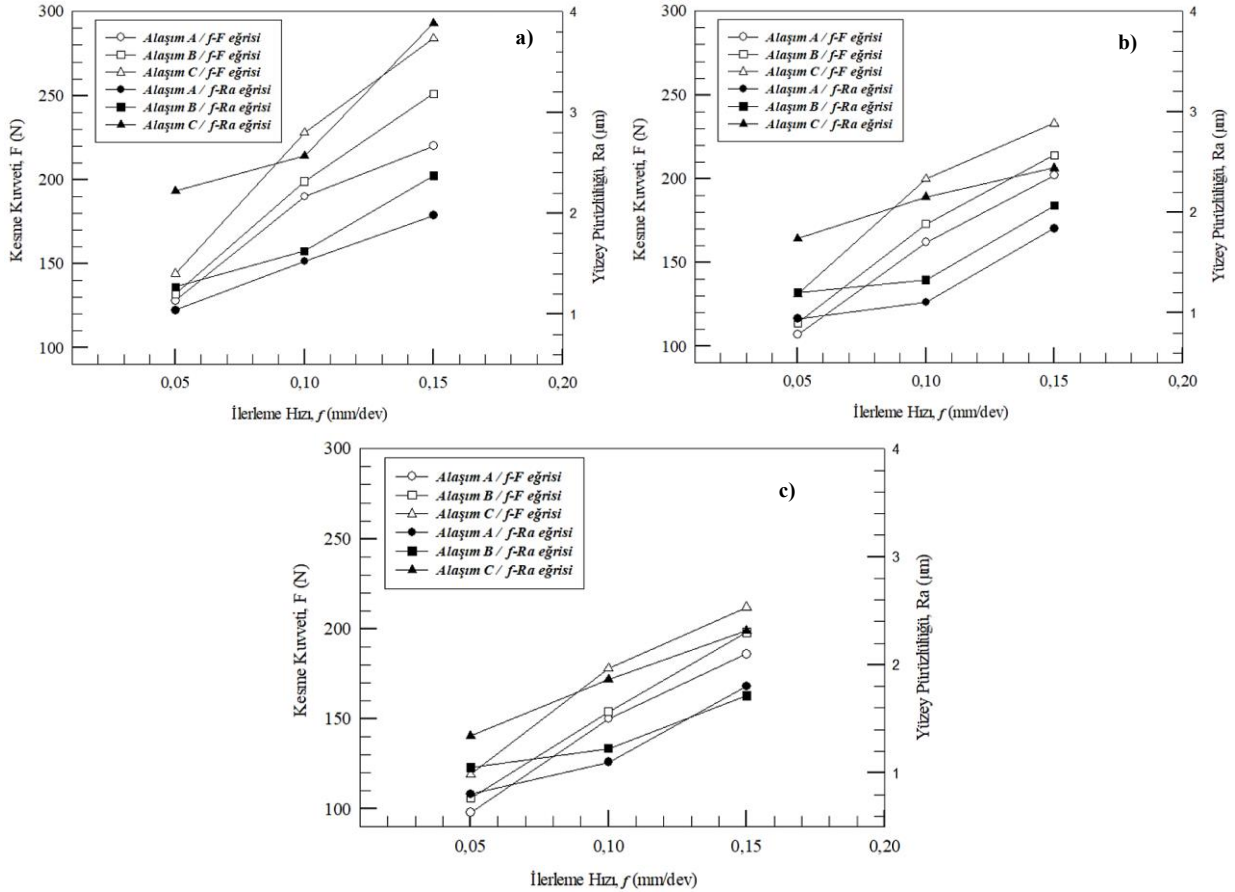
A, *B* ve *C* alaşımlarının işlenmesi esnasında sabit ilerlemede 200, 300 ve 400 m/dak kesme hızları için ölçülen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü grafikleri, Şekil 6'da verilmiştir. Bu grafiklere göre kesme hızının artması ile tüm alaşımlarda kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Kesme hızının artması, birincil ve ikincil deformasyon bölgesinde sıcaklık oluşumunu attırmaktadır. Bu durum, kesme bölgesinde malzemenin akma mukavemetini azaltarak kesme işlemini kolaylaştırmaktadır. Böylelikle, kesme kuvveti azalırken işlenmiş yüzey kalitesi de artmaktadır [16, 27, 28].





Şekil 6. Sabit ilerlemede kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızının etkisi, a) $f: 0,05$ mm/dev, b) $f: 0,1$ mm/dev ve c) $f: 0,15$ mm/dev

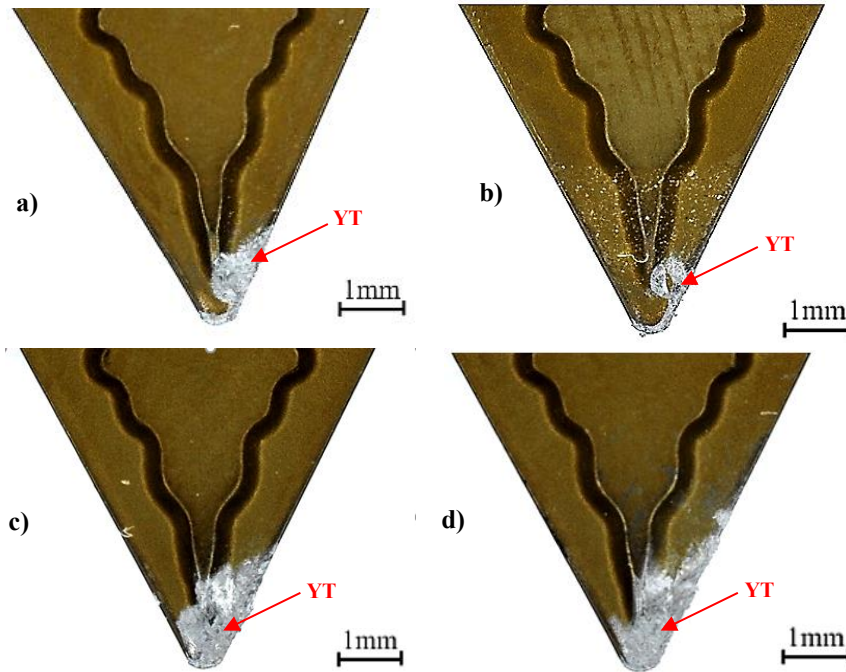
Tüm alaşımların sabit kesme hızında 0,05; 0,1 ve 0,15 mm/dev ilerleme değerlerinde işlenmesi sonucunda ölçülen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü grafikleri, Şekil 7’de verilmiştir.



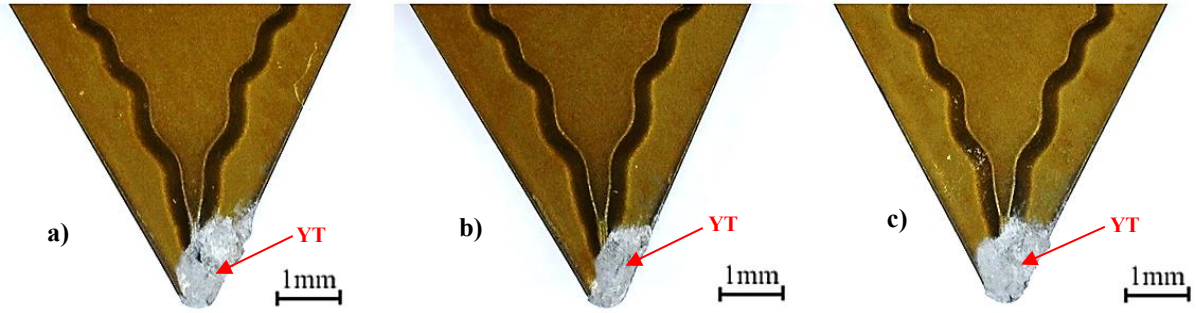
Şekil 7. Sabit kesme hızında kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerlemenin etkisi, a) $V: 200$ m/dak, b) $V: 300$ m/dak ve c) $V: 400$ m/dak

Şekil 7’teki grafiklerde sabit kesme hızı değerlerinde ilerleme oranının artmasına bağlı olarak kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün tüm alaşımlarda arttığı gözlenmiştir. Bu durumun, artan ilerleme ile birim zamanda kaldırılacak talaş hacminin ve kesici takım-talaş ara yüzey alanının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [7, 29-31]. Diğer bir ifade ile $R_a = f^2 / 32r$ eşitliğine göre ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılı olduğu ve ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün de artacağı görülmektedir. Bu eşitlikte, R_a : ortalama yüzey pürüzlülüğü, f : ilerleme hızı ve r : kesici uç yarıçapını ifade etmektedir [32].

Şekil 6 ve 7’de sabit kesme şartları altında, Al-12Si alaşımına %0,1 oranında Sr ilavesi (*A* alaşımı) ile %0,02 Sr ilaveli alaşıma (*B* alaşımı) göre kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözlenmiştir. Bu durumun, *A* alaşımının kopma uzamasında meydana gelen azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, %0,02 Sr oranından sonra kopma uzamasındaki azalmanın dendritik yapıdaki değişime ve dendritik bölgelerde Al_4Sr fazının oluşmasına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, dendritik α (Al) faz hacminin azalması ve interdendritik bölgelerde intermetalik bileşiklerin oluşmasından dolayı alüminyum esaslı alaşımlarda kopma uzamasının azaldığı bilinmektedir [23, 24, 33]. Al-12Si alaşımına %1 oranında Sr ilavesi (*C* alaşımı) ile *A* alaşımına göre kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir. Bu durum, yapısal inceleme sonucunda Al-12Si-Sr alaşımlarında %0,1 oranında Sr ile çökelmeye başlayan Al_4Sr fazının %0,1Sr oranından sonra daha kaba bir yapıya dönüşmesinden kaynaklanmış olabilir [13]. İçyapıda kaba bir yapıya dönüşen Al_4Sr fazı, kesme işlemi esnasında plastik deformasyonu zorlaştırarak kesme kuvvetini arttırdığı ve işlenmiş yüzey kalitesini azalttığı düşünülmektedir. Alaşımların tornada işlenmesi esnasında kesici uçta yığıntı talaşın (YT) oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 8). YT oluşumu, kesme hızının artması ile azaldığı görülmüştür [34]. Bu durumun aşırı deforme olmuş yapının yeniden kristalleşmesi ve yumuşamasını sağlayan ısının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [35-37]. Diğer bir ifade ile kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın artması ile plastik deformasyon oluşumu ve kesme işlemi kolaylaşmaktadır. İlerlemenin artmasına bağlı olarak YT oluşumunun arttığı tespit edilmiştir (Şekil 8). Bu durumun artan talaş kesitine bağlı olarak takım-talaş ara yüzey alanının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [38-40]. Şekil 9’da sabit kesme şartları altında alaşımların işlenmesinde kesici uçta YT oluşumuna ait görüntüler verilmiştir. Bu görüntülerde en az YT oluşumunun *A* alaşımında (Şekil 9b) ve en fazla YT oluşumu ise *B* alaşımında gözlenmiştir (Şekil 9a). Bu durum, alaşımların süneklik özelliklerine veya kopma uzaması değerlerine dayandırılarak açıklanmaktadır (Şekil 5). Literatürdeki çalışmalarda, malzemelerin süneklik özelliğindeki artışın kesme esnasında kesici uçta oluşan kararsız yapıdaki YT eğilimini arttırdığı ve işlenmiş yüzey kalitesini azalttığı bilinmektedir [41, 43-47].



Şekil 8. Farklı kesme koşullarında *A* alaşımının işlenmesinde kesici uçta YT oluşumu, a) $V:200$ m/dak ve $f:0,05$ mm/dev, b) $V:400$ m/dak ve $f:0,05$ mm/dev, c) $V:200$ m/dak ve $f:0,15$ mm/dev ve d) $V:400$ m/dak ve $f:0,15$ mm/dev



Şekil 9. Sabit kesme koşullarında alaşımların işlenmesinde kesici uçta YT oluşumu ($V:300$ m/dak ve $f:0,1$ mm/dev), a) B alaşımı, b) A alaşımı ve c) C alaşımı

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Al-Si esaslı alaşımlar, otomotiv endüstrisinde motor bloğu, jant ve piston gibi bileşenlerde yaygınla kullanılmaktadır. Döküm yöntemi ile üretilen bu alaşımların mekanik sistemlerde nihai ürün olarak kullanılabilmesi için talaşlı imalat prosesleri uygulanmaktadır. Üretim verimliliği, ürün servis ömrü ve kalitesi bakımından bu alaşımların hassas bir şekilde işlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, A, B ve C alaşımlarının tormalanması esnasında farklı Sr ilaveleri ve kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- B alaşımının içyapısı alüminyumca zengin α , ötektik silisyum parçacıklarının ince küresel şekilli olduğu ötektik alüminyum-silisyum ve intermetalik Al-Fe-Si (δ) fazları ile primer silisyum parçacıklarından oluşmaktadır.
- A alaşımı, B alaşımında gözlenen fazlara ilave olarak Al-Sr-Si (Al_4Sr) fazını da içermektedir. C alaşımı da A alaşımı ile aynı fazlardan oluşmaktadır. Ancak, C alaşımının içyapısındaki Al-Sr-Si (Al_4Sr) faz parçacıkları, A alaşımındakilere göre daha kaba şekilli ve fazlıdır.
- A, B ve C alaşımları içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemeti A alaşımı, en yüksek kopma uzaması değerini ise B alaşımı sergilemektedir.
- Kesme hızının artmasına bağlı olarak kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. İlerlemenin artması sonucunda artmıştır.
- Sabit kesme şartları altında en düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri A alaşımının işlenmesinde ölçülürken, en yüksek değerler ise C alaşımında ölçülmüştür.
- Alaşımın işlenmesi esnasında kesici kenarda YT'nin oluştuğu, yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme kombinasyonu ile YT'nin azaldığı tespit edilmiştir.
- Kesme esnasında kesici uçta en az YT oluşumu A alaşımında gözlenirken, en fazla YT oluşumu ise B alaşımında gözlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FBA-2017-803 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dos Santos GR, Da Costa DD, Amorim FL, Torres RD. Characterization of DLC Thin Film and Evaluation of Machining Forces Using Coated Inserts in Turning of Al-Si Alloys. Surface and Coatings Technology, 202 (1029-1033), (2007).
- [2] Konca E, Cheng, YT, Weiner AM, Dasch JM, Alpas AT. Elevated Temperature Tribological Behavior of Non-Hydrogenated Diamond-Like Carbon Coatings Against 319 Aluminum Alloy. Surface and Coatings Technology, 200 (3996-4005), (2006).

- [3] Miller WS, Zhuang L, Bottema J, Wittebrood A, De Smet P, Haszler A, Vieregge AJMS. Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280 (37-49), (2000).
- [4] Bhowmick S, Banerji A, Alpas AT. Tribological Behavior of Al-6.5%, -12%, -18.5% Si Alloys During Machining Using CVD Diamond and DLC Coated Tools. *Surface and Coatings Technology*, 284 (353-364), (2015).
- [5] Kuczmaszewski J, Pieško P, Zawada-Michałowska M. Carbide Milling Cutter Blades Durability During Machining of Al-Si Casting Alloy. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 1(169-175), (2018).
- [6] Barooah RK, Arif AFM, Paiva JM, Oomen-Hurst S, Veldhuis SC. Wear of Form Taps in Threading of Al-Si Alloy Parts: Mechanisms And Measurements. *Wear*, 442 (203153), (2020).
- [7] Bayraktar Ş, Demir O. Processing of T6 Heat-treated Al-12Si-0.6 Mg Alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 35(354-362), (2020).
- [8] Bayraktar Ş, Afyon F. Machinability Properties of Al-7Si, Al-7Si-4Zn and Al-7Si-4Zn-3Cu Alloys. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(1-12), (2020).
- [9] Steininger A, Siller A, Bleicher F. Investigations Regarding Process Stability Aspects in Thread Tapping Al-Si Alloys. *Procedia Engineering*, 100 (1124-1132), (2015).
- [10] Wain N, Thomas NR, Hickman S, Wallbank J, Teer DG. Performance of Low-Friction Coatings in the Dry Drilling of Automotive Al-Si Alloys. *Surface and Coatings Technology*, 200(1885-1892), (2005).
- [11] Marani M, Zeinali M, Farahany S, Mechefske CK. Neuro-Fuzzy Based Predictive Model for Cutting Force in CNC Turning Process of Al-Si-Cu Cast Alloy Using Modifier Elements. *SN Applied Sciences*, 3(1-11), (2021).
- [12] Kumaran D, Paramasivam SSSS, Natarajan H. Optimization of High Speed Machining Cutting Parameters for End Milling of AlSi7Cu4 Using Taguchi Based Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution. *Materials Today: Proceedings*, 47 (6799-6804), (2021).
- [13] Hekimoğlu AP, Çalış M, Ayata G. Effect of Strontium and Magnesium Additions on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-12Si Alloys. *Metals and Materials International*, 25(1488-1499), 2019.
- [14] Hekimoğlu AP, Ayata G. Effect of Strontium and Strontium-Magnesium Additions on The Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic Al-17Si Alloy. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(49-55), (2019).
- [15] Hekimoğlu AP, Çalış M, Ayata G. Stronsiyum ve Stronsiyum Magnezyum Katkılarının Al-9Si Alaşımının Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. 1st International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Antalya, Türkiye, (pp.422-426), (11- 13 Nisan 2018).
- [16] Bayraktar Ş, Hekimoğlu AP, Çalış M. Al-12Si-0,1Sr Alaşımının Sermet Kesiciler ile Tornalanmasında Kesme Hızı ve İlerlemenin Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. 4nd International Conference on Material Science and Technology in Kızılcabamam (IMSTEC'19), Ankara, Türkiye, (pp.539-544), (18- 20 Ekim 2019).
- [17] Hekimoğlu AP, Bayraktar Ş. Effect of Strontium Additives on Cutting Force and Surface Roughness in Machining of Al-12Si Alloy Using CVD-TiCN+TiN Coated Insert. 9th International Advanced Technologies Symposium, Turkey, (27-28 October 2021).
- [18] Jiang W, Xu X, Zhao Y, Wang Z, Wu C, Pan D, Meng Z. Effect of the Addition of Sr Modifier in Different Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of T6 Treated Al-Mg₂Si in-Situ Composite. *Materials Science and Engineering: A*, 721(263-273), (2018).
- [19] Tahta M, Emamy M, Cao X, Campbell J. In *Materials Science Research Trends*. Nova Science Publishers Inc: New York, (251), (2008).
- [20] Srirangam P, Chattopadhyay S, Bhattacharya A, S Nag, Kaduk J, Shankar S, Banerjee R, Shibata T. Probing the Local Atomic Structure of Sr-modified Al-Si alloys. *Acta Materialia*, 65 (185-193), (2014).
- [21] Haro-Rodríguez S, Goytia-Reyes RE, Dwivedi DK, Baltazar-Hernández VH, Flores-Zúñiga H, Pérez-López MJ. On Influence of Ti and Sr on Microstructure, Mechanical Properties and Quality Index of Cast Eutectic Al-Si-Mg Alloy. *Materials & Design*, 32(1865-1871), (2011).

- [22] Liao H, Sun Y, Sun G. Correlation Between Mechanical Properties and Amount of Dendritic A-Al Phase in As-Cast Near-Eutectic Al-11.6% Si Alloys Modified with Strontium, *Materials Science and Engineering: A*, 335(62-66), (2002).
- [23] Alipour M, Azarbarmas M, Heydari F, Houghoughi M, Alidoost M, Emamy M. The Effect of Al-8B Grain Refiner and Heat Treatment Conditions on the Microstructure, Mechanical Properties and Dry Sliding Wear Behavior of An Al-12Zn-3Mg-2.5Cu Aluminum Alloy. *Materials & Design*, 38(64-73), (2012).
- [24] Savaşkan T, Hekimoğlu AP. Microstructure and Mechanical Properties of Zn-15Al-Based Ternary and Quaternary Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 603, (52-57), (2014).
- [25] Shabestari SG. The Effect of Iron and Manganese on the Formation of Intermetallic Compounds in Aluminum-Silicon Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 383(289-298), (2004).
- [26] Abuhasel KA, Ibrahim MF, Elgallad EM, Samuel FH. On the Impact Toughness of Al-Si Cast Alloys. *Materials & Design*, 91(388-397), (2016).
- [27] Korkut I, Boy M, Karacan I, Seker U. Investigation of Chip-Back Temperature During Machining Depending on Cutting Parameters. *Materials & Design*, 28 (2329-2335), (2007).
- [28] Sharma VS, Dhiman S, Sehgal R, Sharma SK. Estimation of Cutting Forces and Surface Roughness for Hard Turning Using Neural Networks. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19 (473-483), (2008).
- [29] Korkut I, Donertas MA. The Influence of Feed Rate and Cutting Speed on The Cutting Forces, Surface Roughness and Tool-Chip Contact Length During Face Milling. *Materials & Design*, 28 (308-312), (2007).
- [30] Ali MH, Khidhir BA, Ansari MNM, Mohamed B. FEM To Predict the Effect of Feed Rate on Surface Roughness with Cutting Force During Face Milling of Titanium Alloy. *HBRC Journal*, 9 (263-269), (2013).
- [31] Bayraktar Ş, Çamkerten Ç, Salihoğlu N. Bakır ve Silisyum İlavelerinin Al-25Zn Alaşımının CVD Al₂O₃ Kaplamalı Takımlarla Tornalanmasında İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8 (79-93), (2020).
- [32] Özel T, Karpat Y. Predictive Modeling of Surface Roughness and Tool Wear in Hard Turning Using Regression and Neural Networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (467-479), (2005).
- [33] Liao H, Sun Y, Sun G. Correlation Between Mechanical Properties and Amount of Dendritic A-Al Phase in As-Cast Near-Eutectic Al-11.6%Si Alloys Modified with Strontium. *Materials Science and Engineering: A*, 335 (62-66), (2002).
- [34] Sekmen M, Günay M, Şeker U. Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı Ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş Ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 18 (141-148), (2015).
- [35] Gökkaya H, Nalbant M. Kesme Hızının Yığıntı Katmanı ve Yığıntı Talaş Oluşumu Üzerindeki Etkilerinin SEM ile İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (481-488), (2007).
- [36] Ciftci I, Turker M, Seker U. Evaluation of Tool Wear When Machining Sicp-Reinforced Al-2014 Alloy Matrix Composites. *Materials & Design*, 25(251-255), (2004).
- [37] Barnes S, Pashby IR, Mok DK. The Effect of Workpiece Temperature on The Machinability of An Aluminum/SiC MMC., 118 (422-427), (1996).
- [38] Atlati S, Haddag B, Nouari M, Moufki A. Effect of The Local Friction and Contact Nature on The Built-Up Edge Formation Process in Machining Ductile Metals. *Tribology International*, 90 (217-227), (2015).
- [39] Haddag B, Atlati S, Nouari M, Moufki A. Dry Machining Aeronautical Aluminum Alloy AA2024-T351: Analysis of Cutting Forces, Chip Segmentation and Built-Up Edge Formation. *Metals*, 6 (197), (2016).
- [40] Acir A, Turgut Y, Übeyli M, Günay M, Şeker U. A Study on The Cutting Force in Milling of Boron Carbide Particle Reinforced Aluminium Composite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 16 (187-196), (2009).
- [41] Ezugwu EO, Lim SK. The Performance of Cermet Cutting Tools When Machining an Ni-Cr-Mo (En 24) Steel. *Lubrication Engineering*, 51(139-145), (1995).
- [42] Boothroyd G, Knight WA. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. CRC Press-Taylor and Francis, (2006).

- [43] Demir H, Gündüz S. The Effects of Aging on Machinability of 6061 Aluminium Alloy. *Materials & Design*, 30 (1480-1483), (2009).
- [44] Yücel A, Yıldırım ÇV, Sarıkaya M, Şirin Ş, Kıvak T, Gupta MK, Tomaz ÍV. Influence of MoS₂ Based Nanofluid-MQL on Tribological and Machining Characteristics in Turning of AA 2024 T3 Aluminum Alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 15 (1688-1704), (2021).
- [45] Yıldırım ÇV, Sarıkaya M, Kıvak T, Şirin Ş. The Effect of Addition of hBN Nanoparticles to Nanofluid-MQL on Tool Wear Patterns, Tool Life, Roughness and Temperature in Turning of Ni-Based Inconel 625. *Tribology International*, 134 (443-456), (2019).
- [46] Ekici E, Motorcu AR, Uzun G. An Investigation of the Effects of Cutting Parameters and Graphite Reinforcement on Quality Characteristics During the Drilling of Al/10B4C Composites. *Measurement*, 95 (395-404), (2017).
- [47] Okay F, Islak S, Turgut Y. Investigation of Machinability Properties of Aluminium Matrix Hybrid Composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 68 (85-94), (2021).

Experimental and Numerical Investigation of Innovative Air Duct Seat Design in Automobiles

Halil BAYRAM^{1,*}  Gökhan SEVİLGİN²  Ahmet İBİŞ³ 

¹Amasya University, Faculty of Engineering Architecture, Department of Mechanical Engineering, 05100, AMASYA

²Bursa Uludağ University, Faculty of Engineering, Department of Automotive Engineering, 16059, Nilüfer/BURSA

³Martur Fompak International, BURSA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 8.11.2021

Revision: 10.01.2022

Accepted: 18.01.2022

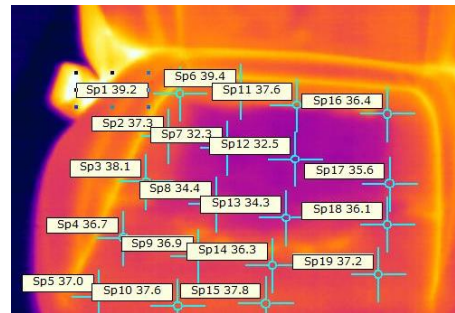
Highlights

- Seat cooling.
- Automobile seat.
- Ansys-Fluent.
- CFD.

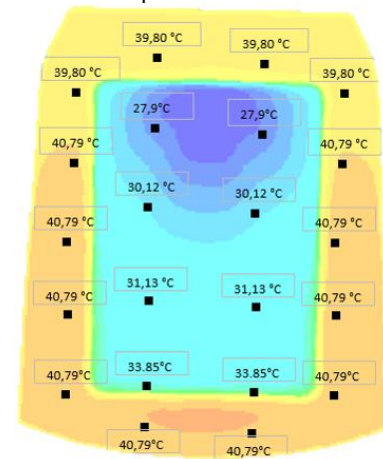
Keywords

Seat heating
Seat cooling
Thermal comfort
CFD

In this study, a new active cooling system was designed and prototyped for automobiles. In order to examine the results obtained from the experimental and numerical studies in more detail, points were defined in the seating area and the temperature values at these points were examined.



(a)



(b)

Figure A. The temperature values of the points defined in the seating area in the 180th second of the (a) experimental (b) numerical study

Purpose: The main purpose of this study is to provide the desired thermal comfort conditions at the hot seating area, especially in summer conditions by using the designed and prototyped active cooling system.

Theory and Methods: The study consists of two main parts, experimental and numerical. In the experimental study, after the seat was heated up to 60°C in a climatic cabin, temperature measurements were made from the defined points on the seat with the help of a thermal camera when the seat cooling system was active. In the numerical study, only the sitting area of the seat was modeled, and CFD analyzes were performed under similar conditions of the experimental study when the seat cooling system was both active and passive.

Results: When the temperature distribution of the seat removed from the cabin is examined, it can be seen that almost all surfaces are at a temperature of 56.5°C. In the process of time, it was observed that the surface temperature value approached the ambient temperature value. However, there were faster decreases in the blowing areas due to the air blown to the surface by the fan. The porous structure of the seat surface decreased to 25°C in the 60th second and the other surfaces were around 50°C. Although there were areas on the seat that did not cool down until the 180th second, after this time the almost entire seat surface was nearly 25°C. In the CFD analysis, the air flow provided by the fan entered the seat model with a velocity of about 2 m/s and increased up to 4.5 m/s in the porous region.

Conclusion: In this study, a new active cooling system for automobiles was designed and prototyped to quickly cool the overheated seat surfaces in hot summer conditions. This system uses the indoor air conditioned by the vehicle air conditioning (AC) system and can provide more effective cooling with an additional cooling unit if desired. In the numerical study, the porous structure area added to the seat surface to obtain a homogeneous air distribution. When the results of the analysis, in which the fan effect is disabled and only natural convection cooling is realized, are compared with the results of the systems with fans, it is seen that at 60th seconds, the average seat surface temperature decreased to 49°C with only natural convection. On the other hand, this value is approximately 43 and 42°C for the experimental and numerical study, respectively, when the fan is activated. At the end of the experiment, these values are approximately 39°C for the natural convection model, while they are approximately 34°C for the fanned models. In addition, the experimental and numerical study results are in good agreement.

GU J Sci, Part C, 9(2): 171-181 (2021)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>



Experimental and Numerical Investigation of Innovative Air Duct Seat Design in Automobiles

Halil BAYRAM^{1,*} Gökhan SEVİLGİN² Ahmet İBİŞ³

¹Amasya University, Faculty of Engineering Architecture, Department of Mechanical Engineering, 05100, AMASYA, 0000-0002-4664-3883

²Bursa Uludağ University, Faculty of Engineering, Department of Automotive Engineering, 16059, Nilüfer/BURSA, 0000-0002-7746-2014

³Martur Fompak International, BURSA, 0000-0002-6607-4614

Abstract

Increasing technology in the automotive sector offers users more advanced comfort conditions. While the desired levels of thermal comfort in automobile seats are provided by seat heating systems in winter conditions, it is achieved by cooling the hot seat surfaces by using seat cooling systems in summer conditions. In this study, a new active cooling system was designed and prototyped for automobiles. This system uses the indoor air conditioned by the vehicle air conditioning (AC) system and can provide more effective cooling with an additional cooling unit if desired. The seating area of this developed seat design is modelled for three-dimensional (3D) Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. Experimental and numerical studies were carried out with the seats produced and modelled under conditions that would comply with both the automotive manufacturer's standards and the studies in the literature. The porous structure area added to the seat surface for a homogeneous air distribution decreased to 25°C in the 60th second and the other surfaces were around 50°C. In the CFD analysis, the air flow provided by the fan entered the seat model with a velocity of about 2 m/s and increased up to 4.5 m/s in the porous region. The experimental and numerical study results are in good agreement. When the results of the analysis, in which the fan effect is disabled and only natural convection cooling is realized, are compared with the results of the systems with fans, it is seen that lower values of up to 8°C are obtained on the seat surface with the active seat cooling system. It is thought that this developed system will contribute to the provision of thermal comfort conditions, especially in hot summer conditions.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 8.11.2021
Düzeltilme: 10.01.2022
Kabul: 18.01.2022

Keywords

Seat heating
Seat cooling
Thermal comfort
CFD

Anahtar Kelimeler

Koltuk ısıtma
Koltuk soğutma
Isıl konfor
HAD

Otomobillerde Yenilikçi Hava Kanallı Koltuk Tasarımının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi

Öz

Otomotiv sektöründe artan teknoloji kullanıcılara daha gelişmiş konfor koşulları sunmaktadır. Otomobil koltuklarında ısı konfor açısından arzu edilen seviyeler kış koşullarında koltuk ısıtma sistemleriyle sağlanırken yaz koşullarında koltuk soğutma sistemleri kullanılarak sıcak koltuk

yüzeylerinin soğutulmasıyla sağlanır. Bu çalışmada otomobiller için yeni bir koltuk soğutma sistemi tasarımı yapılmış ve prototipi üretilmiştir. Geliştirilen bu aktif havalandırılmalı koltuk sistemi taşıt iklimlendirme sistemi tarafından şartlandırılan iç ortam havasını kullanıyor olup istenildiğinde ilave bir soğutucu ünite ile daha etkin bir soğutma da sağlayabilir. Ayrıca geliştirilen bu koltuk tasarımının oturma bölgesi üç-boyutlu 3D Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri yapılmak üzere modellenmiştir. Üretilen ve modellenen koltuklarla hem otomotiv üretici standartlarına hem de literatürde yer alan çalışmalara uygun olacak koşullar altında deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Koltuk yüzeyine homojen bir hava dağılımı için eklenen gözenekli yapı bölgesinin sıcaklığı 60. saniyede 25°C'ye düştüğü ve diğer yüzeylerin 50°C civarında olduğu görülmüştür. HAD analiz sonuçları incelendiğinde ise fan vasıtasıyla sağlanan hava akımı yaklaşık 2 m/s hızla koltuk modeline girmiş ve gözenekli bölgede 4.5 m/s'ye kadar yükselmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Fan etkisinin devre dışı bırakıldığı ve sadece doğal taşınım ile soğumanın gerçekleştiği analiz sonuçları fanlı sistemlerin sonuçları ile karşılaştırıldığında ise aktif koltuk soğutma sistemiyle koltuk yüzeyinde yaklaşık 8°C'ye kadar daha düşük değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Geliştirilen bu sisteminin özellikle sıcak yaz koşullarında ısı konfor şartlarının sağlanmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günlük hayatımızda yaygın bir şekilde kullandığımız taşıtların performanslarıyla birlikte konfor koşulları da artmaktadır. Otomobillerde bulunan özelliklerin kullanıcı tarafından arzu edilen seviyelere getirilebilmesi konforun en önemli faktörlerindedir. Taşıt konfor parametrelerinin başında gelen ısı konfor temel olarak ortamdan duyulan ısı memnuniyeti olarak tanımlanabilir [1]. Isı konfor kişinin metabolik aktivite düzeyi ve giyinmeden oluşan kişisel faktörler ve ortam sıcaklığı, ortam hava hızı ve ortalama ışınım sıcaklığından oluşan çevresel faktörler olmak üzere iki temel faktörden oluşmaktadır [2-5]. Otomobillerin diğer taşıtlara göre daha sınırlı bir hacme sahip olmasından dolayı içerisindeki hava hızı ve sıcaklık dağılımları değişkenlik göstermekte ve dolayısıyla taşıt içerisinde bulunanların ısı konforu etkilenmektedir. Diğer yandan ısı konfor özellikle uzun mesafeli yolculuklarda güvenli bir sürüş içinde önemli faktörlerdendir [6].

Taşıt iklimlendirme sistemleriyle taşıt içerisinde havanın sıcaklık, nem ve hızı kontrol altında tutularak ısı konfor şartları elde edilebilmektedir. Ancak soğuk kış aylarında ya da sıcak yaz aylarında taşıt içerisinde yer alan oturma alanlarının sıcaklıkları da ısı konforu etkileyen parametrelerdendir. Rusya, Danimarka gibi soğuk iklim ülkelerinde standart haline gelmiş olan koltuk ısıtma sistemleri ülkemiz gibi daha ılıman iklime sahip ülkelerde ise kullanıcı tercihine bırakılmıştır [6]. Koltuk ısıtma işlemi ise genel olarak taşıt Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) sisteminden faydalanılarak ya da termoelektrikli cihazlar (TED) yardımıyla gerçekleştirilmekte olup ikinci seçeneğin hem taşıt ısıtma sisteminin kararlı hale gelmesinin süre alması hem daha basit uygulanabilirliğe sahip olması hem de mali açıdan daha uygun olması daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır [7]. Termoelektrikli sistem alternatif sistemine göre daha hafif olmasından dolayı taşıt emisyonuna da katkıda bulunmaktadır [6]. Koltuk soğutma işlemi incelendiğindeyse yine ısıtma sistemlerinde olduğu gibi taşıt iklimlendirme sistemine bağlı bir şekilde çalışabilen sistemler ve TED koltuk havalandırma sistemleri mevcuttur. İkinci sistemde koltuğa yerleştirilen fanın çıkan havanın koltuk ön yüzeyinde belirlenen noktalardan çıkmasıyla koltuk soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu sistem hem daha hafif yapısı hem de daha az maliyetli olması dolayısıyla daha çok tercih edilmektedir [7]. Karimi ve ark. ise TED koltuk soğutma sisteminin insanlar üstündeki konfor parametrelerine etkilerini incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada farklı boy, kilo ve yaş grubuna ait 26 kişi (13 erkek ve 13 kadın) yer almış olup her bir kişinin vücudunda gerçekleşen sıcaklık değişimleri vücudun farklı noktalarındaki 10 adet ısı çifti ile gözlenmiştir [8]. Su ve ark. ise taşıt HVAC sistemiyle entegre çalışan koltuk soğutma sisteminin taşıt performansına ve yakıt tüketimine olan etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir [9]. Lee ve Lee bu her iki sistemi de kullanarak deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 50°C'ye kadar ısıtılan koltuğun üzerinde belirlenen 6 noktada gerçekleşen sıcaklık değişimlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak ise her iki sistemin de benzer soğutma performansları gösterdiğini ancak taşıt HVAC sistemiyle entegre çalışan koltuk soğutma sisteminin taşıt sürüş performansını da etkilediğini gözlemlemişlerdir. Taşıt sürüş performansında görülen bu değişimden dolayı TED koltuk soğutma sisteminin kullanımını önermişlerdir [7].

Bu çalışmada ise yukarıda bahsedilen koltuk soğutma sistemlerinden farklı olarak fan ve gözenekli yapının giriş kesitinde taşıt iklimlendirme sistemi tarafından şartlandırılan iç ortam havasının kullanıldığı dolayısıyla ilave bir soğutma sisteminden faydalanılmadığı ancak arzu edildiğinde ilave bir soğutucu ünite ile daha etkin bir soğutmanın sağlanabileceği aktif havalandırılmalı koltuk sistemi tasarlanmış, prototip imalatı gerçekleştirilmiş ve hem otomotiv üretici standartlarına hem de literatürde yer alan çalışmalara uygun olacak koşullar altında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üretilen koltuğun sayısal olarak da incelenebilmesi için 3D modellenerek deneylerle benzer koşullar altında analizleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan koltuk soğutma metotlarından farklı olarak direk taşıt iç ortam havasından faydalanılarak daha düşük maliyetli bir sistem tasarımı önerilmiş olup yaz aylarında özellikle güneş ışınlarına doğrudan maruz kalmış koltuk yüzeylerinde sürücü ve yolcular için daha iyi ısıl konfor şartlarının sağlanabilmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler yaz koşullarında güneş altında kalmış bir taşıt koltuğu için benzer ortam şartları elde edilerek gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda taşıt koltuğu Şekil 1'de görülen iklimatik kabin içerisine yerleştirilmiş olup bu kabinin iç ortam sıcaklığı 60°C'ye kadar yükseltilmiştir. Bu kabinin teknik özellikleri Tablo 1'de sunulmuş olup kabin iç yüzeyleri yalıtımlıdır. Kabin iç ortam başlangıç sıcaklığının 60°C olarak belirlenmesinde otomotiv üretici standartları göz önünde bulundurulmuştur. Bu kapsamda başlangıç anında 60°C olan koltuk yüzey sıcaklığının 5 dakika sonrasında 40°C sıcaklık değerinin altına düşmesi beklenmektedir [6]. Ayrıca literatürde yer alan güneş ışınımıyla ilgili çalışmalar incelendiğinde güneş ışınları altında kalmış olan taşıt koltuk oturma yüzey sıcaklık değerlerinin 60-70°C mertebelerine kadar yükseldiği, taşıt kabin iç ortam sıcaklığının 30-35°C değerlerinde olduğu gözlenmiş ve çalışmada belirlenen sınır şartlarının literatürle de uyumlu olduğu görülmüştür [10]. Koltuk, kabin içerisinde 10 dk bekletilip üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde edildikten sonra ortam sıcaklığına çıkartılmış, oturma ve sırt kısımlarına yerleştirilmiş olan küçük salyangoz fanlar çalıştırılarak sünger içerisine konulan difüzör yardımıyla koltuk soğutma işlemine başlanmıştır. Bu esnada koltuk üzerinde gerçekleşen sıcaklık değişimleri ise 640*480 çözünürlüğe sahip -20 ile 600 °C arasında 0.02°C hassasiyetle sıcaklık ölçebilen Flir marka termal kamera ile gözlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1. Deneylerde kullanılan (a) iklimatik kabin ve (b) kontrol paneli

Tablo 1. Klimatik kabin teknik özellikleri

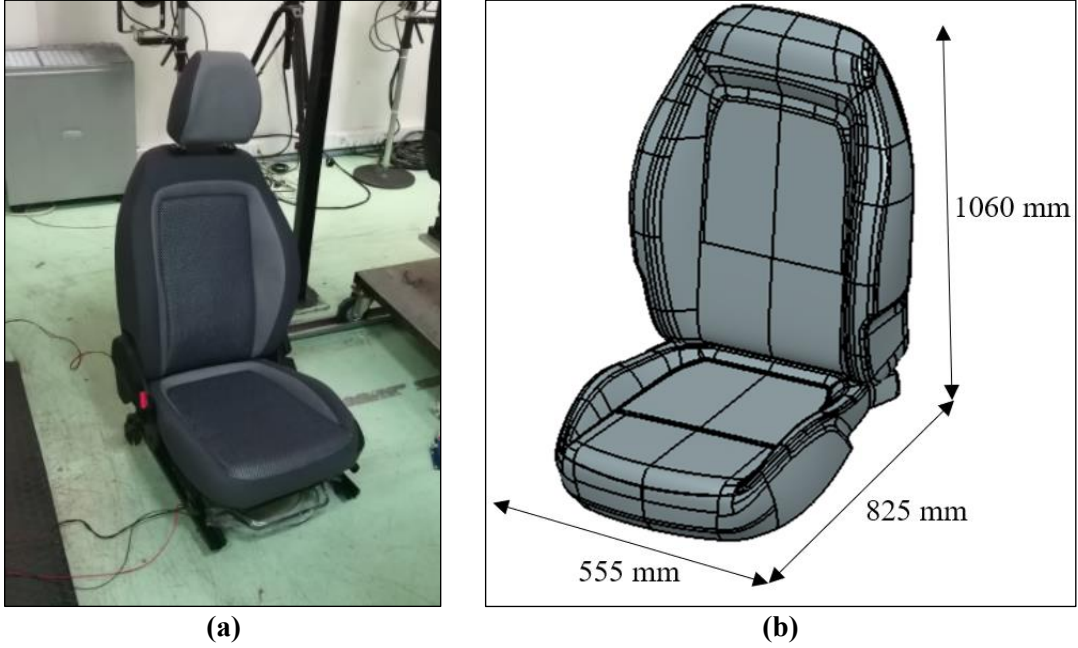
| | |
|------------------------|--|
| Sıcaklık ölçüm aralığı | -40°C...+120°C ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) |
| Genişlik | 2.6 m |
| Derinlik | 2 m |
| Yükseklik | 2 m |
| Hacim | 10.4 m ³ |

Deneylerde kullanılan koltuk üzerine kanal açılarak yerleştirilen salyangoz fan Şekil 2’de görülmektedir. Kullanılan fan 8.6 gr ağırlığında olup 12V ile çalıştırılmaktadır ve teknik özellikleri Tablo 2’ de sunulmuştur.

**Şekil 2.** Deneysel çalışmada koltuğa yerleştirilen salyangoz fan**Tablo 2.** Salyangoz fan teknik özellikleri

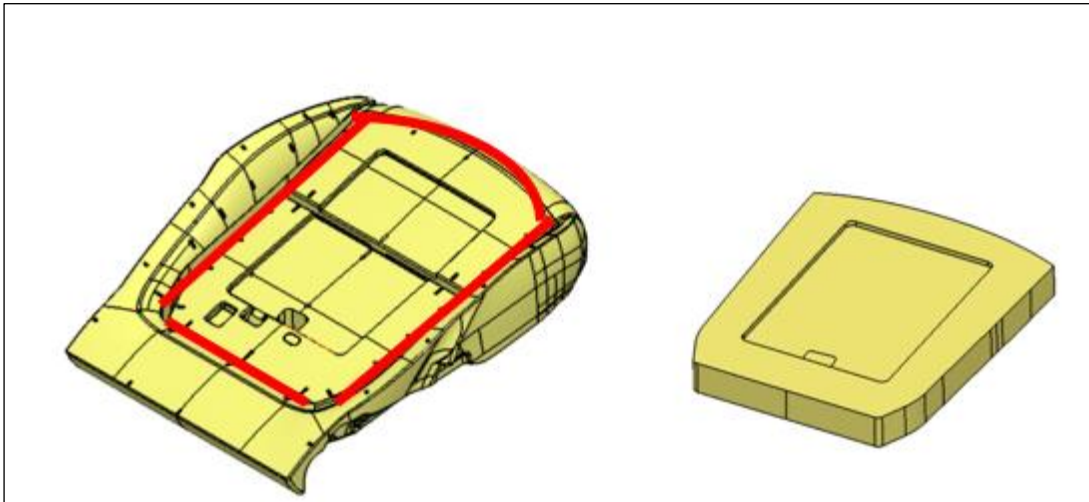
| | |
|--------------------------|--------------|
| Boyut | 30x30x10 mm |
| Hava akış hızı | 5.5 CFM |
| Ağırlık | 8.6 g |
| Devir | 9500 rpm |
| Çalışma sıcaklık aralığı | -10 - +70 °C |
| Ses seviyesi | 23 dB |

Deneysel çalışmada kullanılan koltuk Şekil 3 (a)’da görülebilmektedir. Bu koltuğun sayısal çalışmada kullanılabilmesi için modellenmiş hali ise Şekil 3 (b)’de görülebilmektedir.



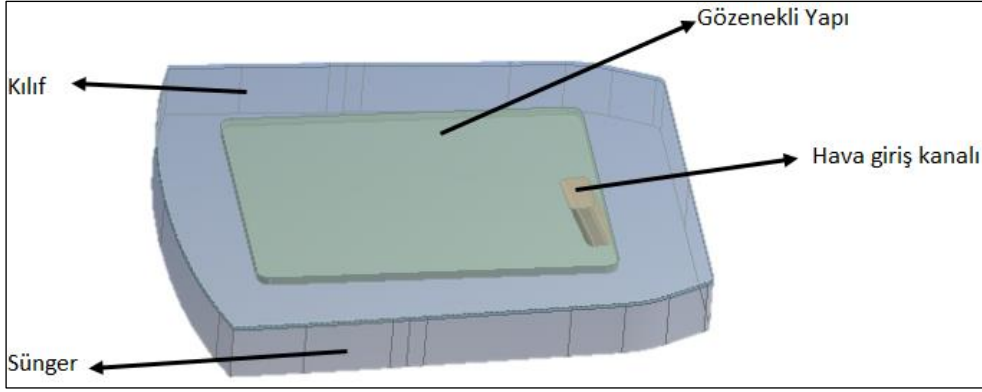
Şekil 3. (a) Deneysel çalışmada kullanılan koltuk (b) havalandırma sistemi eklenmemiş koltuk CAD modeli

Koltuğun oturma kısmında havanın daha efektif bir şekilde yayılabilmesi için oturma bölgesinde ağırlığın geldiği alan seçilerek koltuk süngeri tasarımı yapılmıştır. Dikkat edilmesi gereken noktalardan birisi de koltuk süngeri üzerinde yapılacak olan işlemlerden sonra koltuğun konfor noktası olarak bilinen koltuk ve araç tasarımında özellikle dikkat edilen H noktasının değişmemesidir. H noktası koltuk üzerine oturan yolcu ya da sürücünün kalça, üst bacak ve gövdenin birleştiği yer olarak tanımlanmaktadır [6]. Koltukta bu konum sabit tutularak üzerinde gerekli tasarım çalışmaları yapılmaktadır. Bu noktanın ölçümü, yapılan insan modeli tasarımları ile ölçülmektedir. Oturma süngeri 60 [gr/dm³] yoğunluktadır. Ayrıca oturma ve sırt süngerlerine delik açıldıktan sonra fan çalıştırıldığında homojen bir şekilde dağılım sağlanması için ön yüzeylere difüzör eklenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan koltuk geometrisinde bazı sadeleştirmelere gidilerek sayısal çalışmada kullanılacak olan koltuk modeli oluşturulmuştur (Şekil 4).



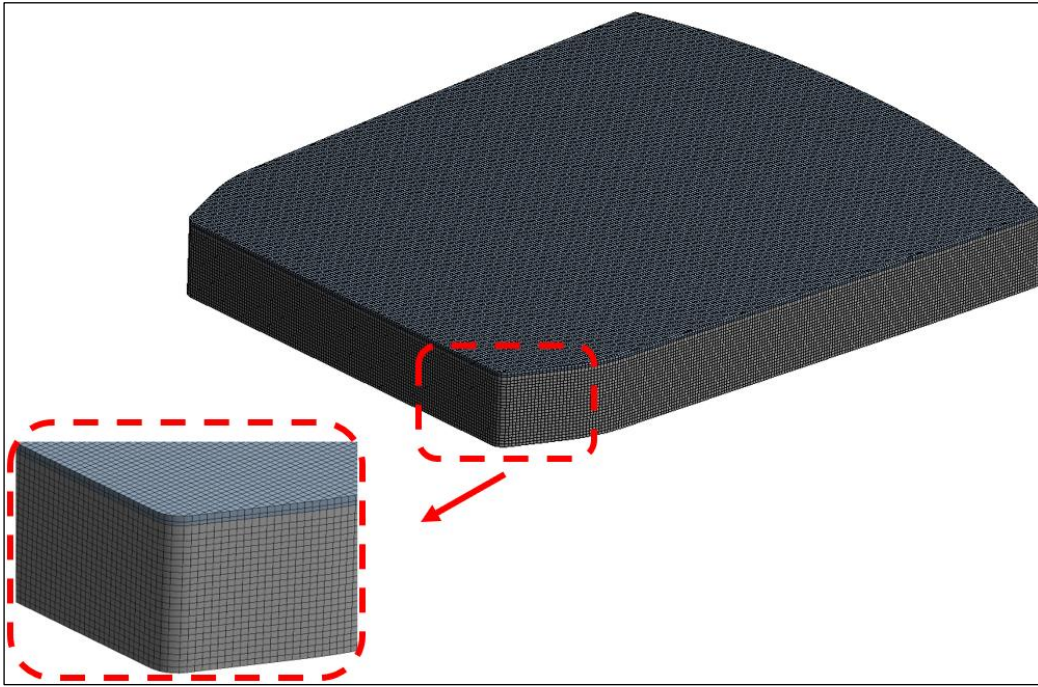
Şekil 4. Sayısal çalışma için koltuk modelinin sadeleştirilmesi

Şekil 4’te sadece koltuk sünger yapısı yer almaktadır. Şekil 5’te ise bu koltuk tasarıma ilave olarak oturma yüzeyinde boşluk görünen yapıya gözenekli bir yapı eklenmiş hali de görülebilmektedir. Bu eklentinin amacı ise hem koltuk stil yüzeyinin bozulmaması hem de sürücü veya yolcu oturduğunda mevcut boşluğu hissetmemesi amaçlanmıştır. Ayrıca en dış yüzeye ise 3 mm kalınlığında bir kumaş eklenerek gerçek koltuk yüzeyi modellenmeye çalışılmıştır.



Şekil 5. Sadeleştirilmiş koltuk modelinde oturma yüzeyi ürün ağacı

Sayısal çalışmada kullanılacak koltuk süngeri, koltuk kılıfı, gözenekli yapı ve havanın gireceği hava kanalından oluşan koltuk oturma modelinin CutCell kullanılarak oluşturulmuş 950000 elemandan oluşan ağ yapısı Şekil 6’da görülebilmektedir. Sayısal çalışmada kullanılan diğer sınır şartları ise Tablo 3’te sunulmuştur.



Şekil 6. Oturma yüzeyi ağ yapısı tasarımı

Tablo 3. Sayısal çalışmada kullanılan sınır şartları

| | |
|---|---|
| Oturma bölgesi yüzey sıcaklığı | 60 °C |
| Dış ortam sıcaklığı | 25 °C |
| Giriş menfez sıcaklığı | 25 °C |
| Giriş menfez hızı | 2.88 m/s |
| Oturma bölgesi dış yüzeyler | Oda sıcaklığına bağlı taşınım sınır şartı |
| Yakınsama kriteri | 10 ⁻⁶ |
| Basınç-Hız ilişkilendirilmesi | SIMPLE |
| Ayrıklaştırma metodu (Basınç) | Standart |
| Ayrıklaştırma metodu (Akış, enerji ve diğ.) | 2.dereceden Upwind yöntemi |

Gözenekli yüzey olarak modellenen kılıfın akış yönleri, direnç katsayıları ve geçirgenlik katsayısı tanımlanmıştır. Daha sonra ise içerisinde bulunan direnç katsayıları ise aşağıdaki formüller yardımıyla bulunmuştur [11]. Burada yer alan gözenekli yüzey hava geçirgenlik katsayı (ϵ) ve gözenekli yapı ölçü (D_p) değerleri sırasıyla 0.95 ve 0.001 m alınmıştır. Bu değerlerin belirlenmesinde ise deneysel çalışmada kullanılan koltuk malzemesinin özellikleri göz önünde bulundurulmuştur.

