



Cilt/Volume: 5 Sayı/Number: 1 Yıl/Year: 2023 E-ISSN: 2667-7989

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
**FEN ve MÜHENDİSLİK
BİLİMLERİ DERGİSİ**

Necmettin Erbakan University
Journal of Science and
Engineering

dergipark.gov.tr/neufmbd



NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE AND ENGINEERING

Cilt/Volume: 5, Sayı/Issue: 1, (Haziran/June, 2023)
Uluslararası Hakemli Dergi/*International Referred Journal*

İmtiyaz Sahibi/Holder of Concession
Necmettin Erbakan Üniversitesi Rektörü
Rector of Necmettin Erbakan University
Prof. Dr. Cem ZORLU

Baş Editör/Editor-in-Chief
Doç. Dr. Fatih ERÇİ, Necmettin Erbakan Üniversitesi
Assoc. Prof., Ph.D., Necmettin Erbakan University

Yardımcı Editör/Associate Editor
Dr. Ahmet Burçin BATIBAY (*Ph.D.*)
Necmettin Erbakan Üniversitesi, *Necmettin Erbakan University*

Yayına Hazırlık ve Mizanpaj Editörleri/Layout Editors
Arş. Gör. Behiç Selman ERDOĞDU (*Res. Asst.*)
Arş. Gör. Canan SEVİNÇ (*Res. Asst.*)

İstatistik Editörü/Statistical Editor
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet PEKGÖR, Necmettin Erbakan Üniversitesi
Asst. Prof., Ph.D., Necmettin Erbakan University

Dil Editörü/Language Editor
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DEMİRTAŞ, Necmettin Erbakan Üniversitesi
Asst. Prof., Ph.D., Necmettin Erbakan University

Sekreter/Secretary
Arş. Gör. Esra TANHAŞ, Necmettin Erbakan Üniversitesi
Res. Asst., Necmettin Erbakan University

Yayın Türü/Publication Type
Yerel Süreli Yayın/*Local Periodical*

Yazışma Adresi/Correspondence Address
Necmettin Erbakan Üniversitesi Rektörlüğü, 42090, Meram, Konya, Türkiye

Telefon/Phone: +90 (332) 221 05 00
web: www.dergipark.gov.tr/neufmbd
e-posta/e-mail: neufmbd@erbakan.edu.tr

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, yılda iki kez yayınlanan uluslararası hakemli bir dergidir.
Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering is a international bi-annual journal.

E-ISSN: 2667-7989

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Endodontik NiTi Eğelerden Elde Edilen TiO₂'nin Boya Duyarlı Güneş Pillerinde Kullanımının Araştırılması <i>Investigation of the Use of TiO₂ Obtained from Endodontic NiTi Files in Dye-Sensitized Solar Cells</i> Uzun, Özgün, Muhammed İhsan; Batıbay, Ahmet Burçin; Ünal, Bayram; Eker, Yasin Ramazan; Terlemez, Arslan.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	1-8
Cebirsel Bir Grafın Harary İndeksi <i>Harary Index for an Algebraic Grap</i> Akgüneş, Nihat; Aydın, Busra.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	9-13
GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou GNSS Sistemlerinin 1. ve 2. Temel Frekanslarının Doluluk Analizi <i>Availability Analysis of 1st and 2nd Fundamental Frequencies of GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou GNSS Systems</i> Öğütçü, Sermet; Özdemir, Behlül Numan; Alçay, Salih, Buydaycı, İlkay.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	14-22
Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme Plakların Statik Analizinde Mikro-Mekanik Modellerin Katkısı <i>Contribution of Micro-Mechanical Models to Static Analysis of Functionally Graded Material Plates</i> Madenci, Emrah.	Araştırma Makalesi <i>Research Article</i>	23-37

Alan Editörleri/Editorial Board

Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU	Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. Ceyda ÖZFİDAN KONAĞCI	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Mesut UYANER	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Senar AYDIN	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Alper ALVER	Aksaray Üniversitesi
Doç. Dr. Alper SİNAN	Akdeniz Üniversitesi
Doç. Dr. Aydın KARAKOCA	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Ceyhun YILMAZ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Doç. Dr. Derya BAL ALTUNTAŞ	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Doç. Dr. Esra YALDIZ	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Hüseyin Zahit SELVİ	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Mehmet HACİBEYOĞLU	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa Kürşat DEMİR	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa YÖNTEM	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Sedat PAK	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Ummahan EGE ARSLAN	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Bilal ERVURAL	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Emrehan YAVŞAN	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Fatma BAYRAM SARIİPEK	Konya Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Murat KARAKOYUN	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YALÇIN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Vahit TONGUR	Konya Teknik Üniversitesi
Dr. Rıza BÜYÜKZEREN	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Dr. Yasemin TABAK	Tübitak MAM

Yayın ve Danışma Kurulu/Editorial and Advisory Board

Prof. Dr. Aşır GENÇ	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Atilla EVCİN	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. Didem ÖZÇİMEN	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Erdal KOCABAŞ	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Haluk BİNGÖL	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Hasan KOTAN	Bursa Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Hicran AÇIKEL	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Hidayet OĞUZ	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim KALAYCI	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet AKTAN	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet KARALI	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Ömer IŞILDAK	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Prof. Dr. Sabri ALPAYDIN	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Sabri KOÇER	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Süleyman KALELİ	Sakarya Üniversitesi
Prof. Dr. Ümmügülsüm DAĞLIOĞLU	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Ahmet CAN	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Nilgün ERTAŞ	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali AKYÜREK	Necmettin Erbakan Üniversitesi

Endodontik NiTi Eğelerden Elde Edilen TiO₂'nin Boya Duyarlı Güneş Pillerinde Kullanımının Araştırılması

Muhammed İhsan ÖZGÜN¹  Ahmet Burçin BATIBAY²  Bayram ÜNAL³ 
Yasin Ramazan EKER⁴  Arslan TERLEMEZ⁵ 

¹ Necmettin Erbakan University Faculty of Engineering, Department of Metallurgy and Material Engineering, Konya, Türkiye, miozgun@erbakan.edu.tr (Sorumlu Yazar/ Corresponding Author)

² Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgy and Material Engineering, Konya, Türkiye

³ İstanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Department of Metallurgy and Material Engineering, İstanbul, Türkiye

⁴ Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Basic Sciences, Konya, Türkiye

⁵ Necmettin Erbakan University, Faculty of Dentistry, Department of Endodontics, Konya, Türkiye

Makale Bilgileri

ÖZ

Makale Geçmişi

Geliş: 02.05.2023

Kabul: 31.05.2023

Yayın: 30.06.2023

Anahtar Kelimeler:

Boya Duyarlı Güneş Pilleri, Endodontik NiTi Eğe, Titanyum oksit, Anataz, Geri kazanılmış atık malzeme.

Artan enerji taleplerin karşılanmasında yenilenebilir enerji türleri açısından popüler olan fotovoltaik teknolojilerde verim artırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Boya duyarlı güneş pilleri yüksek altyapı maliyeti gerektirmeyen yapılar olduğundan, verim artırmaya yönelik çalışmalar boya duyarlı güneş hücreleri (DSSC) üzerine yoğunlaşmıştır. DSSC'de ışığa duyarlı boya, TiO₂ tabakasına tutundurulmaktadır. Bu çalışmada, kullanım ömrünü tamamlamış NiTi alaşımı endodontik eğeler, farklı asitler üzerinden çözeltiye alınıp metalik değerlerine ayrıştırılmıştır. Metalik değerlerden rutil ve anataz fazı tespit edilen TiO₂'nin boya duyarlı güneş hücrelerinde kullanımı amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında atık NiTi eğelerden elde edilen kontamine TiO₂'nin yapısı karakterize edilmiş ve N719 boya çözeltisinin yüzeye tutundurulmasıyla optik özellikleri araştırılmıştır. XRD ve Raman sonuçları farklılık göstermiş, safsızlık piklerin görülmesinde etkin bir parametre olmuştur. FTO (Flor katkılı kalay oksit) kaplı cam yüzeye geri kazanım anataz/rutil TiO₂ tabakası atılmış, yüzeyle görünür bölge spektrumunda belirgin bir etkinlik göstermediği ortaya konulmuştur.

Investigation of the Use of TiO₂ Obtained from Endodontic NiTi Files in Dye-Sensitized Solar Cells

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 02.05.2023

Accepted: 31.05.2023

Published: 30.06.2023

Keywords:

Dye-Sensitized Solar Cells, Endodontic NiTi File, Titanium oxide, Anatase, Recycling waste material.

Renewable energy types, particularly photovoltaic technologies, which are popular in meeting increasing energy demands, are being studied to increase efficiency. Since dye-sensitized solar cells (DSSCs) are structures that do not require high infrastructure costs, studies on improving efficiency have focused on DSSCs. In DSSCs, light-sensitive dye is attached to a TiO₂ layer. In this study, NiTi alloy endodontic files that have reached the end of their useful life were dissolved in different acids and separated into metallic values. The use of TiO₂, in which the rutil and anatase phases were detected from the metallic values, was aimed in dye-sensitized solar cells. The structure of contaminated TiO₂ obtained from waste NiTi files was characterized, and its optical properties were investigated by attaching N719 dye solution to the surface. XRD and Raman results showed differences, and impurity peaks were an effective parameter in the observation of impurities. An anatase/rutile TiO₂ recovery was applied to FTO (Fluorine-doped tin oxide) coated glass surface, and it was revealed that it did not show a significant efficiency in the visible region spectrum.

Atıf/Citation: Özgün, M.İ.; Batıbay, A.B.; Ünal, B.; Eker, Y.R. & Terlemez, A. (2023). Investigation of the use of TiO₂ obtained from endodontic NiTi files in dye-sensitized solar cells, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 1-8.



"This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)"

INTRODUCTION

The need to switch from conventional energy sources to more sustainable and renewable ones is growing as they become less common. The most prevalent and advanced of these sources is the generation of electricity from the sun. Direct conversion of solar energy is possible without a solar tracker mechanism. In addition, problems like noise and environmental pollution are eliminated thanks to solar panels' lack of moving parts. In the modern era, dye-sensitized, Ga-As, Si-based solar cells and perovskite solar cells are the most popular varieties. Dye-sensitized solar cells are appealing because of their minimal infrastructural needs [1–5].

In dye-sensitized solar cells, the anode material is a layer of TiO₂. Titanium dioxide, frequently used in various sectors, from the paint industry to the health sector, from the food industry to the medical industry, is of interest due to its photocatalytic properties [6]. The light-sensitive dye transfers electrons to the conducting component through the TiO₂ layer. However, TiO₂ cannot have its valence electrons activated by visible light since it needs 3.2 eV of energy; hence this layer does not add any electrons to the system. Instead, it is a hole transporter for required electron-hole pairs to form in solar cells [7]. Therefore, the TiO₂ layer utilized as the anode material in solar cells might be chosen during the anatase phase to design a more effective solar cell. TiO₂ has a high photocatalytic activity and electron mobility because it requires a higher energy level than rutile for the excitation of electrons in the valence band from the anatase and rutile phases at room temperature [8,9]. Instead of using pure anatase phase, it was found that nanoparticle mixes with 15-20 wt. % rutile added improved the photocatalytic action. Although the cause of this phenomenon is clarified, it is hypothesized that a reduction in electron transfer at the anatase/rutile contact is to blame [10].

NiTi alloys (NiTi-60) can be recovered using hydrometallurgical techniques over a variety of mineral acids to produce TiO₂ particles (HCl and H₂SO₄ (sample to acid ratio 1:7)) [11]. TiO₂ powders made from waste NiTi alloy files with various acid types were studied for their photocatalytic capabilities and suitability for dye-sensitized solar cells. Recycled TiO₂ powders used in dye-sensitized solar cells were not subjected to intermediate operations like grinding and another heat treatment because they were outside the study's purview.

MATERIALS AND METHODS

The solution obtained from the hydrothermal leaching of NiTi alloy endodontic files recycled for the investigation is shown in Figure 1, together with the TiO₂ powders produced after dehydration at 450°C for 1-2 hours by precipitation around pH 3. In addition, AEROXIDE® TiO₂ P25 brand reference material was obtained from Evonik GMBH. Two different TiO₂ powder groups produced over HCl and H₂SO₄ acidic solutions were characterized, the recovery TiO₂ powder groups and the reference TiO₂ material were compared, and the amount of absorption was tested in the visible spectrum region in a dye-sensitized solar cell.

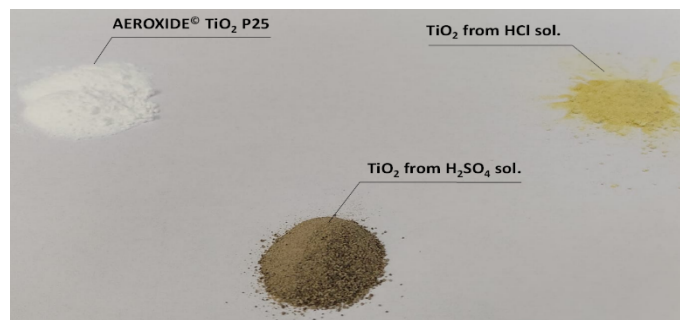


Figure 1. TiO₂ powders used in the production of dye-sensitized solar cells

TiO₂ powders produced from the reference material AEROXIDE® P25 and HCl and H₂SO₄ acid solution were subjected to SEM-EDS analysis (Hitachi - SU 1510), particle size distribution (Cilas 1190),

Confocal Raman analysis (Renishaw inVia Reflex) and XRD analysis (PANalytical EMPYREAN) for crystallographic determination. Following the characterizations, the recycled two TiO₂ powder group was compared to the AEROXIDE® P25 reference material.

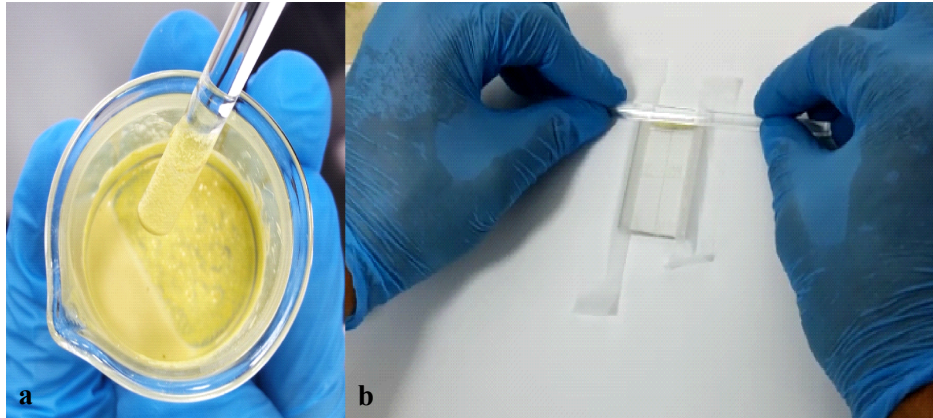


Figure 2. a) Preparation of TiO₂ paste b) Application of TiO₂ paste on FTO glass by doctor blade technique

The obtained TiO₂ powders were mixed with acetic acid, ethanol, and deionized pure water to form a TiO₂ anode layer mortar and mixed with a glass baguette, as shown in Figure 2a, to be dispersed in this mixture for 50 minutes. This mixture added 0.4 mL acetic acid, 2 mL deionized distilled water, and 10 mL ethanol for 2 g TiO₂ powder. Then the slurry mixture was taken into 100 mL ethanol, 5 g terpineol, and 10 g of 10 wt. % ethylene cellulose and ethanol mixture were added to this ethanol medium and stirred for 50 minutes. After this process, an area of 25 mm² was created with the help of 25 μm thickness Scotch tape on FTO (Fluorine doped Tin Oxide) glass samples cleaned in an ultrasonic bath for 10 minutes, and TiO₂ paste prepared by previous processes was applied with the doctor blade technique as shown in Figure 2b. Subsequently, the Scotch tapes were removed, and the FTO glass with the paste applied was dried at 100°C for 1 hour and then sintered at 450°C for 1 hour, and the samples in Figure 3a were produced.

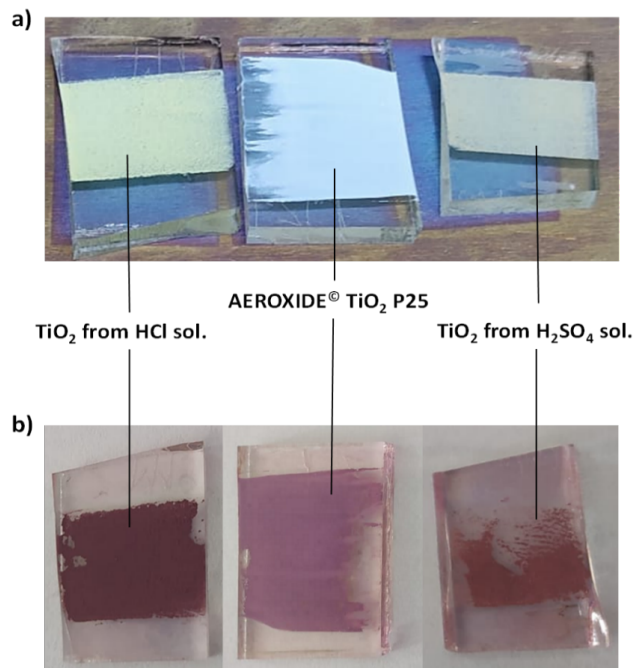


Figure 3. a) Sintered TiO₂ applied FTO glass b) After N 719 dye immersion

The TiO₂ layer applied as an anode material on FTO (fluorine-doped tin oxide) coated glass in solar cell production was immersed in 10⁻³ M N719 (Aldrich) ruthenium-containing dye solution. The absorbance

values in the visible region were analyzed with a UV-Vis-NIR instrument (Shimadzu UV-3600 Plus).

RESULTS

SEM (scanning electron microscopy) was used to analyze microphotographs of TiO_2 particles recovered from HCl and H_2SO_4 acid solutions, and EDS (energy dispersive spectrometry) was used to evaluate the elemental distribution. Figure 4 displays SEM microphotographs, while elemental distribution is given in Figure 5. The SEM picture of the samples applied to and sintered on FTO glass is shown in Figure 6. Commercially used Aeroxide[®] TiO_2 particle morphology is similar to TiO_2 obtained over HCl acid. However, the TiO_2 structure produced over H_2SO_4 exhibits a sharp angular structure.

