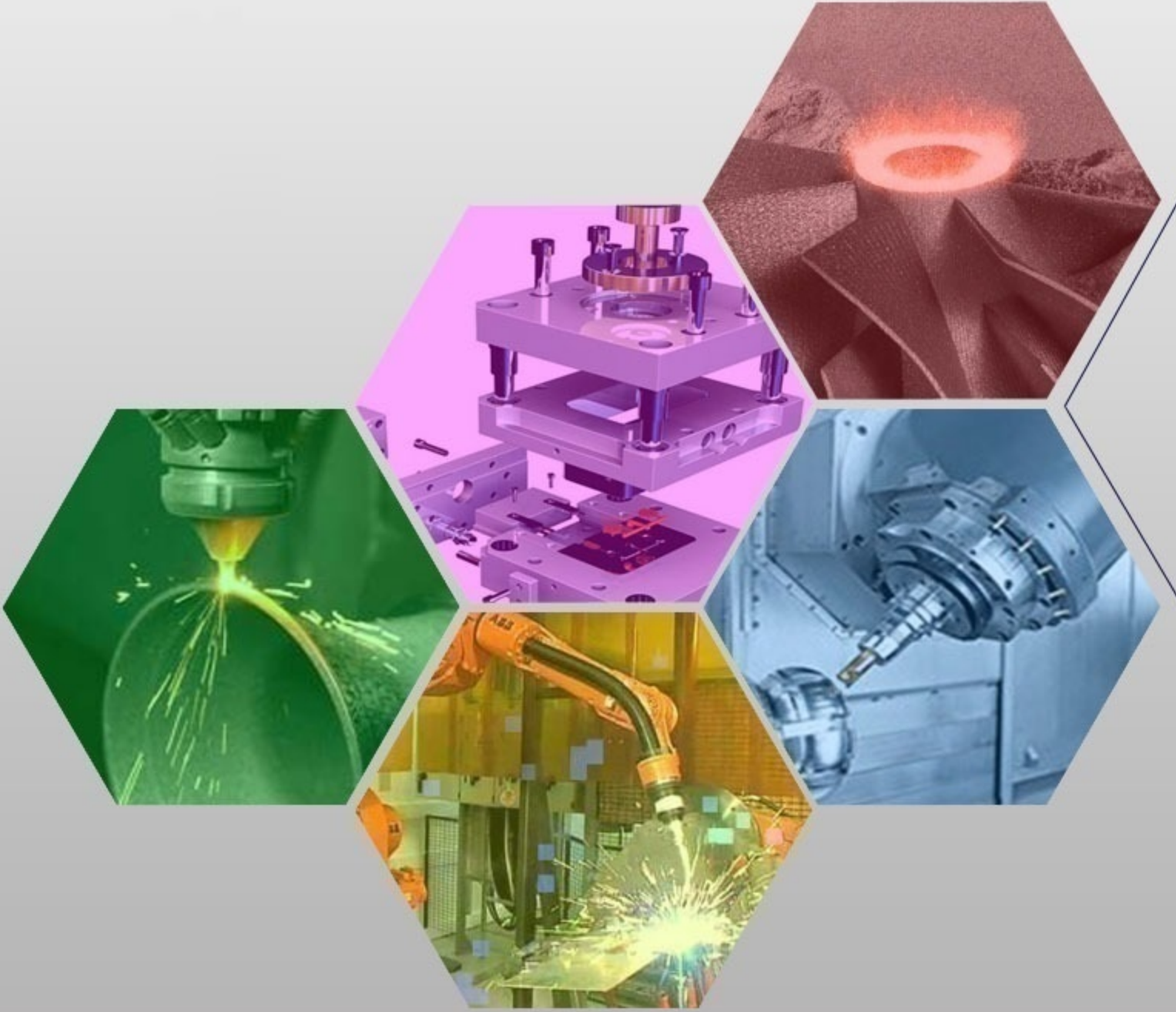




İMİLAT TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

CİLT:5 SAYI:2 YIL: 2024

e-ISSN: 2717-7475



MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

VOLUME:5 ISSUE:2 YEAR:2024



Cilt (Volume) : 5
Sayı (Issue) : 2
Yıl (Year) : 2024
e-ISSN: 2717-7475

İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları Manufacturing Technologies and Applications (MATECA)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca>

Honoray Editör (Honorary Editor)

Prof. Dr. Ulvi Şeker, Gazi Üniversitesi

Baş Editor (Editor in Chief)

Prof. Dr. Mustafa Günay, Karabük Üniversitesi

Yardımcı Editör (Associate Editor)

Prof. Dr. Alaattin Kaçal, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Alan Editörleri (Editors)

Prof. Dr. Turgay Kıvak, Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Sarıkaya, Sinop Üniversitesi
Doç. Dr. Yakup Turgut, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Serkan Apay, Düzce Üniversitesi
Dr. Munish Kumar Gupta, Opole University of Technology

Dil Editörü (Language Editor)

Doç. Dr. Mehmet Erdi Korkmaz, Karabük Üniversitesi

Teknik Editörler (Technical Editors)

Doç. Dr. Ramazan Özmen, Karabük Üniversitesi
Dr. Gürşah GÜRÜF, Karabük Üniversitesi

Danışma Kurulu (Advisory Board)

Prof. Dr. Can Çoğun, Çankaya Üniversitesi
Prof. Dr. Serdar Salman, Marmara Üniversitesi
Prof. Dr. Grzegorz M. Królczyk, Opole University of Technology
Prof. Dr. Mustafa Cemal Çakır, Uludağ Üniversitesi
Prof. Dr. Teyfik Demir, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. İhsan Korkut, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. İlyas Uygur, Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Ramazan Kaçar, Karabük Üniversitesi
Prof. Dr. Ulaş Çaydaş, Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Ayhan Erol, Afyon Kocatepe Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim Çiftçi, Çankırı Karatekin Üniversitesi
Doç. Dr. Mohd Fathullah Ghazali, University of Malaysia Perlis
Doç. Dr. Gültekin Uzun, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Çağrı Vakkas Yıldırım, Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Nafiz Yaşar, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Assist. Prof. Dr. Mozammel Mia, Ahsanullah University of Science and Technology
Assist. Prof. Dr. Üyesi Selçuk Yağmur, Gazi Üniversitesi
Assist. Prof. Dr. Nimel Sworna ROSS, University of Johannesburg
Assist. Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro Da Silva, Federal University of Uberlândia
Dr. Catalin Pruncu, University of Strathclyde



Cilt (Volume) : 5
Sayı (Issue) : 2
Yıl (Year) : 2024
e-ISSN: 2717-7475

Yayıncı (Publisher)
Mustafa GÜNAY

Web Sayfası (Web Page)
<http://dergipark.gov.tr/pub/mateca>

Yayın Tarihi (Publication Date)
Ağustos 2024 (August 2024)

Yayın Dili (Publication Language)
Türkçe / İngilizce (Turkish/English)

Yayın Aralığı (Publication Frequency)
Yılda üç kez yayınlanır (Tri-annual)

Yayın Türü (Publication Type)
Sürekli yayın (Periodical)

Kapak Tasarımı (Cover Design)
Ozan YETKİN

İletişim

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editör)
Telefon: +90 370 4187400
E-posta: matecajournal@gmail.com, mgunay@karabuk.edu.tr

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca> adresinden dergiye ilişkin bilgilere ve makalelerin tam metnine ulaşılabilir.

Contact

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editor)
Phone: +90 370 4187400

E-mail: matecajournal@gmail.com, mgunay@karabuk.edu.tr

Information about the journal and the full text of the articles can be accessed at <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca>.

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)	Sayfa (Page)
<p>Detecting Manufacturing Defects on Printed Circuit Boards Using Metamaterial-Based Circular Microstrip Patch Antenna (<i>Metamalzeme Tabanlı Dairesel Mikroşerit Yama Anteni Kullanılarak Baskı Devre Kartlarındaki Üretim Hatalarının Tespiti</i>) Sultan Suheyla BAKİR, Asaf Behzat SAHİN</p>	65-74
<p>Eriyik Yığıma Modelleme Süreç Parametrelerinin Taguchi Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Çoklu Yanıt Optimizasyonu (<i>Multiple Response Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters Using Taguchi-Based Gray Relational Analysis</i>) İnayet Burcu TOPRAK</p>	89-103
<p>Comparison of Energy Absorptive Capacities of Different Aluminum Alloy Foams Placed Inside the Crash Box (<i>Çarpışma Kutusunun İçine Yerleştirilen Farklı Alüminyum Alaşımli Köpüklerin Enerji Sönümleme Kapasitelerinin Karşılaştırılması</i>) Samet USLU, Batuhan KOCAOĞLU</p>	118-129
Derleme Makale (Review Article)	
<p>FDM Yöntemi ile Üretilen Sandviç Yapılarda Üretim Parametrelerinin Mekanik Performans Üzerindeki Etkisi (<i>The Effect of Production Parameters on the Mechanical Performance of Sandwich Structures Manufactured by FDM Method</i>) Kürşad Ertuğrul BAY, Gültekin UZUN</p>	75-88
<p>Şekil Hafızalı Ve Süperelastik Ni-Ti Esaslı Alaşım Nitinol'ün Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması (<i>Investigation of The Weldability of Nitinol, A Shape Memory And Superelastic Ni-Ti Based Alloy</i>) Necdet DÜZGÖREN, Volkan ONAR, Fatih ÖZEN</p>	104-117

Detecting Manufacturing Defects on Printed Circuit Boards Using Metamaterial-Based Circular Microstrip Patch Antenna

Sultan Suheyla Bakir^{1,2*} , Asaf Behzat Sahin² 

¹Turkish Aerospace, Ankara, Türkiye

²Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Türkiye

ARTICLE INFORMATION

Received: 30.04.2024

Accepted: 25.06.2024

Keywords:

Printed circuit boards
Metamaterials
Circular patch antenna
Non-Destructive testing
Sensors

ABSTRACT

This study introduces a novel all-signal-processing based printed circuit boards (PCB) defect detection tool. A microstrip circular patch antenna is designed having a metamaterial-based (MTM) ground plane to detect manufacturing defects of short circuits and open circuits on PCB. In that regard, PCB specimens of FR-4 as the substrate and copper microstrip lines as the conductive wiring lines are designed and manufactured. Five vertical copper lines printed side by side on the top of the substrate are used to demonstrate the working mechanism of the designed antenna sensor. Two different defect scenarios of open and short circuits with controlled locations are studied to determine variations in the return loss data of the proposed structure. Antenna return loss behaviors in terms of the locations of the faults are employed to prepare a database to detect not only the presence of the faults but also determine their locations. The designed metamaterial based circular patch antenna can be used successfully to determine not only the fault type but also the location of the fault within mm-range on the PCB board. Depending on the fault location, the resonance frequency as well as the return loss magnitude variation from -40dB to -16 dB around 1.5 GHz can be used for the sensing operation on PCB faults. Since the samples to be measured are not irreversibly damaged during the testing process, the proposed design can be considered a non-destructive measurement method to provide information about the type and location of defects with real-time measurement data.

Metamalzeme Tabanlı Dairesel Mikroşerit Yama Anteni Kullanılarak Baskı Devre Kartlarındaki Üretim Hatalarının Tespiti

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 30.04.2024

Kabul: 25.06.2024

Anahtar Kelimeler:

Baskılı devre kartı
Metamalzemeler
Dairesel yama anten
Tahribatsız muayene
Sensörler

ÖZET

Bu çalışmada, baskılı devre kartları (PCB) üzerindeki kısa devre ve açık devrelerden kaynaklanan imalat hatalarını tespit etmek için metamalzeme tabanlı (MTM) yer düzlemine sahip bir mikroşerit dairesel yama anteni tasarlanmıştır. Bu bağlamda altlık olarak FR-4 PCB numuneleri ve iletken kablolama hatları olarak bakır mikroşerit hatları tasarlanıp üretilmektedir. Alt tabakanın üst kısmında yan yana basılmış beş dikey bakır çizgi, tasarlanan anten sensörünün çalışma mekanizmasını göstermek için kullanılmıştır. Önerilen yapının geri dönüş kaybı verilerindeki değişiklikleri belirlemek için konumları kontrollü açık ve kısa devrelerden oluşan iki farklı arıza senaryosu incelenmiştir. Tasarlanan ve üretilen sensörün daha yüksek hassasiyetini elde etmek için, sekizgen bir halka ile çevrelenmiş çapraz çizgili MTM hücre yapıları, önerilen antenin yer düzleminin bir parçası olarak periyodik olarak yerleştirilmektedir. Arızaların konumlarına göre anten geri dönüş kaybı davranışları, arızaların sadece varlığını tespit etmekle kalmayıp aynı zamanda konumlarını da tespit etmek için bir veri tabanı hazırlamak amacıyla kullanılmıştır. Ölçülecek numuneler test sürecinde geri dönülemez bir hasara uğramadığından, önerilen tasarım, gerçek zamanlı ölçüm verileriyle kusurların türü ve konumu hakkında bilgi sağlayan, tahribatsız bir ölçüm yöntemi olarak değerlendirilebilir.

* Corresponding author, e-mail: s.suheylayilmazz@gmail.com

To cite this article: S.S. Bakir, A.B. Sahin, Detecting Manufacturing Defects on Printed Circuit Boards Using Metamaterial-Based Circular Microstrip Patch Antenna, Manufacturing Technologies and Applications, 5(2), 65-74, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1475763>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

1. INTRODUCTION (GIRIS)

Today's continuously improving technology and digitalization concepts have brought an ever-increasing usage of electronic devices through printed circuit boards (PCBs). The PCBs are thin boards made of insulating materials providing conductive wiring/pathways to connect various components [1]. PCBs are acknowledged as the main structures for electronic devices by properly combining electronic components. The demand for utilizing PCBs in all electronic structures has increased rapidly because of low costs, compact sizes, low electronic noise, stable production/performance, and durability [2]. Because of their increasing usage portfolio in related industries and consumer electronics, the risk of having defects on PCB cards becomes unavoidable. Any defect types on a PCB may affect the performance of electronic devices negatively as much as causing the devices not to function.

Unlike the importance and complexity of the defects on PCBs, determining these defects can be challenging through traditional methods. For this reason, identifying and repairing PCB defects at early manufacturing stages has become a critical topic in engineering and production processes.

Defects on PCBs refer to all defects/faults that occur in PCBs during the manufacturing process, from minor issues to major faults. It is crucial to identify these defects to maintain reliability and quality in line with various industry guidelines and reduce operational costs in the long run. The most common defect types are open and short circuits, insufficient or excessive soldering and paste, and missing through holes and components [3].

Open circuits affect the flow of electric current due to discontinuities in conductor paths/wirings. Unintended connections between individual conductor paths are known as short circuits and cause diversion of electric current. Other defects of inadequate/excessive solder or solder bridges may affect the electrical connections between components, eventually causing circuit failures.

High-tech PCB defect inspection techniques have recently become more reliable. Automated optical inspection (AOI), high-resolution cameras augmented with advanced image processing algorithms is used to identify surface faults quickly and with high accuracy [4, 5]. The AOI is a contactless verification approach using an image-processing algorithm to analyze failures through individual PCB layers on images. The image-processing tool evaluates the image as compared to an error-free image based on pre-determined error types. X-ray inspection methods of computed tomography (CT) are helpful to identify internal defects in more detail [6, 7]. Through this technique, internal forms and structural compositions are assessed through a non-destructive scheme. X-ray sources are used with respect to light sources of AOI. Machine learning (ML) and artificial intelligence (AI) have recently been used for detection accuracy and defect inspection [8,9]. With the help of convolutional neural network (CNN) algorithms, deep learning methods are enable to detect various defect types as well as organize them via image classification. However, these PCB defect inspection techniques have some limitations. For example, X-ray methods are time-consuming, optical methods are merely used for surface-based defects, and AI tools are not optimized for use with annotated data.

Thus, this study proposes a real-time, non-destructive, and accurate measurement method for detecting various PCB faults through a novel all-signal-processing-based technique. With this approach, the return loss of the antenna is measured using a network analyzer, which can be both vector and scalar. Depending on the fault location and type, the magnitude and/or operating frequency point is measured and correlated with the fault on PCBs. Since there are distinct differences between the antenna responses due to the fault, the system can estimate the fault location, size, and depth with high accuracy in real-time measurement.

2. MATERIAL AND METHOD (MATERYAL VE YÖNTEM)

In this study, a microstrip patch antenna is used. Such antennas conventionally consist of a patch, a dielectric layer with a known thickness value, and a conductive ground plane placed at the backside of the dielectric layer. Even though the patch can be in any shape including square or rectangular, we use a circular patch since it provides higher bandwidth, omnidirectional pattern due

to circular symmetry, lower cross-polarization, and less side lobe power compared to rectangular patch antennas.

2.1. Antenna and MTM Design (Anten ve MTM Tasarımı)

In order to calculate the operating frequency of the circular patch antenna, the fundamental resonance mode corresponding to circular patch should be initially considered. The resonance frequency of the fundamental mode of the circular microstrip patch antenna can be expressed as in (Eq.1):

$$f = \frac{c}{2\pi R \sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{1}$$

In this formula c is the speed of light in vacuum or free space, R is the radius of the circular patch, and ϵ_{eff} is the effective permittivity of the microstrip line which can be approximated as in (Eq.2):

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{R}\right)^{-\frac{1}{2}} \tag{2}$$

Here, ϵ_r is the relative electrical permittivity of the substrate and h is the substrate height. If we the effective permittivity is substituted into the formula for resonance frequency, the following can be obtained as in (Eq.3):

$$f = \frac{c}{2\pi R \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{R}\right)^{-\frac{1}{2}}}} \tag{3}$$

One can simply found the radius of the patch using the equation above as in (Eq.4):

$$R = \frac{c}{2\pi f} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{R}\right)^{-\frac{1}{2}}} \tag{4}$$

This expression is complicated to solve due to the presence of another R in the equation. Therefore, this is normally solved iteratively or via use of numerical methods.

The structure designed and manufactured in this study is composed of a microstrip patch antenna in circular shape made with copper of a thickness of 0.035 mm. The copper thickness is the standard thickness value commonly used for printed circuit boards having FR4 substrate. The designed copper patch is placed on a dielectric layer, FR-4, with a thickness of 1.6 mm. In order to design the antenna structure to operate at a desired frequency, the radius of the patch should be calculated. Considering that R refers to the patch radius and h is the substrate thickness, then the radius can be calculated using the f_r resonance frequency and ϵ_r the dielectric constant of the substrate (FR-4) as in (Eq.5) [10]:

$$R = \frac{F}{\sqrt{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1.7726 \right]}} \tag{5}$$

In this equation, $F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$ is associated with the relative permittivity and the operating frequency. The radius R of the circular patch was optimized and found to be approximately 26 mm for the frequency point of $f = 1.8$ GHz. For this optimization, the sensitivity of the LPKF Protomat prototype builder which is 0.1 mm. This prototype builder machine is used to manufacture the proposed metamaterial based antenna structure. Since the metamaterial lines and cells need to be thick enough to be manufactured, 0.48 mm thickness is selected after a few manufacturing trials. Lower thickness values for the metamaterial lines cannot be successfully produced. After obtaining the most appropriate metamaterial line thickness value, the cell structure was simulated and the

operating frequency is determined. At the last step, radius of the circular patch of the antenna is tuned by using parameter sweep technique that comes with the CST Microwave Studio software.

After obtaining the detailed dimensions of the microstrip patch antenna in a circular shape, a metamaterial cell structure that will be used with the same layer of the ground plane can be designed. Metamaterials are man-made materials providing unusual properties such as negative refractive index that cannot be obtained using natural materials. The idea of having a negative refractive index, meaning negative electrical permittivity and negative magnetic permeability, originated from the work of Victor Georgievich Veselago, a famous Russian physicist [11]. To increase the sensitivity of the designed structure, the following MTM cell structure was designed and optimized using an electromagnetic simulation tool. The detailed dimensions of the finalized MTM structure are given in the following figure (Fig. 1). As seen in the figure, the structure is composed of three vertically and three horizontally placed lines surrounded by an octagonal ring. The complete reflecting part of the structure is designed by copper with a thickness of 0.035 mm, and FR-4 dielectric with a permittivity (ϵ_r) of 4.3 with a thickness value of $h=1.6$ mm is used as the substrate.

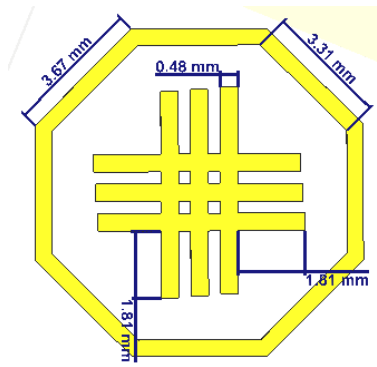


Figure 1. Metamaterial cell structure with detailed dimensions (Detaylı boyutlarda metamateriyal hücre yapısı)

The designed MTM cell structures are then placed on the background layer of the circular patch antenna. A total of 25 cell structure is placed at the ground plane for more sensitivity. The detailed dimensions of the structure are given in the figure below (Fig. 2).

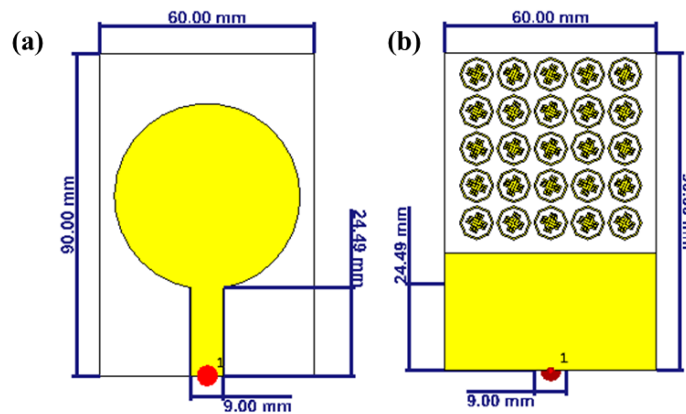


Figure 2. Front-side (a) and back-side views (b) of the MTM based circular patch antenna (MTM tabanlı dairesel yama antenin ön (a) ve arkadan görünüşleri (b))

Following the simulations, the antenna is manufactured along with the PCB boards used for different fault scenarios, which can be seen in Fig. 3. To manufacture the designed configuration, FR-4 substrate is used for the dielectric layers while copper is used for the conductive layers for all the configurations. LPKF Protomat prototype builder is used for this process.

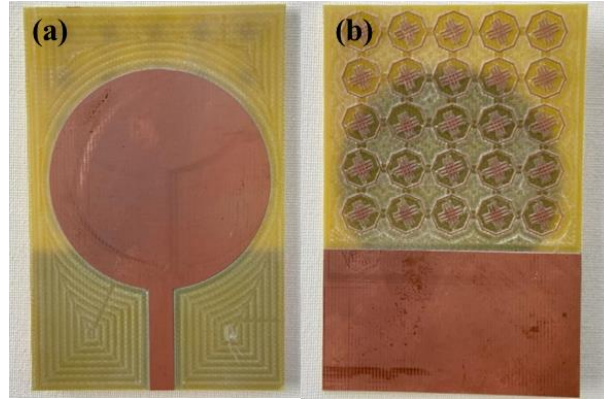


Figure 3. Front-side (a) and back-side (b) of the manufactured MTM based circular patch antenna (Üretilen MTM tabanlı dairesel yama antenin ön yüzü (a) ve arka yüzü (b))

2.2. PCB Fault Scenarios (PCB Arıza Senaryoları)

In this part, a PCB board with five straight copper lines is placed at the back side of the antenna across the ground plane and MTM cells. The PCB board is tested according to three scenarios; no-fault, open circuit, and short circuit cases. To clearly illustrate the working mechanism of the proposed structure, faults are made of all copper lines as demonstrated in the following figures (Fig. 4 and Fig.5).

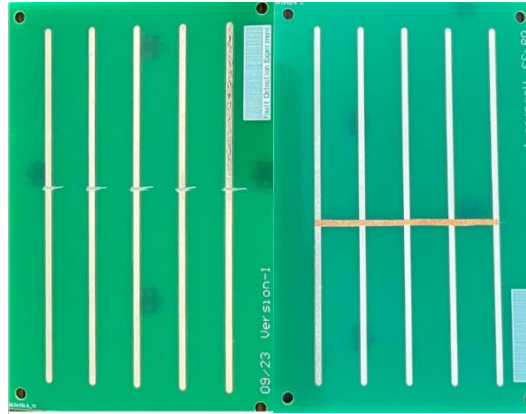


Figure 4. PCBs with open circuit fault (left) and short circuit fault (right) (Açık devre arızalı (solda) ve kısa devre arızalı (sağda) PCB'ler)

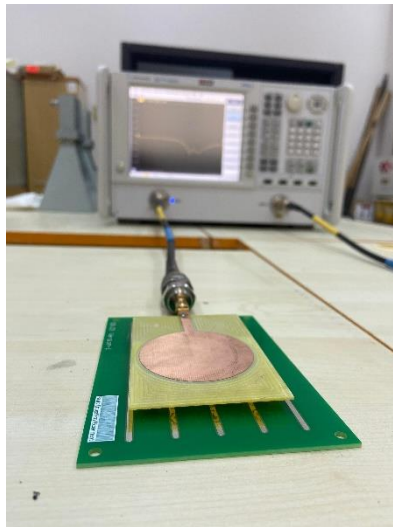


Figure 5. Measurement setup demonstrating the network analyzer, antenna, and PCB sample (Ağ analizörünü, anteni ve PCB örneğini gösteren ölçüm kurulumu)

3. EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS (DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI)

Although numerous defect types can be encountered on PCBs, this study focuses on two scenarios of open circuit and short circuit cases. Initially, the results of the error-free PCB board is given below in Fig.6. In both cases, open and short circuit lines are made using seven different locations starting from the center of the electronic board. The board is prepared using five vertical lines with 2 mm of width and 0.035 mm of thickness using copper. Through employing an optimization program, detection of the exact size, depth, type, and location of various defect types will be one of our future studies since it will require numerous samples and simulations to fill a necessary database.

For the experimental tests, a vector network analyzer is used to obtain scattering parameters, also known as S-parameters. Since we only used one port, obtaining S11 (Reflection) is sufficient. For this reason, only the signal sent and received from the same port (Port-1) in terms of frequency (GHz) is used for the measurements in both fault scenarios. In order to eliminate the cable loss and the adapter effects, the VNA is calibrated using a calibration kit including Short, Open and Load apparatus for the corresponding frequency range.

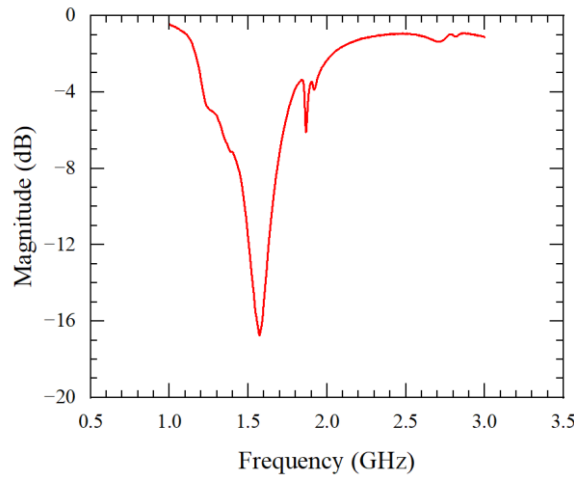


Figure 6. Return Loss of the PCB without any physical faults/defects (Herhangi bir fiziksel arıza/kusur olmadan PCB'nin geri dönüş kaybı)

3.1. Open Circuit Case (Açık Devre Durumu)

A total of 7 different variations of each are used for both open and short circuit cases where location of the defect is shifted from 0 to 18 mm by 3 mm of increments. For the open circuit case, a horizontal cut is made for all vertical lines with seven different locations (Fig. 7). To use the designed structure as the sensor for detecting PCB faults, the return loss (S11) behavior of the design should provide a linear variation depending on the fault type and location. For this purpose, the simulation and experimental studies are performed, and the results are presented in Fig. 8 and Fig. 9, respectively.

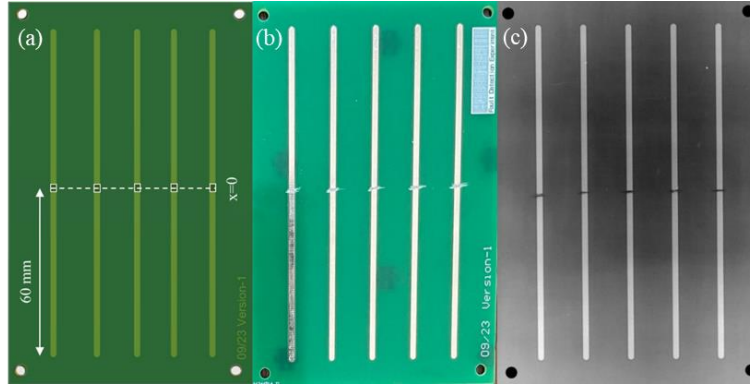


Figure 7. The design representation of the PCB (a), image of the PCB with open-circuit defect at $x=0$ (b), and X-ray image of the PCB with open-circuit defect at $x=0$ (c).

The straight horizontal cuts were made on the vertical lines for different locations from $x=0$ (center of the PCB) to $x=18$ mm.

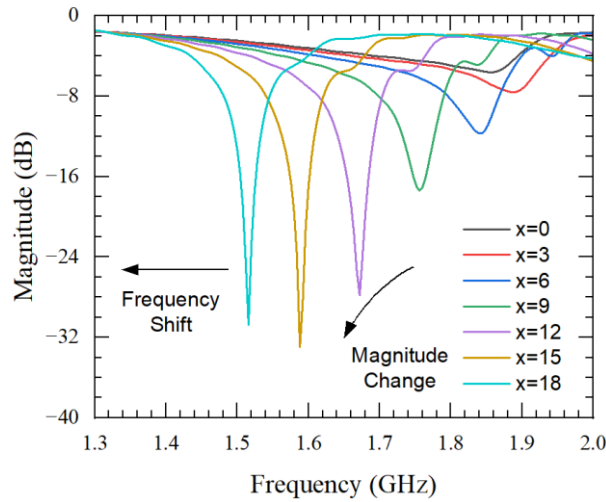


Figure 8. Simulation results for the Return Loss Behavior with respect to different locations of open circuits (Açık devrelerin farklı konumlarına göre geri dönüş kaybı davranışı için simülasyon sonuçları)

The simulation is conducted by adding 1mm thick cuts on the lines, and the results are shown above. As can be seen in the figure, not only the resonance frequencies but also the amplitudes of the return loss curves change depending on the fault location. This change is almost linear providing a sensitive determination function for the PCB fault location. In addition, experimental studies are performed using the manufactured antenna and the PCBs using a Vector Network Analyzer (VNA) capable of measuring 0-43 GHz. The obtained results for all locations are drawn in the following figure (Fig. 9). As seen in the figure below, the resonance frequency points shift left to lower frequency points as the location of the open circuit fault increases to higher values. This behavior is also observed in the simulation results with only small margins. The differences might be caused by laboratory conditions, manufacturing tolerances, and calibration errors. However, the overall behavior is almost the same, and the shift amount in the frequency is almost linear like the simulations.

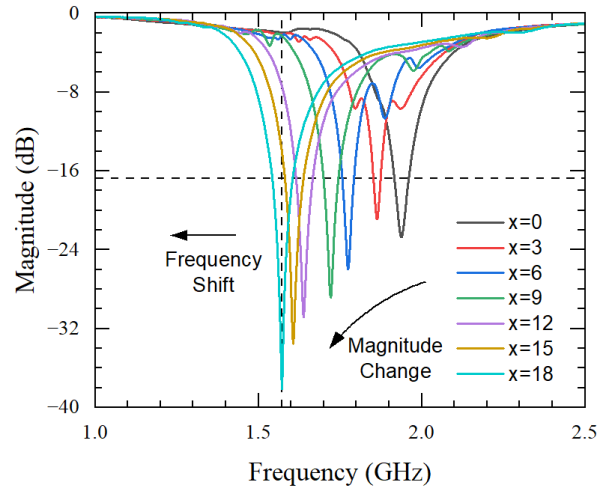


Figure 9. Experiment results for the Return Loss Behavior due to different locations of open circuits (Açık devrelerin farklı konumlarından kaynaklanan geri dönüş kaybı davranışı için deney sonuçları)

3.2. Short Circuit Case (Kısa Devre Durumu)

In this case, microstrip lines perpendicular to the direction of the vertical lines are placed, and the return loss behaviors are obtained depending on the various locations. The fault locations are changed by moving the horizontal tape to seven different locations (Fig. 10).

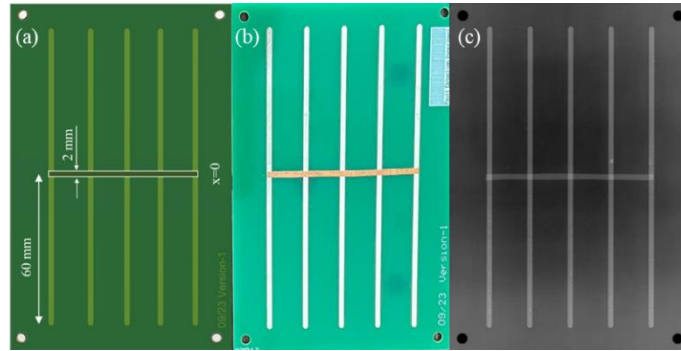


Figure 10. The design representation of the PCB (a), image of the PCB with short-circuit defect at $x=0$ (b), and X-ray image of the PCB with short-circuit defect at $x=0$ (c).

The results are given in the figure below (Fig. 11) and the magnitude and frequency values corresponding to the location of the faults are tabulated for comparison.