Viskoz direnci;

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} \quad 1$$

Atalet direnci;

$$c_2 = \frac{3,5 (1 - \epsilon)}{D_p \epsilon^3} \quad 2$$

Sayısal çalışmalarda kullanılan korunum denklemleri ise aşağıda verilmiştir [12].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = S_m \quad 3$$

Bu denklemde yer alan S_m kaynak terim şeklinde ifade edilir. Sisteme eklenen kütleyle ifade eder. Örneğin faz değişimi sırasında buharlaşma sonucunda eklenen kütle miktarını gösterir. Momentum ve enerji denklemleri ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \nabla(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \nabla(\mu \nabla v) + S_{M_x} \quad 4$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} = \nabla(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \nabla(\mu \nabla v) + S_{M_y} \quad 5$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = \nabla(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \nabla(\mu \nabla w) + S_{M_z} \quad 6$$

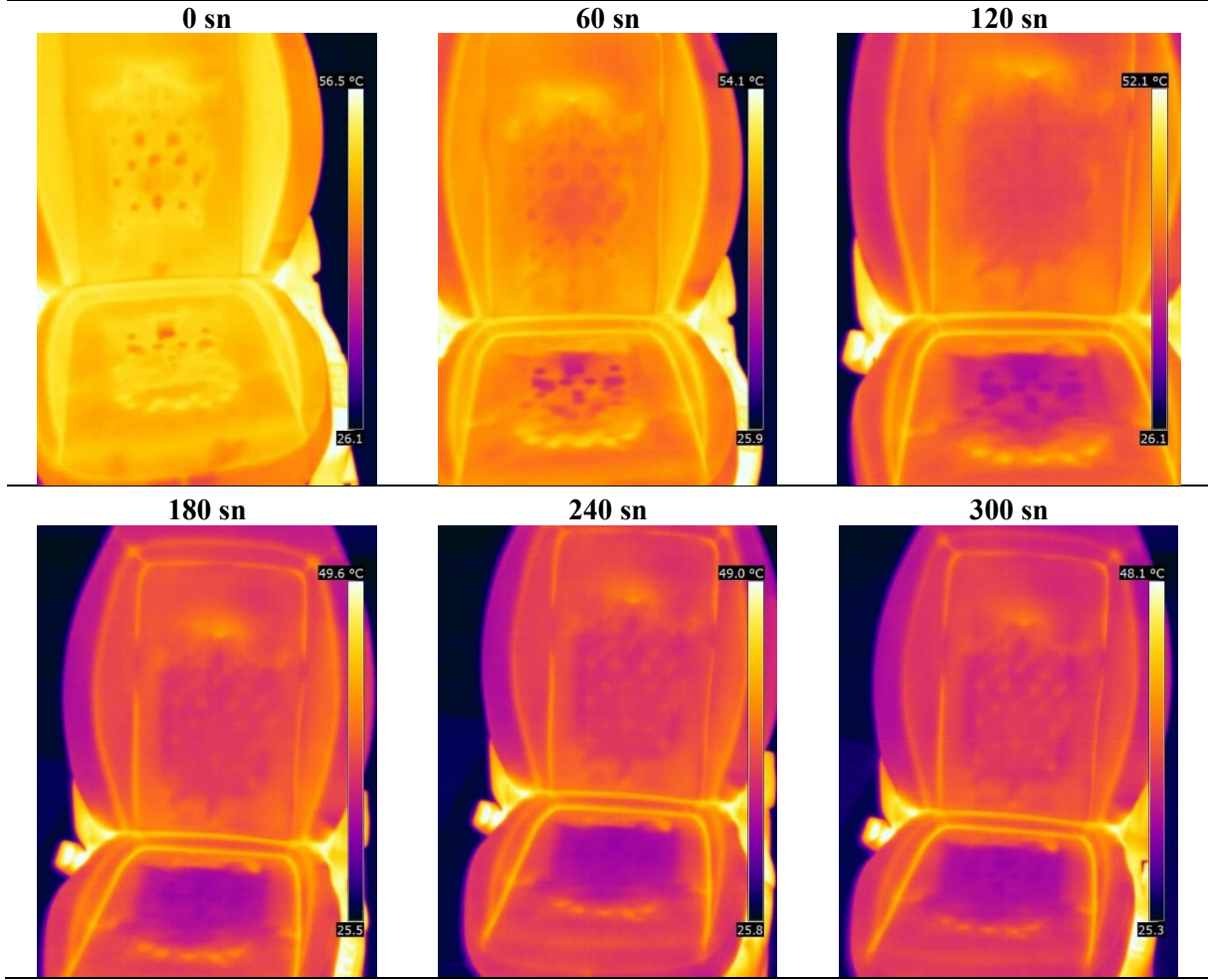
$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = \nabla(\rho e \vec{V}) = -p \nabla \vec{V} + \nabla(k \nabla T) + \Phi + S_e \quad 7$$

Kartezyen koordinat sisteminde ifade edilen denklemlerde; ρ yoğunluğu, \vec{V} hız vektörünü, u , v ve w hız vektörlerinin sırasıyla x , y ve z bileşenlerini, S_m kütle kaynak terimini, S_M momentum kaynak terimini, p basıncı, S_e enerji kaynak terimini, Φ ise disipasyon (yayınım) terimini temsil etmektedir. Buradaki disipasyon terimi enerji kaybını ifade etmektedir. Ayrıca sayısal hesaplamalarda literatürde yer alan benzer sayısal çalışma sonuçlarının kararlılığı göz önünde bulundurularak standart $k-\epsilon$ türbülans modeli tercih edilmiştir [12].

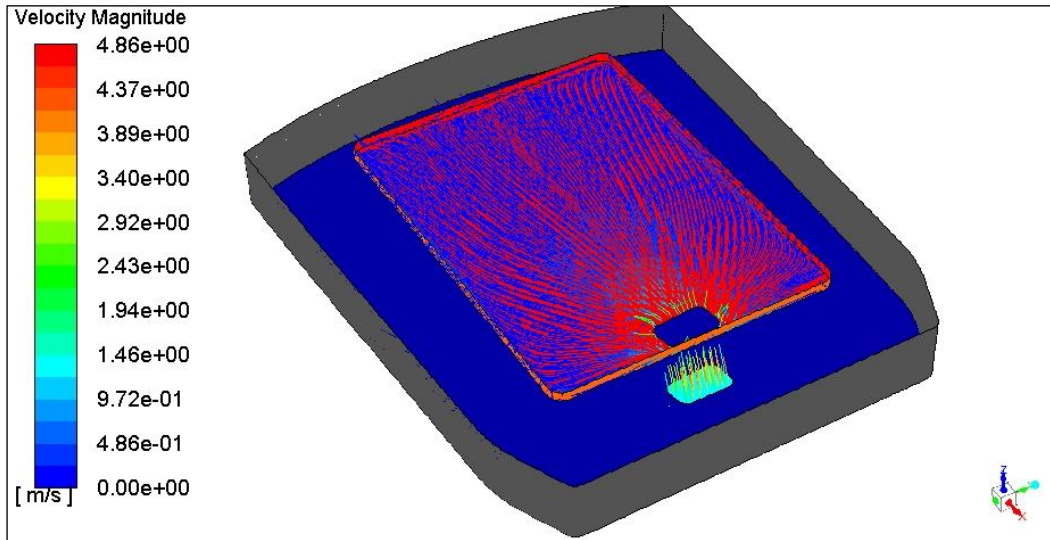
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Klimatik kabin içerisine konumlandırılan koltuk, kabin içerisinde 10 dk bekletildikten sonra dış ortama alınmış ve termal kamerayla koltuğun soğuma işlemi incelenmiştir. Koltuk yüzey sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 7'de sunulmuştur. Kabin içerisinden çıkarılan koltuğun ilk andaki sıcaklık dağılımına bakıldığında neredeyse tüm yüzeylerin 56.5°C sıcaklık değerinde olduğu görülebilmektedir. Bu esnada sadece koltuğun sırt ve oturma bölgelerine yerleştirilen ve içerisinde hava bulunan gözenekli yapının bulunduğu alanlarda küçük lokal bölgelerin sıcaklığının bir miktar düşük olduğu gözlenmiştir. Geçen zamanla birlikte koltuk yüzey sıcaklık değerinin ortam sıcaklık değerine doğru yaklaştığı ancak fan vasıtasıyla yüzeye üflenen hava sayesinde üfleme alanlarında daha hızlı düşüşler olduğu da rahatlıkla görülebilmektedir. Özellikle 60 saniye geçtiği halde koltuk yüzeyinin büyük bir çoğunluğunun 50°C 'nin üzerinde olmasına rağmen ortam havasının üflendiği gözenekli bölge sıcaklığının yaklaşık 25°C 'ye kadar düştüğü gözlenmiştir. Bunun dışında 120. saniyede ise koltuk yüzey sıcaklığında düşüşler gözlenmesine rağmen 50°C mertebesinde alanların olduğu, hava üflenen bölgedeki düşük sıcaklıklı alanda hissedilir artış olduğu görülebilmektedir. 180. ve 300. saniyeler arasında ise koltuk yüzey sıcaklık mertebeleri neredeyse eşit olmakla beraber gözenekli yapının bulunduğu alanın yaklaşık tamamı 25°C sıcaklık mertebesine erişmiştir.

Sayısal çalışmalardan elde edilen hız dağılım sonuçları incelendiğinde gözenekli yapı bölgesinde fanın yaklaşık 2 m/s hızla çıkan hava gözenekli yapı bölgesinde yaklaşık 4.5 m/s hız mertebelerine kadar yükselmiştir. Fan üfleme alanında en yüksek hız değerinde olup bu bölgeden uzaklaştıkça yüksek hızlı alanın azaldığı görülebilmektedir (Şekil 8).



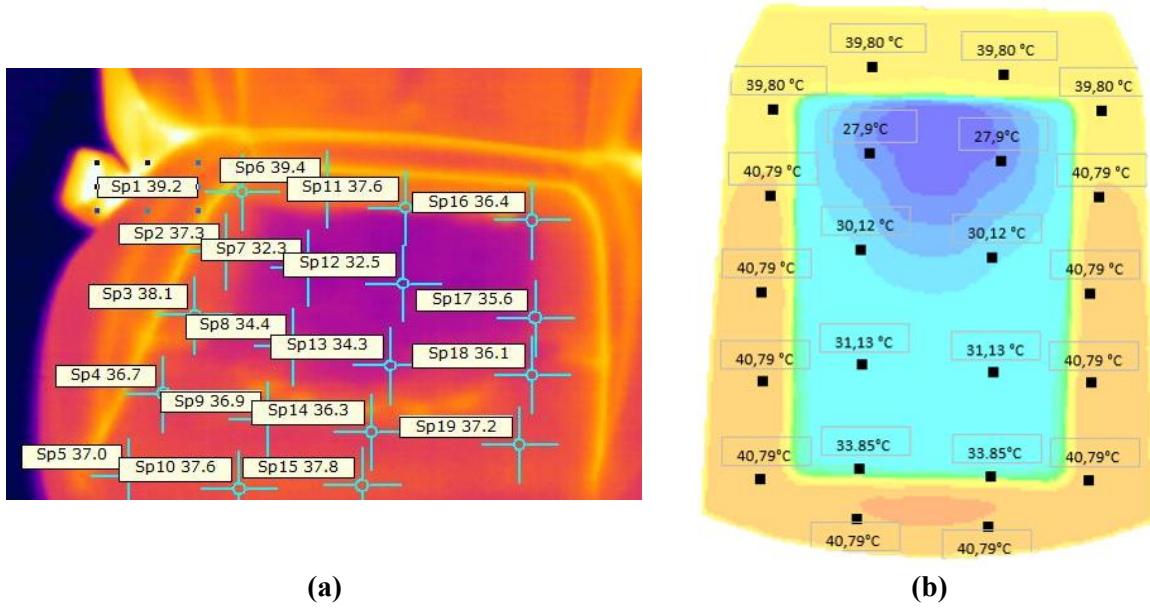
Şekil 7. Termal kamera ile ölçülmüş koltuk yüzey sıcaklık dağılımları



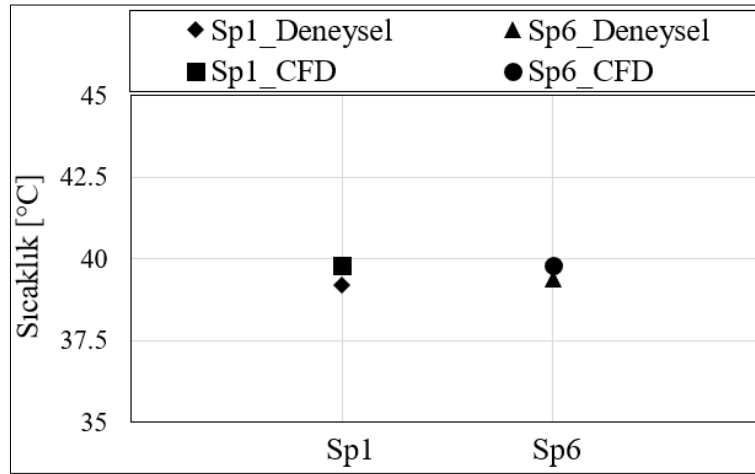
Şekil 8. Koltuk oturma bölgesinde gözenekli yapı içinde havanın hız (m/s) dağılımı

DeneySEL ve sayısal çalışmadan elde edilen sonuçları daha detaylı bir şekilde inceleyebilmek adına koltuk oturma bölgesine noktalar tanımlanmış ve bu noktalardaki sıcaklık değerleri incelenmiştir (Şekil 9). Bu

noktalardan Sp1 ve Sp6'nın 180. saniye için karşılaştırılması ise Şekil 10'da verilmiş olup bu noktalardaki sıcaklık değerlerinin oldukça uyumlu çıktığı görülmüştür.

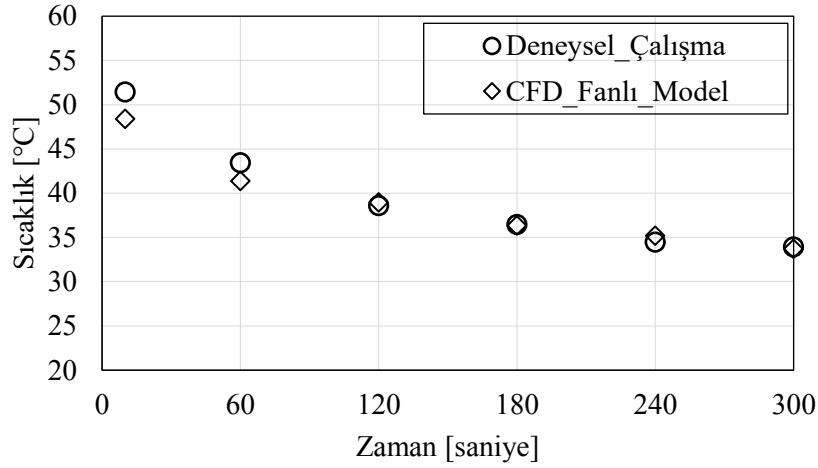


Şekil 9. 180. saniyede (a) deneysel (b) sayısal çalışmada yer alan koltuk oturma bölgesine tanımlanmış noktaların sıcaklık değerleri



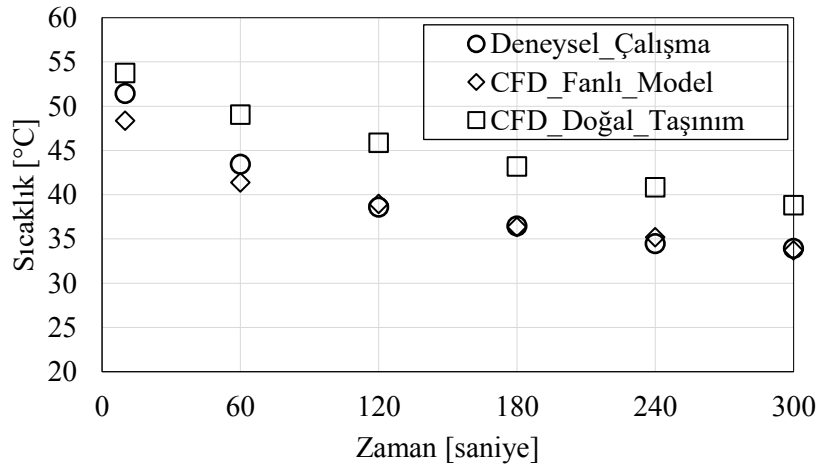
Şekil 10. 180. saniyede Sp1 ve Sp6 noktaları sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Tanımlanan bu noktalardaki sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak farklı zaman adımlarında deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 11). İlk 60 saniye deneysel çalışmadan elde edilen ortalama sıcaklık değerleri daha yüksek gelmiştir. Geçen zamanla birlikte aradaki farkın azaldığı ve 120. saniyeden sonra neredeyse eşit değerler aldığı görülmektedir. Genel olarak grafikte yer alan sonuçlar incelendiğinde ise deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçlarının uyum içerisinde olduğu rahatlıkla söylenebilir.



Şekil 11. Koltuk oturma bölgesinde zorlanmış taşınım etkisinde olan noktalarda sayısal ve deneysel elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Koltuk yapısına eklenen salyangoz fanın soğutma işlemine etkisini gözlemleyebilmek için oluşturulan koltuk modeli fan üflemesinin aktif olmadığı durumda sadece doğal taşınım ile soğutulmaya bırakılmıştır. Bu sayısal çalışma esnasında diğer tüm sınır şartları fanlı model ile aynı olacak şekilde seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise 60 saniye geçtiğinde sadece doğal taşınım ile ortalama koltuk yüzey sıcaklığının ancak 49°C'ye kadar düştüğü, fanlı modellerde ise deneysel ve sayısal çalışmalarda sırasıyla yaklaşık 43 ve 42°C'ye kadar düştüğü gözlenmiştir (Şekil 12). Bu değerler çalışmanın sonunda ise sadece doğal taşınımlı model için yaklaşık 39°C iken fanlı modeller için yaklaşık 34°C'dir. Koltukta yer alan salyangoz fan ile gerçekleştirilen soğutma işlemi sayesinde koltuk yüzeyi ortalama sıcaklık değerlerinin yaklaşık 6°C daha düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 12. Koltuk oturma bölgesinde zorlanmış ve doğal taşınım etkisinde olan noktalarda sayısal ve deneysel elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada otomobiller için mevcut literatürde yer alan koltuk soğutma sistemlerinden farklı olarak, koltuk soğutma sistemi kapsamında koltuğa eklenen fan ve gözenekli yapının giriş kesitinde ilave bir soğutma sisteminden faydalanılmaksızın direk taşıt iklimlendirme sistemi tarafından şartlandırılan iç ortam havasının kullanıldığı ancak arzu edildiğinde ilave bir soğutucu ünite ile daha etkin bir soğutmanın sağlanabileceği aktif havalandırılmalı koltuk sistemi tasarımı yapılarak prototipi üretilmiş ve bu koltuğun

oturma bölgesinin 1:1 ölçekta 3D HAD modeli sadeleştirmelere gidilerek oluşturulmuştur. Üretilen ve modellenen koltuklar ile hem otomotiv üretici standartlarına hem de literatürde yer alan çalışmalara uygun olacak koşullar altında deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada koltuk önce 60°C iklimatik kabin içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilebilmesi için 10 dk boyunca bekletilmiş sonrasında ise ortam sıcaklığında koltuk içerisine yerleştirilen fan yardımıyla soğutulmuştur. Bu esnada koltuk yüzey sıcaklık değişimleri termal kamerayla incelenmiştir. Soğutma işleminde fandan gelen havanın koltuk ara yüzeyinde homojen bir şekilde dağılabilmesini sağlamak için gözenekli yapı kullanılmıştır. Koltuk oturma bölgesi üzerinde noktalar tanımlanarak bu noktalardaki sıcaklık değerleri ile deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ise genel olarak fan yardımıyla soğutulan gözenekli yapının bulunduğu alanlarda diğer koltuk yüzeylerine göre daha hızlı bir soğuma olduğu görülmüştür. Deneye başladıktan 60 saniye sonrasında koltuğun gözenekli bölgesinin sıcaklığı yaklaşık 25°C'ye kadar düşerken diğer yüzeylerin sıcaklık değerleri 50°C mertebelerinde olduğu gözlenmiştir. 180 saniye ve sonrasında ise koltuk yüzey sıcaklıklarında çok büyük değişimler gözlenmemiş ve fan yardımıyla havanın dolaştığı gözenekli bölgenin neredeyse tamamı 25°C değerlerine ulaşmıştır. HAD analiz sonuçları incelendiğinde ise fan vasıtasıyla sağlanan hava akımı, koltuk modeline yaklaşık 2 m/s bir hızla girmiş ve gözenekli yapı içerisinde yaklaşık 4.5 m/s değerlerine kadar yükselmiştir. Koltuk yüzeyine tanımlanan noktaların deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen ortalama sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında ilk 60 saniyede düşük mertebede farklılıklar görülmekle birlikte 120 saniye ve sonrasında neredeyse eşit sonuçların elde edildiği, her iki çalışmanın sonuçlarının da uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Koltuk yüzeyinin fan etkisiyle soğutulmasının etkisini görebilmek amacıyla HAD modeli ile fan etkisinin devre dışı bırakıldığı ve sadece doğal taşınım ile soğumanın gerçekleştiği analizler gerçekleştirilmiştir. 60. saniyede sadece doğal taşınım ile koltuk yüzeyinin ortalama sıcaklık değeri yaklaşık 49°C'ye kadar düşerken fan etkisinin devrede olduğu deneysel ve sayısal çalışmalarda sırasıyla 43 ve 42°C'ye kadar düşmüştür. Bu değerler çalışmanın sonunda fan etkisinin olmadığı durumda yaklaşık 39°C iken fan devreye alındığında gerçekleştirilen çalışmalarda yaklaşık 34°C olarak gözlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, kabin iç ortam havasından faydalanılarak koltuk yüzeyini soğutabilmek için geliştirilen aktif koltuk soğutma sistemiyle koltuk yüzeyinde yaklaşık 6°C daha düşük sıcaklık değerlerinin elde edildiği, bu değerlerin bazı alanlarda yaklaşık 8°C'ye kadar yükseldiği görülmüştür. Ayrıca geliştirilen bu aktif koltuk soğutma sisteminin özellikle sıcak yaz dönemlerinde yolcu ya da sürücüler için ısı konfor şartlarının sağlanmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Martur Fompak International'a desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

| Semboller | Açıklama | |
|------------------|--|-------|
| p | basınç | [Pa] |
| Δ | delta operatör | - |
| Se | enerji kaynak terimi | - |
| μ | dinamik viskozite | [Pas] |
| Φ | disipasyon (yayınım terimi) | - |
| c_2 | gözenekli yapı atalet direnci | [1/m] |
| Dp | gözenekli yapı ölçüsü | [m] |
| ϵ | gözenekli yüzey hava geçirgenlik katsayısı | - |
| V | hız | [m/s] |
| u, v, w | hız vektörleri | - |
| Sm | kütle kaynak terimi | - |
| ∇ | Laplacian operatörü | - |
| SM | momentum kaynak terimi | - |

| | | |
|----------|----------------|------------|
| α | viskoz direnci | $[1/m^2]$ |
| ρ | yoğunluk | $[kg/m^3]$ |
| x,y,z | yön vektörleri | - |

Kısaltmalar Açıklama

| | |
|--------|--|
| AC | Air Conditioning |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| HVAC | Heating, Ventilation And Air Conditioning |
| HAD | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |
| SIMPLE | Semi-Implicit Method For Pressure Linked Equations |
| TED | Termoelektrikli Cihazlar |
| 3D | Üç Boyutlu |

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] ASHRAE handbook – Fundamentals, chapter 8., Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers, (1993).
- [2] Fanger, P.(1970). Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering, New York: McGraw-Hill.
- [3] Parsons, K. (2014). Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance, CRC Press.
- [4] Sevilgen, G. (2010). Otomobil kabininde hız ve sıcaklık dağılımının üç boyutlu sayısal analizi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa, Türkiye.
- [5] Yiğit, A. ve Atmaca, İ. Isıl Konfor ile İlgili Mevcut Standartlar ve Konfor Parametrelerinin Çeşitli Modeller ile İncelenmesi, IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 543, (2011).
- [6] İbiş, A. (2020). Otomobiller için yenilikçi hava kanallı koltuk tasarımı ve prototip imalatı, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa, Türkiye.
- [7] Lee, D. ve Lee, E. Cooling and heating performance improvement of enhanced climate control seats, International Journal of Automotive Technology, cilt 19, sayı 5, sayfa 795–800, (2018).
- [8] Karimi, G., Chan, C. ve Culham, J. R. Experimental study and thermal modeling of an automobile driver with a heated and ventilated seat, SAE International, sayfa 682-692, (2003).
- [9] Su, C., Dong, W., Deng, Y., Wang, Y. ve Liu, X. Numerical and experimental investigation on the performance of a thermoelectric cooling automotive seat, Journal of Electronic Materials, cilt 47, sayı 6, (2018).
- [10] Sevilgen, G.ve Kilic, M. Investigation of transient cooling of an automobile cabin with a virtual manikin under solar radiation, Thermal science, cilt 17, no 2, sayfa 397-406, (2013).
- [11] ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 7.2.3 Porous Media, (2009).
- [12] Sevilgen, G. ve Kılıç, M. Numerical analysis of air flow, heat transfer, moisture transport and thermal comfort in a room heated by two-panel radiators, Energy and Buildings, cilt 43, sayı 1, sayfa 137–146, (2011).



Investigation of the Effects of Processing Parameters on Measuring Accuracy in Electrical Discharge Machining of Ti-6Al-4V Alloy

Ramazan ÇAKIROĞLU^{1*}

¹Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 25.12.2021
Revision: 13.01.2022
Accepted: 18.01.2022

Keywords

Electro Discharge
Machining
Ti-6Al-4V Alloy
Keyseat
Measurement Accuracy

Abstract

Titanium alloys are one of the materials that are difficult to process due to their high strength, high hardness and low thermal conductivity, wherefore low tool life and surface quality and high energy consumption are involved in shaping them with traditional manufacturing methods. In particular, special tool geometries are required for the machining of complex geometry parts including helical groove, keyseat, micro-holes, etc. with traditional manufacturing methods, which leads to increases in machining costs. In such cases, non-traditional alternative processing methods are preferred. In this study, keyseat shaping procedures were performed according to DIN 6885 standard in the electro (die-sinking) erosion machine for Ti-4Al-6V alloy. As a result of experiments conducted in copper electrode and Belone EDM F dielectric fluid environment, the effects of different processing parameters (discharge current, pulse on time and pulse off time) on measuring accuracy were investigated. In addition, the effects of 3D surface and SEM images and processing parameters on the accuracy of the coordinate measurement were evaluated. With the low discharge current, less thermal energy is transferred to the workpiece and smaller particles are removed from the workpiece, obtained in closer results to the targeted values. The biggest difference between the targeted keyseat depth, width and length and the measured value was 18.13%, 4.24% and 0.625%, respectively. The results closest to the specified standard keyseat dimensions were obtained in $I_p=9A$, $T_{on}=150\mu s$, $T_{off}=120\mu s$ processing parameters.

1. INTRODUCTION

Key and keyseat are widely used in power transfer operations. It is very important that it is done with the characteristics and precision to withstand the forces formed during the power transfer [5-6]. The dimensions of the keyseat are determined according to the diameter of the shaft. If the keyseat is not made within the intended dimensions, it can cause serious problems. Therefore, it is important that the keyseat is produced within the intended size limits and from high strength material. The fact that the machined parts will be used in important places such as movement and power transmission by working at high temperature and speed increases the importance of processing parameters even more. In this context, in the studies on the processing of titanium alloy with the EDM method, Verma et al. investigated the effects of different machining parameters by die-sinking electro-erosion on the machining of titanium alloy using copper electrodes. In the experiments, they used to pulse on time, pulse off time, dielectric pressure, and voltage parameters as processing parameters. In their studies, they achieved higher material removal rate in the use of high voltage, high pulse on time and medium dielectric pressure. Increasing the pulse on time caused an increase in microcracks on the machined surfaces. In addition, dielectric flow pressure has played an important role in increasing the material removal rate. They observed that when dielectric flow pressure was low, it was inadequate to remove debris [7]. Klocke et al. [8] compared the effect of polarity in processing Ti-6Al-4V titanium and 42CrMo4 iron alloy with die-sinking electro erosion. Bhaumik et al. [9] The effect of titanium G6 alloy on the material removal rate (MRR) and tool wear rate (TWR) of different tool materials such as copper, brass, and zinc during EDM performance they have evaluated. They obtained higher MRR with brass and zinc tools than copper team. However, copper electrode performed better in tool wear. Singh et al. [10] have attempted different flushing methods to improve the flushing

action during EDM. They used copper tools with and without holes. They observed that flushing using compressed argon gas from perforated tools had a positive effect on MRR and TWR throughout. Prakash et al. [11] investigated the dimensional accuracy of the processing depth by processing AISI 1035 material with EDM. In their study, they used discharge current, pulse on time and pulse off time as processing variables. Gambling et al. [12] investigated the surface integrity and dimensional accuracy of P91 steel in EDM processing. Sanchez et al. [13] investigated the effects of the parameters used in the EDM method on dimensional accuracy and optimized the result. After the literature research, it was observed that there was no comprehensive study to machining keyseat in standard sizes determined by mile diameter with EDM.

In this study, electro-erosion machining experiments were carried out in different processing parameters in order to machining keyseat in DIN 6885 standard for Ti-6Al-4V alloy with cylindrical geometry. As a result of the experiments, keyseat dimensions were measured with CMM device. In addition, the effects of 3D surface and SEM images and processing parameters on the accuracy of the measurement were analyzed.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Experimental Equipment

The main purpose of this study is to determine the effects of processing parameters on the completeness of the measurement in the process of machining the keyseat with EDM to the Ti-6Al-4V alloy. In this study, Ti-4Al-6V titanium alloy with a diameter of 14 mm was used as the workpiece material. For the specified diameter, the DIN 6885 standard is set to be keyseat dimensions width (b) 5mm, depth (h) 5mm, keyseat depth (t1) 3mm and length (L) 20mm. Keyseat sizes according to DIN 6885 standard are given in Figure 1.

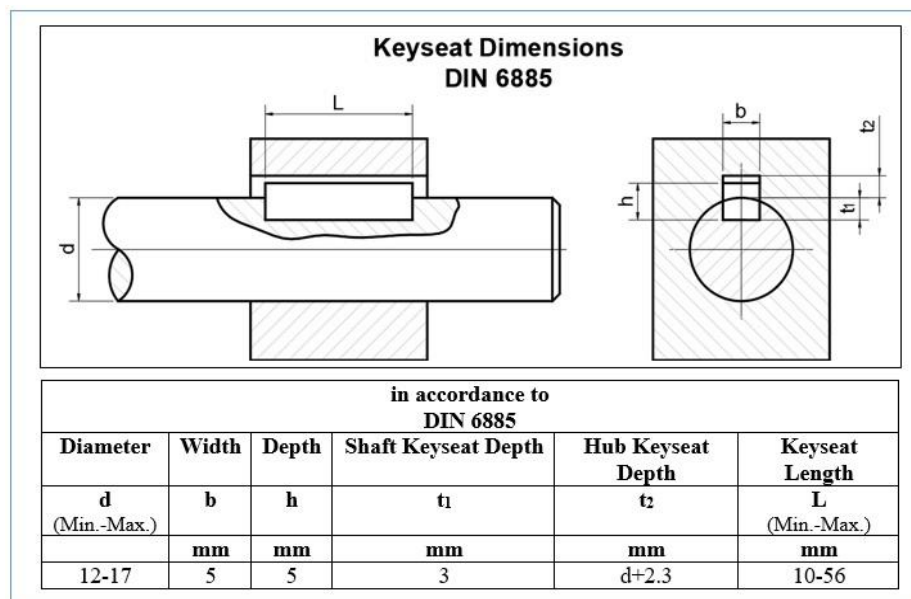


Figure 1. Keyseat dimensions according to DIN 6885 standard

Copper material with 99.5% purity was preferred as a tool (electrode). The tools were prepared by cutting on a wire erosion bench based on the keyseat dimensions. In Figure 2, the dimensions of the workpiece and tool, and the processing principle are shown. The experiments were carried out on the Furkan compact 1 Z-NC type die-sinking electro erosion bench. Belone EDM F liquid with high flash point and low viscosity was used as dielectric fluid.

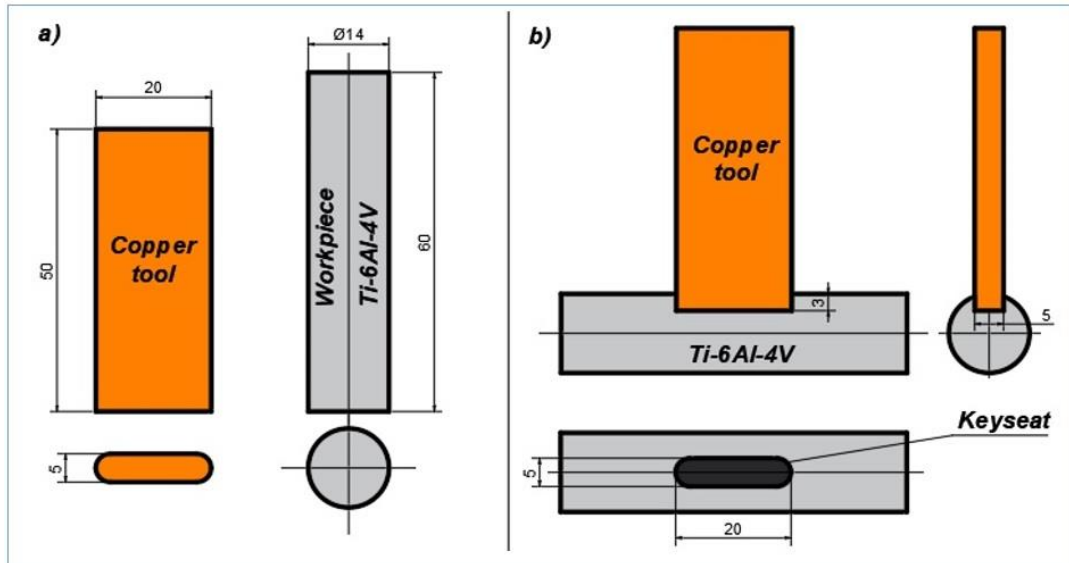


Figure 2. a) Dimensions of the workpiece and tool (electrode), b) processing principle and keyseat dimensions

2.2. Experimental design

As a result of preliminary experiments and literature review, three different discharge currents (I_p), three different pulse on times (T_{on}) and two different pulse off times (T_{off}) were determined as variable parameters. Table 1 shows the levels of variable processing parameters and the parameters kept fixed.

Table 1. Processing parameters

| Processing Parameters | Levels | | |
|--|--------------|------|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| Variable parameters | | | |
| Discharge current, A | 9 | 12.5 | 15 |
| Pulse on time, μs | 150 | 200 | 250 |
| Pulse off time, μs | 100 | 120 | --- |
| Fixed parameters | | | |
| Dielectric pressure, kgf/cm ² | 0.4 | | |
| Retract distance, mm | 4.5 | | |
| Workpiece material | Ti-6Al-4V | | |
| Workpiece polarity | Negative | | |
| Tool (Electrode) material | Copper | | |
| Tool polarity | Positive | | |
| Dielectric fluid | BELONE EDM F | | |

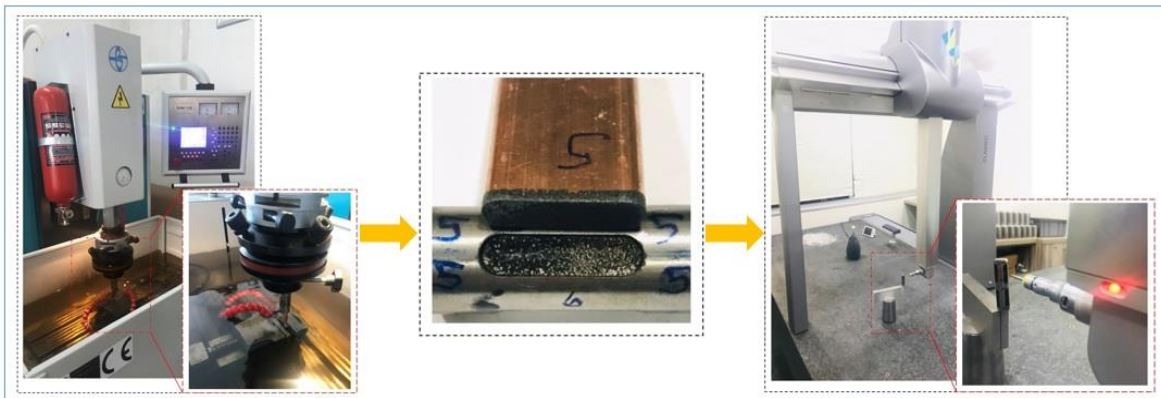


Figure 3. *Experimental setup and workflow*

Dimensional measurements of keyseats obtained after the experiments were made with Global Classic 091508 model coordinate measuring machine (CMM). Before the measurements, the calibration process was performed at the angle of A90B-90. The plane formed from the ground surface of the workpiece was leveled and the position of the workpiece was fixed by verifying with the "line" formed from one side of the keyseat. "t₁" measurement results were obtained by calculating the plane on the ground and the extreme point of the outer diameter. The "b" measurement results were obtained with the lines obtained by contacting two points on the side surfaces of the keyseat. Radius (R) measurements were obtained with circles created by touching three points, and the distance measurement between the circles and the "L" dimension were checked. Perpendicular to the ground "line" was formed from the side walls of the keyseat, and perpendicularity checks were made with the plane on the floor. All calibration and measurement processes were carried out at 21°C. The experimental setup and workflow are shown in Figure 3.

3.RESULTS

In this study, experiments were carried out according to the Taguchi L₁₈ experimental design, which was created according to different machining parameters for keyseat machining in DIN 6885 standard on Ti-6Al-4V alloy by EDM method. As a result of the experiments, dimensional measurements of the keyseat were made and the results are given in Table 2.

Table 2. *Experimental design*

| Experiment No. | Discharge current I_p | Pulse on time T_{on} | Pulse off time T_{off} | Depth t_1 | Width b | Length L | Radus r_{avg} |
|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------|--------------|---------------|--------------------|
| 1. | 9 | 150 | 100 | 2.952 | 5.153 | 20.075 | 2. 5680 |
| 2. | 9 | 200 | 100 | 2.946 | 5.191 | 20.124 | 2. 5800 |
| 3. | 9 | 250 | 100 | 2.704 | 5.212 | 20.117 | 2. 5810 |
| 4. | 12.5 | 150 | 100 | 2.459 | 5.150 | 20.066 | 2. 5670 |
| 5. | 12.5 | 200 | 100 | 2.851 | 5.167 | 20.112 | 2. 5805 |
| 6. | 12.5 | 250 | 100 | 2.914 | 5.169 | 20.100 | 2. 6205 |
| 7. | 15 | 150 | 100 | 2.570 | 5.132 | 20.092 | 2. 5590 |
| 8. | 15 | 200 | 100 | 2.597 | 5.173 | 20.118 | 2. 5620 |
| 9. | 15 | 250 | 100 | 2.891 | 5.202 | 20.125 | 2. 5865 |
| 10. | 9 | 150 | 120 | 3.014 | 5.042 | 20.080 | 2. 5780 |
| 11. | 9 | 200 | 120 | 2.950 | 5.166 | 20.094 | 2. 5945 |
| 12. | 9 | 250 | 120 | 2.890 | 5.175 | 20.118 | 2. 6070 |
| 13. | 12.5 | 150 | 120 | 2.700 | 5.161 | 20.094 | 2. 5675 |
| 14. | 12.5 | 200 | 120 | 2.830 | 5.182 | 20.105 | 2. 5650 |
| 15. | 12.5 | 250 | 120 | 2.872 | 5.184 | 20.125 | 2. 5815 |
| 16. | 15 | 150 | 120 | 2.456 | 5.161 | 20.079 | 2. 5640 |
| 17. | 15 | 200 | 120 | 2.763 | 5.145 | 20.070 | 2. 6065 |
| 18. | 15 | 250 | 120 | 2.695 | 5.182 | 20.097 | 2. 5900 |

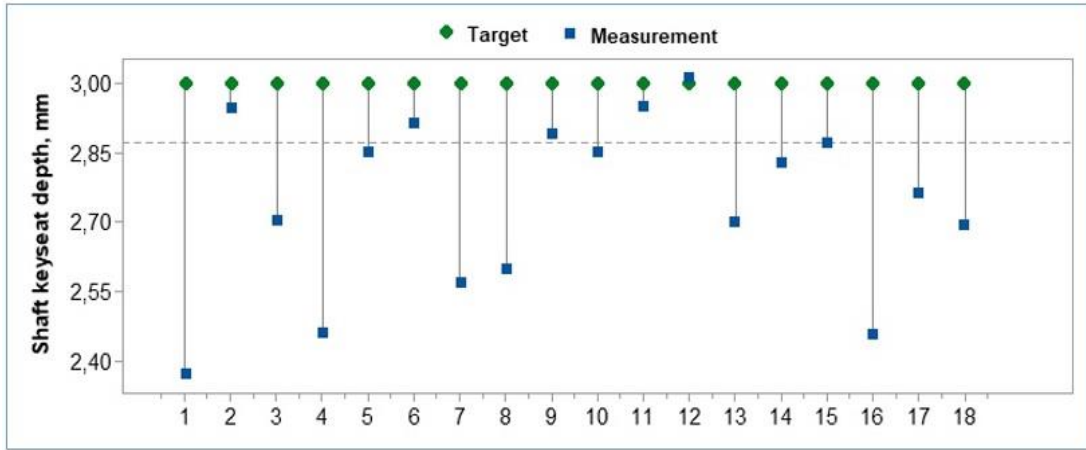


Figure 4. Keyseat depth

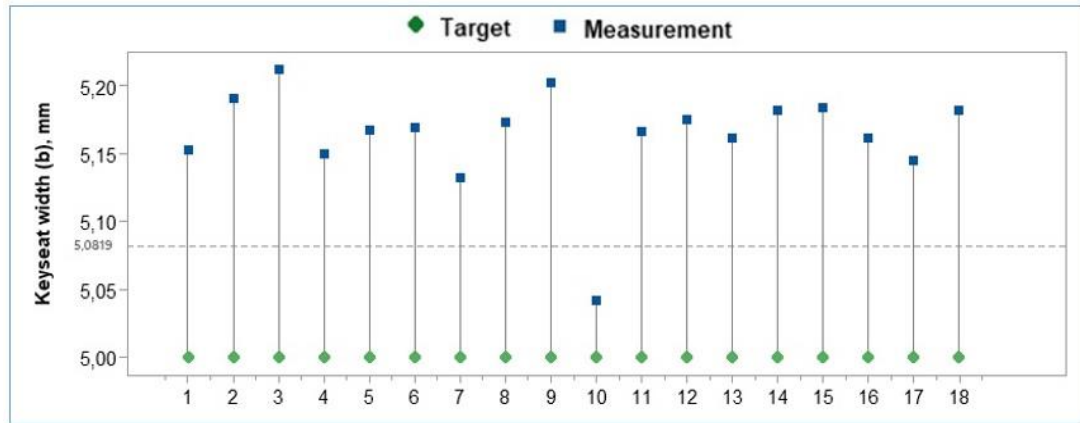


Figure 5. Keyseat width

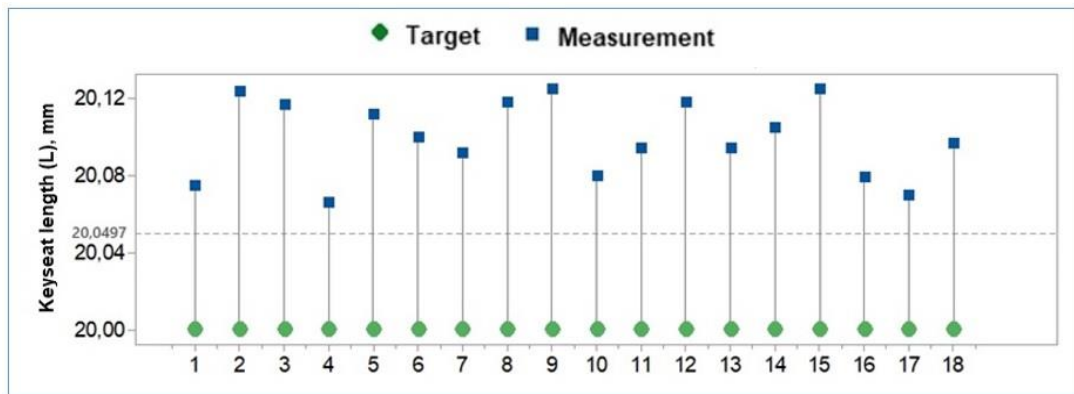


Figure 6. Keyseat length

Figure 4-6 shows the graphs created according to the keyseat values obtained as a result of machining Ti-6Al-4V alloy with different machining parameters. When Figure 4 is examined, the closest value to the targeted keyseat depth was obtained in experiment no. 10 ($I_p=9A$, $T_{on}=150\mu s$, $T_{off}=120\mu s$). The difference between the average keyseat depth of 3.014 mm and the keyseat depth obtained as a result of this experiment was calculated as 4.10%. The biggest difference between the target value and the measured values was 18.13% in the test condition no. 4. It is thought that these changes in depth are caused by the machining process and tool wear depending on the machining parameters. When the discharge current and the pulse on time are high, the chip removal rate increases, but the high temperature caused causes faster tool wear

[14]. On the other hand, it can be said that the sticking of chips from the machined material to the tool causes irregularity in arc formation, reducing the chip removal rate and thus moving away from the target value in depth. As a matter of fact, the deviation is higher due to the reasons mentioned in the experiments where the discharge current and pulse duration are high (Table 2).

Figure 5 and Figure 6 show the changes in keyseat width and length, respectively, according to the machining parameters. The average of the keyseat width and length values are 5.0819 and 20.0497, respectively. The largest difference between the targeted keyseat width and the measured value was 4.24%, while the deviation between the keyseat length was 0.625% at most. These values indicate that the deviation in keyseat width is larger. This result is mainly due to the large surface area falling on the keyseat width and thus the formation of chips and sparks on the larger surface. On the other hand, it is thought that the increasing arc gap [15] with the increase of thermal energy in experiments with high pulse duration causes an increase in the amount of deviation from the target value. However, less thermal energy is transferred to the workpiece with a low discharge current and chip removal in smaller particles from the workpiece resulted in closer results to the targeted values (Table 2). In addition, the low pulse on time and high pulse off time reduced the rate of spark falling on the workpiece surface per unit time [16]. Thus, less melting and evaporation processes, less pits and less crater formations increased the accuracy of measurement.

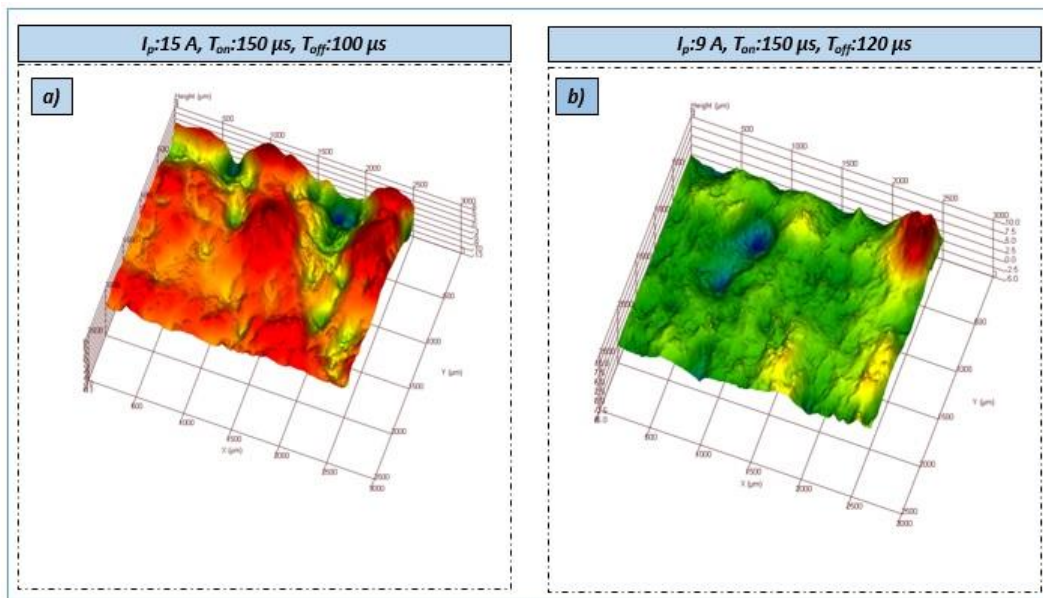


Figure 7. 3D topographies of processed surfaces

Figure 7 shows the 3D surface topographies taken from the base of the keyseat. Considering that the pulse on time (T_{on}) remains the same, the formation of irregular structures consisting of high peaks and valleys on the machined surface in Figure 7a draws attention, while in Figure 7b it is seen that the machined surface has a relatively more homogeneous structure. High I_p and low T_{off} values caused deterioration of the homogeneous structure on the surface and had a negative effect on both surface roughness and measurement accuracy. By increasing the impact dwell time, that is, when the metal removal rate is reduced, shallower craters were formed on the workpiece surface [17]. In order to examine these formations more clearly, SEM images were taken from the machined keyseats for the same machining conditions (Figure 8).

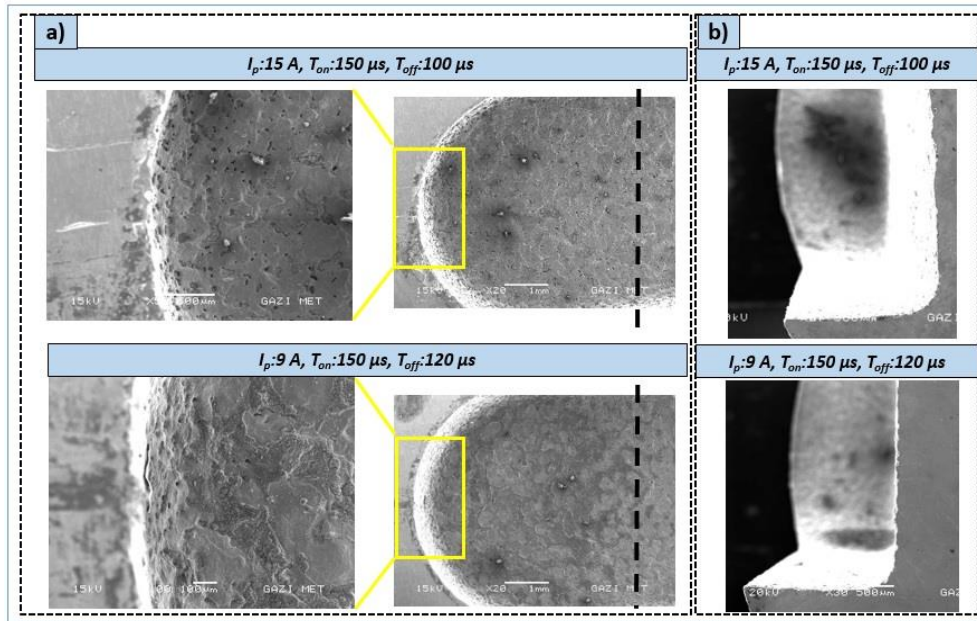


Figure 8. SEM images of corner radius and cross section

It is very important to clean the residues in the processing area accurately and quickly in reducing the amount of error in the geometric dimensions of the machined surfaces. Removal of debris from the keyseat cavity is necessary to achieve stable machining performance. If residues cannot be removed from the machined area, it can lead to unstable machining performance and poor geometric dimensions [18–20]. The desired edge radius depending on the machining geometry and the SEM images obtained after metallographic polishing on the cross-section of the processed samples are given in Figure 8. It is seen that the craters and keyseat profile lines on the machined surfaces change depending on the machining parameters. As can be seen from the cross-section pictures (Figure 8b), deeper and wider craters due to machining parameters that provide high metal removal rate increased the deviation from the dimensions. At the same time, sparks will occur on the larger surface, as possible adhesions on the tool surface disrupt the tool geometry [21]. It is thought that this process enlarges the removed surface area, causing both deviations from the keyseat profile and an irregular form of surface quality.