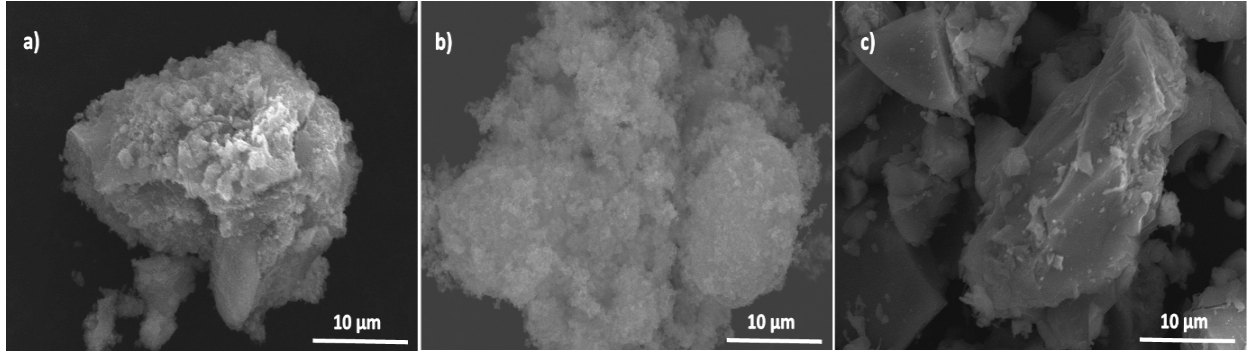


Figure 4. SEM micrograph of powder particles at 3Kx magnification a) TiO_2 powder from HCl solution b) Aeroxide[®] TiO_2 P25 c) TiO_2 powder from H_2SO_4 solution

In the elemental mapping shown in Figure 5, in addition to Ti and O, chlorine and nickel are in Figure 5a, and sulfur and nickel are in Figure 5c because these elements come from the production processes. However, nickel is more abundant in TiO_2 produced by H_2SO_4 acid leaching and less abundant in TiO_2 produced by HCl acid leaching.

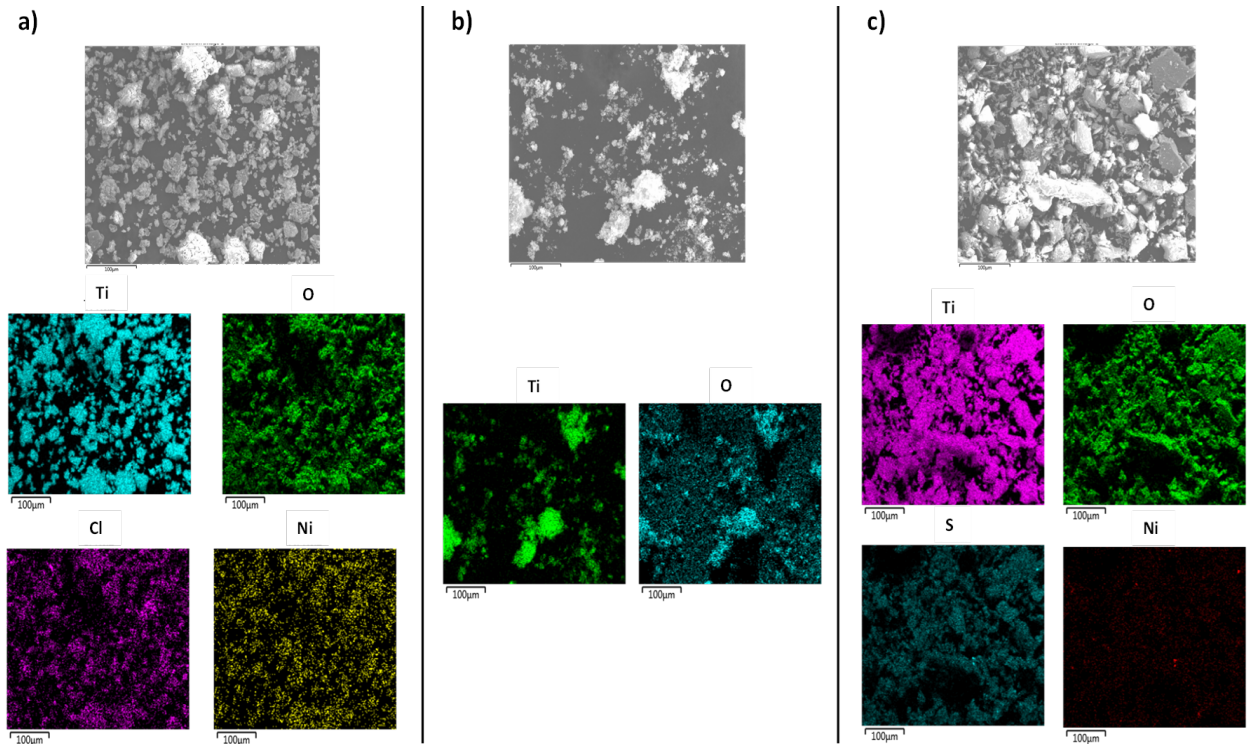


Figure 5. SEM-EDS mapping of powder particles a) TiO_2 powder from HCl solution b) Aeroxide[®] TiO_2 P25 c) TiO_2 powder from H_2SO_4 solution

Figure 6 shows the SEM photographs of TiO_2 powder structures produced by leaching NiTi files at 50x magnification after sintering and before dye immersion after applying TiO_2 powder structures to the

FTO glass surface with the specified procedure. In Figure 6b, the Aeroxide[®] TiO₂ P25 structure has a more integrated morphology with the surface than in Figure 6a and Figure 6b.

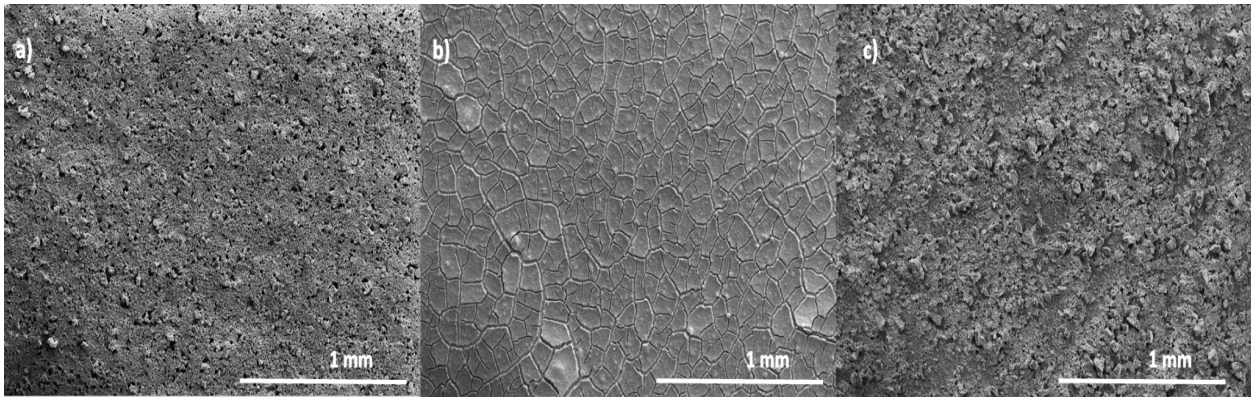


Figure 6. SEM micrograph of samples after sinter process at 50x magnification a) TiO₂ powder from HCl solution b) Aeroxide[®] TiO₂ P25 c) TiO₂ powder from H₂SO₄ solution

Figure 7 shows the results of Raman analysis of Aeroxide[®] TiO₂ P25 used as a reference and TiO₂ powders produced on HCl and H₂SO₄ acids. In these analysis results, Raman spectra were obtained for the vibrational modes of bonds at the molecular level. Raman analysis was performed at 785 nm, 100% power for 250 repetitions. The TiO₂ structures formed by the leaching of Aeroxide TiO₂ P25 and H₂SO₄ are anatase-dominated, while the TiO₂ structure produced by the leaching of HCl is in the rutile phase, as can be seen when the Raman shifts shown in Figure 7 are studied. In his research, Tichel observed that the Raman spectrum may exhibit shifts based on the impurities present in the material. The bands observed at 143, 197, 397, 516, and 638 cm⁻¹ are consistent with those expected for anatase TiO₂. However, the presence of bands at 241, 445, and 610 cm⁻¹, which correspond to the reference rutile phase, indicates that the sample is not solely composed of either anatase or rutile. Specifically, he noted that commercial TiO₂ tends to have a smaller crystallite size and is purer, while TiO₂ with impurities tends to have a larger crystallite size [12].

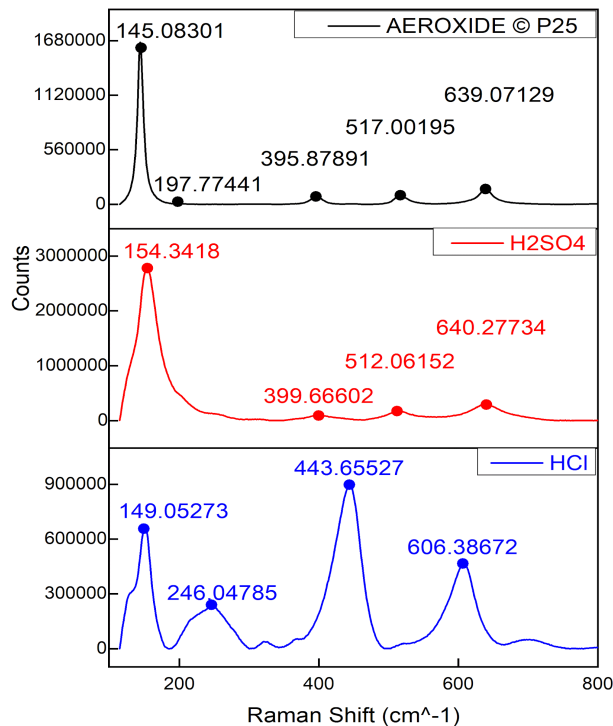


Figure 7. Raman spectrum of powder particles

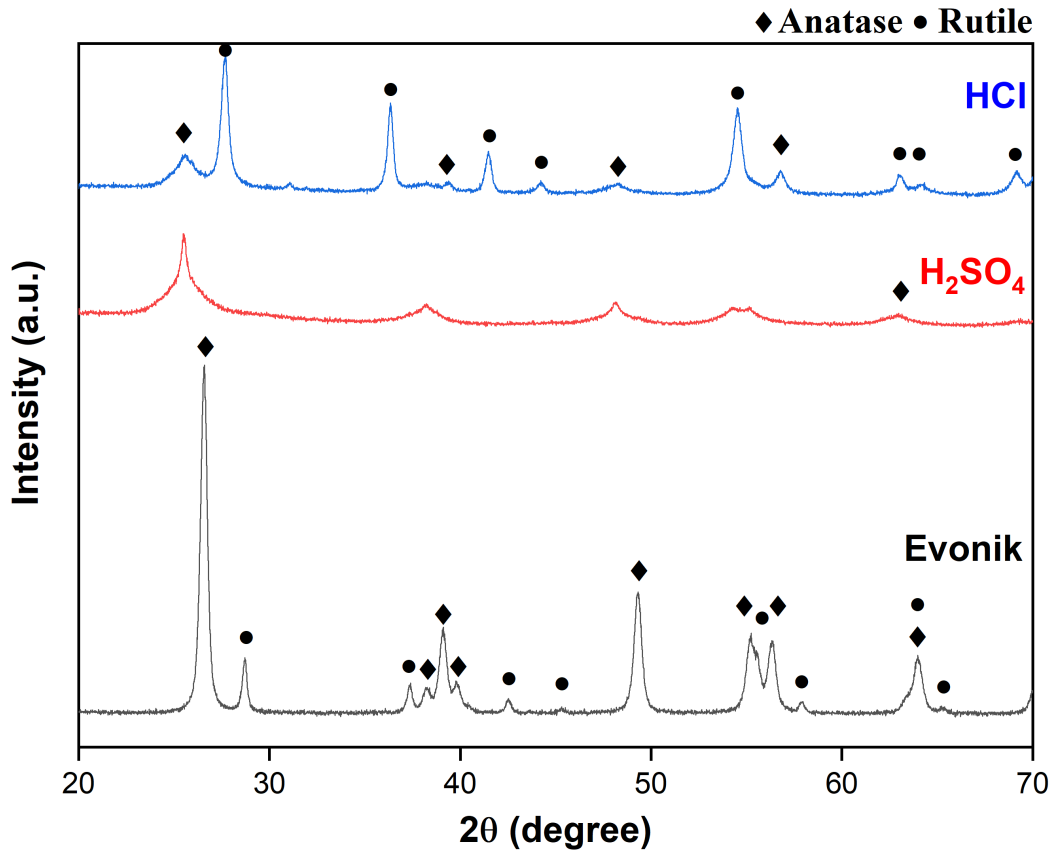


Figure 8. XRD analysis of powder particles

XRD analysis results are given in Figure 8. It is supported by the literature that the Raman spectra given in Figure 7 are compatible with the XRD patterns shown in Figure 8. X-ray diffraction (XRD) analyses were conducted using a copper (Cu) $K\alpha$ tube with a step size of 0.013, within range of 20 to 70 degrees. The phases of TiO_2 used in the anode material of the dye-sensitized solar cell were determined. The XRD patterns provide peaks on the anatase and rutile phases of TiO_2 [13]. The XRD findings indicate that the peaks have shifted, which can be attributed to the presence of impurities within the structure.

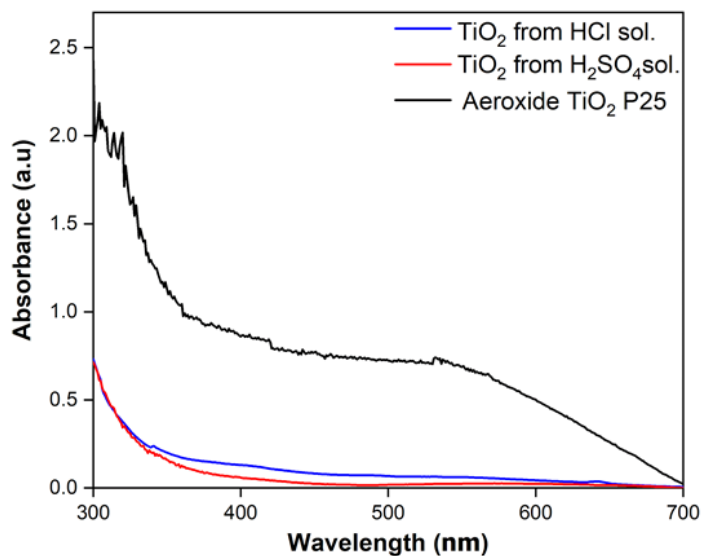


Figure 9. Uv-Vis-NIR analysis of powder particles

Following the application of N719 dye, the anode material samples used to construct solar cells were tested in the visible region of the spectrum in Figure 9. TiO_2 -coated FTO samples were subjected to

measurements. Examining the test findings reveals that commercially available Aeroxide[®] TiO₂ P25 produced absorbance in the visible spectrum (380–700 nm). On the other hand, no absorbance was present in this location in TiO₂ powder samples produced via H₂SO₄ and HCl acids.

Table 1 shows the particle size analysis results of TiO₂ powders used to produce anode material for dye-sensitized solar cells. When the results are examined, it is seen that the particle sizes are slightly larger than the literature values for Aeroxide[®] TiO₂ P25 reference material [14]. The reason for this may be the need for sufficient dispersion.

Table 1. Particle Size distribution of powder particles

<i>Materials</i>	<i>Total Particle Size (μM)</i>			
	D (10%)	D (50%)	D (90%)	Mean D
Aeroxide [®] TiO ₂ P25	4.19	21.41	53.21	25.58
TiO ₂ from H ₂ SO ₄ solution	12.02	39.75	144.47	65.99
TiO ₂ from HCl solution	8.60	36.09	75.47	57.88

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The TiO₂ powders produced over HCl and H₂SO₄ did not give a satisfactory result compared to the commercially used Aeroxide[®] TiO₂ P25 material. The material used in dye-sensitized solar cells should contain rutile and anatase phases, and the particle size should be small enough and excited by the visible spectrum (380-700 nm) [10,12–14]. The rutile and anatase phases in the materials obtained over HCl and H₂SO₄ acids were not as crystalline as the reference material compared to the commercial Aeroxide[®] TiO₂ P25 in XRD analysis. This is thought to be due to the lack of crystal structure, large surface area, and fast electron transport capability with appropriate electronic configuration, as mentioned in the literature. In the materials obtained over HCl and H₂SO₄ acids, contaminations from production (S, Cl, Ni) reduced electron transport [15].

TiO₂ powders obtained from the study should be produced under optimum conditions using dye-sensitized solar cell anode material. These conditions should be investigated with the support of literature studies. TiO₂ powder production parameters should be determined by examining the properties of the reference material in detail. In this context, grinding, washing with pure water, desulfurization (for sulfur contamination), and dechlorination (for chlorine contamination) of the materials obtained from HCl and H₂SO₄ acids should be performed. In the production of powder materials obtained from HCl and H₂SO₄ acids, intermediate processes are required due to contamination.

Acknowledgements

The authors would like to thank Assoc. Prof. Dr. Seçkin Akin, Dr. Erdi Akman, and Muhittin Ünal for their technical support.

The authors would like to thank EVONIK Corporation for providing the study's reference material (Aeroxide[®] TiO₂ P25).

Funding

This study was supported by Necmettin Erbakan University Scientific Research Projects Unit under the project number 201224004.