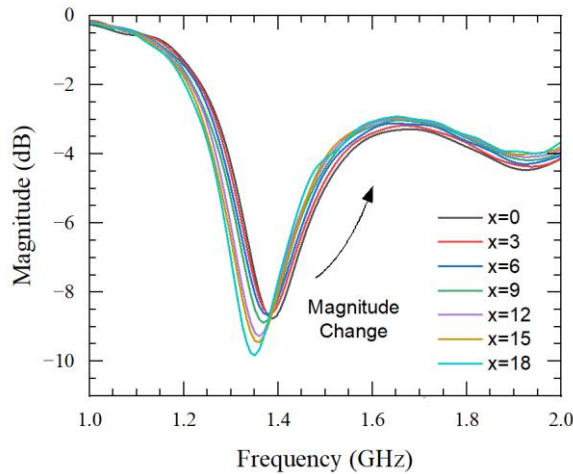


Figure 11. Simulation results for the Return Loss Behavior with respect to different locations of short circuits (Kısa devrelerin farklı konumlarına göre geri dönüş kaybı davranışı için simülasyon sonuçları)

As seen in the figure above, the location of the short circuit fault causes magnitude changes similar to the open circuit case. In addition, all short circuit cases are classified at a frequency range lower than open circuit results, which makes it possible to easily distinguish the fault type. Experimental measurement results obtained using the VNA are given in the following figure for all short circuit cases. As expected from the simulation, the magnitude values of the return loss data and the resonance frequency change depending on the fault location.

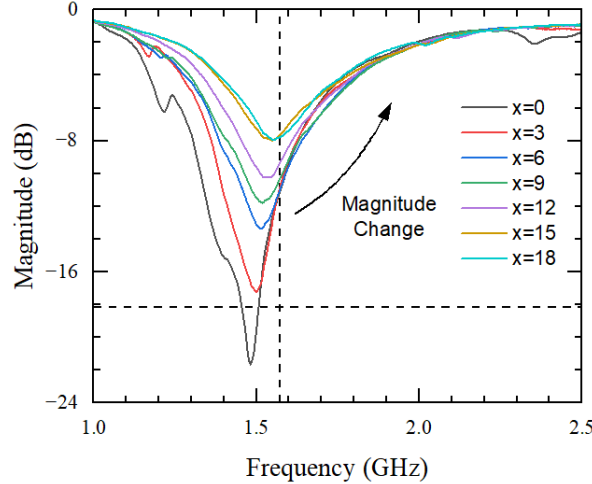


Figure 12. Experiment results for the Return Loss Behavior due to different locations of open circuits (Açık devrelerin farklı konumlarından kaynaklanan geri dönüş kaybı davranışı için deney sonuçları)

Experimental measurement results obtained using the VNA are given in the figure above for all short circuit cases (Fig. 12). As observed in the simulation, the magnitude values of the return loss data and the resonance frequency change depending on the fault location in the experimental study. It can be seen that the resonance frequency varies between 1.4 – 1.5 GHz band for short circuit case, while these values are between 1.5 – 2.0 GHz band for the open circuit case. For both cases, the bands to be used for the sensing operating are sufficient enough to have high accuracy in the measurements compared to the studies in the related literature. Studies focusing on the non-destructive testing of PCB faults are generally based on image/video processing techniques using several methods, such as YOLO. On the other hand, the proposed design only requires a network analyzer and a testing cable rather than having a complex testing structure. The accuracy of the tests performed in a study using image processing is around 75-80 % for open and short circuit cases [12]. However, such detection can be made using the proposed design with almost 1mm sensitivity with distinct separation and detection of PCB faults using a non-expensive antenna structure.

4. CONCLUSIONS



In conclusion, the designed structure is evaluated both theoretically and experimentally for various defect scenarios, and results are validated in terms of the working mechanism of the proposed design within 1.5 - 2.0 GHz frequency window. The designed metamaterial based circular patch antenna can be used successfully to determine not only the fault type (open, short circuit in our case) but also the location of the fault within mm-range on the PCB board. Depending on the fault location, the resonance frequency as well as the return loss magnitude (S11-dB) variation from -40dB to -16 dB around 1.5 GHz can be used for the sensing operation on PCB faults. The structure is designed so that it can be optimized easily to any other frequencies for PCBs with different wiring types and sizes. Even though only open and short circuit faults are investigated in this study, other common types of faults seen on PCBs can also be studied using the same structure in future studies. This proposed approach offers a non-destructive, rapid, and accurate all-signal-processing-based measurement method compared to the state-of-the-art solutions. A follow-up work shall include other aforementioned defect types with controllable factors such as size, location, and quantity. Also, future studies ought to include the other common PCB defect types (e.g., soldering

defects, missing holes) etc.) as well as combining two individual defects to assess the capability of the presented technique. As a result, the developed design can be used for quality control of PCB production plants along with other related industries to detect defect types and locations.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. W. Jillek, W. Yung, Embedded components in printed circuit boards: a processing technology review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 25: 350–360, 2005.
2. A.C. Marques, J.-M. Cabrera, C.F. Malfatti, Printed circuit boards: A review on the perspective of sustainability, *Journal of Environmental Management*, 131: 298-306, 2013.
3. K.P. Anoop, N.S. Sarath, V.V. Sasi Kumar, A review of PCB defect detection using image processing, *International Journal of Engineering and Innovative Technology* 4(11): 188-192, 2015.
4. H. Rau, C-H. Wu, Automatic optical inspection for detecting defects on printed circuit board inner layers, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25: 940-946, 2005.
5. W. Dai, A. Mujeeb, M. Erdt, A. Sourin, Soldering defect detection in automatic optical inspection, *Advanced Engineering Informatics*, 43: 101004, 2020.
6. N. Asadizanjani, S. Shahbazmohamadi, M. Tehranipoor, D. Forte, Non-destructive pcb reverse engineering using x-ray micro computed tomography, *International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA)*, 1-5 November 2015, Oregon, USA.
7. Y. Zhou, M. Yuan, J. Zhang, G. Ding, S. Qin. Review of vision-based defect detection research and its perspectives for printed circuit board, *Journal of Manufacturing Systems*, 70: 557-578, 2023.
8. G. Mahalingam, K. M. Gay, K. Ricanek. Pcb-metal: A pcb image dataset for advanced computer vision machine learning component analysis, *16th International Conference on Machine Vision Applications (MVA)*, 27-31 May 2019, Tokyo, Japan.
9. J. Schmitt, J. Bönig, T. Borggräfe, G. Beitingner, J. Deuse. Predictive model-based quality inspection using machine learning and edge cloud computing, *Advanced Engineering Informatics*, 45: 101101, 2020.
10. C.A. Balanis, *Antenna theory analysis and design*, 3rd Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.
11. V.G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , *Soviet Physics Uspekhi*, 10, 509-514, 1968.
12. V. Kaya, İ. Akgül, Detection of defects in printed circuit boards with machine learning and deep learning algorithms, *European Journal of Science and Technology*, 41: 183-186, 2022.

FDM Yöntemi ile Üretilen Sandviç Yapılarda Üretim Parametrelerinin Mekanik Performans Üzerindeki Etkisi

Kürşad Ertuğrul Bay^{1*} , Gültekin Uzun² 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 22.05.2024

Kabul: 01.07.2024

Anahtar Kelimeler:

Eriyik biriktirme yöntemi
Sandviç yapılar
Üretim parametreleri
Mukavemet
Eklemeli imalat

ÖZET

Eklemeli imalat ve üretilen malzeme teknolojisi her geçen gün daha fazla ilgi görmektedir. Eklemeli imalat yöntemleri içinde Eriyik Biriktirme Yöntemi (FDM) en yaygın kullanılan üretim metodudur. Eriyik Biriktirme Yönteminde kullanılan makinelerin maliyetinin ucuz olması, kompleks geometri yapıların herhangi bir kesici takıma ihtiyaç duyulmadan kısa üretim döngü sürelerinde üretilebilmesi ve düşük artık malzeme oranları gibi unsurlar, yöntemin sunduğu avantajlar arasında gösterilmektedir. Bu yöntemle üretilen sandviç yapılar, üstün özellikleri ve fonksiyonelliği nedeni ile araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Sandviç yapılar, iç ve dış katmanlar arasında bir çekirdek malzemesiyle birleştirilen yapılar olarak tanımlanır ve genellikle hafiflikleri ve yüksek mukavemetleri nedeniyle tercih edilirler. Bu çalışma, sandviç yapıların mukavemetini etkileyen faktörleri, malzeme seçimini, katmanlama yöntemlerini ele almaktadır. Araştırmadan elde edilen en önemli bulgu, sandviç yapıyı oluşturan polimerlerin ayrı ayrı sergiledikleri mukavemet özelliklerinin, sandviç yapıyı oluşturmak için bir araya geldiklerinde artırılabilirliği. Yapılan araştırma, Eriyik Biriktirme Yöntemiyle üretilen sandviç yapılarda üretim parametrelerinin mukavemet özellikleri üzerindeki etkisini anlamak, üretim sürecini optimize etmek ve gelecekte yapılacak uygulamalara bir temel oluşturmak için kılavuz sağlamayı amaçlamaktadır.

The Effect of Production Parameters on the Mechanical Performance of Sandwich Structures Manufactured by FDM Method

ARTICLE INFO

Received: 22.05.2024

Accepted: 01.07.2024

Keywords:

FDM
Sandwich structures
Production parameters
Strength
Additive manufacturing

ABSTRACT

Additive manufacturing and the manufactured material technology are gaining increasing attention day by day. Among additive manufacturing methods, Fused Deposition Modeling (FDM) is the most commonly used production method. Factors such as the low cost of machines used in FDM, the ability to produce complex geometric structures in short production cycle times without the need for any cutting tools, and low waste material ratios are among the advantages offered by the method. Sandwich structures produced by this method attract researchers' interest due to their superior properties and functionality. Sandwich structures are defined as structures that are combined with a core material between inner and outer layers and are generally preferred for their lightweight and high strength. This study addresses the factors influencing the strength of sandwich structures, material selection, and layering methods. The most significant finding obtained from the research is that the strength properties exhibited separately by the polymers forming the sandwich structure can be enhanced when they come together to form the sandwich structure. The research aims to provide guidance for understanding the effect of production parameters on the strength properties of sandwich structures produced by Fused Deposition Modeling (FDM), optimizing the production process, and laying the groundwork for future applications.

* Corresponding author, e-mail: kertugrul.bay@gazi.edu.tr

To cite this article: K.E. Bay, G. Uzun, The Effect of Production Parameters on the Mechanical Performance of Sandwich Structures Manufactured by FDM Method, Manufacturing Technologies and Applications, 5(2),75-88, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1488266>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

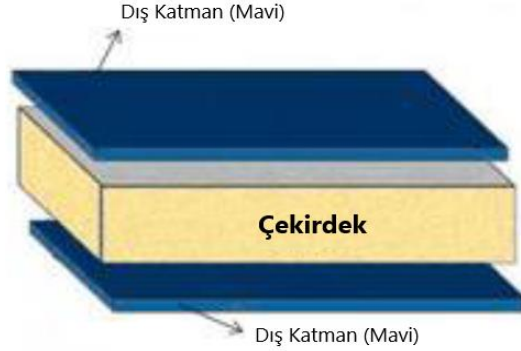
Modern (alışılmamış) imalat yöntemlerinden birisi de eklemeli imalattır. Eklemeli imalat, üç boyutlu (3B) geometrik verileri kullanarak malzemenin katmanlar halinde üst üste eklenmesiyle, kompleks geometriye sahip parçaların hızlı üretimini sağlayan bir tekniktir. Bu teknikte parça, bilgisayar destekli tasarım programları aracılığıyla çizim, tersine mühendislik, gibi farklı metodlarla elde edilen 3B modelden üretilir. 3B model çok sayıda ince katmanlara ayrılır (dilimlenir) ve üretim sistemleri, parçayı tamamlayana kadar her bir katmanı ardışık olarak üretmek için bu geometrik verileri kullanır. Eklemeli imalat teknolojisi, Tıp, Uzay, Havacılık, Otomotiv, Dişçilik, Askeri donanım, Heykelcilik, Kuyumculuk ve Eğitim gibi birçok alanda üretilen parçalar ve ürünlerde kullanılmaktadır. Son yıllarda, eklemeli imalat teknolojisinin kullanım alanı hem yaygınlaşmakta hem de teknolojisi sürekli gelişerek daha fazla alanda uygulanmaktadır [1]. 3 Boyutlu yazıcıların çalışma standartları temelde birbirlerine benziyor olsa da kullanım alanı ve amacına göre malzeme ve yöntemler farklılıklar gösterebilmektedir. 3 Boyutlu yazıcıların çeşitli malzeme ve yöntem uygulamaları şunlardır; Stereolitografi (SLA), Katı Zemin Kırılma (SGC), Lamine Nesne İmalatı (LOM), Eriyik Yığarak Modelleme (FDM), Çok Jetli (Polyjet-Multijet) Modelleme (MJF), Seçmeli Lazer Sinterleme ve Ergitme (SLS/SLE), Elektron Işınli Ergitme (EBM) [2]. Eklemeli imalat yöntemleri içerisinde FDM yöntemi en yaygın kullanıma sahip ve uygulanabilir imalat metodudur. FDM yönteminde, malzeme katmanlarını 3B yazdırmak için termoplastik bir polimerin filamentini kullanılır. Filament, yarı sıvı bir duruma ulaşmak için nozulde ısıtılır ve daha sonra platform üzerinde veya önceden basılmış katmanların üzerine ekstrüde edilir. Polimer filamentin termoplastik özelliği, filamentlerin baskı sırasında birbirine kaynaşmasını ve baskıdan sonra oda sıcaklığında katılmasını sağlayan bu yöntem için temel bir özelliktir. Düşük maliyet, yüksek hız ve işlemin basitliği FDM'nin temel avantajlarıdır. Öte yandan, zayıf mekanik özellikler, katman katman görünüm, düşük yüzey kalitesi [3-4] ve sınırlı sayıda termoplastik malzeme kullanımı FDM'nin ana dezavantajlarıdır [3-5]. Katman kalınlığı, filamentlerin genişliği ve oryantasyonu ve hava boşluğu (aynı katmanda veya katmanlar arasında), basılı parçaların mekanik özelliklerini etkileyen ana işlem parametreleridir [3]. Son çalışmalar ışığında hafif sandviç panellerin kullanımı, yüksek eğilme dayanımı-ağırlık oranı ve mükemmel ısı yalıtımı gibi özellikleri nedeniyle önem kazanmıştır [6]. Hafif sandviç yapılar günümüzde havacılık, denizcilik, otomobil, yel değirmeni ve bina endüstrisi sektörlerinde, özellikle yüksek eğilme sertliği, ısı yalıtımı ve yüksek enerji emme yetenekleri gibi mükemmel çok işlevli özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Sınırlı enerji ve malzeme kaynaklarıyla ilgili olarak, hafif mikro mimarili sandviç yapılar, yapısal sertlik, ısı alışverişi ve elektriksel özellikler gibi birden fazla işlevi yerine getirirken aynı zamanda yapısal elemanların ağırlığını azaltabildikleri için artan bir ilgi görmektedir [7].

Bu makalede, FDM yöntemi ile üretilen sandviç yapıların genel özellikleri, kullanım alanları, üretim parametrelerindeki değişikliklerin bu yapıların mukavemet performansı üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

2. SANDVIÇ YAPILAR VE ÖZELLİKLERİ (SANDWICH STRUCTURES AND THEIR CHARACTERISTICS)

Sandviç yapılar genellikle düşük ağırlık, yüksek eğilme mukavemeti ve yüksek enerji emilimi gerektiren yapısal uygulamalar için kullanılır. Deforme olabilen çekirdek, eğilme momentlerine karşı direnç sağlarken, aynı zamanda elastik veya kalıcı olarak deforme olarak yapı üzerindeki herhangi bir darbeye direnmede önemli bir rol oynar [8-9]. Sandviç yapının çok işlevli performansı büyük ölçüde yapı konfigürasyonuna ve sandviç malzeme seçimine bağlıdır. Sandviç yapıların avantajları arasında gelişmiş enerji emme özellikleri, büyük sertlik/ağırlık oranları, mükemmel balistik direnç performansı ve iyi termal ve akustik izolasyon özellikleri yer almaktadır [10]. Genel olarak, endüstriler çeşitli uygulamalar için uygun hafif yapılar aramaktadır ve umut verici performans sunan kategorilerden biri de sandviç yapılarıdır. Bir sandviç yapı, iki yüz tabakası arasına yerleştirilmiş hafif bir çekirdekten oluşur (Şekil 1). Çekirdeğin yapısının, tüm yapının bükülme ve burkulma direnci ile ilgili kritik bir faktörü koruduğuna dikkat edilmelidir. Minimum ağırlıkla gelişmiş mekanik özellikler sunabilen köpük çekirdek ve kafes çekirdek gibi çeşitli sandviç

yapı türleri de vardır [11]. Günümüzde sandviç yapılar en iyi performans gösteren yastıklama çözümleri arasında yer almaktadır. Özellikle metalik, polimerik ve hibrit sandviç yapılar olarak kategorize edilebilirler. Hem metalik bir iç çekirdek hem de kaplamalarla karakterize edilen ilk sandviç yapı kategorisi, metallerin olağanüstü plastikleşme yetenekleri sayesinde yüksek oranlarda darbe enerjisinin emilmesine olanak tanır. Ancak, bu kategoriye ait emiciler neredeyse çoğunlukla ağır olmaktadır. Öte yandan, sandviç yapıların ikinci kategorisi, her ikisi de metalik malzemelere kıyasla genellikle daha hafif olan plastik malzemelerden yapılmış bir iç çekirdek ve kaplamalar ile karakterize edilir. Bununla birlikte, elastik ve kırılma mekanizmalarıyla ilgili enerji emme kabiliyetleri, metalik emiciler tarafından sağlandan çok daha azdır [12]. Sandviç paneller genellikle yüksek hızlı darbelere maruz kalabilecek uygulamalarda kullanılır, bu nedenle darbe yüklemesi altındaki davranışlarını incelemek önemlidir [13].



Şekil 1. Sandviç yapı (Sandwich structure) [14]

3. SANDVIÇ YAPILARDA ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MUKAVEMETE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ (ANALYSIS OF THE EFFECTS OF PRODUCTION PARAMETERS ON THE STRENGTH OF SANDWICH STRUCTURES)

3.1. Üretim Parametrelerinin Çekme Mukavemetine Etkisi (The Effect of Production Parameters on Tensile Strength)

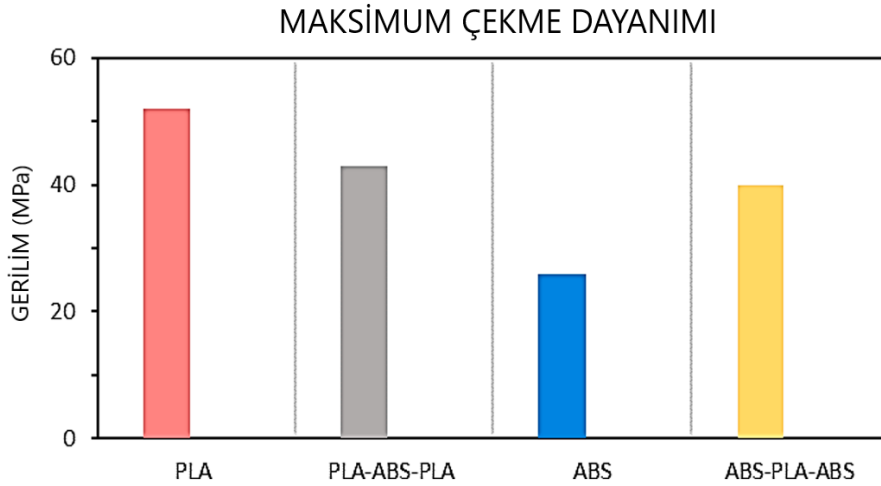
FDM yönteminde üretim parametreleri (Katman kalınlığı, baskı hızı, örgü açısı, tabla ve nozul sıcaklığı vb.) parçaların mekanik özelliklerini etkileyen ana işlem parametreleridir. Özellikle sandviç yapı içerisinde bulunan farklı malzeme konfigürasyonu malzeme mukavemetini etkileyen en önemli parametre olarak ifade edilmektedir. Bu parametrelerin mukavemete olan etkileri literatür ile desteklenerek aşağıda sunulmuştur.

Dhinesh ve arkadaşları, farklı oranlarda ürettikleri polilaktik asit (PLA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) numunelerinin mekanik testlerini gerçekleştirmişlerdir. Testlerde, biri 50'nin altında (38 mm/sn) ve diğeri 50'nin üzerinde (52 mm/sn) olmak üzere iki farklı ilerleme hızı kullanmışlardır. 52 mm/sn'de daha yüksek sayıda ürün üretmelerine rağmen, 38 mm/sn'de üretilen numunelerin daha iyi sonuçlar verdiğini, çünkü polimerik mikrofiber yapının çok daha kesin ve tekdüze olup genel mukavemeti arttırdığını belirtmişlerdir. Buldukları sonuçlarda %20 ABS ve %80 PLA numunesinin en yüksek çekme mukavemetine (21.4 MPa) sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Testten elde ettikleri bir diğer önemli çıkarım da PLA miktarı azaldıkça çekme mukavemetinin büyük ölçüde azaldığı ve dolayısıyla %100 ABS (13.46 MPa) ve %20 PLA - %80 ABS (13.2 MPa) numunelerinin daha az çekme mukavemetine sahip olduğunu rapor etmişlerdir [15]. Çekme testi sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çekme testi sonuçları (Tensile test results) [15]

Malzemeler	Maksimum Yük (KN)	Kopma Yüğü (KN)	Gerilim Anındaki Yük (8%) (KN)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)
ABS	0.68	0.42	0.42	13.46
PLA	1.03	0.96	0.73	20.35
20%ABS, 80%PLA	1.18	1.07	0.83	21.4
%50%50 SANDVIÇ	0.71	0.53	0.57	14.45
80%ABS, 20%PLA	0.65	0.44	0.43	13.2

Patro ve arkadaşları, polilaktik asit (PLA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) polimerlerini kullanarak sandviç yapı oluşturmuşlar ve bu yapıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Numuneleri %100 doluluk oranı ve 70 mm/s baskı hızıyla üretmişlerdir. Deneyden elde ettikleri sonuçlar neticesinde sandviç yapıların saf ABS numunelerinden daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Test edilen kombinasyonlar arasında, çekirdek olarak ABS ve dış katman olarak PLA içeren yapının en iyi sonuçları gösterdiğini (43 Mpa) gözlemlemişlerdir. Ayrıca çalışma, ABS'nin yüzey ve PLA'nın çekirdek olarak kullanıldığı sandviç yapının (40 Mpa) saf ABS'ye (26Mpa) kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu da rapor etmişlerdir [16]. Çekme dayanımı verileri Şekil 2'de gösterilmiştir.



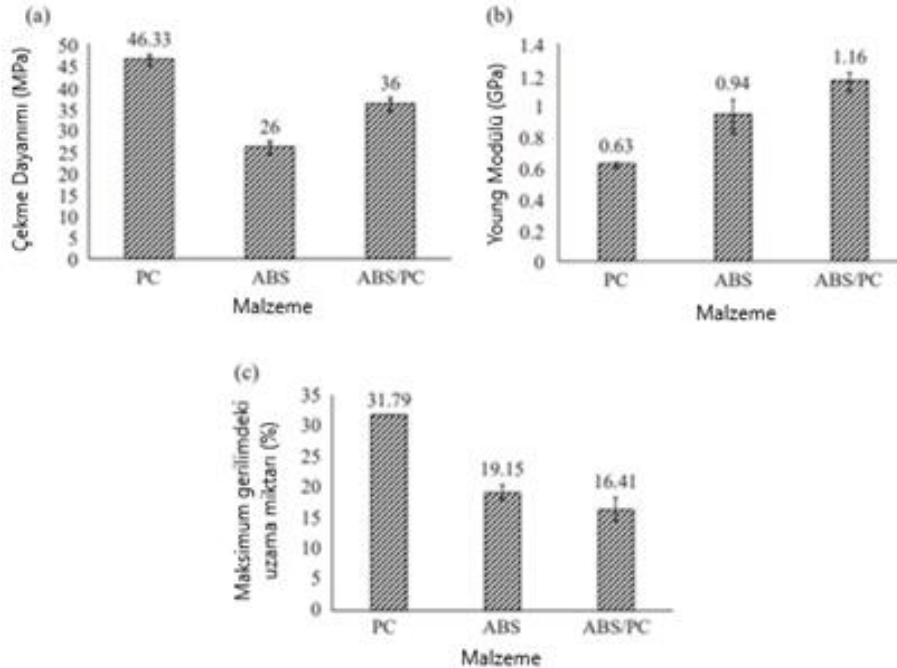
Şekil 2. Maksimum çekme dayanımı (Ultimate tensile strength) [16]

Mishra ve arkadaşları, farklı örgü açısına sahip iki malzemeli laminat yapıların mekanik davranışını gözlemek için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Polilaktik asit (PLA) ve polilaktik asit karbon siyahı (PLA CB), malzemelerini ise hammadde olarak seçmişlerdir. Çok malzemeli yapılar arasında 0° örgü açısıyla üretilen numunenin en yüksek çekme mukavemetine sahip olduğunu (35.09 MPa) ve bunu sırasıyla 45°/-45°, 90° örgü açılarının takip ettiğini belirtmişlerdir. Bu sonuçlara dayanarak çekme yönüne paralel örgü açısının maksimum mukavemet sağladığını rapor etmişlerdir. Dolayısıyla, laminat yapılarda her bir katmanının örgü açısının çekme mukavemeti belirlenmesinde baskın bir rol oynadığını belirtmişlerdir [17]. Çekme dayanımı verileri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Homojen ve Çoklu Laminat Malzemelerin farklı örgü açılarındaki ortalama çekme dayanımı özellikleri (Average tensile properties of mono and bi-material laminates at different raster angle) [17]

Numune Tipi	Young Modülü (MPa)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
A1 modeli			
PLA 0°	2236.49 ± 45.09	41.47 ± 2.18	4.49 ± 0.35
PLA CB 0°	1560.42 ± 61.59	21.36 ± 1.45	3.56 ± 0.07
PLA/PLA CB Kompozit 0°	1625.99 ± 77.94	35.09 ± 4.56	4.12 ± 0.10
A2 modeli			
PLA 0°/90°	1959.47 ± 47.02	21.13 ± 5.28	1.49 ± 0.21
PLA CB 0°/90°	1680.19 ± 10.08	15.23 ± 0.26	1.34 ± 0.06
PLA/PLA CB Kompozit 0°/90°	1823.91 ± 66.54	19.93 ± 1.79	1.41 ± 0.06
A3 modeli			
PLA 45°/-45°	1883.60 ± 160.79	38.22 ± 1.79	4.89 ± 0.30
PLA CB 45°/-45°	1626.99 ± 78.67	21.43 ± 1.74	3.69 ± 0.27
PLA/PLA CB Kompozit 45°/-45°	1419.40 ± 81.54	29.08 ± 0.96	4.51 ± 0.43

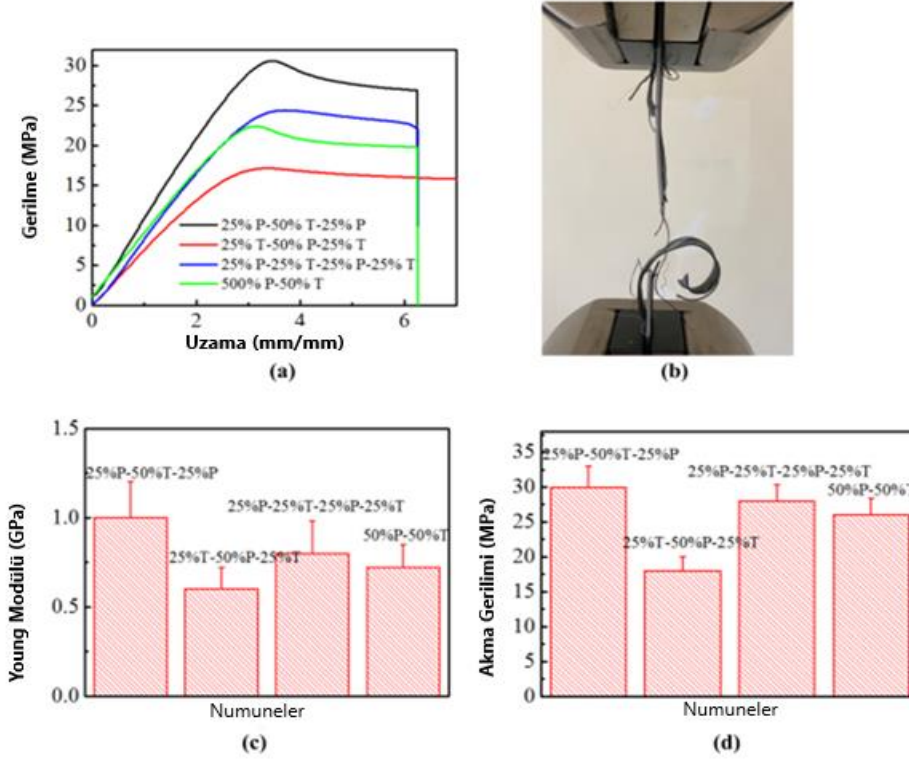
Yap ve arkadaşları, değişen baskı hızı, dolgu yoğunluğu ve nozul çapının numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çok malzemeli numuneleri, ana malzeme olarak akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve takviye malzeme olarak polikarbonat (PC) ile üretmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, baskı parametrelerinin optimum kombinasyonunun 60 mm/s baskı hızı, %15 dolgu yoğunluğu ve 0.8 mm nozul çapı olduğunu belirtmişlerdir. ABS ve PC malzemelerinin kombinasyonun, saf ABS'ye kıyasla sünekliği %14.31 azaltırken çekme mukavemetini %38.46, arttırdığını gözlemlemişlerdir [18]. Deney sonuçları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 3B baskılı ABS, PC ve çok malzemeli ABS/PC numunelerinin a) Çekme dayanımı, b) Young Modülü ve c) Maksimum gerilimdeki uzama miktarı (a) Tensile strength, b) Young's modulus, and c) elongation at maximum stress of 3D printed ABS, PC and multi-material ABS/PC parts) [18]

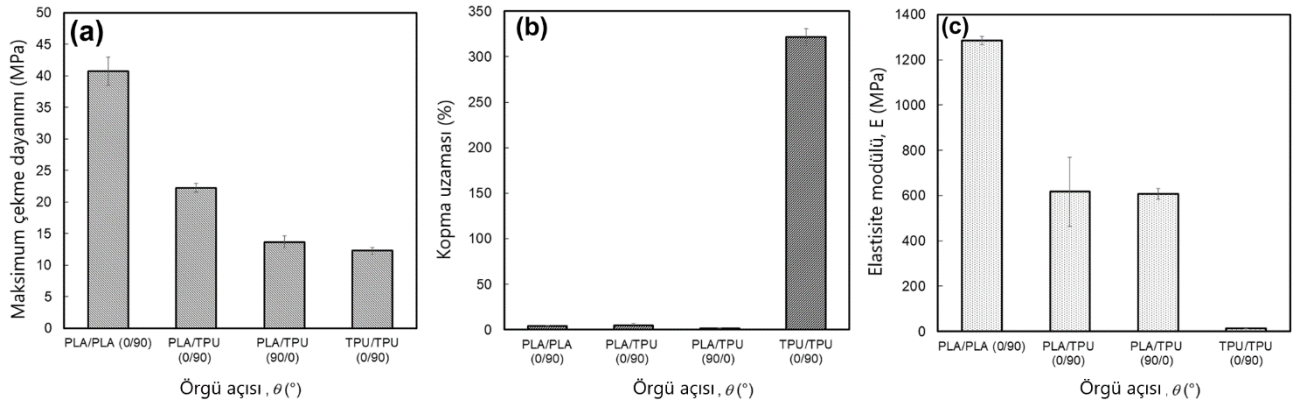
Wang ve arkadaşları, farklı Termoplastik Poliüretan (TPU) hacim oranlarına ve malzeme düzenlerine sahip 3B baskılı PLA-TPU polimerlerini içeren sandviç yapıların çekme özelliklerini incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre, aynı TPU hacim oranıyla, yüzey malzemesi PLA ve çekirdek

malzemesi TPU olan 3B baskılı PLA/TPU numunesinin (%25 PLA-%50 TPU-%25 PLA) en yüksek akma mukavemeti ve elastik modüle sahip olduğunu belirtmişlerdir. Çekirdek malzemesi PLA olan numunelerin ise test edilen tüm numuneler arasında en düşük özellikleri gösterdiğini rapor etmişlerdir. %25 TPU-%50 PLA-%25 TPU numunesinin, tüm numuneler arasında en zayıf özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir [19]. Deney sonuçları Şekil 4’te gösterilmiştir.