In the light of all the results, it has been observed that in the machining of parts with complex geometry by electro-erosion, deviations may occur in different sizes due to arc formation according to the profile-tool surface area. It has been revealed that the most important parameters affecting the material removal rate and surface integrity in EDM of Ti-6Al-4V alloy are flow and pulse on time. On the other hand, the fact that no residues stick to the machined surfaces indicates that the dielectric fluid and application pressure used in the experiments were chosen correctly. When electro-erosion machining is required on parts produced from Ti-6Al-4V alloys, it is recommended to use low current, medium pulse on time and high pulse off time in order to achieve the desired dimensions and surface qualities.

4.CONCLUSIONS

In this study, a comprehensive evaluation of the dimensional measurement results obtained as a result of keyseat forming into Ti-4Al-6V alloy with different machining parameters in EDM was made. The findings obtained as a result of the study are presented below:

- By transferring less thermal energy to the workpiece with low discharge current and removing chips from the workpiece in smaller particles, results closer to the targeted values were obtained.
- High I_p and T_{on} and low T_{off} values caused deterioration of the homogeneous structure on the machined surface and had a negative effect on the measurement accuracy.

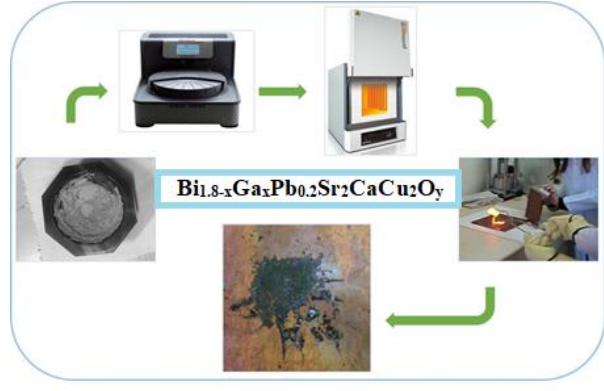
- Optimum parameters were obtained as $I_p=9A$, $T_{on}=150\mu s$, $T_{off}=120\mu s$ for keyseat cutting into Ti-4Al-6V alloy. In this context, the closest keyseat depth to the target value was measured as 3.014 mm.
- The largest deviations between the targeted keyseat depth, width and length and measured values were 18.13%, 4.24% and 0.625%, respectively.
- It has been observed that correct and rapid cleaning of the residues in the processing area is an important factor in reducing the amount of errors in the geometric dimensions of the surfaces processed by electro-erosion.

REFERENCES

- [1] Shokrani A, Dhokia V, Newman ST. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012; 57: 83–101.
- [2] Sivakumar K, Mathan Kumar P, Amarkarthik A, Jegadheeswaran S, Shanmugaprakash R. Empirical modeling of material removal rate and surface roughness of OHNS steel using Cu-TiB₂ Tool in EDM. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 45: 2725–2729.
- [3] Matorian P, Sulaiman S, Ahmad MMHM. An experimental study for optimization of electrical discharge turning (EDT) process. *Journal Of Materials Processing Technology*. 2008; 204: 350–356.
- [4] Pant P, Bharti PS. Electrical Discharge Machining (EDM) of nickel-based nimonic alloys: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 25: 765–772.
- [5] Bishnoi P, Sahu M. Optimization of the Keyseat Design with Consideration of Effect of Stress Concentration on Different Materials. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2014; 3: 477–481.
- [6] Kishor HP, Raghu T. Design Analysis of A Keyless Coupling. *International Journal of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering*. 2014; 1: 37–43.
- [7] Verma V, Sajeevan R. Multi Process Parameter Optimization of Diesinking EDM on Titanium Alloy (Ti6Al4V) Using Taguchi Approach. *Materials Today: Proceedings*. 2015; 2: 2581–2587.
- [8] Klocke F, Mohammadnejad M, Holsten M, Ehle L, Zeis M, Klink A. A Comparative Study of Polarity-related Effects in Single Discharge EDM of Titanium and Iron Alloys. *Procedia CIRP*. 2018; 68: 52–57.
- [9] Bhaumik M, Maity K. Effect of different tool materials during EDM performance of titanium grade 6 alloy. *Engineering Science and Technology, An International Journal*. 2018; 21: 507–516.
- [10] Singh NK, Singh Y, Sharma A, prasad R. Experimental investigation of flushing approaches on EDM machinability during machining of titanium alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 38: 139–145.
- [11] Prakash J, Equbal MdI, Equbal A. Investigative study on dimensional accuracy of machined cavity formed during EDM of AISI 1035. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 47: 3217–3220.
- [12] Kumar P, Dewangan S, Pandey C. Analysis of surface integrity and dimensional accuracy in EDM of P91 steels. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 33: 5378–5383.
- [13] Sanchez JA, Lopez de Lacalle LN, Lamikiz A, Bravo U. Dimensional accuracy optimisation of multi-stage planetary EDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002; 42: 1643–1648.

- [14] Çakiroğlu R, Günay M. Comprehensive analysis of material removal rate, tool wear and surface roughness in electrical discharge turning of L2 tool steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020; 9: 7305–7317.
- [15] Singh H, Shukla DK. Optimizing electric discharge machining parameters for tungsten-carbide utilizing thermo-mathematical modelling. *International Journal of Thermal Sciences*. 2012; 59: 161–175.
- [16] Unses E, Çoğun C. Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric. *Strojniski Vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. 2015; 61.
- [17] Azhiri RB, Bideskan AS, Javidpour F, Tekiyeh RM. Study on material removal rate, surface quality, and residual stress of AISI D2 tool steel in electrical discharge machining in presence of ultrasonic vibration effect. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019; 101: 2849–2860.
- [18] Koenig W. The Flow Fields in the Working Gap with Electro Discharge Machining. *Annals Of The CIRP*. 1977; 25: 71–75.
- [19] Schumacher BM. About the Role of Debris in the Gap During Electrical Discharge Machining. *CIRP Annals*. 1990; 39: 197–199.
- [20] Obara H, Abe M, Ohsumi T. Control of Wire Breakage during Wire EDM -1st Report: Monitoring of Gap Signals According to Discharged Location. *International Journal of Electrical Machining*. 1999; 4: 53–58.
- [21] Cakiroglu R, Günay M. Elektro Erozyonla Tornalama Yöntemiyle İşlenen Soğuk İş Takım Çeliğinin Yorulma Ömrünün Tahmini. *Politeknik Dergisi*. 2021; 24: 495–502.

Investigation of Thermal Properties of $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Glass Ceramics



Şükrü ÇAVDAR*¹, Durak BULUT², Selçuk İZMİRLİ², Neslihan TURAN¹, Haluk KORALAY¹

¹Gazi University Faculty of Science, Department of Physics, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences. Advanced Technologies, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
 Received: 13/01/2022
 Revision 05/02/2022
 Accepted: 07/02/2022

Highlights

*Crystallization kinetics of $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ - glasses studied.
 • Activation energies calculated using Kissinger and Augis-Benett models *k*

This article presents the variation in the thermal properties of Bi-Ga partial substitution in $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (BSCCO) glass ceramic structures. The experimental steps of BSCCO glass ceramic samples are specified. The samples were produced with Bi-Ga partial substitution at different ratio using the melt casting method. Thermal properties were analyzed using the differential thermal analysis (DTA) method. The mass gain in the samples was investigated by the thermogravimetric analysis (TGA) method.

. **Figure 1** Schematic representation of experimental processes of $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ samples

Purpose: The aim is to examine the effect of Bi-Ga partial substitution on the thermal properties of the BSCCO glass ceramic structure.

Theory and Methods: First, the heat treatment stage of the powder samples was specified. Then, the process of transforming the molten material into glass was performed (Figure 1). Finally, the effect of partial substitution ratio of Ga in the $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ on thermal properties using DTA and TGA measurements.

Results: In the DTA curves of all samples, it is seen that as the heating rate is increased, it shifts to the high temperature regions at the glass transition temperature and crystallization temperature. Avrami parameters were calculated for each sample using the crystallization peaks in the DTA curves. The Avrami parameters of samples were calculated as 3,45; 2,82; 2,25 and 2,58 for A, B, C and D respectively. Compared to the A, the activation energy of the B increased by 1-2 kJ/mol, but this energy level started to decrease as the substitution ratio increased. When the graphs are examined for all samples, it is seen that the crystallization rate increases with the increase in the substitution ratio.

Conclusion: Since the required energy range for crystallization will be lower at low temperatures, there will be sufficient time for nucleation. However, as the higher heating rates are increased,

Keywords

DTA/TGA,
Glass Ceramics,
Avrami parameter,
Thermal properties

the required energy range is exceeded rapidly and there will be no time required for nucleation, and the crystallization temperature will increase proportionally. Volumetric nucleation from the surface inwards in all samples shows that the surface nucleation is more dominant than the volumetric nucleation as the substitution ratio increases. It can be said that samples with high energy level are thermally more stable than samples with low energy levels.

GU J Sci, Part C, 7(xx): 4xx-4xx (20xx)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>



Bi_{1,8-x}Ga_xPb_{0,2}Sr₂CaCu₂O_y Cam Seramiklerin Termal Özelliklerinin İncelenmesi

Şükür ÇAVDAR^{*1}, Durak BULUT², Selçuk İZMİRLİ², Neslihan TURAN¹, Haluk KORALAY¹

¹Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, ORCID 0000-0001-6079-7048, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler ABD., 06500, Yenimahalle/ANKARA

Öz

Bu çalışmada, $x = 0; 0,025; 0,1; 0,2$ oranlarında Bi-Ga kısmi yer değiştirmesinin, Bi_{1,8-x}Ga_xPb_{0,2}Sr₂CaCu₂O_y yapısının termal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çekirdeklenme oranları, sıcaklığın ve kısmi yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak Avrami parametreleri kullanılarak çekirdeklenme teorisi açısından analiz edilmiştir. Bi_{1,8-x}Ga_xPb_{0,2}Sr₂CaCu₂O_y yapısında birinci kristallenme piki için aktivasyon enerji değerleri, izotermal olmayan Kissinger, Takhor ve Augis-Bennet yöntemleri kullanılarak hesaplandı. Bi-

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/01/2022
Düzeltilme: 05/02/2022
Kabul: 07/02/2022

Anahtar Kelimeler

DTA/TGA,
cam seramik,
Avrami parametresi,
Termal özellikler

Keywords

DTA/TGA,
Glass Ceramics,
Avrami parameter,
Thermal properties

Ga kısmi yer değiştirmesinin, kütle değişim mekanizmasındaki etkisi oksijen gazı akışında incelendi.

Investigation of Thermal Properties of $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Glass Ceramics

Abstract

In this study, the effect of Bi-Ga partial substitution at $x = 0,0; 0,025; 0,1; 0,2$ on the thermal properties of the $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ structure. Experimental nucleation ratios were analyzed in terms of nucleation theory using Avrami parameters as a function of temperature and partial displacement. The activation energies of the first crystallization peak in the $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ structure were calculated using non-isothermal Kissinger, Takhor and Augis-Bennet methods. By using the thermogravimetric analysis (TG) method, the effect of Bi-Ga partial substitution on the mass change mechanism was investigated in oxygen gas flow.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Camlar izotropik, homojen, Őeffaf ve kimyasallara dirençli ancak kırılğan sert maddelerdir. Camların atom dizilimleri, kristallerde olduğu gibi uzun mesafe düzeni değil, aksine kısa mesafe dizilim sergiler. Camların atomik ve moleküler yapı birimleri kristallerle aynı olmalarına rağmen bu birimler düzenli değildirler [1]. Camların atomik düzeni, kristal yapıdaki gibi 10 nm'den büyük olmadığından ve rastgele yerleŐmiş düzende olduklarından x-ışınları kırınım deseni incelendiğinde $2\theta=30^\circ$ civarında geniş bir tepe gözlemlenir. Camın Őeffaflık özelliği de tanecik sınırlarının olmamasından kaynaklanmaktadır [2].

Cam seramik malzemeler; uzay ve havacılık sanayisinde, elektronik sanayisinde, malzeme kaplama teknolojisinde, medikal uygulamalarda, inŐaat sektöründe, süperiletken malzeme üretiminde kullanılır [3-7]. Yüksek dielektrik sabitine sahip malzemelerin üretiminde baŐta olmak üzere, çeşitli malzemelere kıyasla korozyon ve aşınma dayanımı, üstün darbe direnci ve tokluk özelliklerinden dolayı pek çok alanda tercih edilmektedirler.

Cam seramik malzeme üretiminde en yaygın kullanılan yöntem katı hal tepkime, sol jel ve eritme döküm yöntemleridir. Eritme döküm yöntemi yapı içerisindeki gözenekleri azaltarak yüksek yoğunlukta homojen örneklerin hazırlanmasına olanak sağlamaktır. Böylece parçacıklar arası bağlantılar artmakta ve var olanlar kuvvetlenmektedir. Bunun sonucunda da örneklerin elektriksel, yapısal ve mekanik özellikleri değişmektedir. Başka bir avantajı da farklı Şekil ve büyüklükte örnek hazırlanabilmesidir. Bu yöntemde en önemli nokta, yüksek sıcaklıklarda pota ile üretilen madde arasında oluşabilecek kimyasal reaksiyonlardır. Bu reaksiyonları önlemek için genellikle yüksek erime sıcaklığına sahip platin krozeler kullanılmaktadır [8].

Cam seramik yapılardan BSCCO sisteminin genel formülü, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+y}$ şeklindedir. $n=1, 2, 3$ değerleri kullanılarak elde edilen sistemler Bi, Sr, Ca ve Cu elementlerinin alt indisleri kullanılarak sırasıyla 2201, 2212 ve 2223 kristalografik yapı olarak tanımlanırlar. Cam seramik üretim yöntemi kullanılarak BSCCO (Bi-Sr-Ca-Cu-O) yapısı üzerine gerçekleştirilen ilk çalışma Komatsu ve arkadaşları tarafından 1988 yılında yapılmıştır [9]. BSCCO yapısı cam örnek elde etmeye uygun ve basit bir sistemdir. Ancak, BSCCO cam seramik üretilirken, başlangıç malzemelerin stokiyometrik oranlı karışımları, hazırlama metotları, sinterleme sıcaklığı ve süresi göz önünde bulundurulmalıdır.

Ga'nın sırasıyla 0.62 Å ve 0.81 Å iyonik yarıçaplı Ga 3+ veya Ga 1+ durumunda veya bunlar arasındaki durumda olabileceğine inanılmaktadır. Başlangıç bileŐiminde Ga + 3'ün kullanıldığı varsayılsa, Ga'nın değerlik durumu, ısıl işlem sırasında meydana gelen faz geçiŐleriyle deęiŐebilir, bu da cam seramik malzemenin özelliklerini doğal olarak etkileyebileceği ifade edilmektedir [10]. Aksan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, BSCCO malzemelerde Ga katkısı veya kısmi yer değiştirme de, galyumun cam yapıcı iyon olarak hareket ettiği belirlenmiştir. Bu çalışmada, Bi-Ga kısmi yer değiştirmesinin manyetik özellikleri üzerindeki olumlu etkisini ve kritik akım yoğunluğuna etkisi incenmiŐtir [11]. Dimesso ve ark. $\text{BiSrCaCu}_2\text{Ga}_x\text{O}_y$ sisteminde wisker yapılarının üretimini ve büyüme mekanizmasını araŐtırdı. Cam

malzemelerin termal özelliklerinin Ga konsantrasyonuna bağlı olduğu bulundu. Wisker yapılarının sadece 855 °C'de ısıtılma işlemi görmüş $x = 0.6$ malzemede üretildiğini gösterdiler [12]. Balcı ve arkadaşları, BSCCO nun farklı fazları için, farklı oranlarında Pb ve Ga_2O_3 katkısı için oksitlenme mekanizmalarını incelemiş ve optimum oksitlenme sıcaklığını araştırmışlardır [13].

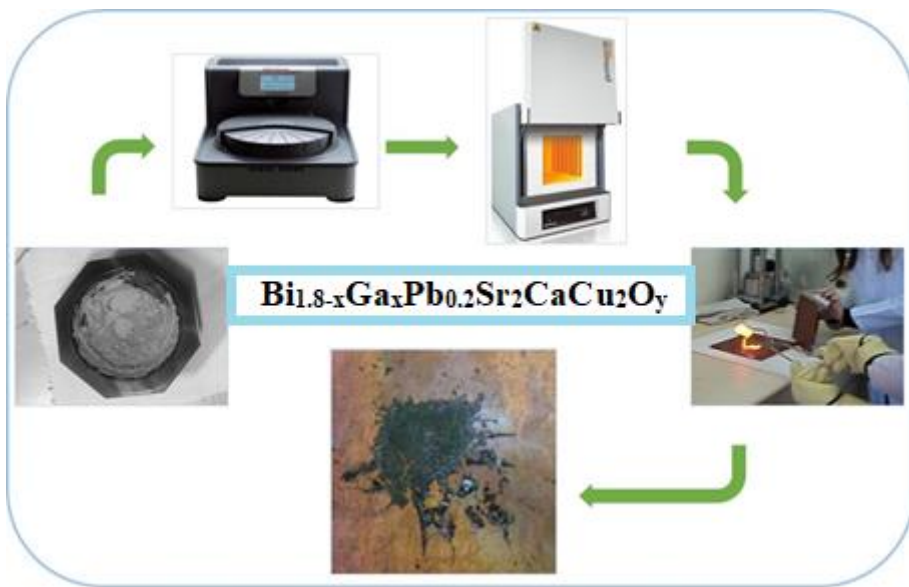
Bu çalışmada; eritme döküm yöntemi kullanılarak Bi-Ga kısmi yer değiştirme oranı $x = 0; 0,025; 0,1; 0,2$ olan $Bi_{1,8-x}Ga_xPb_{0,2}Sr_2CaCu_2O_y$ cam örnekler hazırlanmıştır. $x = 0; 0,025; 0,1; 0,2$ kısmi yer değiştirme oranlarına sahip örnekler sırasıyla A, B, C, ve D olarak isimlendirilmiş ve kısmi yer değiştirmelerin termal özellikler üzerine etkisi DTA yöntemi ile kristalleşme ve çekirdeklenme mekanizmalarına ait, Avrami parametresi incelenmiştir. Kristalleşme aktivasyon enerjisi, Kissinger, Takhor ve Augis-Bennet yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. TGA yöntemi kullanılarak da örneklerdeki kütle değişimi, oksijen gazı akışında incelenmiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIALS & METHODS)

Bu çalışmada, malzeme üretimi açısından nispeten diğer yöntemlerden daha kolay ve işlem basamakları kontrol edilebilen bir yöntem olan eritme döküm ile cam üretimi seçilmiş ve BSCCO malzemelerinin hazırlanışı hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

2.1. Örnek Hazırlama

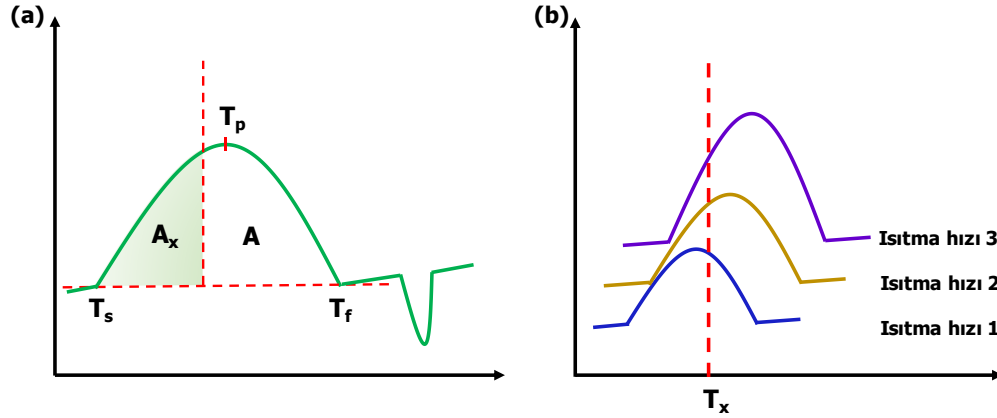
$Bi_{1,8-x}Ga_xPb_{0,2}Sr_2CaCu_2O_y$ cam yapı içerisinde $x=0; 0,025; 0,1; 0,2$ oranlarında Bi-Ga kısmi yer değiştirme yapılacak örnekleri hazırlamak için, yüksek saflıkta (%99.99) Bi_2O_3 , PbO, $SrCO_3$, $CaCO_3$, Ga_2O_3 ve CuO tozları hassas terazide stokiyometrik oranlarda tartıldı ve agat havanda öğütüldü. Toz örnekler yüksek ısıya dayanıklı $\alpha-Al_2O_3$ (alümina) potalara konularak, ortalama ısıtma hızı $20 Kdk^{-1}$ olacak şekilde 1373 K'ye kadar kül fırında ısıtıldı, 1373 K de 10 dk bekletilen örnekler, fırın sıcaklığı 1423 K'ye çıkarılarak 150 dk bekletildi ve eriyik örnekler elde edildi. Eriyik hale getirilen örnekler, fırından alınarak örneklerin kristalleşmesini önlemek için önceden soğutulmuş iki bakır plakanın arasına dökülerek hızlı soğutma yapıldı. Bu işlemler sonucunda, kalınlığı yaklaşık 0.5-0.8 mm olan siyah cam numuneler elde edildi (Şekil 1).



Şekil 1. $Bi_{1,8-x}Ga_xPb_{0,2}Sr_2CaCu_2O_y$ örneğini üretmek için kullanılan işlem basamakları

2.2. Termal Analiz Yöntemleri

Termal analiz yöntemi ile malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak, kristalleşme sıcaklıkları, çekirdeklenme, cam geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı, bozulma, entalpi, entropi gibi parametreler hesaplanabilir. Elde edilen örnekler üzerindeki kinetik çalışmalar, izotermal olmayan teknikle EXSTAR 1200 DTA/TG cihazı kullanılarak yapıldı. Örneklerin $\beta = 5, 10, 15, 20 \text{ K dk}^{-1}$ ısıtma hızlarında alınan DTA eğrileri kullanılarak, kristalleşme ve çekirdeklenme mekanizmalarına ait, avrami parametresi, üç farklı yöntemle kristalleşme aktivasyon enerjisi değerleri, TGA yöntemi ile de, oksijen gazı akışı altında örneklerdeki kütle kazancı hesaplanarak, Bi-Ga kısmi yer değiştirmesinin etkisi incelendi. Şekil 2a da tipik DTA eğrisi görülmektedir. DTA eğrilerinde malzemelerin özelliklerine bağlı olarak, ısıtılmasıyla endotermik veya ekzotermik reaksiyona karşılık gelen pikler oluşabilir. Bu pikler yardımıyla örneğin sıcaklık parametreleri olan kristalleşmeye başladığı sıcaklık (T_s), kristalleşme pik sıcaklığı (T_p), kristalleşmenin bitiş sıcaklığı (T_f) hakkında bilgi alınabilir. Şekil 2b incelendiğinde ısıtma hızlarına bağlı olarak ekzotermik pikin şiddetinin arttığı ve pik maksimum değerinin yüksek sıcaklıklara doğru kaydığı görülmektedir. Bu kaymadan yararlanarak, Avrami parametresi, entalpi değişimi ve aktivasyon enerjileri hesaplanabilir [14].



Şekil 2. DTA Eğrileri a) Tipik DTA eğrisi b) Farklı ısıtma hızlarındaki DTA eğrileri

Avrami Parametresi

Elde edilen kristalleşme piklerinden faydalanılarak hesaplanan Avrami parametresi (n), cam örneklerde kristal büyümesi hakkında önemli bilgiler verir. Hesaplamalar sonucunda elde edilecek olan n değerleri farklı kristalleşme mekanizmalarına karşılık gelir. Xie ve Gao'ya göre; $n=1$; yüzeysel çekirdeklenme ve tek boyutta, $n=2$; hacimsel çekirdeklenme ve tek boyutta, $n=3$; hacimsel çekirdeklenme ve iki boyutta, $n=4$; hacimsel çekirdeklenme ve üç boyutta, büyüme olduğu anlamına gelmektedir [15]. n değerleri;

$$n = - \frac{d[\ln(-\ln(1-\phi))]}{d\ln(\beta)} \quad (1)$$

Eş. 1'deki Ozawa Eşitliği'nden hesaplanabilir [16]. Burada β ısıtma hızıdır ($5, 10, 15, 20 \text{ K dk}^{-1}$). Dönüşüm oranı olarak adlandırılan ϕ ise, Şekil 2'deki gibi farklı ısıtma hızlarındaki kristalleşme piklerinden keyfi olarak alınan ortak bir sıcaklık değerine kadar olan alanın (A_x), pikin toplam alanına (A) oranı ($\phi=A_x/A$) şeklinde hesaplanabilir. Ayrıca Ozawa Eşitliği'ndeki $\ln(-\ln(1-\phi))$ karşılık $\ln\beta$ grafiğinin eğimi, n değerini verir [15].

Aktivasyon enerjisi

Farklı ısıtma hızları ile ekzotermik pik sıcaklık değerlerindeki kaymalar aktivasyon enerjisi hesaplamalarında kullanılabilir [17]. Kristalleşme aktivasyon enerjisini hesaplamak için Kissinger, Takhor ve Augis-Bennet yöntemleri kullanılmıştır. Bu üç yöntem de Johnson-Mehl-Avrami eşitliği esas alınarak geliştirilmiştir [18]. Hazırlanan örneklerin aktivasyon enerjileri Kissinger yöntemi ile;

$$\frac{d\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right)}{d\left(\frac{1}{T_p}\right)} = -\frac{E_a}{RT_p} \quad (2)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır [19,20]. Burada E_a , aktivasyon enerjisi, R gaz sabitidir ($R=8,314$ j/molK). $\ln(\beta/T_p^2)$ nin $1000/T_p$ 'ye karşılık grafiğinin eğimi aktivasyon enerjisine eşit olacaktır.

Aktivasyon enerjisini hesaplamak için diğer bir yöntem ise Takhor yöntemidir. Takhor'a göre aktivasyon enerjisi;

$$\frac{d\ln(\beta)}{d\left(\frac{1}{T_p}\right)} = \frac{E_a}{R} \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanır [21]. Burada da $\ln\beta$ 'nin $-(1000/T_p)$ 'ye karşılık gelen doğrunun eğimi Takhor metoduna göre aktivasyon enerjisini vermektedir.

Diğer bir aktivasyon enerjisi hesaplama yöntemi ise Augis-Bennet'tir. Bu yöntemde göre aktivasyon enerjisi ise;

$$\frac{d\ln\left(\frac{\beta}{T_p-T_0}\right)}{d\left(\frac{1}{T_p}\right)} = -\frac{E_a}{R} \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanır [22]. Buradaki T_0 mutlak sıcaklıktır. Bu yöntemde de $\ln(\beta/(T_p-T_0))$ 'nin $(1000/T_p)$ 'e karşılık gelen doğrunun eğimi aktivasyon enerjisini vermektedir.

2.3. Termogravimetrik Analiz

TGA'da, örneğin ısıtılması ya da sabit bir sıcaklıkta tutulması sırasında kütledeki değişiklikler, zamanın veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülür. Ölçümlerde kütle değişiklikleri örnekte oluşan buharlaşma, süblimleşme, ayrışma, oksitlenme, gaz alışıverışı gibi olaylar ile oluşan ekzotermik veya endotermik reaksiyonların sonucunda oluşabilir.

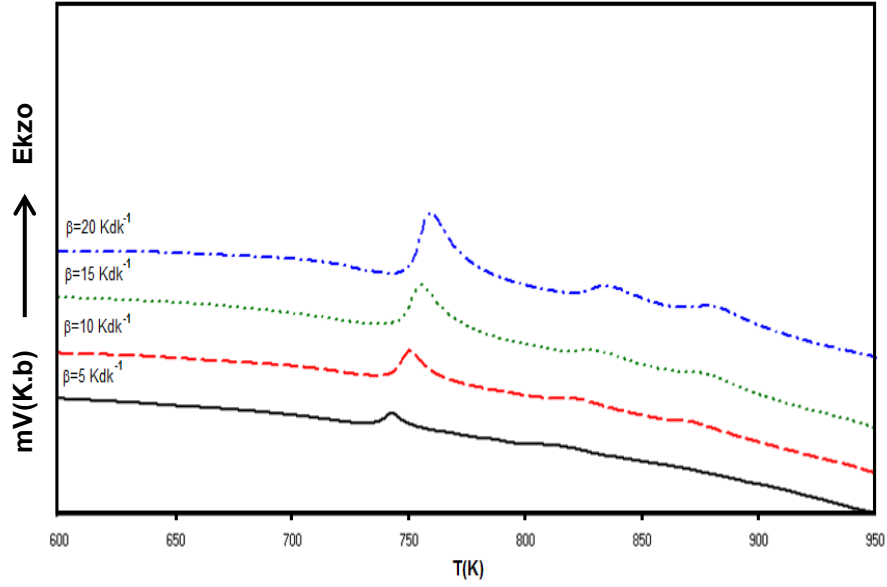
Toplam kütle kazancı TGA eğrisinin maksimum olduğu değer ile minimum olduğu değer arasındaki farktır. Malzemeye ait birim sıcaklık başına kütle kazancı ($\Delta m/\Delta T$), birim zamanda kütle kazancı ($\Delta m/\Delta t$) olarak hesaplanabilir. Eğer malzemede kütle artışı söz konusu ise ve bu kütle artışının oksitlenmeden kaynaklandığı biliniyorsa; birim sıcaklık ve oksijen atomu başına kütle kazancı ($(\Delta m/\Delta T).m_{O_2}$), birim zaman ve oksijen atomu başına kütle kazancı da ($(\Delta m/\Delta t).m_{O_2}$) olarak hesaplanabilir [13].

Bu çalışmada, 10-20 mg arasında A, B, C ve D yığın örneklerinin termal özellikleri, EXSTAR 1200 DTA/TG cihazı ile oksijen gazı akışı altında incelenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS & DISCUSSION)

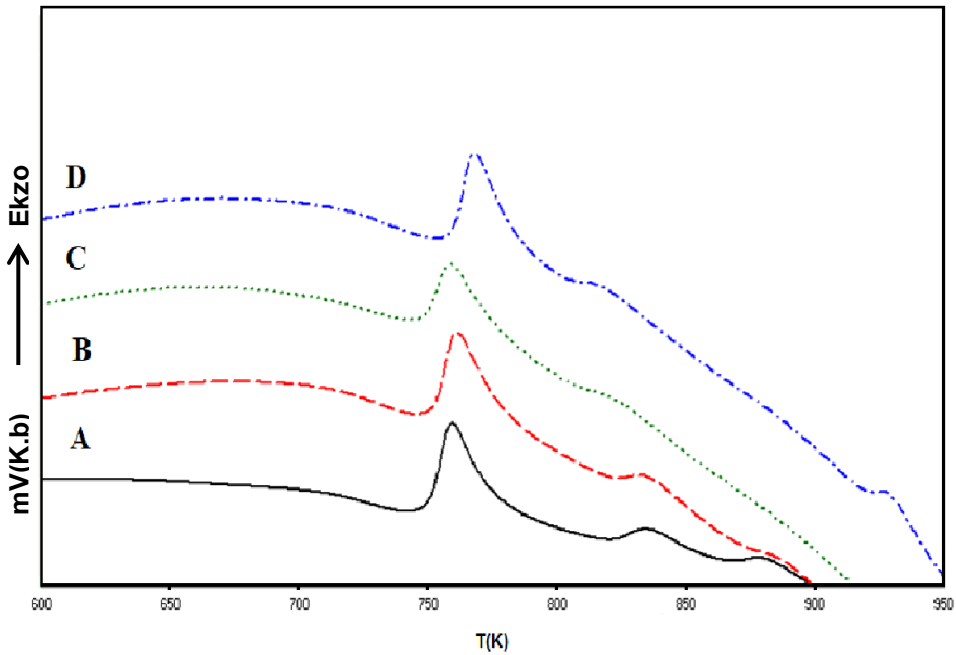
A örneğinin 5, 10, 15, 20 Kdk⁻¹ ısıtma hızlarında alınmış DTA eğrileri Şekil 3'te görülmektedir. Isıtma hızı artırıldığında T_s , T_p , pik genişliği ve pik yüksekliğinin arttığı görülmektedir. Bu artış, birim zamanda verilen yüksek miktardaki enerjinin örnek içerisindeki atomların hareketliliğini artırmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca ısıtma hızları artırıldığında pik noktasının yüksek sıcaklıklara doğru kaydığı görülür. Bu durumun, örneğin çekirdeklenme oranından dolayı kaynaklandığı söylenebilir. Yani, ısıtma

hızının düşük olduğu durumlarda enerji depolama süresi artacağından, örnekteki çekirdeklenme oranı da artacaktır. Bununla birlikte ısıtma hızı yüksek olduğunda ise çekirdeklenme için gerekli olan enerji süresi hızlı bir şekilde geçileceği için çekirdeklenme oranı azalacaktır. Böylece, örnekte kristalleşme için gerekli olan enerjinin daha yüksek sıcaklıklarda sağlanacağı ifade edilebilir.



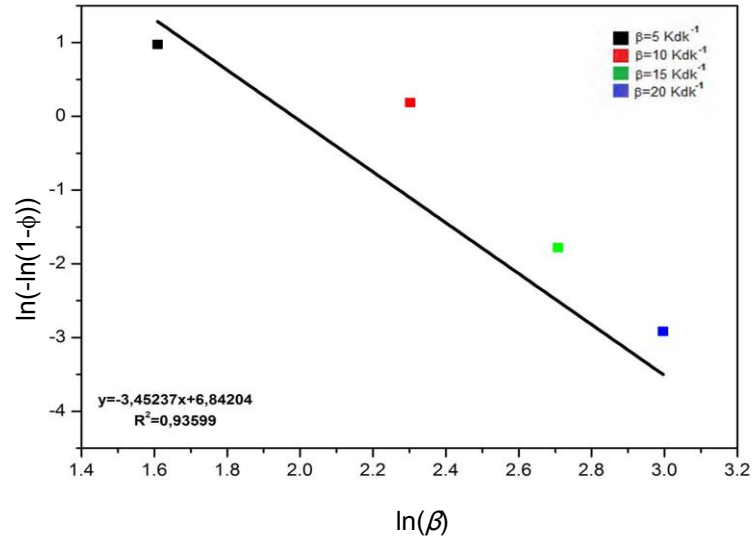
Şekil 3. A örneğinin farklı ısıtma hızlarındaki DTA eğrileri

A, B, C ve D örneklerinde meydana gelen kristalleşme pik sıcaklığının değişimini incelemek için örneklere ait 20 Kdk^{-1} ısıtma hızındaki DTA eğrileri Şekil 4'te görülmektedir. Burada, C örneğinde ihmal edilebilecek derecedeki küçük bir düşüş haricinde genel olarak yer değiştirme oranı arttıkça kristalleşme sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. A, B, C ve D örnekleri için 20 Kdk^{-1} ısıtma hızında DTA eğrileri

DTA ölçümlerinden elde edilen kristalleşme pik sıcaklık değerleri kullanılarak hesaplanan Avrami parametresi, cam örneklerin kristalleşme sürecinde kristal büyümeleri hakkında bilgi verir. Eş. 1’de verilen Ozawa eşitliğine göre, $\ln(-\ln(1-\phi))$ ’ye karşılık gelen $\ln\beta$ grafiği çizildiğinde, elde edilen doğrunun eğimi Avrami parametresini verir. A örneği için Avrami parametresi 3,45 (Şekil 5), B örneği için 2,82, C örneği için 2,25 ve D örneği için ise 2,58 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, A örneğinde hacimsel çekirdeklenme ve üç boyutlu büyüme gerçekleşirken, B, C ve D örneklerinde ise hacimsel çekirdeklenme ve iki boyutlu büyüme gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu da bize, Bi-Ga kısmi yer değiştirme oranı arttıkça genel olarak yüzeysel çekirdeklenmenin hacimsel çekirdeklenmeden daha baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Ozawa yöntemine göre A örneği için $\ln(-\ln(1-\phi))-\ln\beta$ grafiği

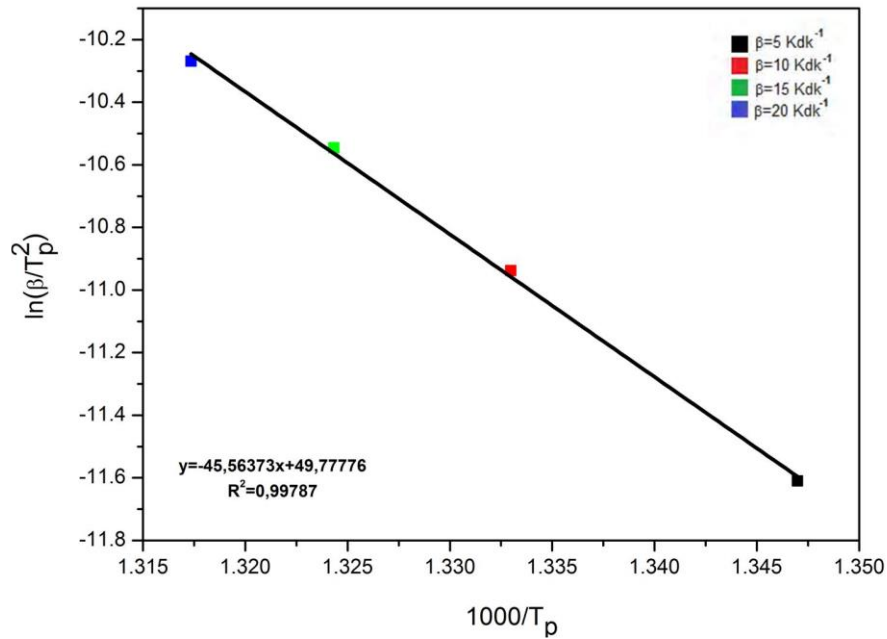
A, B, C ve D örneklerine ait DTA eğrilerinden elde edilen termal parametreler Tablo 1’de görülmektedir. Isıtma hızının artmasıyla bütün örneklerin T_s ve T_p değerlerinin yüksek sıcaklıklara kaydığı görülmektedir. B örneği hariç A, C ve D örneklerinde ısıtma hızıyla beraber pikin genişlediği, aynı ısıtma hızlarında örnekler birbiri ile kıyaslandığında B örneği hariç, T_s , T_p değerleri yer değiştirme oranının artmasıyla artmaktadır.

Bir örnekte kristalleşmenin gerçekleşebilmesi için gerekli olan minimum düzeydeki enerji miktarına kristalleşme aktivasyon enerjisi denir. Tablo 1’de verilen DTA analiz sonuçları kullanılarak Kissinger, Takhor, Augis-Bennet yöntemleri yardımı ile A, B, C ve D örneklerine ait aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.

Örneklerin Kissinger yöntemine göre aktivasyon enerji değerleri Eş. 2 kullanılarak, DTA analiz sonuçlarına göre $\ln(\beta/T_p^2)-1000/T_p$ grafiği çizildiğinde, karşılık gelen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. Grafiklerde dört ısıtma hızında da $\ln(\beta/T_p^2)-1000/T_p$ arasında lineer bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir. Kissinger yöntemi kullanılarak, Şekil 6’daki eğrilerin eğiminden A örneğinin aktivasyon enerjisi 378,83 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Yine aynı yöntem ile B, C, D örneklerinin aktivasyon enerjileri sırasıyla; 380,41; 365,60; 359,42 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

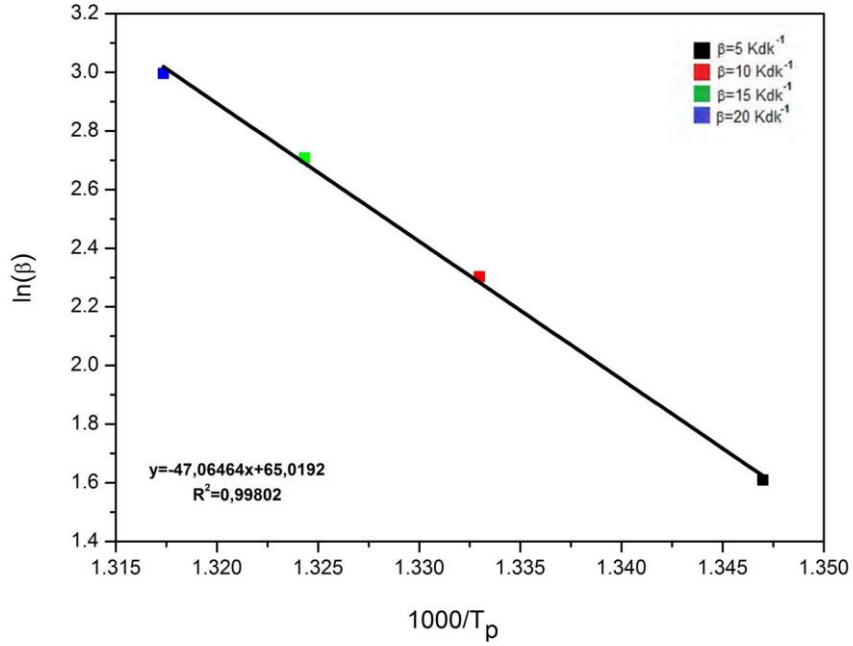
Tablo 1. A, B, C ve D örnekleri için DTA eğrilerinden hesaplanan parametreler

| Örnekler | β (Kdk ⁻¹) | T _s (K) | T _p (K) | $\phi=A_x/A$ | Avrami Parametresi (n) |
|----------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|------------------------------|
| A | 5 | 732,6 | 742,4 | 0,94 | 3,45 |
| | 10 | 738,3 | 750,2 | 0,40 | |
| | 15 | 739,8 | 755,1 | 0,11 | |
| | 20 | 742,4 | 759,1 | 0,02 | |
| B | 5 | 730,7 | 744,3 | 0,05 | 2,82 |
| | 10 | 740,2 | 751,8 | 0,16 | |
| | 15 | 745,2 | 756,6 | 0,70 | |
| | 20 | 746,6 | 761,1 | 0,93 | |
| C | 5 | 734,6 | 741,5 | 0,52 | 2,52 |
| | 10 | 738,8 | 749,0 | 0,14 | |
| | 15 | 743,6 | 754,4 | 0,06 | |
| | 20 | 745,0 | 758,7 | 0,02 | |
| D | 5 | 744,2 | 750,3 | 0,60 | 2,58 |
| | 10 | 749,2 | 757,6 | 0,09 | |
| | 15 | 752,0 | 763,8 | 0,09 | |
| | 20 | 754,9 | 768,0 | 0,02 | |



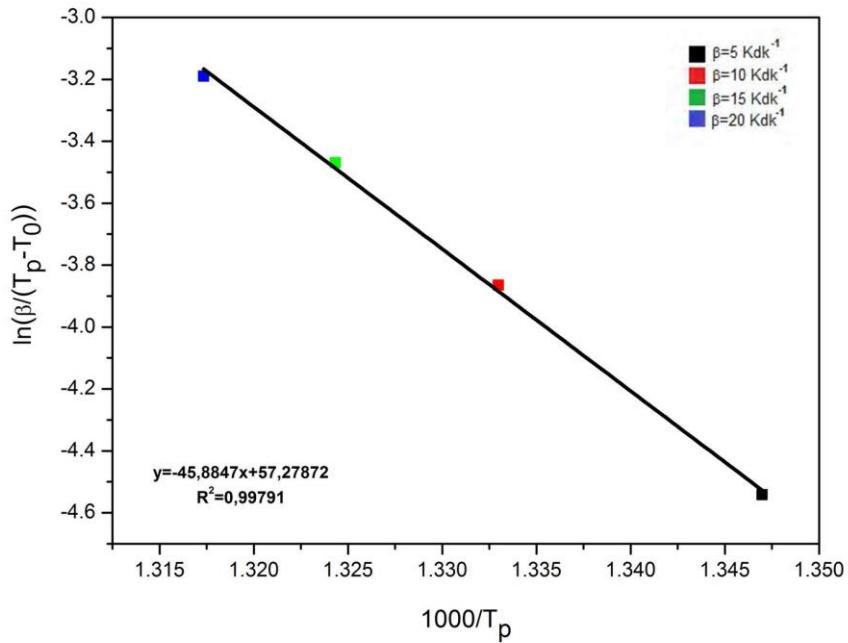
Şekil 6. Kissinger yöntemine göre A örneği için $\ln(\beta/T_p^2)$ - $1000/T_p$ grafiği

Aktivasyon enerjisi hesaplanmasında kullanılan diğer bir yöntem olan Takhor yöntemi ile Eş. 3 kullanılarak A, B, C ve D örnekleri için enerji değerleri hesaplanmıştır. Tüm örnekler için ayrı ayrı $\ln(\beta)$ - $1000/T_p$ grafiği çizildiğinde, karşılık gelen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Takhor yöntemine göre, Şekil 7'deki eğrinin eğiminden A örneğinin aktivasyon enerjisi 391,31 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Yine aynı yöntem ile B, C ve D örneklerinin aktivasyon enerjileri sırasıyla 392,92; 378,07; 372,04 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. Takhor yöntemine göre A örneği için $\ln(\beta)$ - $1000/T_p$ grafiği

Augis-Bennet yöntemiyle Eş. 4 kullanılarak enerji değerleri hesaplanmıştır. A, B, C, D örnekleri için tüm ısıtma hızlarında $\ln(\beta/T_p - T_0) - 1000/T_p$ 'ye karşılık gelen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Augis-Bennet yöntemine göre, Şekil 8'deki eğrinin eğiminden A örneğinin aktivasyon enerjisi 381,50 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. B, C ve D örneklerinin aktivasyon enerjileri sırasıyla; 383,10; 368,26; 362,18 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8. Augis-Bennet yöntemine göre A örneği için $\ln(\beta/T_p - T_0) - 1000/T_p$ grafiği

Tablo 2'de Kissinger, Takhor ve Augis-Bennet yöntemleri ile DTA eğrilerindeki kristalleşme pikleri için aktivasyon enerji değerleri listelenmiştir. Bu aktivasyon enerjilerinde, Kissinger ve Augis-Bennet yöntemleri +3 kJ/mol'lük bir değerle birbirine yakın sonuçlar vermesine rağmen, Takhor yönteminden elde

elden değerlerde Kissinger'e göre yaklaşık olarak 13 kJ/mol, Augis-Bennet'e göre ise 9-10 kJ/mol kadar bir artış hesaplanmıştır. Her yöntem için hesaplamalar kendi arasında tutarlılık ve paralellik göstermektedir.

Yapılan hesaplamalarda, A örneğine göre B örneği her yöntemde de 1-2 kJ/mol artış göstermiştir. Bu da B örneğinin A'ya göre çok az da olsa termal olarak kararlı yapıda olduğunu ve kristalleşme için 1-2 kJ/mol kadar daha fazla enerjiye ihtiyaç duyacağını göstermektedir. Diğer taraftan, A örneğine göre C ve D örneklerinin enerji değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Buradan da C ve D örneklerinin A ve B'ye göre termal olarak daha kararsız yapıda olduğu ve kristalleşme için daha az enerjiye ihtiyaç duyacağı sonucu çıkarılabilir [23,24].

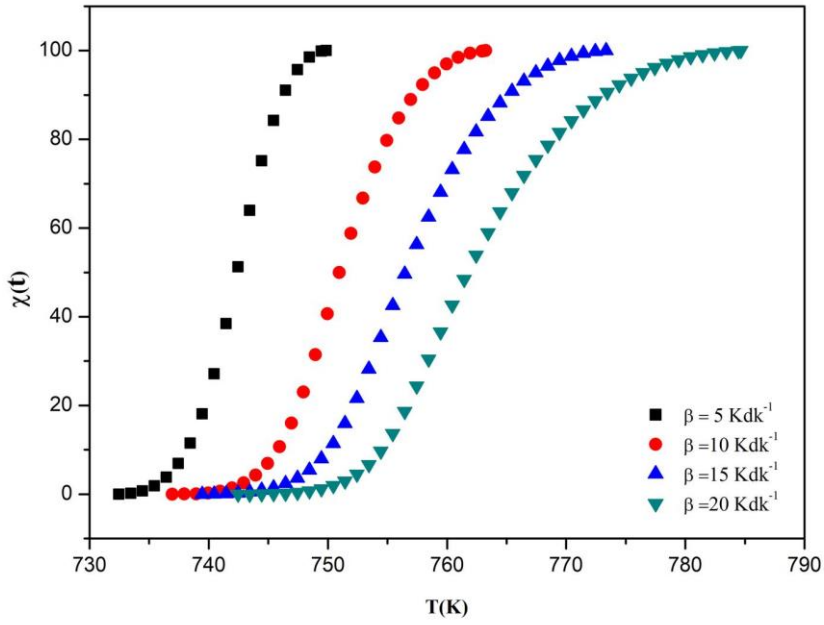
Sonuç olarak; B örneği için aktivasyon enerjisi az da olsa artış göstermiş ve Bi-Ga kısmi yer değiştirme arttıkça aktivasyon enerjisi düşmeye başlamıştır. Camlarda, kristalleşme ve cam geçiş sıcaklığı arasındaki fark, cam kararlılığını verdiği bilindiğine göre aktivasyon enerjisinin yüksek olması örnekteki fazın kararlılık derecesini göstermektedir [24]. Burada B örneği diğerlerine göre daha kararlı yapıya sahiptir. B örneğinin küçük orandaki artışı göz ardı edildiğinde Ga yer değiştirme miktarı arttığında aktivasyon enerjisinin azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür [23,24].

Tablo 2. A, B, C, D örnekleri için aktivasyon enerji değerleri

| Örnekler | Kissinger Metodu (kJ/mol) | Takhor Metodu (kJ/mol) | Augis-Bennet Metodu (kJ/mol) |
|----------|---------------------------|------------------------|------------------------------|
| A | 378,83 | 391,31 | 381,50 |
| B | 380,41 | 392,92 | 383,10 |
| C | 365,60 | 378,07 | 368,26 |
| D | 359,42 | 372,04 | 362,18 |

Elde edilen değerler daha önce yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında; katkısız örneklerdeki aktivasyon enerjilerinin en yüksek olduğu, PbSe ve PbO+Se katkılama çalışmalarında aktivasyon enerjilerin katkı arttıkça azaldığı [26,27] ve RuPb katkılama çalışmasında ise ilk katkıyla birlikte katkısız örneğe göre azaldığı, ancak katkı arttıkça artmaya başladığı [28] görülmektedir. Buradaki çalışmalarda da, görülüyor ki katkılı örnekler katkısız örneklere göre daha katkıya göre daha kararsız yapıda olabilir.