REFERENCES

- [1] R.T. Chen, C.F. Liao, Evaluation and optimization to recycle used TiO₂ photoelectrode for dye-sensitized solar cells, *International Journal of Photoenergy*. 2014 (2014). doi:10.1155/2014/650945.
- [2] S. Akin, E. Erol, S. Sonmezoglu, Enhancing the electron transfer and band potential tuning with

- long-term stability of ZnO based dye-sensitized solar cells by gallium and tellurium as dual-doping, *Electrochimica Acta*. 225 (2017) 243–254. doi:10.1016/j.electacta.2016.12.122.
- [3] T. Ozturk, B. Gulveren, M. Gulen, E. Akman, S. Sonmezoglu, An insight into titania nanopowders modifying with manganese ions: A promising route for highly efficient and stable photoelectrochemical solar cells, *Solar Energy*. 157 (2017) 47–57. doi:10.1016/j.solener.2017.08.010.
- [4] J. Wang, Comparison of development prospects between silicon solar cells and perovskite solar cells, *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 27 (2022) 512–518.
- [5] D. Yang, R. Yang, S. Priya, S. Liu, Recent advances in flexible perovskite solar cells: fabrication and applications, *Angewandte Chemie International Edition*. 58 (2019) 4466–4483.
- [6] H. Tsuji, T. Sagimori, K. Kurita, Y. Gotoh, J. Ishikawa, Surface modification of TiO₂ (rutile) by metal negative ion implantation for improving catalytic properties, *Surface and Coatings Technology*. 158 (2002) 208–213. doi:10.1016/S0257-8972(02)00209-8.
- [7] R. Sastrawan, Photovoltaic Modules of Dye Solar Cells, Albert-Ludwigs University of Freiburg, 2006.
- [8] L. Kavan, M. Grätzel, S.E. Gilbert, C. Klemenz, H.J. Scheel, Electrochemical and photoelectrochemical investigation of single-crystal anatase, *Journal of the American Chemical Society*. 118 (1996) 6716–6723. doi:10.1021/ja954172l.
- [9] T. Sumita, T. Yamaki, S. Yamamoto, A. Miyashita, Photo-induced surface charge separation of highly oriented TiO₂ anatase and rutile thin films, *Applied Surface Science*. 200 (2002) 21–26. doi:10.1016/S0169-4332(02)00614-1.
- [10] R.R. Guimarães, A.L.A. Parussulo, H.E. Toma, K. Araki, Enlightening the synergic effect of anatase/rutile mixtures in solar cells, *Electrochimica Acta*. 188 (2016) 523–528. doi:10.1016/j.electacta.2015.12.040.
- [11] M.İ. Özgün, A. Terlemez, M.E. Acma, Y.R. Eker, A.B. Batibay, Recovering of disposed nickel – Titanium rotary endodontic files via sulfuric acid leaching treatments, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*. 8 (2021) 1–10. doi:10.31202/ecjse.741512.
- [12] D. Tuschel, Raman spectroscopy and polymorphism, *Spectroscopy*. 34 (2019) 10–21.
- [13] J. Wang, J. Yu, X. Zhu, X.Z. Kong, Preparation of hollow TiO₂ nanoparticles through TiO₂ deposition on polystyrene latex particles and characterizations of their structure and photocatalytic activity, *Nanoscale Research Letters*. 7 (2012) 1–8. doi:10.1186/1556-276X-7-646.
- [14] T. MacÉ, S. Vaslin-Reimann, P. Ausset, M. Maillé, Characterization of manufactured TiO₂ nanoparticles, *Journal of Physics: Conference Series*. 429 (2013). doi:10.1088/1742-6596/429/1/012012.
- [15] J. Jia, L. Mu, Y. Lin, X. Zhou, Electrochimica Acta Rutile versus anatase for quantum dot sensitized solar cell, *Electrochimica Acta*. 266 (2018) 103–109. doi:10.1016/j.electacta.2018.01.186.

Cebirsel Bir Grafın Harary İndeksi

Nihat AKGÜNEŞ¹  Büşra AYDIN² 

¹ Necmettin Erbakan University, Faculty of Science, Department of Mathematics and Computer Science, Konya, Türkiye, nakgunes@erbakan.edu.tr (Sorumlu Yazar/ Corresponding Author)

² Necmettin Erbakan University, Institute of Science, Department of Mathematics, Konya, Türkiye,

Makale Bilgileri

ÖZ

Makale Geçmişi

Geliş: 31.05.2023

Kabul: 21.06.2023

Yayın: 30.06.2023

Anahtar Kelimeler:

Graf teori, Harary indeks, Nokta çarpım grafi, Topolojik indeks.

Topolojik indekslerin matematiksel kimyada kullanım alanı bulunmaktadır. Uzaklık-bazlı topolojik indekslerin ise moleküler graf teoride oldukça önemi vardır. Harary indeksi uzaklık-bazlı bir graf değişmezidir. Yakın zamanda cebirsel bir yapı üzerinde nokta çarpım grafi çalışıldı. Bu çalışmada da bu grafın Harary indeksi verilecektir.

Harary Index for an Algebraic Graph

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 31.05.2023

Accepted: 21.06.2023

Published: 30.06.2023

Keywords:

Dot product graph,
Graph theory,
Harary index,
Topological index.

Topological indices are used in mathematical chemistry. Distance-based topological indices have a great interest in molecular graph theory. Harary index is one of the distance-based graph invariant. Recently, a dot product graph for an algebraic structure has been studied. In this study, the Harary index of this graph will be given.

Atf/Citation: Akgüneş, N. & Aydın, B. (2023). Cebirsel bir grafın harary indeksi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 9-13.



"This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). (CC BY-NC 4.0)"

INTRODUCTION AND PRELIMINARIES

Graph and Ring Theory connection was constituted by Beck, in 1988 [1]. Graphs for zero-divisors of algebraic structures have been studied in [2] and [3]. Also dot product graphs for rings, commutative, has been studied by Badawi in [4]. Then this graph for monogenic semigroups has been defined in [5] and [6]. Also, some products of this graphs have been studied in [7] and [8].

The basic definitions are given in (Harary [9], Bondy and Murty [10]). For any simple-connected graph G , the vertex set is symbolized by $V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$. Then elements of edge set $E(G)$ are unordered pairs of adjacent vertices. The order of a graph is the number of vertices $|V| = n$. Then the size of a graph is the number of edges $|E| = m$. Then the distance of two vertices u and v in $V(G)$ is defined as length of shortest path between vertices u and v . The distance the vertices u and v is denoted by $d(u, v)$. The degree of any vertex v in $V(G)$ is the number of edges incident of v . The degree is symbolized by $deg(v)$.

Definition 1. [5] The finite multiplicative semigroup $S_M^n = \{0, x, x^2, \dots, x^n\}$ and its undirected zero-divisor graph $\Gamma(S_M^n)$. The vertex set of $\Gamma(S_M^n)$ is the non-zero elements of monogenic semigroup S_M^n and the edge set is pair of vertices which are provide the rule $x^i \cdot x^j = 0_{S_M^n}$ for $i, j \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ where $x^0 = 0_{S_M^n}$.

Also the dot product graph over monogenic semigroups for finite times is given in [6].

Definition 2. A cartesian product of monogenic semigroup for k times $S = S_M^n \times S_M^n \times \dots \times S_M^n$. The undirected graph of S is $\Gamma(S)$ and the vertex set of $\Gamma(S)$ is consist of non-zero elements of S .

Some parameters of these graphs have been obtained in a lot of research. Further some topological indices over these graphs have been obtained in [11] and [12].

The topological index is a graph invariant-used to characterize the properties of molecular graphs. Molecules are represented by graphs with atoms by vertices and bonds by edges. Topological indices have wide application in chemical graph theory (for example [13]). The Harary index is a distance-based topological index. Harary index has been introduced to characterize the molecular graphs ([14]).

Definition 3. For a graph G , Harary index is obtained as the sum of the reciprocals of distances between all pairs of vertices.

$$H(G) = \sum_{\{u,v\} \in V(G)} \frac{1}{d(u,v)}$$

Harary index, one of the popular distance-based topological index, has been extensively researched [15-17].

Bounds for Harary index depend on the order of graph.

Lemma 4. [18] Let G be a graph with order $n \geq 2$ then

$$1 + n \sum_{k=2}^{n-1} \frac{1}{k} \leq H(G) \leq \frac{n(n-1)}{2}$$

With lower inequality holds iff $G \cong P_n$ and upper inequality holds iff $G \cong K_n$.

MAIN RESULTS

There is a good relations with many physico-chemical properties of molecules and their graphs. Topological indices of graphs are divided into three as distance, degree and eccentric. The Harary index is a distance-based topological index.

Let give the diameter of any dot product graph over monogenic semigroup.

Lemma 5. [5] Let S be cartesian product as Definition 2. Then diameter of $\Gamma(S)$ is equal to

$$diam(\Gamma(S)) = 2$$

We defined dot product of monogenic semigroup finitely k times, above. Now, it will be continued for $k = 2$.

Let $S_M^n = \{x, x^2, \dots, x^n\}$ be a monogenic semigroup for $n \in \mathbb{N}^+$. Then $\Gamma(S)$ be the dot product graph for 2 times of S_M^n monogenic semigroup. It is known that vertices of $\Gamma(S)$ are non-zero elements of S .

The Harary index for dot product graph, it is known that the distances of any two vertices in the vertex set of the dot product graph. Topological index are very important for graph theory and topology [19]. The Wiener index is a distance-based topological index, too.

Theorem 6. Let $\Gamma(S)$ be an algebraic structure graph then Harary index is

$$H(\Gamma(S)) = \frac{1}{4} \left[\left((n+1)^2 - 1 - \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor^2 - 2 \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \right) + \sum_{t=0}^{n-1} [n + (n+1)(n-t)] \right. \\ \left. + \sum_{k=0}^{n-1} [n + (n+1)(n-k)] + \sum_{k,t=0}^{n-1} [2n - k - t + (n-k)(n-t)] \right]$$

Where $S = S_M^n \times S_M^n$ and S_M^n be a monogenic semigroup of order n .

Proof: Let u and v be any two vertices of $\Gamma(S)$ then $d(u, v) \leq 2$ since Lemma 5. So for any two vertices distance is equal to 1 or 2. Then the vertex set of $\Gamma(S)$ can be written by separating into two disjoint sets as

$$V_1 = \{u_1 : d(u_1, u_2) = 1, u_1, u_2 \in \Gamma(S)\}$$

And

$$V_2 = \{u_1 : d(u_1, u_2) = 2, u_1, u_2 \in \Gamma(S)\}$$

So, the Harary index of the dot product graph $\Gamma(S)$ be

$$H(\Gamma(S)) = \frac{1}{2} \sum_{u \in V(\Gamma(S))} [1 \cdot |V_1| + \frac{1}{2} \cdot |V_2|]$$

Since all pairs of vertices are counted twice and $d(u, v) = d(v, u)$.

It is known that $|V| = |V_1| + |V_2|$ then the Harary index is in the form

$$H(\Gamma(S)) = \frac{1}{2} \sum_{u \in V(\Gamma(S))} \left[|V_1| + \frac{1}{2} \cdot (|V| - |V_1|) \right] = \frac{1}{4} \sum_{u \in V(\Gamma(S))} [|V| + |V_1|]$$

Let determine the set of the adjacent vertices since the elements of set V_1 becomes vertices of distances $1n$.

Let any two no-zero elements of S $X = (x^{i_1}, x^{i_2})$ and $Y = (x^{j_1}, x^{j_2})$ for $i_1, i_2, j_1, j_2 \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ where $x^{i_t} = 0_{S_M^n}$ if and only if $i_t = 0$.

Then $\Gamma(S)$ is defined as the vertices are $X, Y \in S^* = S \setminus \{0_S\}$ such that they are adjacent vertices if and only if $X.Y = (x^{i_1}, x^{i_2}).(x^{j_1}, x^{j_2}) = x^{i_1}.x^{j_1} + x^{i_2}.x^{j_2} = x^{i_1+j_1} + x^{i_2+j_2} = 0_{S_M^n}$ then $X \sim Y$ shorthand for two adjacent vertices.

Any vertex in the vertex set of $V(\Gamma(S))$ can be written $(x^{n-k}, x^{n-t}) \in \Gamma(S)$ for $k, t \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$, here we assumed that $x^0 = 0_{S_M^n}$. Then we can separate three cases for k is equal to n or t is equal to n or $k, t \in \{0, 1, 2, \dots, n - 1\}$.

First case: If k is equal to n then the vertex $(x^{n-k}, x^{n-t}) = (0, x^{n-t})$. If any $(x^a, x^b) \in V(\Gamma(S))$ is adjacent to $(0, x^{n-t})$ then $n - t + b = 0$. Hence $n - t + b > n$ or $b = 0_{S_M^n}$. Consequently there are $(n - t)(n + 1) + n$ vertices are adjacent to the vertex $(0, x^{n-t})$.

Second case: If t is equal to n then the vertex $(x^{n-k}, x^{n-t}) = (x^{n-k}, 0)$. If any $(x^c, x^d) \in V(\Gamma(S))$ is adjacent to $(x^{n-k}, 0)$ then $n - k + c > n$ or $d = 0_{S_M^n}$. Similar way to first case there are $(n - k)(n + 1) + n$ vertices are adjacent to the vertex $(x^{n-k}, 0)$.

Last case: If $k, t \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ then the vertex (x^{n-k}, x^{n-t}) is adjacent to any vertex $(x^e, x^f) \in V(\Gamma(S))$ then $n - k + e > n$ or $e = 0_{S_M^n}$ and $n - t + f > n$ or $f = 0_{S_M^n}$. So there are $(n - k)(n - t) + 2n - k - t$ vertices are adjacent to the vertex (x^{n-k}, x^{n-t}) for $k, t \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$.

However; in above cases, the vertices which are adjacent to themselves are counted. It should be subtracted from Harary index. So $(n - \lfloor \frac{n}{2} \rfloor)^2 + 2(n - \lfloor \frac{n}{2} \rfloor)$ vertices adjacent to each other.

Consequently

$$\begin{aligned}
 H(\Gamma(S)) &= \frac{1}{4} \sum_{u \in V(\Gamma(S))} [|V| + |V_1|] \\
 &= \frac{1}{4} \left[(n + 1)^2 - 1 - \lfloor \frac{n}{2} \rfloor^2 - 2 \lfloor \frac{n}{2} \rfloor \right] + \sum_{t=0}^{n-1} [(n - t)(n + 1) + n] \\
 &\quad + \sum_{k=0}^{n-1} [(n - k)(n + 1) + n] + \sum_{k,t=0}^{n-1} [(n - k)(n - t) + 2n - k - t]
 \end{aligned}$$

is obtained.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

By applying a distance-based topological index on a product graph, we obtained the Harary index of the dot product graph over monogenic semigroup. Also other topological indices can be studied on some product graphs.

REFERENCES

- [1] I. Beck, Coloring of Commutating Ring, *Journal of Algebra*, 116 (1988), 208-226.
- [2] D. F. Anderson, P. S. Livingston, The Zero-Divisor Graph of a Commutative Ring, *Journal of Algebra*, 217 (1999), 434-447.
- [3] F. R. De Meyer, L. De Meyer, Zero-Divisor Graphs of Semigroups, *Journal of Algebra*, 283 (2005), 190- 198.
- [4] A. Badawi, On the Dot Product Graph of a Commutative Ring, *Communications in Algebra*, 43 (2015), 43-50.
- [5] K. C. Das, N. Akgüneş, A. S. Çevik, On a Graph of Monogenic Semigroups, *Journal of Inequalities and Applications*, 2013:44 (2013).
- [6] N. Akgüneş, B. Çağan, On the Dot Product of Graphs Over Monogenic Semigroups, *Applied Mathematics and Computation*, 322 (2018), 1-5.
- [7] Y. Nacaroğlu, On the corona product of monogenic semigroup graphs, *Adv. and Appl. in Discrete Math.*, 19(2018) 409-420.
- [8] Y. Nacaroğlu, On Join Operation of Graphs by Obtained Monogenic Semigroups, *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, 13(1)(2021) 57-62.
- [9] F. Harary, Graph Theory, *Addison Wesley, Reading, Mass.*, 1969.
- [10] G. A. Bondy, U. S. R. Murty, Graph Teory with Applications, *Elsevier Science, New York, NY, USA*,

(1982).

- [11] N. Akgüneş, K. C. Das, A. S. Çevik, Topological indices on a graph of monogenic semigroups, *Topics in Chemical Graph Theory*, 16 (2014), 3-20.
- [12] B. Aydın, N. Akgüneş, İ. N. Cangül, On the Wiener index of the dot product graph over monogenic semigroups, *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol.13 No.5 (2020), 1231-1240.
- [13] I. Gutman, O. Polansky, *Mathematical Concepts in Organic Chemistry*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, (1986).
- [14] D. Plavšić, S. Nikolić, N. Trinajstić, Z. Mihalić, On the Harary index for the characterization of chemical graphs, *Journal of Mathematical Chemistry*, 12 (1993), 235–250.
- [15] K. C. Das, K. Xu, I. N. Cangül, A. S. Çevik, A. Graovac, On the Harary index of graph operations, *Journal of Inequalities and Applications*, vol. 339 (2013).
- [16] K. Xu, K. C. Das, On harary index of graphs, *Discrete Applied Mathematics*, vol. 159 no. 15 (2011), 1631–1640.
- [17] B. H. Xing, G. D. Yu, L. X. Wang, J. Cao, The Harary index of all unicyclic graphs with given diameter, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, (2018).
- [18] B. Zhou, X. Cai, N. Trinajstić, On Harary Index, *Journal of Mathematical Chemistry*, 44 (2008), 611-618.
- [19] S. Pak , Ö. Gürmen Alansal ve U. Cesur , "Pseudo 2- Çaprazlanmış Modüller ve Pseudo 3- Çaprazlanmış Modüller", Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2(2), (2020), 22-37.

GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou GNSS Sistemlerinin 1. ve 2. Temel Frekanslarının Doluluk Analizi

Sermet ÖĞÜTCÜ¹  Behlül Numan ÖZDEMİR²  Salih ALÇAY³  İlkey BUĞDAYCI⁴ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

² Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, salcay@erbakan.edu.tr (Sorumlu Yazar/ Corresponding Author)

⁴ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgileri

ÖZ

Makale Geçmişi
Geliş: 30.05.2023
Kabul: 21.06.2023
Yayın: 30.06.2023

Anahtar Kelimeler:
Beidou, Galileo,
GLONASS, GPS.

Günümüzde tam kapasite ile konum belirleme hizmeti sunan dört Küresel Konum Belirleme Sistemi (GNSS) bulunmaktadır. Bunlar GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou' dur. GPS ve GLONASS uzun yıllardır hizmet verirken, Galileo ve BeiDou son yıllarda dahil olmuştur. Bu çalışmada bu dört GNSS sisteminin 1. ve 2. temel frekanslarının doluluk durumu incelenmiştir. Bu amaçla 05.06.2023 tarihine ait 322 IGS-MGEX istasyonlarına ait (bu tarih için igs.ign.fr adresindeki bütün IGS istasyonları) veriler dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre GPS frekans doluluk oranlarının diğer uydu sistemlerine göre bir miktar daha iyi olduğu, doluluk oranlarının %96'nın üzerinde olduğu görülmüştür. Diğer uydu sistemlerinde de doluluk oranları GLONASS ikinci frekans hariç %94'ün üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Availability Analysis of 1st and 2nd Fundamental Frequencies of GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou GNSS Systems

Article Info

ABSTRACT

Article History
Received: 30.05.2023
Accepted: 21.06.2023
Published: 30.06.2023

Keywords: Beidou, Galileo, GLONASS, GPS.

Today, there are four global positioning systems (GNSS) that provide positioning with full capacity. These are GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. While GPS and GLONASS provide positioning for many years, Galileo and BeiDou have been involved in recent years. In this study, the availability status of the 1st and 2nd fundamental frequencies of these four GNSS systems was investigated. For this purpose, the data of 322 IGS stations dated 05.06.2023 (all IGS stations for this date at igs.ign.fr) were taken into account. According to the results, it was seen that the GPS frequency availability rates were slightly better than other satellite systems, and the availability rates were above 96%. It has been determined that the availability rates in other satellite systems are above 94% except for the GLONASS second frequency.