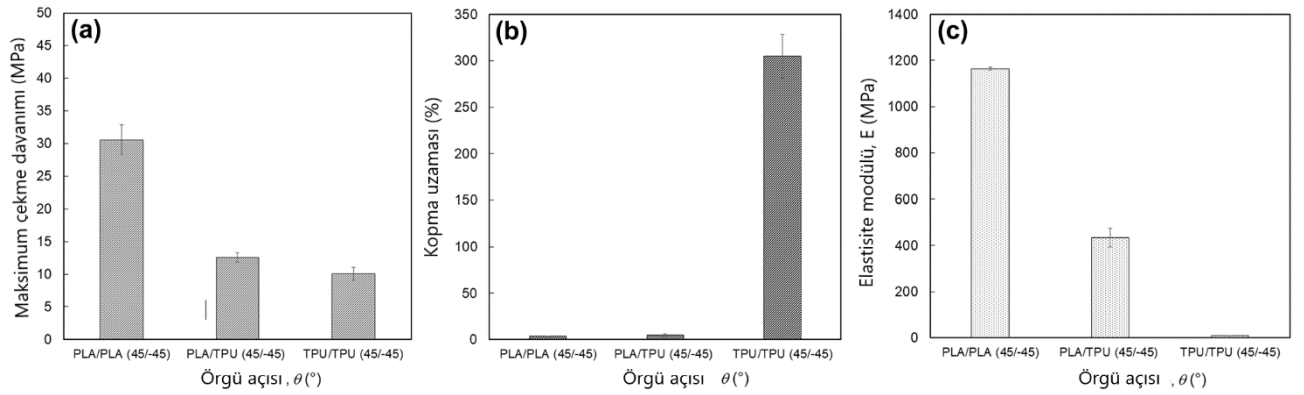


Şekil 4. Farklı malzeme düzenlerine sahip 3B baskılı PLA/TPU numunelerinin gerilme davranışları a) Gerilme-Uzama eğrisi b) Çekme Testi sonrası 25% TPU - 50% PLA - 25% TPU örneği c) Young Modülü d) Akma Gerilimi (Tensile behaviors of 3D printed PLA/TPU samples with different material layouts: a) tensile stress–strain curves; b) failure sample of 25% TPU-50% PLA-25% TPU; c) young’s modulus and d) yield stress) [19]

Arifvianto ve arkadaşları yaptıkları araştırmada, FDM yöntemi ile ürettikleri, sert bir polimer olan polilaktik asit (PLA) ve esnek bir polimer olan termoplastik poliüretandan (TPU) oluşan, sandviç yapılı çok malzemeli numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Üretim parametrelerinde $\theta=0^\circ/90^\circ$ ve $45^\circ/-45^\circ$ olmak üzere iki farklı örgü açısı kullanmışlardır. Test sonuçlarına göre, ürettikleri PLA/TPU sandviç yapılı numunelerinin çekme dayanımı ve elastik modülü, saf PLA'nın özelliklerinden daha düşük, ancak saf TPU'nun özelliklerinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda, sandviç numunesinin mekanik özelliklerinin, sandviç numunesinin iç yapısındaki PLA ve TPU'nun örgü açısı tarafından etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Sonuçlara göre, $\theta=0^\circ/90^\circ$ 'deki PLA/TPU numunesinin çekme dayanımı ve elastisite modülünün ($\sigma=22.3\pm 0.7$ MPa ve $E=617.3\pm 153.3$ MPa), $\theta=90^\circ/0^\circ$ 'deki sandviç numunesinden ($\sigma=13.6\pm 1.0$ MPa ve $E=607.3\pm 22.9$ MPa) daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. Bu bulguya göre, mekanik özellikleri daha zayıf olan TPU katmanlarının iki bitişik PLA katmanı arasına eklenmesinin, ürettikleri PLA/TPU sandviç numunesinin dayanımını zayıflattığını belirtmişlerdir [20]. Test sonuçları Şekil 5 ve Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 5. FDM ile işlenmiş homojen ve sandviç yapıyla PLA/TPU'nun $\theta = 0^\circ/90^\circ$ ve $90^\circ/0^\circ$ mekanik özellikleri: a) çekme dayanımı, b) kopma uzaması ve c) elastisite modülü (Mechanical properties of the monolithic and the sandwich-structured FFF processed PLA/TPU with $\theta = 0^\circ/90^\circ$ and $90^\circ/0^\circ$: a) tensile strength, b) strain at break, and c) elastic modulus) [20]



Şekil 6. FDM ile işlenmiş homojen ve sandviç yapıyla PLA/TPU'nun $\theta = 45^\circ/-45^\circ$ mekanik özellikleri:

a) çekme dayanımı, b) kopma uzaması ve c) elastisite modülü (Mechanical properties of the monolithic and the sandwich-structured FFF printed PLA/TPU with $\theta = 45^\circ/-45^\circ$: a) tensile strength, b) strain at break, and c) elastic modulus) [20]

Kumar ve arkadaşları, PLA ve poliamid 6 (PA6)-TiO₂ (ağırlıkça %70-%30) malzemelerini kullanarak çok malzemeli bir yapı üretilip mekanik testlerini gerçekleştirmişlerdir. Üretim aşamasında katman kombinasyonları, baskı hızı ve dolgu desenindeki değişikliklerin numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir ve en uygun parametrelerin hangisi olduğunu tespit etmek istemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, Dolgu hızı: 90 mm/sn, dolgu deseni: Doğrusal ve katman kombinasyonu: PLA (5 katman): PA6-TiO₂ (5 katman) çok malzemeli fonksiyonel numunelerin FDM baskısı için optimize edilmiş koşullar olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, PLA/PA6-TiO₂ kombinasyonunun, saf PLA'nın (42-45 MPa) mukavemetinden daha yüksek olan 61 MPa'lık çekme mukavemeti gösterdiğini gözlemlemişlerdir [21].

Lopez ve arkadaşları, PLA, ABS ve yüksek etkili polistiren (HIPS) polimerlerini kullanarak sandviç yapılar üretmişlerdir. Aynı geometride farklı sandviç kombinasyonlarının etkisini araştırarak bu malzemelerin bir parçanın mukavemetini artırıp artıramayacağını belirlemek istemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, en iyi sandviç yapı kombinasyonunun dış katmanları PLA ve ABS çekirdek kombinasyonu olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu numunede, çekme mukavemetinin 44.40 MPa (saf ABS'ye kıyasla %35 daha yüksek) ve Young modülünün 1364.25 MPa (saf ABS'ye kıyasla %30 daha yüksek) olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, bu konfigürasyon için kopma uzamasının (6.14 mm), saf ABS ve PLA örneklerine kıyasla daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. HIPS dış katmanları ve ABS çekirdekleri olan örneklerin ise diğer sandviç örneklerine kıyasla en düşük performansı gösterdiğini rapor etmişlerdir [22]. Test sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Homojen ve sandviç yapılı numunelerin gerilim-uzama tepkisine ilişkin deneysel sonuçlar (Experimental results on the tensile stress-strain response for the homogeneous and sandwich-structured specimens) [22]

Sıra	Malzemeler	Çekme Dayanımı (MPa)		Kopma uzaması (mm)		Young modülü (MPa)	
		Ortalama	Standart Sapma	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama	Standart Sapma
1	ABS	32.89	2.32	4.71	1.03	1049.78	54.81
2	PLA	47.46	2.37	4.16	0.20	1396.90	47.33
3	HIPS	20.06	0.26	6.69	1.92	933.33	14.69
4	ABS-PLA-ABS	38.28	0.16	6.02	0.07	1232.96	0.78
5	ABS-HIPS-ABS	29.67	0.07	5.16	0.52	1049.05	4.87
6	PLA-ABS-PLA	44.40	0.26	6.14	0.09	1364.27	16.68
7	PLA-HIPS-PLA	38.77	1.18	5.38	0.38	1351.27	2.50
8	HIPS-PLA-HIPS	25.87	0.06	8.57	1.56	981.45	141.42
9	HIPS-ABS-HIPS	22.21	0.05	6.10	0.12	992.02	3.59

Literatür incelendiğinde, ABS ve PLA polimerleriyle sandviç yapı oluşturulduğunda, Sandviç yapının mukavemetinin saf ABS'nin çekme mukavemetine kıyasla yüksek olduğu ve mukavemeti olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Sandviç yapılarıdaki PLA miktarının yüzde olarak azalması yapının mukavemetini olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir. Düşük baskı hızlarında mukavemetin daha yüksek olduğu bunun da katmanlar arası yapışmanın daha kuvvetli olmasından kaynaklandığı görülmüştür. Sandviç yapılarında her bir katmanının örgü açısının çekme mukavemeti belirlenmesinde baskın bir rol oynadığını görülmüştür. En yüksek mukavemetin ise çekme yönüne paralel örgü açısında olduğu anlaşılmıştır. PLA polimerinin sandviç yapılarında çekirdek malzeme yerine dış katmanlarda kullanılmasının yapının mukavemeti üzerinde olumlu yönde etkileri olduğu görülmüştür.

3.2. Üretim Parametrelerinin Eğilme Mukavemetine Etkisi (The Effect of Production Parameters on Bending Strength)

Eğilme testi, malzemenin mukavemetine ilişkin tasarım bilgilerini belirlemek ve eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla gerçekleştirilir. Bu test, malzemenin süneklik, eğilme dayanımı, kırılma dayanımı ve kırılmaya karşı direncini ölçmeye olanak tanır. Bu özellikler, bir malzemenin basınç altında bozulup bozulmayacağını değerlendirmek için kullanılabilir.

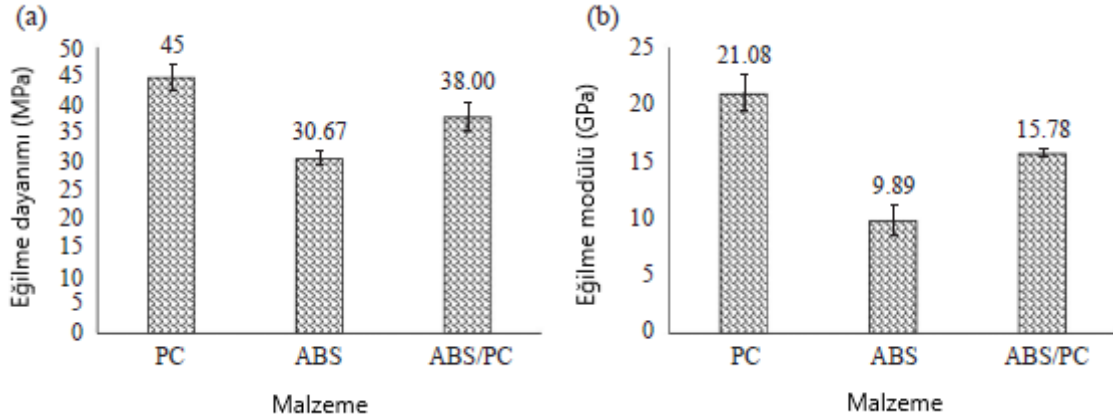
Dhinesh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı oranlarda ürettikleri PLA ve ABS numunelerinin eğme testlerini gerçekleştirmişlerdir. 0° örgü açısı ile birlikte 38 mm/sn ilerleme hızında yapılan numunelerin çok iyi sonuçlar gösterdiğini belirtmişlerdir. Sandviç numuneler arasında %50 PLA -%50 ABS numunesinin maksimum eğilme mukavemetine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [15]. Eğme testi sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Eğilme testi sonuçları (Flexural test results) [15]

Numuneler	Uygulanan Maksimum Yük (N)	Maksimum Gerilim (MPa)	Maksimum Gerilimdeki Uzama	Maksimum Yükteki Uzama (mm)
ABS	34.89637	19.24	0.0556	8.87586
PLA	32.16785	17.90	0.06402	4.62973
20% ABS, 80% PLA	31.6251	16.23	0.06493	6.74632
50%50% SANDVIÇ	34.43876	19.11	0.03173	9.49994
80% ABS, 20% PLA	33.68724	18.03	0.04752	8.9879

Liu ve arkadaşları, yumuşak ve sert malzemelerin üretim parametrelerinin, FDM yöntemi kullanarak ürettikleri çok malzemeli yapıların eğilme davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel ve istatistiksel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada sert malzeme olarak PLA, yumuşak malzeme olarak da TPU'yu seçmişlerdir. Yumuşak-sert sandviç yapıların eğilme mukavemeti için en önemli faktörün PLA için nozul sıcaklığı olduğunu belirtmişlerdir. TPU ve PLA için baskı hızlarının da istatistiksel olarak önemli olduğunu gözlemlemişlerdir. Eğilme modülü TPU için baskı hızından önemli ölçüde etkilenirken, bunu PLA için nozul sıcaklığı ve baskı hızının takip ettiğini vurgulamışlardır. Bununla birlikte, TPU için nozul sıcaklığının eğilme mukavemeti ve modülü üzerinde önemli bir etki göstermediğini belirtmişlerdir [23].

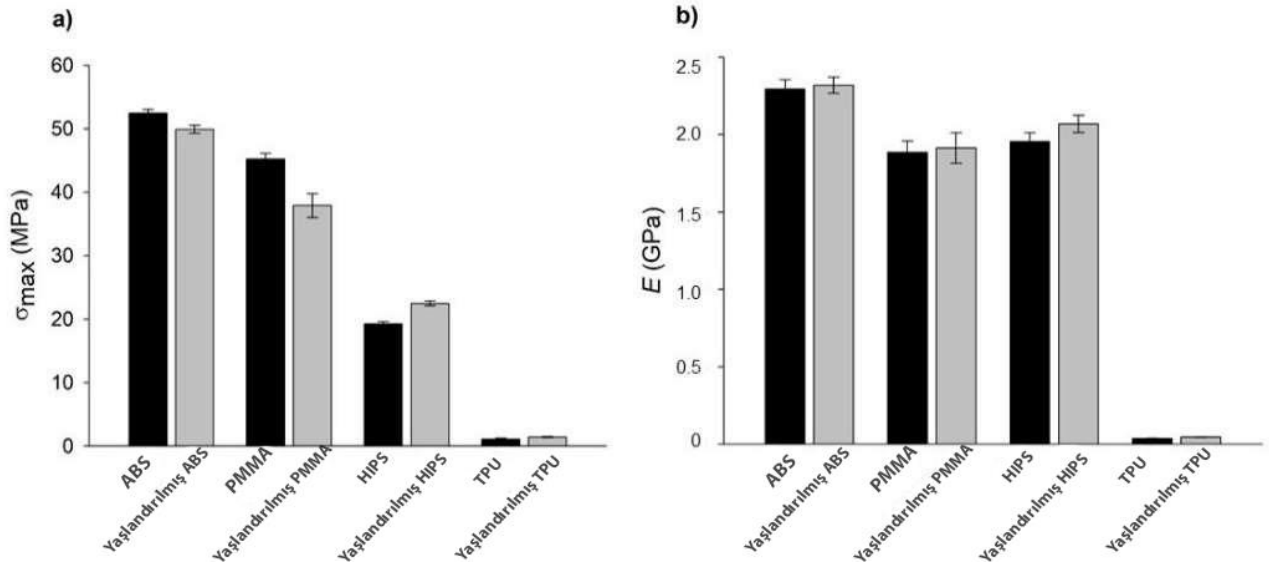
Yap ve arkadaşları, değişen baskı hızı, dolgu yoğunluğu ve nozul çapının numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çok malzemeli numuneleri, ana malzeme olarak akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve takviye malzeme olarak polikarbonat (PC) ile üretmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, baskı parametrelerinin optimum kombinasyonunu 60 mm/s baskı hızı, %15 dolgu yoğunluğu ve 0,8 mm nozul çapı olarak belirtmişlerdir. Test sonuçlarına göre, ABS numunelerine PC polimeri eklenmesinin, elastikiyet modülünü %23,40, eğilme mukavemetini %23,90 ve eğilme modülünü %37,33 oranında artırdığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, sünekliği de %14,31 oranında düşürdüğünü vurgulamışlardır [18]. Test sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir.



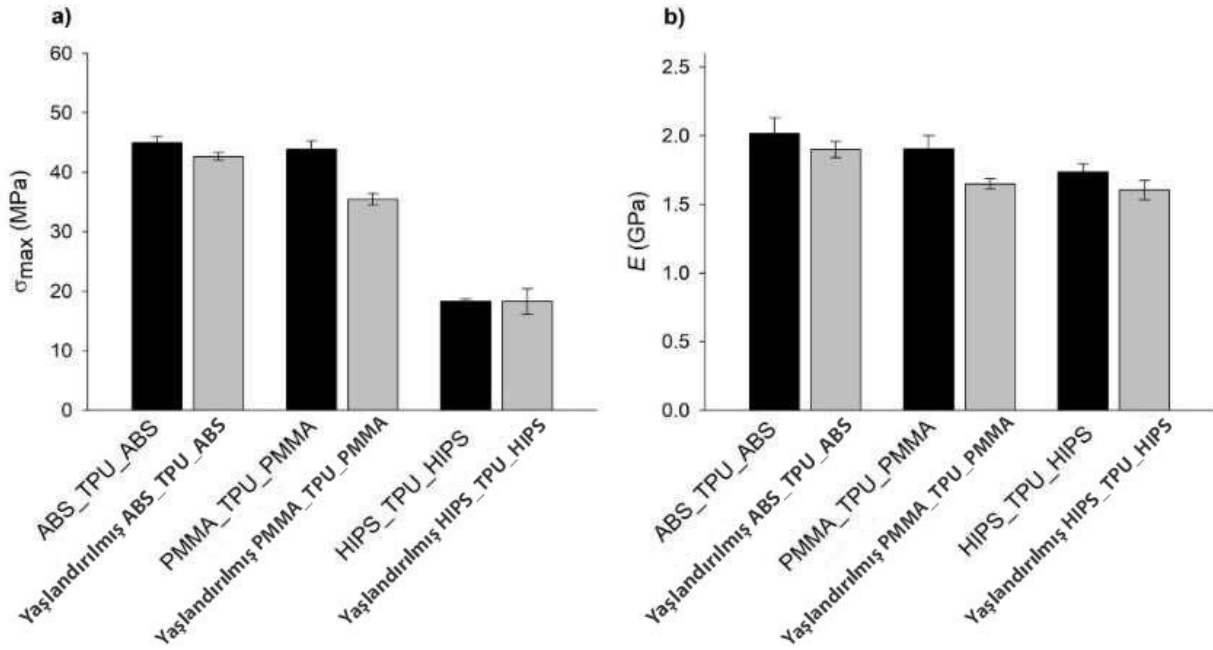
Şekil 7. 3B baskılı ABS, PC ve çok malzemeli ABS/PC numunelerinin a) eğilme dayanımı ve b) eğilme modülü. (a) Flexural strength and b) flexural modulus of 3D printed ABS, PC and multi-material ABS/PC parts) [18]

Pinho ve arkadaşları, çift nozullu bir 3B yazıcı kullanarak ürettikleri sandviç yapıları numunelerin mekanik davranışlarını karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Ayrıca bastıkları malzemeler için yaşlanmanın etkisini de incelemişlerdir. Çalışmada inceledikleri malzemeler arasında ABS, HIPS, Polimetil metakrilat (PMMA) ve TPU bulunmaktadır. Sandviç yapıların konfigürasyonunu, TPU'dan oluşan bir çekirdek ve diğer üç malzemeden birisiyle yapılan dış katmanlardan oluşturmuşlardır. Üretimi yaparken, daha iyi bir gerilim dağılımı ve daha az anizotropik mekanik davranış elde etmek amacıyla %100 çizgi (45°/-45°) dolgu deseni kullandıklarını belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlarına göre en iyi eğilme mukavemetine sahip sandviç kombinasyonunun ABS-TPU-ABS olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak, TPU'nun diğer malzemelerle birleştirilmesinin, basılı

numunelerin saf hallerindeki eğilme özelliklerine kıyasla olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir [24]. Deney sonuçları Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. Kuru ve yaşlandırılmış numuneler için homojen malzemelerin 3 Nokta Eğme testlerinden elde edilen a) σ_{max} ve b) E'nin çubuk grafik gösterimi. (Bar plot representation of a) σ_{max} and b) E, which were obtained from the 3PB tests of the mono-materials for the dry and aged specimens) [24]



Şekil 9. 3 Nokta Eğme testlerinden elde edilen kuru ve yaşlandırılmış sandviç yapı numunelerinin belirlenen a) σ_{max} ve b) E değerleri. (Determined a) σ_{max} and b) E values of the dry and aged sandwich structure specimens that were obtained from the 3PB tests) [24]

Kumar ve arkadaşları, yaygın olarak kullanılan iki farklı polimer olan ABS ve TPU'nun laminat imalatını ve ASTM D790 standartlarına göre test edilen 3B baskılı numunelerin eğilme mukavemetlerini incelemişlerdir. Numuneleri üç katman halinde laminasyon yapmışlardır. Bunları, ABS-TPU-ABS (ATA) ve TPU-ABS-TPU (TAT) olmak üzere iki kategoriye ayırmışlardır. Deney sonuçlarına göre, ATA kombinasyonlu sandviç yapıların, TAT kombinasyonlu numunelere göre daha yüksek eğilme mukavemetine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapılan testlerde saf TPU'nun eğilme mukavemeti 6.8 MPa iken TAT kombinasyonlu örnek için, eğilme mukavemeti 6.8 MPa'dan 13 MPa'ya yükselmiş olup, eğilme mukavemetinde yaklaşık %92'lik bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, ATA örneğinde TPU çekirdeğinin 1.54 mm kalınlığı için, en düşük eğilme mukavemetini (31.38 MPa) gösterdiğini rapor etmişlerdir. Ancak, üç katmanın her birinin eşit

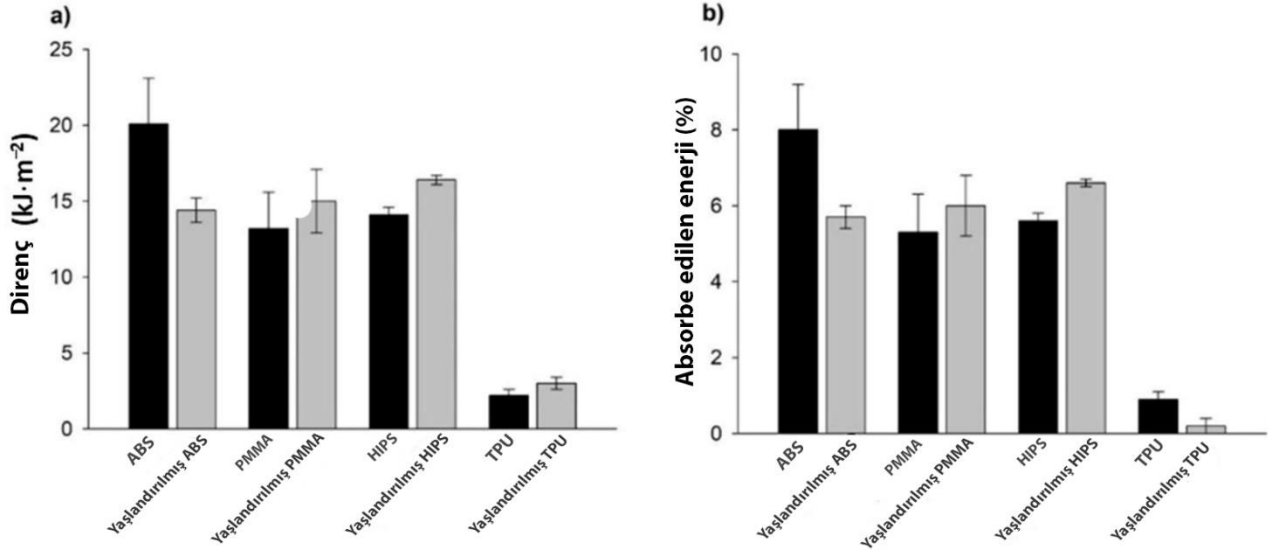
kalınlıkta olduğu (1.10 mm), ATA örnekleri için maksimum eğilme mukavemetinin kaydedildiğini (46.49 MPa) gözlemlemişlerdir [25].

Literatür incelendiğinde, PLA ve ABS karışımının (özellikle %50-%50 oranında) yüksek eğilme mukavemeti sunduğu görülmüştür. ABS polimeri, TPU ve diğer polimerler ile kombine edildiğinde, bu malzemelerin mekanik özelliklerinde belirgin farklılıklar görülmüştür. ABS-TPU-ABS kombinasyonlarının, genellikle daha yüksek eğilme mukavemeti sağladığı gözlenmiştir. PLA için nozul sıcaklığının ve TPU için baskı hızının, eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerinde önemli etkiler yaptığı görülmüştür. Bu gözlemler, FDM baskı sürecinde doğru parametrelerin seçilmesinin önemini ortaya koymuştur.

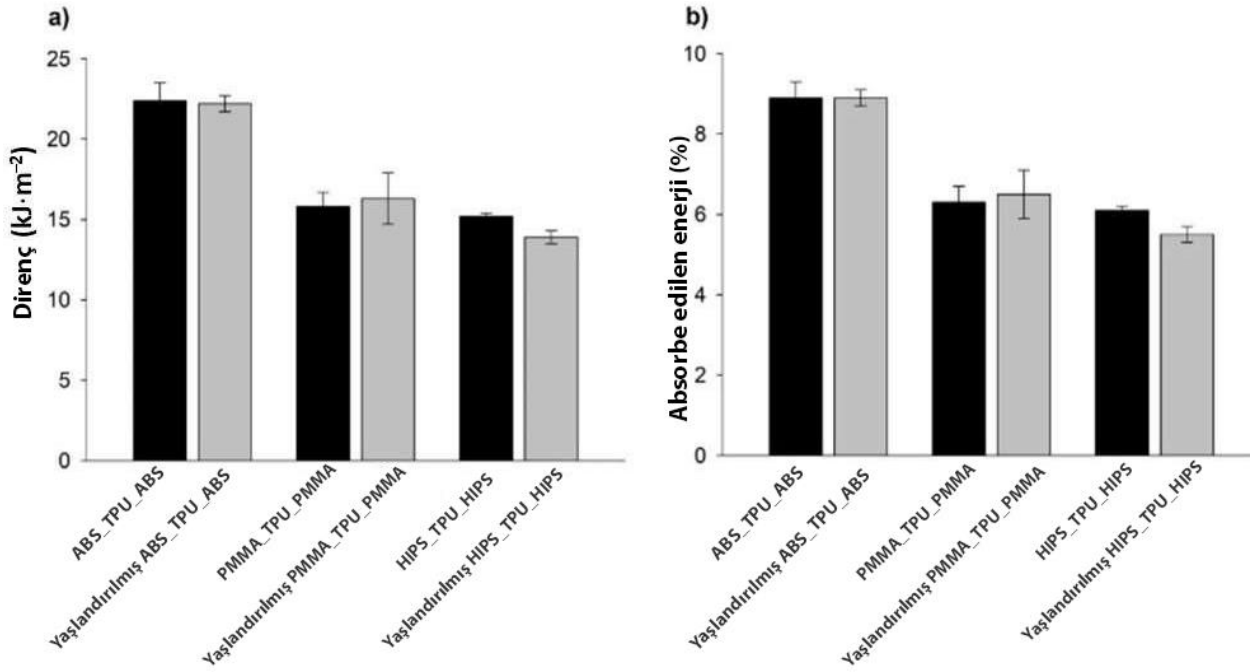
3.3 Üretim Parametrelerinin Darbe Dayanımına Etkisi (Effect of Production Parameters on Impact Strength)

Darbe testinin amacı, bir çarpışma anında malzemenin enerjii emme kapasitesini belirlemektir. Bu enerji, yapılan teste ve belirlenmek istenen özelliğe göre malzemenin tokluğunu, darbe dayanımını, darbe direncini veya kırılma direncini ölçmek için kullanılabilir. Bu değerler, malzemenin araç çarpışmaları gibi ani ve şiddetli yüklemelere dayanacağı uygulamalarda seçilmesi için kritiktir.

Pinho ve arkadaşları, farklı polimerik malzemeler kullanarak üç sandviç konfigürasyonunun mekanik özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır; ABS-TPU-ABS, PMMA-TPU-PMMA ve HIPS-TPU-HIPS. Basılı çok malzemeli sandviç yapıların mekanik davranışını, aynı baskı parametreleriyle basılan her bir saf malzeme ile karşılaştırmışlardır. Üretimi yaparken, daha iyi bir gerilim dağılımı ve daha az anizotropik mekanik davranış elde etmek amacıyla %100 çizgi (45°/-45°) dolgu deseni kullandıklarını belirtmişlerdir. Test sonuçlarına göre, direnç ve emilen enerji standart sapmaları (maksimum ve minimum değerler) göz önünde bulundurulduğunda, tek malzemeli ve çok malzemeli numuneler arasında önemli bir fark olmadığını, çok malzemeli numuneler için değerlendirilen özelliklerde hafif bir artış eğilimi olduğu gözlemlemişlerdir. Ancak, bahsedilmeye değer tek istisnanın PMMA-TPU-PMMA sandviç yapısı olduğunu, bu kombinasyonda ortalama değerlerde daha belirgin bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Test sonuçları Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir.

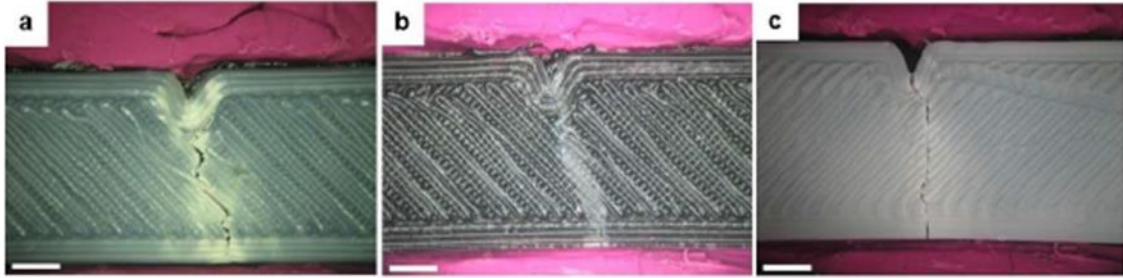


Şekil 10. 3B baskılı homojen malzeme numunelerinin enine darbe testleri kullanılarak elde edilen a) direnç ve b) absorbe edilen enerjisi. (a) Resilience and b) absorbed energy of the printed mono-material specimens, which were obtained using transverse impact tests) [24]



Şekil 11. Enine darbe testleri ile belirlenen a) direnç ve b) absorbe edilen enerji. (a) Resilience and b) absorbed energy, which were determined by transversal impact tests.) [24].

Çekiç darbesiyle indüklenen hasar söz konusu olduğunda ise, tüm sandviç yapıların dış katmanlarda görünür çatlaklar gösterdiğini gözlemlemiştir. Sandviç yapıların yüzeyinde oluşan çatlakların derinlemesine yayılımının, çekirdek polimer olan TPU'ya ulaştığında durduğunu rapor etmişlerdir. Bu davranışın sebebinin, TPU'nun yapılan testlerde en düşük enerji emilim yüzdesine sahip olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bunun da TPU'nun büyük bir darbe enerjisi oranını başarıyla dağıtabileceğini ve çatlak kusurları oluşumu olmadan yapısal bütünlüğünü koruyabileceği anlamına geldiğini vurgulamışlardır [24]. Bununla ilgili görseller Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Enine darbe testlerinden sonra 3B baskılı sandviç yapı numunelerinin yüzey hasarı: a) ABS_TPU_ABS, b) PMMA_TPU_PMMA ve c) HIPS_TPU_HIPS. Ölçek çubuğu: 500 µm. (Surface damage of the as-printed sandwich-structured specimens after the transversal impact tests: a) ABS_TPU_ABS, b) PMMA_TPU_PMMA, and c) HIPS_TPU_HIPS. Scale bar: 500 µm) [24]

Literatür incelendiğinde, TPU, darbe enerjisinin büyük bir kısmını emip dağıtarak çatlak oluşumunu engelleyebildiği ve yapısal bütünlüğü koruyabildiği görülmüştür. TPU'nun bu özelliği, sandviç yapıların yüzeyinde oluşan çatlakların derinlemesine yayılımını durdurmaktadır. Çok malzemeli sandviç yapılar, özellikle darbe direncinin önemli olduğu uygulamalarda tercih edilebilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

FDM yöntemi ile üretilen sandviç yapılarda malzeme konfigürasyonu ve üretim parametrelerinin malzeme mukavemetine etkilerinin araştırıldığı çalışmamızdan elde edilen çıkarımlar, çok malzemeli sandviç yapıların, saf polimerlere göre üstün mekanik özellikler sunabileceğini göstermektedir. Özellikle, doğru malzeme kombinasyonları ve baskı parametreleri seçildiğinde, bu

yapıların çekme ve eğilme mukavemeti ile darbe dayanımı önemli ölçüde artırılabilir. TPU'nun darbe enerjisini dağıtma yeteneği, sandviç yapıların çatlak oluşumunu engellemede kritik bir rol oynamaktadır. Dolgu desenleri ve örgü açılarının dikkatli seçimi, mekanik özelliklerin optimize edilmesinde anahtar faktörlerdir. Bu bulgular, mühendislik uygulamalarında çok malzemeli 3B baskılı yapıların potansiyel kullanım alanlarını genişletmektedir. Yapılan araştırmada elde edilen bulgular şu şekildedir;


- TPU, büyük bir darbe enerjisi oranını başarıyla dağıtabilmekte ve yapısal bütünlüğü koruyabilmektedir. Bunun sebebi ise TPU'nun düşük enerji emilim yüzdesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır.
- Farklı oranlarda üretilen PLA ve ABS numunelerinin eğilme testleri, %50 PLA - %50 ABS sandviç numunesinin maksimum eğilme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Bu kombinasyon, PLA ve ABS'nin avantajlarını birleştirerek daha yüksek bir eğilme dayanımına ulaşmıştır.
- PLA için nozul sıcaklığının yumuşak-sert sandviç yapıların eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, TPU ve PLA için baskı hızlarının da eğilme dayanımını etkilediği gözlemlenmiştir.
- ABS ve PC ile üretilen çok malzemeli numunelerde yapılan testler, optimum baskı parametrelerinin kullanılmasıyla ABS numunelerine PC polimeri eklenmesinin eğilme dayanımını artırdığını göstermektedir.
- Sandviç yapılarda TPU çekirdeğinin kalınlığının eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- Çalışmalardan elde edilen bulgular, farklı malzeme kombinasyonlarının sandviç yapıların mekanik özelliklerini belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir. Özellikle PLA ve ABS gibi farklı polimerlerin bir arada kullanılması, sandviç yapıların çekme mukavemeti ve elastikiyet modülü üzerinde önemli etkilere sahiptir. En iyi performans elde etmek için malzeme kombinasyonlarının dikkatlice seçilmesi gerekmektedir.
- Sandviç yapılarda baskı parametrelerinin mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Optimum baskı parametrelerinin belirlenmesi, çekme mukavemetini artırabilir ve elastikiyet modülünü yükseltebilir.
- Örgü açısının çekme mukavemeti üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmüştür. Özellikle çekme yönüne paralel örgü açısının maksimum mukavemeti sağladığı belirtilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. K. Özsoy, B. Duman, Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1): 36-48, 2017.
2. Ş. Erener, S. Boz, Modern üretim tekniklerinde eklemeli imalat sistemlerinin yeri ve kullanım alanları, *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 3(1): 47-56, 2021.
3. T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, D. Hui, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 143: 172-196, 2018.
4. J.S. Chohan, R. Singh, K.S. Boparai, R. Penna, F. Fraternali, Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications, *Composites Part B: Engineering*, 117: 138-149, 2017.
5. O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, *Advances in manufacturing*, 3: 42-53, 2015.
6. B.D. de Castro, F.D.C. Magalhães, T.H. Panzera, J.C. Campos Rubio, An assessment of fully integrated polymer sandwich structures designed by additive manufacturing, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30: 5031-5038, 2021.
7. H.Y. Sarvestani, A.H. Akbarzadeh, A. Mirbolghasemi, K. Hermenean, 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability, *Materials & Design*, 160: 179-193, 2018.