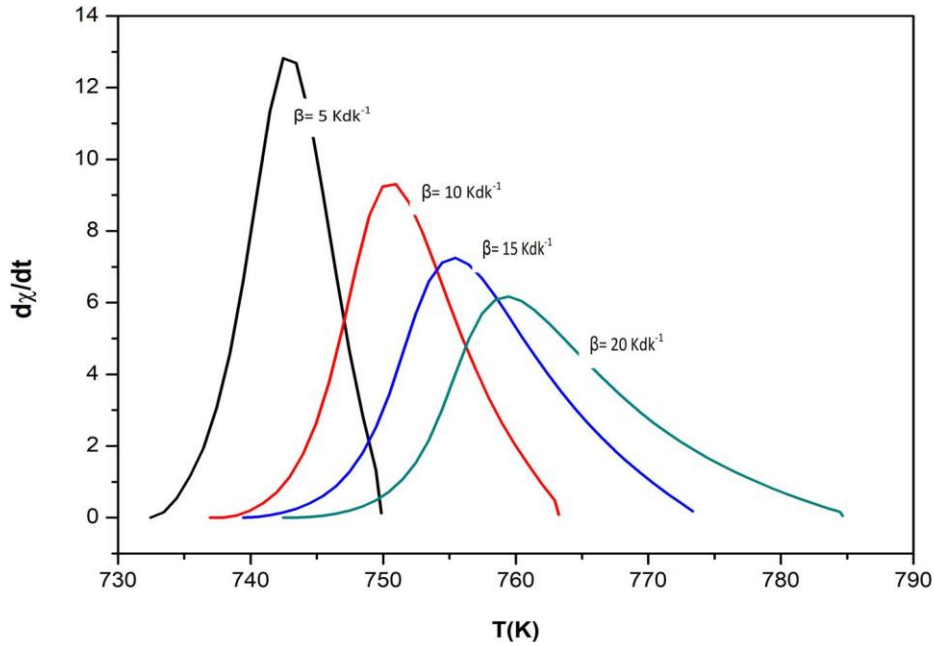
Hazırlanan örnekler için farklı ısıtma hızlarında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 9'daki A örneğinin kristalleşme kesri eğrisi incelendiğinde, kristalleşme bütün ısıtma hızlarında yaklaşık olarak aynı sıcaklıklarda başlamasına rağmen kristalleşmenin sona erdiği sıcaklık değerleri ısıtma hızının artması ile daha yüksek sıcaklıklara çıktığı görülmüştür.



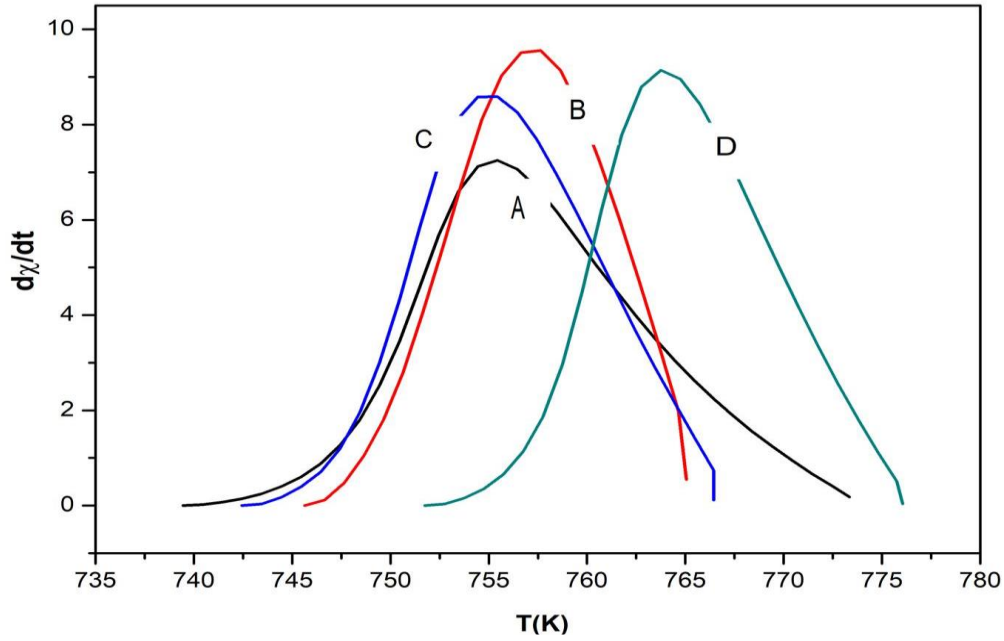
Şekil 9. A örneği için farklı ısıtma hızlarında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kristalleşme kesri

Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak verilen Şekil 10'daki A örneğinin kristalleşme hızı eğrileri ise bize, yüksek ısıtma hızlarında kristalleşmenin daha hızlı olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalarla da uyumludur [29,30].

Sıcaklığın fonksiyonu olarak kristalleşme hızı grafikleri tüm örnekler için incelendiğinde ise, Bi-Ga kısmi yer değiştirme oranının artmasıyla kristalleşme hızının da arttığı görülmüştür (Şekil 11).



Şekil 10. A örneği için farklı ısıtma hızlarında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kristalleşme hızı



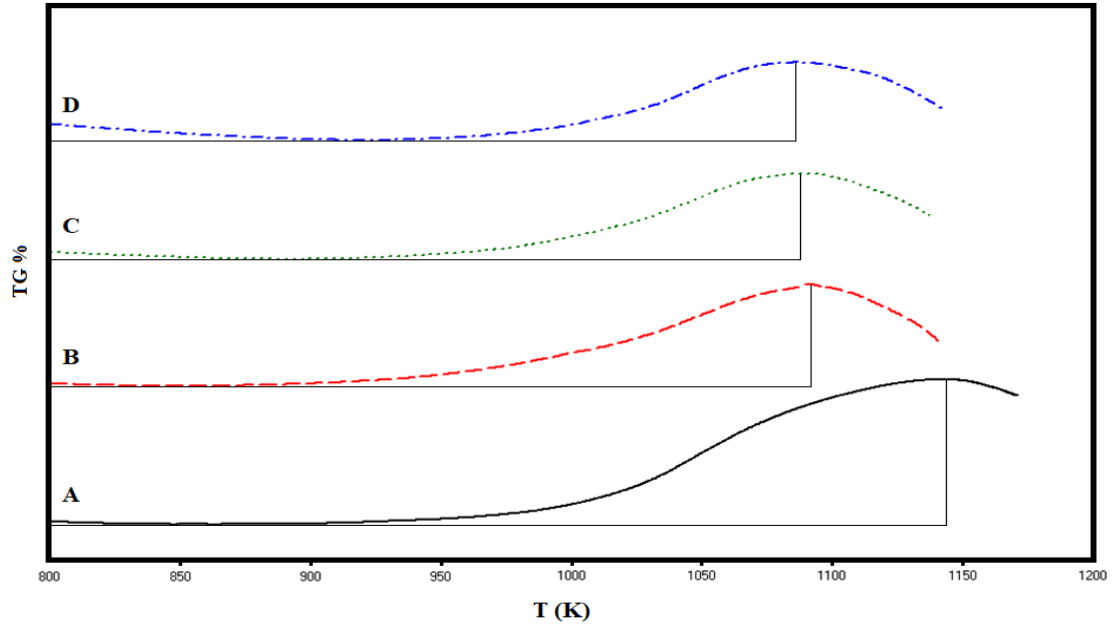
Şekil 11. A, B, C, D örnekleri için 15 Kdk^{-1} farklı ısıtma hızında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kristalleşme hızı

Örneklerin 5, 10, 15, 20 Kdk^{-1} ısıtma hızlarındaki yüzdesel olarak kütlelerindeki değişim (TG%-T) tespit edilmiştir. Örneklerin başlangıçtaki kütleleri %100 olarak alınırsa artan sıcaklık ile kütlede yüzde olarak artma ya da azalma olacaktır. Analizlerin oksijen akışı altında yapıldığından dolayı örneklerin oksitlenmesi ile birlikte örneklerde kütleli bir artış olacaktır.

Şekil 12. de 20 Kdk^{-1} sabit ısıtma hızında A, B, C, D örneklerine ait (TG%-T) eğrilerinden elde edilen sayısal veriler kullanılarak yapılan hesaplama sonuçları Tablo 3’de verilmiştir. Şekil 12. incelendiğinde A, B, C, D örnekleri kütle kazancına sırasıyla; 905, 877, 927, 931 K civarında başlayıp 1144, 1094, 1087, 1086 K’da sona ermiştir. Diğer ısıtma hızlarında örneklerin davranışları incelendiğinde, örnekler ortalama olarak 900 K civarında oksitlenme ile kütle kazancına başladığı ve 1100 K civarında da kütle kaybetmeye başladığı söylenebilir. Ayrıca, A, B, C ve D örnekleri için 5, 10, 15, 20 Kdk^{-1} ısıtma hızlarındaki toplam kütle kazancı (Δm), birim sıcaklıkta toplam kütle kazancı ($\Delta m / \Delta T$), birim zamanda toplam kütle kazancı ($\Delta m / \Delta t$), birim zamanda birim oksijen atomunda toplam kütle kazancı ($(\Delta m / \Delta t) \cdot m_{O_2}$) ve birim sıcaklıkta birim oksijen atomunda kütle kazancı ($(\Delta m / \Delta T) \cdot m_{O_2}$) sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda, A örneği 5 Kdk^{-1} ısıtma hızındaki toplam kütle kazancı $3,06 \times 10^{-3} \text{ g}$, 20 Kdk^{-1} ısıtma hızında ise $5,79 \times 10^{-3} \text{ g}$, olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, B, kütle kazancında A örneğine göre düşüş yaşarken, Bi-Ga kısmi yer değiştirme oranının artırıldığı, C ve D örneklerinde toplam kütle kazançlarında artış olduğu görülmektedir. Buradan da genel olarak, yer değiştirme oranı ile birlikte ısıtma hızı artırıldığında toplam kütle kazancında bir artış olduğu söylenebilir.

Öte yandan; örneklerin birim sıcaklıkta toplam kütle kazancı, birim zamanda toplam kütle kazancı, birim zamanda birim oksijen atomunda toplam kütle kazancı ve birim sıcaklıkta birim oksijen atomunda kütle kazancında da B örneği A örneğine göre düşüş yaşarken yer değiştirme ve ısıtma hızının artmasıyla bu sonuçlarda da artma olduğu görülmektedir.



Şekil 12. A, B, C, D örnekleri için 20 Kdk⁻¹ ısıtma hızında TGA eğrileri.

Tablo 3. A, B, C, D örnekleri için TGA sonuçları

| Örnek | Isıtma Hızı (β) | Toplam Kütle Kazancı Δm(g) (x10 ⁻³) | Birim Sıcaklık Başına Kütle Kazancı Δm/ΔT (g/K) (x10 ⁻³) | Birim Zamanda Kütle Kazancı Δm/Δt (g/s) (x10 ⁻³) | Birim Sıcaklıkta Birim O ₂ Atomu Başına Kütle Kazancı (Δm/ΔT).Mo ₂ (Atom/K) (x10 ⁻²⁶) | Birim Zamanda Birim O ₂ Atomu Başına Kütle Kazancı (Δm/Δt).Mo ₂ (Atom/s) (x10 ⁻²⁶) |
|-------|-----------------|---|--|--|---|--|
| A | 5 | 3,06 | 0,31 | 1,49 | 0,83 | 3,95 |
| | 10 | 3,89 | 0,24 | 3,16 | 0,65 | 8,41 |
| | 15 | 3,64 | 0,24 | 3,50 | 0,63 | 9,31 |
| | 20 | 5,79 | 0,35 | 6,89 | 0,92 | 18,34 |
| B | 5 | 2,46 | 0,18 | 0,92 | 0,48 | 2,46 |
| | 10 | 2,50 | 0,22 | 2,29 | 0,57 | 6,10 |
| | 15 | 4,19 | 0,37 | 5,74 | 0,98 | 15,27 |
| | 20 | 6,24 | 0,43 | 9,31 | 1,14 | 24,77 |
| C | 5 | 2,88 | 0,42 | 2,17 | 1,11 | 5,76 |
| | 10 | 5,30 | 0,52 | 5,46 | 1,38 | 14,53 |
| | 15 | 6,78 | 0,63 | 8,37 | 1,67 | 22,27 |
| | 20 | 5,05 | 0,37 | 8,02 | 0,98 | 21,32 |
| D | 5 | 2,63 | 0,43 | 2,27 | 1,15 | 6,03 |
| | 10 | 6,41 | 0,76 | 8,01 | 2,03 | 21,31 |
| | 15 | 5,89 | 0,50 | 7,96 | 1,33 | 21,17 |
| | 20 | 7,51 | 0,57 | 12,52 | 1,52 | 33,29 |

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada; $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ ($x= 0; 0,025; 0,1; 0,2$) örnekleri $5, 10, 15, 20 \text{ Kdk}^{-1}$ ısıtma hızlarında termal özelliklerini incelemek üzere DTA eğrileri elde edildi. Bütün örneklerin DTA eğrilerinde ısıtma hızının artmasıyla kristalleşme sıcaklığında yüksek sıcaklık bölgelerine kayma görüldü. DTA eğrilerindeki kristalleşme pikleri kullanılarak her örnek için ayrı ayrı hesaplanan Avrami parametresinde, A örneği için 3,45; B için 2,82; C için 2,25 ve D örneği için ise 2,58 olarak hesaplandı. Bu sonuçlar neticesinde A örneğinde yüzeyden içe doğru hacimsel çekirdeklenme ve üç boyutlu büyüme, diğer tüm örneklerde ise yine yüzeyden içe doğru hacimsel çekirdeklenme ve iki boyutlu büyüme gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bi-Ga kısmi yer değiştirme oranı arttıkça yüzeysel çekirdeklenmenin hacimsel çekirdeklenmeden daha baskın olduğu görüldü. Ayrıca da C ve D örneklerinin A ve B'ye göre termal olarak daha kararsız yapıda olduğu ve kristalleşme için daha az enerjiye ihtiyaç duyacağı sonucu çıkarılabilir [23,24]. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak çizilen A örneğinin kristalleşme hızı eğrileri ise bize, yüksek ısıtma hızlarında kristalleşmenin daha hızlı olduğunu göstermektedir Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalarla da uyumludur [29,30].

DTA eğrilerindeki kristalleşme pikleri yardımı ile Aktivasyon enerjisi hesabında kullanılan Kissinger, Takhor ve Augis-Bennet yöntem sonuçlarının kendi içerisinde tutarlılık ve paralellik gösterdiği görüldü. Her üç yöntemde A örneğine göre, B örneğinin aktivasyon enerjisi 1-2 kJ/mol kadar artış göstermiş ancak Bi-Ga kısmi yer değiştirme oranı arttıkça bu enerji seviyesi düşmeye başlamıştır. Bu azalmanın sebebi olarak, yüksek enerji seviyesine sahip olan örneklerin düşük enerji seviyesine sahip olan örneklere göre termal olarak daha kararlı yapıda olduğu söylenebilir. Alınan TGA değerlerinden ise hazırladığımız örneklerde kütle kazancı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise BSCCO yapısı içerisinde oksijen tutmaya elverişli atomların bulunmasıdır. TGA eğrilerinden Bi-Ga kısmi yer değiştirme oranı ve ısıtma hızı artırıldığında kütle kazancında bir artma olduğu söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 05/2016-05 no'lu proje ile Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] McMillan, P.W. (1979). Glass-Ceramics (Second Edition). London: Academic Press, 1-266.
- [2] Lewis, M. H. (1989). Glasses and Glass-Ceramics. Chapman and Hall, London, 42-58.
- [3] Leidreiter, P. G., Durschang, B., Kolb, U., SEXTL, G., Crystal structure determination of a new LaPO_4 phase in a multicomponent glass ceramic via 3D electron diffraction, *Ceramics International*, 48, 3, 3790-3799, (2022).
- [4] Deng, L., Fu, Z., Mingxing, Z., Li, H., Yao, B., He, J., Chen, H., Ma, Y., Crystallization, structure, and properties of $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$ co-doped $\text{MgO-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass-ceramics, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 121217, (2022)
- [5] Guo, X., Cai, X., Song, J., Yang, G., Yang, H., Crystallization and microstructure of $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass-ceramics containing complex nucleation agents, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 405, 63-67, (2014)
- [6] Kumar, A., Mariappan, C.R., A new biocompatible phosphate free mesoporous calcium borosilicate glass-ceramics for medical application, *Materials Letters* 305, 130752, (2021)

- [7] Koralay H., Hicyilmaz O. Cavdar S. Ozturk O. Tasci A.T. Experimental and theoretical approaches on thermal and structural properties of Zn doped BSCCO glass ceramics, *Materials Science*, 34, 1, 25 – 321, (2016).
- [8] Özkurt, B. (2007). Nd ve Gd katkılı BSCCO cam seramik süperiletken sisteminin fiziksel ve iletim özellikleri. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Adana.
- [9] Komatsu, T., Sato, R., Imai, K. and Yamashita, T., High-Tc superconducting glass ceramics based on the Bi-Ca-Sr-Cu-O system. *Japanese Journal Of Applied Physics*, 27(4), 550, (1988).
- [10] Weast, R.C., Astle M.J.. (1982), *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC press, London
- [11] Altın, S., Aksan, M.A., Yakinci, M.E., Fabrication of single crystalline Bi-2212 whiskers from Ga added; Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x composition and their thermal, structural, electrical and magnetic properties, *Materials Chemistry and Physics*, 133, 2–3, 706-712, (2012).
- [12] Dimesso, L., Matsubara, I., Ogura, T., Funahashi, R., Yamashita, H., Tampieri A., Effect of the Ga-doping on the growth and superconducting properties of the Bi₂Sr₂CaCu₂O_y whiskers, *Physica C*, 235, 473-474, (1994).
- [13] Balcı, Y., Ceylan, M., Aksan, M.A. and Yakinci, M. E., Oxidation behavior of Bi(Pb,Ga)SrCaCuO system. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 24, 511, (2011).
- [14] Li Zhang, Huan Xiao, Shun Li, Liming Xu, Bingge Zhao, Qijie Zhai, Yulai Gao, Revealing the crystallization kinetics and phase transitions in Mg₆₅Zn₃₀Ca₅ metallic glass by nanocalorimetry *Journal of Alloys and Compounds Volume 899*, 5 April 2022, 163353
- [15] Xie, X. and Gao, H.. Calorimetric studies on the crytallization of Li₂S-B₂O₃ glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, (240); 166-176, (1998)
- [16] Ozawa, T., Kinetic analysis of derivative curves in thermal analysis. *Journal Thermal Analysis*, (2); 301, (1970).
- [17] Koralay, H. (2007). Farklı Oranlarda Vanadyum Katkısı yapılmış Bi-Tabanlı Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerinin Üretimi, Yapısal ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 53, 54, 115
- [18] Avrami, M., Kinetics of phase changes 1. general theory, *Journal of Chemical Physics*, 7(12); 1103-1112, (1939).
- [19] Kissinger, H.E., Variation of peak temperature with heating rate in differential thermal analysis. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 57 (4); 217-221, (1956).
- [20] Kissinger, H., Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis. *Anal.Chem.*, 29, 1703, (1957).
- [21] Takhor, R.L., Advances in nucleation and crystallization of glasses. Ohio: The American Ceramics Society, 166-172, (1972).
- [22] Augis, J.A. and Bennett, J.D., Calculation of the Avrami Parameters for heterogeneous solid state reactions using a modification of the Kissinger Method. *Journal of Thermal Analysis*, 13(2), 283-292, (1978).
- [23] Arslan, A., Koralay, H., Çavdar, Ş. and Günen, A., Crystallization kinetic studies on Bi_{1.75}Pb_{0.25}Sr₂Ca₂Cu_{3-x}Sn_xO_y glass-ceramic by using non-isothermal technique. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358, 1190–1195, (2012).

- [24] Altin, S., Effects of SnO on growth and physical properties of BSCCO whiskers . Energy Materials: Materials Science and Engineering for Energy Systems, (5) 1125-1131, (2012).
- [25] Mahedevan, S. G., Calorimetric Measurements on As-Sb-Se Glasses. J. of Non-Crystalline Solids , (88) 11-34, (1986).
- [26] Cavdar, Ş. , Deniz, E., Koray, H. , Ozturk, O., Erdem, M., Gunen, A., The Effect of PbSe Addition on the Mechanical Properties of Bi-2212 Superconductors, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 25, 2297–2307, (2012).
- [27] Koray H. , Kılıç G., Tuğluoğlu N., Çavdar Ş., (2017), Farklı Oranlarda PbO ve Se Katkısının Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O_x (BSCCO) Cam Seramik Sistemindeki Isıl Özelliklerine Etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, cilt.5, sa.1, ss.91-98.
- [28] Ozturk O., Gokcen T., Cavdar Ş. , Koray H. , Tasci A. T., A study on nucleation, crystallization kinetics, microstructure and mechanical properties of Ru-Bi partial substituted BSCCO glass ceramics, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 123, 1073–1082. (2016).
- [29] Qun Gao, Y. W., On The Crystallization Kinetics of Pd₈₀B₄Si₁₆ Glass. J. of Non-Cryst. Solids (81) 135, (1986).
- [30] Vasquez, J.W.-G., Glass Transition and Crystallization Kinetics in Sb_{0.18}As_{0.34}Se_{0.48} Glassy Alloy by Using Non-Isothermal Techniques . J. Non-Cryst. Solids, 235-237, 548-553, (1998).



Experimental Investigation on the Cooling Performance of a Counterflow Dew Point Evaporative Cooler

Ekrem ÖZDEN^{2,*} Mahmut Sami BÜKER^{2,3}

¹ SOLIMPEKS Solar Co., Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan University, Energy and Semiconductors Research Group, BITAM, Konya, Türkiye

³ Necmettin Erbakan University, Aeronautical Engineering, Konya, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 16.12.2021
Revision: 02.02.2022
Accepted: 13.02.2022

Keywords

Evaporative cooler
M-cycle
Experimental study
Dew point cooling

Abstract

In this study, an innovative indirect evaporative cooler is presented and experimentally analysed. Although there are many evaporative cooler designs, this study proposes a unique M-cycle type evaporative cooler with newly designed heat exchanger to enhance the cooling performance of indirect evaporative coolers. The prototype was assembled for the experimental investigation of the system and tested in the laboratory environment under the conditions of constant air flow rate of 350 m³/h, circulating water temperatures of 15 °C and 20 °C, inlet air temperatures of 25 °C and 30 °C and lastly inlet air humidity of 9g/kg and 13g/kg, respectively. Based on the data obtained during the experiments, calculations were performed for the cooling capacity, cooling efficiency, energy efficiency and exergy efficiency of the system for each case. The findings showed that the highest wet bulb effectiveness, dew point effectiveness and EER of evaporative cooler were found to be 0.91, 0.62, and 0.77, respectively.

| Nomenclature | | Subscripts | |
|---------------|-------------------------------------|------------|-----------------------|
| c_p | specific heat, J/g. °C | a | air |
| e | exergy, J/kg | da | dry air |
| \dot{m} | mass flow rate, kg/s | f | air supply |
| T | temperature, °C | db | dry bulb |
| I | exergy destruction, W | wb | wet bulb |
| i | enthalpy, J/kg | dp | dew point |
| P | consumed power, W | t | total |
| R | gas constant kJ/kgK | th | thermal |
| ρ | density, kg/m ³ | me | mechanical |
| \dot{Q} | cooling capacity, W | ch | chemical |
| W | humidity ratio, g/kg | p | process |
| \dot{V} | volume flow rate, m ³ /s | w | water |
| φ | relative humidity | o | restricted dead state |
| ε | effectiveness | oo | dead state |

| <i>Abbreviations</i> | |
|----------------------|------------------------------|
| <i>DEC</i> | Direct evaporative cooling |
| <i>IEC</i> | Indirect evaporative cooling |
| <i>EER</i> | Energy efficiency ratio |

1. INTRODUCTION

The ever-increasing use of technology and the desire to live in more comfortable environments substantially increase the use of air conditioning systems around the world. Consequently, excessive use of air conditioning systems is responsible for approximately 50% of the energy consumption in the building sector, which has a significant share of 30%-40% energy consumption [1]. Therefore, it is now more crucial to attempt to develop and use more efficient and environmentally friendly processes in air conditioning sector ever before. To reduce emissions from cooling processes and protect the ecosystem, high-energy efficiency “Green Cooling” technologies, which uses natural fluids such as water and air, should be widespread [2–4].

There are great quanta of studies have been performed in the existing literature showing that evaporative coolers are highly energy efficient and very environmentally friendly systems compared to conventional mechanical vapor compression cooling systems [5–6]. Although evaporative coolers are used in residential air conditioning, they can also be effectively used in foundries, livestock farms and greenhouses that needed moist air [7]. Evaporative cooling systems have simple principle based on the evaporation of water introduced into the air. In these systems, the latent heat required for the evaporation of water is taken from the sensible heat of the air. Due to heat and mass transfer, that decrease the air temperature, the cooling process is performed. Structurally, evaporative cooling systems are divided into two types as direct evaporative cooling (DEC) and indirect evaporative cooling (IEC) according to whether the product air is exposed to water or not [1].

Since the air is directly cooled in direct evaporative coolers, wet bulb effectiveness is usually high (80%-90%) in such systems [8]. Although the efficiency of DEC systems is relatively high, their implementations are limited especially in humid areas. They are less preferred due to reasons such as increasing the ambient humidity, causing corrosion of the materials and unsuccessfully meeting the human comfort conditions [9]. However, it is suitable for use in arid climatic regions as it provides comfort by humidifying the air [3]. Indirect evaporative coolers, on the other hand, can provide air-cooling without adding moisture to the product air. Unlike DEC systems, IEC systems have secondary channels and separate the air flow from the water flow. This advantage allows IEC systems to be used in humid areas. However, wet bulb efficiencies are relatively lower (55%-65%) than DEC systems [8]. In this context, to increase the efficiency of IEC systems and eliminate this drawback, a new type of heat exchanger design was introduced by Maisotsenko [10,11]. This design can cool the product air at levels close to the dew point below the wet bulb temperature, and known as M-cycle [12–14].

There are many studies have been conducted on M-cycle evaporative coolers. To exemplify a few, Zhao et al. [15] introduced an M-cycle based counter-flow heat and mass exchanger. In this design, part of the product air is directed to the wet channels through the holes at the end of the flow channels. It was observed that the cooling efficiency was substantially improved. The wet bulb effectiveness and the dew point effectiveness of the system were reached 1.3 and 0.9, respectively. Also, in another study, they presented a performance comparison of M-cycle type cross and counter flow indirect evaporative coolers. The results showed that the counter-flow system yielded 20% more cooling capacity, 15% higher wet bulb effectiveness, and 23% higher dew point effectiveness compared to the cross-flow system [16]. Additionally, a feasibility study of this proposed system was conducted for different regions of China and England. Because of these studies, it was stated that the M-cycle indirect evaporative cooling system can be used in regions where the relative humidity level is below 70% [17–18]. Zhan et al. [19] compared an M-cycle cross-flow cooler with a conventional cross-flow indirect evaporative cooler in a numerical study. It was proved that the wet bulb effectiveness and the cooling capacity of the M-cycle system were 16.7% and 15.7% higher, respectively. Rogdakis et al. [20] conducted a theoretical and experimental

study to evaluate the performance of an M-cycle indirect evaporative cooler under the prevailing climatic conditions of Greece. The findings revealed that the system with a wet bulb effectiveness between 97% and 115% can be used in most of the cities of Greece. Rianguilaikul et al. [21] presented changes in the cooling efficiency of an evaporative cooler system according to different temperatures and humidity values in their numerical study. For 35 °C of ambient air temperature 26.4 g/kg of humidity level, they found the wet bulb effectiveness as 1.09 and the dew point effectiveness as 0.86 and confirmed their results experimentally. Lei et al. [22] performed the exergy efficiency analysis of a counter-flow evaporative cooler operating on the M-cycle principle. Findings demonstrated that the exergy efficiency was 21% for 1 m duct length and 0.01 m duct width, 33.5 °C air inlet temperature, and 8.244-g/kg-specific humidity. Aydin et al. [23] evaluated the use of evaporative coolers with dryers in regions where the ambient relative humidity is more than 50%. It was decided that the system with the dryer offers 40% a more specific cooling capacity than the system without a dryer.

This work introduces and experimentally investigates a new type of M-cycle evaporative cooler. The system is unique in terms of its newly designed heat exchanger having M cycle applied to the system. The proposed evaporative cooler was tested in a laboratory environment, and wet bulb effectiveness, dew point effectiveness and EER of the system performance were determined. In this context, this study is thought to be important in terms of its potential contribution to the current literature and efforts in the field of evaporative cooling technologies.

2. DESCRIPTION OF THE DEW POINT EVAPORATIVE COOLER

Evaporative cooling has mainly two configurations as direct evaporative cooler (DEC) and indirect evaporative cooler (IEC). DEC systems cool the air entering the system via pads, which are kept constant wet (Figure 1). However, since the air is in direct contact with water, the humidity of the incoming air increases significantly (70%-90%) [24]. However, IEC systems have separate water and air channels. Heat transfer arises through the surface between these two channels. Since air and water flows do not come into direct contact, cooling is performed by means of latent heat and without a significant increase in the humidity of the product air (Figure 2).

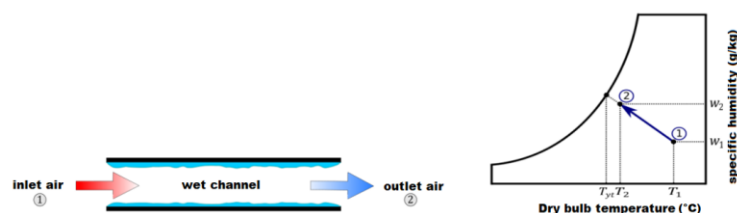


Figure 1. Direct evaporative cooling (DEC) [25]

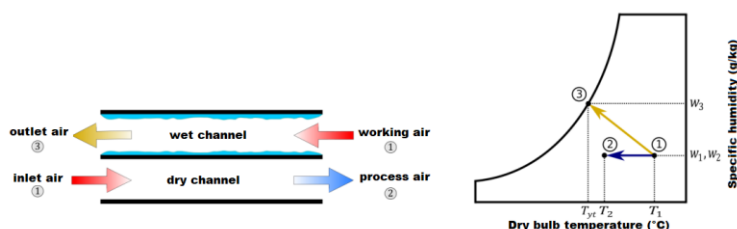


Figure2. Indirect evaporative cooling (IDEC) [25]

In this study, an evaporative cooler with an improved M-cycle heat exchanger design that can effectively cool with an insignificant increase in humidity has been introduced [10]. M-cycle evaporative coolers also have two separate dry and wet channels. However, unlike IEC systems, part of the product air entering the system from the dry channel is transferred at the end of each dry channel to the wet channels (working air) (see Figure 3). The process air loses its heat to the end of the dry channel and is transferred to the wet channel, thereby increasing the cooling efficiency of the system. Working air flowing in the opposite direction to the inlet air causes the water on the surface of the wet channel to evaporate, allowing heat to

be absorbed from the channel walls. While the working air flowing in the wet channel is exhausted from the system as exhaust air, the inlet air that is not directed into the wet channel is used as a product air for cooling. As a result, the system can achieve 85% dew point efficiencies, thanks to the working air that passes through the wet channel after pre-cooling [15].

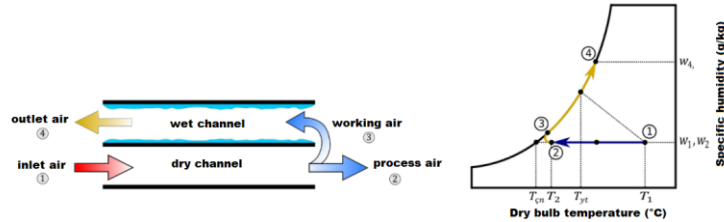


Figure3. M-cycle indirect evaporative cooler [25]

2. EXPERIMENTAL SETUP

The prototype of the proposed system assembled is shown in Figure 4. Holes are drilled at the end of each channel to introduce the working air from the dry channel to the wet channel (see Figure 4a). The channels are stacked on top of each other thanks to the bends on the edges of the wet and dry channels (see Figure 4b). Additionally, plates with equilateral triangle geometry were placed between each wet and dry channels to increase cooling efficiency and the heat exchanger was fitted and sealed. Then, the heat exchanger was placed inside the construction so that it could stand in the right position and the necessary fittings were retained. A fan was incorporated into the system, ensuring that the inlet air is transferred to the dry channels. Additionally, a blower fan provides that fraction of the inlet air (working air) in the dry channels passes through the holes to the wet duct and is discharged from the heat exchanger as exhaust air. The pump in the system maintains the circulation of the cooling water from the reservoir to the wet channels. A 25-L capacity reservoir is used to collect the circulating water. A completely assembled and insulated system, with all mechanical and electrical connections, is seen in Figure 4b.

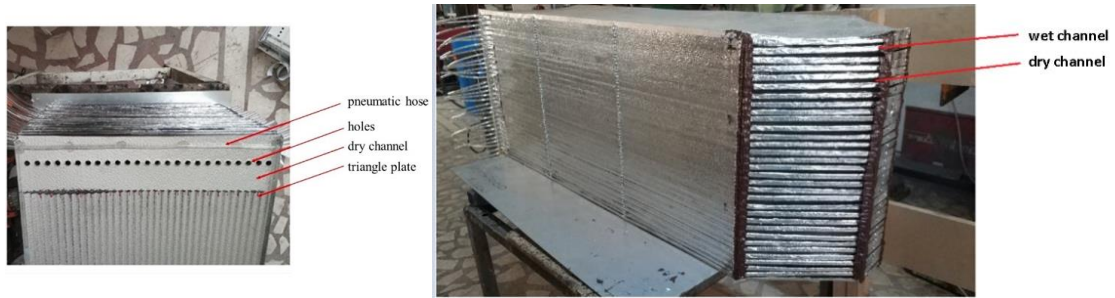


Figure 4. (a) Dry and wet channels



Figure 4. (b) Assembly and test setup of the proposed system

The wet and dry channels of the system and flows inside the channels are shown in the schematic diagram of the heat exchanger (see Figure 5). As can be seen in the figure, the air entering from the lower left-hand side of the heat exchanger moves along the dry channel and fraction of the air passes into the wet channels at the end of each channel (working channel). The air passing through the wet duct, which has a continuous water flow from above, flows in the opposite direction to the inlet air and exits as exhaust air from the lower right-hand side of the heat exchanger. The process air that enters the system and does not pass into the wet duct is blown to the air-conditioned area (product air).

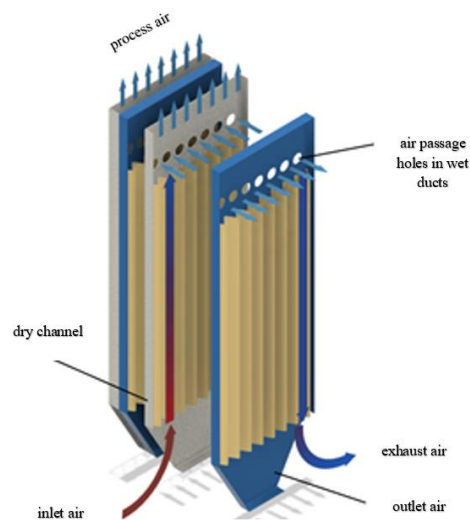


Figure 5. Schematic view of the M-cycle heat exchanger

The proposed evaporative cooler has a fan with a maximum flow rate of 520 m³/h for process air inlet and a blower with a flow rate of 410 m³/h and 80 W power for exhaust air. A pump with a flow rate of 3 m³/h was also used for water circulation. Additionally, ENDA ESHT-102-W-50 temperature and humidity sensor with 1 °C temperature and 2% humidity sensitivity is used to measure the temperature and humidity values of the process, product and exhaust air. A VFA float type flowmeter with a measuring range of 100–3000 l/h was used to measure the flow of water. Air velocities entering and leaving the cooler were measured manually using the CEM DT-619 anemometer with ±0.20 m/s sensitivity. All related data were recorded at a sampling rate of 10s by Novus data logger with 8 analog and digital channels each. A direct link between data logger and PC was provided to save and export data on Excel spreadsheet. The technical details of the components and measuring devices used are presented in Table 1.

Table 1. Technical specifications of system components and measuring devices

| | | |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Blower fan (exhaust air) | Power | 80 W |
| | Voltage | 220 V |
| | Revolutions Per Minute | 2325 |
| | Max. flow rate | 410 m ³ /h |
| Fan (for inlet air) | Power | 210 W |
| | Voltage | 220 V |
| | Revolutions Per Minute | 2800 |
| | Max. flow rate | 520 m ³ /h |
| Circulation pump | Power | 750 W |
| | Voltage | 220 V |
| | Max. flow rate | 3 m ³ /h |
| Anemometer | Range | 0.4–30 m/s |
| | Accuracy | ± 0.20 m/s |
| Hum. and Temp. transmitter | Temperature | -40 °C to +125 °C |
| | Accuracy | ± 1 (0-+70 °C) |
| | | ±0.5 (20-+40 °C) |
| Datalogger | # of channels | 8 digital, 8 analog |
| | Analog input types | Thermocouples, V, |
| | | mV, mA, Pt100 |

3.PERFORMANCE ANALYSIS

A numerical model suitably tailored to the configuration of the proposed system was adapted to simulate the thermal performance of the system. For the sake of simplicity, several assumptions were considered during the thermodynamic analysis of the system as follows;

- The heat is transferred vertically to the partition plate,
- Air flow rate is constant throughout the duct,
- There is always water on the wet surfaces of the channels,
- Air is considered as incompressible since the Mach number of the air flow rate is less than 0.3,
- As the thickness of the partition plate is low, the temperature difference between the dry and wet surfaces of the partition plate can be neglected.

4.ENERGY ANALYSIS

To evaluate the system performance of M-cycle evaporative coolers, wet bulb and dew point effectiveness values are examined. These efficiency values are calculated according to the temperature values of the air entering and leaving the system. The wet bulb effectiveness, as seen in Equation 1, is the ratio of the dry bulb temperature difference in the inlet and outlet air to the inlet dry bulb temperature and the inlet wet bulb temperature difference [22].

$$\varepsilon_{wb} = \frac{T_{db,1} - T_{db,2}}{T_{db,1} - T_{wb,1}} \quad (1)$$

The dew point effectiveness, on the other hand, is the ratio of the dry bulb temperature difference in the inlet and outlet air to the inlet dry bulb temperature and the inlet dew bulb temperature difference, as seen in Equation 2.

$$\varepsilon_{dp} = \frac{T_{db,1} - T_{db,2}}{T_{db,1} - T_{dp,1}} \quad (2)$$

The cooling capacity of the evaporative cooler is calculated using the following equation. Here, $c_{p,a}$ is the specific heat of the inlet air, ρ_a is the density of the air, \dot{V} is the volumetric flow rate of the air, T_{in} is the temperature of the inlet air and T_{out} is the outlet temperature of the process air [22].

$$\dot{Q}_{cooling} = c_{p,a} \rho_a \dot{V} (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

The Energy Efficiency Ratio (EER) of the evaporative cooler is calculated using the following equation. EER is found by the ratio of the cooling capacity to the total power consumption of the cooler. It is preferred instead of COP in cooling systems, which provides insight about how much cooling capacity could be obtained from a specific amount of energy used. EER requires the calculation of electrical power consumption by fan and water pump in the system [22].

$$EER = \frac{\dot{Q}_{cooling}}{P_{total}} \quad (4)$$

Where P_{total} is the total energy consumed instantly by each device in the system and it is determined by measurement.

5. EXERGY ANALYSIS

The exergy in the air conditioning process, which reaches thermal, mechanical and chemical equilibrium under ambient conditions, can be written as follows [22]

$$e_t = e_{th} + e_{me} + e_{ch} \quad (5)$$

Air and water are two types of fluids flowing across the evaporative cooler. Wet air can be considered a mixture of ideal gas consisting of dry air and water vapor. Then, the exergy of moist air and water can be written as [22]

$$e_a = (c_{da} + Wc_v)T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + (1 + 1.608W)R_a T_0 \ln \frac{P}{P_0} + R_a T_0 \left[(1 + 1.608W) \ln \frac{1 + 1.608W_{00}}{1 + 1.608W} + 1 + 1.608W \ln \frac{W}{W_{00}} \right] \quad (6)$$

$$e_w = [i_w(T) - i_w(T_0)] - T_0 [s_w(T) - s_w(T_0)] - R_v T_0 \ln \phi_0 \quad (7)$$

The definition of the dead state condition is pivotal for exergy analysis. Generally, a stable atmospheric conditions are chosen as reference. However, air that is not saturated with moisture under atmospheric conditions still has useful energy. Therefore, the dead state is defined as the saturated outside air in the study. The exergy of this is, then, expressed as [22]

$$(m_1 e_{1,a} + m_{w,i} e_{w,i}) = (m_f e_{2,a} + m_3 e_{3,a}) + I \quad (8)$$

Where I is the exergy destruction, which is a measure of resource degradation and specifies where in system destruction occurs. The exergy destruction describes the lost work potential and is also called irreversibility or exergy loss that occurs mainly due to air leakage, pressure loss and flow friction in evaporative cooling systems.

In the heat and mass transfer process, the moisture added to the air is considered as the amount of water inlet. The exergy efficiency of evaporative cooler is defined as the ratio between the useful exergy of obtained cooling effect and overall exergy used to drive the evaporative cooling system. The second law, exergy, is an important criterion for evaluating cooling performance, and exergy efficiency is defined as [22]

$$\eta_e = 1 - \frac{I}{(m_1 e_{1,a} + m_{w,i} e_{w,i})} \quad (9)$$

Uncertainty of the experimental results

The relative uncertainty in the efficiency and cooling capacity calculations based on the temperature and humidity values obtained from the tests can be by [26]

$$\frac{\Delta x}{y} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\Delta x_i}{y} \right)^2} \quad (10)$$

Where x and y refer to the directly measured and calculated parameters. It was found that the relative uncertainty of wet bulb thermometer and dew point effectiveness was 7%, while the relative uncertainty of the cooling capacity was 9.1%. It is noted that the main parameter affecting the efficiency and cooling uncertainty is the sensitivity of the temperature sensors used in the measurements. Utilisation of high sensitivity equipment in assessment and evaluation would substantially reduce the uncertainty values attained in this study. However, when the results were compared with similar studies in the literature, the uncertainties were found reasonable [26].

6. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

In this study, an M-cycle counter-flow evaporative cooler was experimentally tested in the Low Carbon Technology Laboratories of Science and Technology Research and Application Centre (BITAM) of Necmettin Erbakan University. The tests were conducted at water temperatures of 15 °C and 20 °C, air inlet temperatures of 25 °C and 30 °C and air inlet humidity of 9g/kg and 13g/kg, respectively. The corresponding data on product and exhaust air were recorded. Wet bulb effectiveness, dew point effectiveness, EER, cooling capacity and exergy values related to system performance were calculated using the obtained data and evaluations were performed on the basis of these calculations. Therefore, the effect of cooling water and inlet air parameters on the performance of an M-cycle evaporative cooler is demonstrated.

In this section, the findings obtained from the laboratory tests of the proposed evaporative cooler are evaluated. Temperature and humidity data of product air and exhaust air were recorded in 8 different tests performed at different water temperatures, air inlet temperatures and humidity values, and performance analyses of the system were conducted in line with the recorded data. Table 2 demonstrates the test conditions.

Table 2. Experimental test conditions

| | Inlet air flow rate (m ³ /h) | Water temperature (°C) | Inlet air temperature (°C) | Inlet air humidity ratio (g/kg) |
|---------|---|----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 1. Exp. | 350 | 15 | 30 | 9 |
| 2. Exp. | 350 | 15 | 30 | 13 |
| 3. Exp. | 350 | 15 | 25 | 9 |
| 4. Exp. | 350 | 15 | 25 | 13 |
| 5. Exp. | 350 | 20 | 30 | 9 |
| 6. Exp. | 350 | 20 | 30 | 13 |
| 7. Exp. | 350 | 20 | 25 | 9 |
| 8. Exp. | 350 | 20 | 25 | 13 |

6.1. 15 °C of Water Temperature

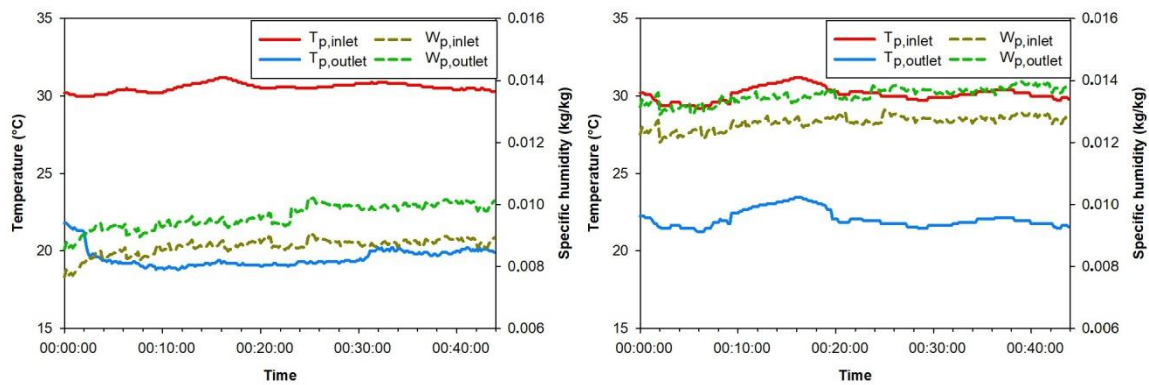


Figure 6. Findings for 15 °C of water and 30 °C of inlet air temperatures at (a) 9 g/kg and (b) 13 g/kg of inlet air humidity levels

Figure 6 demonstrates the test results conducted for 9g/kg and 13g/kg moisture levels when the water temperature was 15 °C and the air inlet temperature was 30 °C. While the humidity of the inlet air was 9g/kg (Figure 6a.), the inlet air temperature (30 °C) decreased by about 9 °C at the outlet and the humidity increased by about 1g/kg. While the inlet air humidity was 13g/kg (Figure 6b), the air was cooled by 7 °C down to 23 °C. Similarly, the humidity level increased by 1 g/kg and departed the system as approximately 13.5 g/kg.

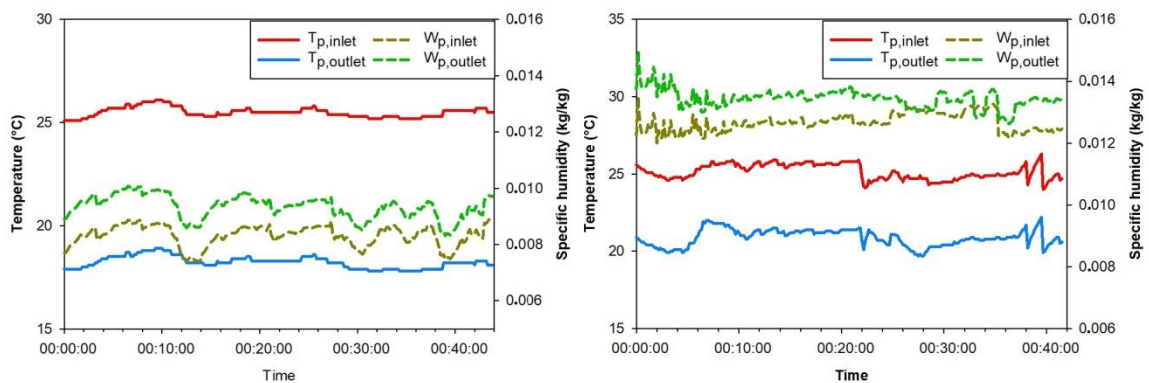


Figure 7. Findings for 15 °C of water and 25 °C of inlet air temperatures at (a) 9 g/kg and (b) 13 g/kg of inlet air humidity levels

When the water temperature was still 15 °C and the air inlet temperature was set to 25 °C, two tests were conducted for the humidity of 9 g/kg and 13 g/kg. The values of the temperature and humidity at the inlet-outlet of the system are presented in Figure 7a and 7b. In the test performed for 9g/kg air inlet humidity, the inlet air at 25 °C was cooled by approximately 6.5 °C, while it was down by approximately 5 °C for 13g/kg air inlet humidity. Moisture levels increased by approximately 1g/kg in both tests. It is seen that the air was cooled more at 30 °C air inlet temperature (Figure 6) than 25 °C air inlet temperature (Figure 7).

6.2. 20 °C of Water Temperature

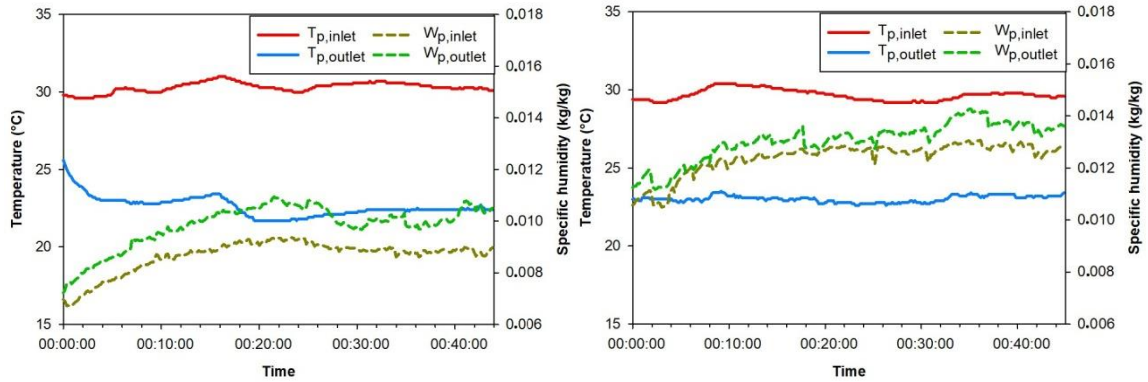


Figure 8. Findings for 20 °C of water and 30 °C of inlet air temperatures at (a) 9 g/kg and (b) 13 g/kg of inlet air humidity levels

The results obtained in the tests when the circulating water temperature in the system was 20 °C and the inlet air temperature was 30 °C are shown in Figure 8a and 8b, respectively. While the water temperature was 20 °C, the air inlet temperature was 30 °C, the air inlet humidity was 9 g/kg, the air was humidified by approximately 1g/kg and its temperature was reduced by around 8 °C (see Figure 8a). The air was cooled by 6.5 °C by humidifying approximately 1g/kg when the inlet air humidity level was 13 g/kg.

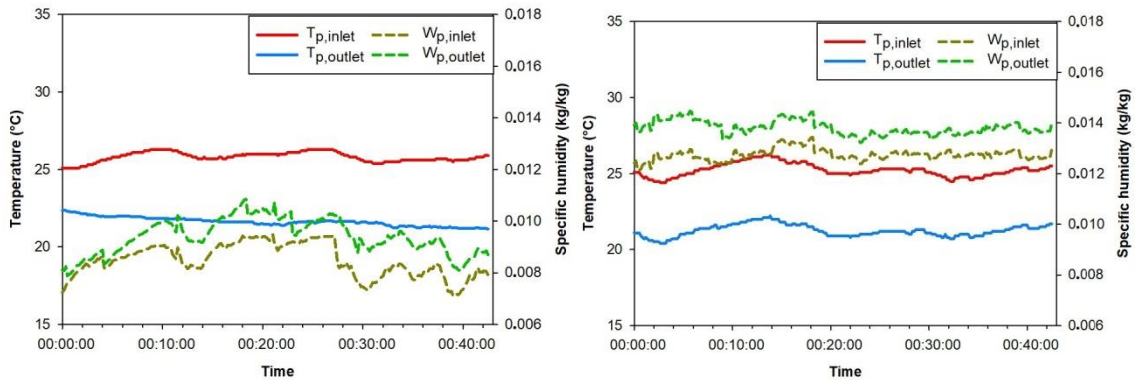


Figure 9. Findings for 20 °C of water and 25 °C of inlet air temperatures at (a) 9 g/kg and (b) 13 g/kg of inlet air humidity levels

Figure 9 demonstrates the findings when the water temperature was 20 °C, air inlet temperature was 25 °C and inlet air humidity levels were 9 g/kg and 13g/kg, respectively. It has been determined that when the water temperature was 15 °C, compared to the 20 °C water temperature, the system could perform better as shown in Figure 9. While the air inlet temperature and air humidity were 25 °C and 9g/kg and 13g/kg, the air was chilled by approximately 4.2 °C and 3.5 °C, respectively. In some cases, extra energy could be needed to supply 15 °C water, which contributes to the increase in cooling capacity.