Atıf/Citation: Öğütçü, S.; Özdemir, B.N.; Alçay, S. & Buğdaycı, İ. (2023). GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou GNSS Sistemlerinin 1. ve 2. Temel Frekanslarının Doluluk Analizi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 14-22.



"This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)"

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel Konum Belirleme Sistemleri (GNSS) son yıllarda yüksek doğruluk gerektiren birçok konum belirleme uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar arasında haritacılık faaliyetleri açısından deformasyon izleme [1], kadastral ölçmeler [2,3], imar uygulamaları, sayısal arazi modellerinin oluşturulması sayılabilir. Haritacılık uygulamalarında son yıllarda insansız hava araçları [4] ve uzaktan algılama teknikleri [5] daha aktif olarak kullanılsa da GNSS tekniği de yaygın olarak tercih edilmektedir.

GNSS ifadesi Global Positioning System (GPS) ve Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) ile ortaya çıkmış ve bu iki sistemin performans analizi üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir [6-12]. 2018 yılında Galileo'nun [13] ve 2020 yılında ise BeiDou'nun [14] tam kapasiteye ulaşması ile birlikte dört uydu sistemi küresel konumlama hizmeti vermektedir. Sistemlerin performans analizi üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir [15-23].

Küresel uydu sistemlerinin sayısının artması ile birlikte kullanılan sinyal frekansları da artmıştır. GPS L1C/A, L1C, L2C, L2P ve L5; GLONASS L1C/A, L2C, L2P ve L3OC sinyallerini kullanırken, Galileo E1, E5a, E5b, E5AltBOC ve E6; BeiDou ise B1I, B2I, B3I, B1C, B2a ve B2b sinyallerini kullanmaktadır. Tüm bu sinyaller ilgili uydulardan yayınlanmasına rağmen GNSS alıcılarının da tüm bu sinyalleri alabilecek özellikte olması International GNSS Service-Multi-GNSS Experiment (IGS-MGEX) ile yapılacak çözümleme açısından önemlidir. Ayrıca GNSS alıcıları bu sinyalleri alabilme özelliğine sahip olsa bile hangi seviyede alabildikleri önemlidir. Bu durum özellikle çift frekans faz ve kod ölçümleri kullanılarak yapılan hassas nokta konum belirleme (PPP) ve hassas görelî konum belirleme değerlendirme işlemlerinde önem kazanmaktadır. Çift frekans kullanılarak yapılan jeodezik amaçlı konum belirleme işlemlerinde, ilgili epoka ait her iki frekanstaki faz ve kod ölçümlerine ihtiyaç vardır. GNSS alıcılarına ait bazı donanımsal ve yazılımsal kısıtlamalar nedeni ile faz ve kod verileri bazı epoklar için boş gelebilmektedir [24]. Bu durum, ilgili epokta çözüm yapılamamasına veya dengeleminin serbestlik derecesinin düşmesine yol açabilir, çünkü kullanılan uydu sayısı düşmektedir. Bu durum, özellikle kısıtlı uydu görünürlüğünde yapılan ölçümleri daha kötü şekilde etkilemektedir. Görelî konum belirleme işlemlerinde sabit ve gezici için ortak epoklardaki veriler işlendiği için, her iki alıcı için de bu durum önem arz etmektedir.

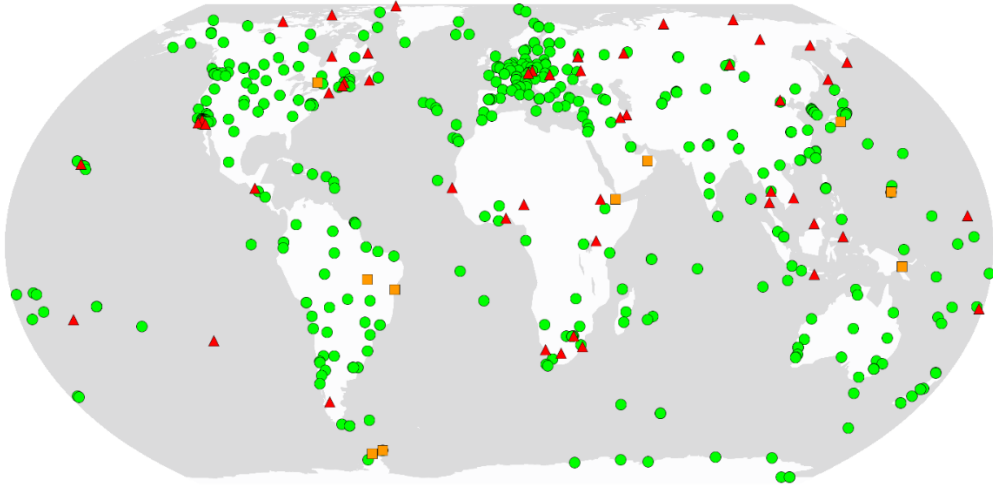
Bu çalışma kapsamında multi-GNSS istasyonlarında yaygın olarak kullanılan sinyal frekansları dikkate alınmıştır: GPS (C1C C2W L1C L2W), GLONASS (C1C L1C C2P L2P), Galileo (C1C L1C C5Q L5Q) ve Beidou (C2I L2I C6I L6I). Bu sinyal kanallarının seçilmesindeki en önemli durum, analiz merkezlerinin birçoğunun uydu yörünge ve saat ürünlerini üretmek için kullandığı sinyal kanalları olması [25-27] ve çoğu IGS-MGEX alıcılarında bu sinyallerin mevcut olmasıdır. Bunun haricinde PPP tekniği ile faz başlangıç belirsizliği çözünürlüğü için, analiz merkezlerinin üretmiş olduğu BIAS SINEX [28] dosyalarının genellikle bu sinyal kanalları için üretiliyor olması (GLONASS hariç) da bu sinyal kanallarının tercih edilmesinde önemli bir rol oynamıştır.

IGS'in ağına dahil olan istasyonların RINEX verileri için belirli frekanstaki faz ve kod ölçümlerinin doluluk analizi ile ilgili herhangi bir bilgi verilmemektedir. Ancak, epok doluluk oranı hakkında bilgi Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) servisinin yayınlamış olduğu istasyon bazındaki verilere <http://sopac-old.ucsd.edu/dataBrowser.shtml> bu adresten ulaşılabilir. Burada, seçilen istasyona ait olması gereken epok sayısı ile alıcının kaydetmiş olduğu epok sayıları oranlanarak kullanıcılara % olarak verilmektedir. IGS'in sitesinde ise (<https://network.igs.org/>) seçilen istasyonların faz ve kod frekanslarındaki olması gereken sayı ile alıcının kaydetmiş olduğu frekans sayıları ayrı ayrı görüntülenebilmektedir (örneğin ABPO istasyonu için 05/06/2023 tarihinde GPS uyduları için beklenen 35818, alıcının kaydettiği 31285). Ancak bu sitelerdeki bilgilerden, frekans bazında bir tarama yapılamamaktadır.

MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHODS)

İstasyonların RINEX 3.xx verileri igs.ign.fr adresinden 2023/06/05 tarihi için indirilmiştir. Bu tarih

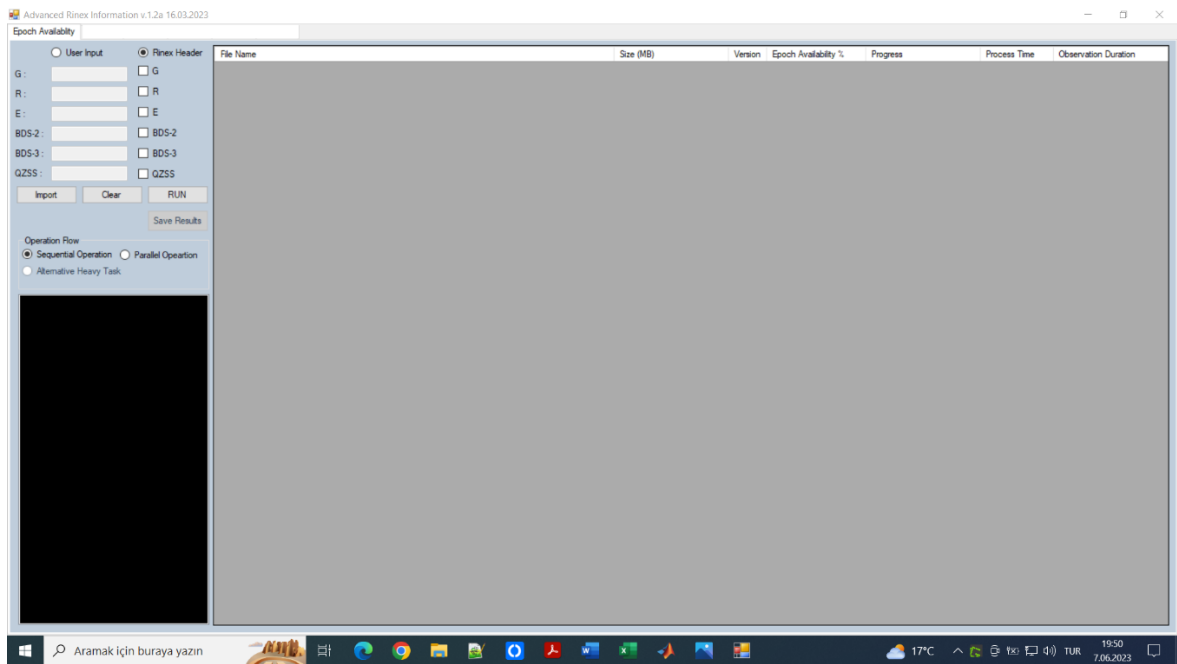
için igs.ign.fr adresinde bulunan 322 adet istasyona ait RINEX verisi indirilmiştir. İndirilen RINEX verilerinin hepsi 24 saatlik olup 30-s gözlem aralığındadır. Bu istasyonların haritası Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Seçilen IGS-MGEX istasyonlarının yeri

Kırmızı üçgen ve turuncu kare ile gösterilen istasyonların RINEX verileri 2023/06/05 tarihi için ve bundan önceki tarihler için mevcut değildir, dolayısı ile bu istasyonlar çalışma kapsamında hariç tutulmak zorunda kalmıştır. Ayrıca yeşil olarak gösterilen istasyonların bazılarının da RINEX verileri IGS ağının ftp adresinde (igs.ign.fr) mevcut değildir, dolayısı ile bu istasyonlar da hariç tutulmuştur.

Seçilen IGS-MGEX istasyonlarının RINEX verisi C# yazılımı kullanılarak üretilen bir yazılım aracılığı ile okutulup 1. ve 2. temel kod ve faz frekanslarının (GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou için sırasıyla, C1C/C2W/L1C/L2W, C1C/C2P/L1C/L2P, C1C/C5Q/L1C/L5Q, ve C2I/C6I/L2I/L6I) doluluk oranları GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uyduları için hesaplanmıştır. BeiDou uyduları için seçilen C2I L2I C6I L6I faz ve kod sinyal kanalları hem BDS-2 hem de BDS-3 uyduları için ortak sinyal kanallarıdır. Frekans isimlendirmesinde C kod ölçümlerini, L faz ölçümlerini ifade etmektedir. Frekans isimlendirmesinin detayı hakkında okuyucular [29] ilgili referansı inceleyebilirler. Yazılımın arayüzü Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Yazılımın arayüzü

Yazılımın arayüzü oldukça sade tutulmuştur. Kullanıcı için iki opsiyon geçerlidir. Birinci opsiyon seçilen RINEX dosyalarındaki header kısmındaki bütün sinyal kodlarının seçilip bunların doluluk analizlerinin yapılmasıdır. İkinci opsiyon ise, kullanıcının kendi girdiği sinyal kodlarına göre yazılım RINEX dosyalarının içinden bu sinyal kodlarına ait doluluk analizi yapmasıdır. Bu çalışmada yukarıda belirtilen sinyal kodları yazılıma girilerek, seçilen sinyal kodlarının doluluk analizi yapılmıştır. Yüksek örneklem aralığında olan RINEX dosyaları için (1Hz veya daha yüksek) ve/veya çok sayıda seçilen RINEX dosyalarının işlem hızını artırmak için yazılıma multi-threading özelliği dahil edilmiştir. Kullanıcı tek çekirdek (Sequential) veya multi-threading (parallel) seçeneklerinden birini seçerek işlemini gerçekleştirmektedir.

GNSS uydu frekans doluluk oranları yazılım tarafından şu şekilde hesaplanmaktadır. Öncelikle, GPS, GLONASS, Galileo, ve BeiDou uyduları için tüm epoklarda alıcının kayıt etmesi gereken faz ve kod ölçümlerinin toplam sayısı ilgili frekanslar için belirlenmektedir. Daha sonra, bu ölçümler içinde verisi olmayan (RINEX dosyası içinde 0 veya boşluk gelen) kısımların toplam sayısı ilgili frekanslar için belirlenmektedir. Bunların oranı alınarak ilgili frekanstaki ve GNSS uydu sistemi için doluluk yüzdesi hesaplanmaktadır. Veri kaybının olmadığı durumlarda bu oran her bir frekans için %100 gelmesi gerekmektedir, ancak GNSS alıcına ve GNSS uydularına ait yazılımsal ve donanımsal sorunlar nedeni ile faz ve kod frekanslarına ait veri boşlukları RINEX dosyasının içinde oluşabilmektedir. Örnek olarak aşağıda ABMF istasyonunun 2023 06 05 08 56 30.0000000 epogundaki ilgili satırın ilk dört kısmına ait veri kısmı verilmektedir.

```
R 20 C1C L1C D1C S1C C1P L1P D1P S1P C2P L2P D2P S2P C2C SYS / # / OBS TYPES
    L2C D2C S2C C3Q L3Q D3Q S3Q                SYS / # / OBS TYPES
> 2023 06 05 08 56 30.0000000
R06 24521416.666 3          2622.705 3      20.905
```

RINEX dosyasının header kısmında GLONASS uydularına ait 20 adet frekans belirtilmiştir. Veri kısmında L1C (faz ölçüsünün 1. frekansı) frekansına ait veri boş olarak gözükmemektedir.

Sonuçlar kısmında GPS, GLONASS, Galileo, ve BeiDou uyduları için bu frekansların doluluk oranları verilmiştir.

BULGULAR (RESULTS)

Yazılım aracılığı ile okutulan 322 adet istasyona ait RINEX verileri sonucu GPS, GLONASS, Galileo, ve BeiDou uyduları için 1. ve 2. frekanslardaki kod ve faz ölçülerinin ortalama doluluk oranları Tablo 1’de verilmiştir.

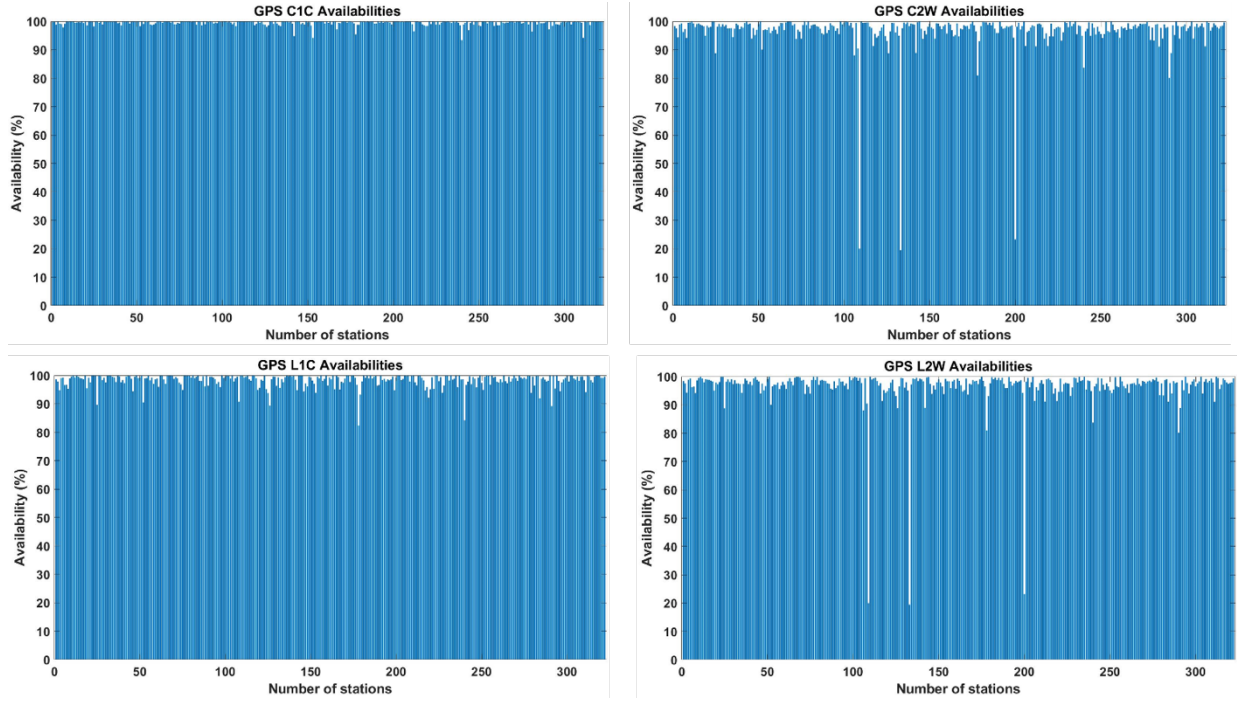
Tablo 1. Uydu sistemlerinin ortalama frekans doluluk oranları

UYDU SİSTEMİ	FREKANS TÜRÜ			
	DOLULUK ORANI %			
GPS	C1C	L1C	C2W	L2W
	99.5	98.3	96.6	96.5
GLONASS	C1C	L1C	C2P	L2P
	99.5	98.6	86.1	85.8
Galileo	C1C	L1C	C5Q	L5Q
	98.3	96.7	95.4	94.0
BeiDou	C2I	L2I	C6I	L6I
	98.6	97.3	96.2	94.8