8. I. Ullah, M. Brandt, S. Feih, Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures, *Materials & Design*, 92: 937-948, 2016.
9. H. Mozafari, S. Khatami, H. Molatefi, Out of plane crushing and local stiffness determination of proposed foam filled sandwich panel for Korean Tilting Train eXpress–Numerical study, *Materials & Design*, 66: 400-411, 2015.
10. Y. Feng, H. Qiu, Y. Gao, H. Zheng, J. Tan, Creative design for sandwich structures: A review, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(3): 1729881420921327, 2020.
11. N. Kladovasilakis, P. Charalampous, K. Tsongas, I. Kostavelis, D. Tzetzis, D. Tzovaras, Experimental and computational investigation of lattice sandwich structures constructed by additive manufacturing Technologies, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(3): 95, 2021.
12. V. Acanfora, R. Castaldo, A. Riccio, On the effects of core microstructure on energy absorbing capabilities of sandwich panels intended for additive manufacturing, *Materials*, 15(4): 1291, 2022.
13. A. Rahimijonoush, M. Bayat, Experimental and numerical studies on the ballistic impact response of titanium sandwich panels with different facesheets thickness ratios, *Thin-Walled Structures*, 157: 107079, 2020.
14. H.P. Konka, M.A. Wahab, K. Lian, On mechanical properties of composite sandwich structures with embedded piezoelectric fiber composite sensors, *ASME. J. Eng. Mater. Technol.*, 134(1): 011010, 2012.
15. S.K. Dhinesh, P.S. Arun, K.K. Senthil, A. Megalingam, Study on flexural and tensile behavior of PLA, ABS and PLA-ABS materials, *Materials Today: Proceedings*, 45: 1175-1180, 2021.
16. P.K. Patro, S. Kandregula, M.S. Khan, S. Das, Investigation of mechanical properties of 3D printed sandwich structures using PLA and ABS, *Materials Today: Proceedings*, 2023.
17. P.K. Mishra, P. Senthil, Prediction of in-plane stiffness of multi-material 3D printed laminate parts fabricated by FDM process using CLT and its mechanical behaviour under tensile load, *Materials Today Communications*, 23: 100955, 2020.
18. P.V. Yap, M.Y. Chan, S.C. Koay, Preliminary Study on Mechanical Properties of 3D Printed Multi-materials ABS/PC Parts: Effect of Printing Parameters, *Journal of Physical Science*, 32(2): 87-104, 2021.
19. F. Wang, Y. Ji, C. Chen, G. Zhang, Z. Chen, Tensile properties of 3D printed structures of polylactide with thermoplastic polyurethane, *Journal of Polymer Research*, 29(8): 320, 2022.
20. B. Arifvianto, B.E. Satiti, U.A. Salim, Suyitno, A. Nuryanti, M. Mahardika, Mechanical properties of the FFF sandwich-structured parts made of PLA/TPU multi-material, *Progress in Additive Manufacturing*, 7(6): 1213-1223, 2022.
21. S. Kumar, R. Singh, M. Singh, Multi-material 3D printed PLA/PA6-TiO₂ composite matrix: Rheological, thermal, tensile, morphological and 4D capabilities, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(2): 2329-2348, 2022.
22. D.M. Baca Lopez, R. Ahmad, Tensile mechanical behaviour of multi-polymer sandwich structures via fused deposition modelling, *Polymers*, 12(3): 651, 2020.
23. Q. Liu, Z. Zhang, D. Yavas, W. Shen, D. Wu, Multi-material additive manufacturing: effect of process parameters on flexural behavior of soft-hard sandwich beams, *Rapid Prototyping Journal*, 29(5): 885-896, 2023.
24. A.C. Pinho, A.P. Piedade, Sandwich multi-material 3D-printed polymers: influence of aging on the impact and flexure resistances, *Polymers*, 13(22): 4030, 2021.
25. S. Kumar, I. Singh, S.S.R. Kolor, D. Kumar, M.Y. Yahya, On laminated object manufactured FDM-printed ABS/TPU multimaterial specimens: An insight into mechanical and morphological characteristics, *Polymers*, 14(19): 4066, 2022.

Eriyik Yığıma Modelleme Süreci Parametrelerinin Taguchi Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Çoklu Yanıt Optimizasyonu

İnayet Burcu Toprak^{1,*} 

¹Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Antalya, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 11.06.2024

Kabul: 09.08.2024

Anahtar Kelimeler:

Eriyik yığıma modelleme

Polilaktik asit

Taguchi yöntemi

Gri ilişkisel analiz

ÖZET

Bu çalışmada, eriyik yığıma modelleme ile üretilen polilaktik asit numunelerinin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve ağırlık gibi özellikleri incelenmiştir. Numunelerin 3D baskısı için dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı olmak üzere üç temel parametre dikkate alınmıştır. Deneylerin tasarımında Taguchi'nin L9 ortogonal dizisi kullanılmış ve varyans analizi yöntemiyle her bir süreç parametresinin her bir yanıtı olan göreceli etkisi ve katkısı belirlenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan testlerde, çekme mukavemeti için optimum parametrelerin baskı hızı 60 mm/s, katman kalınlığı 0.3 mm ve %80 dolgu yoğunluğu olduğu; akma mukavemeti için ise 50 mm/s, katman kalınlığı 0.3 mm ve %80 dolgu yoğunluğu olduğu; ağırlık için ise 50 mm/s, katman kalınlığı 0.2 mm ve %40 dolgu yoğunluğu olduğu belirlenmiştir. Gri İlişki Analizi, en yüksek gri ilişki derecesinin 50 mm/s baskı hızı, 0.3 mm katman kalınlığı ve %80 dolgu yoğunluğunda elde edildiğini göstermiştir. Bu parametre değerlerinde çekme dayanımı 52.29 MPa, akma dayanımı 42.82 MPa ve parça ağırlığı 9.5818 gram olarak elde edilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre, %76 katkı oranı ile Gri İlişki Derecesi için en önemli değişkenin dolgu yoğunluğu olduğu tespit edilmiştir. Önerilen Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi, tüm yanıtlar için optimum parametreleri belirlemiştir. Bu çalışma, nihai ürün üretim süreci için en iyi 3D baskı işlem parametre ayarlarını belirleyerek literatüre katkı sağlamaktadır.

Multiple Response Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters Using Taguchi-Based Gray Relational Analysis

ARTICLE INFO

Received: 11.06.2024

Accepted: 09.08.2024

Keywords:

Fused deposition modeling

Polylactic acid

Taguchi method

Grey relational analysis

ABSTRACT

In this study, the tensile strength, yield strength, and weight properties of polylactic acid samples produced by fused deposition modeling were investigated. Three key parameters for 3D printing, namely infill density, layer thickness, and printing speed, were considered. Taguchi's L9 orthogonal array was used in the experiment design, and the relative effects and contributions of each process parameter to each response were determined using variance analysis. In the tests conducted using the Taguchi method, the optimal parameters for tensile strength were determined to be a printing speed of 60 mm/s, a layer thickness of 0.3 mm, and an 80% infill density; for yield strength, a printing speed of 50 mm/s, a layer thickness of 0.3 mm, and an 80% infill density were found to be optimal; and for weight, a printing speed of 50 mm/s, a layer thickness of 0.2 mm, and a 40% infill density were identified as optimal. Grey Relational Analysis has shown that the highest grey relational degree was achieved at a printing speed of 50 mm/s, a layer thickness of 0.3 mm, and 80% infill density. At these parameter values, the tensile strength was measured as 52.29 MPa, yield strength as 42.82 MPa, and the part weight as 9.5818 grams. According to the results of variance analysis, infill density was identified as the most important variable for Grey Relational Degree, with a contribution rate of 76%. The proposed Taguchi-based grey relational analysis method determined the optimum parameters for all responses. This study contributes to the literature by determining the optimal 3D printing process parameters for final product manufacturing.

*Corresponding author, e-mail: ibmutlu@akdeniz.edu.tr

To cite this article: İ.B. Toprak, Multiple Response Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters Using Taguchi-Based Gray Relational Analysis, *Manufacturing Technologies and Applications*, 5(2), 89-103, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1499800>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Katmanlı üretim veya 3D baskı, havacılık ve uzay, otomotiv, savunma, tıbbi ve tüketici ürünleri de dâhil olmak üzere birçok endüstriyel sektörde kullanılmaktadır [1, 2]. Eriyik Yığılma Modelleme (EYM), lazer gerektirmeden hassas prototipler üretebildiği için birçok endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. EYM yöntemi, 3D CAD dosyalarından doğrudan 3D nesnelere oluşturur. Bu işlem, modelin STL dosyasının ön işleme yazılımına aktarılmasıyla başlar ve ardından takım yolları üretim cihazına aktarılır. Termoplastik malzeme, sıcaklık kontrollü bir nozul aracılığıyla katman katman ekstrüde edilir. Üretim, bilgisayar destekli üretim (CAM) yazılım sistemi tarafından tamamen kontrol edilen sayısal kontrollü bir mekanizma tarafından gerçekleştirilir [3].

Son yıllarda, EYM işlem ayarlarının değişkenliğinin basılı ürün özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak önemli bir konu haline gelmiştir. Araştırmalar, dayanıklılık, baskı süresi, boyutsal doğruluk, sertlik gibi özelliklerin, çeşitli EYM 3D yazıcı parametreleri tarafından ayarlanabileceğini göstermektedir [4]. Genellikle bir işlem parametresi değiştirilirken diğerleri sabit tutulur. Ancak, birden fazla parametrenin optimize edilmesi ve parametreler arasındaki etkileşimlerin göz ardı edilmesi durumunda deney sayısı hızla artar. Bu da zaman ve kaynak israfına neden olabilir. Bu bağlamda, Taguchi yöntemi gibi istatistiksel analiz ve optimizasyon teknikleri, en uygun baskı parametrelerinin belirlenmesinde etkili araçlar olarak öne çıkmaktadır.

Kothandaraman ve Balasubramanian tarafından yapılan araştırmada, EYM yöntemiyle üretilen düz bir nesnenin yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için baskı parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Deneylerde Polilaktik Asit (PLA) malzemesi kullanılmış ve baskı sıcaklığı, katman kalınlığı ve baskı hızı gibi ana parametreler üzerinde odaklanılmıştır. Taguchi' nin deney tasarımı olan L9 ortogonal dizini kullanılarak test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler, baskı sıcaklığının en etkili parametre olduğunu göstermiş, katman kalınlığı ve baskı hızının ise daha az etkili olduğunu belirlemiştir. Bu bulgular, baskı sürecinde baskı sıcaklığının dikkatle kontrol edilmesinin önemini vurgulamaktadır [5]. Benzer şekilde, Handiansah vd. [6], Termoplastik Poliüretan (TPU) malzemesiyle yapılan 3D baskının yüzey pürüzlülüğünü optimize etmek için çeşitli işlem parametrelerinin etkisini incelemiştir. Bu parametreler arasında akış hızı, katman kalınlığı, nozul sıcaklığı, baskı hızı, örtüşme ve fan hızı bulunmaktadır. Deneyler L27 ortogonal Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve optimal parametre kombinasyonu belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, katman kalınlığının baskı yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkisi olduğu ve en yüksek katkı oranına sahip olduğu bulunmuştur. Heidari-Rarani vd. [7], PLA numunelerinin çekme özellikleri üzerinde etkili olan dolgu yoğunluğu, baskı hızı ve katman kalınlığı gibi üç önemli işlem parametresinin etkisini araştırmıştır. Deney tasarımı olarak Taguchi yöntemi uygulanmış ve deney sayısını azaltarak maksimum mekanik özellikler, minimum ağırlık ve minimum baskı süresi için optimal parametreler bulunmaya çalışılmıştır. Rasheed vd. [8], EYM işlem parametrelerinin Polilaktik Asit-Akrilonitril Bütadien Stiren (PLA-ABS) bi-katmanlı kompozitin çekme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Dört ana parametre (dolgu yoğunluğu, katman sayısı, baskı hızı ve yatak sıcaklığı) farklı seviyelerde değiştirilmiş ve Taguchi optimizasyon tekniği kullanılarak deneyler optimize edilmiştir. Sonuçlar, dolgu yoğunluğunun çekme dayanımını en çok etkilediğini, baskı hızının da önemli olduğunu göstermektedir. Dina vd. [9]' da çalışmalarında, EYM sürecinin işleme parametrelerinin nihai katman kalınlığı, baskı hızı, yönlendirme açısı, dış sınır sayısı ve nozul sıcaklığı gibi beş imalat değişkeninin çekme dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Pinar vd. [10], 3D yazıcı ile üretilen PLA numunelerinin vida tutma kuvveti üzerindeki etkilerini istatistiksel olarak araştırmıştır. Taguchi L27 Ortogonal Dizisi kullanılarak, yazdırma hızı, yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, tabla sıcaklığı ve dolgu deseni gibi farklı faktörlerin çeşitli seviyeleri test edilmiştir. Çalışma, yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, dolgu deseni ve yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı faktörleri ve etkileşimlerinin anlamlı olduğunu ortaya koymuştur. Demir [11], 3D yazıcı ile üretilen PLA parçaların sertliği üzerine yazıcı parametrelerinin etkisini araştırmıştır. İncelenen parametreler nozul çapı, katman yüksekliği, iç örgü açısı ve nozul sıcaklığıdır. Her bir parametre için üç seviye belirlenmiş ve deney sayısı Taguchi deney tasarımı ile optimize edilmiştir. Nozul çapının sertliğe %85 oranında etkisi varken, nozul sıcaklığının etkisi belirsiz kalmıştır. Sertlik, katman kalınlığı ile ters orantılı, nozul çapı ile doğru

orantılıdır. Daha büyük nozul çapı, daha iyi mekanik özellikler ve daha kısa üretim süresi sağlamaktadır. Tunçel ve Bayraklılar [12], EYM kullanılarak üretilen PLA numunelerinin basma mukavemetini optimize etmeyi amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda Taguchi yöntemi kullanılarak üç farklı işlem parametresi (duvar kalınlığı, dolgu deseni ve baskı hızı) optimize edilmiştir. Sonuçlar, duvar kalınlığının en etkili parametre olduğunu, dolgu deseni ve baskı hızının ise daha az etkili olduğunu göstermektedir.

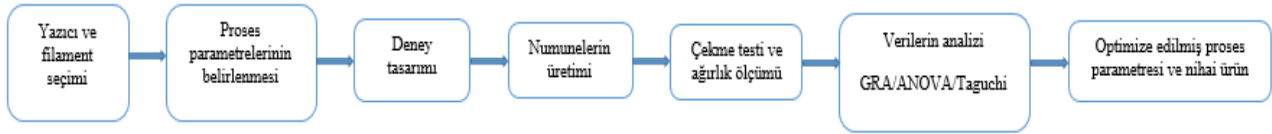
Bu çalışmalar, EYM sürecinde kullanılan çeşitli baskı parametrelerinin, üretilen parçaların yüzey kalitesi, mekanik dayanımı ve diğer kritik özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymakta ve Taguchi yöntemi gibi optimizasyon tekniklerinin bu alanda etkin bir şekilde kullanılabilmesini göstermektedir. Ancak, EYM süreçlerinde genellikle birden fazla performans kriteri aynı anda optimize edilmek istenir. Örneğin, bir parça için hem yüzey kalitesinin yüksek olması hem de mekanik dayanımının güçlü olması gerekebilir. Bu tür çoklu kriterlerin bulunduğu durumlarda, tek bir optimizasyon yöntemi yetersiz kalabilir ve dengeleyici çözümler bulmak zorlaşabilir. İşte bu noktada, çok kriterli karar verme yöntemlerine (MCDM) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür durumlarda, Gri İlişkisel Analiz (GRA) gibi yöntemler tercih edilmesinin önemi büyüktür. GRA, farklı kriterler arasındaki ilişkileri analiz ederek, tüm kriterleri dikkate alan dengeli ve optimum çözümler elde edilmesine olanak tanır. Özellikle, EYM gibi birden fazla parametrenin ve performans kriterinin bulunduğu karmaşık süreçlerde, GRA sayesinde daha kapsamlı ve dengeli sonuçlar elde edilebilir. GRA'nın sunduğu sistematik yaklaşım, parametrelerin her birinin toplam performans üzerindeki etkilerini belirleyerek en uygun kombinasyonların seçilmesini sağlar. Böylece, EYM ile üretilen parçaların kalitesi ve performansı artırılabilir. Shakeria vd. [13], farklı işlem parametrelerinin (baskı odası sıcaklığı, baskı sıcaklığı, katman kalınlığı ve baskı hızı gibi) silindiriklik, dairesellik, dayanıklılık, Young modülü ve deformasyon gibi belirli özellikler üzerindeki etkisini GRA yöntemiyle araştırmıştır. Singh ve Barti [14], gerilme dayanımı, eğilme dayanımı ve aşınma direncini eş zamanlı olarak etkileyen en iyi parametreleri belirlemeyi amaçlayarak GRA yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada, katman yüksekliği, ekstruder sıcaklığı, doluluk yüzdesi ve baskı hızının üç mekanik özelliği üzerindeki farklı kombinasyonlarının etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sharma ve Kumar [4], EYM ile basılmış PLA numunelerinin mekanik özelliklerini incelemiştir. Özellikle, çekme dayanımı ve Shore sertliği gibi mekanik özellikler üzerindeki etkiler araştırılmıştır. İşlem parametrelerinin (katman yüksekliği, nozul sıcaklığı, raster açısı ve çevresel basınç gibi) bu mekanik özelliklere olan etkisi değerlendirilmiştir. GRA kullanılarak daha iyi mekanik özelliklere sahip numunelerin üretimi için işlem parametreleri optimize edilmiştir. John vd. [15], Taguchi deney tasarımı ve GRA kullanarak hücresel geometri, nozul çapı ve gerilme hızı gibi parametreleri incelemişlerdir. Yapılan çekme testleri sonuçlarına göre, kare desenli numuneler diğerlerine göre daha iyi performans göstermiş ve mekanik dayanımı daha yüksek bulunmuştur. GRA, 0.8 mm'lik büyük nozul çapı, dakikada 5 mm'lik gerilme hızı ve kare hücresel geometri kombinasyonunun en yüksek ilişki derecesine sahip olduğunu göstermiştir. Nozul çapının en belirgin faktör olduğu ve hücresel geometrinin ise ikinci sırada yer aldığı belirlenmiştir. Patel vd. [3] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, öncelikle çekme dayanımı, Shore sertliği ve boyutsal hassasiyet gibi mekanik özelliklere odaklanılmıştır. Numunelerin 3D baskısı için belirlenen işlem parametreleri arasında katman yüksekliği, dolgu yoğunluğu ve baskı hızı bulunmaktadır. Çalışmanın bir sonraki aşamasında, Taguchi tabanlı Gri İlişkisel Analiz (TGRA) yöntemi kullanılarak çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiş ve tüm mekanik özelliklerin en uygun seviyede optimize edildiği bir numune üretilmiştir.

Otomotiv ve savunma sektörlerinde, parçaların hafif ve dayanıklı olması gereklidir. Hafif parçalar, araçların performansını artırırken yakıt verimliliğini de iyileştirir. Savunma sektöründe ise hafif ve dayanıklı malzemeler, taşıma kapasitesini artırırken operasyonel manevra kabiliyetini artırır. Ayrıca zamanın etkili bir şekilde yönetilmesi önemlidir. Özellikle savunma sektöründe, operasyonların kesintisizliği ve hızlı tepki verebilme yeteneği, zamanın kritikliğini daha da artırır. Bu ihtiyaçları karşılamak için, EYM gibi 3D baskı teknolojileri önemli bir rol oynar. Bu teknolojiler, hızlı prototipleme ve üretim süreçlerini sağlayarak zamanı kısaltabilirler. Ayrıca, çeşitli malzemelerle hafif ve dayanıklı parçaların üretimini mümkün kılarlar. Ancak, bu teknolojilerin

etkin bir şekilde kullanılabilmesi için işlem parametrelerinin doğru bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, EYM yöntemiyle üretilen parçaların çekme, akma dayanımı ve ağırlığını etkileyen dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı gibi işlem parametreleri incelenmiştir. Deneyler Taguchi yöntemi kullanılarak tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Taguchi gri ilişkisel analiz yöntemi (TGRA), çekme ve akma dayanımını maksimize etmek ve ağırlığı minimize etmek için birden fazla performans özelliğini optimize etmede kullanılmıştır. Detaylı literatür incelemesinden, çoğu araştırmacının EYM işlem parametrelerinin optimizasyonunda Taguchi yöntemini kullandığı görülmüştür. Birkaç çalışmada TGRA denenmiş ancak önerilen giriş-yanıt kombinasyonları kullanılmamıştır. Bu çalışma literatüre ilave bir katkı sunmuştur. Giriş parametrelerinin değerleri ve yanıtlar, literatür incelemesi sonucunda belirlenmiştir. Özellikle çok amaçlı optimizasyon için TGRA metodolojisinin seçilmesine karar verilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Önerilen yöntem Şekil 1'de gösterilmiştir. İlk olarak, donanım, malzeme ve işlem parametrelerinin seçimi yapılmıştır. Deney için Taguchi'nin L9 tasarımı kullanılmış ve numuneler bu tasarıma göre basılmıştır. Ardından, numunelerin mekanik özellikleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler, analiz sürecinde değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın genel diyagramı (General diagram of the article)

2.1. İşlem Parametreleri ve Araştırma Değerleri (Process Parameters and Research Values)

Araştırmalar, EYM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özelliklerinin baskı hızı, katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu gibi işlem faktörlerinden etkilendiğini göstermektedir [16]. Deneyler için Taguchi deney tasarımının L9 ortogonal dizisi kullanılmıştır ve her işlem parametresi için üç farklı seviye dikkate alınmıştır. Bu seviyeler, literatür dikkate alınarak belirlenmiştir. İncelenen işlem parametrelerinin araştırma aralıkları ve elde edilen seviyeleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. İşlem parametreleri ve seviyeleri (Process parameters and levels)

Parametreler	Seviyeleri		
Dolgu Yoğunluğu (DY) (%)	40	60	80
Katman Kalınlığı (KK) (mm)	0.2	0.25	0.3
Baskı Hızı (H) (mm/sn)	40	50	60

2.2. Materyal (Material)

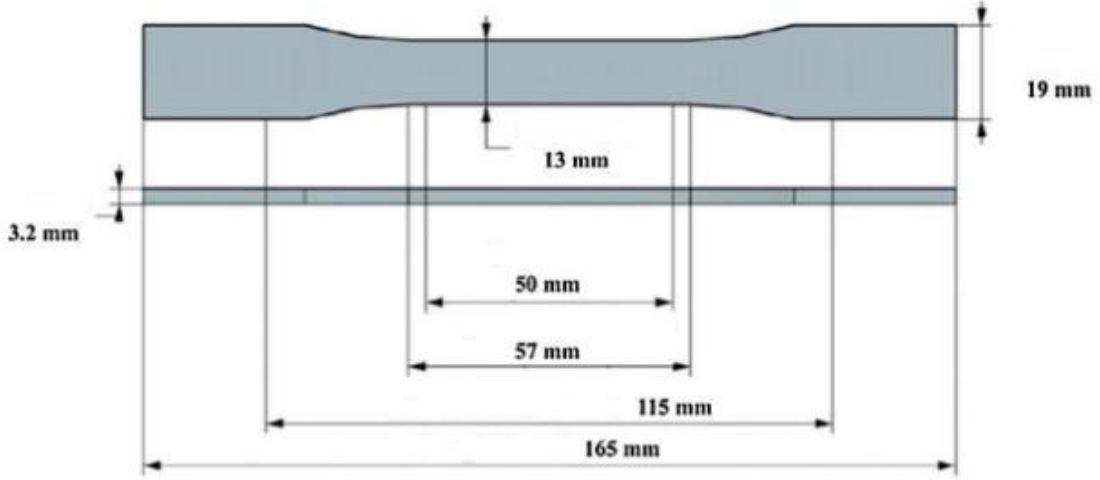
Analiz amacıyla test numunelerinin basımında Teira3D 1.75 mm lik PLA' dan yapılmış beyaz filament kullanılmıştır. PLA malzemesinin özellikleri Tablo 2' de gösterilmektedir.

Tablo 2. PLA malzeme özellikleri (PLA material properties)

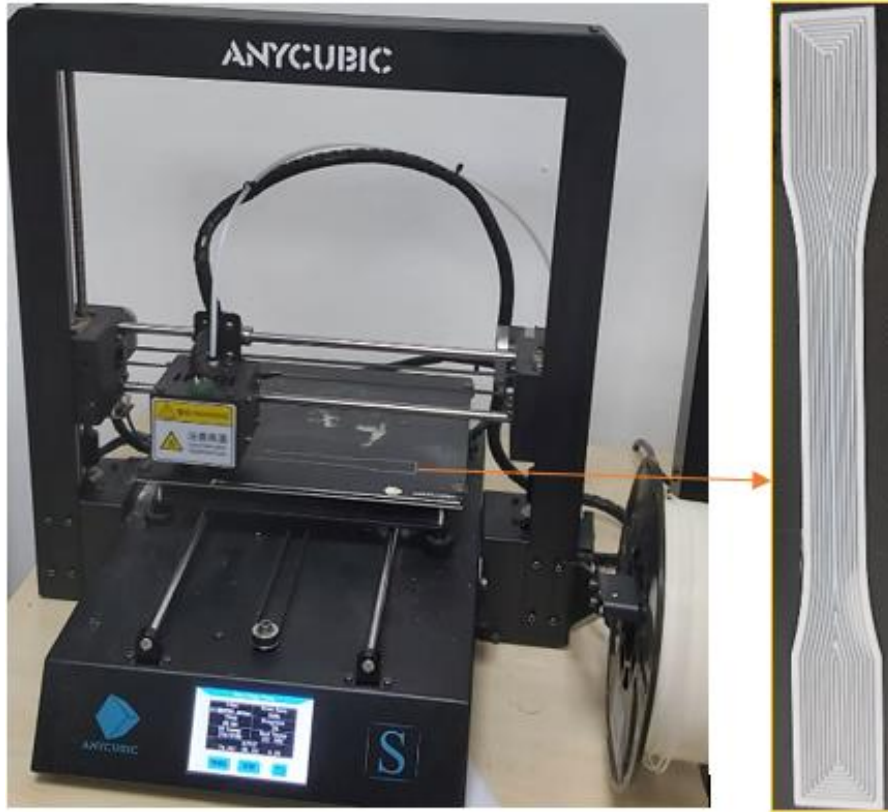
Özellik	Aralık
Ekstrüzyon Sıcaklığı	200-220 °C
Tabla Sıcaklığı	50-60 °C

2.3. Numune Hazırlığı (Sample Preparation)

PLA'nın çekme özellikleri ASTM D638 tip 1 standardı kullanılarak incelenmiştir. CAD 3D modelinin oluşturulması için kullanılan örneğin şekli ve boyutları Şekil 2'de gösterilmiştir [17]. CAD modeli STL formatında CURA yazılımına aktarılmıştır. PLA örneklerini üretmek için ANYCUBIC yazıcı kullanılmıştır (Şekil 3). Her bir numune 0.4 mm nozul çapı, 50 °C platform sıcaklığı, 210 °C baskı sıcaklığı olmak üzere aynı özelliklerle basılmıştır.



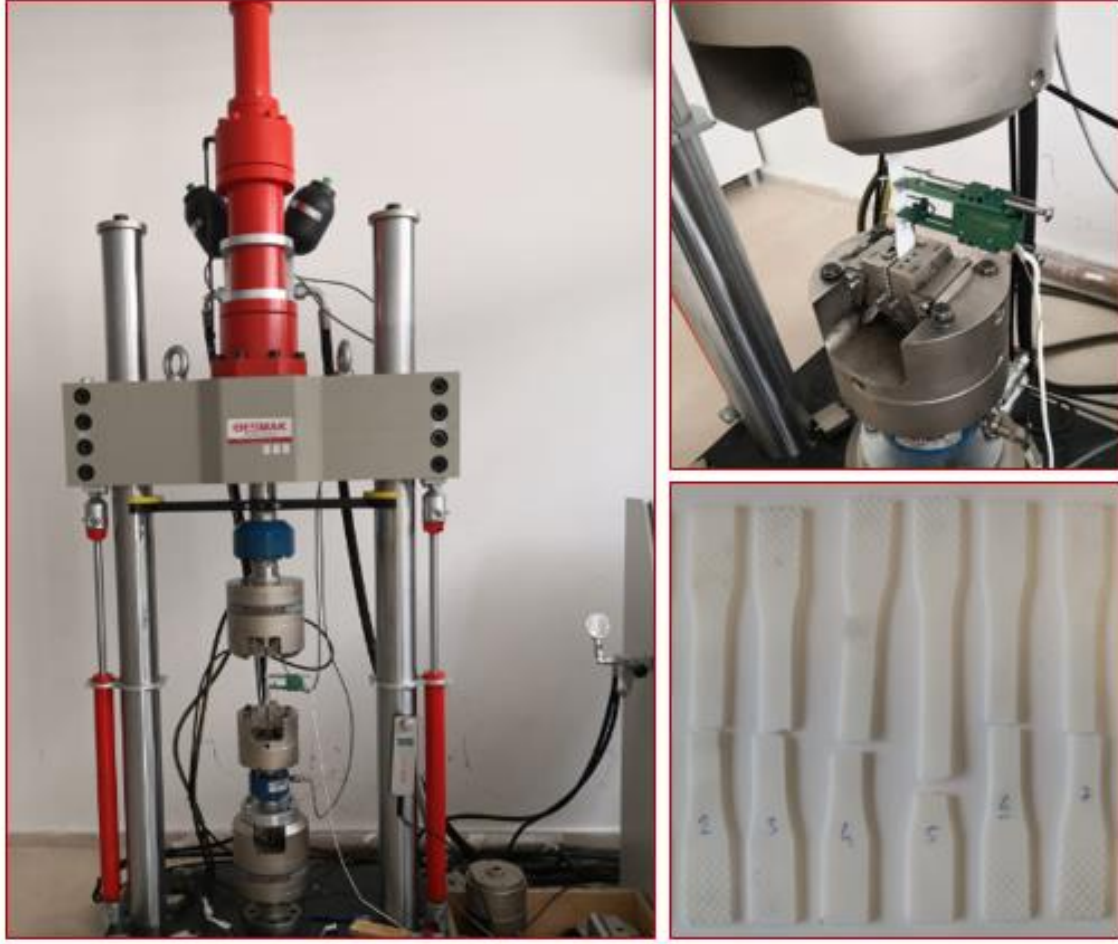
Şekil 2. Çekme numunesinin CAD modeli (CAD model of the tensile specimen)



Şekil 3. Numunenin 3 boyutlu baskısı (3D printing of the specimen)

2.4. Ölçüm Sonuçları (Measurement Results)

Karadeniz Teknik Üniversitesi METAM' da gerçekleştirilen ölçümlerde, çekme testleri 25kN kapasiteli Besmatik statik dinamik universal test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde ekstansiyometre kullanılmış olup, çekme hızı 5 mm/dak olarak belirlenmiştir. Üretim parametre değişikliklerinin numunelerin çekme ve akma dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek için bu test sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 4' te çekme testi cihazı, test esnasındaki numuneler, çekme testi sonrası numunelerin kopma görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4. Çekme testi cihazı, test esnasındaki numuneler ve çekme testi sonrası numunelerin kopma görüntüleri (Tensile test machine, specimens during the test, and images of the specimens after fracture)

Ayrıca, Şekil 5'te RADWAG AS 220.R2 PLUS kullanılarak yapılan numunelerin ağırlık ölçümüne ait görüntüyü bulabilirsiniz.



Şekil 5. Numunelerin ağırlık ölçümü (The weight measurement of the samples)

Çekme dayanımı (ÇD), Akma Dayanımı (AD) ve Ağırlık (A) için Taguchi' nin L9 Ortogonal Dizisi kullanılarak belirlenen yanıtlar Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Ölçülen yanıtlar (Measured responses)

Deney No	Dolgu Yoğunluğu (%)	Katman Kalınlığı (mm)	Baskı Hızı (mm/sn)	ÇD (MPa)	AD (MPa)	A (g)
1	40	0.2	40	41.73	34.73	7.5667
2	40	0.25	50	44.14	38.53	8.0964
3	40	0.3	60	48.17	30.85	8.7138
4	60	0.2	50	46.08	27.53	8.181
5	60	0.25	60	48.14	28.71	8.6518
6	60	0.3	40	48.65	34.19	9.1133
7	80	0.2	60	49.89	36.09	8.9661
8	80	0.25	40	51.72	35.97	9.3539
9	80	0.3	50	52.29	42.82	9.5818

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Taguchi Deney Tasarım Yöntemi (Taguchi Experimental Design Method)

Taguchi metodu, ürün ve süreçlerin geliştirilmesinde kullanılan deneysel bir tasarım ve optimizasyon tekniğidir. Bu yöntem, maliyetleri minimize etmeye odaklanarak en az deney sayısı ile maksimum bilgi elde etmeyi amaçlar [3-4]. Endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilen Taguchi metodu, birçok değişkenin etkileşimini analiz etmek için tasarlanmıştır. Bu çalışmada, EYM ile üretilen örneklerin mekanik özellikleri, EYM sürecinin kontrol parametreleri ile ilişkilendirilerek Taguchi tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada, numunelerin dayanıklılığına odaklanılmış ve en yüksek dayanıklılığın elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, çekme ve akma dayanımı için "daha büyük, daha iyi" kalite kriteri benimsenmiştir. S/N oranı hesaplama formülü, Eşitlik 1' de gösterilmiştir [18].