6.3. Wet Bulb Temperature and Dew Point Effectiveness

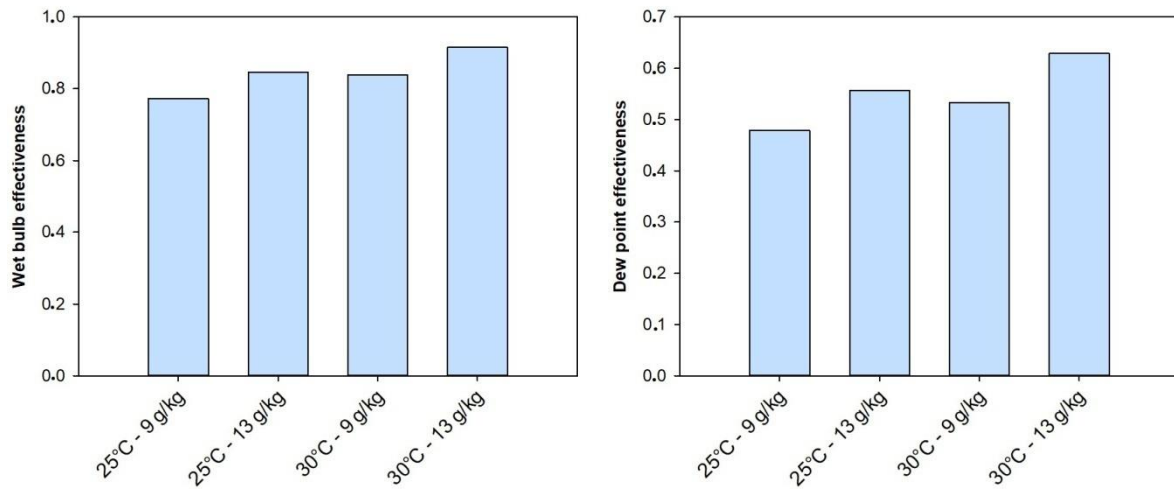


Figure 10. (a) Wet bulb and (b) dew point effectiveness at 15 °C water temperature

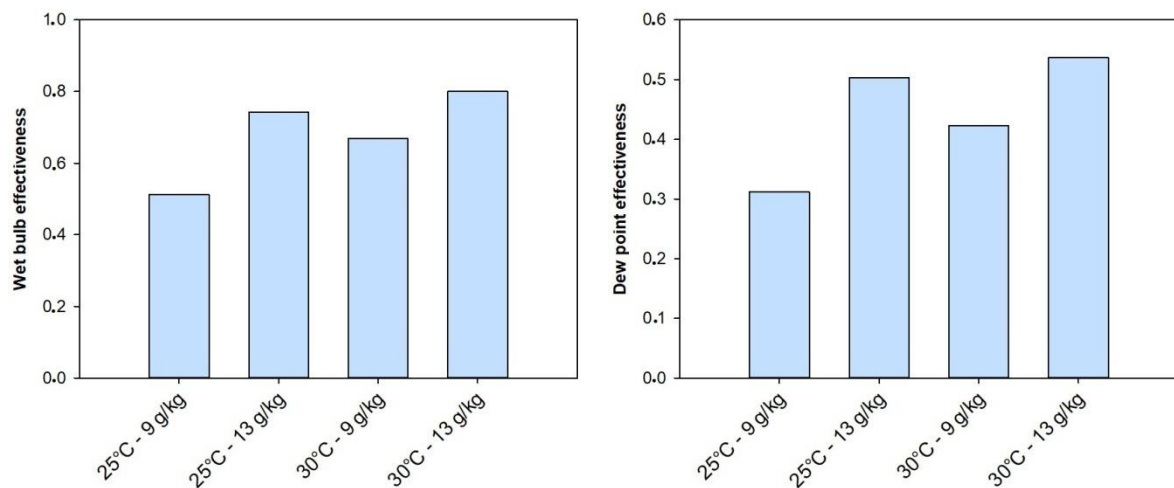


Figure 11. (a) Wet bulb and (b) dew point effectiveness at 20 °C water temperature

Dew point and wet bulb effectiveness are decisive parameters in the performance evaluation of evaporative cooling systems. The wet bulb and dew point effectiveness depend on the temperature of the outlet air (product air) and inlet air, and humidity values as expressed in Eqns. 1 and 2. The higher the wet bulb and dew point effectiveness, the closer the outlet air temperature approaches the inlet air wet bulb and dew point temperature. As can be seen in Figures 10 and 11, it is shown that when wet bulb and dew point effectiveness increase, the temperature and humidity of the inlet air increase as well. In contrast, when the water temperature increases, it is noticed that the wet bulb and dew point effectiveness decrease.

While the water temperature was 15 °C, the inlet air temperature was 30° C and the specific humidity was 13 g/kg, the highest wet-bulb and dew point effectiveness values were achieved as 0.91 and 0.62, respectively. While the water temperature was 20 °C, the inlet air temperature was 30 °C and the specific humidity was 13 g/kg, the highest wet bulb and dew point effectiveness were attained as 0.80 and 0.53, respectively. As shown, the cooling effectiveness is highly affected by the inlet air temperature and humidity values, while the water temperature has relatively less impact on the cooling effectiveness.

6.4. Cooling Capacity and EER

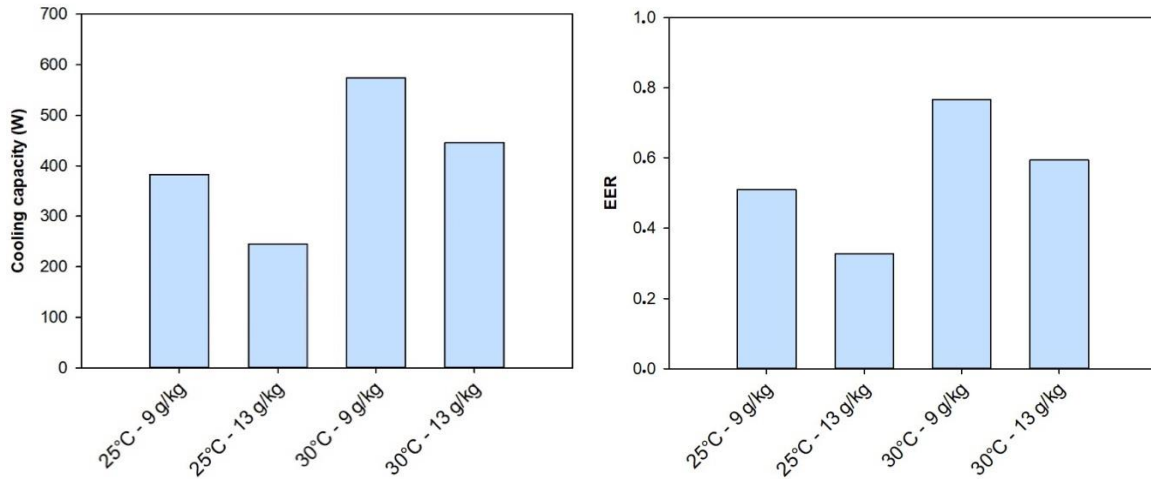


Figure 12. (a) Cooling capacity and (b) EER at 15 °C water temperature

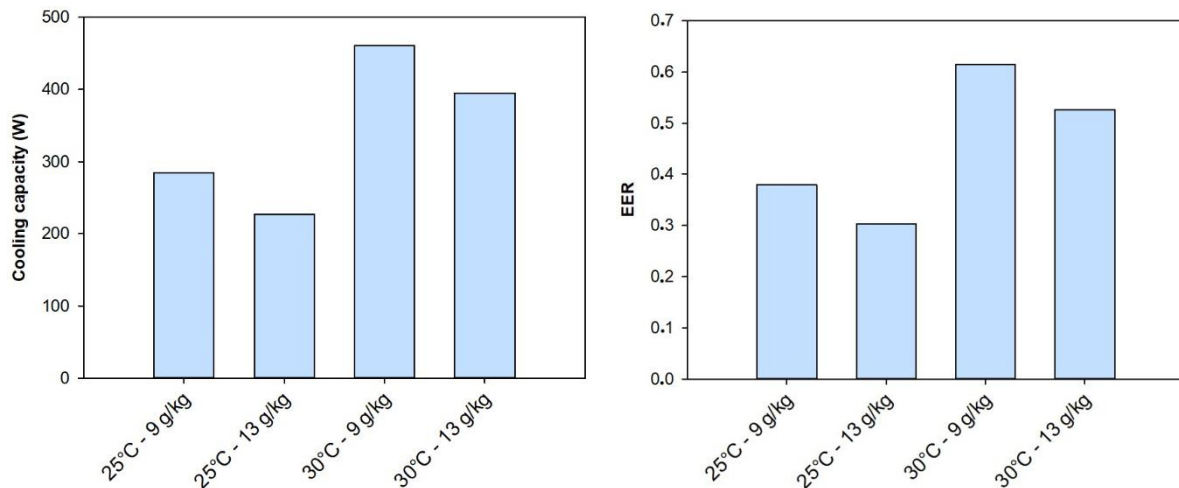


Figure 13. (a) Cooling capacity and (b) EER at 20 °C water temperature

In evaporative cooling systems, cooling capacity and EER are also essential in addition to the cooling efficiency. The cooling capacity of an evaporative cooler should sufficiently encounter the heat gains in the air-conditioned space. EER, on the other hand, indicates how efficiently the system works. For 15 °C and 20 °C water temperatures, the highest cooling capacity was achieved as 574.5 and 460.8 W, and highest EER was attained as 77.6% and 61.4% at inlet air temperature of 30 °C and specific humidity of 9 g/kg. However, the lowest cooling capacities were recorded as 245.3 and 227.4 W, and the lowest EERs were 32.7% and 30.3% at 25 °C of inlet air temperature and 13 g/kg of specific humidity. It can be deduced that the cooling capacity and EER decrease as the water temperature and specific humidity increase. Yet, as the inlet air temperature increases, the cooling capacity and EER values increase. However, note that the EER of the system will decrease if extra energy must cool down the water temperature circulating across the system.

6.5. Exergy Efficiencies and Destruction

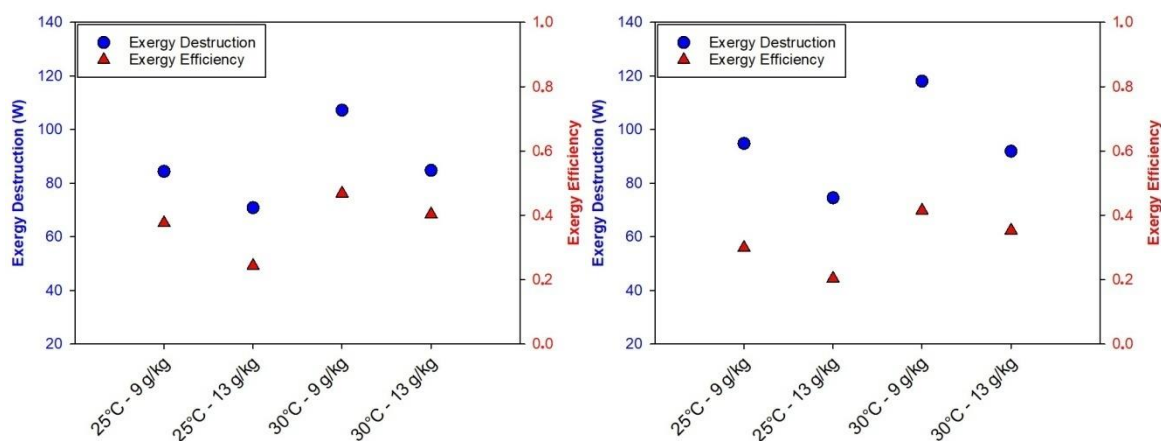


Figure 14. Exergy efficiencies and exergy destruction at (a) 15 °C and (b) 20 °C water temperatures

The exergy analyses in line with the data obtained from the tests performed under different water temperature and air inlet conditions are shown in Figure 14. Findings reveal that the exergy efficiency and exergy destruction increases with the increasing air inlet temperature. Adversely, exergy efficiency and destruction decrease as the inlet humidity increases. The highest exergy efficiency was found as 0.46 at air inlet temperature of 30 °C and air inlet humidity of 9 g/kg, while the lowest exergy efficiency was 0.20 at air inlet temperature of 25 °C and inlet humidity of 13 g/kg air. Corresponding exergy destruction was 110 W and 75 W, respectively.

The energetic and exergetic performance of the investigated M cycle evaporative cooler could be further improved by increasing the distance travelled by process air inside the heat exchanger, which would increase the cooling capacity. However, the pressure drop due to air friction is a drawback which may be overcome through oval channels.

7. CONCLUSION

In this study, an experimental investigation on the cooling performance of an innovative M-cycle evaporative cooler was conducted. Series of tests were performed at different water temperatures (15 °C and 20 °C) and different air inlet conditions (inlet temperature of 25 °C and 30 °C and inlet humidity of 9g/kg and 13g/kg). The concluding remarks outlined are as follows:

- It was noted that the water temperature has a significant impact on the wet bulb and dew point effectiveness, that can seriously alter the product air outlet temperature by approximately 2–3 °C.
 - The inlet air temperature and inlet air humidity has the reverse effect on the wet bulb and dew point effectiveness. As such, the wet bulb and dew point effectiveness increase with the increasing inlet air temperature and decrease with the increasing inlet air humidity.
 - It was observed that the air inlet humidity increased by about 1 g/kg. This humidity increase is minimal comparing to the humidity increase in conventional direct evaporative coolers.
 - The highest wet bulb and dew point efficiencies obtained from the system were attained at the air inlet temperature of 30 °C and air inlet humidity of 13 g/kg. The highest wet-bulb effectiveness at water temperatures of 15 °C and 20 °C was found to be 91.5% and 80%, respectively, while the highest dew point effectiveness was found to be 62.8% and 53.6%, respectively.
 - The highest EER value was achieved as 76.6% at a water temperature of 15 °C, air inlet temperature of 30 °C and air intake humidity of 9 g/kg.
 - The highest exergy efficiency was achieved as 46.8% at 15 °C water temperature, 30 °C air inlet temperature, and 9 g/kg air inlet humidity. However, the lowest exergy efficiency was attained as 20.3% at a water temperature of 20 °C, air inlet temperature of 25 °C and air intake humidity of 13 g/kg.
- It was also deduced that the performance of the developed M-cycle cooler can be further improved substantially through;

- sealing each layer of the heat exchanger separately during assembly,
- constructing an outer case, preventing the system being exposed to the external environment,
- preserving water temperature by using water storage without exposing the water to the ambient temperature
- and finally utilising blower fans with lower capacities.

It is inferred that the proposed cooling unit can be used in hot, dry and even humid climates. In humid climates, however, a dehumidifier must be integrated into the system so the air humidity level can be adjusted to human comfort conditions.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support of Scientific Research Council (BAP) of the Necmettin Erbakan University (Project no: 201216001).

REFERENCES

- [1] Duan, Z., Zhan, C., Zhang, X., Mustafa, M., Zhao, X., Alimohammadisagvand, B., & Hasan, A. (2012). Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6823-6850.
- [2] Buker, Mahmut Sami; Riffat, Saffa B. Recent developments in solar assisted liquid desiccant evaporative cooling technology—A review. *Energy and Buildings*, 2015, 96: 95-108.
- [3] Yang, Y., Cui, G., & Lan, C. Q. (2019). Developments in evaporative cooling and enhanced evaporative cooling—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109230.
- [4] Yang, H., Shi, W., Chen, Y., & Min, Y. (2021). Research development of indirect evaporative cooling technology: An updated review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111082.
- [5] Buker, Mahmut Sami; Mempoou, Blaise; Riffat, Saffa B. Experimental investigation of a building integrated photovoltaic/thermal roof collector combined with a liquid desiccant enhanced indirect evaporative cooling system. *Energy Conversion and Management*, 2015, 101: 239-254.
- [6] Bom, G. J., Foster, R., Dijkstra, E., Tummers, M., *Evaporative air-conditioning: applications for environmentally friendly cooling*, The World Bank, 1999
- [7] Osma E., *Evaporatif Soğutma Sistemlerinin Mekanik Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sistemleri İle Termodinamik Ve Ekonomik Bakımdan Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2011.
- [8] El-Refaie, M. F., Kaseb, S., Speculation in the feasibility of evaporative cooling, *Building and Environment*, 2009, 44(4): 826-838.
- [9] Xuan, Y. M., Xiao, F., Niu, X. F., Huang, X., Wang, S. W, Research and application of evaporative cooling in China: A review (I)—Research, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3535-3546.
- [10] Maisotsenko, V., Gillan, L. E., Heaton, T. L., Gillan, A. D, 2003, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office U.S., Patent No. 6,581,402.
- [11]. Dizaji, H. S., Hu, E. J., Chen, L., Pourhedayat, S, Development and validation of an analytical model for perforated (multi-stage) regenerative M-cycle air cooler, *Applied Energy*, 2018, 228: 2176-2194.
- [12] Pandelidis, Demis; Pacak, Anna; Anisimov, Sergey. Energy Saving Potential by Using Maisotsenko-Cycle in Different Applications. *International Journal of Earth & Environmental Sciences*, 2018, 2018.

- [13] Pandelidis, D., Anisimov, S., Drağ, P., Sidorczyk, M., & Pacak, A., Analysis of application of the M-Cycle heat and mass exchanger to the typical air conditioning systems in Poland. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 873-883.
- [14] Pandelidis, D., Anisimov, S., Worek, W. M., & Drağ, P., Numerical analysis of a desiccant system with cross-flow Maisotsenko cycle heat and mass exchanger. *Energy and Buildings*, 2016, 123: 136-150.
- [15] X. Zhao, J. M. Li, and S. B. Riffat, "Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 1942-1951, 2008.
- [16] C. Zhan et al., "Comparative study of the performance of the M-cycle counter-flow and cross-flow heat exchangers for indirect evaporative cooling – Paving the path toward sustainable cooling of buildings," *Energy*, vol. 36, pp. 6790-6805, 2011.
- [17] X. Zhao, S. Yang, Z. Duan, and S. B. Riffat, "Feasibility study of a novel dew point air conditioning system for China building application," *Building and Environment*, vol. 44, pp. 1990-1999, 2009.
- [18] X. Zhao, Z. Duan, C. Zhan, and S. B. Riffat, "Dynamic performance of a novel dew point air conditioning for the UK buildings," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 4, pp. 27-35, 2009.
- [19] Zhan, C., Zhao, X., Smith, S., Riffat, S. B., Numerical study of a M-cycle cross-flow heat exchanger for indirect evaporative cooling, *Building and Environment*, 2011, 46(3): 657-668.
- [20] E. D. Rogdakis, I. P. Koronaki, and D. N. Tertipis, "Experimental and computational evaluation of a Maisotsenko evaporative cooler at Greek climate," *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 497-506, 2014.
- [21] Riangvilaikul, B., Kumar, S., Numerical study of a novel dew point evaporative cooling system, *Energy and Buildings*, 2010, 42(11): 2241-2250.
- [22] Wang, L., Zhan, C., Zhang, J., & Zhao, X. (2019). The energy and exergy analysis on the performance of counter-flow heat and mass exchanger for M-cycle indirect evaporative cooling. *Thermal Science*, 23(2 Part A), 613-623.
- [23] KHOSRAVİ, Nima; AYDIN, Devrim. Investigation of a Storage Type Solar-Driven Solid Desiccant Cooling System. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 2021, 9.3: 463-477.
- [24] Sajjad, U., Abbas, N., Hamid, K., Abbas, S., Hussain, I., Ammar, S. M., ... & Wang, C. C. (2021). A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 122, 105140.
- [25] ÖZDEN, E., PARLAMIŞ, H., & BÜKER, M. S. Karşı Akışlı Dolaylı bir Evaporatif Soğutucunun Soğutma Performansının Sayısal Analizi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 7(3), 1074-1087.
- [26] Liu, Y., Akhlaghi, Y. G., Zhao, X., & Li, J. (2019). Experimental and numerical investigation of a high-efficiency dew-point evaporative cooler. *Energy and Buildings*, 197, 120-130.



Cloud Based WEB Application Design for Automatic Turkish Business Card Recognition and Its Performance Evaluation

İbrahim ŞAHİN¹  Mustafa Hikmet Bilgehan UÇAR^{1,*}  Serdar SOLAK¹ 

¹Kocaeli University, Faculty of Technology, Department of Information Systems Engineering, 41001, Umuttepe, İzmit/KOCAELİ

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 01.12.2021
Revision: 10.02.2022
Accepted: 22.02.2022

Highlights

- Cloud Based WEB Application Design for Automatic Turkish Business Card Recognition.
- Tesseract-based optical character recognition.
- Software performance evaluation.

Keywords

Cloud Computing
Optical Character Recognition (OCR)
Tesseract
Recognition Business Cards

In this study, a cloud-based web application is developed that extracts information such as names, phone numbers, e-mail addresses, job titles from physical business cards prepared in Turkish using Tesseract-based optical character recognition method (OCR).

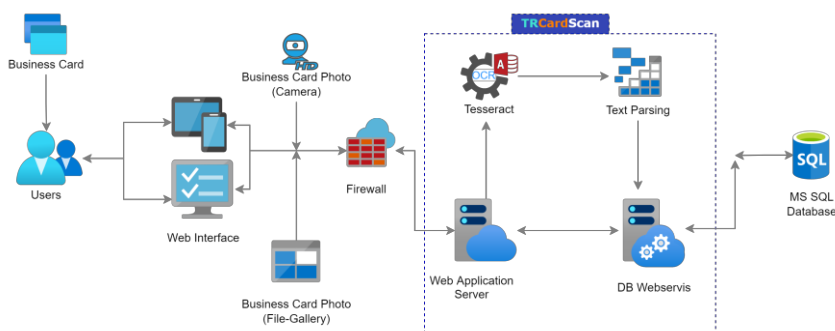


Figure A. System architecture of the proposed cloud-based business card reader application

Purpose: In the literature, there are various applications developed based on Mobile Vision, OpenCV and Tesseract for the digitization and extraction of information on paper-based business cards in English, Vietnamese, Japanese and Chinese languages. In this study, it is aimed to develop a high-accuracy cloud-based business card recognition software (TRCardScan) compatible with Turkish language with Tesseract-based OCR in order to extract the information from paper-based business cards in Turkish.

Theory and Methods: The system architecture of the proposed paper-based Turkish business card reader application is given in Figure A. As can be seen, firstly, business card photos, are taken from the camera or image gallery as input to the application. Then, these photos are subjected to character reading process with Tesseract-based OCR method. As a result of the OCR process, the read and converted texts such as name, surname, mobile phone, e-mail address and contact address on the business card are parsed by algorithms specific to the characteristic of the parts in which it is located. In the last stage, the data that is parsed and transformed into meaningful information is sent to the web service to be written in the relevant field in the database.

Results: In the analyzes made with 15 paper-based Turkish business cards with different features, it was observed that the proposed TRCardScan software was able to extract the information from physical business cards with 84.76% accuracy, 96.05% precision, 84.88% recall and 90.12% F1 score. In addition, the average extraction time per business card is 1.6 seconds.

Conclusion: The proposed TRCardScan can read and parse data from physical business cards with an average extraction time of 1.6 seconds and high accuracy of around 85%. These results show that the parsing algorithm designed for the Turkish language in the proposed web-based application is successful, considering the time and performance criteria. Finally, when compared to similar software, TRCardScan is considered to be quite successful with its high accuracy rates and reasonable extraction times.



Cloud Based WEB Application Design for Automatic Turkish Business Card Recognition and Its Performance Evaluation

İbrahim ŞAHİN¹  Mustafa Hikmet Bilgehan UÇAR^{1,*}  Serdar SOLAK¹ 

¹Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 41001, Umuttepe, İzmit/KOCAELİ

Abstract

In this study, digital-business card holder software was developed that digitally stores physical business cards prepared in Turkish in a cloud-based database. In the proposed software, the information on the physical business card is converted into text by optical character recognition method (OCR) using business card photos, and then the texts obtained with the help of developed algorithms are separated and grouped. Finally, the digitally obtained business card data is stored in the cloud-based database for later use. Considering the Turkish business cards, it is known that there are a wide variety of complex business cards unique to the country as well as the characters specific to the Turkish language. In this context, first of all, a method that correctly recognizes Turkish characters has been determined in the study. Later, name, mobile phone, e-mail address, company title, position and similar meaningful information were separated from the data read. In order to make these decompositions, special methods have been developed for each field and more accurate and meaningful data has been obtained with field-based algorithms. Thanks to the developed cloud-based platform-independent interface, it is possible to access data from more than one device with a single user over the internet. The study also offers a layered service architecture and database infrastructure that can be used by multiple accounts and multiple users connected to it simultaneously from a single platform. In the experimental studies, the proposed software can extract the data on 15 physical business cards with different features with 84.76% Accuracy, 96.05% Precision, 84.88% Recall, 90.12% F1 Score and an average extraction time of 1.6 seconds.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01.12.2021
Düzeltilme: 10.02.2022
Kabul: 22.02.2022

Keywords

Cloud Computing
Optical Character
Recognition (OCR)
Tesseract
Recognition Business
Cards

Anahtar Kelimeler

Bulut Bilişim
Optik Karakter Tanıma
(OKT)
Tesseract
Kartvizit Karakter Tanıma

Otomatik Türkçe Kartvizit Tanıma için Bulut Tabanlı WEB Uygulama Tasarımı ve Performans Değerlendirmesi

Öz

Bu çalışmada, Türkçe hazırlanmış fiziksel kartvizitleri, sayısal olarak bulut tabanlı veritabanında saklayan dijital-kartvizitlik yazılımı geliştirilmiştir. Önerilen yazılımda, fiziksel kartvizit üzerindeki bilgiler kartvizit fotoğraflarından optik karakter tanıma (Optical Character Recognition: OCR) yöntemi ile metne çevrilmekte daha sonra geliştirilen algoritmalar yardımıyla elde edilen metinler ayrıştırılarak gruplandırılmaktadır. Son olarak sayısal olarak elde edilen kartvizit verileri, daha sonra kullanılmak üzere bulut tabanlı veritabanında saklanmaktadır. Türkçe kartvizitler göz önüne alındığında, Türk diline özgün karakterlerin yanı sıra ülkeye özgün çok çeşitli-karmaşık kartvizitlerin de olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda çalışmada öncelikli olarak Türkçe karakterleri doğru tanıyan bir yöntem belirlenmiştir. Daha sonra okunan verilerden isimler, cep telefonu, e-posta adresi, şirket unvanı, görevi ve benzeri anlamlı kartvizit bilgilerinin ayrıştırılması yapılmıştır. Bu ayrıştırmaları yapabilmek için her alan için kendine özel yöntemler geliştirilerek alan bazlı algoritmalarla daha doğru ve anlamlı verilerin elde edilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen bulut tabanlı, platformdan bağımsız arayüz sayesinde internet üzerinden tek kullanıcı ile birden fazla cihazdan verilere erişilebilmesine olanak sağlanmıştır. Çalışma aynı zamanda tek bir platformdan, birden çok hesap ve ona bağlı birden fazla kullanıcının aynı anda kullanabileceği katmanlı servis mimarisi ve veritabanı alt yapısı da sunmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, geliştirilen yazılım, farklı özelliklere sahip 15 adet fiziksel kartvizitteki verileri, %84,76 Doğruluk, %96,05 Kesinlik, %84,88 Duyarlılık, %90,12 F1 Skoru ve ortalama 1,6 sn'lik çıkartım süreleriyle okuyarak ayrıştırabilmektedir.

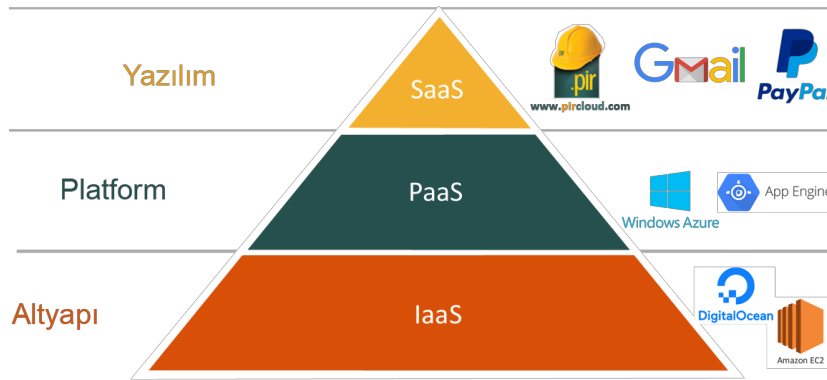
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojik gelişmelere paralel olarak günlük hayattan, iş hayatına kadar çeşitli alanlardaki birçok işlemin, sürecin veya uygulamanın dijitalleşmesine rağmen bazı geleneksel kullanımlar yaygınlığını korumaktadır. Bu tercihlerin sebepleri olarak kullanım kolaylığı veya alışkanlıklar olarak sıralanabilir. Özellikle iş hayatında yaygın bir şekilde kullanılan fiziksel kartvizitler bu kullanım tercihinin örnek olarak gösterilebilir. Kişilerin telefon, e-posta adresi veya diğer iletişim bilgilerinin toplu halde bir arada yer alması ve kısa sürede paylaşma imkânı tanınması fiziksel kartvizitlerin yaygın olarak tercih edilme sebepleri arasındadır. İhtiyaç duyulduğu zaman kullanılmak üzere saklanan fiziksel kartvizitlere ulaşmak zor veya imkânsız olabilmektedir. Kartvizitlerin cep telefonu veya dijital asistan gibi çeşitli kayıt ortamlarına aktarımı, veri girişinin zaman alması ve uğraştırması sebebiyle genelde yapılmamaktadır. Bu bilgiler kaydedilse bile ilgili cihazların arızalanması, yanlışlıkla formatlanması veya cihaz değişiklikleri gibi durumlarda bu bilgilere erişimin kaybolması da söz konusudur. Fiziksel kartvizitlerin kolay erişilebilir olması, üzerindeki bilgilerin sayısallaştırılarak bulut ortamına aktarılması ile mümkün olabilir. Bu kapsamda çalışmada, Türkçe hazırlanmış fiziksel kartvizitleri, sayısal olarak bulut tabanlı veritabanında saklayan kullanıcı dostu dijital-kartvizitlik yazılımı geliştirilmiştir. Önerilen yazılımda, fiziksel kartvizit üzerindeki bilgiler, kartvizit görüntülerinden optik karakter tanıma (Optical Character Recognition: OCR) yöntemi ile metne çevrilmekte daha sonra geliştirilen algoritmalar yardımıyla ayrıştırılan metinler gruplandırılarak bulut tabanlı veritabanında saklanmaktadır. Fotoğrafi çekilen veya tarayıcı ile taranan fiziksel kartvizit hem resim hem de işlenebilir veri olarak saklanabilmektedir. Çevrimiçi olarak çalışacak bulut tabanlı kartvizit uygulaması hem saklama işlevini sağlarken hem de veri girişi esnasında kaybedilecek zamanı kısaltmaktadır. Fiziksel kartvizit üzerindeki bilgilerin sayısallaştırılmasında kullanılan OCR yöntemi, basılı veya el yazması metinlere ait görüntülerin, görüntü işleme teknikleri kullanarak yazıya ve işlem yapılabilir veriye dönüştürme işidir. OCR günlük hayatımızda; plaka tanıma sistemleri [1], görme engelliler için destek uygulaması [2], bankacılık uygulaması [3], otonom sürüş uygulaması [4] gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Literatürde, İngilizce [5], Vietnamca [6], Japonca [7], Çince [8, 9] dillerinde hazırlanmış kâğıt tabanlı kartvizitlerde yer alan bilgilerinin dijitalleştirilmesi ve çıkarılması amacıyla Mobile Vision, OpenCV ve Tesseract [5-11] gibi çeşitli görüntü işleme kütüphaneleri kullanarak geliştirilmiş uygulamalar yer almaktadır. Bu kapsamda, Thuan ve arkadaşları Google Vision kütüphanesini kullanarak İngilizce hazırlanmış kâğıt tabanlı kartvizitler üzerinde yer alan bilgilerin OCR yöntemi ile dijitalleştirilmesini gerçekleştirmiştir [5]. Ayrıca bu çalışma kâğıt kartvizit bilgilerini dijitalleştirmek ve çıkarmak için mobil cihazlar için bir Android uygulama sağlamaktadır. Hung ve arkadaşları hem Vietnamca hem de İngilizce kartvizitlerden Tesseract açık kaynak OCR ile isim, telefon numaraları, e-posta adresleri, iş unvanları gibi anlamlı bilgileri çıkartan bir android uygulama geliştirmiştir [6]. Çalışmada önerilen, tanıma algoritması; kartvizit işleme, metin bloğu bulucu, görüntü ikilileştirme, OCR işleme ve dil işleme şeklinde beş aşamadan oluşmaktadır. Öte yandan, Saiga ve arkadaşları ise hem format hem de yazı tipi olarak çok çeşitli Japon kartvizitlerini tanıyan deneysel bir kartvizit tanıma sistemi önermişlerdir [7]. Ayrıca önerilen sistem önceden tanımlanmış birkaç kategoride kartvizit veri tabanının otomatik olarak oluşturulmasını da sağlamaktadır. Chiou ve arkadaşları, Çince ve İngilizce dilinde hazırlanmış renkli kartvizitlerden, karakterleri görüntü işleme teknikleri ile çıkararak, istatistiksel bir karakter tanıma sistemiyle tanımaktadır [8]. Wang ve arkadaşları tarafından kartvizit üzerindeki Çince karakterleri tanımak için Saklı Markov modelini kullanan bir yaklaşım önerilmiştir [9]. Tanıma oranını iyileştirmek için bir son işleme yöntemi, Saklı Markov modeliyle birleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, Çince kartvizitlerden şirket ve adres ögesinin tanınması üzerine deneyler gerçekleştirilmiştir. Dangiwa ve Kumar iOS cihazlar için Tesseract'a dayalı Kartvizit okuyucu uygulaması geliştirmişlerdir [10]. Shinde ve arkadaşları ise Google Vision dil çeviri özelliği kullanarak çoklu dil destekli kartvizit okuyucu önermişlerdir [11]. Özellikle Türkçe kartvizitlerde Türk diline özgün karakterlerin kullanılmasının yanı sıra ülkeye özgün çok çeşitli-karmaşık kartvizitler bulunması sebebiyle literatürde yer alan bu uygulamaların Türkçe kartvizitlerde başarımının düşük ve kullanımının zor olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, Tesseract açık kaynak OCR yöntemi ile Türkçe hazırlanmış fiziksel kartvizitlerden isim, telefon numaraları, e-posta adresleri, iş unvanları gibi anlamlı bilgileri çıkartan bulut tabanlı WEB uygulaması geliştirilmiştir. Çalışmada kullanılan açık kaynak OCR yöntemi olan Tesseract, Ios ve Android de dâhil çeşitli işletim sistemlerinde kodlama yapan

yazılımcılar tarafından tercih edilen bir metin tanıma motorudur. Tesseract, Hewlett-Packard tarafından geliştirilerek 1985-1995 yılları arasında ücretli bir araç olarak kullanıcılara sunulmuştur. Daha sonra, 2005 yılında Nevada Üniversitesi ve Hewlett-Packard tarafından açık kaynak olarak paylaşılmıştır. 2006-2018 yılları arasında geliştirme süreçleri Google tarafından desteklenen Tesseract'ın son sürümü (Long short-term memory, LSTM bazlı) 2019 yılında yayınlanmıştır [12]. Tesseract, piyasadaki özgür yazılımlar arasında en çok tercih edilen ve en doğru sonuç üretebilen OCR motorlarından biri olarak kabul edilmektedir [13-19].

Çalışmanın tüm katmanlarında kullanılan bulut bilişim (Cloud Computing, CC) daha az maliyetle, daha çok kaynağa, daha hızlı ulaşma imkânı veren bir teknolojidir. Bulut bilişim, ihtiyaç duyulan bilgisayar kaynaklarını veya verilerini, uzaktan erişimle hızlı bir şekilde kullanabilmek ve yönetebilmektir. 2006 yılında hizmete başlayan “Amazon S3”, gerçek anlamda ilk bulut bilişim hizmeti olarak kabul edilmektedir. Nesnelerin interneti (IoT) ve yapay zekânın (AI) ihtiyaç duyduğu bilişim kaynakları, bulut bilişim kullanımını ve kullanım alanlarını ciddi biçimde artırmıştır [20]. Bulut Bilişim’in temelinde Şekil 1.’de gösterilen, Yazılım (Software As A Service, SaaS), Platform (Platform As A Service, PaaS) ve Altyapı (Infrastructure As A Service, IaaS) hizmet katmanlarından oluşmaktadır. SaaS katmanında, yazılım hizmeti servis olarak sunulmaktadır. Bu servise örnek olarak çevrim içi mail sunucuları (Gmail.com), çevrim içi ödeme sistemleri (PayPal.com) veya çevrim içi muhasebe, müşteri ilişkileri yönetimi (Pircloud.com) yazılım hizmetleri verilmektedir. PaaS katmanında, yazılım geliştiricilerin platform olarak kullanabileceği bir yapı sunulmaktadır. Veritabanı, yazılımın sunulacağı web ortamı ve bunların gereksinim duyabileceği diğer tüm yan ihtiyaçları için alınan hizmetler bütün olarak tanımlanmaktadır. Windows Azure, Google App Engine gibi platformlar örnek olarak verilebilir. IaaS, bulut hizmetlerinde ihtiyaç duyulan fiziksel donanımın sunulduğu katmandır. Kullanıcı ihtiyaç duyduğu depolama alanı, işlemci kapasitesi, ağ kaynağı ve diğer bilişim kaynaklarını kendisi yapılandırabilmekte ve uygulama alanına göre ihtiyacı olan işletim sistemi ve yazılımları yükleyebilmektedir [20].



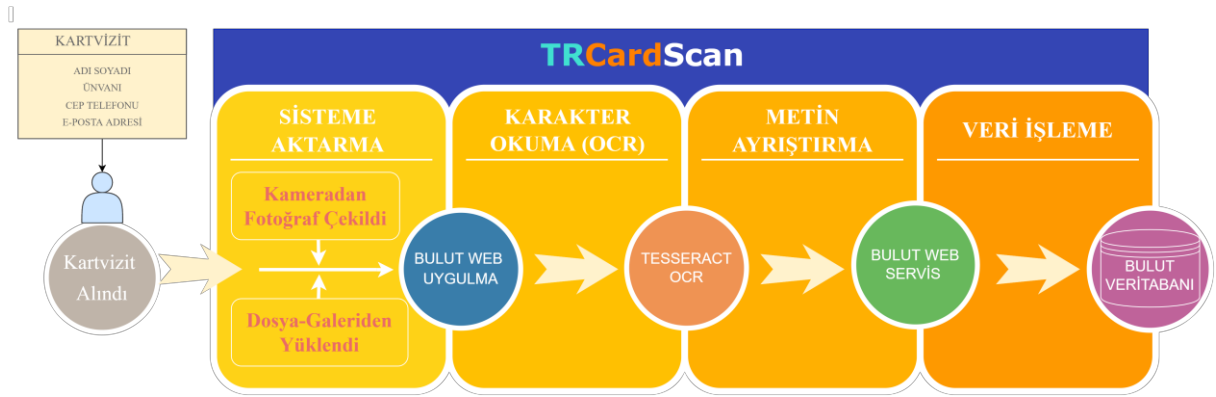
Şekil 1. Bulut bilişim servis katmanları

Geliştirilen yazılım, platform bağımsız olması için bulut tabanlı bir web uygulaması olarak tasarlanmıştır. Bu sayede farklı platformlardan ve dolayısıyla çeşitli cihazlardan (telefon, tablet, bilgisayar, araç paneli, akıllı TV gibi) kolayca erişilebilen bir uygulama olması sağlanmıştır. Fotoğrafi çekilen veya daha önce resim dosyası olarak kaydedilmiş fiziksel kartvizitin hem görüntü hem de işlenebilir metin (OCR ile resimden metne dönüştürme) olarak bulut tabanlı bir veritabanında saklanması amaçlanmıştır. Veritabanı işlemlerini yapmak için de ayrı bir WEB servisi yazılmıştır.

Çalışmada, Tesseract açık kaynak OCR yöntemi ile kartvizit görüntülerinden yazıya çevrilen veriler, kartvizit alanının karakteristik ve dilsel özelliklerine göre geliştirilen özgün algoritmalarla ayrıştırılmıştır. Bu veriler, telefon, e-posta, adres, isim, şirket veya diğer anlamlı bilgilerden oluşmaktadır. Ek olarak, geliştirilen yazılımda, algoritma dışında kalan ve ayrıştırılamayan bilgiler kullanıcıya seçenek olarak sorulup düzenleme esnekliği de sağlanmıştır.

2. GELİŞTİRİLEN BULUT TABANLI OTOMATİK KARTVİZİT TANIMA WEB UYGULAMASI: TRCARDSCAN (DEVELOPED CLOUD-BASED AUTOMATIC BUSINESS CARD RECOGNITION WEB APPLICATION: TRCARDSCAN)

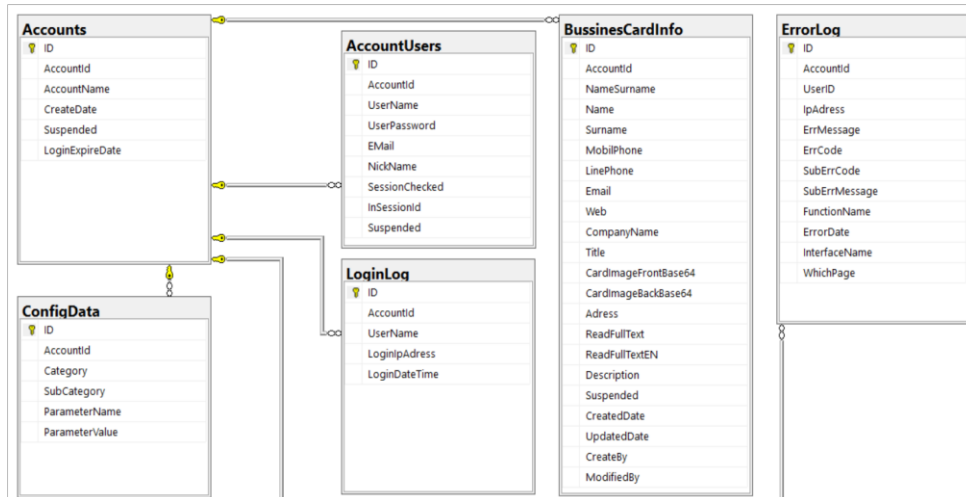
Bu bölümde, geliştirilen bulut tabanlı kartvizit tanıma yazılımının (TRCardScan) genel yapısına ve geliştirme süreçlerine yer verilmektedir. Önerilen kâğıt tabanlı Türkçe kartvizit okuyucu uygulamasına ait blok diyagram Şekil 2’de yer almaktadır. Blok diyagramdan da görüldüğü üzere, ilk olarak kartvizit görüntüleri kamera vasıtasıyla uygulamaya girdi olarak alınmaktadır. Daha sonra alınan bu kartvizit görüntüleri, Tesseract [21] OCR yöntemi ile karakter okuma işlemine tabi tutulmaktadır. OCR işlemi sonucu okunmuş ve dönüştürülmüş metinler ayrıştırma sürecine tabi tutulur. Bu süreçte isim, soy isim, cep telefonu, e-posta adresi ve iletişim adresi gibi veriler yer aldığı alanın karakteristiğine özgü yazılmış algoritmalarla ayrıştırılmaktadır. Son aşamada ise ayrıştırılan ve anlamlı veriler haline dönüştürülen her bir bilgi veri tabanındaki ilgili alana yazılmak üzere web servisine gönderilmektedir.



Şekil 2. Önerilen bulut tabanlı kartvizit okuyucu uygulamasına ait blok diyagram

2.1. Veritabanı ve Web Servis Tasarımı (Database and Web Service Design)

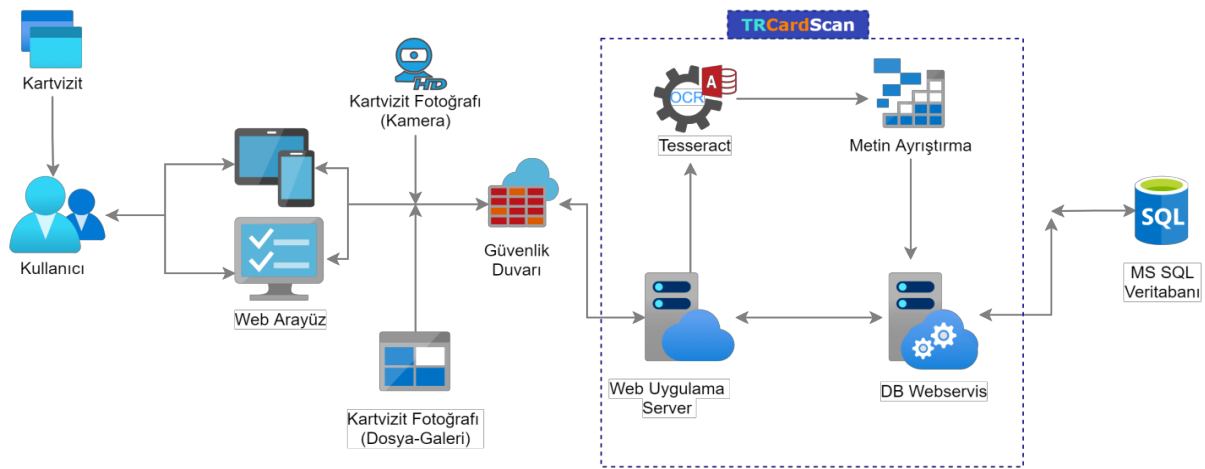
Çalışmaya özgü olarak MS SQL veritabanı yönetim sisteminde hazırlanan veritabanı, kartvizit işlemleri, üyelik işlemleri ve sistem gereksinimlerini kapsayan Şekil 3’te betimlenen 6 adet tablodan oluşmaktadır. “Account” tablosu üyelik sistemi için hesapların tutulduğu, “AccountUsers” tablosu ise hesaba bağlı kullanıcı bilgilerinin tutulduğu tablodur. Giriş ekranında yazılan kullanıcı adı ve şifre “AccountUsers” tablosu ile karşılaştırılmaktadır.



Şekil 3. Önerilen bulut tabanlı kartvizit okuyucu uygulamasına ait veritabanı varlık ilişki diyagramı

“BussinesCardInfo” tablosu kartvizit bilgilerinin tutulduğu tablodur. OCR yardımı ile okunan ve ayrıştırılan veriler bu tablodaki ilgili alanlara yazılmaktadır. Ayrıca daha sonra ihtiyaç duyulması halinde kullanılmak üzere ham veri de bu tabloda saklanmaktadır. “ConfigData” kullanıcı ve hesap bazlı parametrik olması gereken ayarların sakladığı sistem tablosudur. “LoginLog” tablosu, istatistiksel bilgi ve kullanıcı güvenliğini sağlamak için giriş bilgilerinin tutulduğu sistem tablosudur. “ErrorLog” tablosu, kullanıcıların aldığı hataların saklandığı tablodur.

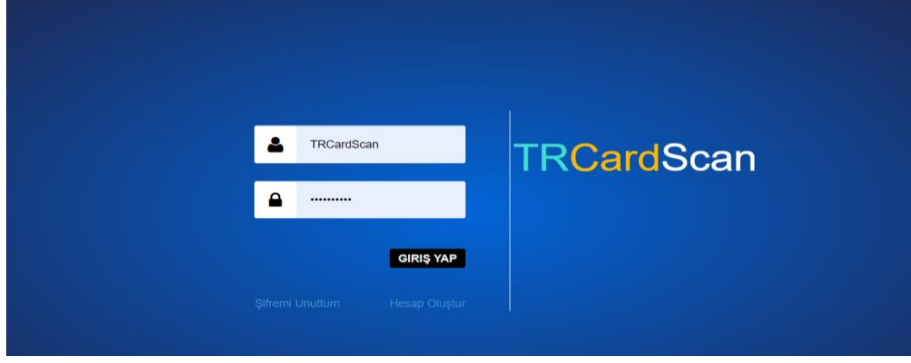
Veri tabanı işlemleri için web uygulaması ve veri tabanı arasında haberleşmeyi sağlayacak bir web servis tasarlanmıştır. Şekil 4.’de Sistem mimarisi diyagramında belirtildiği gibi kullanıcı ya da uygulama doğrudan veri tabanına erişemez. Bu yapı veri güvenliği için uygulanan bulut mimarisinde tercih edilen bir yapıdır. Aynı zamanda trafiğin paylaşılması ve kaynakların verimli kullanılması açısından da fayda sağlamaktadır. Web servis, kullanıcı yetki kontrolleri, veri ekleme, veri düzenleme, veri silme ve veri listeleme gibi birçok veri tabanı işlemlerini yapan metotları içermektedir. Bu metotların uygulama tarafında erişimine olanak tanıyan uç noktalar yardımı ile kullanılabilir. Bu metotların uygulama tarafında erişimine olanak tanıyan uç noktalar yardımı ile kullanılabilir.



Şekil 4. Önerilen bulut tabanlı kartvizit okuyucu uygulamasına ait sistem mimarisi

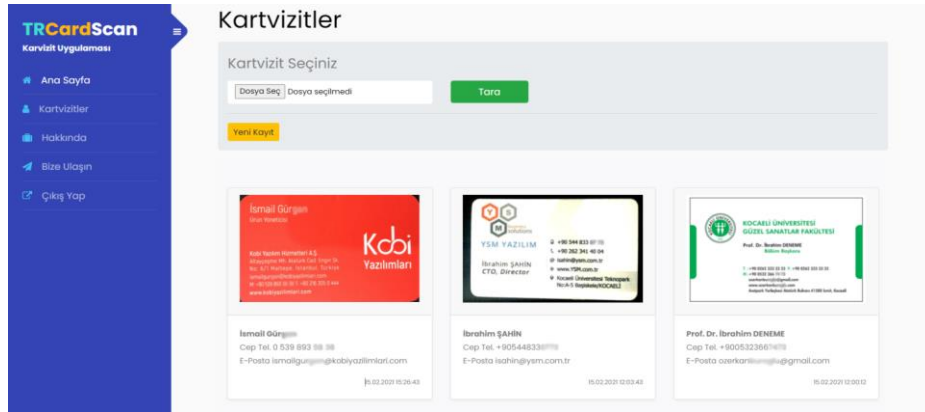
2.2. Arayüz Tasarımı ve Uygulama (Interface Design and Implementation)

Çalışmada kâğıt tabanlı kartvizit görüntüleri, Şekil 4’te yer alan sistem mimarisine göre, web ara yüzü aracılığı ile TRCardScan uygulamasına aktarılmaktadır. Kartvizit görüntüleri kamera yolu ile fotoğrafı çekilerek sisteme gönderilebileceği gibi var olan bir resim galerisinden seçilerek de sisteme aktarılabilir. Sistemin güvenlik duvarı, gelen istekleri karşılayarak yetkili kullanıcının isteğini web uygulama sunucusuna iletmektedir. Gönderilen istek TRCardScan uygulamasına entegre edilmiş Tesseract OCR motoru sayesinde işlenebilir metne çevrilmiştir. Kartvizit görüntülerinden dönüştürülmüş ham veri metin ayrıştırma algoritmaları aracılığıyla alanlara ayrıştırılmaktadır. Bu alanlar kartvizitin içeriğinde bulunan isim, soy isim, cep telefonu, e-posta adresi, unvanı-görevi, iletişim adresi vb. alanları içermektedir. Metin ayrıştırma işleminden sonra anlamlı veriler haline dönüştürülen alanlar DB web servis aracılığıyla MS SQL veri tabanına yazılmaktadır. Kullanıcı daha önce sisteme kaydettiği kartvizitleri görüntülemek için web ara yüzünü kullanarak, önce web uygulama sunucusuna istek göndermektedir. Uygulama sunucusu, yazılım aracılığıyla gelen kriterlere uygun veriyi DB web servisten çekerek web ara yüzüne göndermektedir. Geliştirilen TRCardScan uygulamasına ait giriş sayfası arayüz görüntüsü Şekil 5’te yer almaktadır. Görüldüğü üzere uygulama ara yüzü, kullanıcı doğrulama sayfası ile başlamaktadır. Bu sayfada kullanıcı adı ve şifre alanları girilerek kullanıcı kontrolü yapılmakta ve değerler doğru ise ana sayfaya yönlendirilmektedir. Daha önce hesap oluşturmamış kullanıcılar için “Hesap Oluştur” ve şifresini hatırlamayan kullanıcılar için ise “Şifremi Unuttum” butonları da bu sayfada yer almaktadır.