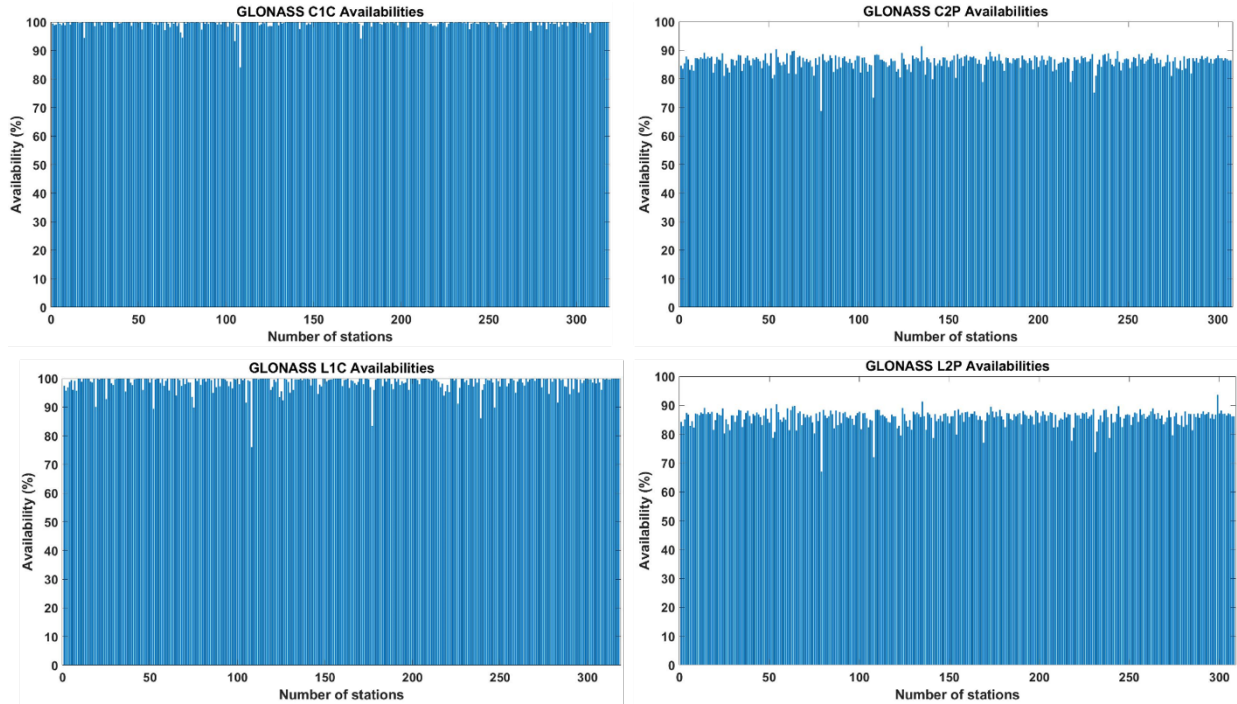
Tablo 1’de görüldüğü gibi GPS 1. kod ve faz doluluk oranları sırası ile %99.5 ve %98.3 olarak hesaplanmıştır. GPS 2. kod ve faz doluluk oranları ise %96’nın üzerindedir. Diğer uydu sistemlerinde ise 1. temel frekansta %96’nın üzerinde bir doluluk oranı söz konusudur. Tablo 1 detaylı olarak incelendiğinde, tüm uydu sistemlerinde 2. frekans doluluk oranları 1. frekansa göre daha düşüktür. Bu durum GLONASS

verilerinde daha net görülmektedir. Bunun temel sebebi GLONASS R06 ve R23 uydularının 2. frekansta yayın yapmaması kaynaklıdır. Bu durum yaklaşık %14'lük 2. frekansta veri kaybına yol açmaktadır. Bu uydulara ait 2. frekans boşluğu sadece bu çalışma için seçilen gün de değil, önceki tarihler için de geçerlidir. Bu durumun temel sebebi bilinmemekle beraber bu çalışmanın kapsamı dahilinde değildir. Ayrıca, tüm uydu sistemleri göz önüne alındığında doluluk oranları sistemler arasında oldukça tutarlı olup önemli bir fark görülmemektedir.

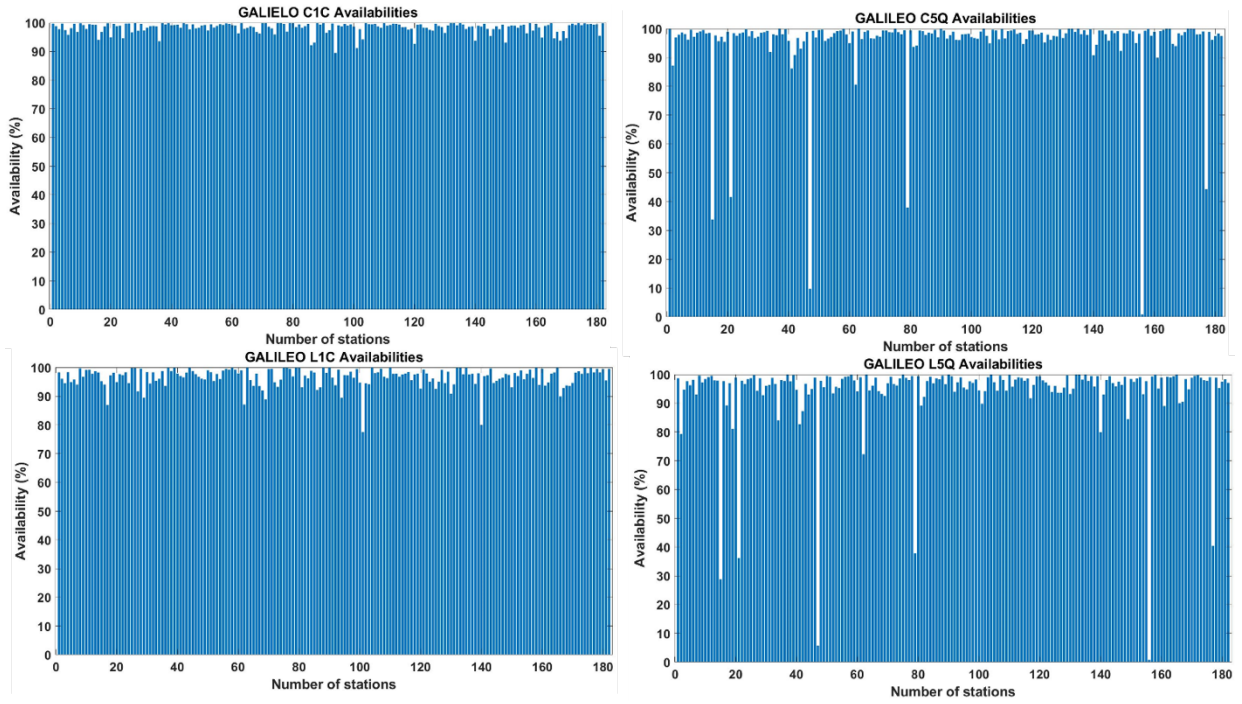
Şekil 3-4-5-6 sırası ile GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uyduları için her bir istasyon için frekans doluluk oranlarını göstermektedir.



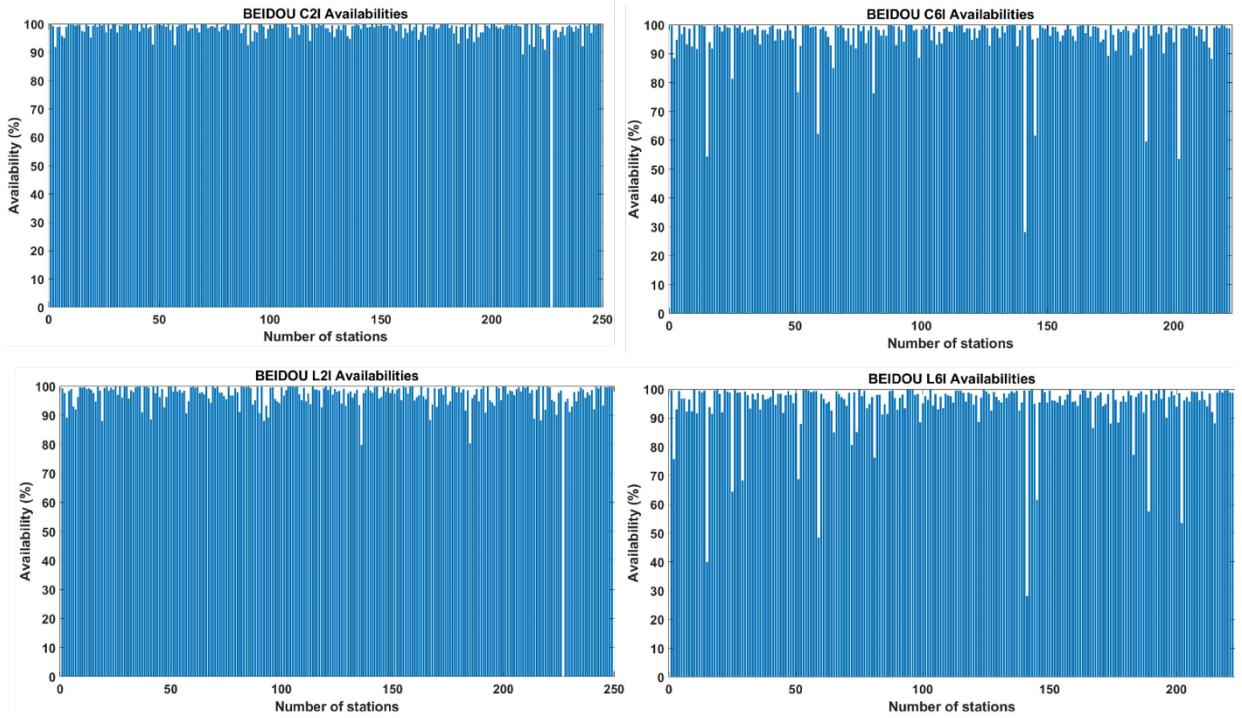
Şekil 3. İstasyon bazlı GPS 1. ve 2. temel frekans doluluk oranları



Şekil 4. İstasyon bazlı GLONASS 1. ve 2. temel frekans doluluk oranları



Şekil 5. İstasyon bazlı GALILEO 1. ve 2. temel frekans doluluk oranları



Şekil 6. İstasyon bazlı BeiDou 1. ve 2. temel frekans doluluk oranları

Şekil 3-4-5-6 incelendiğinde ikinci frekans faz ve kod doluluk oranlarının genellikle 1. frekans'a göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca bazı istasyonların 1. ve 2. frekanstaki faz ve kod ölçümlerinde ciddi seviyelerde veri kaybı olduğu gözükmemektedir. Bu durum daha çok Galileo ve BeiDou sistemleri için gözlenmektedir.

Örneğin ARUC istasyonunda Galileo C5Q ve L5Q sinyallerinin doluluk oranları sırası ile %33.8 ve %28.8 olarak hesaplanmıştır. GLPS istasyonunda BeiDou C6I ve L6I sinyallerinin doluluk oranları sırası ile %62.3 ve %48.5 olarak bulunmuştur. Bu durum, istasyonların farklı tarihteki RINEX verileri için de geçerlidir. Dolayısı ile alıcıdan kaynaklı donanımsal veya yazılımsal bir sorun olduğu büyük bir ihtimalle ön görülmektedir. GLONASS R06 ve R23 uydularının 2. frekansta yayın yapmaması nedeni ile tüm istasyonlar için 2. frekanstaki faz ve kod ölçümleri %90 doluluk oranının altında kalmıştır (yaklaşık %86).

IGS ağına dahil olan IGS-MGEX istasyonları içinde Galileo ve BeiDou uydu sistemlerini destekleyen alıcıların sayısı GPS ve GLONASS uydu sistemlerini destekleyen alıcılara göre daha düşük olduğu için her bir istasyona ait frekans doluluk oranlarında istasyon sayıları Galileo ve BeiDou uyduları için GPS ve GLONASS'a göre daha azdır.

Frekans boşlukları boşluk miktarına bağlı olarak Hassas Nokta Konum Belirleme (PPP) veya hassas görelî konum belirleme işlemlerinin yapılamamasına yol açabilmektedir. Örneğin, INEG istasyonunun GPS'e ait C2W ve L2W frekansları 05/06/2023 tarihi için %80 boş gelmiştir. Geleneksel kod ve faz ölçümleri kullanılarak yapılacak olan PPP veya görelî konum belirleme işlemlerinde (bu istasyonun sabit veya gezici olması durumunda) statik veya kinematik değerlendirmede sonuç alınmamaktadır.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında 2023/06/05 tarihi için 322 adet IGS-MGEX istasyonun 24 saatlik RINEX verileri, özel olarak geliştirilmiş yazılım aracılığı ile okutulup, GPS, GLONASS, Galileo, ve BeiDou uyduları için seçilen 1. ve 2. frekanslardaki kod ve faz ölçülerinin doluluk oranları hesaplanmıştır. Frekans seçiminde uydu yörünge ve IGS-MGEX istasyonlarının konumunun hesabında en çok tercih edilen C1C/C2W/L1C/L2W (GPS), C1C/C2P/L1C/L2P (GLONASS), C1C/C5Q/L1C/L5Q (Galileo), ve C2I/C6I/L2I/L6I (BeiDou) frekanslar seçilmiştir.

Sonuçlar analiz edildiğinde en yüksek frekans doluluk oranlarının GPS uydusu için olduğu görülmekle beraber diğer sistemlere göre farkların (GLONASS 2. Frekanslar hariç) genellikle %1 seviyelerinde olduğu görülmektedir. GLONASS R06 ve R23 uydularının 2. frekansta yayın yapmaması, GLONASS uydularının 2. frekanstaki doluluk oranlarını yaklaşık %14 olarak düşürmektedir. Sayıları tüm IGS-MGEX istasyonlarına göre kıyasla az da olsa bazı IGS-MGEX istasyonlarında ciddi veri kayıpları söz konusudur. Bu durum, GPS ve GLONASS'a göre daha yeni olan Galileo ve BeiDou uyduları için daha belirgindir. Bu tür istasyonlarda yazılımsal ve/veya donanımsal güncelleme yapılması gerekmektedir. Uydu sistemleri kendi içinde 1. ve 2. frekanslar bakımından incelendiğinde, 1. frekanstaki veri doluluğunun 2. frekansa göre daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. GNSS sistemleri kendi arasında karşılaştırıldığında (GLONASS hariç) en düşük faz ve kod frekans oranlarının BeiDou sistemi için olduğu ortaya çıkmıştır (C2I L2I C6I L6I frekansları için sırası ile %98.6 %97.3 %96.2 %94.8).

Görelî hassas konum belirleme amaçlı değerlendirme işlemlerinde sıklıkla sabit noktalar için IGS istasyonları seçilmektedir (Koordinat zaman serisi analizleri ve ülkelerin ulusal datumlarının belirlenmesi gibi). Bu durumlarda, gezici olarak belirlenen alıcının frekans verilerinin dışında kontrol noktası olarak alınan IGS istasyonlarının da frekans verileri önem arz etmektedir. Sonradan değerlendirme işlemlerinde (post process) önce GNSS alıcısının topladığı kod ve faz ölçülerinin doluluk oranı analizlerinin, daha hassas ve doğru sonuçlara ulaşmak için, hem gezici hem de sabit alıcılar için yapılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] M. Reguzzoni, L. Rossi, C.I. De Gaetani, S. Caldera, R. Barzaghi, GNSS-Based Dam Monitoring: The Application of a Statistical Approach for Time Series Analysis to a Case Study, *Applied Science*. 12 (2022), 9981. <https://doi.org/10.3390/app12199981>
- [2] S.S. Durduran, İ. Kalaycı, M. Şen, Kadastral Ölçmelerde Motorize GPSSİT (GPS Sanal İstasyon Tekniği) Yönteminin Kullanılabilirliği ve Coğrafi Bilgi Sistemine Entegrasyonu, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultay.*, 11-15 Mayıs (2009), Ankara
- [3] E. Jonuzi, S.S. Durduran, T. Alkan, North Macedonian Cadastre Towards Cadastre 2034, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*. 4(2) (2022), 26-44, <https://dergipark.org.tr/en/pub/neufmbd/issue/74887/1205803>
- [4] A. Varlık, M. Erdönmez, Yapılaşmış Alanlarda İnsansız Hava Araçları ile Eğik Resim Fotogrametrisi Uygulaması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2(2) (2020), 1-11, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/neufmbd/issue/59145/819853>

- [5] B. Keleş, S.S. Durduran, Osmaniye İlinin Arazi Örtüsü ve Kullanımındaki Zamansal Değişimin Uzaktan Algılama Teknikleri ile Araştırılması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 1(1) (2019), 32-52, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/neufmbd/issue/44699/539863>
- [6] C. Cai, Y. Gao, Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations, *Journal of Global Positioning Systems*. 6(1) (2007), 13–22.
- [7] S. Alçay, C. Inal, C.O. Yigit, M. Yetkin, Comparing GLONASS-only with GPS-only and Hybrid Positioning in Various Length of Baselines, *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 47(1) (2012), 1-12, <https://doi.org/10.1556/AGeod.47.2012.1.1>
- [8] C. Cai, Y. Gao, GLONASS-Based Precise Point Positioning and Performance Analysis, *Advances in Space Research*. 51(3) (2013), 514-524, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.08.004>
- [9] A. Angrisano, S. Gaglione, C. Gioia, Performance Assessment of GPS/GLONASS Single Point Positioning in an Urban Environment, *Acta Geodaetica et Geophysica*. 48 (2013), 149–161, [https://doi.org/10.1007/s40328-012-0010-4doi:10.1016/S0169-4332\(02\)00614-1](https://doi.org/10.1007/s40328-012-0010-4doi:10.1016/S0169-4332(02)00614-1)
- [10] C.O. Yigit, V. Gikas, S. Alçay, A. Ceylan, Performance Evaluation of Short to Long Term GPS, GLONASS and GPS/GLONASS Post-Processed PPP, *Survey Review*, 46(3) (2014), 155-166, <https://doi.org/10.1179/1752270613Y.0000000068>
- [11] R.M. Alkan, V. Ilci, I.M. Ozulu, M.H. Saka, A Comparative Study for Accuracy Assessment of PPP Technique Using GPS and GLONASS in Urban Areas, *Measurement*. 69 (2015), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.012>
- [12] Ö. Yurdakul, İ. Kalaycı, GLONASS’ın Kısa Bir Bazda (5 Km) Ağ Bazlı RTK Tekniklerine (VRS, FKP, MAC) Etkisi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2(2) (2020), 38 - 51, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/neufmbd/issue/59145/825596>
- [13] F. Xia, S. Ye, P. Xia, L. Zhao, N. Jiang, D. Chen, G. Hu, Assessing the Latest Performance of Galileo-Only PPP and the Contribution of Galileo to Multi-GNSS PPP, *Advances in Space Research*. 63(9) (2019), 2784–2795. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.06.008>
- [14] W. Liu, M. Wu, X. Zhang, W. Wang, W. Ke, Z. Zhu, Single-epoch RTK Performance Assessment of Tightly Combined BDS-2 and Newly Complete BDS-3, *Satellite Navigation*. 2(6) (2021), 1–17, <https://doi.org/10.1186/s43020-021-00038-y>
- [15] G. Jiao, S. Song, Y. Ge, K. Su, Y. Liu, Assessment of BeiDou-3 and Multi-GNSS Precise Point Positioning Performance, *Sensors*. 19 (2019), 2496. <https://doi.org/10.3390/s19112496>
- [16] K. Su, S. Jin, & Y. Ge, Rapid Displacement Determination with a Stand-Alone Multi-GNSS Receiver: GPS, Beidou, GLONASS, and Galileo, *GPS Solutions*. 23, 54 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0840-4>
- [17] S. Erol, Comparative Study for Performance Analysis of Kinematic Multi-Constellation GNSS PPP in Dynamic Environment, *Journal of Marine Science and Engineering*. 8 (2020), 514. <https://doi.org/10.3390/jmse8070514>
- [18] H. Karimi, An Analysis of Satellite Visibility and Single Point Positioning with GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou-2/3, *Applied Geomatics*. 13 (2021), 781–791, <https://doi.org/10.1007/s12518-021-00391-2>
- [19] S. Oğutcu, A. Shakor, H. Farhan, Investigating the Effect of Observation Interval on GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou static PPP, *International Journal of Engineering and Geosciences*. 7(3) (2022), 294-301, <https://doi.org/10.26833/ijeg.980148>
- [20] Z. Hou, F. Zhou, Assessing the Performance of Precise Point Positioning (PPP) with the Fully Serviceable Multi-GNSS Constellations: GPS, BDS-3, and Galileo, *Remote Sensing*. 15 (2023), 807. <https://doi.org/10.3390/rs15030807>
- [21] P. Liu, K.V. Ling, H. Qin, T. Liu, Performance Analysis of Real-Time Precise Point Positioning with GPS and BDS State Space Representation, *Measurement*. 215 (2023), 112880, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112880>
- [22] X. Yan, C. Liu, M. Jiang, M. Yang, W. Feng, M. Zhong, I. Peng, Performance Analysis of Oceanographic Research Vessel Precise Point Positioning Based on BDS/GNSS RTK Receivers,