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (1)$$

S/N oranı, bu kalite kriterini nicel olarak değerlendirmek için kullanılan bir yöntemi temsil etmektedir. Numunenin hafif olması amaçlandığından, ağırlık için yanıtların kalite özelliklerini değerlendirirken Eşitlik 2'deki "daha düşük, daha iyi" prensibi tercih edilmiştir [18].

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (2)$$

ANOVA, parametrelerin %95 güven düzeyindeki önemini ve yanıtları etkilemedeki yüzde katkıları belirlemek için sıkça kullanılan bir istatistiksel analiz yöntemidir [14]. Bireysel yanıtların analizi için ANOVA gerçekleştirilmiştir. Çekme dayanımı için Tablo 4' te sunulan analiz sonuçları, dolgu yoğunluğunun çekme dayanımını en çok etkileyen faktör olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Tablo 5 ve Şekil 6' da gösterildiği gibi, sinyal-gürültü oranı verileri, parametreleri sıralamak ve bunların numunenin çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanılmıştır. Tablo 5' e göre, baskı sırasında numunenin çekme mukavemetini en çok etkileyen parametrenin dolgu yoğunluğu olduğu, bunu katman kalınlığı ve baskı hızının takip ettiği açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar, literatürü desteklemektedir [3]. Şekil 6' ya göre, çekme dayanımı için optimum baskı koşulları, %80 dolgu yoğunluğu (DY), 0.30 mm katman kalınlığı (KK) ve 60 mm/sn baskı hızı (H) olarak belirlenmiştir. Modelin R kare değeri %96.60' dır. Katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu arttıkça, numunenin çekme dayanımı belirgin şekilde artmaktadır. Ayrıca, baskı hızının 40 mm/sn' den 60 mm/sn' ye çıkmasıyla çekme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Daha kalın katmanlar, daha az katman gerektirir ve bu da daha az ara yüzey ve bağlantı noktası demektir. Bu durum, daha güçlü bir mekanik bağlanma ve homojen bir yapı oluşturabilir, bu da çekme dayanımını artırabilir. Syed vd. göre, katman kalınlığındaki artış, bileşenin genel dayanıklılığını artırır; bu durum, numunenin çekme mukavemetinin önemli ölçüde artmasına yol açar. Dolgu yoğunluğunun çekme mukavemeti üzerindeki etkisi ise çok açıktır: Numunenin yoğunluğu arttıkça, çekme mukavemeti

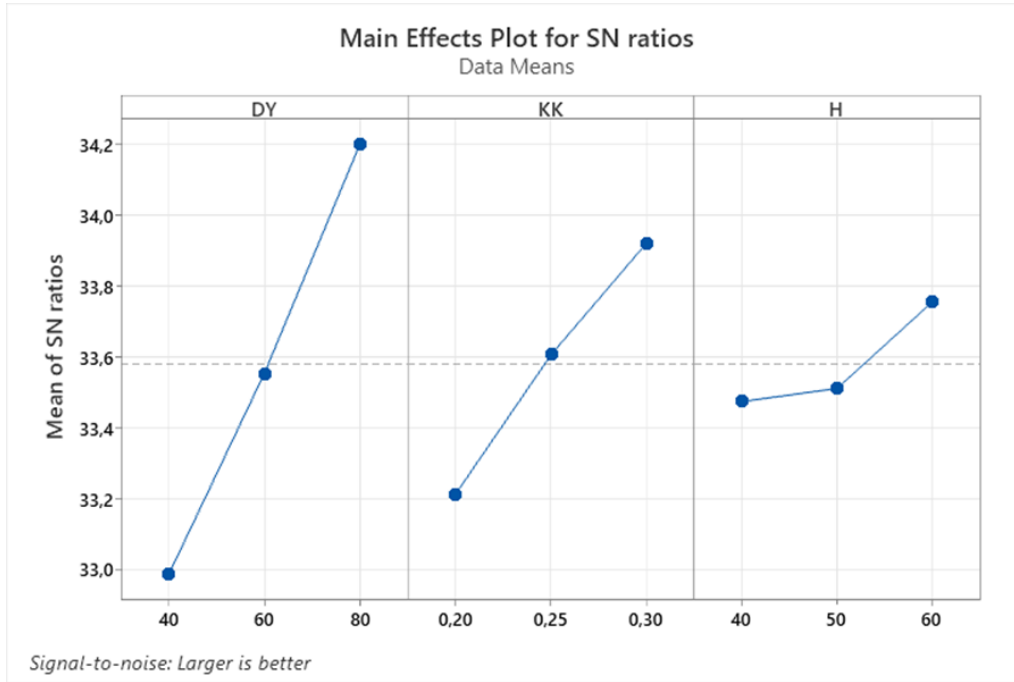
de artar. Dolayısıyla, dolgu yoğunluğunun artmasıyla birlikte çekme mukavemetinde bir artış gözlemlenir [19]. Günay vd. [20], üretilen numunelerin kesit alanlarının aynı olmasına rağmen, kesit alanındaki doluluk oranının artmasının birim alana düşen çekme yükü taşıma kapasitesini artıracak ve bu durumun yüksek dayanıma neden olacağını açıklıyorlar. Ahmad vd. [21] de, dolgu yoğunluğunun artmasıyla mekanik dayanıklılığın artacağını, bu durumun daha fazla malzemenin birikmesiyle ve dolayısıyla parçanın içinde daha az boşluk olmasıyla gerçekleşeceğini belirtiyorlar.

Tablo 4. Çekme dayanımı için ANOVA (ANOVA for tensile strength)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	PCR (%)
DY	2	2.2122	2.2122	1.10612	20.21	0.047	68.75
KK	2	0.7564	0.7564	0.37821	6.91	0.126	23.5
H	2	0.1395	0.1395	0.06975	1.27	0.440	4.34
Residual Error	2	0.1094	0.1094	0.05472			
Total	8	3.2176					

Tablo 5. Çekme dayanımı için yanıt tablosu (Response table for tensile strength)

Level	DY	KK	H
1	32.99	33.21	33.47
2	33.55	33.61	33.51
3	34.20	33.92	33.76
Delta	1.21	0.71	0.28
Rank	1	2	3



Şekil 6. Çekme dayanımı için S/N oranlarının ana etki grafiği (Main effect plot of S/N ratios for tensile strength)

Tablo 6' da sunulan ANOVA sonucuna göre, dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı, akma dayanımının %77.64' ünü açıklamaktadır. Tablo 7' deki S/N oranlarına ilişkin yanıt tablosu, dolgu yoğunluğunun akma dayanımı üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğunu, bunu baskı hızı ve katman kalınlığının takip ettiğini göstermektedir. Şekil 7' ye göre, akma dayanımı için optimum baskı koşulları, %80 dolgu yoğunluğu (DY), 0.30 mm katman kalınlığı (KK) ve 50 mm/sn baskı hızı (H) olarak belirlenmiştir. Kerekes vd. [22], dolgu yoğunluğunun artmasıyla birlikte Young modülü, başlangıç akma gerilimi, mukavemet ve tokluk özelliklerinin arttığını bulmuştur. Numunenin özelliklerini orta düzeyde etkileyen bir diğer faktör olarak katman kalınlığını

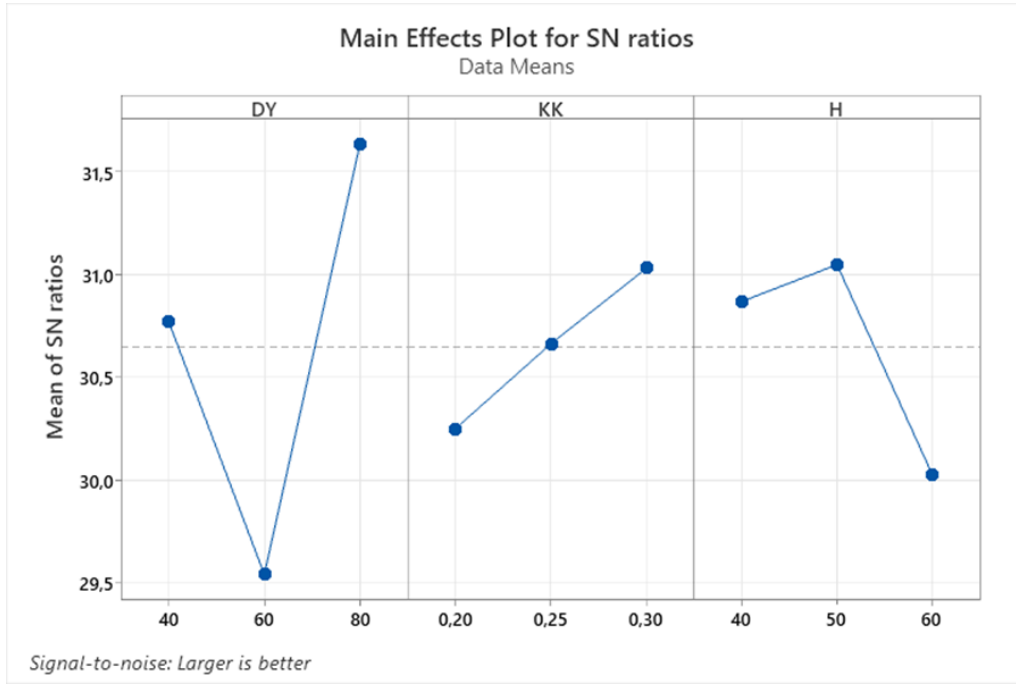
belirlemiştir. Daha düşük tabaka kalınlığının, akma sonrası özelliklerdeki belirsizlikleri artırdıklarını gözlemlemiştir.

Tablo 6. Akma dayanımı için ANOVA (ANOVA for yield strength)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	PCR (%)
DY	2	6.6078	6.6078	3.3039	2.47	0.288	55.22
KK	2	0.9121	0.9121	0.4561	0.34	0.746	7.6
H	2	1.7705	1.7705	0.8852	0.66	0.602	14.8
Residual Error	2	2.6761	2.6761	1.3381			
Total	8	11.9666					

Tablo 7. Akma dayanımı için yanıt tablosu (Response table for yield strength)

Level	DY	KK	H
1	30.77	30.25	30.87
2	29.54	30.67	31.05
3	31.63	31.03	30.03
Delta	2.09	0.78	1.02
Rank	1	3	2



Şekil 7. Akma dayanımı için S/N oranlarının ana etki grafiği (Main effect plot of S/N ratios for yield strength)

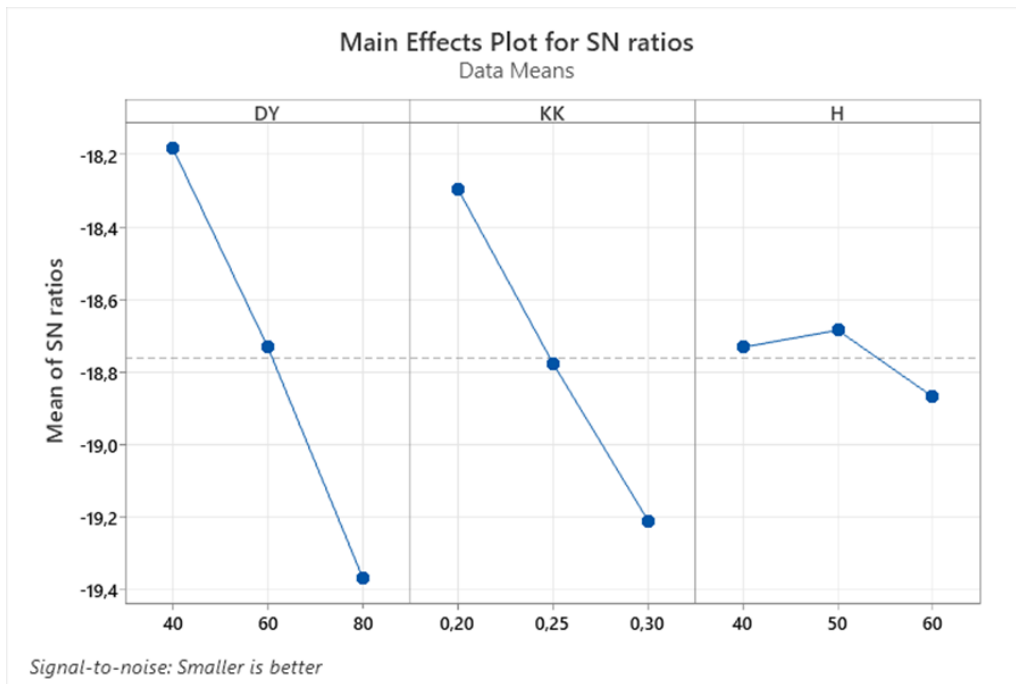
Tablo 8' de sunulan ANOVA tablosundan, dolgu yoğunluğunun ağırlığa en yüksek etkiye sahip olduğu ve bunu katman kalınlığının takip ettiği görülmektedir. Tablo 9' daki sıralama sonuçlarına göre, ağırlık için en etkili parametre 1.18 değeriyle dolgu yoğunluğu iken en az etkili parametre 0.18 değeriyle baskı hızı olmuştur. Ana etki grafiğine göre, dolgu yoğunluğu ve katman kalınlığının artışının ağırlığı artırdığı görülmektedir. Bu sonuç, Tunçel vd.'nin çalışmasını destekler niteliktedir [23]. Şekil 8'e göre, minimum ağırlık için optimum baskı koşulları, %40 dolgu yoğunluğu (DY), 0,20 mm katman kalınlığı (KK) ve 50 mm/sn baskı hızı (H) olarak belirlenmiştir. Modelin R kare değeri 98.40'dır. Dolgu yoğunluğu, EYM yöntemiyle üretilen parçanın hem kütlesini hem de dayanıklılığını önemli ölçüde etkiler. Daha düşük yoğunluklar, azalan baskı süresi ve malzeme kullanımıyla maliyet tasarrufu ve ağırlık azaltımı sağlar. Ancak, yapı içindeki boşlukların artması gözenekliliği artırır ve bu durum, bağlanmış alanın azalmasına ve dolayısıyla mekanik özelliklerin zayıflamasına yol açabilir. Öte yandan, dolgu yoğunluğunun artması, daha yüksek mekanik kalite sunar ancak basım süresini önemli ölçüde uzatabilir [21].

Tablo 8. Ağırlık için ANOVA (ANOVA for weight)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	PCR (%)
DY	2	2.10758	2.10758	1.05379	37.92	0.026	60.74
KK	2	1.25265	1.25265	0.62633	22.54	0.042	36.1
H	2	0.05389	0.05389	0.02694	0.97	0.508	1.55
Residual Error	2	0.05558	0.05558	0.02779			
Total	8	3.46971					

Tablo 9. Ağırlık için yanıt tablosu (Response table for weight)

Level	DY	KK	H
1	-18.18	-18.30	-18.73
2	-18.73	-18.78	-18.68
3	-19.37	-19.21	-18.87
Delta	1.18	0.91	0.18
Rank	1	2	3



Şekil 8. Ağırlık için S/N oranlarının ana etki grafiği (Main effect plot of S/N ratios for weight)

3.2. Gri İlişkisel Analiz (Grey Relational Analysis)

Taguchi yöntemi kullanılarak her bir yanıt bağımsız olarak optimize edilebilmektedir. Birçok durumda, tek bir yanıt değeri (tek bir ölçüt veya tek bir hedef) kullanmak yetersiz olabilir çünkü gerçek dünya uygulamaları genellikle çok karmaşıktır ve birden fazla kriter veya hedefi dikkate almak gerekir. Çoklu yanıt değerlendirmesi, EYM gibi karmaşık 3B baskı süreçlerinde analizi daha kapsamlı hale getirir ve karar verme sürecini iyileştirir. Gri ilişkisel analiz (GRA), çok kriterli karar verme problemlerini çözmek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde, çeşitli alternatiflerin performansı arasındaki ilişkileri analiz etmek için gri ilişkisel derece (GRG) kullanılır. GRG, her bir alternatifin belirlenen kriterlere olan yakınlığını ölçen bir ölçüdür. Çok amaçlı optimizasyon durumunda, en yüksek performansın en yüksek GRG ile ilişkilendirildiği gözlemlenmiştir [4, 19]. GRA'nın uygulanmasında temel adımlardan biri verinin normalizasyonudur. Veriyi normalleştirmek için üç seçenek sunulur: nominal, daha küçük ve daha büyük daha iyidir. Bu aşama, verilen veriyi 0 ile 1 arasında standart boyutsuz bir ölçeğe dönüştürür. Çalışmada, çekme ve akma dayanımı gibi mekanik özelliklerin optimize edilmiş performansı için en yüksek değere sahip olması gerektiği düşünüldüğünden, daha büyük daha iyidir seçeneği tercih edilmiştir. Daha büyük daha iyidir seçeneği için, veriyi normalleştirmede eşitlik 3 kullanılmıştır [13].

$$X^*(p) = \frac{X_i(p) - \text{Min}(X_i(p))}{\text{Max}(X_i(p)) - \text{Min}(X_i(p))} \quad (3)$$

Dönüşüm sırasında, ağırlığın minimize edilmesi istendiğinden daha küçük, daha iyi yaklaşımı kullanılmıştır. Ağırlığı minimize etmek için normalleştirirken eşitlik 4 kullanılmıştır [24].

$$X^*(p) = \frac{\text{Max}(X_i(p)) - X_i(p)}{\text{Max}(X_i(p)) - \text{Min}(X_i(p))} \quad (4)$$

Daha sonra, her bir yanıtın sapma dizisi belirlenir. Gri İlişkisel Katsayı, bu sapma dizisinden hesaplanır. Ardından, her bir yanıtın ağırlığı Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi ile belirlenir.

AHP, çok kriterli karar verme süreçlerinde karar vericilere kriterler arasındaki öncelikleri belirlemede ve alternatifler arasında tercih yapmada yardımcı olan matematiksel yöntemdir. İlk adım olarak, karar verme sürecinde önemli olan kriterler belirlenir. İkinci adımda, belirlenen kriterler birbirleriyle karşılaştırılarak karşılaştırma matrisi oluşturulur. Bu matris, her kriter çifti için önem derecelerini içerir. Üçüncü adımda, karşılaştırma matrisindeki verilere dayanarak, kriterlerin öncelikleri veya normalize edilmiş ağırlıkları hesaplanır. Bu hesaplama süreci, tutarlılık kontrolü yaparak ve ağırlıkları belirlemek için özel matematiksel işlemler kullanarak gerçekleştirilir [25]. Son olarak, dördüncü adımda, belirlenen kriterlere göre alternatifler değerlendirilir ve her alternatif için kriter ağırlıkları kullanılarak toplam değerlendirme yapılır. Bu değerlendirme sonucunda, en uygun alternatif veya alternatifler belirlenir ve karar verme süreci yapılandırılarak nesnel bir karar verme ortamı sağlanır.

AHP, karmaşık karar verme problemlerinde farklı kriterler arasındaki ilişkileri analiz ederek, karar vericilere sistematik bir yaklaşım sunar. Hem akademik hem de endüstriyel alanda geniş bir uygulama alanına sahiptir [26-28]. AHP ile hesaplanan ağırlık değerleri şu şekildedir: çekme dayanımı için 0.5571, akma dayanımı için 0.3202 ve ağırlık için 0.1226.

Son olarak, Gri İlişkisel Derece (GRG), her bir yanıtın Gri İlişkisel Katsayı değerlerinin AHP ile ağırlıklı toplamı olarak hesaplanır. Bu süreç, her bir yanıtın etkisini dikkate alarak tek bir çoklu yanıt skoru elde etmek için yapılır [14].

Gri İlişkisel Derece ve sıralamalar yukarıdaki adımlara göre hesaplanmış ve sonuçlar tablo 10' da gösterilmiştir. En yüksek gri ilişkisel derece 1. sıradadır. Deney 9, kontrol edilebilir parametrelerin en iyi optimum kombinasyonunu temsil etmektedir. GRG sonuçları, parametrelerin GRG üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla ANOVA tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. Tablo 11, toplam varyansın %76'sının en yüksek katkıya sahip olan dolgu yoğunluğuna ($p < 0.05$) ait olduğunu göstermektedir. Benzer sonuç Patil vd. [29] çalışmasında da görülmektedir. Ayrıca, katman kalınlığı ve baskı hızının GRG üzerindeki etkisi söz konusu olduğunda önemsiz değişkenler olduğu sonucuna varılabilir ($p > 0.05$). Model için R-kare değeri %96.59' dur. GRG için sinyal-gürültü oranı Yanıt Tablosuna (Tablo 12) göre, en yüksek etkiye sahip olan faktör dolgu yoğunluğu, bunu katman kalınlığı ve baskı hızı takip etmektedir.

Şekil 9, maksimum ve minimum çoklu performansla ulaşmak için ilgili parametre seviyelerini göstermektedir. Optimum GRG değerinin %80 dolgu yoğunluğu, 0.30 mm katman kalınlığı ve 50 mm/sn baskı hızında elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Tablo 13, başlangıç ve optimum parametreler arasındaki GRG iyileştirmesini göstermektedir. Karşılaştırma için seçilen başlangıç parametreleri: %80 dolgu yoğunluğu, 0.30 mm katman kalınlığı ve 40 mm/sn baskı hızıdır. Bu parametrelerin yanıtları: 51.18 MPa çekme dayanımı, 32.91 MPa akma dayanımı ve 9.5777 g ağırlıktır. Bu parametreler için hesaplanan GRG değeri ise 0.6407' dir. Optimum parametrelerle yapılan deneyde çekme dayanımı 52.29 MPa, akma dayanımı 42.82 MPa, ağırlık 9.5818 g ve GRG değeri 0.9182' dir. Dolayısıyla %43.31' lik bir GRG iyileştirmesi elde edilmiştir. Ağırlıkta kayda değer bir değişim olmamakla birlikte, çekme dayanımında 1.11 MPa, akma dayanımında 9.91 MPa artış meydana gelmiştir.

Tablo 10. Gri ilişkisel analiz sonucu (Result of grey relational analysis)

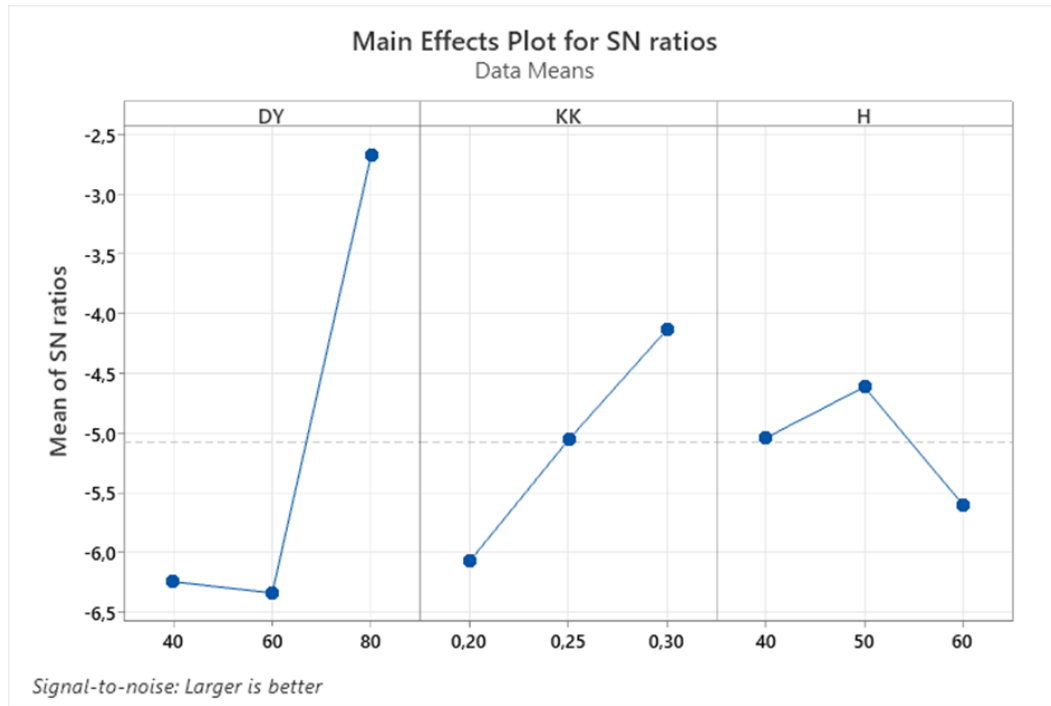
Deney No				Normalizasyon			Uzaklık Matrisi			Gri İlişki Katsayısı			Gri İlişki Derecesi				
	ÇD	Ağırlık	AD	ÇD	Ağırlık	AD	ÇD	Ağırlık	AD	ÇD	Ağırlık	AD	ÇD*0.5571	Ağırlık*0.1226	AD*0.3202	GRG	Sıralama
1	41.7300	7.5667	34.7300	0.0000	1.0000	0.4709	1.0000	0.0000	0.5291	0.3333	1.0000	0.4859	0.1857	0.1226	0.1556	0.4639	8
2	44.1400	8.0964	38.5300	0.2282	0.7371	0.7194	0.7718	0.2629	0.2806	0.3931	0.6554	0.6406	0.2190	0.0804	0.2051	0.5045	5
3	48.1700	8.7138	30.8500	0.6098	0.4307	0.2171	0.3902	0.5693	0.7829	0.5617	0.4676	0.3898	0.3129	0.0573	0.1248	0.4951	6
4	46.0800	8.1810	27.5300	0.4119	0.6952	0.0000	0.5881	0.3048	1.0000	0.4595	0.6212	0.3333	0.2560	0.0762	0.1067	0.4389	9
5	48.1400	8.6518	28.7100	0.6070	0.4615	0.0772	0.3930	0.5385	0.9228	0.5599	0.4815	0.3514	0.3119	0.0590	0.1125	0.4835	7
6	48.6500	9.1133	34.1900	0.6553	0.2325	0.4356	0.3447	0.7675	0.5644	0.5919	0.3945	0.4697	0.3298	0.0484	0.1504	0.5285	4
7	49.8900	8.9661	36.0900	0.7727	0.3055	0.5598	0.2273	0.6945	0.4402	0.6875	0.4186	0.5318	0.3830	0.0513	0.1703	0.6046	3
8	51.7200	9.3539	35.9700	0.9460	0.1131	0.5520	0.0540	0.8869	0.4480	0.9026	0.3605	0.5274	0.5028	0.0442	0.1689	0.7159	2
9	52.2900	9.5818	42.8200	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.3333	1.0000	0.5571	0.0409	0.3202	0.9182	1

Tablo 11. GRG için ANOVA (ANOVA for GRG)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	PCR (%)
DY	2	26.161	26.161	13.0805	22.29	0.0435	76
KK	2	5.627	5.627	2.8134	4.79	0.173	16.35
H	2	1.461	1.461	0.7307	1.25	0.445	4.24
Residual Error	2	1.173	1.173	0.5867			
Total	8	34.422					

Tablo 12. GRG için yanıt tablosu (Response table for GRG)

Level	DY	KK	H
1	-6.240	-6.065	-5.038
2	-6.335	-5.053	-4.612
3	-2.672	-4.129	-5.596
Delta	3.663	1.936	0.984
Rank	1	2	3



Şekil 9. Parametre yanıtlarının ve GRG' nin etkilerinin grafiksel gösterimi (Graphical representation of parameter responses and GRG effects)

Tablo 13. Başlangıç ve optimum parametre sonuçlarının karşılaştırılması

Yanıtlar	Başlangıç Parametresi			Optimum Parametre		
	DY %80	KK 0.30 mm	H 40 mm/s	DY %80	KK 0.30 mm	H 50 mm/s
ÇD		51.18 MPa		52.29 MPa		
AD		32.91 MPa		42.82 MPa		
A		9.5777 g		9.5818 g		
GRG		0.6407		0.9182		

4. SONUÇ (RESULT)

Bu çalışma, işlem parametrelerinin çıkış tepkileri üzerindeki etkisini araştırmakla kalmayıp aynı zamanda Taguchi yöntemi tabanlı gri ilişkisel analiz kullanılarak çekme dayanımı, akma dayanımı

ve ağırlığı eş zamanlı olarak etkileyen optimize edilmiş yazıcı parametrelerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu hedeflere ulaşmak için gri ilişkisel analiz (GRA) ve Taguchi yöntemleri kullanılmıştır. Araştırmadan çıkan sonuçlar şunlardır:

Çekme dayanımını en çok etkileyen parametre, dolgu yoğunluğudur ve katkısı %68.75' tir ($p < 0.05$).

Akma dayanımı için yapılan ANOVA analizine göre, parametreler akma dayanımının %77.64' ünü açıklamaktadır. Parametrelerin p değerleri 0.05'ten büyük çıkmıştır. S/N oranlarına ilişkin yanıt tablosu, dolgu yoğunluğunun akma dayanımı üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğunu, bunu baskı hızı ve katman kalınlığının takip ettiğini göstermektedir.

Ağırlık, %60.74 ($p < 0.05$) katkı ile dolgu yoğunluğundan ve %36.10 ($p < 0.05$) katkı ile katman kalınlığından etkilenmektedir.

Taguchi Yöntemi'nin eksiklikleri, çoklu hedef optimizasyonunu sağlayan Gri İlişkisel Analiz ile giderilebilir. 9 deneyin deneysel verileri için Gri İlişkisel Derece ve sıralamalar hesaplanmıştır. En yüksek GRG'ye sahip optimum işlem parametreleri 9. deneyde elde edilmiştir.

Bu makine-malzeme-işlem parametre kombinasyonu için, ağırlığı en aza indirmek ve aynı zamanda çekme ve akma dayanımlarını maksimize etmek için dolgu yoğunluğu %80, katman kalınlığı 0.30 mm ve baskı hızı 50 mm/s olarak ayarlanmalıdır. Bu parametre değerlerinde çekme dayanımı 52.29 MPa, akma dayanımı 42.82 MPa ve ağırlık 9.5818 gram olarak elde edilmiştir. GRA kullanarak yapılan optimizasyon, başlangıç şartlarına göre GRG' de %43.31' lik bir iyileşme sağlamıştır. Gri ilişkisel analiz, çoklu yanıt optimizasyonunu gerçekleştirmek için etkili bir teknik olarak gözlemlenmiştir.

GRG için en önemli değişken %76 katkı oranı ile dolgu yoğunluğudur. Ayrıca, katman kalınlığı ve baskı hızınının GRG üzerindeki etkisi göz önüne alındığında anlamsız değişkenler olduğu sonucuna varılabilir ($p > 0.05$). Modelin R-kare değeri %96.59'dur.

Taguchi tabanlı GRA yöntemi literatürde kullanılmış olmasına rağmen, çalışmada kullanılan girdi-çıkı veri kombinasyonu daha önce araştırılmamıştır. Bu nedenle, çalışmanın özgün bir katkı sağladığı düşünülmektedir.




Daha sonraki çalışmalarda, farklı parametrelerin aynı çoklu yanıtların optimizasyonundaki etkilerini daha detaylı bir şekilde incelemek mümkün olabilir. Ayrıca, farklı çoklu yanıt optimizasyon yöntemlerinin karşılaştırılması ve performanslarının değerlendirilmesi de gelecek araştırmalarda dikkate alınabilir. Gelecekteki araştırmalarda, bulanık mantık ve genetik algoritma gibi tekniklerin uygulanabilirliği ve etkinliği incelenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. O. Özsolak, Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1): 9-14, 2019.
2. D.M. D'Addona, S.J. Raykar, D. Singh, D.Kramar, Multi objective optimization of fused deposition modeling process parameters with desirability function, *Procedia CIRP*, 99: 707-710, 2021.
3. K. Patel, S. Acharya, G.D. Acharya, Multi objective optimization of FDM parameters using taguchi grey relation analysis for PLA specimen, *Jurnal Kejuruteraan*, 36(1): 113-122, 2024.
4. K. Sharma, K. Kumar, Parametric multi-objective optimization of fused deposition modelling (FDM) with biopolymer using Grey-Taguchi method, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 1248(1):012107, 2022.
5. L. Kothandaraman, N.K. Balasubramanian, Optimization of the printing parameters to improve the surface roughness in fused deposition modeling, *2E3S Web of Conferences*, 399, 03003, 2023.
6. H. Hasdiansah, R.I. Yaşın, P. Pristiansyah et al., FDM-3D printing parameter optimization using taguchi approach on surface roughness of thermoplastic polyurethane parts, *Int J Interact Des Manuf*, 17: 3011-3024, 2023.
7. M. Heidari-Rarani, N. Ezati, P. Sadeghi, M. Badrossamay, Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(12): 2435-2452, 2022.
8. A. Rasheed et al, Experimental investigation and Taguchi optimization of FDM process parameters for the enhancement of tensile properties of Bi-layered printed PLA-ABS, *Mater. Res. Express*, 10, 095307, 2023.