Şekil 5. Önerilen bulut tabanlı kartvizit okuyucu uygulamasına ait giriş sayfası görüntüsü

Kullanıcı kontrolü sonrası açılan ana sayfa görüntüsü Şekil 6’da verilmiştir. Bu sayfada kullanıcının kaydettiği son 6 kartvizit ön izleme şeklinde listelenmektedir. Ayrıca yeni kartvizit okuma işlemi yapabilmek için kartvizit yükleme aracı da bu arayüz ile gelmektedir. Kartvizitler sayfasında daha önce kaydedilen kartvizitler ile ilgili işlemler yapılmaktadır. Liste içinde arama, yeni kayıt ekleme, var olan kayıta güncelleme, silme gibi işlemler bu sayfadan yapılabilmektedir. Üyelik işlemleri sayfasında hesap bilgileri ve kullanıcı bilgileri ile ilgili işlemler yapılabilmektedir. Şifre değiştirme, hesap bilgilerini güncelleme, yeni kullanıcı tanımlama gibi işlemler de bu sayfadan yapılabilmektedir.



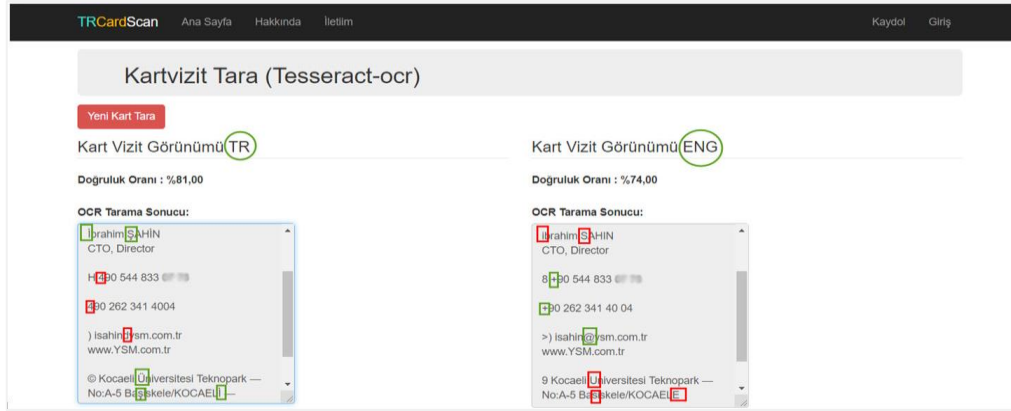
Şekil 6. Önerilen bulut tabanlı kartvizit uygulamasına ait ana sayfa görüntüsü

2.3. Kartvizit Görüntü İşleme (Business Card Image Processing)

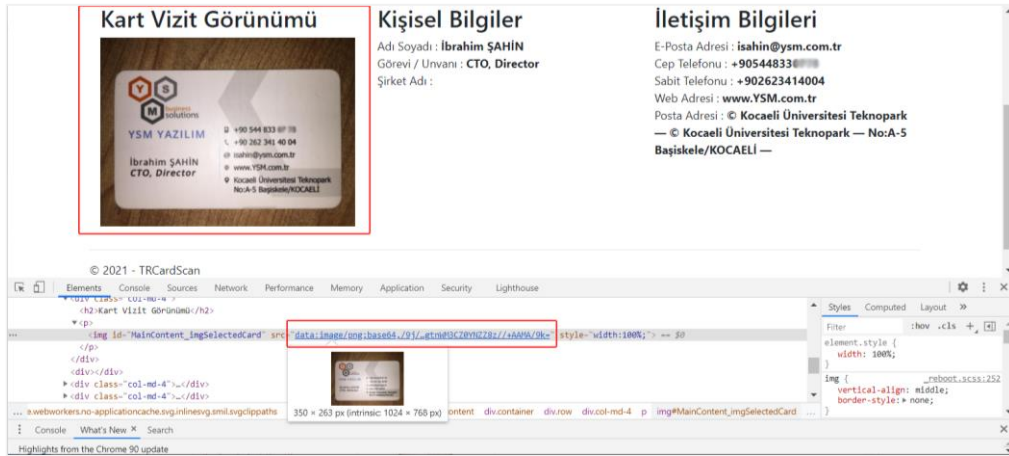
Çalışmada resim işleme ve metne çevirme işlemleri Tesseract OCR motoru kullanılarak yapılmaktadır. Tesseract’ın varsayılan dili İngilizce olduğundan herhangi bir güncelleme yapılmadan kullanıldığında özellikle isim ve adres kısımlarındaki Türkçe karakterlerin algılanmadığı görülmüştür. Tesseract motorunda her dil için yapılmış eğitim verileri bulunmaktadır. Türkçe eğitim verileri “tur.traineddata” dosyasında bulunmaktadır [21]. Yazılımda “tur.traineddata” dosyası “tessdata” klasörü içerisine kopyalanması gerekmektedir. Tesseract motoru çağırılırken de dil parametresi olarak Türkçe için “tur”, İngilizce için “eng” değeri gönderilmelidir.

Şekil 7’de bir Türkçe kartvizite ait Tesseract OCR ile tanıma sonuçlarına yer verilmektedir. Tesseract motoru Türkçe çağırıldığında e-posta adresinde özellikle “@” işaretinin, telefon numaralarında “+” şeklindeki karakterlerin algılanmadığı gözlemlenmiştir. Tesseract ile hem Türkçe hem de İngilizce tarama sonuçları satır satır karşılaştırılmış, tarama başarımı yüksek olan dil referans alınarak alanların ayrıştırılması gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, fotoğrafı çekilen veya klasörden seçilen kartvizit

görüntüleri Tesseract OCR ile işlenebilir metinler şeklinde veritabanında saklanırken, Şekil 8.'de görüldüğü gibi Base64 formatında resim olarak da kaydedilmektedir.



Şekil 7. Tesseract OCR ile örnek bir Türkçe kartvizitin tanıma sonuçları



Şekil 8. Uygulamada kayıtlı örnek kartvizite ait ekran görüntüsü ve ayrıştırılmış anlamlı bilgiler

2.4. Metin Ayrıştırma ve Alanların Tespiti (Text Parsing and Fields Detection)

Kartvizitte bulunan her alan (isim, soy isim, cep telefonu, sabit telefon, adres vb.) kendi karakteristik özelliklerini taşıdığı için ayrıştırma ve alan tespit yöntemleri farklılık göstermektedir. Ayrıca karakter tanıma işleminin daha verimli olması ve doğruluk oranının artırılması için daha önce kullanılmış bazı yöntemlerden de faydalanılmaktadır. Ayrıştırma işlemi en kolay ayrıştırılacak alanlardan en zora doğru bir sıralama ile yapılmaktadır. Buna göre kolaydan zora doğru; web adresi, e-posta adresi, cep telefonu, sabit telefon, görevi-unvanı, adı soyadı, adres ve şirket unvan bilgileri şeklinde ayrıştırılmaktadır.

2.4.1. Web adresi ayrıştırma (Web address parsing)

Web adresinin metin içerisinde belirlenebilmesi diğer alanlara göre daha kolaydır. Metin içerisinde “www” veya “http” ifadeleri ve nokta “.” karakterinin aynı anda geçtiği satırı belirleyip o satırdaki değer, web adresi olarak alınabilmektedir. Web adresinde okuma hatası sonucu, normal şartlarda olmaması gereken “><”) vb. karakterlerin geldiği gözlemlenmiştir. Bu karakterleri temizlemek üzere yazılıma eklenen kod bloğu ile daha doğru sonuçlar elde edilmektedir.

2.4.2. Web adresi ayrıştırma (Web address parsing)

E-posta adresinin metin içerisinde belirlenebilmesi de diğer alanlara göre daha kolaydır. Bunun için “@” karakteri ve nokta “.” karakterinin aynı anda geçtiği satır belirlenip, ilgili satırdaki değer e-posta adresi olarak ayrıştırılabilmektedir. E-Posta adresinde normal şartlarda olmaması gereken “>”) (” vb. karakterlerin geldiği gözlemlenmiş ve karakterleri temizlemek için de web adres bölümündeki yaklaşım kullanılarak daha doğru tanıma gerçekleştirilmiştir.

2.4.3. Cep ve sabit telefon numarası ayrıştırma (Mobile and line phone number parsing)

Cep telefonunun 0’dan sonra ilk üç hanesinin belirleyici olduğu bilinmektedir. Kartvizitten OCR ile çıkartılan metinlerden cep telefonu verisini belirleyebilmek için Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK), tarafından düzenlenen ve Türkiye’deki tüm operatörlerin alan kodu bilgisinin yer aldığı “Türkiye ulusal numaralandırma planı” kullanılmaktadır. Bu kodlar bir diziye yazılarak karşılaştırma için kullanılmıştır. Bazı durumlarda üç haneli kodun başka metinlerin içinde de geçebildiği tespit edilmiştir. Çözüm için farklı bir algoritma daha kurgulanmıştır. Buna göre, okunan metinde yan yana 10 adet sayısal karakter var ve sıfırdan sonraki ilk 3 rakam operatörlerin kodları ile eşleşiyorsa o satırdaki değeri cep telefonu bilgisi olarak tespit edilmektedir. Cep telefonunda olduğu gibi; eğer okunan metinde yan yana 10 karakter, sayısal karakter ise ve sıfırdan sonraki ilk üç rakam şehir kodları ile eşleşiyorsa, o satırdaki değer sabit telefon bilgisi alanına yazılmaktadır.

2.4.4. İş unvanı/ görevi ayrıştırma (Job title/ task parsing)

İş unvanları veya görevi kartvizitlerden okunan metinlerden ayrıştırılması diğer bilgilerin ayrıştırılmasından nispeten daha zordur. Unvanların kısaltılmış halleri yazıldığı gibi bazı durumlarda yaygın kullanılmayan kısaltmaların da yapıldığı gözlemlenmiştir. Bazı kartvizitlerde uluslararası firmalarda yaygın olarak kullanılan ve ülkemizde de kabul görmüş CEO, CTO, CFO gibi kısaltmalar da kullanılmaktadır. Bazı durumlarda pozisyon, görev, rütbe gibi unvanların da kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu durumlara uygun olarak en doğru ayrıştırma yapabilmek için kapsamlı bir eşleştirme listesi ve sıralı karşılaştırma mantığı kurgulanması gerekmektedir.

Bu kapsamda, en yaygın kullanılan İngilizce kısaltmaların listesi bir diziye eklenerek ilk karşılaştırma bu dizi ile yapılmıştır. Kısaltma listelerinde eşleşme bulunamaması halinde bir sonraki karşılaştırma listesine geçilmektedir. Bu liste unvanlarda en çok geçen kelimeleri içeren bir listedir. Listeyi oluşturmak için Türkiye’de yaygın olarak kullanılan insan kaynakları sitesinden faydalanılmıştır. Kısaltılmış bu listede “Müdür”, “Başkan”, “Uzman”, “Eleman”, “Amir”, “Usta” gibi birçok unvanda geçmesi muhtemel kelimeler vardır. Sık kullanılan unvanlar listesinde de eşleşme bulunamadıysa daha fazla bilgiyi içeren tam unvan listesi ile karşılaştırma yapılmaktadır. Liste içeriği örneğin; Acil Tıp Uzmanı, Akademik Personel, Bilişim Teknolojileri Öğretmeni, Grafik Tasarımcı, Kalibrasyon Uzmanı, Köşe Yazarı gibi yaklaşık 1600 pozisyon ismi yer almaktadır. Üç listeden herhangi biriyle eşleşen satır belirlenip o satırdaki değer, unvan alanı olarak belirlenmektedir.

2.4.5. Adı ve soyadı ayrıştırma (Parsing name and surname)

Ad ve soyad bilgisinin metin içerisinde belirlenebilmesi için ayraç olarak, Türkiye’de kullanılan tüm isimlerin listesi kullanılmıştır [22, 23]. Liste, yazılım içerisinde bir sınıf oluşturularak karşılaştırma yapılmak üzere diziye aktarılmıştır. Bu listede yaklaşık 12.900 isim bulunmaktadır. Eğer okunan değer, isim listesi ile eşleşiyorsa o satırdaki değer, adı soyadı alanına atanmaktadır.

2.4.6. Adres ayrıştırma (Address parsing)

Adres bilgisinin metin içerisinde belirlenebilmesi için ayraç olarak iki faktörlü bir karşılaştırma yapılmıştır. Bunun için Türkiye’deki şehirlere ve adreste geçmesi muhtemel kelimelere ihtiyaç duyulmuştur. Şehir isimlerinin olduğu bir sınıf oluşturularak isimler diziye yazılmıştır. Ayrıca çeşitli kartvizitler incelenerek adreste geçmesi muhtemel kelimeler de belirlenmiştir. Örnek olarak mahalle, sokak, cadde, no, apartman, blok, bina, posta kutusu vb. kelimeleri ve bunların “apt.”, “mah.”, “cad.” gibi

kısaltmaları verilebilir. Ayırıştırma işleminde satırda, şehir ismi geçiyor ve aynı zamanda mahalle, sokak gibi adres belirten kelimeler geçiyorsa o satırdaki değer adres alanı olarak belirlenmiştir.

2.4.7. Şirket unvanı ayırıştırma (Company title parsing)

Diğer alanlara göre ayırıştırması ve tespit edilmesi en zor şirket unvanı alanıdır. Şirket Unvanı bilgisinin metin içerisinde belirlenebilmesi için unvan içerisinde kullanılan kelimelere ihtiyaç duyulmaktadır. Örnek kartvizitler incelenerek “Anonim”, “Şirketi”, “Sanayi”, “Ortaklığı”, “Komandit”, “Kolektif”, “Kooperatif”, “Ticaret”, “Hizmetleri”, “Pazarlama”, “Yatırım”, “Üniversitesi”, “Fakültesi” gibi kelimelerin ve bunlar için kullanılan “Şti.”, “A.Ş.”, “A.O.”, “San.”, “Tic.”, “Ltd.” gibi kısaltmaların kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu kelimeler ve kısaltmaları için bir sınıf oluşturularak, her biri bir diziye aktarılmıştır. Ayırıştırma işleminde satırda, bu listedeki ayraçlardan herhangi biri geçiyorsa o satırdaki değer şirket unvanı alanı olarak belirlenmiştir. Bu alanı ayırıştırmanın zor olmasının en önemli sebebi, sıklıkla şirkete ait tam unvan kullanmak yerine şirket logosunun kartvizitlerde kullanılmasıdır.

2.5. Gözlem ve Değerlendirilmesi (Observation and Evaluation)

Geliştirilen yazılımın, kartvizit okuma ve metin ayırıştırma performansını değerlendirmek için Şekil 9’da yer alan arayüz kullanılarak 15 adet, farklı karakteristik özelliklere sahip Türkçe kartvizit kullanılarak bir dizi test çalışması gerçekleştirilmiştir. Test çalışması neticesinde elde edilen alan bazlı ve kart bazındaki ayrıntılı doğruluk sonuçları sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de yer almaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen Türkçe kartvizit tanıma yazılımının fiziksel kartvizitin tüm alanları dikkate alındığında ortalama %82’lik bir doğrulukta okuma ve ayırıştırma yaptığı tespit edilmiştir. Ayırıştırılan alanların doğruluk oranları, adı soyadı %93, e-posta adresi %93, cep telefonu %87, web adresi %89, görevi / unvanı %92, şirket adı %33, posta adresi %73 oranlarında hesaplanmıştır. Öte yandan, kartvizit işleme süresi, kartvizitin çözünürlüğüne, içerdiği bilgilerin karmaşıklığına ve satır sayısına göre değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir.















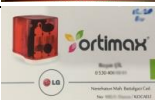


Şekil 9. Fiziksel kartvizit okuma ve metin ayırıştırma arayüzü

Metin ayırıştırma algoritmalarının birçok kartvizit için doğru çalıştığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte okunamayan metinlerin, tespit edilemeyen alanların da olduğu gözlemlenmiştir. Karakterlerin ya da metinlerin okunmadığı durumlar çoğunlukla çözünürlüğü düşük, ışık ve parlaklığın kötü olduğu, koyu arka plan kullanılmış kartvizit görüntülerinin işlenmesinde gözlemlenmiştir. Karakterleri okunduğu ve metne çevrildiği halde herhangi bir alanla eşleştirilemeyen bilgiler, çoğunlukla aynı satırda birden fazla alana ait bilginin yer aldığı satırlardan kaynaklanmaktadır. Aynı satırda örneğin web sayfası ve e-posta adresi yan yana yazılmışsa sadece bir tanesi ile eşleştirilebildiği gözlemlenmiştir. Eksik eşleştirilen alanlarda ise sorun, çoğunlukla aynı alan verisinin birden fazla satırda yazılmış olması durumunda karşılaşılmıştır.

Tablo 1. Kartvizit okuma ve ayrıştırma doğruluk analizi

Doğru: D; Yanlış: Y Okunamadı: × Veri Yok: -

| SN | Kartvizit | Adı Soyadı | E-Posta Adresi | Telefon Nu. | Web Adresi | Görev Unvanı | Şirket Adı | Posta Adresi | Doğruluk % |
|----|---|------------|----------------|-------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| 1 |  | D | D | D | - | D | - | D | 100 |
| 2 |  | D | D | D | D | D | D | D | 100 |
| 3 |  | D | D | D | - | D | Y | D | 83 |
| 4 |  | D | D | × | × | - | × | D | 43 |
| 5 |  | × | D | D | D | Y | Y | Y | 43 |
| 6 |  | D | D | D | D | D | - | D | 100 |
| 7 |  | D | D | × | - | D | - | D | 80 |
| 8 |  | D | × | D | - | - | × | D | 60 |
| 9 |  | D | D | D | - | D | D | × | 83 |
| 10 |  | D | D | D | D | D | - | × | 100 |
| 11 |  | D | D | D | D | D | Y | D | 86 |
| 12 |  | D | D | D | D | D | × | × | 71 |
| 13 |  | D | D | D | D | D | D | D | 100 |
| 14 |  | D | D | D | D | D | - | D | 100 |
| 15 |  | D | - | D | - | - | - | D | 75 |

Tablo 2. Ayrıştırılan alanlara göre doğruluk oranı tablosu

| Ayrıştırma yapılan alan adı | Doğruluk Oranı % (15 Kartvizit) |
|-----------------------------|---------------------------------|
| 1- Adı Soyadı | %93 |
| 2- E-Posta Adresi | %93 |
| 3- Cep / Sabit Telefon | %87 |
| 4- Web Adresi | %89 |
| 5- Görevi / Unvanı | %92 |
| 6- Şirket Adı | %33 |
| 7- Posta Adresi | %73 |

Tablo 2’de yer alan 15 adet kartvizitin tüm alanları için başarıyı değerlendirildikten sonra, hemen hemen tüm kartvizitlerde yer alan isim, telefon ve posta adresi gibi ortak alan bilgilerinin çıkartım başarıyı da değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede “Başarılı” tanımlaması ilgili alana ait kartvizit bilgisinin doğru bir şekilde çıkartıldığı, “Başarısız” tanımlaması ise ilgili alana ait kartvizit bilgisinin çıkartılmadığı veya yanlış çıkartıldığı anlamına gelmektedir. Tablo 3’ten görüldüğü üzere, TRCardScan yazılımı, isim, telefon numarası ve e-posta adresi bilgilerini sırasıyla %93, %87 ve %93 oranlarında başarılı olduğu tespit edilmektedir. Birçok kartvizitte yer alan bu ortak alanların başarılı bir şekilde çıkartımı ortalama %91’dir. Literatürde yer alan çalışmalarla kıyaslandığında bu oranın makul ve kabul edilebilir seviyelerde olduğu değerlendirilmektedir [5-11].

Tablo 3. Kartvizit okuma ve ayrıştırma doğruluk analizi

| Kartvizit Alanı Okuma | | Toplam Kartvizit | (%) |
|-----------------------|---|------------------|-----|
| Adı | ☑ | 14 | 93 |
| Soyadı | ☒ | 1 | 7 |
| Telefon Numarası | ☑ | 13 | 87 |
| | ☒ | 2 | 13 |
| E-posta Adresi | ☑ | 13 | 93 |
| | ☒ | 2 | 7 |

☑: Başarılı, ☒: Başarısız

TRCardScan yazılımının Tablo 2’de yer alan 15 adet fiziksel kartvizitin, çeşitli alanlarını okuma ve ayrıştırma başarıyı değerlendirilmek için Şekil 10’da yer alan karmaşıklık matrisleri aşağıdaki açıklamalar çerçevesinde oluşturulmuştur. Buna göre *TP*, *FN*, *FP* ve *TN* elemanları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

TP: Gerçekte fiziksel kartvizitte ilgili alan bilgisi **var iken**, Tesseract OCR tabanlı TRCardScan yazılımı bu bilgiyi **doğru olarak bulmaktadır**. Tablo 2’de “D” ile gösterilen “Doğru Okudu” verisi burada değerlendirilmektedir.

FN: Gerçekte fiziksel kartvizitte ilgili alan bilgisi **var iken**, Tesseract OCR tabanlı TRCardScan yazılımı bu bilgiyi **doğru olarak bulamamaktadır**. Tablo 2’de “×” ile gösterilen “Okunamadı” verisinin tamamı ve “Y” ile gösterilen “Yanlış Okundu” verisinin bir kısmı burada değerlendirilmektedir.

FP: Gerçekte fiziksel kartvizitte ilgili alan bilgisi **yok iken**, Tesseract OCR tabanlı TRCardScan yazılımı bu alanla ilgili bilgiyi **bulmaktadır**. Tablo 2’de “Y” ile gösterilen “Yanlış Okundu” verisinin kalan kısmı burada değerlendirilmektedir.

TN: Gerçekte fiziksel kartvizitte ilgili alan bilgisi **yok iken**, Tesseract OCR tabanlı TRCardScan yazılımı bu alanla ilgili bilgiyi **bulamamaktadır**. Tablo 2’de “-” ile gösterilen “Veri Yok” bilgisi burada değerlendirilmektedir.

| | | TRCardScan (Adı Soyadı) | |
|---------------------------|-----|----------------------------|-----------|
| | | Okudu | Okumadı |
| Fiziksel Kartvizit Verisi | Var | TP (14) | FN (1) |
| | Yok | FP (-) | TN (-) |

(a)

| | | TRCardScan (Telefon Numarası) | |
|---------------------------|-----|------------------------------------|-----------|
| | | Okudu | Okumadı |
| Fiziksel Kartvizit Verisi | Var | TP (13) | FN (2) |
| | Yok | FP (-) | TN (-) |

(b)

| | | TRCardScan (E-posta adresi) | |
|---------------------------|-----|----------------------------------|-----------|
| | | Okudu | Okumadı |
| Fiziksel Kartvizit Verisi | Var | TP (13) | FN (1) |
| | Yok | FP (-) | TN (1) |

(c)

| | | TRCardScan (Tüm Alanlar) | |
|---------------------------|-----|-------------------------------|------------|
| | | Okudu | Okumadı |
| Fiziksel Kartvizit Verisi | Var | TP (73) | FN (13) |
| | Yok | FP (3) | TN (16) |

(d)

Şekil 10. Kartvizit alanları için karmaşıklık matrisleri: (a) Adı/ Soyadı, (b) Telefon Numarası, (c) E-posta adresi ve (d) Tüm alanlar

Bilindiği üzere, doğruluk (Accuracy, A), kesinlik (Precision, P), duyarlılık (Recall, R) ve $F1$ skoru gibi performans metrikleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$A = \frac{TP + TN}{TP + TN + FN + FP} \quad (1)$$

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

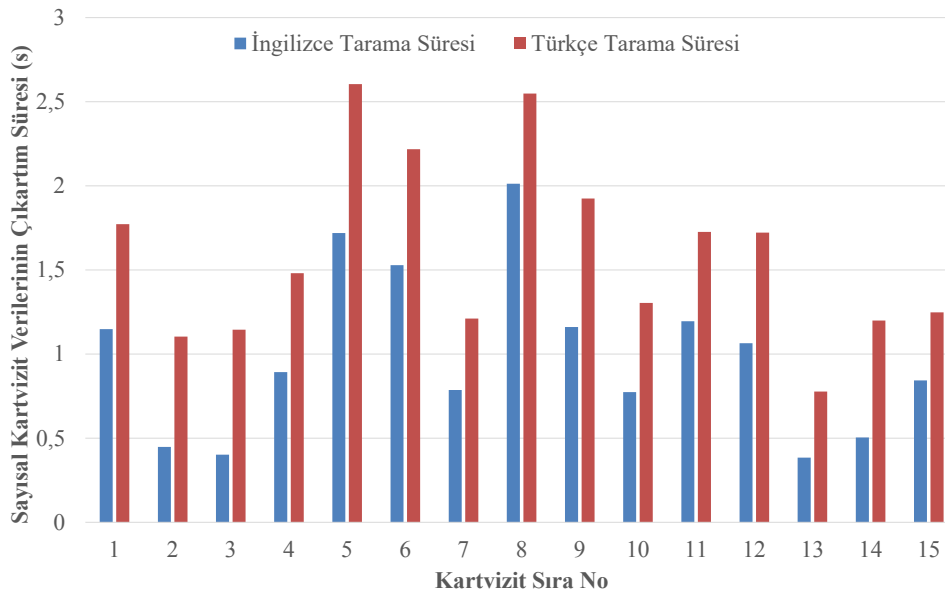
$$F1 = 2 * \frac{P * R}{P + R} \quad (4)$$

Önerilen Tesseract OCR tabanlı TRCardScan yazılımının performans metrik değerleri (1-4) denklemleri ile hesaplanmış ve Tablo 4'te listelenmiştir. Görüldüğü üzere önerilen TRCardScan yazılımı, %84,76 Doğruluk, %96,05 Kesinlik, %84,88 Duyarlılık ve %90,12 F1 Skoru ile fiziksel kartvizitlerden, sayısal kartvizit verilerini çıkarabildiği görülmektedir. Bu oranlar, önerilen Tesseract OCR tabanlı TRCardScan yazılımının fiziksel kartvizitlerden, sayısal kartvizit verilerinin çıkarımında kabul edilebilir oranlardaki başarıma sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 4. Kartvizit okuma ve ayrıştırma doğruluk analizi

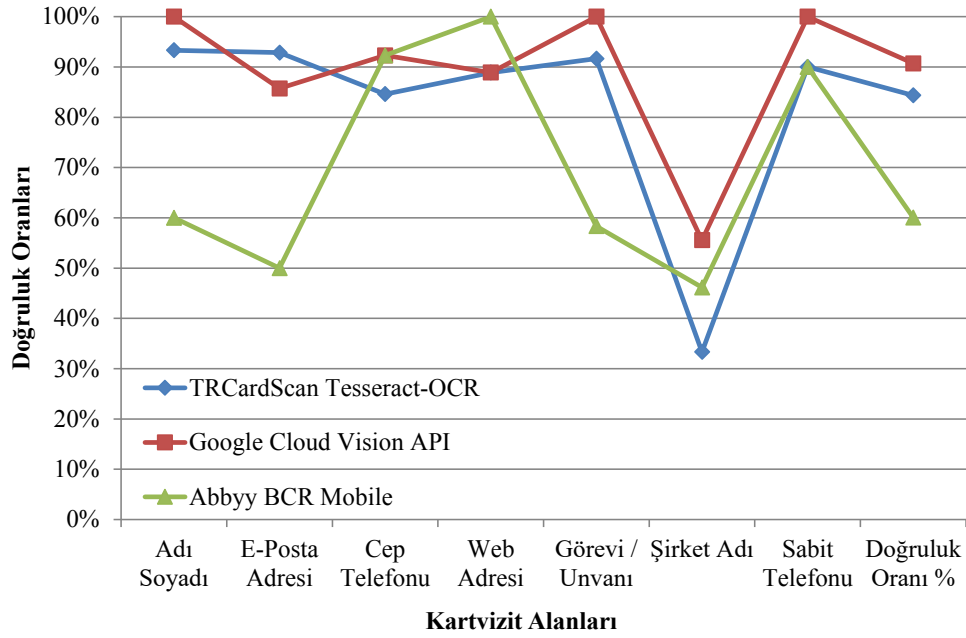
| Kartvizit Alanları | Metrik Değerleri | | | |
|--------------------|------------------|--------------|----------------|----------|
| | Doğruluk (A) | Kesinlik (P) | Duyarlılık (R) | F1 Puanı |
| Adı Soyadı | 0,9333 | 1 | 0,9333 | 0,9654 |
| Telefon No. | 0,8666 | 1 | 0,8666 | 0,9285 |
| E-posta Adresi | 0,9333 | 1 | 0,8666 | 0,9285 |
| Tüm Alanlar | 0,8476 | 0,9605 | 0,8488 | 0,9012 |

Önerilen TrCardScan yazılımının, Tablo 2’de yer alan 15 adet fiziksel kartvizit için İngilizce ve Türkçe modelleri kullanılarak kartvizit alanlarının okuma ve ayrıştırma süre analizleri Şekil 11’de yer almaktadır. Görüldüğü üzere, İngilizce model kullanılarak gerçekleştirilen çıkartım süreleri, Türkçe modele göre ortalama 0,608 saniye daha hızlıdır. Karmaşık olmayan ve az veri olan kartvizitlerde okuma hızı farkı yaklaşık 0,39 saniye iken daha karanlık ortamda çekilmiş, koyu renkli ve daha çok yazı içeren kartvizitlerde ise okuma hız farkı 0,88 saniye olarak tespit edilmiştir. Türkçe OCR işleminin daha yavaş olması, temelde, İngilizce dilinde olmayan Türkçe diline özgü “ç, ğ, ö, ş, ı, ü, Ç, Ğ, Ö, Ş, İ, Ü” karakterlerin kullanılmasıdır. Bu karakterler, OCR motorlarının varsayılan eğitim verilerinde tanımlı olmadığı için ya kendine en yakın harf olarak algılanmakta ya da ayrıştırılan metinlerde farklı karakterler (><, (, gibi) olarak tespit edilmektedir. Okuma ve ayrıştırma işlemi Türkçe dili için hazırlanmış eğitim verileri kullanılarak yapıldığında ise metin ayrıştırma algoritmasına daha doğru veri iletildiği için metinlerin doğru şekilde tespit edilerek ilgili alanla eşleştirme oranları da artmaktadır.

**Şekil 11.** Önerilen TrCardScan yazılımının İngilizce ve Türkçe eğitim modelleri için 15 adet kartvizitteki çıkartım süreleri.

Öte yandan geliştirilen yazılımın, literatürde yer alan erişime açık yazılımlarla ilgili kartvizit alanlarının çıkartım başarımları ve çalışma hızları açısından karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 12 ve Tablo 5’te sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, 15 adet kartvizit için elde edilen ortalama doğruluk oranları TRCardScan, Google Cloud Vision API ve Abbyy BCR Mobile uygulamaları için sırasıyla %84,76, %90 ve %60 dır. Ayrıca Tablo 5’te verilen ortalama okuma ve ayrıştırma sürelerine göre en hızlı Abbyy BCR Mobile uygulaması iken, önerilen TrCardScan yazılımı, kart başına ortalama 1,6 sn’lik çıkartım süresine sahiptir. Google’ın sağlamış olduğu OCR API ise 5,30 sn’lik bir sürede kartvizit verilerini sayısallaştırabilmektedir. Bu sonuçlara göre önerilen TRCardScan yazılımı benzerleri ile kıyaslandığında

yüksek doğruluk oranlarında makul çıkartım süreleri ile fiziksel kartvizitlerdeki verileri başarılı bir şekilde okuyarak ayrıştırabilmektedir.



Şekil 12. Önerilen TrCardScan yazılımının, literatürde yer alan benzer kartvizit okuyucuları ile karşılaştırılması.

Tablo 5. Önerilen TrCardScan yazılımının, literatürde yer alan benzer kartvizit okuyucular ile ortalama veri çıkartım süreleri.

| | TrCardScan (Tesseract-OCR) | Google Cloud Vision API | Abbyy BCR Mobile |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------|
| Kartvizit Tarama Süresi (s) | 1,60 | 5,30 | 1,37 |

Tablo 6. Önerilen TRCardScan ve literatürde yer alan benzer çalışmaların değerlendirme sonuçları

| Referans | Kullanılan Yöntem | Dil | Örnek Sayısı | Doğruluk (%) |
|-----------------------|-------------------|------------------------|--------------|---|
| Thuan ve diğ. [5] | Google Vision | İngilizce Vietnamca | 170 | Adı Soyadı: 77,1 Telefon N : 93,5 E-posta : 94,7 Ortalama : 88,4 |
| Hung ve Linh [6] | Tesseract | İngilizce Vietnamca | 54 | Adı Soyadı: 80,0 Telefon N : 96,7 E-posta : - Ortalama : 88,6 |
| Dangiwa ve Kumar [10] | Tesseract | İngilizce | 55 | Adı Soyadı: 53,8 Telefon N : 100 E-posta : 83,3 Ortalama : 79,0 |
| TRCardScan | Tesseract | İngilizce Türkçe | 15 | Adı Soyadı: 93,0 Telefon N : 87,0 E-posta : 93,0 Ortalama : 84,7 |

Son olarak, önerilen yazılımın literatürdeki yerini ve katkısını ortaya koymak için benzer yazılımlarla kıyaslanmış ve fiziksel kartvizit alanlarının çıkartım performansları Tablo 6'da sunulmuştur. Görüldüğü üzere, önerilen Tesseract OCR tabanlı yazılım Adı Soyadı, Telefon Numarası, E-posta adresi alanlarının çıkarımında yüksek doğruluk oranları ile başarılı bir performans sergilemektedir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Çalışma kapsamında, günlük hayatta yaygın olarak kullanılan Türkçe dilinde tasarlanmış kartvizitlere ait görüntülerin OCR yöntemi ile işlenebilir anlamlı bilgilerin elde edilerek ayrıştırılması ve bu bilgilerin bulut tabanlı bir veritabanında saklanması için bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılımda, kartvizit görüntülerinden işlenebilir bilgilerinin elde edilmesi Tesseract kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kartvizit bilgileri dört aşamalı bir akış ile ayrıştırılmıştır. İlk aşama, kartvizitin sisteme aktarılması, ikinci aşama Tesseract OCR motoru aracılığıyla karakterlerin okunması, üçüncü aşamada metin ayrıştırma, dördüncü ve son aşamada ise ayrıştırılan ve anlamlı veriler haline dönüştürülen her bir alanın veritabanında yazılması şeklindedir.

Analiz ve değerlendirme için 15 adet farklı özellikteki kartvizit ile yapılan çalışmalarda önerilen TRCardScan yazılımı, %84,76 Doğruluk, %96,05 Kesinlik, %84,88 Duyarlılık ve %90,12 F1 Skoru ile fiziksel kartvizitlerden, sayısal kartvizit verilerini çıkarabildiği gözlemlenmiştir. İsim/ soyisim, telefon numarası, e-posta adresi, gibi birçok kartvizitte yer alan ortak alanların başarılı bir şekilde çıkartımı ortalama %90'ın üzerindedir. Bu sonuç ilgili alanlar için kurgulanan ayrıştırma algoritmasını başarılı olduğunu göstermektedir. Şirket adı çıkartım algoritması %33 oranla en düşük doğruluk oranına sahiptir. Bu sonuç bu alanla ilgili farklı algoritmalar oluşturulması gerektiğini göstermektedir. Sonraki çalışmalarda çıkarım başarımları düşük olan kartvizitler ve alanlar daha detaylı incelenerek algoritmaların iyileştirilebilir ve yeni algoritmalar geliştirilerek daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Ek olarak TRCardScan, benzer yazılımlarla kıyaslandığında ortalama 1,6 sn'lik makul çıkartım süreleri ile fiziksel kartvizitlerdeki verileri yüksek doğruluk oranlarında okuyarak ayrıştırabilmektedir.

Ayrıca gelecek çalışmalar kapsamında, eşleşmeyen kartvizit veriler için bir algoritma ile kendi kendine karar verebilecek ve kullanıcıya önerilerde bulunabilecek akıllı bir sistem tasarlanması hedeflenmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Değerli yorumları için isimsiz hakemlere teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kakani B. V., Gandhi D., Jani S., Improved OCR based automatic vehicle number plate recognition using features trained neural network, In 2017 8th international conference on computing, communication and networking technologies, (2017) 1-6.
- [2] Shen H., Coughlan J. M., Towards a real-time system for finding and reading signs for visually impaired users, In International Conference on Computers for Handicapped Persons, Springer, Berlin, Heidelberg, (2012) 41-47.
- [3] Emekligil E., Arslan S., Agin O., A bank information extraction system based on named entity recognition with CRFs from noisy customer order texts in Turkish, In International Conference on Knowledge Engineering and the Semantic Web, Springer, Cham, (2016) 93-102.
- [4] Chauhan P., Luthra P., Ahmad Ansari I., Road Sign Detection Using Camera for Automated Driving Assistance System. In Proceedings of the International Conference on Advances in Electronics, Electrical & Computational Intelligence (ICAEEC), (2019).
- [5] Thuan N. H., Nhan D. T., Toan L. T., Giang N. X. H., Truong Q. B., An Android Business Card Reader Based on Google Vision: Design and Evaluation, In *Context-Aware Systems and Applications, and Nature of Computation and Communication*, Springer, Cham, (2019) 223-236.
- [6] Hung P. D., Linh D. Q., Implementing an android application for automatic vietnamese business card recognition, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 29(1) (2019), 156-166.

- [7] Saiga H., Nakamura Y., Kitamura Y., Morita T., An OCR system for business cards, IEEE In Proceedings of 2nd International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR'93), (1993) 802-805.
- [8] Chiou Y. H., Lee H. J., Recognition of Chinese business cards, IEEE in Proceedings of the Fourth International Conference on Document Analysis and Recognition, 2 (1997) 1028-1032.
- [9] Wang Y. K., Fan K. C., Juang Y. T., Chen T. H., Using hidden Markov model for chinese business card recognition, IEEE In Proceedings 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No. 01CH37205), 1 (2001) 1106-1109.
- [10] Dangiwa B. A., Kumar, S. S., A business card reader application for iOS devices based on Tesseract, IEEE In 2018 International Conference on Signal Processing and Information Security (ICSPIS), (2018) 1-4.
- [11] Shinde A., Tungar M., Khairnar P., Gunjkar J., Energy Efficient Business Card Recognition and Translation over Cloud Computing using Google Vision, GRD Journals- Global Research and Development Journal for Engineering, 2(4) (2017) 80-84.
- [12] Tesseract_(software), [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesseract_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesseract_(software)), Ziyaret Tarihi: 22.11.2021.
- [13] Smith R., An overview of the Tesseract OCR engine, IEEE In Ninth international conference on document analysis and recognition, 2 (2007) 629-633.
- [14] Smith R. W., Hybrid page layout analysis via tab-stop detection, IEEE In 2009 10th International Conference on Document Analysis and Recognition, (2009) 241-245.
- [15] Smith R., Antonova D., Lee D. S., Adapting the Tesseract open source OCR engine for multilingual OCR, In Proceedings of the International Workshop on Multilingual OCR, (2009) 1-8.
- [16] Smith R., Limits on the application of frequency-based language models to OCR, IEEE In 2011 International Conference on Document Analysis and Recognition, (2011) 538-542.
- [17] Lee D. S., Smith R., Improving book ocr by adaptive language and image models, IEEE In 2012 10th IAPR International Workshop on Document Analysis Systems, (2012) 115-119.
- [18] Unnikrishnan R., Smith R., Combined script and page orientation estimation using the tesseract ocr engine, IEEE In Proceedings of the international workshop on multilingual OCR, (2009) 1-7.
- [19] Rice S. V., Jenkins F. R., Nartker T. A., The fourth annual test of OCR accuracy, Technical Report 95, 3 (1995) 1-39.
- [20] Okutucu B. O., Bulut Bilişim ve Teknolojileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Okan Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, (2012).
- [21] Tesseract OCR, <https://github.com/tesseract-ocr>, Ziyaret Tarihi: 22.11.2021.
- [22] <https://gist.github.com/ismailbaskin/1325813> Ziyaret Tarihi: 26.11.2021.
- [23] <https://data.tuik.gov.tr/> Ziyaret Tarihi: 26.11.2021.

Numerical Investigation Of Coke Oven Gas Combustion Characteristics In A Premixed Burner

Sezgin TAŞDEMİR^{1,*}  Serhat KARYEYEN²  Mustafa İLBAŞ² 

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 17.01.2022
Revision: 22.02.2022
Accepted: 02.03.2022

Highlights

- CFD Modelling
- Premixed Flame
- Reaction Mechanism

Keywords

Coke Oven Gas
Combustion
Emission
Premixed Burner

In this study, the premixed combustion performance and emission characteristics of coke oven gas, which is a by-product of coal coking, were numerically investigated.

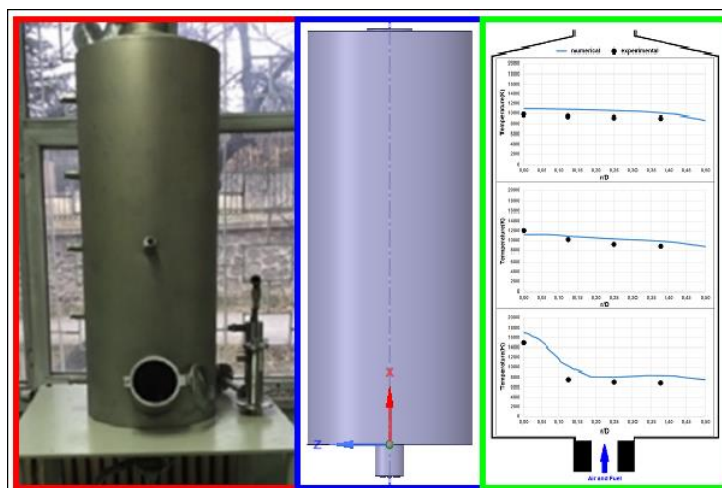


Figure A. Experimental system, numerical modeling and results

Purpose: In order to meet our ever-increasing energy needs, it may not be convenient to directly use the coal reserves. Gases obtained from coal exposed to heat treatment in an oxygen-free environment, on the other hand, would be more appropriate to consume because it is requires a simple and small burner, and especially forms less pollutant emissions.

Theory and Methods: A premixed burner pre-mixing the fuel and air, and introducing the mixture to the combustion chamber was used to burn the coke oven gas. The fuel-air mixture was consumed as premixed at excess air ratios of $\lambda=1,2$ and $\lambda=1,5$ under lean combustion conditions. In the study presented, the amount of fuel corresponding to a power of 10 kW was introduced to the combustion chamber. The experimental setup in which the measurements were made was modeled as three-dimensional through a commercial code ANSYS-Fluent. Combustion modeling was carried out by integrating the Eddy Dissipation Concept into the combustion model by creating 21, 27, 78, 162 and 239-step reactions for the coke oven gas and end-of-combustion NO_x estimations with the help of GRI-Mech 3.0 chemical kinetics as a combustion model. P-1 was chosen as the radiation model, and 3 different turbulence models were used to determine the effect of the turbulence model.

Results: It was observed that the number of reaction steps did not significantly affect the temperature, but significantly affected the NO emission estimation values.

Conclusion: The obtained temperature and NO_x profiles were compared with the experimental data and it was determined that there was a satisfactorily good agreement, it was seen that the 162-step reaction was sufficient.



Numerical Investigation Of Coke Oven Gas Combustion Characteristics In A Premixed Burner

Sezgin TAŞDEMİR^{1*} Serhat KARYEYEN² Mustafa İLBAŞ²

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

In order to meet our ever-increasing energy needs, it may not be convenient to directly use the coal reserves, which are abundant in our country, because it is difficult to transport, requires large volumes of combustor, leaves wastes such as ash and slag, and especially due to the high pollutant emissions. Gases obtained from coal exposed to heat treatment in an oxygen-free environment, on the other hand, would be more appropriate to consume because it is easy to transport, requires a simple and small burner, and requires less air during combustion, and especially forms less pollutant emissions. In this study, the premixed combustion performance and emission characteristics of coke oven gas, which is a by-product of coal coking, were numerically investigated. A premixed burner pre-mixing the fuel and air, and introducing the mixture to the combustion chamber was used to burn the coke oven gas. The fuel-air mixture was consumed as premixed at excess air ratios of $\lambda=1,2$ and $\lambda=1,5$ under lean combustion conditions. In the study presented, the amount of fuel corresponding to a power of 10 kW was introduced to the combustion chamber. The experimental setup in which the measurements were made was modeled as three-dimensional through a commercial code ANSYS-Fluent. Combustion modeling was carried out by integrating the Eddy Dissipation Concept into the combustion model by creating 21, 27, 78, 162 and 239-step reactions for the coke oven gas and end-of-combustion NO_x estimations with the help of GRI-Mech 3.0 chemical kinetics as a combustion model. P-1 was chosen as the radiation model, and 3 different turbulence models were used to determine the effect of the turbulence model. The obtained temperature and NO_x profiles were compared with the experimental data and it was determined that there was a satisfactorily good agreement, it was seen that the 162-step reaction was sufficient.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17.01.2022
Düzeltilme: 22.02.2022
Kabul: 02.03.2022

Keywords

Coke Oven Gas
Combustion
Emission
Premixed Burner

Anahtar Kelimeler

Kok Fırını Gazı
Yanma
Emisyon
Ön Karışımli Yakıcı

Ön Karışımli Bir Yakıcıda Kok Fırını Gazı Yanma Karakteristiklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Öz

Her geçen gün daha da artan enerji ihtiyacımızı karşılamak için ülkemizde de çokça bulunan kömür rezervini doğrudan kullanmak, gerek taşınmasının zor olması, gerek büyük hacimli yakıcıya ihtiyaç duyması gerekse de kül, cüruf gibi atıklar bırakması ve özellikle kirletici emisyonlarının fazla olması nedeniyle doğrudan kullanılması elverişli olmayabilir. Oksijensiz ortamda ısı işleme maruz kalan kömürden elde edilen gazlar ise hem taşınması kolay, hem basit ve küçük yakıcıya ihtiyaç duyması hem de yakma sırasında daha az havaya ihtiyaç duyması ve özellikle daha az kirletici emisyon oluşturması nedeniyle bu gaz yakıtın tüketilmesi daha uygun olacaktır. Bu çalışmada, kömürün koklaştırma yan ürünü olan kok fırını gazının, ön-karışımli olarak yanma performansı ve emisyon karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Kok fırını gazını yakmak için yakıtı ve havayı önceden karıştırılarak yanma odasına gönderen ön-karışımli bir yakıcı kullanılmıştır. Yanma koşullarında fakir karışım bölgesinde kalınarak hava fazlalık katsayısı $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,5$ koşullarında yakıt-hava karışımı ön-karışımli olarak tüketilmiştir. Çalışmada 10 kW güce karşılık gelen yakıt miktarı yanma odasına gönderilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı deney düzeneği ANSYS-Fluent ticari kodu ile üç boyutlu olarak modellenmiştir. Yanma modeli olarak GRI-Mech 3.0 kimyasal kinetiği yardımıyla kok fırını gazı ve yanma sonu NO_x tahminleri için 21, 27, 78, 162 ve 239 basamaklı reaksiyonlar oluşturulmasıyla Eddy Dissipation Concept yanma modeline entegre edilerek yanma modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Radyasyon modeli olarak P-1 seçilmiş olup, türbülans modelinin etkisini belirlemek için de 3 farklı türbülans modeli kullanılmıştır. Elde edilen sıcaklık ve NO_x profilleri deneysel verilerle karşılaştırılmış ve oldukça iyi bir uyum olduğu saptanmış, 162 basamaklı reaksiyonun yeterli olduğu görülmüştür.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerjiye olan ihtiyaç birçok farklı kaynaklardan sağlanmaktadır. Günümüzde alternatif kaynaklara olan yönelim artsa da hala enerji ihtiyacının büyük çoğunluğu fosil kaynaklardan sağlanmaktadır ve ülkemizde kömür rezervleri fazla olduğundan sahip olduğumuz enerji potansiyelimiz yüksektir. Fakat, fosil yakıtlar özellikle de ülkemizde bulunan ısı değerleri düşük kömür rezervlerinin çok miktarda inorganik madde barındırması ve içerisindeki azot ve kükürt maddelerinden dolayı doğrudan kullanılması durumunda fazlaca kirletici emisyonlar oluşturmaktadır [1]. Bu çalışmada elverişli olması açısından kömürün koklaştırma yan ürünü kok fırını gazı yakıt olarak kullanılmıştır. Yanma şartlarında özellikle reaksiyon basamak sayısının etkisi üzerinde durulmuştur. Açığa çıkan yanma ürünlerinden NO_x değerlerinin belirlenmesi ve bu kirletici emisyonun düşürülme yolları araştırılmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda belirtilmiştir;

İlbaş ve Karyeyen (2016), hidrojen içeren yakıtlardan şehir gazı ve kok fırını gazının ön-karışımli bir yakıcıda deneysel olarak yanmasını incelemişlerdir. Yanma odasının aksel ve radyal ölçüm sonuçlarını belirlemişlerdir. Aksel ve radyal ölçümlerin (Sıcaklık, NO_x , CO_2 ve CO) yaklaşık çoğunluğunda kok fırını gazının değerlerinin yüksek olduğu, özellikle şehir gazında hacimce daha fazla N_2 gazı olmasına rağmen yanma sonucu daha az NO_x oluşmasının nedeni bu gazın kalori değerinin diğer gazdan daha az olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [2].

Ortiz vd. (2021), metal yüzeyine çarptırılmış kısmi ön-karışımli bir metan alevinin deneysel ve sayısal analizini yapmış, farklı güçlerde yakılan metan alevinin sıcaklık ve CO emisyon değerlerini karşılaştırmıştır. Radyal olarak sıcaklık ölçümlerinin genelde deneysel verilere uygun olarak azaldığı, merkezdeki sıcaklığın 10 mm uzağındaki alev sıcaklığından düşük olması ön-karışımli alevde meydana gelen sürüklenme alanının oluşturduğu koniden oluştuğu [3], alev hızı yönünden sayısal çalışmada yapılan k-omega türbilans modeli ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu, yakıt gücünün artırılması giriş hızının artmasıyla koni kısmının genişlemesine yol açtığı bu nedenle radyal olarak merkez konumdaki sıcaklığın hızla ters orantılı olduğu belirtilmiştir. CO değerinin ise gücün artmasıyla arttığı ve merkezden uzaklaştıkça azaldığı vurgulanmış, yakıt hava giriş çapının değiştirilmesiyle farklı güçlerde CO ve sıcaklık değerleri de incelenmiş, bu duruma göre 350-400 W aralığında maksimum termal verimlilik sağlanmasına rağmen CO değerinin de fazla olduğu gösterilmiştir [4].

Zhen vd. (2016), giriş havasının sıcaklığı artırılarak oluşturulan Bunsen alevinin ısı transferine etkileri deneysel olarak araştırılmış, $\text{CH}_4\text{-H}_2$, $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-N}_2$ ve $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ 'den oluşan farklı yakıtlar üzerinde yapılan deneysel ölçümlerde giriş sıcaklıklarının artırılmasıyla hepsinin adyabatik sıcaklıklarının ve laminar alev hızlarının arttığı belirtilmiş, $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ ve $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-N}_2$ alevinde oluşan sürüklenme alanının oluşturduğu koni yüksekliğinin yakıt giriş sıcaklığının artırılmasıyla ters orantılı olarak azaldığı gösterilmiş, yine bu üç yakıtın giriş sıcaklığının artırılmasıyla yanma sonucu oluşan NO_x değerinin de arttığı, bu değerlerden en yüksek olan $\text{CH}_4\text{-H}_2$ yakıtında olduğu, orta seviyede $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-N}_2$ yakıtında olduğu, en azının ise diğeri olan $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ yakıtında meydana geldiği ölçülmüş, aynı deney CO için de yapılmış ve bu sefer en yüksek CO değerine sahip olan yakıtın $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ 'de meydana geldiği, orta seviyede $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-N}_2$ 'de meydana geldiği en azının ise $\text{CH}_4\text{-H}_2$ yakıtında olduğu gösterilmiştir. $\text{CH}_4\text{-H}_2$ yakıtı için nozuldan uzaklaştıkça ısı transfer oranının azaldığı, $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ yakıt hava karışımının farklı giriş sıcaklık değerlerindeki ölçümlerde giriş hava sıcaklığının artırılmasıyla ısı transfer oranının da arttığı ölçüm sonuçlarıyla gösterilmiştir [5].