Measurement. 211 (2023), 112637, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112637>

- [23] L. Zhao, P. Blunt, L. Yang, S. Ince, Performance Analysis of Real-Time GPS/Galileo Precise Point Positioning Integrated with Inertial Navigation System, *Sensors*. 23 (2023), 2396. <https://doi.org/10.3390/s23052396>
- [24] J. Chen, X. Zhao, C. Liu, S. Zhu, Z. Liu, D. Yue, Evaluating the Latest Performance of Precise Point Positioning in Multi-GNSS/ RNSS: GPS, GLONASS, BDS, Galileo and QZSS, *The Journal of Navigation*. 74(1) (2020), 247–267. <https://doi.org/10.1017/S0373463320000508>
- [25] B. Duan, U. Hugentobler, O. Montenbruck, P. Steigenberger, Performance of Galileo Satellite Products Determined from Multi-Frequency Measurements, *Journal of Geodesy*. 97(4) (2023), 32, <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01723-3>
- [26] P. Steigenberger, Z. Deng, J. Guo, L. Prange, S. Song, O. Montenbruck, BeiDou-3 Orbit and Clock Quality of the IGS Multi-GNSS Pilot Project, *Advances in space research*. 71(1) (2023), 355-368, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.058>
- [27] F. Guo, X. Li, X. Zhang, J. Wang, Assessment of Precise Orbit and Clock Products for Galileo, BeiDou, and QZSS from IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX), *GPS Solutions*, 21 (2017), 279-290, <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0523-3>
- [28] S. Schaer, SINEX BIAS—Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format for GNSS BIASes Version 1.00, (2011). http://ftp.aiub.unibe.ch/bcwg/format/draft/sinex_bias_100_feb07.pdf (Erişim 8 Haziran 2023)
- [29] W. Gurtner, & L. Estey, Rinex-the Receiver Independent Exchange Format-Version 3.00. Astronomical Institute, University of Bern and UNAVCO, (2007), Boulder, Colorado.

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme Plakların Statik Analizinde Mikro-Mekanik Modellerin Katkısı

Emrah MADENCİ¹ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye,
emadenci@erbakan.edu.tr (Sorumlu Yazar/ Corresponding Author)

Makale Bilgileri

ÖZ

Makale Geçmişi

Geliş: 25.05.2023

Kabul: 25.06.2023

Yayın: 30.06.2023

Anahtar Kelimeler:

FDM Plak, Mikro-mekanik model, Birinci mertebeye kayma deformasyon teorisi, Eğilme.

Yeni nesil mühendislik malzemelerinden biri olarak bilinen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), tabakalı yapılarda ortaya çıkan arayüz problemlerini kaldırarak modern mühendislik uygulamalarında yüksek mukavemet ve ısı direnci sağlar. Tipik FDM'nin karakteristik özellikleri, yüksek eğilme-gerilme bağlantısı ve bileşen malzemelerin hacim oranının kademeli olarak değişmesi gibi mekanik özelliklerinden dolayı termal dirençlidir. Bu çalışmada; FDM plakların malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılan "Voigt, Reuss, Tamura, yerel temsili hacim elemanı (LRVE) ve Mori-Tanaka" gibi çeşitli mikro-mekanik modellerin kalınlık koordinatı boyunca malzeme özelliği değişen FDM plakların eğilme davranışına tepkisi üzerindeki etkisi analitik çözüm ile araştırılmıştır. FDM plak elemanının kinematik bağıntıları için birinci dereceden kayma deformasyonu plak teorisi kullanılmış ve virtüel yer değiştirme ilkesinin yardımıyla alan denklemleri elde edilmiştir. Basit mesnetli FDM plakların analitik çözümü için Navier yöntemi kullanıldı. Her bir mikro-mekanik modelden elde edilen sonuçlar literatürde bulunan referans çözümler ile karşılaştırıldı ve uyum içinde oldukları görüldü. Elde edilen sonuçlara göre hacim oranı indeksinin yer değiştirme konusunda modeller arasında farklılık ortaya koyduğu görülmüştür.

Contribution of Micro-Mechanical Models to Static Analysis of Functionally Graded Material Plates

Article Info

ABSTRACT

Article History

Received: 25.05.2023

Accepted: 25.06.2023

Published: 30.06.2023

Keywords:

FGM plates; Micro mechanical models, First order shear deformation theory, Flexure.

The Functionally graded materials (FGM) which are known one of the next generation of engineering materials, renovate interface problems due to graded structures and provide high strength and thermal resistance in modern engineering applications. The characteristic properties of typical FGM are high bending-stretching coupling and thermal resistance due to their mechanical properties such as the volume fraction of constituent materials changes gradually. In this study; the effect of various micro-mechanical models such as "Voigt, Reuss, Tamura, LRVE and Mori-Tanaka" on the response of FGM plates to the bending behavior of FGM plates, which are used to determine the material properties of FGM plates with varying properties throughout the thickness, have been analyzed by analytical solution. First order shear deformation plate theory was used for the kinematic relations of the FGM plate element and the governing equations were obtained with the help of the virtual displacement principle. Navier method was used for the analytical solution of the simple-supported FGM plate. The results obtained from each micromechanical model were compared with the reference solutions found in the literature and it was found that they were in good agreement. According to the results, it was seen that the volume fraction index revealed a difference between models on displacement.

Atıf/Citation: Madenci, E. (2023). Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme plakların statik analizinde mikro-mekanik modellerin katkısı, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 23-37.



"This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (CC BY-NC 4.0)"

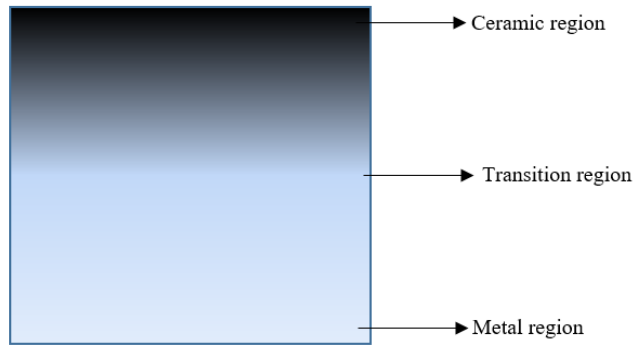
GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fonksiyonel dereceli malzeme (FDM), mikro yapı malzeme özelliklerinin kademeli iç dağılımla karakterize edildiği yeni bir kompozit malzemedir. FDM'ler, malzeme bileşimi belirli bir yön(ler) boyunca sürekli ve düzgün bir şekilde değişen iki veya daha fazla bileşen içeren homojen olmayan kompozit malzemelerdir [1]. FDM konsepti ilk olarak Japon bilim adamları tarafından 1984 yılında Sendai bölgesinde geliştirildi ve başlangıçta havacılık yapısal uygulamaları ve füzyon reaktörleri için bir termal bariyer kaplaması olarak önerildi, ancak bugün çeşitli mühendislik dallarında yapısal bir bileşen olarak genel kullanım için hızlı bir gelişme yaşadı [2]. Genel olarak FDM'ler, ısıya ve aşındırıcı etkilere karşı mükemmel dirençli seramikler ve iyi tokluğa sahip metal gibi iki farklı parçadan oluşur [3]. FDM'ler, standart kompozit özelliklerinin yanı sıra düşük özgül ağırlık ve verimli enerji kapasitesi gibi avantajları nedeniyle son zamanlarda tasarımcılar ve araştırmacılar tarafından ilgi görmektedir. FDM'ler, malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca değişkenliği ve ısı etkilerine karşı dirençleri nedeniyle havacılık, askeriye, inşaat, otomotiv ve nano-kompozitler gibi farklı sektörlerde çok çeşitli uygulamalarda tercih edilmektedir [4-9]. Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitlerde önemli ve dikkat edilmesi gereken husus tabakalar arası bölgenin takviye edilmesidir. Zayıf tabakaların arasında kalan bölgelerin özellikleri, tabakalı FRP kompozit yapıların genel performansını sınırlandırır [10]. FDM'lerde ise malzeme özelliklerinin değişimi fonksiyonel bir geçişe sahiptir. O yüzden delaminasyon problemi yoktur.

FDM plaklarının davranışlarını doğru bir şekilde öngörmek için yeterli yaklaşıma sahip çeşitli eşdeğer tek tabakalı teoriler geliştirilmiştir [11-17]. Kirchhoff plak teorisi [18, 19], birinci-mertebe kayma deformasyon plak teorisi [20, 21] ve yüksek mertebe kayma deformasyon plak teorisi [22-25] ve çeşitli çözüm yöntemleri kullanılarak FDM plakların statik ve dinamik analizleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır [26-32]. Kirchhoff plak teorisine göre, deformasyondan önce orta yüzeye dik ve düzlem olan kesitler, deformasyondan sonra da düzlem ve orta yüzeye dik olarak kalır. Bu varsayımın bir sonucu olarak, düzleme dik olan kayma deformasyonlarının etkisi göz ardı edilmektedir. Bu nedenle, enine kayma deformasyonlarının etkisi dikkate alınmaz ve bu teori sadece ince plaklar için uygun sonuçlar verir. [33]. Ancak plak kalınlığı arttıkça bu deformasyonların etkisi artmakta ve Kirchhoff plak teorisi hatalı sonuçlara yol açabilmektedir. Kalın plaklar için Kirchhoff teorisi kullanmak uygun değildir. Kirchhoff plak teorisi ile elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlardan farklılık gösterdiğinden, kayma deformasyon etkilerinin de dikkate alındığı birinci mertebe kayma deformasyon plak teorileri geliştirilmiştir. Birinci dereceden kayma deformasyon teorileri kayma deformasyon etkilerini ihmal etmez, bir kayma düzeltme faktörü kullanarak plaka kalınlığı boyunca düzgün bir enine kayma gerilimi dağılımını dikkate alınır. Bu nedenle plak yüzeylerinde sıfır enine kayma gerilmesi koşulunu sağlamaz. Kayma düzeltme faktörü, tabaka yönüne, yükleme koşullarına, geometrik parametrelere ve sınır koşullarına bağlıdır [34]. Kalınlık yönü boyunca kayma gerilimi dağılımı, kayma düzeltme faktörü kullanılarak doğru bir şekilde tahmin edilememektedir. Dikey yer değiştirme bileşenlerinin dikey koordinatların fonksiyonları olduğu ve dikey kayma deformasyonlarının doğrusal yerine nonlineer değiştiği yüksek mertebe kayma deformasyon teorileri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu teorilerde, elemanın kalınlığı boyunca kayma deformasyonlarının değişimi yüksek derecede ifade edildiğinden, plağın alt ve üst yüzeylerindeki kayma gerilmelerinin sıfır olması koşulunu sağlamakta ve herhangi bir kayma düzeltme faktörü gerektirmemektedir [35]. FDM plakları ile ilgili bazı çalışmalardan bahsetmek gerekirse; Zenkour and Mashat [36] FDM plaklarının termal burkulmasını analiz etmek için sinüzoidal kayma deformasyon plak teorisi önerdi. Sonuçları, yüksek mertebe kayma deformasyonu, birinci mertebe kayma deformasyonu ve Euler-Bernoulli plak teorileri kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlar ve sonuçlarının yüksek mertebe kayma deformasyonu plak teorisine çok yakın olduğunu bulmuşlardır. Hadji ve ark. [37], FDM'lerin içinde üretimleri sırasında meydana gelebilecek gözenekleri göz önünde bulundurarak FDM plaklarının eğilmesi ve serbest titreşimi için hiperbolik kayma deformasyon plak teorisi sundu. FDM plakalar için dört farklı gözeneklilik tipi kullanılmıştır. Hareket denklemleri Hamilton prensibinden türetilmiştir. Alan denklemlerinin çözümünde Navier prosedürü uygulanmıştır. Benferhat ve ark. [13], nötr yüzey konseptine dayanan yeni bir sinüzoidal kayma deformasyonu teorisini kullanarak basit mesnetli FDM plağın enine yük altındaki statik analizini

analitik olarak inceledi. Abdelaziz ve ark. [38] tarafından çeşitli sınır koşulları ile FDM sandviç plağın eğilmesi, titreşimi ve burkulması için basit bir hiperbolik kayma deformasyon teorisi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Modelin yer değiştirme alanı, plağın kalınlığı boyunca düzlem içi yer değiştirmelerdeki hiperbolik bir varyasyona dayalı olarak seçilmiştir. Benlahcen ve ark. [39], üniform ve gradyan sıcaklık değişimine maruz kalan parabolik içbükey kalınlık değişimine sahip FDM plaklarının termal burkulma direncini araştırdı. Analitik bir formülasyon türetildi ve diferansiyel alan denklemi, sonlu farklar yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözüldü. Bouamoud ve ark. [40] tarafından iki tür FDM sandviç plağın termomekanik eğilmesini incelemek için dört değişkenli rafine bir plak modeli uygulandı. Sadece dört bilinmeyen değişken dikkate alınarak, virtüel iş prensibine dayalı olarak alan denklemleri yazıldı ve daha sonra bu denklemlerin çözümü için Navier yöntemi kullanıldı.

Geleneksel kompozit malzemeler, sabit bir hacim oranından ve sürekli bir matris içinde dağılmış ayrı bir takviye süspansiyonundan oluşurken, FDM yapıları, yapının kalınlığı boyunca bileşen malzeme hacim oranlarında büyük farklılıklar gösterir (Şekil 1).



Şekil 1. FDM bir yapının şematik gösterimi

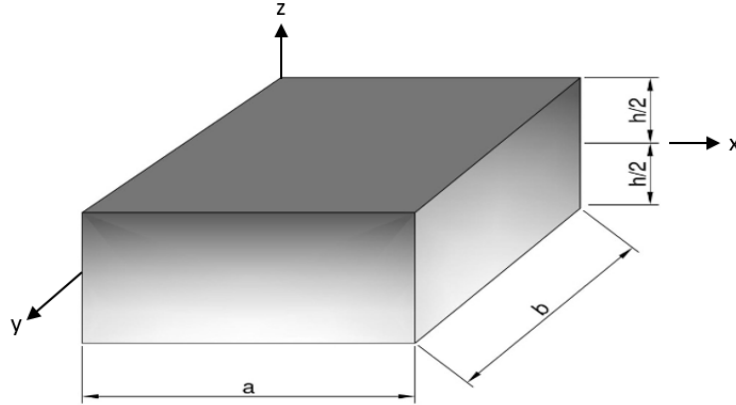
FDM'lerdeki yoğunlaşma veya yapısal gradyanlar nedeniyle, geleneksel kompozitler için kullanılan yaklaşımlar ve modeller doğrudan FDM'lere uygulanamaz. Bir FDM'nin tasarımı, büyük ölçüde ortaya çıkan güçlü özelliklere ve bu özelliklerin mikro yapısıyla nasıl ilişkili olduğuna bağlıdır. Bu nedenle, belirli bir mikro yapı ve alansal dağılım için mekanik, termal veya diğer ilgili özelliklerin tahmini, FDM'nin tasarımında önemli bir rol oynar. Literatürde, FDM'lerin etkin malzeme özelliklerini hacim oranlarına göre tahmin etmek için önerilen farklı modeller vardır [41-43]. Mikro-mekanik modeller, bileşen malzeme hacim oranlarını, özelliklerini ve mikro yapılarını etkin özelliklerle ilişkilendirerek bu araştırma alanları arasında önemli bir bağlantı sağlar. FDM'lerin mikro-mekanik modelleri Gasik [44] tarafından ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Kompozitlerin ve FDM'lerin özelliklerini değerlendirmek için kullanılan mikro-mekanik modellerden bazıları "Reuss, Voigt, Sasaki-Kerner, Mori-Tanaka, Wakashima - Tsukamoto, Tamura, Gasik - Ueda ve yerel temsili hacim öğeleridir". Uygun bir mikro-mekanik model kullanan Yin ve ark. [45] doğrusal termal genişleme katsayısı, elastisite modülü ve Poisson oranının ifadelerini belirlemişlerdir. FDM'nin ısı iletimi ve termo-elastik deformasyonları, hücre yöntemine dayanan yüksek dereceli mikro-mekanik modellerden Pindera ve ark. [46] tarafından incelenmiştir. İncelenen FDM'lerin bir, iki ve üç dereceli yönleri vardı. Ostoja-Starzewski ve ark. [47] FDM elyaf takviyeli kompozitlerin etkili lineer termal iletkenliği ve lineer elastik sabitleri için bir mikro-mekanik model vasıtasıyla belirlenmiştir.