9. D. Ali, A.F. Huayier, A. Enzi, Parametric prediction of FDM process to improve tensile properties using Taguchi method and artificial neural network, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(4): 130-138, 2023.
10. A.M. Pinar, B. Ergene, G. Atlıhan, A. A. Mağatlı, F. Kaya, B. Karahan, M. E. Nişancı, Statistical evaluation of the screw pull out forces of PLA parts manufactured by fused deposition modeling, *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 9(2): 310-321, 2023.
11. S. Demir, 3B yazıcı ile Polilaktik asit (PLA) esaslı numune üretiminde yazıcı parametrelerinin sertlik üzerindeki etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(2), 136-144, 2024.
12. O. Tunçel, M.S. Bayraklılar, The application of the Taguchi method for optimizing the compression strength of PLA samples produced using FDM, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1): 133-141, 2024.
13. Z. Shakeri, K. Benfriha, N. Zirak, M. Shirinbayan, Optimization of FFF processing parameters to improve geometrical accuracy and mechanical behavior of polyamide 6 using grey relational analysis (GRA), *Research Square*, 2021.
14. M. Singh, P.S. Bharti, Grey relational analysis based optimization of process parameters for efficient performance of fused deposition modelling based 3D printer, *Journal of Eng. Research*, ICMET Special Issue, 2022.
15. J. John, D. Devjani, S. Ali, S. Abdallah, S. Pervaiz, Optimization of 3D printed polylactic acid structures with different infill patterns using Taguchi-grey relational analysis, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(1): 62-78, 2023.
16. A. Dey, N. Yodo, A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 3(3):64, 2019.
17. J.Y. Tey, W.H. Yeo, Y.J. King, W.O. Ding, 3D printing of polylactic acid bioplastic-carbon fibres and twisted kevlar composites through coextrusion using fused deposition modeling, *Journal of Renewable Materials*, 8(12): 1671-1680, 2020.
18. Y. Kuruoğlu, M. Akgün, H. Demir, FDM yöntemiyle üretilen ABS, PLA ve PETG numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımının modellenmesi ve optimizasyonu, *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(3): 358-369, 2022.
19. Md. A. B. Syed, Q. Rahman, H. Md. Shahriar, M.M.A Khan, Grey-Taguchi approach to optimize fused deposition modeling process in terms of mechanical properties and dimensional accuracy, *Journal of Engineering Research, Innovation and Education*, 4(1), 2022.
20. M. Günay, S. Gündüz, H. Yılmaz, N. Yaşar, R. Kaçar, PLA Esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3d baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 73-79, 2020.
21. N.F.N. Ahmad, Y.H. Wong, N.N.N. Ghazali, A systematic review of fused deposition modeling process parameters, *Soft Science*, 2(11), 2022.
22. T.W. Kerekes, H. Lim, W.Y. Joe, G.j. Yun, Characterization of process-deformation/damage property relationship of fused deposition modeling (FDM) 3D-printed specimens, *Additive Manufacturing*, 25: 532-544, 2019.
23. O. Tunçel, K. Tüfekci, Ç. Kahya, Multi-objective optimization of 3D printing process parameters using gray-based Taguchi for composite PLA parts, *Polym Compos*, 1-15, 2024.
24. P. Achuthamenon Sylajakumari, R. Ramakrishnasamy, G. Palaniappan, Taguchi grey relational analysis for multi-response optimization of wear in co-continuous composite. *Materials*, 11(9), 1743, 2018.
25. A.A Supçiller, O. Çapraz, AHP-TOPSIS yöntemine dayalı tedarikçi seçimi uygulaması, ekonometri ve istatistik, 12. Uluslararası Ekonometri, Yöneylem Araştırması, İstatistik Sempozyumu Özel Sayısı, 13: 1-22, 2011.
26. T. Varol, Y. Kandemir, Alüminyum matrisli kompozitler için en uygun takviye malzemesinin AHP yöntemi ile seçimi, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 946-963, 2022.
27. M.R. Sadabadi, E. Chang, M. Saberi, Z. Zhou, Are MCDM methods useful? A critical review of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Analytic Network Process (ANP), *Cogent Engineering*, 6(1), 2019.
28. E. Ekin, G. Dolanbay, AHP temelli TOPSIS yöntemi ile yer seçim problemine ilişkin bir uygulama, *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(1): 301-317, 2024.
29. P. Patil, D. Singh, S.J. Raykar, J. Bhamu, Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for Printing Polylactic Acid (PLA) polymer components, *Materials Today: Proceedings* 45(6): 4880-4885, 2021.

Şekil Hafızalı Ve Süperelastik Ni-Ti Esaslı Alaşım Nitinol'ün Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması

Necdet Düzgören^{1,*} , Volkan Onar² , Fatih Özen¹ 

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Denizli, Türkiye

²Batman Üniversitesi, Beşiri Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Batman, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 16.07.2024

Kabul: 06.08.2024

Anahtar Kelimeler:

Şekil bellekli alaşımlar

NİTİNOL

Kaynaklanabilirlik

Süperelastik

ÖZET

Şekil hafızalı ve süperelastik alaşım malzemeler uygun ısı ve mekanik işlemlere maruz bırakılması durumlarında ilk boyutlarına geri dönebilme yeteneğine sahip malzemelerdir. Bu durum farklı endüstri dalları için büyük avantaj sağlamaktadır. Günümüz teknolojisinde geliştirilen değişik şekil bellekli alaşım grupları bulunmaktadır. Bu alaşımlardan endüstride en çok tercih edileni Ni-Ti esaslı alaşım olan "NİTİNOL" alaşımıdır. Bu çalışmanın amacı şekil hafızalı ve süperelastik alaşım türlerinden biri olan Ni-Ti esaslı alaşım olan NİTİNOL alaşımının kendi içerisinde ve diğer malzeme grupları ile farklı kaynak yöntemleri kullanılarak kaynaklanabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaç kapsamında yapılan çalışmaların incelenmesinde Ni-Ti esaslı şekil hafızalı ve süperelastik alaşım malzemelerinin kendi içinde ve diğer malzemelerle farklı kaynak yöntemleri kullanılarak ergitmeli ve katı hal kaynak yöntemlerinden bazıları ile kaynak işleminin uygulanabildiği ve alaşımın kendine özgü olan bu üstün özelliklerini koruduğu tespit edilmiştir.

Investigation of The Weldability of Nitinol, A Shape Memory And Superelastic Ni-Ti Based Alloy

ARTICLE INFO

Received: 16.07.2024

Accepted: 06.08.2024

Keywords:

Shape memory alloys

NİTİNOL

Weldability

Superelastic

ABSTRACT

Shape memory and superelastic alloy materials are materials that have the ability to return to their original dimensions when subjected to appropriate thermal and mechanical treatments. This provides great advantages for different industries. There are different shape memory alloy groups developed in today's technology. The most preferred among these alloys in the industry is the Ni-Ti based alloy "NİTİNOL". The aim of this study is to investigate the weldability of NİTİNOL alloy, one of the shape memory and superelastic alloy types, which is a Ni-Ti based alloy, in itself and with other material groups by using different welding methods. In the examination of the studies carried out within the scope of this purpose, it has been determined that Ni-Ti based shape memory and superelastic alloy materials can be welded in themselves and with other materials by using different welding methods, with some of the melt and solid-state welding methods, and the alloy preserves these unique superior properties.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin ilerlemesi ile tüketicinin istekleri doğrultusunda üreticiler yeni malzemeler arayışı içine girmişlerdir. Her geçen gün artan talepler doğrultusunda şekil hafızalı süperelastik özellik gösteren alaşım malzemeler ön plana çıkmaya başlamıştır. Bu malzemelerin kullanımı tamiratının ve birleştirme özelliklerinin de bilinmesi gerekliliğini arttırmaktadır. Araştırmacılar buna yönelik çalışmalarında özellikle birleştirme yöntemleri üzerinde çalışmalar yapmış ve farklı birleştirme yöntemleri kullanmışlardır ve istenen optimum mekanik özellikleri sağlayan birleştirmeleri tespit etmeyi amaçlamışlardır. Bu alaşımların hafıza özelliğinden faydalanılarak farklı birleştirme yöntemleri ile tasarımlar oluşturmuşlardır. Bu birleştirme yöntemlerinden biri de kaynaklı

*Corresponding author, e-mail:nduzgoren22@posta.pau.edu.tr

To cite this article: N. Düzgören, V. Onar, F. Özen, Investigation of The Weldability of Nitinol, A Shape Memory And Superelastic Ni-Ti Based Alloy, Manufacturing Technologies and Applications,5(2),104-117, 2024.

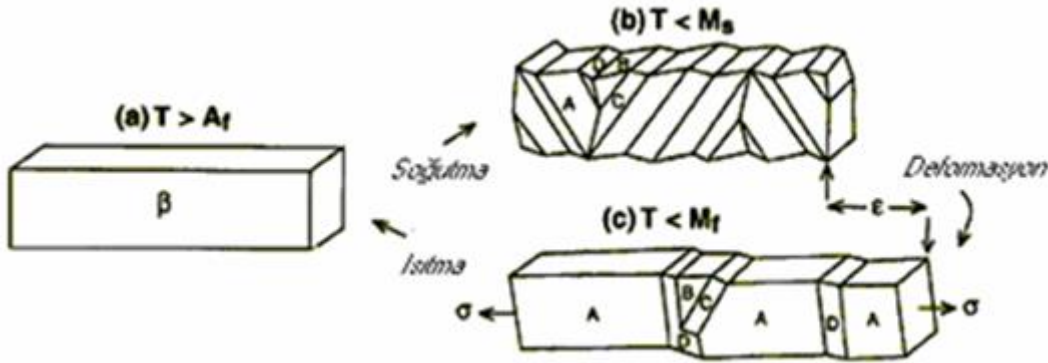
<https://doi.org/10.52795/mateca.1517314>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

birleştirme işlemleridir. Hali hazırda kullanılan farklı kaynak yöntemleri bulunmakla beraber bu alaşım malzemelere taşıdıkları özellikleri koruyabilecekleri kaynak işlemlerinin uygulanması da oldukça önem arz etmektedir. Yapılan araştırmalar ışığında şekil hafıza ve süperelastik özelliğine sahip alaşımlara farklı kaynak yöntemleri uygulanarak birleştirme işlemlerinin gerçekleştirildiği gözlemlenmiş ve bu işlemler neticesinde şekil hafıza özelliklerini tamamen kaybetmedikleri görülmüştür. Bu özelliklere sahip yüksek ısı girdisinden olumsuz etkilenen bu alaşımların kendi içinde ve farklı alaşım malzemelerle birleştirme işlemleri endüstride kullanılabilirlik açısından önem arz ettiği için bu malzemelerin kaynaklanabilirlikleri ve hangi yöntemlerle kaynak işlemlerinin uygulanabildiği üzerine genel bir araştırma yapılmıştır.

2. ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR (SHAPE MEMORY ALLOYS)

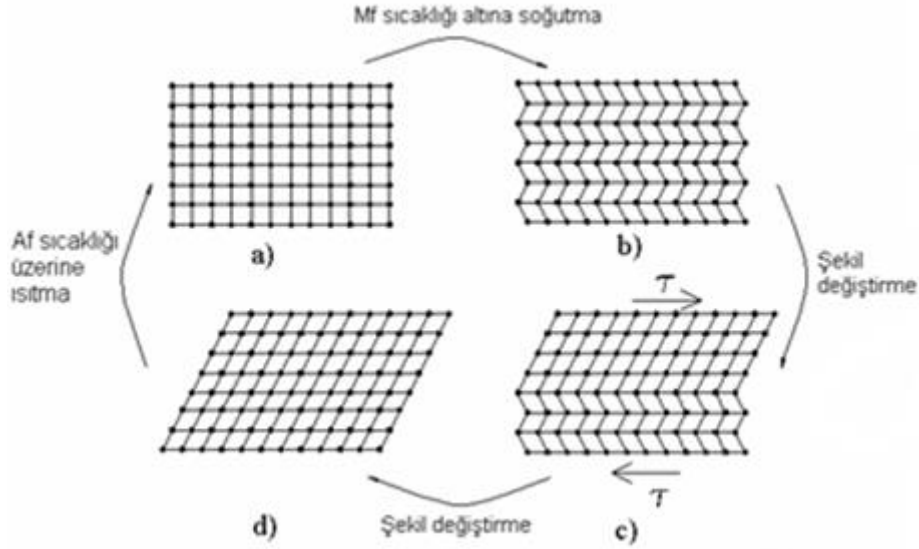
Malzeme biliminde farklı özelliklere sahip birçok alaşım bulunmaktadır. Bu farklı özelliklere sahip alaşımlardan biri de şekil hafızalı ve süperelastiklik özelliğe sahip olan alaşımlardır. Bu alaşımlar Şekil 1’de görüldüğü üzere ısıl ve mekanik işlemlere tabi tutulduğunda kritik sıcaklığın altında ve üstünde iki farklı kristal yapıya sahip olduklarından ilk şekline dönebilen alaşımlardır. Şekil hafıza özelliğine sahip farklı alaşımlar mevcuttur ve bu alaşımlardan Ni-Ti ve Cu esaslı olan alaşımlar üzerine daha yoğun çalışmalar literatüre kazandırılmıştır [1].

Şekil hafızalı alaşımlarda malzemenin ısıl veya mekanik özelliklere maruz kalması ile şekil değiştirerek eski şekline tekrar geri döndüğü, bu şekil değişimlerinin mikro ve makro yapılarıdaki faz dönüşümleri ile olduğu anlaşılmaktadır. Bu faz dönüşümlerinin ısı enerjisinin değişimiyle ve termodinamik yasalara uygun olduğu değerlendirilmiştir. Şekil değişimini kavrayabilmek için martenzitik faz dönüşümünün termodinamiğinin bilinmesi gerektiği bilinmelidir. Şekil hafızalı alaşımların martenzit fazda deformasyona uğraması ve östenit sıcaklığa çıkılıp tekrar soğutulması sonucu ilk şekline dönmesi ve soğutma süresince malzemeden alınan veya ısıtma esnasında malzemeye verilen enerjilerin faz dönüşüm entalpileri kadar olup termodinamik yasalara uygun olduğu bilinmektedir [2].



Şekil 1. (a) Beta fazlı kristal
 (b) Soğutma ve martenzite dönüşümü takiben kendi kendine yerleşen A, B, C ve D ikizlenmiş üniteler
 (c) A ünitesi uygulanan gerilme bitiminde konfigürasyonda baskın olur ve ısıtma anında malzeme beta fazlı yapısına yani orijinal şekline tekrar dönüş yapar [1]

Şekil hafıza etkisi martenzitik dönüşüm ile açıklanmaktadır. Şekil 2’de gösterildiği gibi alaşım östenit fazdayken soğutulup martenzit faza dönüştüğü anda kalıcı şekil değişimine maruz bırakıldıktan sonra tekrar malzemeye ısı verilip östenit faza ulaşıldığında malzemenin ilk şekline dönüştüğü görülür ve bu termodinamik değişim malzemenin şekil hafıza etkisi olarak tanımlanmıştır [3].



Şekil 2. Şekil hafıza dönüşüm mekanizması (Shape memory conversion mechanism) [3]

Şekil hafızalı alaşımların sıcaklık veya deformasyon etkisiyle faz değişimine uğradıkları ve buna bağlı olarak şekil değiştirdikleri ve bu durumun bu alaşımlara çok farklı avantajlar kazandırdığı gözlemlenmiştir. Bu alaşımların yüksek mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dirençleri gibi özellikleri sebebiyle havacılık sanayisi ve otomotiv sektörlerinin yanı sıra biyomedikal uygulamalarda da kullanıldığı bilinmektedir. İmplant malzemesi olarak kullanılan alaşımlardan canlı sistemleri ile uyumluluk beklenmekte ve bu uyumluluğun aşınma ve korozyon davranışları ile yüzey özellikleri iyi olan malzemelerle sağlanabildiği bilinmektedir. Şekil hafızalı alaşımların kimyasal yapıyı bozmadan yük taşıyıcı biyolojik sistemlerde yüksek mukavemet gösterdiği ve sağlık alanında avantaj sağladığı sonucuna çeşitli araştırmalar ışığında ulaşılabilmektedir [4].

Tablo 1. İki farklı şekil hafızalı alaşımın karşılaştırılması (Comparison of two different shape memory alloys) [5]

Özellikler	Şekil Hafızalı Alaşım Türü	
	Ni-Ti	Cu-Zn-Al
Geri Kazanılabilen Gerinim	%8 (max.)	%4 (max.)
Geri Kazanılabilen Gerilim	400 MPa (max.)	200 MPa (max.)
İşlenebilirlik	Zayıf	Orta
Korozyon Dayanımı	İyi	Kötü
Şekil Bellek Prosesi	Kolay (Göreceli)	Zor (Göreceli)
Çevrim Ömrü	105($\epsilon=0,02$)	10 ² ($\epsilon=0,02$)
	107($\epsilon=0,005$)	105($\epsilon=0,005$)

Yapılan araştırmalar neticesinde Ni-Ti alaşımı haricinde Tablo 1’de belirtildiği üzere farklı şekil hafıza özelliği sergileyen alaşımlarda keşfedilmiştir. Bunlar Cu-Zn-Al, Fe-Mn-Si ve Cu-Al-Ni gibi farklı türlerde şekil hafıza özellikli alaşımlardır ancak korozyon direnci, çevrim ömrü gibi farklı üstün özellikleri sebebiyle endüstride en çok Ni-Ti alaşımları tercih edilmektedir [5].

Tablo 2. Bazı şekil bellekli alaşımlar ve özellikleri (Some shape memory alloys and their properties) [3]

Alaşım	Kimyasal Bileşim	Dönüşüm Sıcaklık Aralığı (°C)	Yaklaşık Dönüşüm Histerizisi (°C)
Ag-Cd	44-49 %Cd	-190 ~ -50	15
Au-Cd	46.5-50 %Cd	30 ~ 100	15
Cu-Al-Ni	14-14.5 %Al 3-4.5 %Ni	-140 ~ 100	35
Cu-Sn	Yaklaşık %15Sn	-120 ~ 30	
Cu-Zn	38.5-41.5 %Zn	-180 ~ -10	10
Cu-Zn-X (X=Si, Sn, Al)	az %X	-180 ~ 200	10
In-Ti	18-23 %Ti	60 ~ 100	4
Ni-Al	36-38 %Al	-180 ~ 100	10
Ni-Ti	49-51 %Ni	-50 ~ 110	30
Fe-Pt	yaklaşık 25 %Pt	yaklaşık -30	4
Mn-Cu	5-35 %Cu	-250 ~ 180	25
Fe-Mn-Si	32 %Mn, 6 %Si	-200 ~ 150	100

Tablo 2’de görüldüğü üzere Ni-Ti bazlı alaşımlar dışında şekil bellek ve süperelastik özellik taşıyan ve keşfedilen bazı alaşım türleri ve bu alaşımların özellikleri listelenmiştir.

2.1. Ni-Ti Esaslı Şekil Hafızalı ve Süperelastik Alaşım NİTİNOL (Ni-Ti based shape memory and superelastic alloy NITINOL)

1962 yılında Donanma Mühimmat Laboratuvarında keşfedilişi itibariyle nikel (Ni) ve titanyumun (Ti) neredeyse eşit atomik yüzde bileşiminden oluşan NİTİNOL alaşımı, şekil hafızalı ve süperelastik davranış sergileyen alaşımlardan biridir. Diğer alaşım grupları içerisinde şekil bellek ve süperelastik özelliklerinde en iyi performans gösteren alaşımdır. Isıtma, manyetik veya mekanik yükleme yoluyla orijinal şekillerini plastik olarak bozulmuş bir durumdan geri yükleme veya ezberleme konusundaki dikkate değer genel kapasiteleri nedeniyle, NİTİNOL popülerlik kazanmaya başlamıştır. Tablo 3’te Ni-Ti esaslı NİTİNOL alaşımının genel olarak tüm özellikleri belirtilmiştir. NİTİNOL alaşımı ikili bir alaşım sistemi olup intermetalik eşit atomlu bir bileşiktir. NİTİNOL, mikro-elektromekanik sistem (MEMS) cihazlarında ve diğerlerinin yanı sıra robotik, elektronik, havacılık, biyomedikal, otomotiv alanlarında çeşitli diğer gelişmiş uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, çeşitli kendine özgü özellikleri nedeniyle kesilmesi zor bir metaldir. NİTİNOL’ü geleneksel işleme ile işlemenin önünde çok sayıda engel vardır [6].

Yapılan araştırmalarda Ni-Ti şekil bellekli alaşımların özellikleri ve kullanım alanları incelemiştir. Günümüzde teknolojik alanlarda kullanımı hızla yaygınlaşan şekil hafızalı alaşımlar tıp sektöründe implant uygulamalarında, uzay teknolojileri ve savunma sanayisi alanında ve daha birçok alanda kullanılmaya başlandığı değerlendirilmiştir. NiTi şekil bellekli alaşımlar konusunda Türkiye’de bir başlangıç olarak gerçekleştirilen pirometalurjik üretimin; bu alanda yapılacak Ar-Ge çalışmalarına yardımcı olacağı ve daha ekonomik sistemlere çözüm sağlayacağı değerlendirilmiştir [3].

Angadi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada NİTİNOL şekil hafızalı alaşımların son 5 yılda küresel araştırma topluluğu tarafından üretimleri için kullanılan çeşitli üretim yöntemleri ve bu malzemelerin karakterizasyon, optimizasyon, mekanik özellikler ve fonksiyonel özellikler hakkındaki tartışmaları incelenmiştir. Nihai olarak bu malzemelerin üretim yöntemleri arasında lazer ateşleme veya yanma sentezi (CS), seçici lazer eritme (SLM), lazer bazlı toz yatağı füzyonu (PBF), mikrolazer metal tel biriktirme (mLMWD) içeren kendi kendine yayılan yüksek sıcaklık

sentezi (SHS), hassas döküm, kısıtlı oluk presleme (CGP), boru işleme, lazer ışını eritme (LBM) ve plazma biriktirme (CGP) oldukları sonucuna ulaşmışlardır [7].

Tablo 3. Ni-Ti esaslı şekil hafızalı ve süperelastik alaşım NİTİNOL'ün özellikleri (Properties of Ni-Ti based shape memory and superelastic alloy NITINOL) [8]

Özellik	Değer
Ergime Sıcaklığı (°C)	1300
Yoğunluk (g/cm ³)	6.45
Elektrik Direnci (mikro-ohm.cm)	Yaklaşık
- Östenit	100
- Martenzit	70
Isıl İletkenlik (W/cm. °C)	
Östenit	18
Martenzit	8.5
Korozyon Direnci	300 serisi paslanmaz çeliklere veya titanyum alaşımlara yakın
Young Modülü (GPa)	Yaklaşık
- Östenit	83
- Martenzit	28 – 41
Akma Dayanımı (MPa)	
- Östenit	195 – 690
- Martenzit	70 – 140
Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	895
Dönüşüm Sıcaklığı (°C)	-200 ~110
Dönüşüm Sırasındaki Gizli Isı (kJ/kg.atom)	167
Şekil Hafıza Gerinimi (%)	Maksimum %8.5

Immanuel ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise şekil hafızalı alaşımların imalat süreçleri, mekanik özellikleri, kesme sıvısı türleri ve yaşlanma özellikleri incelenmiştir. Kaplamalı takımların kaplamasız takımlara kıyasla işleme prosesleri sırasındaki sürtünmelerinin kontrol edilebilir olduğu görülmüştür. Ni-Ti şekil hafızalı alaşımın üretimi sırasında kimyasal bileşim; ergime sıcaklığını, arayer elementlerinin çözünürlüğünü ve soğuk işlenebilirliğini etkilediği sonucuna varılmıştır. MQL tipi yağlayıcı uygulamasının bu malzemelerin işlenmesi sırasında takım ömrünün uzamasına yardımcı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [9].

3. Ni-Ti ESASLI ŞEKİL HAFIZALI VE SÜPERELASTİK NİTİNOL ALAŞIMININ KAYNAKLANABİLİRLİĞİ (WELDABILITY OF Ni-Ti BASED SHAPE MEMORY AND SUPERELASTIC NITINOL ALLOY)

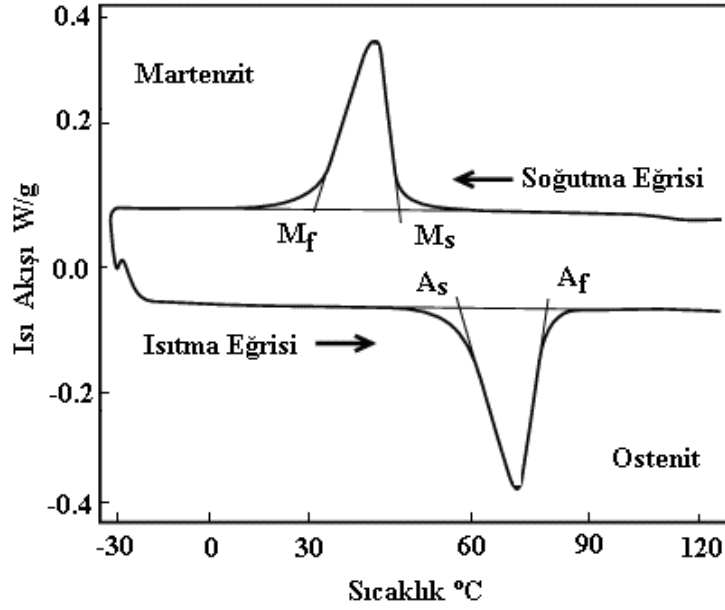
3.1. Metal Malzemelere Uygulanan Genel Kaynak Yöntemleri (General Welding Methods Applied to Metal Materials)

a) Ergitmeli Kaynak Yöntemleri: Oksi-Gaz kaynağı, ark kaynağı, TIG kaynağı, MIG-MAG kaynağı, tozaltı kaynağı, elektrik direnç kaynağı, yakma alın kaynağı, saplama kaynağı, plazma kaynağı, elektron ışın kaynağı, lazer ışın kaynağı, curufaltı kaynağı, termit kaynağı, su altı kaynağı [10].

b) Katı Hal Kaynak Yöntemleri: Difüzyon kaynağı, sürtünme kaynağı, sürtünme-karıştırma kaynağı, patlama kaynağı, ultrasonik kaynak, yüksek frekans kaynağı [10].

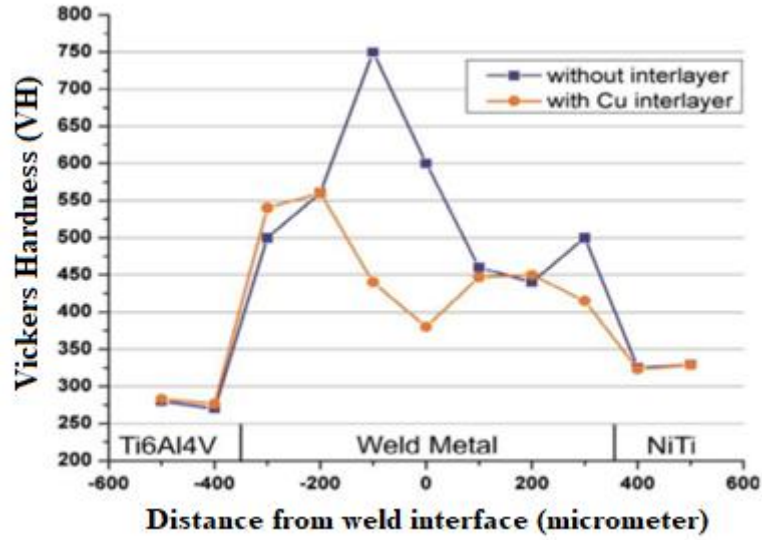
Şekil hafızalı alaşımlardan bazılarının farklı kaynak yöntemleri ile kaynak yapılabildiği ancak ısı girdisi sebebiyle fiziksel ve mekanik özelliklerinde farklılıklar meydana geldiği görülmüştür. Şekil 3'te Ni-Ti esaslı alaşım malzemenin faz dönüşüm sıcaklıkları belirtilmiştir. Kaynak işlemi uygulanabilen şekil hafızalı alaşımlardan bazıları ise Fe-30Mn-6Si, Fe-30Mn-6Si-5Cr, Ni-49.6Ti ve Cu-6.94Al-18.86Zn alaşımları olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak uygulanan kaynak

yöntemlerinin lazer kaynağı, TIG kaynağı, elektrik direnç nokta kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemleri olduğu yapılan araştırmalar neticesinde anlaşılmıştır. [11].



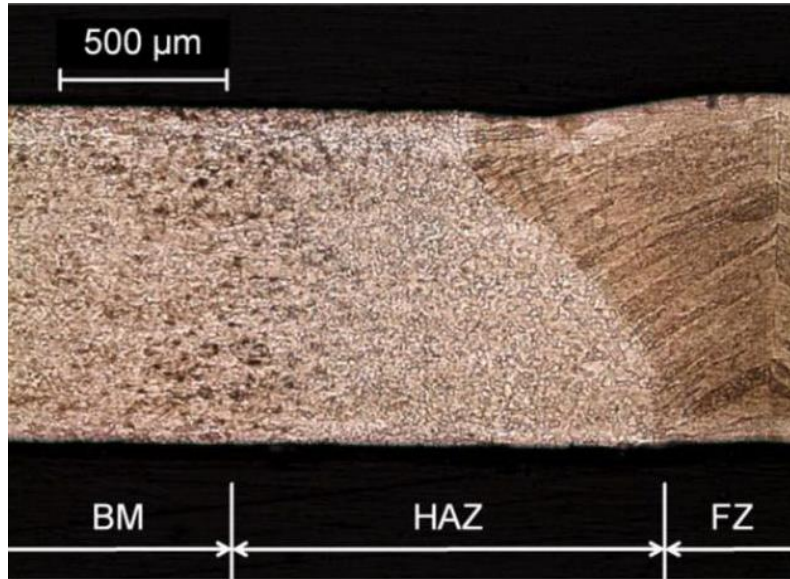
Şekil 3. Ni-Ti Alaşım malzemenin DSC analizi sonucu faz dönüşüm sıcaklık değerleri (Phase transformation temperature values as a result of DSC analysis of Ni-Ti Alloy material) [11]

Araştırmacılar yaptıkları çalışmada şekil hafızalı alaşım malzemelerinden biri olan Ni-Ti alaşımı ile yine Ti esaslı Ti-6Al-4V alaşımı bazı numunelere bakır ara katmanı da eklenerek elektrik direnç nokta kaynak işlemi uygulayarak mikroyapısal ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Yapılan çalışmada 400 µm kalınlığında ve %50.8 Ni'lik bir kimyasal bileşime sahip süper elastik bir Ni-Ti levha kullanılmıştır. Kaynak sonrası malzemenin oda sıcaklığında hala tam ostenitik fazda olduğu ve bu nedenle çekirdek bölgesinde istenmeyen martenzit oluşumu sonucu bozulma olmadığı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Ni-Ti şekil hafızalı alaşım malzemesine yapılan direnç nokta kaynağı işlemi sonucu kaynak bölgesinde ve ITAB bölgesinde herhangi büyük bir kusur gözlemlenmemiş. DSC ile ölçülen dönüşüm sıcaklıkları incelendiğinde kaynak bölgesinde iki farklı tane boyutu dağılımı ve ek bir tepe noktası gözlemlenmiş, mikrosertlik ölçümünde kaynak bölgesinde büyük tane boyutları nedeniyle Şekil 4'te görüldüğü üzere daha düşük bir ortalama sertlik değeri (~340 HV) tespit edilmiştir. Cu ara katmanının eklenmesi çatlamış bir bağlantıyı maksimum 300 MPa'lık çekme mukavemetine sahip bir malzemeye dönüştürdüğü için olumlu değerlendirilmiştir. Ayrıca Cu ara katmanın eklenmesi, kaynak metalinde Ti₂-Cu ve Cu bakımından zengin intermetalik fazların oluşmasına yol açtığı tespit edilmiştir. Nihai değerlendirmede ise malzemenin süperelastik özelliğinin korunduğu tespit edilmiştir [12].



Şekil 4. Cu ara katmanlı ve katmansız uygulanan kaynak işlemi sonucu alınan mikrosertlik profili (Microhardness profile obtained as a result of the welding process applied with and without Cu interlayer) [12]

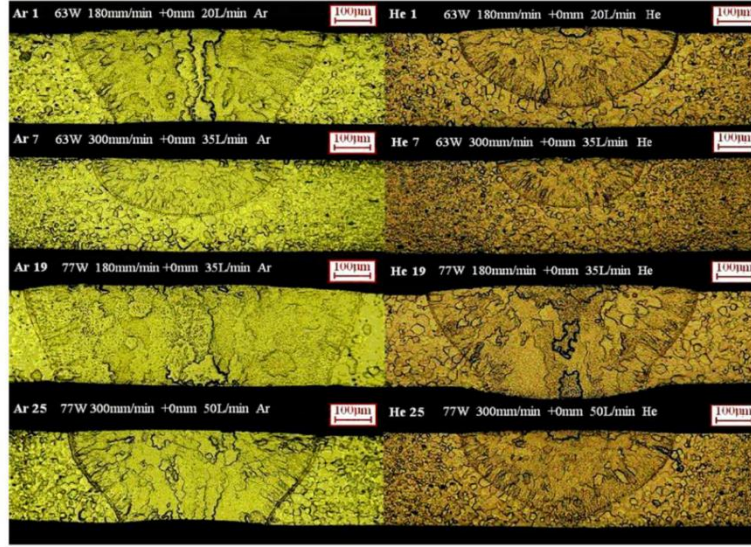
Başka bir çalışmada araştırmacılar süperelastik Ni-Ti esaslı şekil hafızalı alaşım malzemenin birleştirme işleminde Nd: YAG lazer kaynak yöntemi kullanılarak mikroyapı ve mikrosertlik özellikleri hakkında çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalara göre, işlem sürekli dalga boyunda çalışan Nd: YAG lazer kaynağını özel bir hazneye enjekte edilen Argon gazı koruması altında yapmışlardır. Kaynak işlemleri ve çekme deneyleri hadde yönünde uygulanmıştır. Yaptıkları sertlik testleri sonucunda kaynak bölgesindeki değerlerde düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir. Haddeleme yönünde kaynaklanmış numunelerde diğer yöndeki kaynaklanan numunelere göre daha üstün mekanik mukavemet olduğu tespit edilmiş, kaynak bağlantısının 50 MPa altı gerinimler için süperelastik davranış gösterdiği belirlenmiştir. Kaynak bölgesinde düşük sertlik ve düşük UTS değerleri alınmış, Şekil 5'te görüldüğü gibi ITAB'da yeniden kristalleşme ve tane büyümesi tespit edilmiştir. Fraktografi gözlemleri ile kırılma yüzeyleri incelendiğinde kaynak bölgesinin belirgin sünek olduğu değerlendirilmiştir [13].