Salem (2018), CH_4 , H_2 ve CO yakıtlarının 2, 5 ve 10 basamakli reaksiyonda ön-karışımli yanma şartları incelenmiş, reaksiyon basamak sayısı arttıkça maksimum sıcaklığın düştüğü gösterilmiştir. Ayrıca Chemkin kodu üzerinde de yanma ürün mol değişim sonuçları paylaşılmıştır. Farklı oranlarda karıştırılan $\text{CH}_4\text{-H}_2$ yakıtının yine farklı hava-yakıt oranlarında yanmasının alev hızı sonuçları irdelenmiş ve CH_4 içerisine eklenen H_2 oranı artırıldıkça alev hızının arttığı ve bu hızın stokiyometrik yanma şartlarında maksimum olduğu belirtilmiştir. Yine hava fazlalık katsayısının bir olduğu durumda maksimum sıcaklığın

en yüksek olduğu, eksenel uzaklık arttıkça ise yüksek sıcaklığın hava fazlalık katsayısının bir buçuk olduğu şartlara doğru kaydığı gösterilmiştir. Ayrıca 10 basamaklı reaksiyonda H₂-CO yakıtının farklı yakıt-hava yanma şartlarında deneysel ve sayısal olarak yanma sonuçlarının adyabatik sıcaklık kıyaslaması yapılmış ve en iyi uyumlu sonucun stokiyometrik yanma şartlarında olduğu gösterilmiştir [6].

Zhai vd. (2021), CH₄ ve H₂ karışımı yakıtın, kısmi ön-karışımı yakıcıda yakılması sonucu alev boyutu ve rengi üzerinde durulmuş, öncelikle hidrojen gazının yoğunluğuna bakılmaksızın giriş hava miktarı artırıldıkça sürüklenme alanının küçüldüğü yani koni yüksekliğinin azaldığı belirtilmiş, H₂ gazının artırılmasıyla özellikle fazla hava girişli yanmalarda daha belirgin olmak üzere alev boyunun küçüldüğü ve alev parlaklığının azaldığı gösterilmiştir [7].

Jiang vd. (2017), ön-karışımı bir yakıcıda biogazın yanması incelenmiş, biogazın içeriğinde bulunan CH₄, CO₂, H₂ ve N₂ gazları miktarı üzerinde değişiklik yapılarak 5 farklı yakıt oluşturulmuş ve bu yakıtların yanma sonuçları üzerinde kıyaslama yapılmıştır. Chemkin kodu üzerinde laminer biogaz alevi simülasyonu yapılmış, sıcaklık ve yakıt ile yanma ürünlerinin kütleli değişimleri gösterilmiştir. Sonuçlara göre tamamen CH₄'ten oluşan biogaz sıcaklığının daha yüksek olduğu, biogaz içeriğindeki CO₂ miktarı arttıkça sıcaklığın düştüğü, biogaz içeriğinde bulunan CO₂ miktarının bir kısmının N₂ ile değiştirilmesi durumunda sıcaklık boyutunda önemli değişikliğin olmadığı gösterilmiştir. Laminer alev hızı konusunda tamamen CH₄'ten oluşan biogaz yakıtında en yüksek olduğu, biogaz içeriğindeki CO₂ miktarı arttıkça laminer alev hızının azaldığı, biogaz içeriğindeki CO₂ miktarının bir kısmının N₂ ile değiştirilmesi durumunda laminer alev hızının da arttığı gösterilmiştir. Tek boyutlu bir simülasyon çalışmasında biogaz laminer alev üzerinde metan konsantrasyonunun önemli bir etkisinin olduğu belirtilmiştir [8].

Józsa vd. (2022), bütanal karışımı dizel yakıtın sıcaklık kontrollü girdaplı yakıcıda yakılması incelenmiş, eşdeğerlik oranı 0,86 ile 0,76 arasında olacak şekilde PID kontrolüyle yakıcıya gelen havanın sıcaklığı değiştirilmiş, basınç kontrolüyle de yakıt ve hava miktarı kontrol edilmiş, hava debisini kontrol eden basınç değeri artırıldıkça alev renginin değiştiği ve renk kaybettiği, aynı zamanda kirlenici NO(ppm) ve CO(ppm) seviyelerinin azaldığı, yakıt içerisindeki bütanın artırılmasıyla alev kalınlığının azaldığı, görünümü itibari ile sadece dizel yakıtta OH reaksiyonlarının arttığı, fakat yakıt içerisine bütan ilave edildiğinde OH ara ürün yoğunluğunun azaldığı, gürültü seviyesinin de yaklaşık 10 dB civarında azaldığı gösterilmiştir [9].

Konvansiyonel veya çok bileşenli yakıtların yanma şartlarını araştıran çok sayıda literatür vardır, fakat ön-karışımı olarak tüketilme koşullarında alev ve reaksiyon basamak sayısı etkileşimi, basamak sayısının yanma sonu ürünlerine etkisi konularıyla ilgili kritik sorular hala devam etmektedir. Ayrıca ön-karışımı yakıcılarda, hava ile yakıt yanma bölgesine gelmeden önce karıştığı için ön-karışimsız yakıcılara göre daha homojen bir yakıt-hava karışımı sağlamaktadır. Bu nedenle ön-karışımı yakıcılarda oluşan NO emisyon seviyesi ön-karışimsız yakıcılara göre daha az olmaktadır [10]. Daha temiz enerji elde etmek temel motivasyon kaynağımız olduğu için bu çalışmada ön-karışımı yanma şartları incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL and METHOD)

Yakıtlar, kimyasal reaksiyonla ısı üretiminde elverişli maddelerdir. Yakıtlarda C, H, S gibi yanıcı elementler ile beraber O ve N gibi diğer elementler de bulunur. Fiziksel özelliklerine göre yakıtları sınıflandırdığımızda taş kömürü, esmer kömür, turb, odun gibi doğal ve kok ve odun kömürü gibi yapay olan katı yakıtlar, taş ve esmer kömürün gazlaştırılmasından veya odunun karbonizasyonundan üretilen katran veya alkol gibi sıvı yakıtlar ile doğal olanı yer gazı yapay olanları ise hava gazı, su gazı, kuvvet gazı, kok gazları, metan, asetilen, bütan gibi gaz yakıtlar da vardır [11].

Katı yakıtlar kapalı ortamda ısı işleminden geçirilirse koklaştırılmış olurlar ve sıvı ile gaz yakıtlara dönüşürler, eğer 600 °C derecelere kadar ısı işlem yapılırsa katran elde edilir, eğer 1200 °C dereceye kadar ısı işleminden geçerse katrandan tamamen temizlenmiş fazla oranda karbon içeren kok elde edilir, bu ikinci aşamada gaz verimi daha fazladır. Yapılan ısı işlemde sıcaklığın artış hızı önemlidir. Eğer hızlı

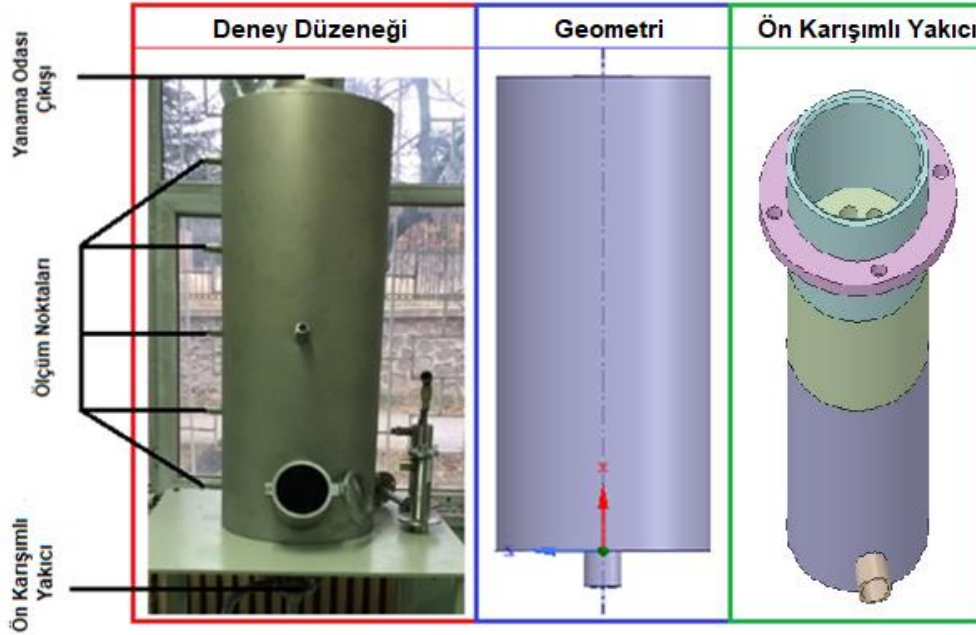
sıcaklık artışına maruz kalırsa gazlaşma aşaması sıcaklığın yüksek olduğu kesimlere kaymaktadır. Hidrokarbonca yüksek gaz elde etmek için alçak sıcaklık koklaştırması, hidrojenle yüksek gaz elde etmek için yüksek sıcaklık koklaştırması yapılır. Koklaştırmaya her kömür uygun değildir [11]. Örneğin alev kömürü, gaz kömürü ve yağsız kömürler elverişli olmayıp, yağlı kömür elverişlidir. Başlıca olarak yüzey ısıtmalı, yıkama gazlı, akışkanlaştırılmış yatak ve pnömatik koklaştırma yöntemleri ile kömürler gazlaştırılmaktadır. Kömürün gazlaştırılması sonucu elde edilen kok fırın gazının içerdiği bileşenler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 1. Kok Fırın Gazı İçeriğinin Hacimce Bileşenleri [1]

| Kok Fırın Gazı Bileşenleri | Hacimce(%) |
|-------------------------------|------------|
| H ₂ | 55 – 60 |
| CH ₄ | 23 – 27 |
| CO | 5 – 8 |
| CO ₂ | 1 – 2 |
| N ₂ | 3 – 6 |
| C ₂ H ₄ | 1 – 1,5 |
| C ₂ H ₆ | 0,5 – 0,8 |
| C ₃ H ₈ | ≤ 0,07 |
| H ₂ S | ≤ 3,2E-5 |

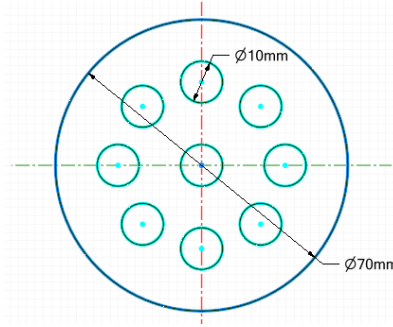
Bu çalışmada, %55H₂, %27CH₄, %6CO, %2CO₂ ve %10N₂ içeriğine sahip, 3678 kcal/m³ ısıl değer ve yaklaşık 0,45 kg/m³ yoğunluğundaki kok fırını gazı kullanılmıştır [2].

Yukarıda belirtilen gazı yakmak için deney düzeneğinde kullanılan yanma odası, paslanmaz çelikten üretilmiş 40 cm çapında ve 1 metre yüksekliğinde silindirik şekildedir. Yanma odasının yan tarafında, belli aralıklarla dizilmiş (10cm, 30cm, 50cm, 70cm ve 90cm) deneysel ölçümlerin yapılabildiği toplam 5 adet ölçüm noktaları bulunmaktadır. Ön tarafında da alevin görülebileceği gözlem penceresi bulunmaktadır.



Şekil 1. Yanma odası ve ön karışımli yakıcı [1-2]

Bu yanma odasının alt kısmında takılı olan ön-karışımli yakıcı, 70 mm çapındaki paslanmaz çelik üzerine belli aralıklarla açılmış 9 adet 10 mm çapındaki deliklerden oluşmaktadır. Ön-karışımli yakıcının kesit görünümü aşağıdaki resimde gösterilmiştir.



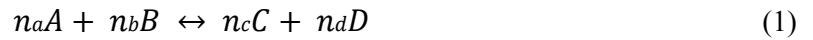
Şekil 2. Ön-karışimli yakıcının kesit görünümü [1-2]

3. SAYISAL MODELLEME (NUMERICAL MODELLING)

Yakıtlarda C, H, S, O ve N atomları bulunduğundan ve yanma için oksitleyici olarak hava (O_2 ve N_2) kullanıldığından yanma sonucu CO, NO_x gibi havayı kirletici gazlar oluşmaktadır. Bu çalışmada özellikle NO_x kirleticileri üzerinde durulmuştur. NO_x , NO, NO_2 , N_2O , N_2O_3 ve N_2O_5 olmak üzere 5 adet gaz bileşeninin genel ismidir. Bunlardan üçü olan NO, NO_2 ve N_2O asıl öneme sahip olup toplam NO_x oluşumunun da büyük çoğunluğunu NO oluşturmaktadır. NO_x 'in farklı mekanizmalarla oluştuğu kabul edilir. Bunlardan ısıl (Zeldovich) NO_x oluşum mekanizması; hava-yakıt oranı yüksek olan yanma şartlarındaki NO yanma ürünü oluşumunda önemli reaksiyonlardır [12]. Ani NO_x oluşum mekanizmasında ise NO oluşumunun yarıdan fazlası hava-yakıt oranı düşük olan yanma şartlarında meydana gelmektedir. Sonucu olan yakıt NO_x oluşumu da yakıt içerisinde bulunan bağıl azotun oksidasyonundan meydana gelir [13].

Yanma, zincirleme kimyasal reaksiyonlarda girenler ile ürünler arasındaki dönüşümde açığa çıkan enerjidir.

Bu kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibi gösterilirse;



n_a, n_b, n_c, n_d : Reaksiyona giren elementi yada moleküllerin stokiyometrik katsayı değeri,
 A, B, C, D : Reaksiyona giren veya çıkan element yada moleküller,

Bu reaksiyondaki giren veya ürünlerin konsantrasyon değişimi ise aşağıdaki gibi gösterilirse;

$$-\frac{1}{n_a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{n_b} \frac{d[B]}{dt} = -\frac{1}{n_c} \frac{d[C]}{dt} = -\frac{1}{n_d} \frac{d[D]}{dt} = k[A]^x[B]^y \quad (2)$$

k : Hız sabiti, x ve y : reaksiyon derecesi,

Bu denklemi Arrhenius formatında aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

T : Sıcaklık(K), R : Universal gaz sabiti (cal/mol.K), E : Aktivasyon enerjisi (cal/mol), A : Arrhenius faktörü,

Buradaki A terimi yani Arrhenius faktörünü T^n sıcaklık üstel faktörü ile çarparsak;

$$k = A \cdot T^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

Denklem 4'deki gibi Ansys Chemkin kodu için kimyasal reaksiyon giriş parametreleri elde edilmiş olmaktadır. Chemkin formatı için aşağıdaki tabloda bazı NO_x oluşum reaksiyonları gösterilmiştir.

Tablo 2. GRI-Mech 3.0 kimyasal kinetiğine göre bazı NO_x oluşum reaksiyonları

| Reaksiyon Sayısı | Kimyasal Reaksiyon | Arrhenius Faktörü | Sıcaklık Üstel Değeri | Aktivasyon Enerjisi |
|------------------|---|-------------------|-----------------------|---------------------|
| 1. | $N + NO \rightleftharpoons N_2 + O$ | 2.70E+13 | 0.0 | 355.0 |
| 2. | $N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$ | 9.00E+09 | 1.0 | 6500.0 |
| 3. | $N + OH \rightleftharpoons NO + H$ | 3.36E+13 | 0.0 | 385.0 |
| 4. | $CH + N_2 \rightleftharpoons HCN + N$ | 3.12E+09 | 0.9 | 20130.0 |
| 5. | $CN + H_2O \rightleftharpoons HCN + OH$ | 8.00E+12 | 0.0 | 7460.0 |
| 6. | $C + NO \rightleftharpoons CN + O$ | 1.90E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 7. | $N_2O(+M) \rightleftharpoons N_2 + O(+M)$ | 7.91E+10 | 0.0 | 56020.0 |
| 8. | $N_2O + O \rightleftharpoons 2NO$ | 2.90E+13 | 0.0 | 23150.0 |
| 9. | $HO_2 + NO \rightleftharpoons NO_2 + OH$ | 2.11E+12 | 0.0 | -480.0 |
| 10. | $NO_2 + H \rightleftharpoons NO + OH$ | 1.32E+14 | 0.0 | 360.0 |

Tablo 2'deki 1. ve 2. reaksiyonlar (Zeldovich) ile 3. Reaksiyon (Lavoie ve ark.) ısı NO_x oluşum reaksiyonlarıdır [14]. Bu oluşumlar genellikle yüksek alev sıcaklıklarında (1800 K'dan fazla) meydana gelmektedir. Diğer olan ani NO_x oluşum mekanizması için 4., 5. ve 6. reaksiyonlar gösterilebilir. Zengin yakıt-hava karışımlarında fazlaca meydana gelmekle birlikte diğer iki NO_x oluşum mekanizmasına göre daha azdır. Yakıt NO_x oluşumu, 5. ve 6. reaksiyonlarda meydana gelen CN ve HCN gibi moleküllerin oksijenle buluşmasıyla NO_x 'in oluşmasıdır [15-16]. Diğer reaksiyonlarda da gösterildiği gibi farklı NO_x türlerinin (N_2O , NO_2 gibi) oluşum mekanizmaları da vardır.

Daha ekonomik ve enerji tasarrufu açısından yanma simülasyonları kullanmak yeni bulgulara kılavuzluk sağlayabilir. Bu amaçla deney düzeneği ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu (Ansys Fluent) yardımıyla üç boyutlu olarak modellenmiştir (Yanma odasının ısı iletkenlik katsayısı $k=16,27$ W/mK). Kok fırını gazı için 3678 kcal/m³ ısı değer referans alınarak 10 kW ısı güce karşılık gelen yakıt debisi ile hava fazlalık katsayısı $\lambda=1,2$ yanma şartlarındaki hava debisi toplanarak giriş yakıt-hava debisi elde edilmiştir. Bu debi Şekil 2'de gösterilen ön-karışımli yakıcının akışkan kesit alanına oranlanarak sınır şartı olan giriş hızı elde edilmiştir. Deneyin yapıldığı şartlardaki gibi giriş yakıt-hava sıcaklığı 293 K'dır (Dinamik viskozite $\mu=1,72e-5$ kg/ms, ısı iletkenlik $k=0,0454$ W/mK). Isı taşınım katsayısı $h=20$ W/m²K ve ortam sıcaklığı 293 K sınır şartlarında sayısal çözümleme yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar bulgular bölümünde irdelenmiştir. Sayısal modellemenin matematiksel alt yapısı kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerine dayanmaktadır. Kütle korunumu denklemi (Denklem 5) [17];

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

ρ : Akışkanın yoğunluğu, t : Zaman, u , v , w : Referans eksenine göre hızlar

Momentum korunumu denklemi (Denklem 6, 7, 8) [18-19];

$$\rho \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{\partial(\tau_{xx}-p)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + F_{mx} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\partial(\tau_{yy}-p)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} + F_{my} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{\Delta w}{\Delta t} = \frac{\partial(\tau_{zz}-p)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial z} + F_{mz} = 0 \quad (8)$$

p : Basınç, τ : Viskoz gerilim tensörü, F : Kuvvet,

Parçacık boyutunda enerji korunumu denklemi (Denklem 9) [6];

$$\rho \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -div(\rho V) + \frac{\partial(v\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \quad (9)$$

$$+ \frac{\partial(v\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zz})}{\partial z} + \text{div}(k\Delta T) + Q = 0$$

V : Hız, k : Isı iletim katsayısı, T : Sıcaklık,

Silindirik ve simetrik yanma odası geometrisi için transfer denklemi (Denklem 10) [1];

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j \Phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right] + S_\Phi \quad (10)$$

S_Φ : Taşıma denklemi için kaynak terim, Φ : Bağımlı değişken, v_j : Bağımlı değişken Φ 'ye karşılık gelen hız, Γ : Değişken için difüzyon katsayısı,

Zincirleme kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği anda alevin yayılması aşağıdaki formüllerle tanımlanabilir ve türbülanslı alev hızı hesabı için formül aşağıda gösterilmiştir (Denklem 11, 12, 13) [3-15-20].

$$\frac{\partial(\rho x)}{\partial t} + \nabla(\rho v x) = \nabla \left(\frac{\mu}{S_{x_t}} \nabla x \right) + \rho S_x \quad (11)$$

$$\rho S_x = \rho_u S_v |\Delta x| \quad (12)$$

$$S_v = A(v')^{3/4} V_l^{0,5} \Gamma^{-0,25} X_t^{0,25} = A v' \left(\frac{\tau_t}{\tau_x} \right)^{0,25} \quad (13)$$

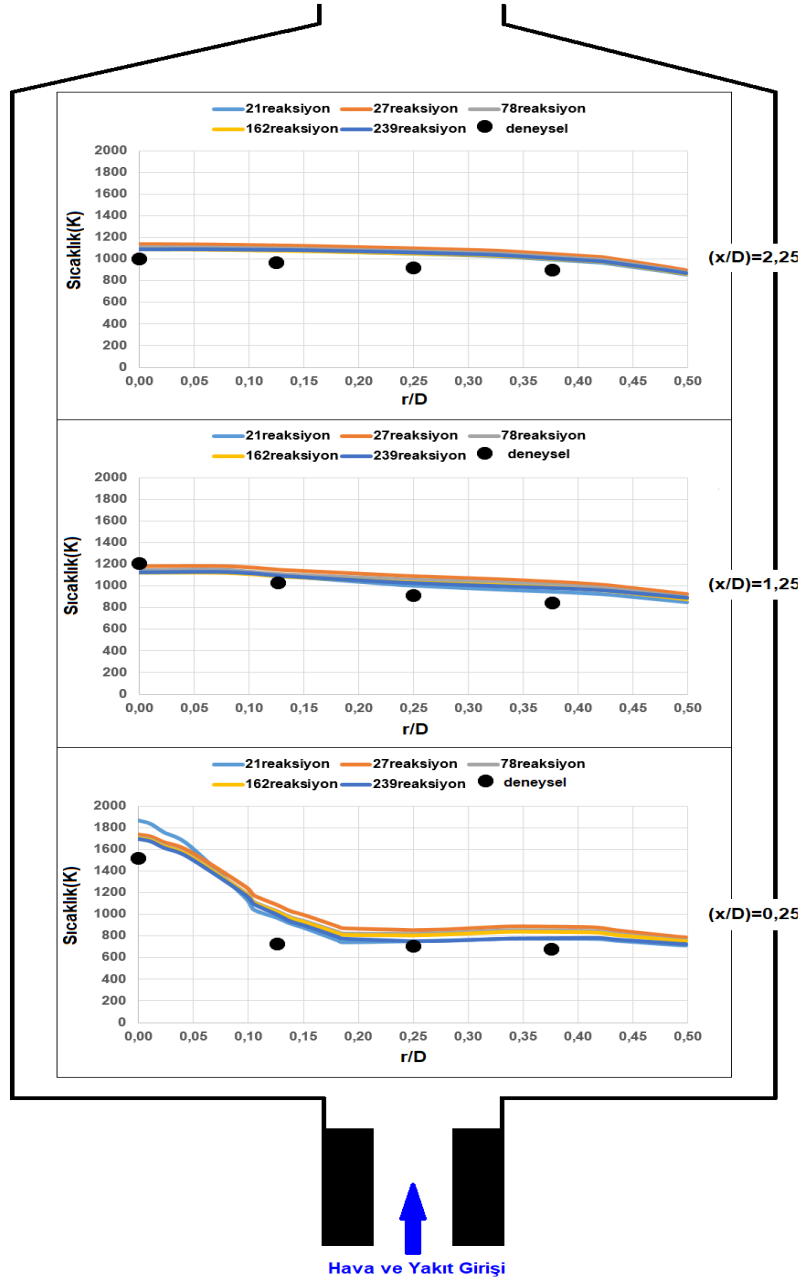
S_v : Türbülans alev hızı, V_l : Laminer alev hızı, v' : RMS hızı, A : Model sabiti, ρ_u : Yanmış karışımın yoğunluğu, Γ : Yanmamış karışımın difüzyon katsayısı, X_t : Türbülans uzunluk ölçeği, τ_t ve τ_x : Türbülans zaman ölçeğidir. Buradaki x terimi, CFD modelinde bir sınır şartıdır ve girişte $x=0$ (yanmamış), $x=1$ (yanmış) anlamındadır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Ön-karışımli alevler ön-karışimsız alevlerden farklıdır. Ön-karışimsız alevlerde yakıt ile hava birleşmesi esnasında yanma işlemi başlamasına rağmen ön-karışımli alevlerde, hava ve yakıt karıştıktan belli bir süre sonra yanma işlemi meydana gelmektedir. Hava ve yakıt önceden karışımli yakıcı ile yanma odasına gönderilmesi akabinde belirli bir süre sürüklenmeden sonra reaksiyonlar başlar, hava ve yakıtın önceden buluşması ve yanma alanına da sürüklenerek karışması kirletici emisyon oluşumunda azalma sağlayabilir [10]. Reaksiyonların başladığı bu alan genelde koni şeklini oluşturur, bu koninin yüksekliği ve genişliği yakıt ve havanın yanma odasına gönderilme hızına bağlıdır. Koni iç kısmında yanma (reaksiyonlar) olmadığından sıcaklık düşüktür. Yanma (reaksiyonlar) koninin dış kısmında meydana geldiğinden sıcaklık artışı bu kısımda meydana gelmektedir. Bu sayede yakıcı ekipmanın zarar görmesi de önlenir. Ön-karışımli alevlerin rengi diğerinden farklı olmaktadır. Alev rengi yakıt-hava karışımındaki hava miktarına ve yakıtın bileşenleri gibi birçok etkene bağlıdır. Ayrıca ön-karışımli yakıcılarda yanma sonucu yanma odasında oluşan dinamik basınç değişimleri ön-karışimsız yakıcıya göre daha azdır [21]. Bu nedenle deney düzeneğinde kullanılan ön-karışımli yakıcı ayrıca emisyon seviyesinde azaltma etkisi göstereceği düşünülmektedir.

Deneyin yapıldığı şartlar referans alınarak 10 kW güce karşılık gelen kok fırını gazı ve hava fazlalık katsayısı $\lambda=1,2$ oranındaki hava miktarı yanma odasına gönderilmiştir. Bu sınır şartlarında, farklı reaksiyon basamak sayılarında, modellemenin yapıldığı ticari kod üzerinde çözdürülmüştür. Radyal sıcaklık ölçümleri yanma odasının 10 cm, 50 cm ve 90 cm'deki noktalarından ölçüldüğünden [2], bu noktalardaki radyal sıcaklık profilleri ve 10 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm ve 90 cm'deki eksenel sıcaklık ölçüm sonuçları farklı reaksiyon basamak sayılarındaki sayısal verilerle karşılaştırılmıştır. NO emisyon eksenel ölçüm

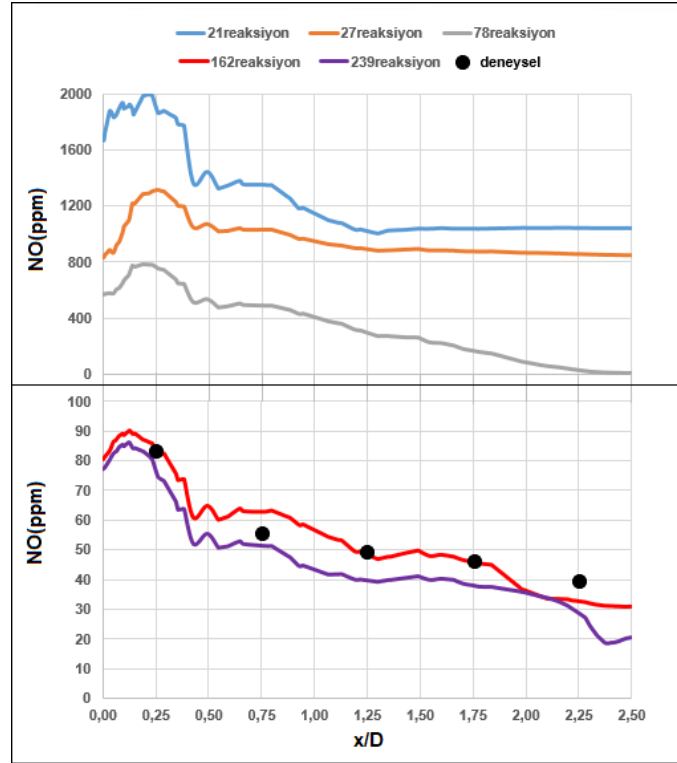
sonuçları [2] da yine farklı reaksiyon basamak sayılarındaki sayısal sonuçlar ile karşılaştırılması gösterilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4).



Şekil 3. Radyal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

Yanma sırasında en yüksek sıcaklık stokiyometrik yanma şartlarında meydana gelmektedir. Stokiyometrik yanma şartlarından uzaklaştıkça reaksiyona katılmayan fazla havanın yanma odasından ayrılırken sıcaklığı da beraberinde götürmesi sonucu sıcaklığın azaldığı bilinmektedir. Yanma sırasında yakıtın hepsi tamamen CO₂ veya H₂O dönüşmediğinden, yanma sırasında oluşan ara ürünler de sıcaklığın düşmesine neden olmaktadır. Yani yanma bir basamaklı reaksiyondan oluşmayıp zincirleme birçok basamaklı reaksiyondan oluşmaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi ölçülen deneysel sonuçların sayısal verilerle uyumunun sağlanabilmesi için sadece deneyin yapıldığı ortam ve yakıt hava giriş verilerini hesaplamalı akışkan dinamiği kodu üzerinde çalıştırmak yeterli değildir. Ara ürün sayısını yani reaksiyon basamak sayısını artırarak sayısal çözümleme yapmak da gerekmektedir.

Şekil 3'te yanma odasının aksel olarak 10 cm, 50 cm ve 90 cm'deki ölçüm noktalarından ölçülen radyal sıcaklık sonuçları [2] ile sayısal modelleme sonuçları, GRI-Mech 3.0 kimyasal kinetiği yardımıyla kok fırını gazı ve NO_x için oluşturulan 5 farklı reaksiyon basamak sayısında analiz edilmiştir. Basamak sayısının sonuçlara olan etkisinin daha belirgin olarak görmek için aksel NO sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir.

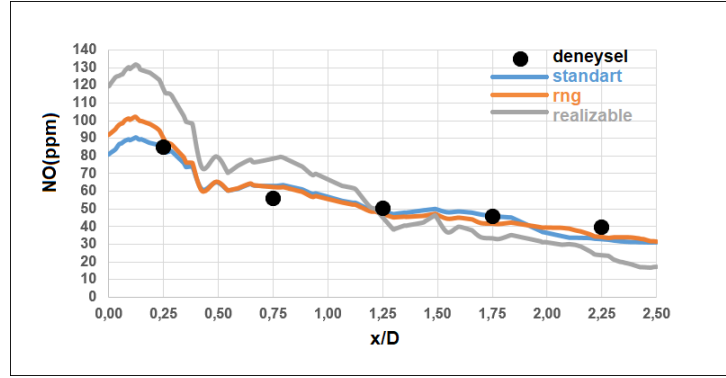


Şekil 4. Aksel NO sonuçlarının karşılaştırılması

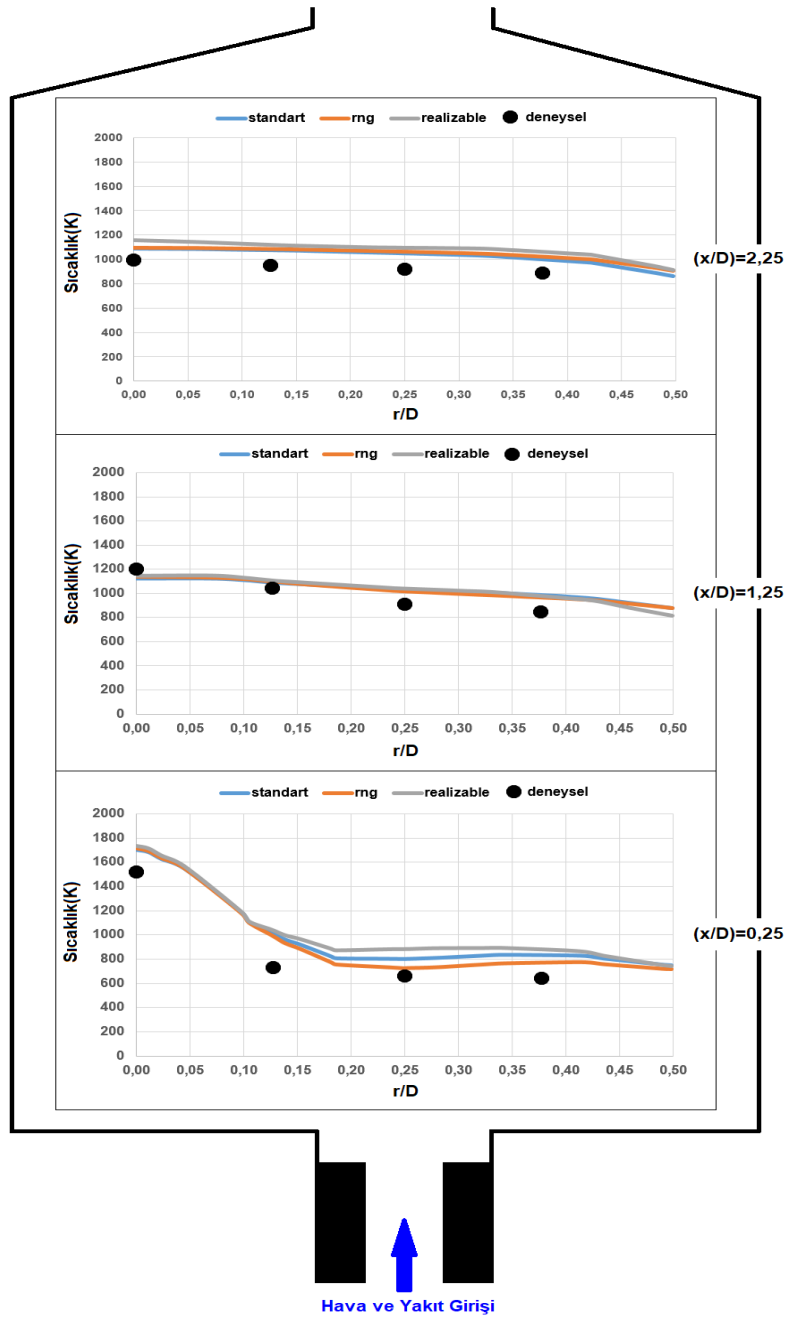
Şekil 4'te de görüldüğü gibi GRI-Mech 3.0 kimyasal kinetiği yardımıyla kok fırını gazı ve NO_x için oluşturulan 5 farklı reaksiyon basamak sayısındaki aksel NO (ppm) emisyon sayısal sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçlarının [2] karşılaştırılması yapıldığında, reaksiyon basamak sayısı artırdıkça deneysel sonuçlarla daha iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Özellikle 162 basamaklı ve daha fazla reaksiyon kinetiğinin kullanıldığı kimyasal kinetikler ile elde edilen sonuçların, daha düşük reaksiyonlar ile yapılan modellemelere göre iyi sonuçlar verdiği ve deneysel verilerle büyük ölçüde hem değer hemde eğilim bakımından uyumlu olduğu söylenebilir. Alev bölgesinden ($x/D=0,25$) elde edilen NO verilerinin de büyük ölçüde tutarlı olması oldukça önemli bir kazanımdır. Bu sonuçların temel nedeninin, daha fazla ara reaksiyonun dikkate alınmasının daha gerçekçi olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3'e göre reaksiyon basamak sayısının artması sıcaklık verilerinde fazla bir değişikliğe neden olmasa da NO (ppm) emisyon verilerinde oldukça farklılık göstermesi nedeni ile, yani Şekil 3 ve Şekil 4 birlikte değerlendirildiğinde, 162 reaksiyon basamak sayısının kok fırını gazının gerçekçi modellenmesi için yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde gerçekleştirilecek modellemelerde de 162 basamaklı reaksiyon kinetiği kullanılmıştır.

Sayısal sonuçların doğruluğunu etkileyen diğer önemli bir faktör de türbülans modeli olup 3 farklı k-ε türbülans modelinin (Standard, RNG ve Realizable) aksel NO ve radyal sıcaklık dağılımlarına olan etkileri Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

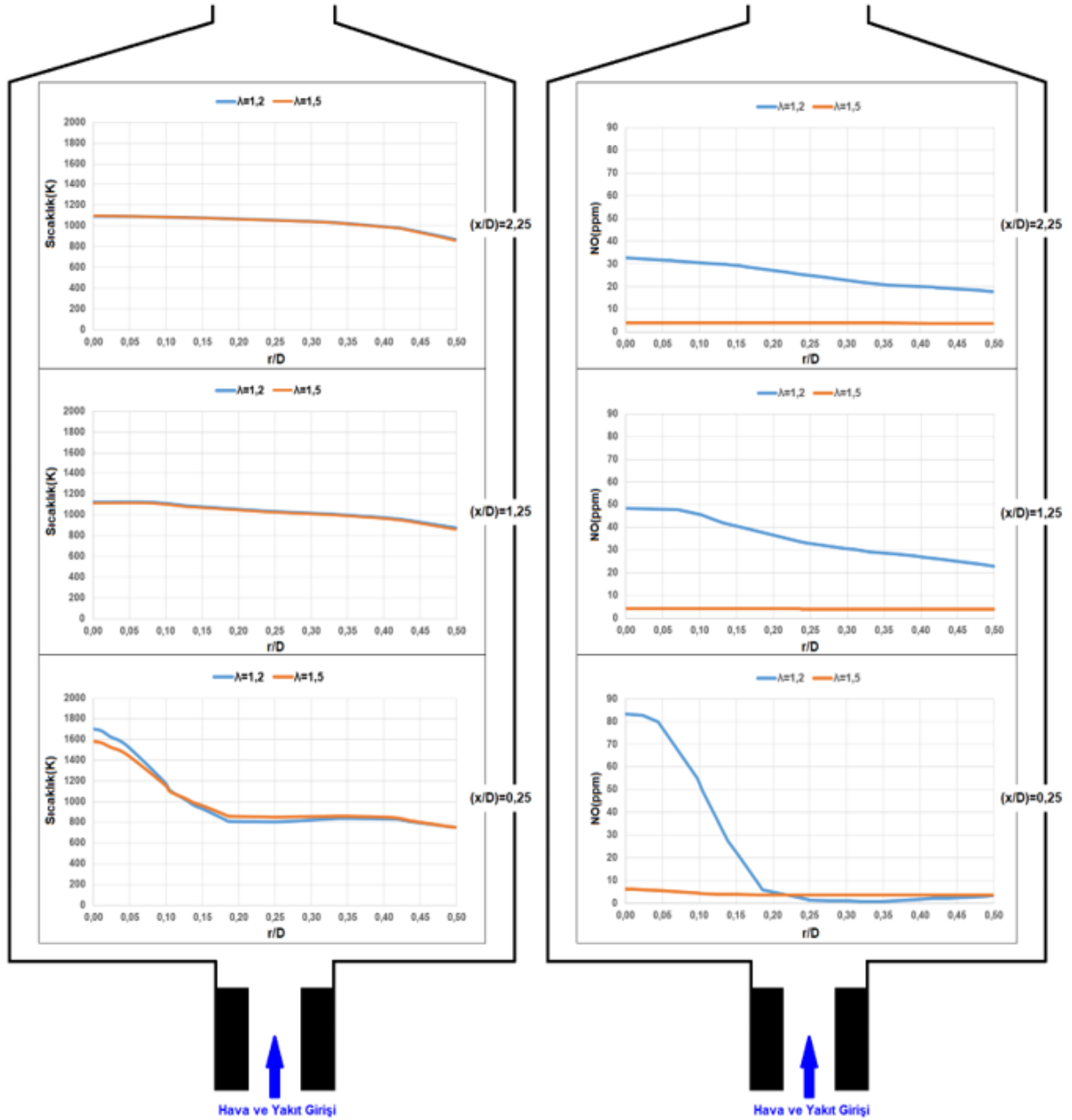


Şekil 5. Türbülans modelinin aksel NO profiline etkisi



Şekil 6. Türbülans modelinin radyal sıcaklık profiline etkisi

Şekil 5 ve Şekil 6’da 3 farklı türbülans modeli için deneysel [2] ve sayısal aksenal NO (ppm) emisyon ve radyal sıcaklık profilleri karşılaştırılmış olup, yine sıcaklık değerlerinde önemli derecede farklılığın olmamasına karşı NO (ppm) emisyon değerlerinde, türbülans model etkisinin önemli derecede farklılık oluşturduğu görülmüştür. Ancak yine de, özellikle standard k- ϵ ve RNG k- ϵ türbülans modellemeleri kullanılarak elde edilen NO (ppm) dağılımlarının deneysel ölçüm sonuçları ile daha iyi bir uyum içinde olduğu saptanmış olup, genel olarak, daha fazla noktadaki NO değerlerini yakalayabildiği için standard k- ϵ türbülans modeli, ön-karışımli bir yakıcıda, toplam 162 basamaklı reaksiyon ile yapılan kok fırını gazı modellemesi için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. Hava fazlalık katsayısının radyal sıcaklık ve NO dağılımlarına olan etkisi

Çalışmanın bu bölümüne kadar yapılan modellemelerde, öncelikle farklı basamak sayılı reaksiyon kinetiklerinin ve türbülans modellerinin ön-karışımli bir yakıcıdaki kok fırını gazı modellemelerine olan etkileri araştırılmış olup, çalışmanın devamında ise, hava fazlalık katsayısının yanma sonu sıcaklık ve NO

emisyon dağılımlarına olan etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Şekil 7’de, 1,2 ve 1,5 hava fazlalık katsayıları için yanma sonu sıcaklık ve NO dağılımları gösterilmiştir. Yanma odası giriş kısmından yanma odası çıkışına doğru gidildikçe sıcaklık değerleri azalmış, buna bağlı olarak da NO oluşumları (ısılı NO_x) azalma göstermiştir. Ayrıca, hava fazlalık katsayısı 1,2’den 1,5’e çıkarıldığında, özellikle alev bölgesindeki sıcaklık değerlerinin bir miktar düştüğü gözlemlenmiştir. Hem sıcaklık düşüşüne hem de reaksiyon hızının yavaşlamasına bağlı olarak NO değerlerinde kayda değer bir düşüş gözlemlenmiştir. 1,2 hava fazlalık katsayısı için yanma odası çıkışının merkezinde yaklaşık 30 ppm dolaylarında olan NO sayısal tahmin değeri, 1,5 hava fazlalık katsayısı için 10 ppm’in altına kadar düşürülmüştür.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Ön-karışımli bir yakıcı ve bağlı olduğu yanma odasını içeren bir yanma sistemi için, öncelikle yanma sırasında oluşan ara ürünlerin sayısı artırılarak yani reaksiyon basamak sayısı artırılarak sayısal yanma sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. 21 basamaklı reaksiyon yanma sonuçlarında maksimum sıcaklık 2115 K seviyesinde iken 239 basamaklı reaksiyon yanma sonuçlarında 2048 K seviyesine kadar gerilemesine rağmen maksimum NO emisyon seviyesi 1995 ppm seviyesinden 87 ppm seviyesine kadar düşmüştür. Reaksiyon basamak sayısının sıcaklığı önemli ölçüde etkilememesine karşın NO emisyon tahmin değerlerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Kok fırını gazı için 5 farklı basamak sayılı reaksiyon kinetiği ile gerçekleştirilen yanma modellemeleri neticesinde elde edilen sıcaklık ve NO profillerine göre, 162 basamaklı reaksiyon kinetiğinin modelleme sonuçları için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın diğer bölümünde ise, ön-karışımli kok fırını gazı yanma modellemeleri için türbülans modelinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda modellerinden standard, RNG ve realizable türbülans modelleri kullanılarak sıcaklık ve NO dağılımları değerlendirilmiş ve deneysel ölçümlerle en iyi uyumun standard k-ε türbülans modelinin kullanıldığı modelleme ile ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında son olarak hava fazlalık katsayısının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,5$ hava fazlalık katsayıları için yanma modellemeleri gerçekleştirilmiş ve yanma odası boyunca sıcaklık ve NO dağılımları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre (83 ppm olan NO emisyon seviyesinin 6 ppm’e kadar düşmesi), hava fazlalık katsayısının, özellikle NO dağılımlarını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Fakir yanma şartları için, hava fazlalığı nedeniyle, özellikle fazla oksijen ve azotun yanma reaksiyonlarına katılmadan yanma odasını terk ederken de ortam ısısını beraberinde götürdüğü, bu nedenle bir miktar sıcaklık düşüşüne sebep olduğu, düşük sıcaklık neticesinde de NO oluşumunu azalttığı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Karyeyen S. (2016). Geliştirilen Bir Yakıcıda Kömür Gazlarının Yanma Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] İlbas M., Karyeyen S., Premixed Turbulent Combustion of Hydrogen Containing Fuels - An Experimental Study, 24th « Journées d’Etude » of the Belgian Section of the Combustion Institute. Louvain-la-Neuve, Belgium, May, 19-20, 2016.
- [3] Wang L., Jiang Y., Qiu R., Experimental Study Of Combustion Inhibition By Trimethyl Phosphate In Turbulent Premixed Methane/Air Flames Using OH-PLIF, Journal Of Fuel 294(2021) 120324.

- [4] Laguillo S., Ochoa J.S., Tizné E., Pina A., Ballester J., Ortiz A., CO Emissions And Temperature Analysis From An Experimental And Numerical Study Of Partially Premixed Methane Flames Impinging Onto A Cooking Pot, *Journal Of Natural Gas Science And Engineering* 88(2021) 103771.
- [5] Zhen H.S., Miao J., Leung C.W., Cheung C.S., Huang Z.H., A Study On The Effects Of Air Preheat On The Combustion And Heat Transfer Characteristics Of Bunsen Flames, *Journal Of Fuel* 184(2016) 50-58.
- [6] Salem E. (2018). Numerical Simulations Of Premixed Flames Of Multi Component Fuels/Air Mixtures And Their Applications, *Theses And Dissertations Mechanical Engineering*.132, Lexington.
- [7] Guo L., Zhai M., Shen Q., Guo H., Dong P., Effect Of Hydrogen Addition On The Ionization Of Partially Premixed Methane Flame, *Journal Of Fuel*, 285(2021) 119141.
- [8] Jiang X., Greco A., Mira D., Effects Of Fuel Composition On Biogas Combustion In Premixed Laminar Flames, *Energy Procedia* 105(2017) 1058-1062.
- [9] Józsa V., Csemány D., Hidegh G., Darwish M., Distributed Combustion Of Diesel-Butanol Fuel Blends In A Mixture Temperature-Controlled Burner, *Fuel* 307(2022) 121840.
- [10] Gupta A. K., Khalil A. E. E., Towards Colorless Distributed Combustion Regime, *Fuel* 195(2017) 113-122.
- [11] Telli Z. (1984). *Yakıtlar ve Yanma*, Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Yayınları, Isparta.
- [12] Nguyen T.H., Kim S., Park J., Jung S., Kim S., CFD-CRN Validation Study For NO_x Emission Prediction In Lean Premixed Gas Turbine Combustor, *Journal Of Mechanical Science And Technology* 31 (10) (2017) 4933-4942.
- [13] Ilbas M. (1997). *Studies Of Ultra Low NO_x Burners*, PhD Thesis, School Of Engineering, University Of Wales, Cardiff, UK, 10-28.
- [14] Tunçer O., Hidrojenle Zenginleştirilmiş Metan Yakıtının Alev Hızları ve Emisyon Değerlerinin Kimyasal Kinetik Analizi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi* 29,2.29-42, 2009.
- [15] Yılmaz B. (2010). *Computational Analysis And Experimental Verification Of Premixed Combustion Of Hydrogen Methane/Air Mixtures*, Thesis For The Degree Of Doctor Of Philosophy, Marmara University, Institute For Graduate Studies In Pure And Applied Sciences, İstanbul.
- [16] Sepman A.V., Mokhov A.V., Levinsky H.B., The Effect Of Hydrogen Addition On NO Formation In Atmospheric-Pressure, Fuel-Rich-Premixed, Burner-Stabilized Methane, Ethane And Propane Flames, *International Journal Of Hydrogen Energy* 36 (2011) 4474-4481.
- [17] Feng R., Gruber A., Chen J.H., Valiev D.M., Influence Of Gas Expansion On The Propagation Of A Premixed Flame In A Spatially Periodic Shear Flow, *Journal Of Combustion And Flame* 227(2021) 421-427.
- [18] Pashchenko D., Numerical Investigation Of High Temperature Synthesis Gas Premixed Combustion Via ANSYS Fluent, *MATEC Web Of Conferences* 145, 03012 (2018).
- [19] Yılmaz İ., Yılmaz H., Cam O., Ilbas M., Combustion Characteristics Of Premixed Hydrogen/Air Flames In A Geometrically Modified Micro Combustor, *Journal Of Fuel* 217 (2018) 536-543.
- [20] Karyeyen S., Ilbas M., Experimental And Numerical Analysis Of Turbulent Premixed Combustion Of Low Calorific Value Coal Gases In A Generated Premixed Burner, *Journal Of Fuel* 220(2018) 586-598.
- [21] Gupta A.K., Arghode V.K., Bryden K.M., High Intensity Colorless Distributed Combustion For Ultra Low Emissions And Enhanced Performance, *Applied Energy* 92 (2012) 822-830.