Bu çalışmada, etkin malzeme özelliklerinin değişimini tahmin etmek için kullanılan mikro-mekanik modellerin farkı ve FGM plakların eğilme davranışı üzerindeki etkisi analitik olarak analiz edilmiştir. FDM plaklarının kalınlık koordinatı boyunca etkin malzeme özelliklerini belirlemek için hacim oranı ve kuvvet kanunu indeksine dayalı "Voigt, Reuss, Tamura, hacim elemanı ve Mori-Tanaka" mikro-mekanik modelleri kullanılmıştır. Dikdörtgen FDM plağının statik davranışı için kinematik ilişkileri elde etmek için birinci dereceden kayma deformasyon plak teorisi kullanıldı. Alan denklemleri, virtüel yer değiştirme ilkesinin dinamik versiyonu kullanılarak türetilmiştir. Basitçe desteklenen sınır koşulları ile FDM plağın analitik

çözümleri için Navier yöntemi kullanıldı. Farklı mikro-mekanik modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan referans çözümlerle karşılaştırıldı.

MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Metal ve seramik gibi farklı hacim oranlarına ve kademeli dağılıma sahip bir FDM plağı varsayalım. Bir FDM malzemesi için, hacimsel oran dağılımı hakkındaki bilgiler dışında, gerçek derecelendirilmiş mikro yapı ve parçacıkların boyutu, şekli ve dağılımının ayrıntılı bir açıklaması genellikle mevcut değildir [48]. Kalınlık boyunca derecelendirilen FDM plakasının geometrik parametreleri: uzunluk "a", genişlik "b" ve kalınlık "h" ve kullanılan koordinat sistemi Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. FDM plak geometrisi

Voigt modeli: Mikro-mekanik modellerde, Voigt modeli nispeten basittir, hacim oranına bağlı etkin malzeme özellikleri " P_f " şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_f = P_t V_m + P_b V_c \quad (1)$$

burada " P_t " ve " P_b " sırasıyla FDM plağının üst ve alt yüzeylerinin özelliklerini temsil eder, " V_c " ve " V_m " seramik ve metal hacim oranlarıdır ve aralarındaki ilişkiler şöyledir:

$$V_c + V_m = 1 \quad (2)$$

Hacim oranı " V_c " şu şekilde yazılabilir:

$$V_c = \left(\frac{2z+h}{2h} \right)^n \quad (3)$$

Hacim oranı üssü olarak bilinen ve ($0 \leq n \leq \infty$) değerine eşit olan kalınlık yönü boyunca malzeme özelliklerini yöneten üs, sırasıyla tam seramik ve metali temsil eder. Buna göre, kalınlık koordinatı boyunca etkin elastisite modülü " E_f " ve Poisson oranı " ν_f " aşağıdaki gibi elde edilir:

$$E_{(z)} = E_c V_c + E_m (1 - V_c) \quad (4)$$

$$\nu_{(z)} = \nu_c V_c + \nu_m (1 - V_c) \quad (5)$$

Reuss Modeli: Reuss, malzeme dağılımı boyunca gerilmelerin homojen olduğunu varsaymış ve etkin malzeme özelliklerini şu şekilde elde etmiştir [49-51]:

$$E_{(z)} = \frac{E_c E_m}{E_c (1 - V_c) + E_m V_c} \quad (6)$$

$$\nu_{(z)} = \frac{\nu_c \nu_m}{\nu_c (1 - V_c) + \nu_m V_c} \quad (7)$$

Mori-Tanaka Modeli: Yerel olarak etkin malzeme özellikleri, Mori-Tanaka tahminleri gibi mikro-mekanik modeller tarafından sağlanabilir. Bu yöntem, küresel parçacıklarla güçlendirilmiş matristen oluşan iki fazlı bir kompozit malzemenin, plak içinde rastgele dağıldığı varsayımına dayanmaktadır. Mori-Tanaka tarafından geliştirilen modele göre etkin hacim modülü "K" ve etkin kayma modülü "G" aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$K_{(z)} = \frac{K_m + V_c (K_c - K_m)}{1 + (1 - V_c) 3(K_c - K_m) / (3K_m + 4K_c)} \quad (8)$$

$$G_{(z)} = G_m + \frac{V_c (G_c - G_m)}{1 + (1 - V_c) (G_c - G_m) / (G_m + \frac{G_m (9K_m + 8G_m)}{6(K_m + 2G_m)})} \quad (9)$$

Sonrasında etkin elastisite modülü ve Poisson oranı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$E_{(z)} = \frac{9K_{(z)} G_{(z)}}{3K_{(z)} + G_{(z)}} \quad (10)$$

$$\nu_{(z)} = \frac{(3K_{(z)} - 2G_{(z)})}{2(3K_{(z)} + G_{(z)})} \quad (11)$$

Tamura Modeli: Tamura modeli, iki fazlı bir FDM'nin etkin Poisson oranı için doğrusal bir karıştırma kuralını varsayar, etkin elastisite modülü formülasyonunda matris ve parçacık fazlarındaki gerilim ve şekil değiştirmeyi ilişkilendiren gerilme-şekil değiştirme transferi olarak bilinen ampirik bir uydurma parametresi içerir.

$$E_{(z)} = \frac{(1 - V_c) E_m [q_T - E_c] + V_c E_c [q_T - E_m]}{(1 - V_c) [q_T - E_c] + V_c [q_T - E_m]} \quad (12)$$

$$\nu_{(z)} = \nu_c V_c + \nu_m (1 - V_m) \quad (13)$$

Burada "gerilmeden şekil değiştirmeye transfer" olarak bilinen ampirik uydurma parametresi şu şekildedir:

$$q_T = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (14)$$

Yerel Temsili Hacim Elemanı (LRVE) Modeli: FDM'lerin etkin malzeme özelliklerini elde etmek için kullanılan bir model, iki fazlı bir kompozitin ikinci aşamasını bir kapsama alanı olarak kabul eden Kübik yerel temsili hacim öğeleri (LRVE) modelidir. LRVE modeli, FDM malzemesinin mikro yapısının bilindiği varsayılarak geliştirilmiştir. LRVE modelinde, Poisson oranı Voigt mikro-mekanik modelindeki gibi hesaplanır (Denklem 5). Elastisite modülü şu şekilde ifade edilir [49, 52]:

$$E_{(z)} = E_m \left(1 + \frac{V_c}{\left(\frac{1}{1 - \frac{E_m}{E_c}} \right) - \sqrt[3]{V_c}} \right) \quad (15)$$

Deformasyonların $x-z$ düzleminde olduğu varsayılarak ve x , y ve z doğrultuları boyunca yer değiştirme bileşenleri sırasıyla “ u ”, “ v ” ve “ w ” ile gösterilerek, plak için birinci merteye kayma deformasyon teorisi yer değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (16)$$

burada “ u_0 , v_0 , w_0 , ϕ_x , ϕ_y ” bilinmeyen fonksiyonlar ve “ u_0 , v_0 , w_0 ” bir noktadaki yer değiştirmeleri, “ ϕ_x , ϕ_y ” ise “ y ” ve “ x ” eksenlerine göre dönmeleri temsil ediyor.

Şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^1 \\ \varepsilon_{yy}^1 \\ \gamma_{yz}^1 \\ \gamma_{xz}^1 \\ \gamma_{xy}^1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

Birinci merteye kayma deformasyon teorisine göre bünye bağıntıları:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} & 0 & 0 \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & Q_{45} \\ 0 & 0 & 0 & Q_{45} & Q_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Mühendislik sabitleri:

$$Q_{11} = Q_{22} = Q_{66} = \frac{E_{(z)}(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (19a)$$

$$Q_{12} = Q_{16} = Q_{26} = \frac{\nu E_{(z)}}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (19b)$$

$$Q_{44} = Q_{55} = Q_{66} = \frac{E_{(z)}}{2(1+\nu)} \quad (19c)$$

Kuvvet ifadeleri “**N**, **M** ve **Q**” aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^1 \\ \varepsilon_{yy}^1 \\ \gamma_{xy}^1 \end{Bmatrix} \quad (20a)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^1 \\ \varepsilon_{yy}^1 \\ \gamma_{xy}^1 \end{Bmatrix} \quad (20b)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{Bmatrix} = k_s \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{xy}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{Bmatrix} \quad (20c)$$

Burada

$$(A_{ij}) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (Q_{ij}) dz \quad (21a)$$

$$(B_{ij}) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (Q_{ij}) z dz \quad (21b)$$

$$(D_{ij}) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (Q_{ij}) z^2 dz \quad (21c)$$

Birinci dereceden teoriye dayanan FDM plağının alan denklemleri, virtüel yer değiştirme ilkesinin dinamik versiyonu kullanılarak türetilebilir:

$$0 = \int_0^T (\delta U + \delta V - \delta K) dt \quad (22)$$

Euler-Lagrange denklemleri, katsayılar “ δu_0 , δv_0 , δw_0 , $\delta \phi_x$ ve $\delta \phi_y$ ” ın “ Ω_0 ” sıfır olması ile elde edilir:

$$\delta u_0 : \frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = I_0 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} \quad (23a)$$

$$\delta v_0 : \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_{yy}}{\partial y} = I_0 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial t^2} \quad (23b)$$

$$\delta w_0 : \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q = I_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \quad (23c)$$

$$\delta \phi_x : \frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = I_2 \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} \quad (23d)$$

$$\delta\phi_y : \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_{yy}}{\partial x} - Q_y = I_2 \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} \quad (23e)$$

Hareket denklemleri, kuvvet ve moment bileşkelerini yerine koyarak yer değiştirmeler cinsinden ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[A_{11} \frac{\partial u_0}{\partial x} + A_{12} \frac{\partial v_0}{\partial y} + A_{16} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + B_{11} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + B_{12} \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + B_{16} \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[A_{16} \frac{\partial u_0}{\partial x} + A_{26} \frac{\partial v_0}{\partial y} + A_{66} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + B_{16} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + B_{26} \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + B_{66} \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \right] \\ & = I_0 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (24a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[A_{16} \frac{\partial u_0}{\partial x} + A_{26} \frac{\partial v_0}{\partial y} + A_{66} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + B_{16} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + B_{26} \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + B_{66} \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[A_{12} \frac{\partial u_0}{\partial x} + A_{22} \frac{\partial v_0}{\partial y} + A_{26} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + B_{12} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + B_{22} \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + B_{26} \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \right] \\ & = I_0 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (24b)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[k_s A_{45} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \right) + k_s A_{55} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_s A_{44} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \right) + k_s A_{45} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \right) \right] + q \\ & = I_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (24c)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[B_{11} \frac{\partial u_0}{\partial x} + B_{12} \frac{\partial v_0}{\partial y} + B_{16} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + D_{11} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + D_{16} \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[B_{16} \frac{\partial u_0}{\partial x} + B_{26} \frac{\partial v_0}{\partial y} + B_{66} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + D_{16} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + D_{26} \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + D_{66} \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \right] \\ & - \left[k_s A_{45} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \right) + k_s A_{55} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \right) \right] = I_2 \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (24d)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[B_{16} \frac{\partial u_0}{\partial x} + B_{26} \frac{\partial v_0}{\partial y} + B_{66} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + D_{16} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + D_{26} \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + D_{66} \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[B_{12} \frac{\partial u_0}{\partial x} + B_{22} \frac{\partial v_0}{\partial y} + B_{26} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + D_{11} \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + D_{22} \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + D_{26} \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \right] \\ & - \left[k_s A_{44} \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y \right) + k_s A_{45} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \right) \right] = I_2 \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (24e)$$

Birinci dereceden kayma deformasyon teorisi için sınır koşulları, aşağıdaki genişletmelerle karşılır:

$$u_0(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} U_{mn}(t) \cos \alpha x \sin \beta y \quad (25a)$$

$$v_0(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} V_{mn}(t) \sin \alpha x \cos \beta y \quad (25b)$$

$$w_0(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} W_{mn}(t) \sin \alpha x \sin \beta y \quad (25c)$$

$$\phi_x(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} X_{mn}(t) \cos \alpha x \sin \beta y \quad (25d)$$

$$\phi_y(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} Y_{mn}(t) \sin \alpha x \cos \beta y \quad (25e)$$

Burada “ $\alpha = m\pi/a$ ” ve “ $\beta = n\pi/b$ ”. Mekanik yük:

$$q(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} Q_{mn}(t) \sin \alpha x \sin \beta y \quad (26)$$

Navier çözümüne bağlı statik analiz aşağıdaki formda hesaplanabilir:

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & 0 & s_{14} & s_{15} \\ s_{12} & s_{22} & 0 & s_{24} & s_{25} \\ 0 & 0 & s_{33} & s_{34} & s_{35} \\ s_{14} & s_{24} & s_{34} & s_{44} & s_{45} \\ s_{15} & s_{25} & s_{35} & s_{45} & s_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{mn} \\ V_{mn} \\ W_{mn} \\ X_{mn} \\ Y_{mn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ Q_{mn} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (27)$$

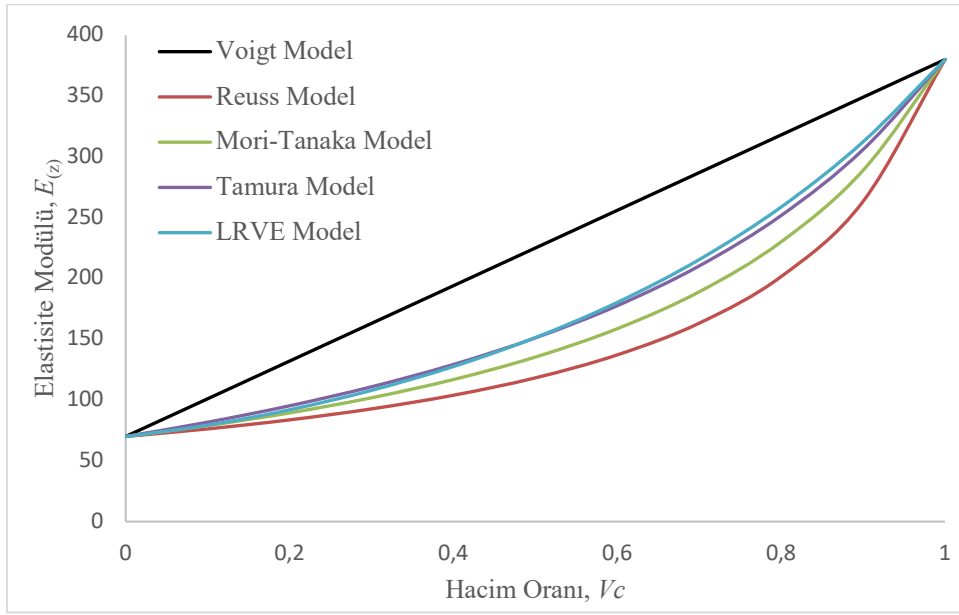
Burada “ s_{ij} ” referans [52] de verilmiştir.

BULGULAR (RESULTS)

Bu bölümde, birinci dereceden kayma deformasyon plak teorisi kullanılarak FDM plaklarının eğilme analizi üzerindeki mikro-mekanik modellerin etkisi sunulmuş ve bu çalışmanın sonuçları çeşitli mevcut plak teorileri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır [53]. FDM plağının malzeme özellikleri, alt yüzeyi alüminyum olarak seçilmiştir ($E_m = 70 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\nu = 0.3$ and $\rho_m = 2702 \text{ kg/m}^3$), üst yüzeyi alümina seçilmiştir ($E_c = 380 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\nu = 0.3$ and $\rho_m = 3800 \text{ kg/m}^3$). Nümerik sonuçlar aşağıdaki denklemler kullanılarak boyutsuz hale dönüştürülmüştür:

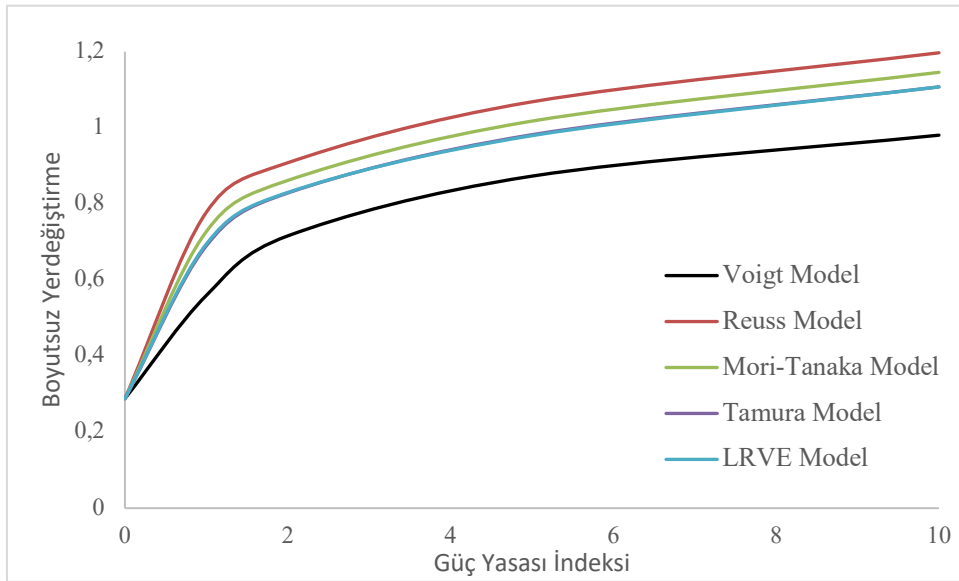
$$\bar{w} = \frac{100E_c h^3}{q_0 a^4} w; \quad \bar{\sigma}_{xx} = \frac{h}{q_0 a} \sigma_{xx} \left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}, z \right); \quad \bar{\tau}_{xz} = \frac{h}{q_0 a} \tau_{xz} \left(0, \frac{b}{2}, z \right) \quad (28)$$

Mikro-mekanik modellerin elastisite modülünde neden olduğu değişimler Şekil 3'te gösterilmiştir. “0” ile “1” arasında değişen hacim oranı değerine bağlı olarak, FDM plağının kalınlığı boyunca malzeme özellikleri arasındaki elastisite modülü dağılımı grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında Voigt modeli doğrusal bir dağılım gösterirken, diğer modeller hacim oranında parabolik bir artış göstermektedir. Voigt ve Reuss modelleri maksimum ve minimum elastisite modülü değerlerini vermiştir. Tamura ve LRVE modelleri, hacim oranının değerinden bağımsız olarak elastisite modülü açısından aynı sonucu verir.