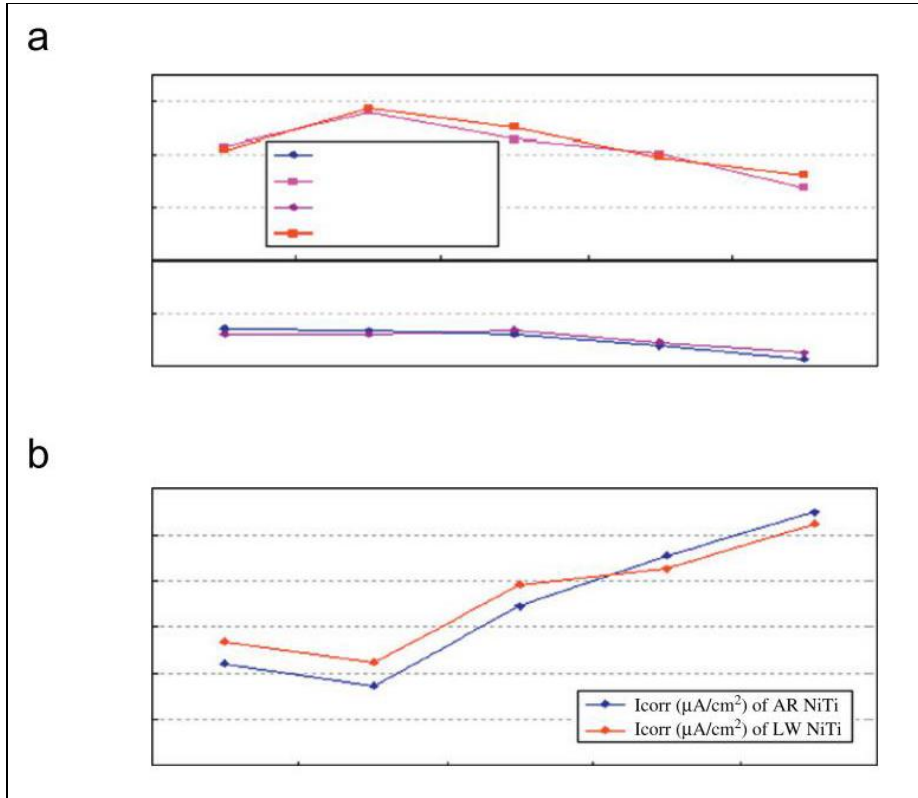
Şekil 5. Haddeleme yönünde yapılan kaynak işlemi neticesinde kaynak bölgesinin mikroskobik görünümü (Microscopic view of the welding area as a result of the welding process in the rolling direction) [13]

Diğer bir çalışmada Chan ve Man, Ni-Ti ince folyo malzemeye Ar ve He gazı korumasında lazer kaynak işlemi uygulayarak kaynak bağlantısının en ve boy oranı üzerindeki etkilerini incelemek için iki L27 taguchi deneyi uygulayarak araştırma yapmışlardır. Taguchi deney tasarımı ile en

büyük en/boy oranına ve arzu edilen mikro alaya sahip tam nüfuzlu kaynak üretmek için optimum parametreler belirlemişlerdir. Kaynak bölgesinin korozyon özelliklerini iyileştirmek için 573 ila 1173 K arasında değişen kaynak sonrası ısıl işlemlerinin etkisini incelemişlerdir. Şekil 6 ve Şekil 7’de görüldüğü üzere ısıl işlem gören Ni-Ti kaynağının korozyon özelliklerini, yüzey morfolojisini, mikroyapısını ve Ti/Ni oranını analiz etmişlerdir. Kaynak sonrası 573 K’da 1 saat uygulanan ısıl işlemin kaynak bölgesinde en iyi oyuklaşma korozyon direncini sağladığını gözlemlemişlerdir. En büyük en/boy oranına ve arzu edilen mikroyapıya sahip Ni-Ti kaynağını üretmek için (Ar18) 70 W, 300 mm/dk +1.6 mm, 35 L/dk ve Ar koruması altında olduğunu tespit etmişlerdir [14].



Şekil 6. Ar ve He gazı korumalı Ni-Ti kaynaklarının mikroyapı görüntüleri (Microstructure images of Ar and He gas shielded Ni-Ti welds) [14]

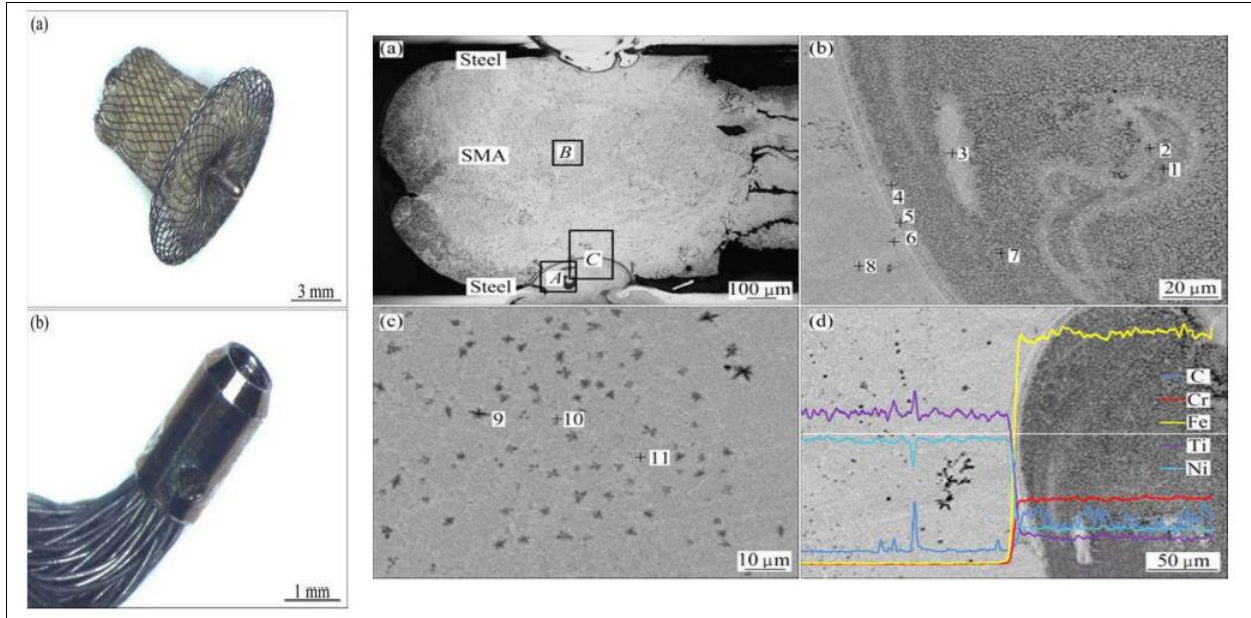


Şekil 7. Optimize edilmiş Ni-Ti kaynaklarının (Ar 18) ve daha önce alınan Ni-Ti numunelerinin ve farklı sıcaklıklarda tavlamadan sonra (a) çukurlaşma potansiyeli (E_{pit}), korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve (b) akım yoğunluğu (I_{corr}) değerlerinin grafikleri [14]

Optimize edilmiş Ni-Ti kaynağının kaynak merkezindeki mikroyapının tane boyutu yaklaşık 3 mm olan dentrit yapıda olduğunu belirlemişlerdir. Kaynak bölgesinin esas olarak B2 fazından ve az miktarda NiB3Ti fazından oluştuğunu tespit etmişlerdir. Yaşlandırma işlemi olmadan optimize edilmiş kaynak bölgesi ile ana malzemesinin benzer korozyon direnç performansı gösterdiklerini görmüşlerdir. Kaynak bölgesinin korozyon direncinin 573 K'da 1 saat yaşlandırma işlemi ile büyük ölçüde arttığını tespit etmişlerdir [14].

Prabu ve arkadaşları, şekil hafızalı Ni-Ti malzemenin şekil hafıza davranışını koruyarak kaynaklı birleştirme uygulayabilmek için bir katı hal kaynak tekniği olan sürtünme karıştırma kaynak (FSW) tekniğiyle kaynaklı birleştirme işlemini uygulamışlardır. Yapılan kaynak işlemi sonucunda dinamik yeniden kristalleşme nedeni ile kaynak bölgesinde tane incelmeye olduğu gözlemlenmiştir, numunelere uygulanan çekme testinde 800 ve 1000 rpm dönüş hızında yapılan kaynaklarda süperelastik özelliğin korunduğunu belirlemişlerdir. 800 rpm'de yapılan kaynak işleminin sonucunda kaynak bölgesinde ve ana metalde faz dönüşüm sıcaklıklarının hemen hemen aynı olduğu ve 1000 ile 1200 rpm'de yapılan kaynak işleminde ise kaynak bölgesi yüksek ısıdan etkilendiği için ana malzemeye göre farklı olduğunu gözlemlenmiştir [15].

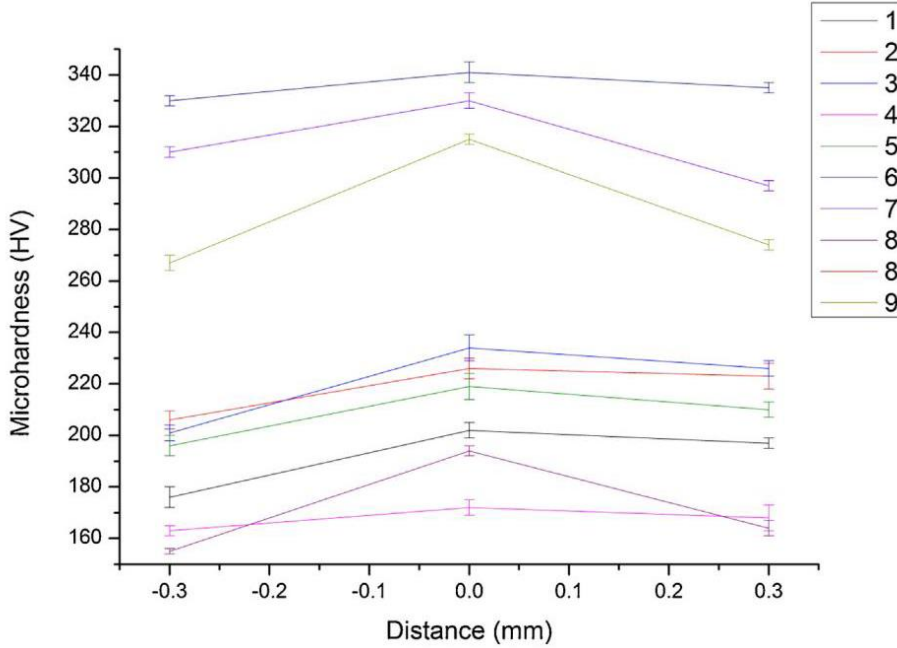
Lü ve arkadaşları yaptıkları çalışmada şekil hafızalı Ni-Ti alaşım malzeme ile medikal tıbbi tıkaçıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılan 316L paslanmaz çelik malzemeye kaynak işlemi uygulamışlardır. Öncelikle şekil hafızalı alaşım malzemenin (Ni-Ti alaşımı) elde edilmiş tel numuneleri TIG arkı ile ergitme işlemi ile birleştirilmiş ardından birleştirme işlemi uygulanan malzeme ile 316L paslanmaz çelik malzemeye lazer ışın punta kaynağı ile kaynaklı birleştirme işlemi uygulanmıştır. Sonuçlar Şekil 8'de görüldüğü üzere mikroyapısal olarak incelendiğinde, TiC bileşiklerinin dağılmış olduğu, yapılan lazer ışın nokta kaynağı kaynak bölgesi incelendiğinde kaynağın füzyon sınırı çevresinde TiC bileşiklerinin miktarının büyük ölçüde azaldığı belirlenmiştir NiTi şekil hafızalı alaşımın TIG işleminde TiC ve siyah yıldız fazlarının çoğunun lazer nokta kaynağı ile tane boyutunun artmasına rağmen kaynak sınırı çevresinde kaybolduğu tespit edilmiştir [16].



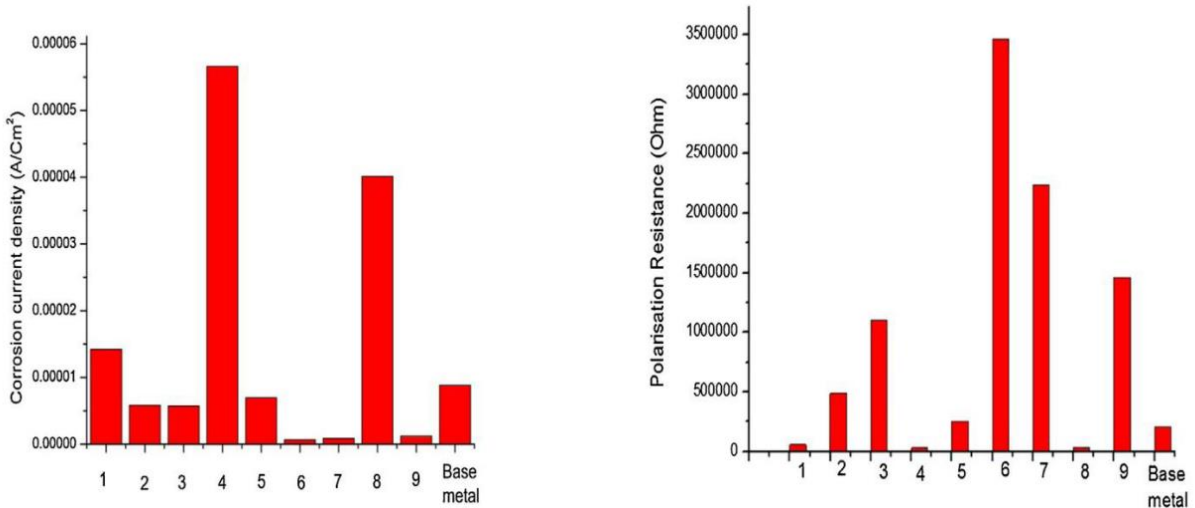
Şekil 8. NiTi SMA telleri ile paslanmaz çelik boru (b) arasındaki tıbbi tıkaçıcının (a) ve lazer nokta kaynağının fotoğrafları ve Lazer nokta kaynağında ve NiTi SMA TIG kaynağında geri saçılan elektron görüntüleri ve çizgi tarama analizi sonuçları: (a) Tam görünüm; (b) A Alanı; (c) B Alanı; (d) Alan C [16]

Deepan Bharathi Kannan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 1 mm kalınlığında Ni-55.64at.%Ti levhaya Yb: YAG lazer kaynak işlemini uygulanmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Kaynak işlemi koruyucu Ar gazı ile sabit gaz akışı hızında ayrıca değişen kaynak hızı, gaz üfleme mesafesi ve ışın gücü ile gerçekleştirilmiş, uygulanan 9 deneysel çalışmanın 7'sinde tam penetrasyonun sağlandığı, kaynak hızı ve gücündeki değişikliğin tane yapısının geometrisini büyük

ölçüde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Mikroyapıda dentritler tespit edilmiş, koruyucu gaz üfleme mesafesinin yakın olmasının kaynak bölgesinde gözeneklere sebep olduğu belirlenmiştir. Gözeneklerin varlığının Şekil 9’da belirtildiği gibi mikrosertlik değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Kaynak bölgesinin korozyon direnci incelendiğinde ise Şekil 10 incelendiğinde ana malzemeye göre daha iyi korozyon direncine sahip olduğu görülmüş, bunu etkileyen faktöründe Ti/Ni oranındaki değişimden dolayı olduğu yorumlanmıştır. Nihai olarak 900W güç, 2100mm/dk kaynak hızı, -0.5 odak konumu ve 16 mm koruyucu gaz üfleme mesafesinde yapılan kaynak işleminde daha üstün özelliklerde tane yapısı, sertlik ve korozyon direnci olduğu tespit edilmiştir [17].



Şekil 9. 9 adet numuneye ait kaynak parçasının tümünün mikrosertlik değerleri (Microhardness values of all 9 sample weld pieces) [17]



Şekil 10. 9 adet numuneye ait kaynak ve ana metal için korozyon akım yoğunluğu ve polarizasyon direnci (Corrosion current density and polarization resistance for weld and base metal of 9 samples) [17]

Mehrpouya ve arkadaşları tarafından Ni-Ti şekil hafızalı alaşımının lazer kaynak işleminde optimum uygulama parametrelerinin tahmini için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Ni-Ti alaşımının lazer kaynak işlemi malzemenin ısıdan olumsuz etkilenmesinden dolayı zorlu bir işlem olduğu için ısıyı, ısıdan etkilenen bölgeyi ve füzyon bölgesindeki ısıdan etkilenme oranını azaltabilmek, daha iyi bir kaynaklı birleştirme işlemi gerçekleştirebilmek ve optimum kaynak parametrelerini

belirleyebilmek için sayısal bir model kullanılmıştır. Deney için 0.5 mm kalınlığında ticari bir Ni54.76Ti alaşımı (üretici tarafından tavlama işlemine tabi tutulmuş) levha kullanılmış ve alın kaynak işlemi uygulanmıştır. Isı transferi analizi için ABAQUS programında sonlu eleman modellemesi işlemi yapılmıştır. Kaynak işleminde optimum lazer parametrelerinin tahmini için yapay sinir ağı (YSA) ve ayrıca eğitim algoritması işlemleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler ve incelemeler sonucunda en yüksek ısı girdisine neden olan lazer kaynağı ve tarama hızı sırasıyla 500 W ve 3 mm/s olarak tespit edilmiştir. Kaynak bölgesine ısı girdisinin artmasının nedeni olarak Ni ve Ti elementlerinin yapıdaki miktarını etkilediğini tespit edilmiştir. Ayrıca ısı girdisinin yüksek olmasının kaynak bölgesinin tane yapısının ITAB bölgesinin tane yapısına kıyasla daha büyük taneli olduğu tespit edilmiştir [18].

Sadati ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise lazer kaynağının şekil hafızalı alaşımlar üzerindeki etkisini, kaynak bölgesinin mikroyapısının yanı sıra mekanik özellikleri incelenmiştir. Kaynak işlemi için sektördeki en popüler şekil hafızalı alaşım olan Ni-Ti alaşımı kullanılmıştır. Kaynak işlemi için Nd:YAG (PIM-3475, IQL-20) model (1 mm çapından küçük numunelere kaynak işlemi uygulayabilen tek cihaz) kaynak cihazını kullanılmıştır. Sonuç olarak iki Ni-Ti numunenin lazer kaynağı başarılı olarak gerçekleştirilmiş ve mikroyapısal incelemede de küçük ve yayılmış gözenekler gözlemlenmiştir. Yapılan gerilme testinde hadde yönünde yapılan kaynak numunesinde nihai gerilme mukavemetinin ve ek maksimum uzamanın daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Mikroyapısal incelemelerde kaynak bölgesinde katılma davranışının Ni-Ti ana malzemenin kaynak bölgesi arayüzünden kaynak merkezi hattına doğru dentritik yapıda olduğu görülmüştür. Ni-Ti ana malzeme ile kaynak bölgesinin karşılaştırılmasında kabul edilebilir gerilme-uzama davranış farkı olduğu tespit edilmiştir. Çekme deneyinde kaynaklı bağlantı noktasının ayrıca 118 MPa çekme mukavemetine ve %8 gerilmeye ulaştığını tespit edilmiştir. Ayrıca kaynak bölgesi ve civarında yapısal hatalar gözlemlenmiştir [19].

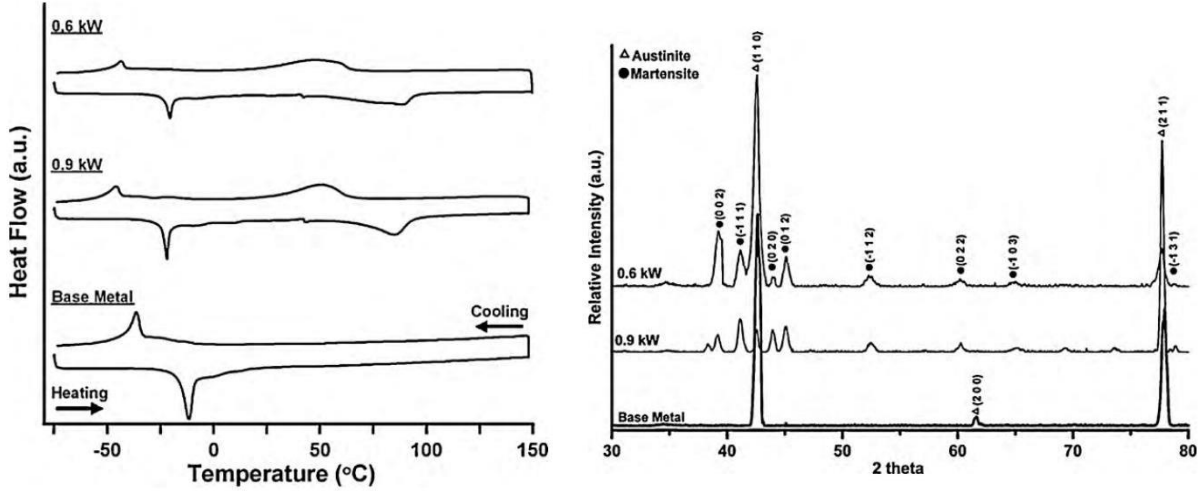
Deepan Bharathi Kannan ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada NİTİNOL şekil hafızalı alaşımların lazer kaynağında gri ilişkisel analiz (GRA) kullanılarak çoklu performans özelliklerinin optimizasyonu üzerine bir çalışma sunulmuştur. 1mm kalınlığındaki nitinol malzemeye Yb: YAG lazer kaynak işlemi uygulanarak boncuk plaka kaynak işlemi yapılmış, deney parametreleri olarak kaynak hızı, koruyucu gaz üfleme mesafesi, odak konumu ve güç miktarını Taguchi L9 tasarımı temelinde belirlenmiştir. Çoklu performans özellikleri üzerindeki parametrelerin yüzde katkısının hesaplanmasını (ANOVA) varyans analizi yöntemiyle yapılmış, nihai olarak kaynak hızının çoklu performans özellikleri üzerinde en etkili parametre olduğu ve takiben koruyucu gaz üfleme mesafesinin, kaynak gücünün ve odak pozisyonunun etkili oldukları tespit edilmiştir. [20].

Deepan Bharathi Kannan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada NİTİNOL şekil hafızalı alaşımların iteryum alüminyum granat (Yb: YAG) lazer kaynak işlemi üzerine araştırma yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. İşlem parametreleri taguchi L9 tasarımına dayalı olarak belirlenerek nitinol levha malzemeye boncuk kaynak işlemi yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda çoklu yanıt özellikleri ve kaynak parametrelerinin optimizasyonu için ortogonal dizili TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Optimize edilmiş parametre kombinasyonu ise; 2100 mm/dk kaynak hızı, 30° koruyucu gaz üfleme açısı, 0mm odak konumu, 940 W kaynak gücü olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlere karşılık gelen çıkış parametreleri ise 1,186mm penetrasyon derinliği, 1.737 mm boncuk genişliği ve 204.5 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Ayrıca bu işlemin çoklu yanıt özellikleri için önemli parametreleri hesaplamak üzere ANOVA işlemi uygulanmış, önerilen TOPSIS ve ANOVA kombinasyonunun optimize parametrelerinin belirlenmesinde daha etkili oldukları tespit edilmiştir [21].

Datta ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada ise 1 mm kalınlığındaki NİTİNOL levhaya fiber lazer ile alın kaynağı işlemi uygulanmış, işlem sonucu malzemenin boncuk geometrisi, mikroyapısı, yeni faz oluşumu ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Girdi ve çıktı parametreleri istatistiksel regresyon analizi ile ilişkilendirilmiş, kaynak dikiş alanı minimum tutulup mikrosertlik değerinin ana malzemeninkinden sapmasını azaltmak için kısıtlı bir optimizasyon problemi formüle edilmiştir. GWO, CA, BO ve GA gibi dört metasezgisel optimizasyon tekniği kullanılarak optimum girdi ve çıktı parametreleri elde edilmiştir. Nihai olarak ana malzemenin,

ITAB'dan kaynak dikişine doğru tane irileşmesi nedeniyle mikrosertlik değerinde azalma olduğu görülmüş, kaynak bölgesindeki ortalama mikrosertlik 242 ila 296 HNV0.05 arasında, ana malzemenin mikrosertlik değeri ise 350 HNV0.05 olarak tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde Ti₂Ni ve Ni₃Ti gibi farklı intermetalik bileşikler görülmüş ve bu durumun mukavemeti azalttığı, kırılma modunun ise sünekten sünek ve kırılma kırılma karışımında olduğu sonucuna varılmıştır. Girilen parametreler ve sonuçlar ışığında düşük güç, yüksek tarama hızı ve odak konumunun tane boyutu büyümesini en az olarak ve mikrosertlik değerindeki düşüşünde en az olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan dört metasezgisel işlemten en iyi çözüm yeteneğini BO, en yavaş olanı ise CA olduğu belirlenmiştir [22].

Khan ve Zhou tarafından yapılan çalışmada, NİTİNOL'un (Ni-49.2 at. %Ti) darbeli Nd:YAG lazer kaynak işleminden kaynaklanan yerel faz dönüşümü ile ilişkili bazı önemli bulguları detaylandırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada 0.37 mm kalınlığında ticari olarak temin edilebilen SE508 Nitinol şerit kullanılmıştır. Numunelere 1.06 m dalga boyuna sahip bir ışın üreten Myachi Unitek darbeli Nd:YAG lazer sistemi (Model LW50 A) kullanılarak kaynak işlemi uygulanmıştır. Kaynak işlemi yekpare levhalar üzerinde yapılmış, oksidasyonu önlemek için alt ve üst argon koruması altında kaynak işlemi uygulanmıştır. Akış hızı olarak önceki çalışmalar ışığında 30 CFH'lik bir akış hızını seçilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda lazerin nitinol dönüşüm sıcaklığı üzerindeki etkileri analiz edilmiş, Şekil 11 incelendiğinde DSC sonuçlarına göre kaynak bölgesinde yerel faz dönüşümüne ek yüksek sıcaklık zirvesi ortaya çıktığı belirlenmiştir. Şekil 11 incelendiğinde XRD analizi ile ana metalde yalnızca östenit fazı görülmüş ve kaynak bölgesinde ise martenzit pikleri olduğu tespit edilmiştir. TEM gözlemlerinde oda sıcaklığında işlenmiş/erimiş bölgede martenzitin varlığının desteklendiği görülmüştür. Nihai olarak yapılan bu işlemin nitinolün çekme özelliklerini değiştirdiği belirlenmiştir [23].



Şekil 11. Baz ve işlenmiş metal için DSC taramaları ve XRD verileri (DSC scans and XRD data for base and wrought metal) [23]

Zoeram ve arkadaşı tarafından yapılan çalışmada Ti-6Al-4V alaşım malzeme ile NİTİNOL şekil hafızalı malzemelerin lazer kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliği araştırılmış, kaynak işlemi için Nd:YAG lazer kaynağı yöntemi kullanılmıştır. Kimyasal bileşimi (Ni-50.7 at%Ti) olan ve 1 mm kalınlıkta Ti açısından zengin Nitinol malzeme kullanılmış, lazer kaynağı dalga boyu 1.064µm olan bir SW-1 darbeli ND:YAG lazer makinesi kullanılarak kaynak işlemi uygulanmıştır. Bu iki farklı malzemenin kaynağında kaynak bölgesinde enine çatlakların oluşması sebebiyle düşük mukavemet ve sünek yapı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle kırılma fazlarının oluşumunu azaltmak ve müteakip çatlakları ortadan kaldırmak ve metalin kimyasal bileşimini değiştirmek amacıyla ana malzemeler arasına 75 µm kalınlığında bir bakır ara katman yerleştirilerek kaynak işlemi yapılmıştır. Sonuç olarak kaynak işlemi bakır ara katmanı ile başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Ana metaller arası farklı genleşme katsayıları ile birlikte kaynak metalinde Ti₂Ni kırılma fazının oluşumunun ve kaynak bölgesinde enine çatlakların oluşumunun bağlantı bölgesinde hatalara yol

açtığı tespit edilmiştir. Kaynak bölgesindeki bu Ti₂Ni fazının azalmasında kullanılan bakır levhanın etkisinin çok fazla olduğu belirlenmiştir. Bu bakır katmanının kullanılması ile çatlaklar oluşmuş kaynak bölgesinin özellikleri iyileştirilerek maksimum 300 MPa'lık çekme mukavemetine sahip kaynak bağlantısına dönüştürdüğü saptanmıştır. Bakır ara katmanının eklenmesi kaynak metalinde Ti₂-Cu ve Cu bakımından zengin intermetalik fazların oluşmasını sağladığı bu sebeple bir bakır ara katmanının eklenmesinin kaynak metalinin sertliğini düşürdüğü tespit edilmiştir. Ti-6Al-4V/Cu/NiTi malzemelerin kaynaklı birleştirme işlemiyle Ti₂Cu ve ayrıca Cu bakımından zengin intermetalik fazların oluşumunun çekme numunelerinin gevrek kırılmalarının kaynağı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [24].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)



Günümüzde farklı alanlarda kullanılan üstün özelliklere sahip şekil hafızalı ve süperelastik malzemelerin farklı birleştirme yöntemlerinden biri olan ve malzemenin özelliklerini etkileyen yüksek ısı girdisinin olduğu ve belirgin üstün özelliklerinin belirli ölçüde korunmak suretiyle kaynak işlemlerinin başarıyla uygulanabildiği ve verim alındığı görülmüştür. Şekil bellek özelliği ile süperelastik özelliklere sahip farklı alaşım gruplarına kaynak işlemi uygulanabilmekle beraber bu alaşım türlerinden biri olan ve daha üstün özelliklere sahip Ni-Ti esaslı ticari adı ile NİTİNOL alaşımına ergitmeli ve katı hal kaynak yöntem türlerinin başarılı olarak uygulanabildiği ve olumlu sonuçlar alındığı sonucuna yapılan literatür araştırmalarından ulaşılmıştır. Hâlihazırda uygulanabilen kaynak yöntemleri ele alındığında ise öne çıkan yöntemler ergitmeli kaynak türlerinden olan lazer ışın kaynağı, elektrik direnç nokta kaynağı, TIG kaynağı olup, ayrıca bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynak işlemidir. Uygulanan kaynaklı birleştirme yöntemlerindeki en önemli problem yüksek ısı girdisi ve dolayısıyla malzemenin mikroyapısal özelliklerindeki değişimdir. Ancak uygulanan yöntemlerde ısı girdisi kritik seviyenin altında olduğunda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca kaynak birleştirmelerinde özellikle kaynak bölgesinde oluşan faz yapılarından dolayı çatlaklar oluştuğu ve bu durumun mukavemeti olumsuz etkilediği görülmüş, bazı çalışmalarda bu durumun önüne geçmek için bakır ara katmanı kullanılarak kaynak bölgesindeki çatlak oluşumu sınırlandırılarak daha sünek bir yapı elde edilmek suretiyle mukavemetin arttığı tespit edilmiştir. Nihai olarak henüz uygulanmayan farklı kaynak yöntemleri bulunmaktadır, ısı girdisinin kritik seviyenin üzerine çıkmadan kontrollü bir şekilde uygulanması ile optimum parametreler belirlenerek şekil hafızalı ve süperelastik alaşım malzemelere kendine has üstün özelliklerini kaybetmeden kendi içinde ve farklı malzeme grupları ile kaynak işlemleri uygulanabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. A. Akdoğan, K. Nurseven, Şekil hafızalı alaşımlar, Mühendis ve Makine, 44(521): 35-44, 2003.
2. Ö. Çakmak, M. Kaya, Akıllı malzeme şekil hafızalı alaşımların termodinamiği, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(2): 541-555, 2017.
3. S. Dilibal, N. Sönmez, H. Dilibal, NiTi şekil bellekli alaşımlar (ŞBA) ve teknolojik kullanım alanları, Politeknik Dergisi, 20(3): 623-627, 2017.
4. Z.D. Yakıncı, Şekil hafızalı alaşımların sağlık alanındaki uygulamaları, İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi, 3(2): 1-6, 2015.
5. H.O. Erdoğan, NiTi şekil bellekli alaşımların süperelastik özelliklerinin termo-mekanik işlemlerle süperelastik özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2015.
6. N. Besekar, B. Bhattacharyya, Experimental investigation and characterization of NiTiInol shape memory alloy during wire electrochemical machining, Journal of Manufacturing Processes, 81: 346-361, 2022.
7. S.V. Angadi, S.H. Nayak, G.S. Ranjith Kumar, A. Buradi, S.P.S. Yadav, Recent advancements in the manufacture of nitinol including its characterization and properties, Materials Today: Proceedings, 62: 9-17, 2022.
8. K. Nurveren, NiTi alaşımında şekil hafıza etkisinin iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2008.