Ek:

| Reaksiyon Sayısı | Kimyasal Reaksiyon | Arrhenius Faktörü [mol-cm-sn-K] | Sıcaklık Üstel Değeri | Aktivasyon Enerjisi [kal/mol] |
|------------------|---|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1. | $2O+M \rightleftharpoons O_2+M$ | 1.20E+17 | -1.0 | 0.0 |
| 2. | $O+H+M \rightleftharpoons OH+M$ | 5.00E+17 | -1.0 | 0.0 |
| 3. | $O+H_2 \rightleftharpoons H+OH$ | 3.87E+04 | 2.7 | 6260.0 |
| 4. | $O+HO_2 \rightleftharpoons OH+O_2$ | 2.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 5. | $O + H_2O_2 \rightleftharpoons OH + HO_2$ | 9.63E+06 | 2.0 | 4000.0 |
| 6. | $O + CH \rightleftharpoons H + CO$ | 5.70E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 7. | $O + CH_2 \rightleftharpoons H + HCO$ | 8.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 8. | $O + CH_2(S) \rightleftharpoons H_2 + CO$ | 1.50E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 9. | $O + CH_2(S) \rightleftharpoons H + HCO$ | 1.50E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 10. | $O + CH_3 \rightleftharpoons H + CH_2O$ | 5.06E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 11. | $O+CH_4 \rightleftharpoons OH+CH_3$ | 1.02E+09 | 1.5 | 8600.0 |
| 12. | $O+CO(+M) \rightleftharpoons CO_2(+M)$ | 1.80E+10 | 0.0 | 2385.0 |
| 13. | $O+HCO \rightleftharpoons OH+CO$ | 3.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 14. | $O+HCO \rightleftharpoons H+CO_2$ | 3.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 15. | $O+CH_2O \rightleftharpoons OH+HCO$ | 3.90E+13 | 0.0 | 3540.0 |
| 16. | $O_2+CO \rightleftharpoons O+CO_2$ | 2.50E+12 | 0.0 | 47800.0 |
| 17. | $O_2+CH_2O \rightleftharpoons HO_2+HCO$ | 1.00E+14 | 0.0 | 40000.0 |
| 18. | $H+O_2+M \rightleftharpoons HO_2+M$ | 2.80E+18 | -0.9 | 0.0 |
| 19. | $H+2O_2 \rightleftharpoons HO_2+O_2$ | 2.08E+19 | -1.2 | 0.0 |
| 20. | $H+O_2+H_2O \rightleftharpoons HO_2+H_2O$ | 1.13E+19 | -0.8 | 0.0 |
| 21. | $H+O_2+N_2 \rightleftharpoons HO_2+N_2$ | 2.60E+19 | -1.2 | 0.0 |
| 22. | $H+O_2+AR \rightleftharpoons HO_2+AR$ | 7.00E+17 | -0.8 | 0.0 |
| 23. | $H+O_2 \rightleftharpoons O+OH$ | 2.65E+16 | -0.7 | 17041.0 |
| 24. | $2H+M \rightleftharpoons H_2+M$ | 1.00E+18 | -1.0 | 0.0 |
| 25. | $2H+H_2 \rightleftharpoons 2H_2$ | 9.00E+16 | -0.6 | 0.0 |
| 26. | $2H+H_2O \rightleftharpoons H_2+H_2O$ | 6.00E+19 | -1.2 | 0.0 |
| 27. | $2H+CO_2 \rightleftharpoons H_2+CO_2$ | 5.50E+20 | -2.0 | 0.0 |
| 28. | $H+OH+M \rightleftharpoons H_2O+M$ | 2.20E+22 | -2.0 | 0.0 |
| 29. | $H+HO_2 \rightleftharpoons O+H_2O$ | 3.97E+12 | 0.0 | 671.0 |
| 30. | $H+HO_2 \rightleftharpoons O_2+H_2$ | 4.48E+13 | 0.0 | 1068.0 |
| 31. | $H+HO_2 \rightleftharpoons 2OH$ | 8.40E+13 | 0.0 | 635.0 |
| 32. | $H+H_2O_2 \rightleftharpoons HO_2+H_2$ | 1.21E+07 | 2.0 | 5200.0 |
| 33. | $H+H_2O_2 \rightleftharpoons OH+H_2O$ | 1.00E+13 | 0.0 | 3600.0 |
| 34. | $H+CH \rightleftharpoons C+H_2$ | 1.65E+14 | 0.0 | 0.0 |
| 35. | $H+CH_2(+M) \rightleftharpoons CH_3(+M)$ | 6.00E+14 | 0.0 | 0.0 |
| 36. | $H+CH_2(S) \rightleftharpoons CH+H_2$ | 3.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 37. | $H+CH_3(+M) \rightleftharpoons CH_4(+M)$ | 1.39E+16 | -0.5 | 536.0 |
| 38. | $H+CH_4 \rightleftharpoons CH_3+H_2$ | 6.60E+08 | 1.6 | 10840.0 |
| 39. | $H+HCO(+M) \rightleftharpoons CH_2O(+M)$ | 1.09E+12 | 0.5 | -260.0 |
| 40. | $H+HCO \rightleftharpoons H_2+CO$ | 7.34E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 41. | $H+CH_2O \rightleftharpoons HCO+H_2$ | 5.74E+07 | 1.9 | 2742.0 |
| 42. | $H_2+CO(+M) \rightleftharpoons CH_2O(+M)$ | 4.30E+07 | 1.5 | 79600.0 |
| 43. | $OH+H_2 \rightleftharpoons H+H_2O$ | 2.16E+08 | 1.5 | 3430.0 |
| 44. | $2OH(+M) \rightleftharpoons H_2O_2(+M)$ | 7.40E+13 | -0.4 | 0.0 |

| | | | | |
|-----|---|----------|------|---------|
| 45. | $2\text{OH} \rightleftharpoons \text{O} + \text{H}_2\text{O}$ | 3.57E+04 | 2.4 | -2110.0 |
| 46. | $\text{OH} + \text{HO}_2 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Declared duplicate reaction | 1.45E+13 | 0.0 | -500.0 |
| 47. | $\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Declared duplicate reaction | 2.00E+12 | 0.0 | 427.0 |
| 48. | $\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Declared duplicate reaction | 1.70E+18 | 0.0 | 29410.0 |
| 49. | $\text{OH} + \text{C} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO}$ | 5.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 50. | $\text{OH} + \text{CH} \rightleftharpoons \text{H} + \text{HCO}$ | 3.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 51. | $\text{OH} + \text{CH}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$ | 2.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 52. | $\text{OH} + \text{CH}_2 \rightleftharpoons \text{CH} + \text{H}_2\text{O}$ | 1.13E+07 | 2.0 | 3000.0 |
| 53. | $\text{OH} + \text{CH}_2(\text{S}) \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$ | 3.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 54. | $\text{OH} + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$ | 5.60E+07 | 1.6 | 5420.0 |
| 55. | $\text{OH} + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O}$ | 6.44E+17 | -1.3 | 1417.0 |
| 56. | $\text{OH} + \text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ | 1.00E+08 | 1.6 | 3120.0 |
| 57. | $\text{OH} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO}_2$ | 4.76E+07 | 1.2 | 70.0 |
| 58. | $\text{OH} + \text{HCO} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{CO}$ | 5.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 59. | $\text{OH} + \text{CH}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$ | 3.43E+09 | 1.2 | -447.0 |
| 60. | $2\text{HO}_2 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ Declared duplicate reaction | 1.30E+11 | 0.0 | -1630.0 |
| 61. | $2\text{HO}_2 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ Declared duplicate reaction | 4.20E+14 | 0.0 | 12000.0 |
| 62. | $\text{HO}_2 + \text{CH}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{CH}_2\text{O}$ | 2.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 63. | $\text{HO}_2 + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{CH}_4$ | 1.00E+12 | 0.0 | 0.0 |
| 64. | $\text{HO}_2 + \text{CO} \rightleftharpoons \text{OH} + \text{CO}_2$ | 1.50E+14 | 0.0 | 23600.0 |
| 65. | $\text{HO}_2 + \text{CH}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}_2$ | 5.60E+06 | 2.0 | 12000.0 |
| 66. | $\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{CO}$ | 5.80E+13 | 0.0 | 576.0 |
| 67. | $\text{CH} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{HCO}$ | 6.71E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 68. | $\text{CH} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_2$ | 1.08E+14 | 0.0 | 3110.0 |
| 69. | $\text{CH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$ | 5.71E+12 | 0.0 | -755.0 |
| 70. | $\text{CH}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{H} + \text{CO}$ | 5.00E+12 | 0.0 | 1500.0 |
| 71. | $\text{CH}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_3$ | 5.00E+05 | 2.0 | 7230.0 |
| 72. | $\text{CH}_2 + \text{CH}_4 \rightleftharpoons 2\text{CH}_3$ | 2.46E+06 | 2.0 | 8270.0 |
| 73. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{N}_2$ | 1.50E+13 | 0.0 | 600.0 |
| 74. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{AR} \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{AR}$ | 9.00E+12 | 0.0 | 600.0 |
| 75. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{OH} + \text{CO}$ | 2.80E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 76. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ | 1.20E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 77. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{H}$ | 7.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 78. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$ | 3.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 79. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CH}_4 \rightleftharpoons 2\text{CH}_3$ | 1.60E+13 | 0.0 | -570.0 |
| 80. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO} \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{CO}$ | 9.00E+12 | 0.0 | 0.0 |
| 81. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{CO}_2$ | 7.00E+12 | 0.0 | 0.0 |
| 82. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{CH}_2\text{O}$ | 1.40E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 83. | $\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{CH}_2\text{O}$ | 2.31E+12 | 0.0 | 20315.0 |
| 84. | $\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{HO}_2 + \text{CH}_4$ | 2.45E+04 | 2.5 | 5180.0 |
| 85. | $\text{CH}_3 + \text{HCO} \rightleftharpoons \text{CH}_4 + \text{CO}$ | 2.65E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 86. | $\text{CH}_3 + \text{CH}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{CH}_4$ | 3.32E+03 | 2.8 | 5860.0 |
| 87. | $\text{HCO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ | 1.50E+18 | -1.0 | 17000.0 |
| 88. | $\text{HCO} + \text{M} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO} + \text{M}$ | 1.87E+17 | -1.0 | 17000.0 |

| | | | | |
|------|---|----------|------|----------|
| 89. | $\text{HCO}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{HO}_2+\text{CO}$ | 1.34E+13 | 0.0 | 400.0 |
| 90. | $\text{N}+\text{NO}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{O}$ | 2.70E+13 | 0.0 | 355.0 |
| 91. | $\text{N}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{NO}+\text{O}$ | 9.00E+09 | 1.0 | 6500.0 |
| 92. | $\text{N}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{H}$ | 3.36E+13 | 0.0 | 385.0 |
| 93. | $\text{N}_2\text{O}+\text{O}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{O}_2$ | 1.40E+12 | 0.0 | 10810.0 |
| 94. | $\text{N}_2\text{O}+\text{O}\rightleftharpoons 2\text{NO}$ | 2.90E+13 | 0.0 | 23150.0 |
| 95. | $\text{N}_2\text{O}+\text{H}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{OH}$ | 3.87E+14 | 0.0 | 18880.0 |
| 96. | $\text{N}_2\text{O}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{HO}_2$ | 2.00E+12 | 0.0 | 21060.0 |
| 97. | $\text{N}_2\text{O}(\text{+M})\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{O}(\text{+M})$ | 7.91E+10 | 0.0 | 56020.0 |
| 98. | $\text{HO}_2+\text{NO}\rightleftharpoons\text{NO}_2+\text{OH}$ | 2.11E+12 | 0.0 | -480.0 |
| 99. | $\text{NO}+\text{O}+\text{M}\rightleftharpoons\text{NO}_2+\text{M}$ | 1.06E+20 | -1.4 | 0.0 |
| 100. | $\text{NO}_2+\text{O}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{O}_2$ | 3.90E+12 | 0.0 | -240.0 |
| 101. | $\text{NO}_2+\text{H}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{OH}$ | 1.32E+14 | 0.0 | 360.0 |
| 102. | $\text{NH}+\text{O}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{H}$ | 4.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 103. | $\text{NH}+\text{H}\rightleftharpoons\text{N}+\text{H}_2$ | 3.20E+13 | 0.0 | 330.0 |
| 104. | $\text{NH}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{HNO}+\text{H}$ | 2.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 105. | $\text{NH}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{N}+\text{H}_2\text{O}$ | 2.00E+09 | 1.2 | 0.0 |
| 106. | $\text{NH}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{HNO}+\text{O}$ | 4.61E+05 | 2.0 | 6500.0 |
| 107. | $\text{NH}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{NO}+\text{OH}$ | 1.28E+06 | 1.5 | 100.0 |
| 108. | $\text{NH}+\text{N}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{H}$ | 1.50E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 109. | $\text{NH}+\text{H}_2\text{O}\rightleftharpoons\text{HNO}+\text{H}_2$ | 2.00E+13 | 0.0 | 13850.0 |
| 110. | $\text{NH}+\text{NO}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{OH}$ | 2.16E+13 | -0.2 | 0.0 |
| 111. | $\text{NH}+\text{NO}\rightleftharpoons\text{N}_2\text{O}+\text{H}$ | 3.65E+14 | -0.5 | 0.0 |
| 112. | $\text{NH}_2+\text{O}\rightleftharpoons\text{OH}+\text{NH}$ | 3.00E+12 | 0.0 | 0.0 |
| 113. | $\text{NH}_2+\text{O}\rightleftharpoons\text{H}+\text{HNO}$ | 3.90E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 114. | $\text{NH}_2+\text{H}\rightleftharpoons\text{NH}+\text{H}_2$ | 4.00E+13 | 0.0 | 3650.0 |
| 115. | $\text{NH}_2+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NH}+\text{H}_2\text{O}$ | 9.00E+07 | 1.5 | -460.0 |
| 116. | $\text{H}+\text{NO}+\text{M}\rightleftharpoons\text{HNO}+\text{M}$ | 4.48E+19 | -1.3 | 740.0 |
| 117. | $\text{HNO}+\text{O}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{OH}$ | 2.50E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 118. | $\text{HNO}+\text{H}\rightleftharpoons\text{H}_2+\text{NO}$ | 9.00E+11 | 0.7 | 660.0 |
| 119. | $\text{HNO}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{H}_2\text{O}$ | 1.30E+07 | 1.9 | -950.0 |
| 120. | $\text{HNO}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{HO}_2+\text{NO}$ | 1.00E+13 | 0.0 | 13000.0 |
| 121. | $\text{CN}+\text{O}\rightleftharpoons\text{CO}+\text{N}$ | 7.70E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 122. | $\text{CN}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NCO}+\text{H}$ | 4.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 123. | $\text{CN}+\text{H}_2\text{O}\rightleftharpoons\text{HCN}+\text{OH}$ | 8.00E+12 | 0.0 | 7460.0 |
| 124. | $\text{CN}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{NCO}+\text{O}$ | 6.14E+12 | 0.0 | -440.0 |
| 125. | $\text{CN}+\text{H}_2\rightleftharpoons\text{HCN}+\text{H}$ | 2.95E+05 | 2.5 | 2240.0 |
| 126. | $\text{NCO}+\text{O}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{CO}$ | 2.35E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 127. | $\text{NCO}+\text{H}\rightleftharpoons\text{NH}+\text{CO}$ | 5.40E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 128. | $\text{NCO}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{H}+\text{CO}$ | 2.50E+12 | 0.0 | 0.0 |
| 129. | $\text{NCO}+\text{N}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{CO}$ | 2.00E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 130. | $\text{NCO}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{NO}+\text{CO}_2$ | 2.00E+12 | 0.0 | 20000.0 |
| 131. | $\text{NCO}+\text{M}\rightleftharpoons\text{N}+\text{CO}+\text{M}$ | 3.10E+14 | 0.0 | 54050.0 |
| 132. | $\text{NCO}+\text{NO}\rightleftharpoons\text{N}_2\text{O}+\text{CO}$ | 1.90E+17 | -1.5 | 740.0 |
| 133. | $\text{NCO}+\text{NO}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{CO}_2$ | 3.80E+18 | -2.0 | 800.0 |
| 134. | $\text{HCN}+\text{M}\rightleftharpoons\text{H}+\text{CN}+\text{M}$ | 1.04E+29 | -3.3 | 126600.0 |
| 135. | $\text{HCN}+\text{O}\rightleftharpoons\text{NCO}+\text{H}$ | 2.03E+04 | 2.6 | 4980.0 |
| 136. | $\text{HCN}+\text{O}\rightleftharpoons\text{NH}+\text{CO}$ | 5.07E+03 | 2.6 | 4980.0 |

| | | | | |
|------|---|----------|------|---------|
| 137. | $\text{HCN} + \text{O} \rightleftharpoons \text{CN} + \text{OH}$ | 3.91E+09 | 1.6 | 26600.0 |
| 138. | $\text{HCN} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{NH}_2 + \text{CO}$ | 1.60E+02 | 2.6 | 9000.0 |
| 139. | $\text{C} + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{CN} + \text{N}$ | 6.30E+13 | 0.0 | 46020.0 |
| 140. | $\text{CH} + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{N}$ | 3.12E+09 | 0.9 | 20130.0 |
| 141. | $\text{CH}_2 + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{NH}$ | 1.00E+13 | 0.0 | 74000.0 |
| 142. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{NH} + \text{HCN}$ | 1.00E+11 | 0.0 | 65000.0 |
| 143. | $\text{C} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{CN} + \text{O}$ | 1.90E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 144. | $\text{C} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{N}$ | 2.90E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 145. | $\text{CH} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{O}$ | 4.10E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 146. | $\text{CH} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{H} + \text{NCO}$ | 1.62E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 147. | $\text{CH} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{N} + \text{HCO}$ | 2.46E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 148. | $\text{CH}_2 + \text{NO} \rightleftharpoons \text{OH} + \text{HCN}$ | 2.90E+14 | -0.7 | 760.0 |
| 149. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{NO} \rightleftharpoons \text{OH} + \text{HCN}$ | 2.90E+14 | -0.7 | 760.0 |
| 150. | $\text{CH}_3 + \text{NO} \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{H}_2\text{O}$ | 9.60E+13 | 0.0 | 28800.0 |
| 151. | $\text{CH}_3 + \text{N} \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{H}_2$ | 3.70E+12 | 0.1 | -90.0 |
| 152. | $\text{NH} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HNO} + \text{CO}$ | 1.00E+13 | 0.0 | 14350.0 |
| 153. | $\text{CN} + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{NCO} + \text{NO}$ | 6.16E+15 | -0.8 | 345.0 |
| 154. | $\text{NCO} + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O} + \text{CO}_2$ | 3.25E+12 | 0.0 | -705.0 |
| 155. | $\text{N} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{CO}$ | 3.00E+12 | 0.0 | 11300.0 |
| 156. | $\text{O} + \text{CH}_3 \Rightarrow \text{H} + \text{H}_2 + \text{CO}$ | 3.37E+13 | 0.0 | 0.0 |
| 157. | $\text{OH} + \text{HO}_2 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Declared duplicate reaction | 5.00E+15 | 0.0 | 17330.0 |
| 158. | $\text{OH} + \text{CH}_3 \Rightarrow \text{H}_2 + \text{CH}_2\text{O}$ | 8.00E+09 | 0.5 | -1755.0 |
| 159. | $\text{CH} + \text{H}_2(+\text{M}) \rightleftharpoons \text{CH}_3(+\text{M})$ | 1.97E+12 | 0.4 | -370.0 |
| 160. | $\text{CH}_2 + \text{O}_2 \Rightarrow 2\text{H} + \text{CO}_2$ | 5.80E+12 | 0.0 | 1500.0 |
| 161. | $\text{CH}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{CH}_2\text{O}$ | 2.40E+12 | 0.0 | 1500.0 |
| 162. | $\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{H}_2 + \text{CH}_2\text{O}$ | 6.82E+10 | 0.2 | -935.0 |



The Effect of Horizontal Drainage Lengths on the Stability of a Homogeneous Earth-Fill Dam Under Seepage Conditions

Ahmet ERDAĞ^{1*} Pınar Sezin Öztürk KARDOĞAN²

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 06560 Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 06560 Yenimahalle/ANKARA

Article Info

Research article
Received: 14.11.2021
Revision: 01.03.2022
Accepted: 15.03.2022

Keywords

Homogeneous Earth-Fill Dam
Drain Systems
Pore-Water Pressure
Stabilization

Abstract

Failures can occur from seepage failure in the downstream slope of an earth-fill dam. The excessive pore pressures and seepages must be controlled to achieve the desired safety level in such dams. This safety can be provided with a horizontal drainage cover design. The essential goal of drainage system design is to increase system efficiency in reducing pore water pressures and seepage. Several calculations were made with a downstream slope cover design and downstream horizontal drainage length for homogeneous earth-fill dams. The minimum and maximum effective length of the filtered drainage system was obtained after the analyses. Moreover, the factor of safety regarding the downstream slope was calculated for the drainage system with different geometries. The results showed that the horizontal drainage length affects system performance and the seepage behavior of the dam.

1. INTRODUCTION

Despite the remarkable development of the dam industry and the application of modern methods and equipment in dam constructions, homogeneous earth-fill dams are still in use thanks to their ease of application, environmental compatibility, local material usage, and availability to be built on a low-strength foundation [1]. Therefore, homogeneous earth-fill dams are one of the most common types [2].

Homogeneous earth-fill dams are hydraulic structures made of impermeable material built along a river to form an upstream reservoir to hold water for various purposes. The purposes of impoundment may include irrigation, hydropower generation, flood control, shipping, and fishing. Dams can be built to meet any of the purposes mentioned above or constructed to achieve more than one purpose [3].

The homogeneous earth-fill dam is designed with relatively fewer slopes to stay safe while being built. (Generally, 1:3 on upstream side and 1:2 on downstream side) [4]. The design differs due to dam location and the material variety in the construction. Furthermore, the building purpose of the dam also affects the design. It is not possible to present a general design criterion for earth-fill dams [5]. But each design criteria should include the following design aspects.

- Stability of embankments and foundations in critical conditions such as earthquakes and floods
- Seepage and pressure check for both filling and foundations
- Erosion control methods

Critical conditions such as earthquakes, overflows, and unexpected increases in seepage must be overcome with control structures such as filter-protected stack drains, horizontal drains, relief wells, and edge drainage [6,7].

Figure 1 illustrates that the drains are divided into horizontal, triangular toe, chimney, and combined drain based on their location and geometry [8].

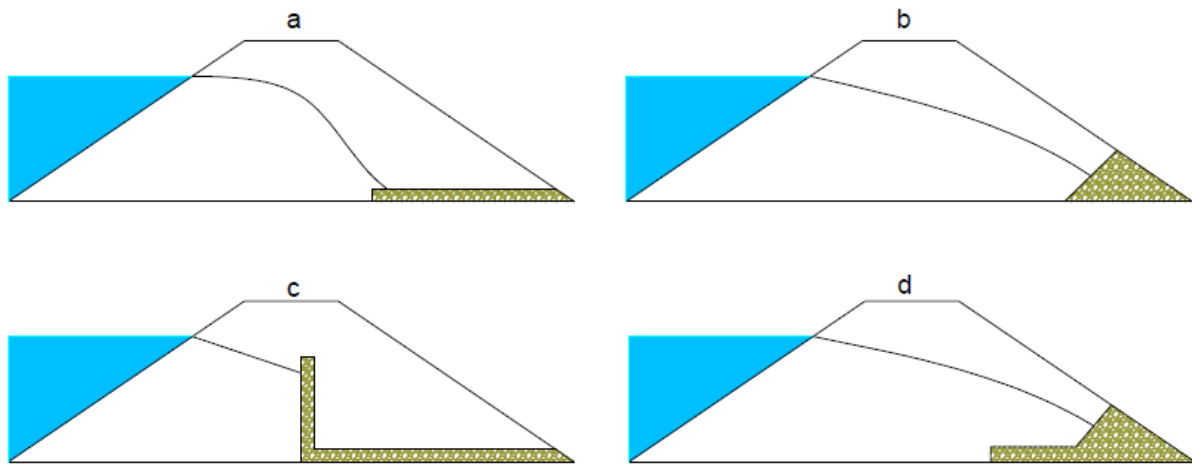


Figure 1. Different types of drainage in homogeneous earth dams, (a) Horizontal drain, (b) Triangular toe drain, (c) Chimney drain, (d) Combined drain.

The horizontal drainage method is a cost-effective and widespread method for seepage design. These drains dissipate excess pore water pressure, causing equipotential lines to become closer to the ground surface and more horizontal. They also have a very substantial effect on the stability of the upstream slope during a rapid drawdown. The efficiency of the horizontal drainage system is a function provided by several factors such as soil properties, slope geometry, drainage location, length, and spacing [8].

There is limited scholarship to describe several parameters that control horizontal drainage design or evaluate the feasibility of using a horizontal drainage system to reduce groundwater levels [9-11]. Moreover, Rahardjo et al. (2002) analyzed the effectiveness of horizontal drainage for slope stability in dams [12,13].

Properly designed horizontal drainage can provide dam safety by shortening the seepage flow length [14]. Therefore, it is essential to design a drainage system long enough to hold the water surface within the dam structure and short enough to prevent excessive seepage volume [15].

Horizontal drains are commonly used in medium-height homogeneous dams up to 50 m high [16]. This drainage should have adequate length and thickness to channel the water safely from the dam body. The recommended drain thickness is at least 1 meter [17]. The upper limit for the length of the drain is defined in the USBR (1987). The limitations indicate that the distance between the dam's centerline and the upstream end of its horizontal drainage should not be less than $H+1.55$ m, where H is the height of the dam. Furthermore, the drain should be placed in such a way that no capillary rise above the waterline is visible on the downstream slope [18-20].

This study includes an analysis on horizontal drainage systems applied in homogeneous earth-fill dams. The data from the literature, drainages of different lengths were designed, and the stability and pore water pressures on the downstream side of the dam were detailed.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Materials

The slope stability and pore water pressures varying along the slip surface were examined under the conditions of drainage systems with different geometry of a homogeneous earth-fill dam. The sample dam considered from the literature data was defined according to the USBR (1987) criteria.

Since the properties of the dam material largely determine the seepage and stability behavior of the dam, these properties were collected from sources containing actual data in the literature. Therefore, the soil properties of the homogeneous earth-fill dam investigated are available in Table 1, while the dam model used in the analysis is detailed in Figure 2 [21,22].

Table 1. Properties of materials used in seepage and stability analyses

| | c (kPa) | Φ (degree) | Ψ (degree) | γ_{unsat} (kN/m ³) | γ_{sat} (kN/m ³) | ν | E (kPa) | k (m/s) |
|----------------------------|---------|-----------------|-----------------|--|--|-------|---------|--------------------|
| Homogeneous Earth-fill Dam | 20 | 30 | 0 | 18 | 19.2 | 0.30 | 6000 | 10^{-7} |
| Impervious Foundation | 25 | 40 | 10 | 19 | 22 | 0.32 | 73200 | 10^{-10} |
| Horizontal Filter Drain | 0 | 35 | 5 | 17.8 | 20.9 | 0.25 | 12250 | 4×10^{-3} |

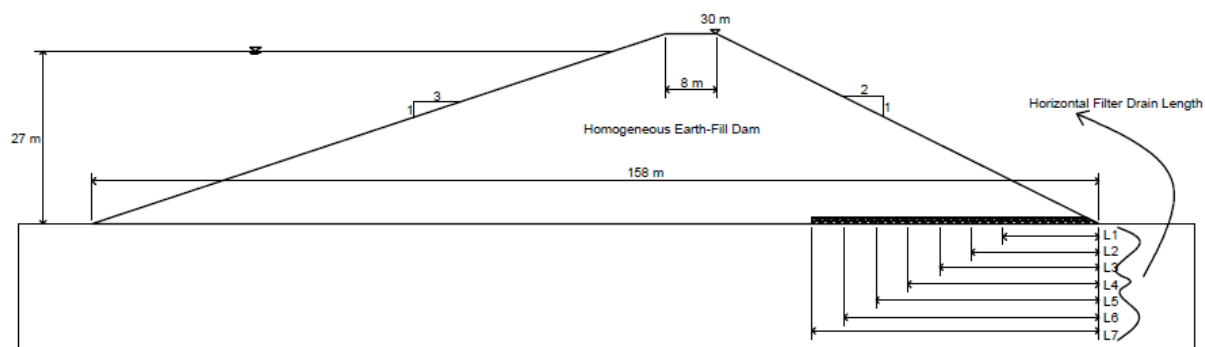


Figure 2. The general section of a homogenous earth dam with a horizontal filter drain

2.2. Methods

Numerical models were used to analyze how the dam stability is affected under seepage conditions. It is possible to mathematically model the physical process of water flowing through the environment with numerical modeling by creating a mathematical simulation of an actual physical process. It is also purely mathematical, in this regard, and very different from scale physical modeling in the laboratory or full-scale field modeling [23]. Limit equilibrium approach modeling is a well-known method regarding stability analysis problems. This method considers the force or moment balance of the soil mass above a possible failure surface.

Figure 3 shows the simulation steps. This process includes creating geometric models and mesh, defining material properties and boundary conditions, solving boundary conditions and governing equations, and finally, visualizing and interpreting the results.

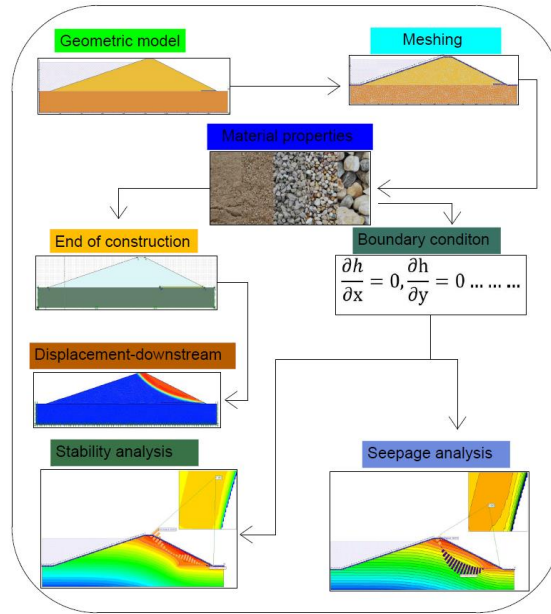


Figure 3. Simulation process of the study

2.3. Governing equation

The equations are two-dimensional diffusion equations in the unstable state. The general partial differential water flow equation for seepage, derived from the combination of Darcy's law and the mass conservation equation, can be detailed as follows [24].

$$(k \cdot h) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} (1)$$

The sum of elevation head (z) and pressure head is called piezometric head.

k : the hydraulic conductivity

h : the piezometric head

S_s : specific storage and t is time

The two-dimensional form of equation (1) can be formulated as [1]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} (2)$$

2.4. Seepage and Stability Solutions

The purpose of the analysis is to define the pore water pressures in the dam-downstream system needed for slope stability and calculations. The analyzes were performed through the SLIDE module of the Rocscience geotechnical software package.

Figure 3 shows the boundary conditions and mesh at the dam and around the horizontal drainage system. A tight mesh was applied around the drainage system and in the dam body.

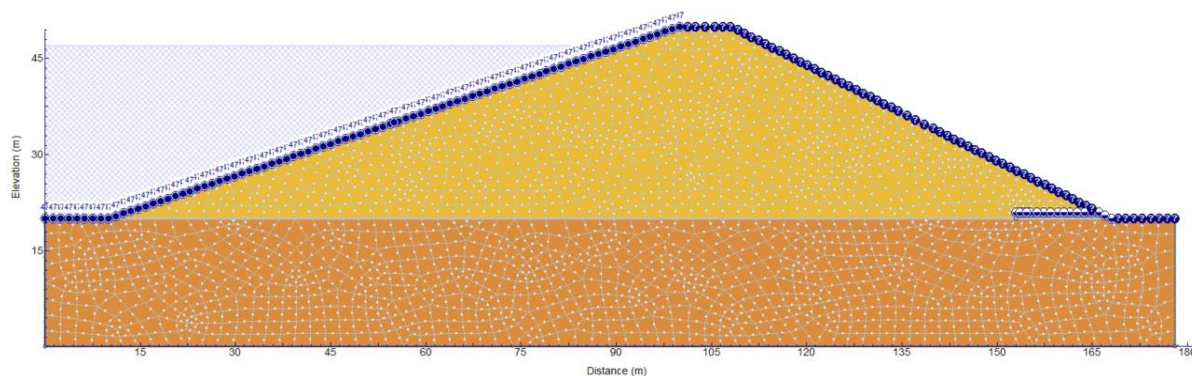


Figure 4. Initial conditions for the dam as it is designed in Rocscience Slide [25].

The upstream and downstream boundaries are defined as the water height behind the reservoir and the water height in the tail-water region. It should be noted that the boundary condition is assumed to be load-free since there is no water downstream of the dam.

The Bishop method, one of the limit equilibrium methods, was applied to analyze the slope safety in the downstream region of drainage systems with different geometries. The Bishop method is prevalent in practice for circular cutting surfaces. It uses the interslice normal forces while omitting the interslice shear forces [26-27].

3. ANALYSES

It is critical to evaluate the embankment body, upstream and downstream slope at the end of construction before analyzing the pore water pressures that may occur in seepage cases. Therefore, displacements that may occur on the downstream side of the drainage system were examined through FEM-based PLAXIS 2D software after the construction of the homogeneous earth-fill dam (Fig. 7 (28))

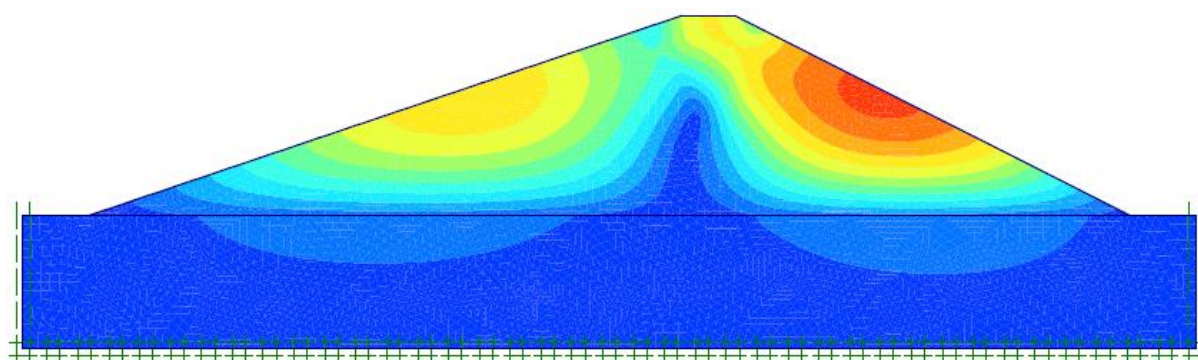


Figure 5. Total displacements during the end of construction using FEM (downstream-45 m drain)

The geological section was placed in the Rockscience Slide 6.0 software. Moreover, the stability analysis and the maximum and minimum pore water pressure values varying along the slip surface were calculated.

Horizontal drainage lengths of 15, 20, 25, 30, 35, 40, and 45 meters were included and applied to the dam geometry, respectively. Factors of safety on the downstream side were calculated for each drainage length. In contrast, the minimum and maximum pore water pressures after the seepage along the slip surfaces were calculated (Figure 6).

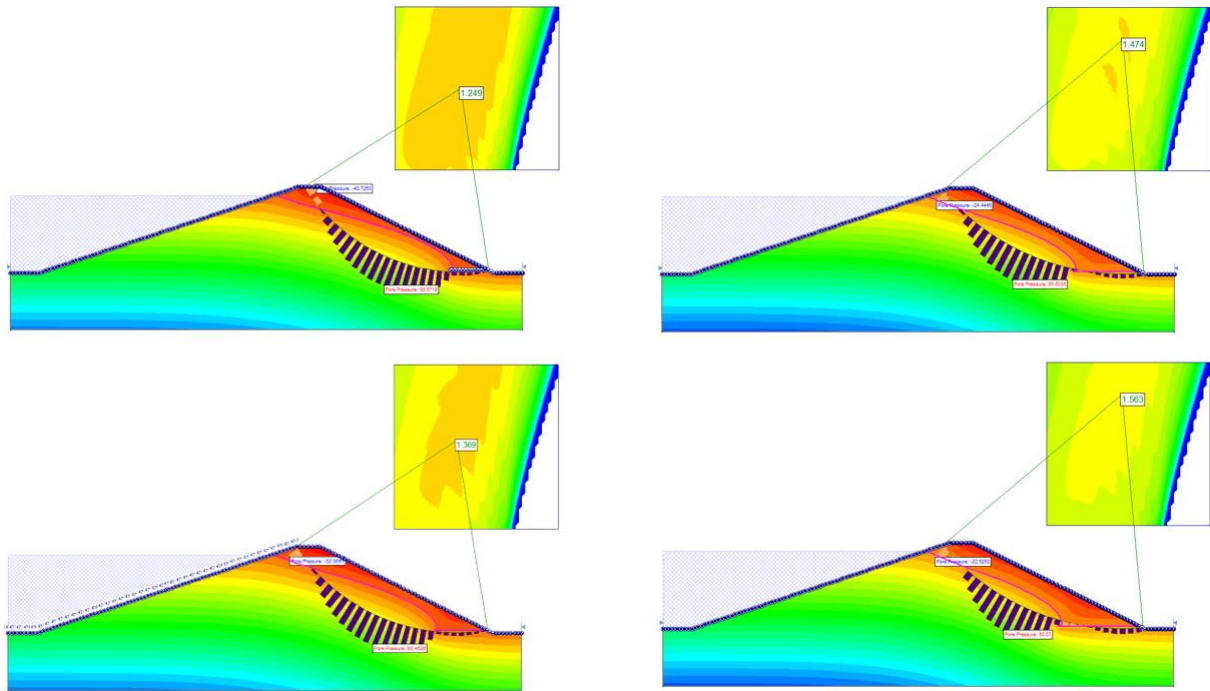


Figure 6. FoS and pore-water pressure for various lengths of the drain (15-20-25-30 m)

The results obtained showed that the lowest factor of safety belonged to the 15-meter horizontal drainage system. A linear correlation was observed between the horizontal increase in drainage lengths and the factor of safety. However, after a certain length (35-40-45 m), it was found that the factor of safety did not change much (Table 2). This might be rooted in the idea that exceeding the horizontal drainage length specified in the design at certain levels will not affect the safety of the dam.

Table 2. The Pore water pressures and factor of safety for various lengths of the blanket drain.

| Horizontal Filter Drain Lengths (m) | Factor of Safety | Along Surface Minimum and Maximum Pore Water Pressure | |
|-------------------------------------|------------------|---|---------|
| | | Minimum | Maximum |
| 15 | 1.249 | -40,720 | 93,671 |
| 20 | 1.369 | -32,309 | 85,452 |
| 25 | 1,474 | -24,444 | 65,603 |
| 30 | 1.563 | -22,525 | 50,070 |
| 35 | 1.637 | -36,501 | 24,643 |
| 40 | 1.673 | -60,400 | 8,269 |
| 45 | 1.673 | -64,728 | 8,270 |

Figure 7 shows the pore water pressure variation along the slip surface beside the correlation between the horizontal drainage length and downstream stability. Considering the length variation of the horizontal drainage system, it was found that the drainage geometry affects the reduction of pore water pressure after 25-30 meters for both combinations.

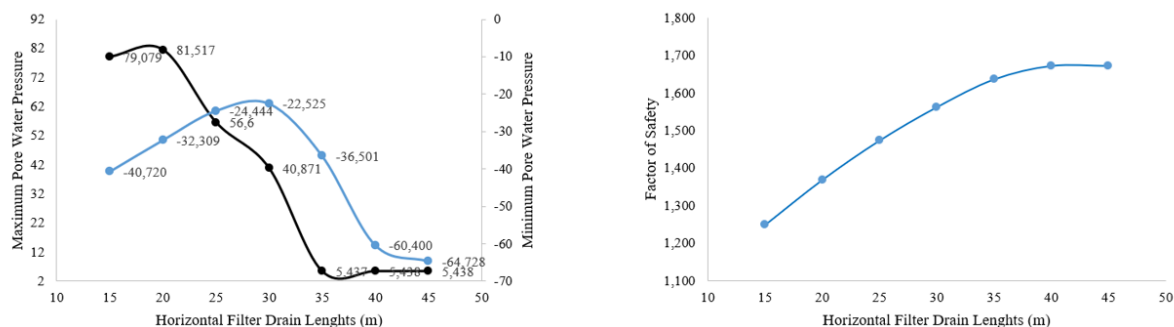


Figure 7. Pore water pressure distribution and factor of safety

However, it cannot be asserted that increasing the length beyond 35 meters significantly affects pore water pressure. This might be rooted in the fact that the horizontal drain length should be increased in length to reduce pore water pressure, and the design length should be considered.

The analyses for the critical loading situation revealed that the drainage systems of different lengths do not meet all the requirements of the United States Army Corps of Engineers (USACE), British Dam Society (BDS), and Canadian Dam Association (CDA) recommendations. This is detailed in Table 3 [21].

Table 3. Summary slope stability analysis results

| Condition | FoS (USACE) | FoS (BDS) | FoS (CDA) | Length (m) | FoS | Status |
|--------------|-------------|-----------|-----------|------------|-------|--------|
| Steady-State | 1.5 | 1.3-1.5 | 1.5 | 15 | 1.249 | x |
| | | | | 20 | 1.369 | x |
| | | | | 25 | 1.474 | x |
| | | | | 30 | 1.563 | ✓ |
| | | | | 35 | 1.637 | ✓ |
| | | | | 40 | 1.673 | ✓ |
| | | | | 45 | 1.673 | ✓ |

The data obtained from the SLIDE program was used in the analysis through the SEEP/W software with the design system of the maximum drainage length (45 m). SEEP/W software is a finite element program that can simulate groundwater flow in soils. Different materials and boundary conditions can be modeled two-dimensionally under saturated or unsaturated conditions for steady-state or transient analysis. It is widely used for groundwater flow modeling by several scholars.

Graphic data showing the variation of soil permeability and volumetric water content with matric suction pressure in the seepage analyses made according to soil mechanics principles are available in Figure 8.

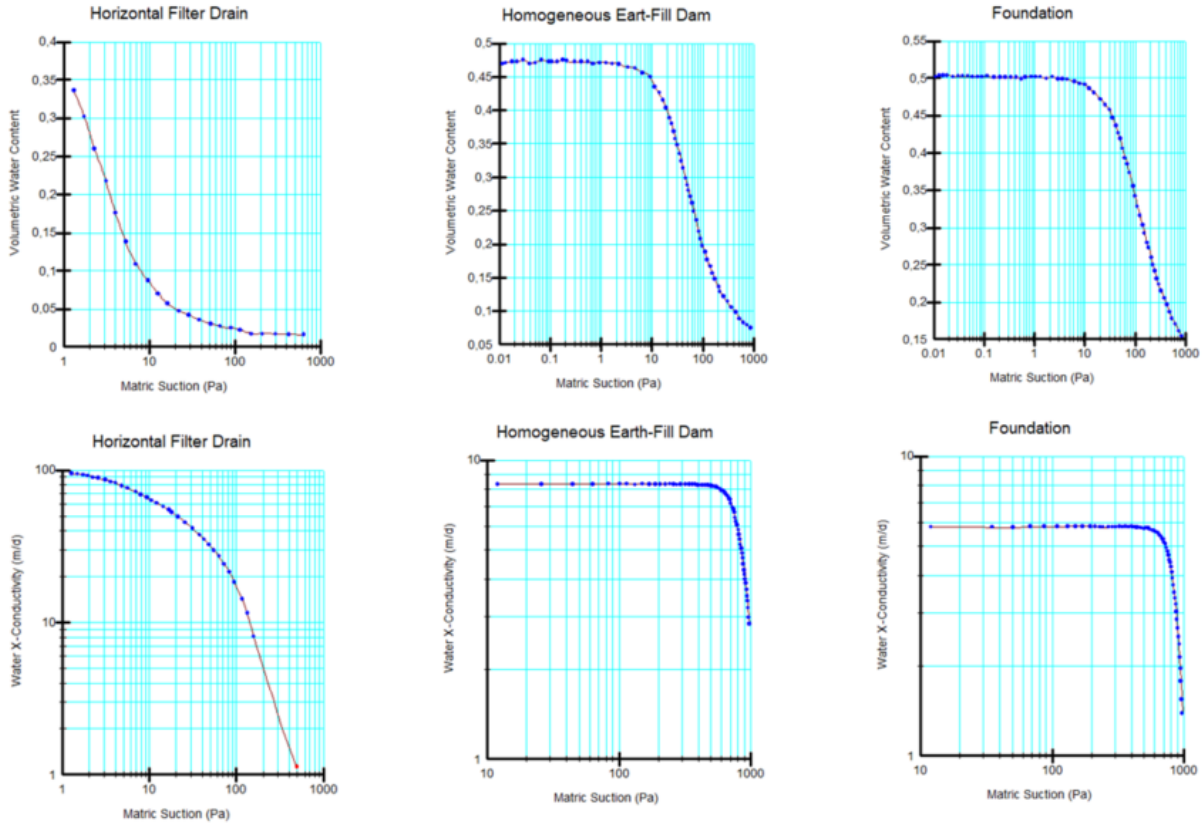


Figure 8. Soil–water characteristic curve and permeability function for soil materials

The analysis performed in the SEEP/W program was applied to the design with a horizontal drainage length of 45 meters [29]. As in the Rocscience Slide analysis, the seepage analysis was performed, while the maximum water was assumed to be 27 m above the foundation level. The pore water pressure distribution in the downstream region of the dam was obtained (Figure 9) through the seepage analysis.

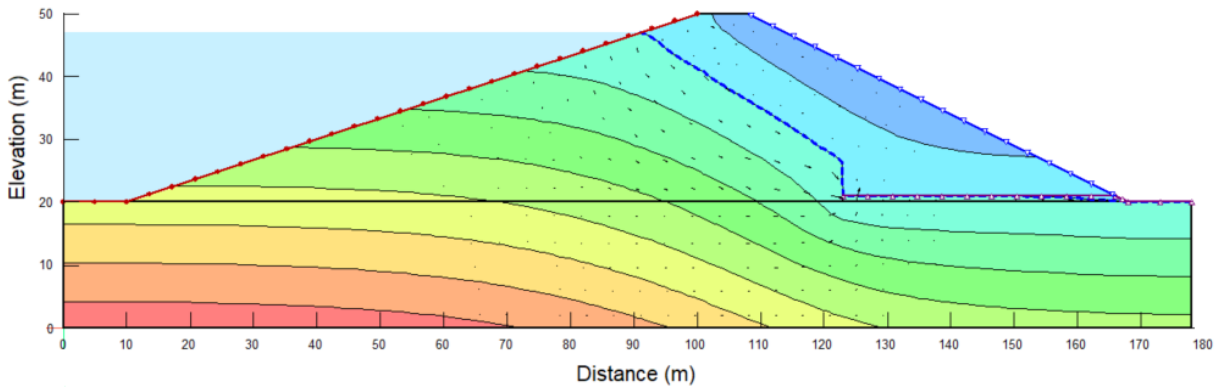


Figure 9. Pore water pressure contours of the Dam (45 m)

Figure 10 shows the variation of pore water pressure by the distance along the critical slip circle in the downstream slope. The graph shows that the pore water pressure is negative due to suction at the heel of the downstream slope, increasing towards the phreatic line. The critical sliding surface is zero when it intersects the phreatic line. The pore water pressure rises to the maximum ordinate of the slices from the phreatic line and begins to decrease towards the end of the downstream slope.

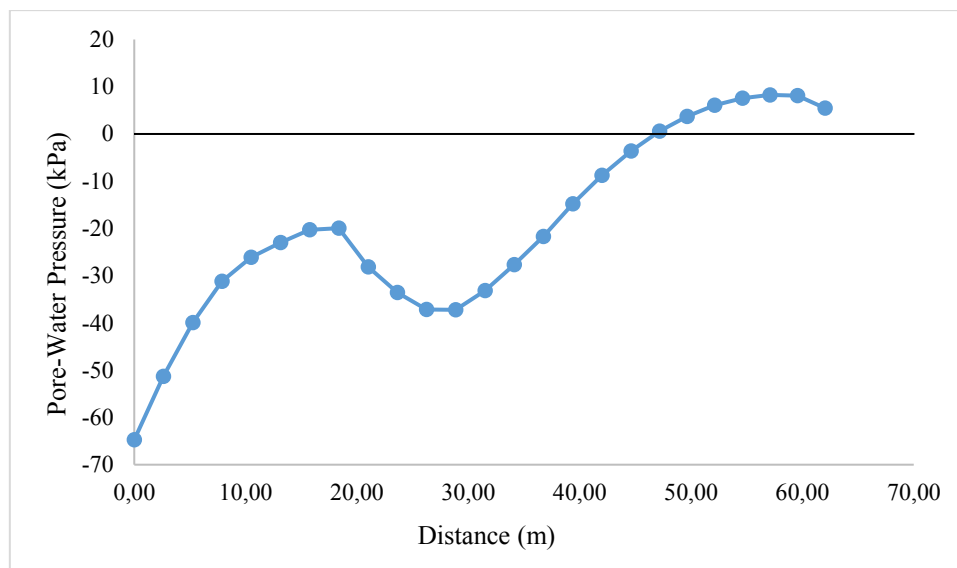


Figure 10. Pore-water pressure and distance for the 45-meter drainage system.

4.RESULTS

Seepage control in earth-fill dams is crucial for the safe and sustainable operation of constructed dams. The effects of horizontal drainage systems with various lengths on stability and seepage properties were analyzed with the Geotechnical software. The length of the downstream drainage on the seepage in homogeneous earth-fill dams was evaluated for seven different cases.

The main findings of this study can be summarized below:

- 1- It was observed that the increases in drainage length caused decreases in the pore water pressures passing through the body. Downstream slope protection is essential to the safety of the dam, but the use of drainage provides improved safety against seepage effects.
- 2- The downstream drainage system shifts the waterline away from the downstream slope, thereby preventing downstream slope failure. It also quickly removes the seeping water and reduces the pore water pressure inside the dam.
- 3- The drain length extending beyond the point of intersection with the critical failure surface does not provide a significant change in the factor of safety.
- 4- It was found that the maximum length has a more significant effect on the safety factor for the overall length combination when different horizontal drainage length combinations are applied for the full reservoir level and the steady-state condition regarding the fill dams.
- 5- The water discharged by the horizontal drain is impeded to rise in the filling on the drain. Suppose the horizontal drain does not have sufficient capacity. In that case, the upstream line will reach the downstream embankment, reducing the stability of the downstream slope and also potentially causing pipe collapse in the downstream fill.
- 6- The basic guidelines for drainage design were also provided, and particular suggestions were propounded on evaluating their performance by the seepage properties.

In the study, the effect of climatic conditions on the dam was ignored. These effects can be included in a future analysis. In addition, the effect of the water level change that may occur on the upstream side of the dam model used in this study (eg rapid drawdown) on the drainage filter and dam stability can be examined and can be an example for future studies.

REFERENCES

- [1] Azam K., Fouad K., Mahmood H., Reza Z., Numerical and experimental modelling of seepage in homogeneous earth dam with combined drain, *Ish Journal of Hydraulic Engineering*, 21 (2021) 94-107.
- [2] Farzin S., Behnam M., Effect of Homogeneous Earth Dam Hydraulic Conductivity Ratio (K_x/K_y) with Horizontal Drain on Seepage, *Indian Geotech J*, 44(3) (2014) 322–328.
- [3] Mahmud S., Mohayminul I., A Comprehensive Study of Different Types of Seepage Control Measures for Earth Dam Using FEM, 5 (2019) 24-37.
- [4] Stephens T., Manual on small earth dams: Food and Agriculture organization of United nations, (2010) 64.
- [5] Kutzner C., Design of earth and Rockfill dams. Earth and rockfill dams: principles of design and construction: Taylor & Francis. Original edition, (1997) 105-107.
- [6] Jansen R. B., Lowe J., Kramer R.W., Poulos S.J., Advanced dam engineering for design, construction, and rehabilitation. In Jansen, R.B. (ed). Earthfill dam, Design and Analysis: Kluwer Academic Publishers, (1998) 256-258.
- [7] Rajeeth A., An analysis of earth dam break, Master Thesis in Geosciences Faculty, of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo, Norway (2011).
- [8] Sharma H.D., Embankment Dams. Oxford & Ibh Publishing Company: New Dehli Bombay Calcutta, (1991) 72–76.
- [9] Royster D. L., Horizontal drains and horizontal drilling: an overview. *Transp Res Rec* (1980) 783:16–25
- [10] Lau KC, Kenney TC (1984) Horizontal drains to stabilize clay slopes. *Can Geotech J* 21(2):241–249
- [11] Martin R. P., Siu K. L., Premchitt J., Performance of horizontal drains in Hong Kong. Special Project Report, SPR 11/94, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, Hong Kong (1994).
- [12] Rahardjo H, Hritzuk K. J., Leong E. C., Rezaur R. B., Effectiveness of horizontal drains for slope stability. *Eng. Geol*, (2002) 295–308
- [13] Abdolreza M., Yousef H., Farzin S., Gholam M., Gholamreza M., Performance of the horizontal drains in upstream shell of earth dams on the upstream slope stability during rapid drawdown conditions, *Arab J Geosci* 7(2014) 1957–1964.
- [14] Creager, W., and Barbour, F., Design and Maintenance of Earth Dams [with Discussion], American Water Works Association, 31(8) (1939), 1335-0360.
- [15] Amir W, Krishnanand Y., Matthew S., Rebecca N., Direct Method To Model Seepage For An Embankment With A Drain, *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, (2015) 1-7.
- [16] Singh B., Varshney R. S., Engineering for Embankment Dams. Brookfield, VT : A.A. Balkema Publishers (1995).
- [17] USBR, Design of Small Dams. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation(1998).
- [18] Mishra G. C., Singh A. K., Seepage through a Levee, *International Journal of Geomechanics*, (2005) 5(1), 74–79.

- [19] Yılmaz A. H., Assessment of Performance of Drainage Systems in Earth-Fill Dams, The Degree of Master of Science in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (2017).
- [20] Behnam M., Farzin S., Effect of horizontal drain length and cutoff wall on seepage and uplift pressure in heterogeneous earth dam with numerical simulation, Journal of Civil Engineering and Urbanism, 3(3) (2013) 114-121.
- [21] Amonuel Z., Modeling the slope of embankment dam during static and dynamic stability analysis: a case study of Koga dam, Ethiopia, Modeling Earth Systems and Environment, 6 (2020)1963–1979
- [22] Priyanka T., Arindam D., Finite element analysis for identifying locations of cracking and hydraulic fracturing in homogeneous earthen dams, International Journal of Geo-Engineering, (2021) 12:10
- [23] Maknoon M., Slope stability analyses of waste rock piles under unsaturated conditions following large precipitations, PhD Thesis, Montreal University, (2016) 64-75.
- [24] Mutreja K.N., Applied hydrology. Tata McGraw-Hill: New Dehli, (1986) 396.
- [25] Slide v6.0, Program for limit-equilibrium slope stability analysis, Rocscience Inc. (2006).
- [26] Baba K., Bahi L., Ouadif L., Akhssas A., Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods applied to a railway in the Moroccan rif. Open Journal of Civil Engineering, (2012) 27-32.
- [27] Bishop, A. W., 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique, 10, 129-150.
- [28] Plaxis 2D Material Models Manual, 2018.
- [29] Geo-Slope (20012) SEEP/W version. User's manual. GEOSLOPE International. Calgary, Alberta, Canada