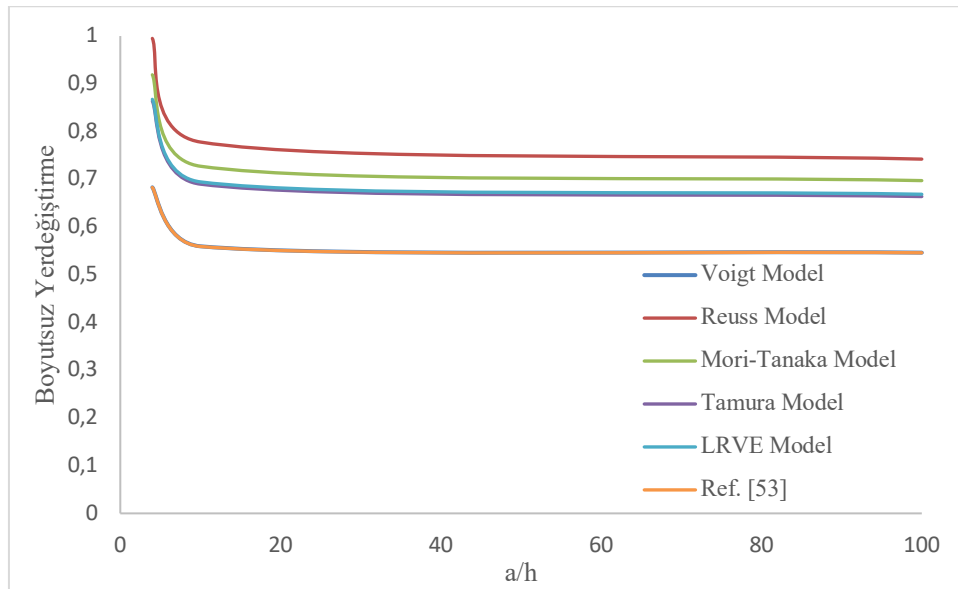


Şekil 3. Çeşitli mikro-mekanik modeller için etkin elastisite modülü değişimi

Mikro-mekanik modellere göre FDM plağının güç yasası indeksinin farklı varyasyonlarına göre boyutsuz yer değiştirme sonuçlarının değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Modelden bağımsız olarak kuvvet kanunu indeksindeki artışın yer değiştirme değerlerinde artışa neden olduğu şekilden görülmektedir. LRVE ve Tamura modelleri pratik olarak aynı sonuçlara sahiptir. Şekil 5'te, mevcut birinciden kayma deformasyonu teorisinin sonuçları ile çeşitli mikro-mekanik modeller ve ref. [53] arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 4. Mikro-mekanik modeller için güç yasası indeksine karşı yer değiştirmeler



Şekil 5. Güç yasası indeksi "1" için yer değiştirme ve narinlik oranlarının karşılaştırılması

Tablo 1. Mikro-mekanik modeller ve güç yasası parametresine bağlı olarak FDM plakta çökme ve gerilmeler

Güç Yasası İndeksi	Model	\bar{w}	$\bar{\sigma}_{xx}$	$\bar{\tau}_{xz}$
0	Voigt Model	0.2880	2.0635	0.3333
	Reuss Model	0.2880	2.0635	0.3333
	Mori-Tanaka Model	0.2880	2.0635	0.3333
	Tamura Model	0.2880	2.0635	0.3333
	LRVE Model	0.2880	2.0635	0.3333
	[52]	0.2881	2.0635	0.3333
1	Voigt Model	0.5590	3.1740	0.3333
	Reuss Model	0.7781	4.0620	0.2655
	Mori-Tanaka Model	0.7271	3.8231	0.2763
	Tamura Model	0.6898	3.6639	0.2869
	LRVE Model	0.6945	3.6551	0.2852
	[52]	0.5592	3.1738	0.3333
2	Voigt Model	0.7161	3.6811	0.2796
	Reuss Model	0.9082	4.7184	0.2456
	Mori-Tanaka Model	0.8615	4.4012	0.2452
	Tamura Model	0.8286	4.2007	0.2477
	LRVE Model	0.8302	4.1561	0.2397
	[52]	0.7158	3.6812	0.2796
5	Voigt Model	0.8730	4.2581	0.2108
	Reuss Model	1.0684	5.9643	0.2529
	Mori-Tanaka Model	1.0175	5.4838	0.2417
	Tamura Model	0.9819	5.1572	0.2337
	LRVE Model	0.9793	5.1144	0.2309
	[52]	0.8729	4.2580	0.2108
10	Voigt Model	0.9806	5.0870	0.2279
	Reuss Model	1.1972	7.2434	0.2777
	Mori-Tanaka Model	1.1458	6.7133	0.2675
	Tamura Model	1.1075	6.3250	0.2593
	LRVE Model	1.1075	6.3247	0.2598
	[52]	0.9806	5.0870	0.2279

Tablo 1'de, çeşitli mikro-mekanik modellerle mevcut çözümün sonuçları arasında ikinci bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar, sapma ve çeşitli kısıtlamalar açısından verilmiştir. Burada yine aynı gözleme dikkat çekiyoruz ki sonuçlar Voigt modeli için çok yakın ve diğerlerine göre çok az bir fark göze çarpıyor. Ayrıca Reuss modeli diğer modellere göre en yüksek yer değiştirme değerlerine sahiptir. Voigt modeli sonucu ise en düşük değerlere sahiptir. LRVE ve Tamura modelleri pratik olarak aynı sonuçlara

sahiptir. Güç yasası indeksi p 'nin artırılmasının, plakanın dış yüzeyindeki enine kayma gerilmesinin azalmasına yol açtığı gözlemlenebilir. Ayrıca, metal veya seramik olan homojen plakaların aynı enine kayma gerilimini verdiği bulunmuştur. Voigt modeli, maksimum gerilimler arasındaki farkın minimum olduğu diğerlerine kıyasla en yüksek gerilimleri veren modeldir.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Bu çalışmada FDM plakalarının etkin malzeme özelliklerini belirlemek için “Voigt modeli, Reuss modeli, Mori-Tanaka modeli, LRVE modeli ve Tamura modeli” gibi farklı mikro-mekanik modeller kullanılmıştır. Kinematik ilişkiler, birinci dereceden kayma deformasyonu plak teorisine bağlı olarak elde edilmiş ve Hamilton prensibi yardımıyla hareket denklemleri elde edilmiştir. Basit mesnetli sınır koşullarına sahip FDM plağının analitik çözümleri için Navier yöntemi kullanıldı. Sonuçlar, literatürde bulunan referans çözümlerle iyi bir uyum içindedir. Bu sonuçlardan ve farklı mikro-mekanik modeller arasındaki karşılaştırmalardan, bazı modeller arasında önemli farklılıklar olduğu bulunmuştur. FDM plakasının Reuss, LRVE, Tamura ve diğer mikro-mekanik modeller tarafından tahmin edilen düzlem dışı yer değiştirmesi arasındaki tutarsızlık, önemli ölçüde güç yasası indeksine bağlıdır. Enine kayma gerilmesi için Voigt modeli, maksimum gerilmeler arasındaki farkın minimum olduğu diğerlerine kıyasla en yüksek gerilmeleri veren modeldir. Bu, analiz sonuçlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için FDM'lerin uygun bir mikro-mekanik modellemesine duyulan ihtiyacı kanıtlamaktadır.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] E. Madenci, A refined functional and mixed formulation to static analyses of fgm beams, *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*. 69 (2019) 427-437.
- [2] S. Kumar, Development of Functionally Graded Materials by Ultrasonic Consolidation, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 3 (2010) 85-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.07.006>.
- [3] L. Hadji, M. Meziane, Z. Abdelhak, T.H. Daouadji, E.A. Bedia, Static and dynamic behavior of FGM plate using a new first shear deformation plate theory, *Structural engineering and mechanics: An international journal*. 57 (2016) 127-140.
- [4] A.A. Bousahla, S. Benyoucef, A. Tounsi, S.R. Mahmoud, On thermal stability of plates with functionally graded coefficient of thermal expansion, *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*. 60 (2016) 313-335.
- [5] L. Gemi, M. Kara, A. Avcı, Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes, *Composites Part B: Engineering*. 106 (2016) 154-163.
- [6] M. Rabhi, K.H. Benrahou, A. Kaci, M.S.A. Houari, F. Bourada, A.A. Bousahla, A. Tounsi, E.A.A. Bedia, S.R. Mahmoud, A. Tounsi, A new innovative 3-unknowns HSDT for buckling and free vibration of exponentially graded sandwich plates resting on elastic foundations under various boundary conditions, *Geomechanics and Engineering*. 22 (2020) 119.
- [7] M. Guellil, H. Saidi, F. Bourada, A.A. Bousahla, A. Tounsi, M.M. Al-Zahrani, M. Hussain, S.R. Mahmoud, Influences of porosity distributions and boundary conditions on mechanical bending response of functionally graded plates resting on Pasternak foundation, *Steel and Composite Structures*. 38 (2021) 1.
- [8] T. Cuong-Le, K.D. Nguyen, N. Nguyen-Trong, S. Khatir, H. Nguyen-Xuan, M. Abdel-Wahab, A three-dimensional solution for free vibration and buckling of annular plate, conical, cylinder and cylindrical shell of FG porous-cellular materials using IGA, *Composite Structures*. 259 (2021) 113216. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113216>.
- [9] H. Berghouti, E.A. Adda Bedia, A. Benkhedda, A. Tounsi, Vibration analysis of nonlocal porous nanobeams made of functionally graded material, *Advances in nano research*. 7 (2019) 351-364.

- [10] M. Uyaner, A. Yar, Nano Elyaf Takviyeli Nanokompozit Üretimi ve Karakterizasyonu, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. 1 (t.y.) 10-19.
- [11] F. Salah, Investigation of thermal buckling properties of ceramic-metal FGM sandwich plates using 2D integral plate model, Steel and Composite Structures, An International Journal. 33 (2019) 805-822.
- [12] T.H. Daouadji, R. Benferhat, Bending analysis of an imperfect FGM plates under hygro-thermo-mechanical loading with analytical validation, Advances in materials Research. 5 (2016) 035.
- [13] R. Benferhat, T.H. Daouadji, B. Adim, A novel higher order shear deformation theory based on the neutral surface concept of FGM plate under transverse load, Advances in Materials Research. 5 (2016) 107.
- [14] R.A. Atmane, N. Mahmoudi, R. Bennai, Investigation on the dynamic response of porous FGM beams resting on variable foundation using a new higher order shear deformation theory, Steel and Composite Structures, An International Journal. 39 (2021) 95-107.
- [15] A. Chikh, A. Bakora, H. Heireche, M.S.A. Houari, A. Tounsi, E.A. Bedia, Thermo-mechanical postbuckling of symmetric S-FGM plates resting on Pasternak elastic foundations using hyperbolic shear deformation theory, Structural engineering and mechanics: An international journal. 57 (2016) 617-639.
- [16] A. Attia, A.A. Bousahla, A. Tounsi, S.R. Mahmoud, A.S. Alwabli, A refined four variable plate theory for thermoelastic analysis of FGM plates resting on variable elastic foundations, Structural engineering and mechanics: An international journal. 65 (2018) 453-464.
- [17] M. Yousfi, H.A. Atmane, M. Meradjah, A. Tounsi, R. Bennai, Free vibration of FGM plates with porosity by a shear deformation theory with four variables, Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal. 66 (2018) 353-368.
- [18] M. Aydogdu, Conditions for functionally graded plates to remain flat under in-plane loads by classical plate theory, Composite Structures. 82 (2008) 155-157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.10.004>.
- [19] J. Yang, H.-S. Shen, Dynamic response of initially stressed functionally graded rectangular thin plates, Composite Structures. 54 (2001) 497-508. doi:[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00122-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00122-2).
- [20] M. Memar Ardestani, B. Soltani, Sh. Shams, Analysis of functionally graded stiffened plates based on FSDT utilizing reproducing kernel particle method, Composite Structures. 112 (2014) 231-240. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.032>.
- [21] C.-S. Chen, Nonlinear vibration of a shear deformable functionally graded plate, Composite Structures. 68 (2005) 295-302. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.03.022>.
- [22] A.M. Zenkour, Generalized shear deformation theory for bending analysis of functionally graded plates, Applied Mathematical Modelling. 30 (2006) 67-84. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2005.03.009>.
- [23] H.-T. Thai, S.-E. Kim, A simple higher-order shear deformation theory for bending and free vibration analysis of functionally graded plates, Composite Structures. 96 (2013) 165-173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.08.025>.
- [24] L. Dozio, Exact free vibration analysis of Lévy FGM plates with higher-order shear and normal deformation theories, Composite Structures. 111 (2014) 415-425. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.014>.
- [25] M. Abualnour, M.S.A. Houari, A. Tounsi, E.A.A. Bedia, S.R. Mahmoud, A novel quasi-3D

- trigonometric plate theory for free vibration analysis of advanced composite plates, *Composite Structures*. 184 (2018) 688-697. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.047>.
- [26] C.-L. Thanh, L. V. Tran, T.Q. Bui, H.X. Nguyen, M. Abdel-Wahab, Isogeometric analysis for size-dependent nonlinear thermal stability of porous FG microplates, *Composite Structures*. 221 (2019) 110838. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.010>.
- [27] K. Xu, Y. Yuan, M. Li, Buckling behavior of functionally graded porous plates integrated with laminated composite faces sheets, *Steel and Composite Structures, An International Journal*. 32 (2019) 633-642.
- [28] A. Tounsi, M.S.A. Houari, A. Bessaim, A new 3-unknowns non-polynomial plate theory for buckling and vibration of functionally graded sandwich plate, *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*. 60 (2016) 547-565.
- [29] J.N. Reddy, Analysis of functionally graded plates, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 47 (2000) 663-684. doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(20000110/30\)47:1/3<663::AID-NME787>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(20000110/30)47:1/3<663::AID-NME787>3.0.CO;2-8).
- [30] X. Zhao, Y.Y. Lee, K.M. Liew, Mechanical and thermal buckling analysis of functionally graded plates, *Composite Structures*. 90 (2009) 161-171. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.03.005>.
- [31] E. Madenci, Ş. Gülcü, Optimization of flexure stiffness of FGM beams via artificial neural networks by mixed FEM, *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*. 75 (2020) 633-642.
- [32] H. Bellifa, K.H. Benrahou, L. Hadji, M.S.A. Houari, A. Tounsi, Bending and free vibration analysis of functionally graded plates using a simple shear deformation theory and the concept the neutral surface position, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 38 (2016) 265-275. doi:10.1007/s40430-015-0354-0.
- [33] C.M. Wang, J.N. Reddy, K.H. Lee, *Shear deformable beams and plates: Relationships with classical solutions*, Elsevier, 2000.
- [34] E. Madenci, A. Özütok, Variational approximate for high order bending analysis of laminated composite plates, *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*. 73 (2020) 97-108.
- [35] R. Kumar, A. Lal, B.N. Singh, J. Singh, New transverse shear deformation theory for bending analysis of FGM plate under patch load, *Composite Structures*. 208 (2019) 91-100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.014>.
- [36] A.M. Zenkour, D.S. Mashat, Thermal buckling analysis of ceramic-metal functionally graded plates, *Natural Science*. 2 (2010) 968.
- [37] L. Hadji, F. Bernard, A. Safa, A. Tounsi, Bending and free vibration analysis for FGM plates containing various distribution shape of porosity, *Advances in Materials Research-An International Journal*. 10 (2021) 115-135.
- [38] H.H. Abdelaziz, M.A.A. Meziene, A.A. Bousahla, A. Tounsi, S.R. Mahmoud, A.S. Alwabri, An efficient hyperbolic shear deformation theory for bending, buckling and free vibration of FGM sandwich plates with various boundary conditions, *Steel and Composite Structures, an International Journal*. 25 (2017) 693-704.
- [39] F. Benlahcen, K. Belakhdar, M. Sellami, A. Tounsi, Thermal buckling resistance of simply supported FGM plates with parabolic-concave thickness variation, *Steel and Composite Structures*. 29 (2018) 591-602.
- [40] A. Bouamoud, Thermomechanical bending investigation of FGM sandwich plates using four shear deformation plate theory, *Steel and Composite Structures, An International Journal*. 32 (2019) 611-

632.

- [41] H.-S. Shen, Z.-X. Wang, Assessment of Voigt and Mori–Tanaka models for vibration analysis of functionally graded plates, *Composite Structures*. 94 (2012) 2197-2208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.02.018>.
- [42] N. Sundararajan, T. Prakash, M. Ganapathi, Nonlinear free flexural vibrations of functionally graded rectangular and skew plates under thermal environments, *Finite Elements in Analysis and Design*. 42 (2005) 152-168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.finel.2005.06.001>.
- [43] C.S. Huang, O.G. McGee, M.J. Chang, Vibrations of cracked rectangular FGM thick plates, *Composite Structures*. 93 (2011) 1747-1764. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.01.005>.
- [44] M.M. Gasik, Micromechanical modelling of functionally graded materials, *Computational Materials Science*. 13 (1998) 42-55. doi:[https://doi.org/10.1016/S0927-0256\(98\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(98)00044-5).
- [45] H.M. Yin, L.Z. Sun, G.H. Paulino, Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions, *Acta Materialia*. 52 (2004) 3535-3543. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.04.007>.
- [46] M.-J. Pindera, J. Aboudi, S.M. Arnold, Analysis of spallation mechanism in thermal barrier coatings with graded bond coats using the higher-order theory for FGMs, *Engineering Fracture Mechanics*. 69 (2002) 1587-1606. doi:[https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(02\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00048-6).
- [47] M. Ostoja-Starzewski, I. Jasiuk, W. Wang, K. Alzebdeh, Composites with functionally graded interphases: Mesocontinuum concept and effective transverse conductivity, *Acta Materialia*. 44 (1996) 2057-2066. doi:[https://doi.org/10.1016/1359-6454\(95\)00269-3](https://doi.org/10.1016/1359-6454(95)00269-3).
- [48] H.-S. Shen, *Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells*, CRC press, 2016.
- [49] A.H. Akbarzadeh, A. Abedini, Z.T. Chen, Effect of micromechanical models on structural responses of functionally graded plates, *Composite Structures*. 119 (2015) 598-609. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.031>.
- [50] L.L. Mishnaevsky Jr, *Computational mesomechanics of composites: numerical analysis of the effect of microstructures of composites of strength and damage resistance*, John Wiley & Sons, 2007.
- [51] R.W. Zimmerman, Behavior of the Poisson Ratio of a Two-Phase Composite Material in the High-Concentration Limit, *Applied Mechanics Reviews*. 47 (1994) S38-S44. doi:10.1115/1.3122819.
- [52] R.B. Bouiadjra, A. Mahmoudi, S. Benyoucef, A. Tounsi, F. Bernard, Analytical investigation of bending response of FGM plate using a new quasi 3D shear deformation theory: Effect of the micromechanical models, *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*. 66 (2018) 317-328.
- [53] A.M. Zenkour, A simple four-unknown refined theory for bending analysis of functionally graded plates, *Applied Mathematical Modelling*. 37 (2013) 9041-9051. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.04.022>.