9. I.D. Immanuel, M. Gangariu, D. Arulkirubakaran, R. Ralkia Razalin Prince, T. Debnath, D. Palanisamy, Fabrication, mechanical testing, machining of shape memory alloy-A review, *Materials Today: Proceedings*, 68(5): 1718-1723, 2022.
10. N. Kahraman, B. Gülenç, *Modern Kaynak Teknolojisi*, 1. baskı, Epamat Basım Yayın Promosyon San. Ltd. Şti., Ankara, 2016.
11. B. Kurt, N. Orhan, Şekil hafızalı alaşımların kaynak edilebilirliği, *Doğu Anadolu bölgesi araştırmaları* 4, 2(1): 1-5, 2003.
12. A. Shamsolhodaei, A. GhateiKalashami, A. Safdel, A. R. H. Midawi, M. A. Elbestawi, Resistance spot welding of NiTi shape memory alloy sheets: Microstructural evolution and mechanical properties, *Journal of Manufacturing Processes*, 81: 467-475, 2022.
13. L. Alberty Vieira, F.M. Braz Fernandes, R.M. Miranda, R.J.C. Silva, L. Quintino, A. Cuesta, J.L. Ocana, Mechanical behaviour of Nd:YAG laser welded superelastic NiTi, *Materials Science and Engineering A*, 528: 5560-5565, 2011.
14. C.V. Chan, H.C. Man, Laser welding of thin foil nickel–titanium shape memory alloy, *Optics and Lasers in Engineering*, 49: 121-126, 2011.
15. S.S. Mani Prabu, H.C. Madhu, C.S. Perugu, K. Akash, R. Mithun, P.A. Kumar, S.V. Kailas, M. Anbarasu, I.A. Palani, Shape memory effect, temperature distribution and mechanical properties of friction stir welded nitinol, *Journal of Alloys and Compounds*, 776: 334-345, 2019.
16. S. Lü, Z. Yang, H. Dong, Welding of shape memory alloy to stainless steel for medical occluder, *Transactions of nonferrous metals society of china*, 23: 156-160, 2013.
17. T. Deepan Bharathi Kannan, A.R. Shegokar, P. Sathiya, T. Ramesh, Parameter design And analysis in laser welding of Nitinol shape memory alloy, *Materials Today: Proceedings*, 4: 8883-8891, 2017.
18. M. Mehrpouya, A. Gisario, H. Huang, A. Rahimzadeh, Numerical study for prediction of optimum operational parameters in laser welding of NiTi alloy, *Optics and Laser Technology*, 118: 159-169, 2019.
19. M.E. Sadati, Y. Javadi, Investigation of mechanical propertiesin welding of shape memory alloys, *Procedia Engineering*, 149: 438-447, 2016.
20. T. Deepan Bharathi Kannan, T. Pavani Priya,, P. Sathiya, T. Ramesh, Metallurgical Aspects and Optimisation of Yb: YAG Laser Welded NiTinol Shape Memory Alloy, *Materials Today: Proceedings*, 4: 1268-1276, 2017.
21. T. Deepan Bharathi Kannan, P. Sathiya, T. Ramesh, Experimental investigation and characterization of laser welded NiTinol shape memory alloys, *Journal of Manufacturing Processes*, 25: 253-261, 2017.
22. S. Datta, M.S. Raza, A.K. Das, P. Saha, D.K. Pratihari, Experimental investigations and parametric optimization of laser beam welding of NiTinol sheets by metaheuristic techniques and desirability function analysis, *Optics and Laser Technology*, 124: 105982, 2020.
23. M.I. Khan, Y. Zhou, Effects of local phase conversion on the tensile loading of pulsed Nd:YAG laser processed Nitinol, *Materials Science and Engineering A*, 527: 6235-6238, 2010.
24. A.S. Zoeram, S.A.A. Akbari Mousavi, Laser welding of Ti–6Al–4V to Nitinol, *Materials and Design*, 61: 185-190, 2014.

Comparison of Energy Absorptive Capacities of Different Aluminum Alloy Foams Placed Inside the Crash Box

Samet Uslu^{1,*} , Batuhan Kocaoğlu¹ 

¹Karabük University, Faculty of Engineering, Karabük, Turkey

ARTICLE

INFORMATION

Received: 22.07.2024

Accepted: 20.08.2024

Keywords:

Aluminum foam

Crash box

Energy absorption

ABSTRACT

Increasing population worldwide and the resulting increasing number of automobiles increase the risk of traffic accidents. Due to this increasing risk, automobile manufacturers take various safety measures to protect drivers and passengers in case of possible accidents. Crash boxes are one of the passive safety system elements that are the first to absorb the impact in the event of a front or rear impact accident, absorbing the resulting deformation energy and ensuring that it is transmitted into the car at the least possible level. Therefore, increasing the energy absorption ability of crash boxes is an extremely important issue. In this study, it was aimed to increase the energy absorption capabilities by placing aluminum foam based materials produced by using the powder metallurgy method using three different aluminum alloys (Al2024, Al5083, and Al6061) inside the crash boxes, which are normally manufactured as hollow. In addition, the produced aluminum foams were compared in terms of pore sizes with SEM images. It can be said that Al6061 is the most ideal material among the alloys used in terms of pore structure and homogeneity. On the other hand, Al6061 alloys produced the greatest damped energy value within the parameters of the investigation, 221.711 J. This value was 169.556 J for Al2024 alloy and 214.101 J for Al5083 alloy. As a result, it was concluded that the amount of energy absorption can be increased by about 4-5 times by using metallic foams produced using aluminum materials compared to the empty crash box.

Çarpışma Kutusunun İçine Yerleştirilen Farklı Alüminyum Alaşımli Köpüklerin Enerji Sönümlenme Kapasitelerinin Karşılaştırılması

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 22.07.2024

Kabul: 20.08.2024

Anahtar Kelimeler:

Alüminyum köpük

Çarpışma kutusu

Enerji sönümlenme

ÖZET

Dünya çapında artan nüfus ve buna bağlı olarak artan otomobil sayısı trafik kazası riskini artırmaktadır. Artan bu risk nedeniyle otomobil üreticileri olası kazalarda sürücü ve yolcuları korumak için çeşitli güvenlik önlemleri almaktadır. Çarpışma kutuları, önden veya arkadan çarpma durumunda darbeyi ilk absorbe eden, ortaya çıkan deformasyon enerjisini absorbe eden ve araca mümkün olan en az seviyede iletilmesini sağlayan pasif güvenlik sistemi elemanlarından biridir. Bu nedenle çarpışma kutularının enerji absorbe etme yeteneğinin artırılması son derece önemli bir konudur. Bu çalışmada normalde içi boş olarak üretilen çarpışma kutularının içine alüminyum köpük esaslı malzemeler yerleştirilerek enerji sönümlenme yeteneklerinin artırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla üç farklı alüminyum alaşımı (Al2024, Al5083 ve Al6061) seçilmiş ve en iyi enerji sönümlenme yeteneğini belirlemek için karşılaştırılmıştır. Al6061 alaşımları, araştırma parametreleri içerisinde en büyük sönümlenmiş enerji değerini (221.711 J) üretmiştir. Bu değer, Al2024 alaşımı için 169.556 J ve Al5083 alaşımı için 214.101 J olarak belirlenmiştir. Boş çarpma kutusuyla karşılaştırıldığında alüminyum köpükler kullanılarak enerji sönümlenme kabiliyetinin yaklaşık 4-5 kat arttığı görülmüştür.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Day by day, the amount of road transportation grows, and so does traffic density. There are more cars on the road, which leads to more traffic accidents. Automobile manufacturers are working on

*Corresponding author, e-mail: sametuslu@karabuk.edu.tr

To cite this article: S. Uslu, B. Kocaoğlu, Comparison of Energy Absorptive Capacities of Different Aluminum Alloy Foams Placed Inside the Crash Box, Manufacturing Technologies and Applications, 5(2), 118-129, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1520669>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

safety systems and trying to design safe vehicles to reduce the number of accidents that may occur and to prevent drivers and passengers from being harmed in the event of an accident or to minimize the damage that will occur [1]. These security systems are divided into two groups as active and passive security systems. While active safety systems reduce the probability of an accident occurring, passive safety systems are systems that minimize the damage to passengers after the accident occurs. For example, active safety systems; systems such as anti-lock braking system (ABS), anti-skid system (ASR), electronic stability program (ESP), speed control and parking sensor. Passive security systems are elements that come into play when active security systems are not sufficient. For example, vehicle elements such as crash boxes, seat belts and airbags are passive safety systems. While the seat belt restricts the forward movement of the passenger during an accident, airbags reduce the possibility of death and injury by absorbing the impact intensity that will reach the passengers during a possible crash. The purpose of crash boxes is to absorb the impacts that will occur during a crash [2, 3] and ensure that the passengers are affected by these impacts at a minimum level [4]. Crash boxes are located at the front and rear of vehicles and ensure safety in both front and rear collisions [5]. Figure 1 shows the image of the vehicle skeleton structure and crash box.



Figure 1. Skeletal structure and crash boxes of a vehicle (Bir aracın iskelet yapısı ve çarpışma kutuları)

Impact forces occurring during an accident are distributed in different sizes across the car. Most of the impact energy created by these forces is absorbed by the parts at the front of the car. Crash boxes are the parts that first absorb the impact forces with the buffer. Crash boxes absorb approximately 20% of this impact energy. There are different studies on increasing the energy absorption ability of crash boxes [6–8]. To increase the energy absorption capacity of crash boxes, this study aimed to fill them with aluminum foam. The reason why aluminum material is preferred is that it has a high energy absorption capacity and is light [9]. Because ensuring both lightweight and durability at the same time has become one of the most crucial working difficulties in the automotive industry as well as in many engineering sectors in recent years [10]. For this purpose, metallic foam materials have been the focus of extensive research in recent years [11, 12]. It is employed in the rail systems and space industries in addition to the automobile industry [13]. Because of these materials' higher energy absorption capacity, vibration dampening, and thermal insulation, their employment in the automobile sector is expanding. Metallic foams, which are made from a variety of light metals including aluminum, magnesium, nickel, and titanium, are widely used in the automobile sector because they offer resilience, light weight, and fuel efficiency. Aluminum-based metallic foams are the most widely used and chosen among all metallic foams due to their low specific weight, adequate ductility, superior heat conductivity, and low manufacturing cost [14]. Metallic foams produced using aluminum are superior at absorbing energy from many metals by converting impact energy production into plastic energy [15]. Additionally, metallic foams are lightweight; thanks to the void space they have around 75%-90% [16]. Even though the metallic foams placed inside the crash boxes cause some weight increase, they are ignored because they increase the ability to absorb impact energy by 4-5 times. There are some studies in the literature about crash boxes that are tested by filling them with foam material. Rajendran et al. [17]

filled the crash box with the foam material they produced from AISI 304L material and tested its energy absorption ability. As a result of the tests, they concluded that the energy absorption capacity of the profile filled with foam material is much higher than the hollow profile. Another study, Altın and Yücesu [18] placed aluminum-based metallic foam material inside crash boxes with circular, square, pentagonal and hexagonal cross-sections and examined the changes in energy dissipation capacity with finite element analysis. As a result of the study, they determined that aluminum-based metallic foam materials placed inside hollow crash boxes significantly increased the energy absorption capacity. In another metallic foam study, Wang et al. [19] conducted compression and impact tests on a foam-filled crash box to investigate its energy absorption and shielding capabilities. Their tests indicated that the crash boxes were useful and beneficial for crashworthiness. In a study supported by the finite element method, Valente et al. [20] aimed to improve the crashworthiness behavior by filling a honeycomb crash box with open-cell aluminum foams. For this purpose, they performed optimization with finite element application in addition to experimental studies. The authors reported that successful results were obtained with an error of 1.72% and 0.05% for the breaking force and absorbed energy for the empty structure between the results obtained from the application and the experimental results, respectively. In addition, it was stated that the optimum cell number could be determined with the finite element application and that metallic foams could be used more efficiently. As a result, it was stated by the authors that metallic foams could be used successfully for impact absorption.

In this study, foam materials produced from different aluminums (Al2024, Al5083, and Al6061) were placed inside the crash boxes used in automobiles and their energy absorption capabilities were compared with the hollow crash box. There are a limited number of studies on filling aluminum foam inside crash boxes and these studies were mostly conducted in the form of comparison on a single metallic foam material. The difference of this study from the others is that metallic foam is produced using three different aluminums (Al2024, Al5083 and Al6061), pore size comparison is made through SEM images of the produced foams in cross-sectional form and energy absorption capabilities of the produced foams are compared.

2. MATERIAL AND METHOD (MATERYAL VE YÖNTEM)

2.1. Materials and Production Methods (Materyaller ve Üretim Yöntemleri)

In the laboratory of Gazi University Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, studies were carried out by following the steps of producing metallic foam with the powder metallurgy method. In the first stage, the powders of the substance to be foamed and the foaming agent powders were mixed. Al2024, Al5083 and Al6061 powders with an average grain size of 150 µm and TiH₂ powders with an average grain size of 325 mesh obtained from Aldrich were used as foaming agent powder. Powder mixtures were prepared by calculating the weight of each powder to put the appropriate amount of powder into the volume of the mold designed to press the powders. The dimensions of the mold used are 60x60x10mm and are given in Figure 2.

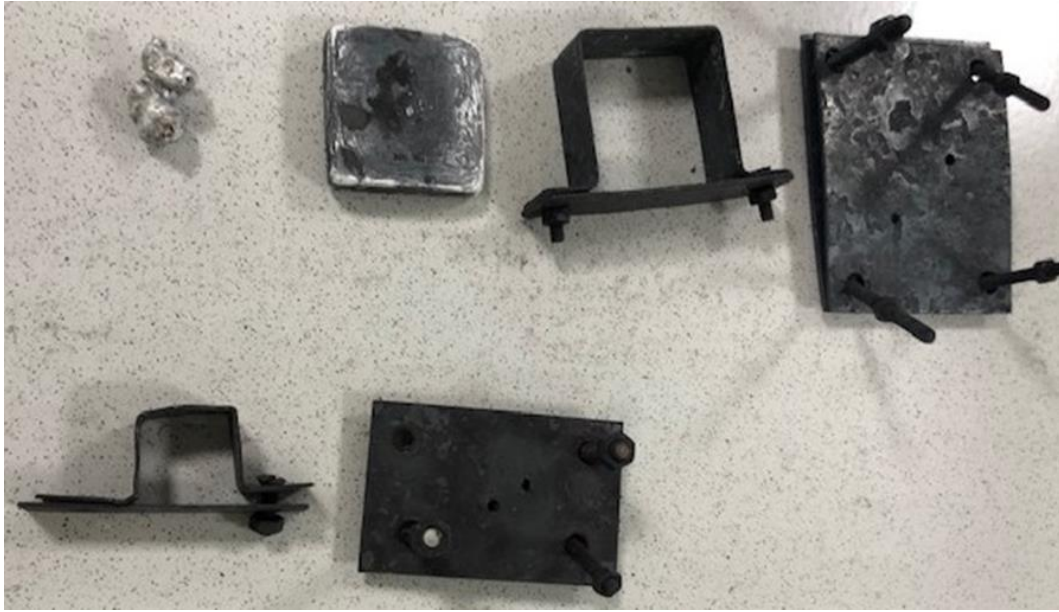


Figure 2. Compression mold (Sıkıştırma kalıbı)

The powders, whose weights were precisely measured on an electronic scale, were mixed with the turbula shown in Figure 3 for 45 minutes to obtain a homogeneous mixture. The prepared powder samples were pressed under approximately 10 tons of pressure in a hydraulic press with a uniaxial working mechanism in the air environment and turned into semi-finished products. The sintering process was applied to prevent the semi-finished powders from disintegrating in subsequent processes after the pressing process, to form a durable and resistant structure where the powder particles are interconnected, and to prevent foaming gases from escaping from the pores of the structure formed during the foaming stage. The semi-finished products obtained during the sintering process in air were heated for 45 minutes and reached a temperature of 500 °C. The semi-finished products, which reached 500 °C, were sintered under 100 tons of pressure for 35 minutes and left to cool. Visuals of pressing and sintering processes are given in Figure 4.



Figure 3. Turbula



Figure 4. (a) Pressing, (b) sintering and (c) final product ((a)Presleme, (b) Sinterleme ve (c) nihai ürün)

The products, whose dimensions were 60x60x10 mm, were prepared for the foaming process, and four pieces of each aluminum alloy were cut in the abrasive grinding device. These materials were prepared to be used in closed mold and foaming at different temperatures. For closed mold foaming processes, aluminum alloys were placed in 30x30x20 mm closed molds shown in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** and three foams from three different alloys were produced.



Figure 5. Foaming in closed mold (Kapalı kalıpta köpürme)

2.2. Compression Tests (Basma Testleri)

Compression tests of rectangular shaped samples were carried out on a computer-controlled 220 V / 50 Hz AC powered Instron 3369 brand universal compression test device with a maximum load capacity of 50 kN. All the samples were deformed with a deformation rate of 1mm/second until they reached 70-80% deformation. Figure 6 gives the visual of the Instron 3369 brand compression-tensile test device, while Figure 7 shows the compression tests of a sample (Al 6061).



Figure 6. Instron 3369 brand compression tester (Instron 3369 marka sıkıştırma test cihazı)

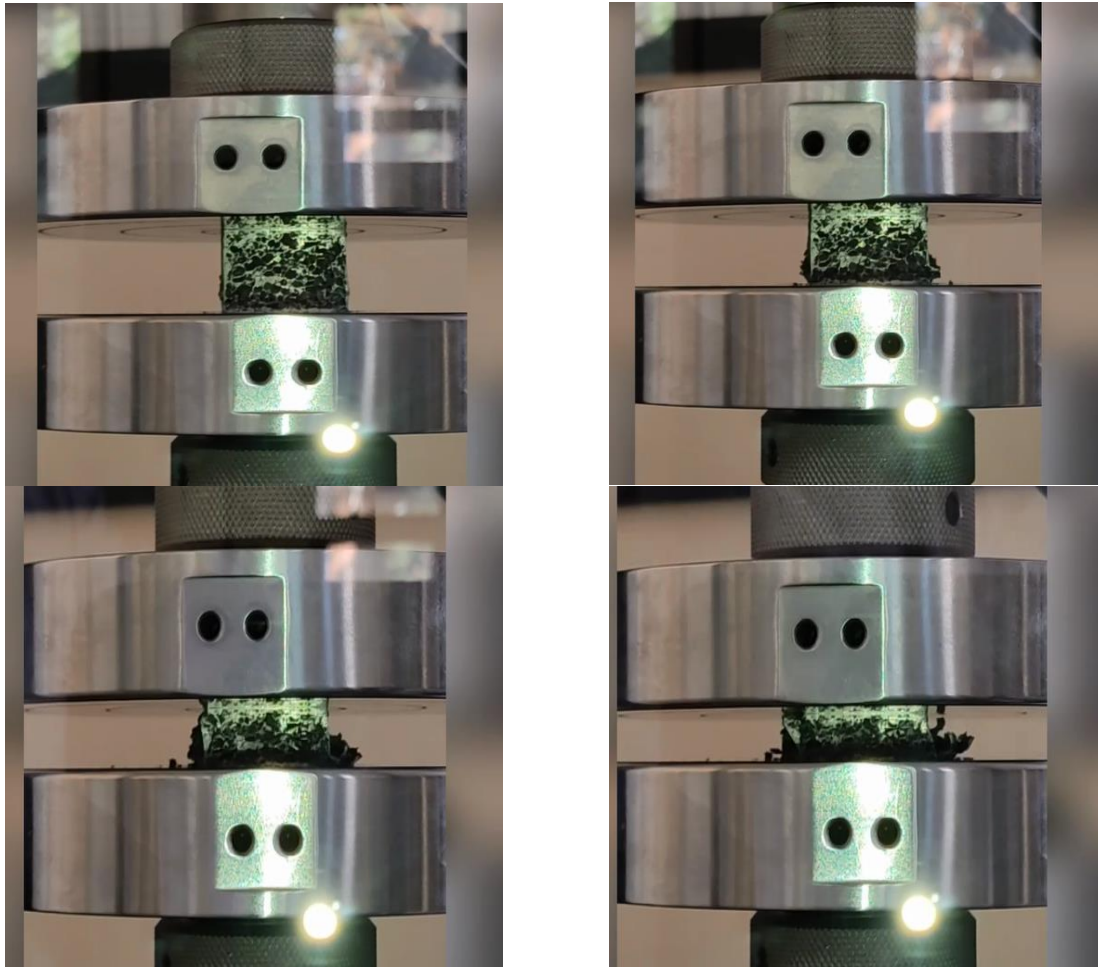


Figure 7. Deformations of Al6061 alloy during the compression test (Al6061 alaşımının basma testi sırasında deformasyonları)

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

In Figures 8, 9 and 10, the pore sizes of Al2024, Al5083 and Al6061 alloys are given respectively, and calculations are made based on four points. The results are shown in Table 1. The average spheroidization rate of the Al2024 alloy is 0.525 and the average pore size of four randomly selected pores is 4.69. Similarly, the average spheroidization rate of Al5083 and Al6061 alloys and the average pore sizes of four randomly selected pores are 1-5.125 and 1.1875-2.98, respectively. When the pore structures and dimensions of the aluminum alloys foamed in the closed mold were examined, it was observed that the Al alloy with the lowest spheroidization rate was Al2024, and the highest was the Al5083 Alloy. It can be said that the most ideal alloy in terms of pore structures and homogeneity is Al6061 in terms of foaming pattern and uniform distribution.

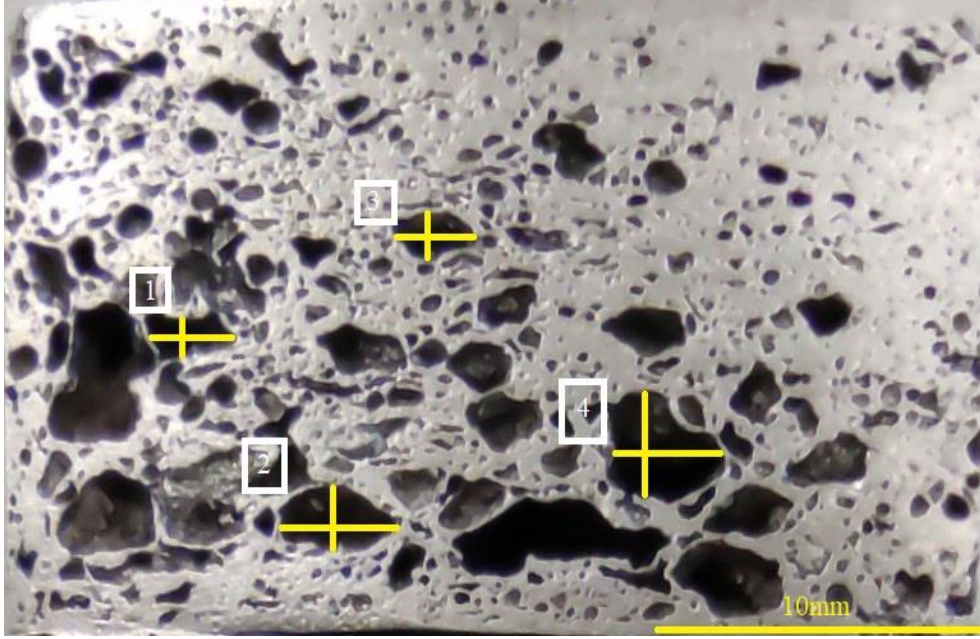


Figure 8. Pore sizes of Al2024 alloy (Al2024 alaşımının gözenek boyutları)

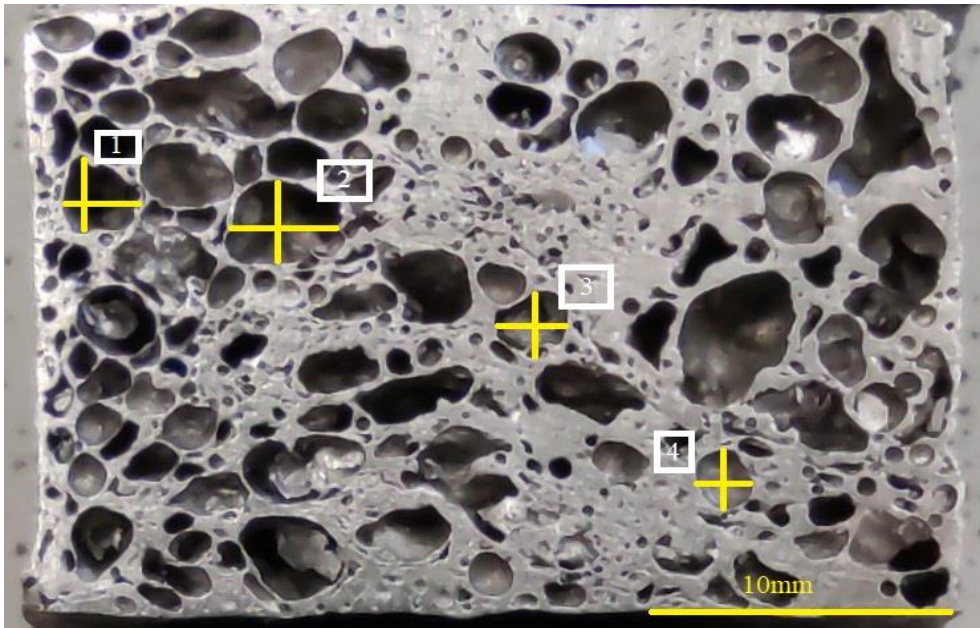


Figure 9. Pore sizes of Al5083 alloy (Al5083 alaşımının gözenek boyutları)

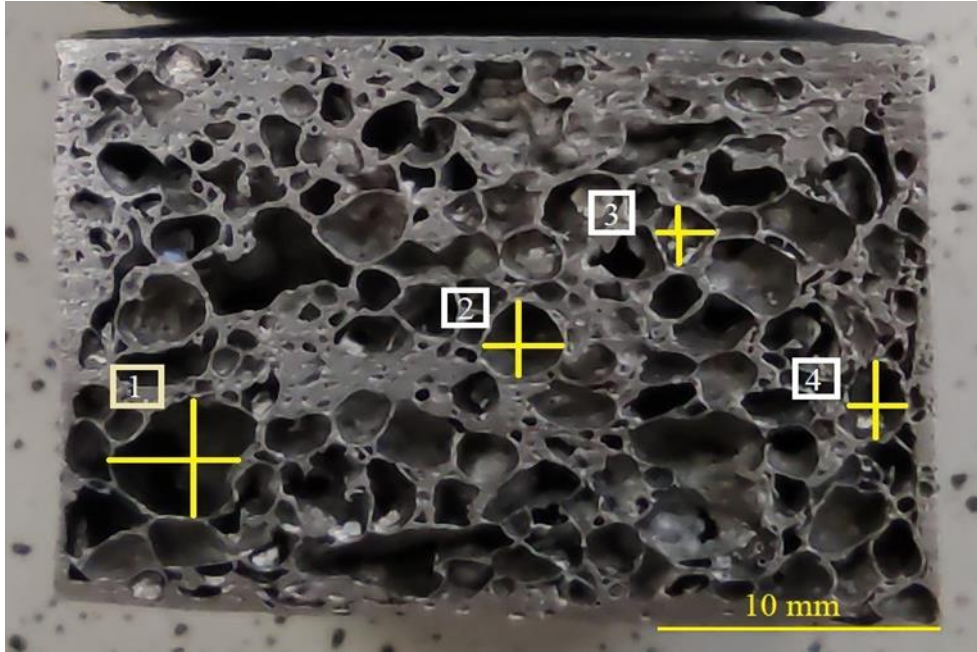


Figure 10. Pore sizes of Al6061 alloy (Al6061 alaşımının gözenek boyutları)

Table 1. Calculation of spheroidization rate and pore size of different alloys (Farklı alaşımların küreselleşme oranının ve gözenek boyutunun hesaplanması)

	Pore	X (mm)	Y (mm)	Spheroidization Rate (Y/X)	Pore Size (X+Y) / 2
Al 2024	1 st pore	5.27	1.63	0.309	3.45
	2 nd pore	7.27	3.63	0.499	5.45
	3 rd pore	5	2	0.4	3.5
	4 th pore	6.72	6	0.892	6.36
Al 5083	1 st pore	5	5.2	1.04	5.1
	2 nd pore	7.2	5.8	0.8	6.5
	3 rd pore	4.8	4.6	0.95	4.7
	4 th pore	3.8	4.6	1.21	4.2
Al 6061	1 st pore	4.6	4.4	0.95	4.5
	2 nd pore	3	3	1	3
	3 rd pore	2	3.2	1.6	2.6
	4 th pore	1.66	2	1.20	1.83

Compression tests were applied to examine the mechanical behavior of the obtained samples. Square-section rectangular-shaped samples of equal dimensions with different densities were cut in an abrasive grinding machine to be used in compression tests. Compression test results are shown in Table 2 for each aluminum alloy. Moreover, the physical condition of Al6061 before and after the compression test is shown in Figure 11.



Figure 11. Physical condition of Al6061 before and after compression test (Al6061'in sıkıştırma testinden önceki ve sonraki fiziksel durumu)

Table 2. Compression test results of the samples (Numunelerin basma testi sonuçları)

	Al2024	Al5083	Al6061
Compressive stress under maximum load (N)	42916.91	35158.43	39829.22
Maximum compressive stress (MPa)	64.391	55.941	63.617
Maximum compression tension (%)	39.49	59.462	52.517
Amount of extension at maximum tension (mm)	8.491	12.754	10.704
Breaking load amount (N)	42916.905	35158.431	39829.221
Width (mm)	31	29.3	30.75
Wall thickness (mm)	21.5	21.45	20.36
Amount of elongation at break (mm)	8.491	12.745	10.704
Compressive stress at break (MPa)	64.391	55.941	63.617
Compressive strain at fracture (mm/mm)	0.39495	0.594	0.525
Fracture energy (J)	169.556	214.101	221.711
Displacement amount at maximum pressure (mm)	8.491	16.103	16.120
Pressure load tension at maximum pressure (N)	42916.905	35158.426	39829.221
Geometry	Rectangle	Rectangle	Rectangle

In the Al2024 aluminum foam material, a maximum compressive stress of 64.391 MPa occurred under a compressive stress of 42.916 kN at maximum load and an elongation of 8.491 mm was achieved in the material. At the moment of fracture, the compressive strain is 0.394 mm/mm and the energy released is 169.556 J. In Al5083 type foam, 55.941 MPa compressive stress occurred under 35.158 kN compressive stress at maximum load and 12.754 mm elongation occurred in the material. At the moment of fracture, the compressive strain was measured as 0.594 mm/mm and the energy released was 214.101 J. Finally, in the data of Al6061 alloy, it was determined that at maximum load, 39.828 kN compressive stress, 63.617 MPa maximum compressive stress occurred and 10.704 mm elongation occurred. The compressive strain at which the fracture occurred was calculated as 0.525 mm/mm and 221.711 J of energy was released. Based on the compression test results of aluminum foams in different alloys, the damped energy values were compared with the empty crash box, and the changes in the damped energy due to displacement are shown in Figure 12. While Al5083 and Al6061 have almost similar energy dissipation abilities, Al2024 remains at lower levels. The amount of energy that the empty crash box can absorb is almost 4-5 times less than Al5083 and Al6061. According to these results, it is clearly seen that improvement is achieved with aluminum foam reinforcement. In addition, the stress-strain diagram is shown in Figure 13. In the stress-strain diagram, one of the most important parameters affecting toughness (the material's capacity to absorb the effect caused by external factors as energy until rupture) is the maximum tensile stress. The true stress (MPa)-true strain (%) curve is shown in order to reveal the maximum stress that the material can carry before rupture. The strain values that reveal the ductility performance of the material are different at the rupture point. It is noticeable that ductility is higher in the 5xxx and 6xxx series alloys, which have replaced AA2024 in the aviation field in recent years. In order to compare energy absorption, the energy amounts absorbed under a fixed displacement value are consistent with the maximum stress values obtained. Ductility and toughness are the two most important parameters expressing the energy absorption capability of the material. The fact that these two values are high in the 5xxx and 6xxx series alloys reveals their superiority over the 2xxx series and the untreated.

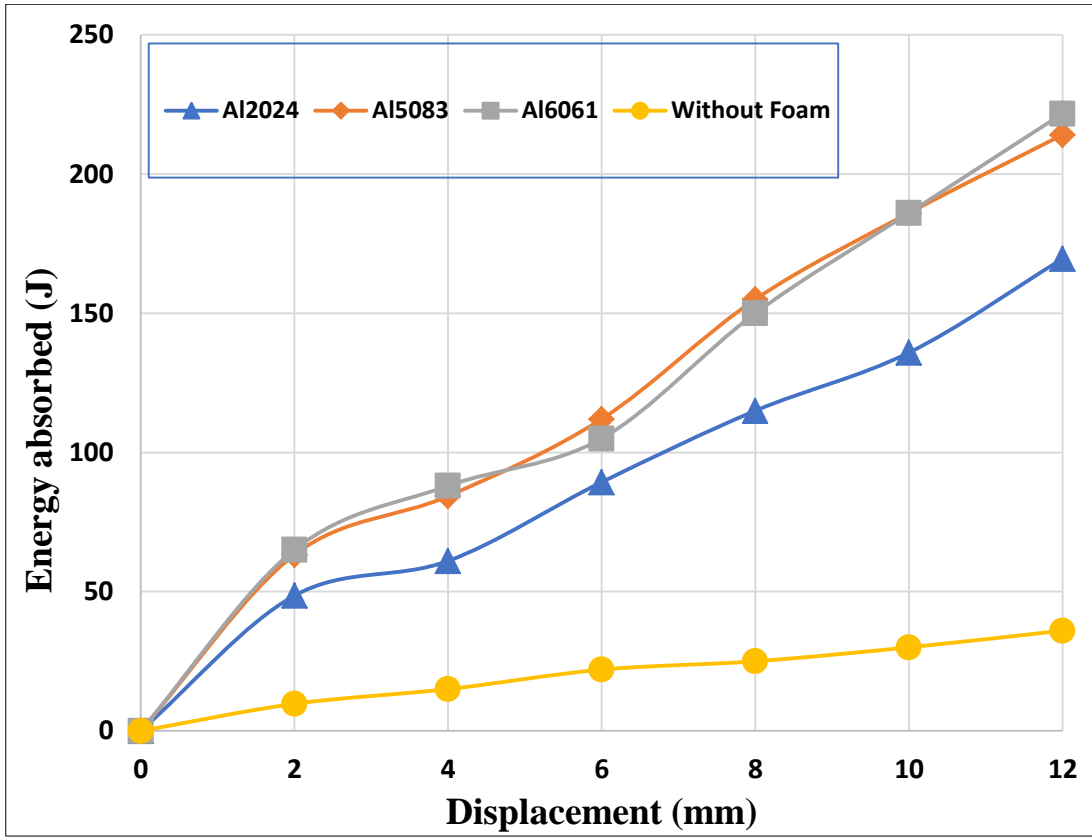


Figure 12. Comparison of the amount of energy absorbed due to displacement (Yer değiştirme nedeniyle emilen enerji miktarının karşılaştırılması)

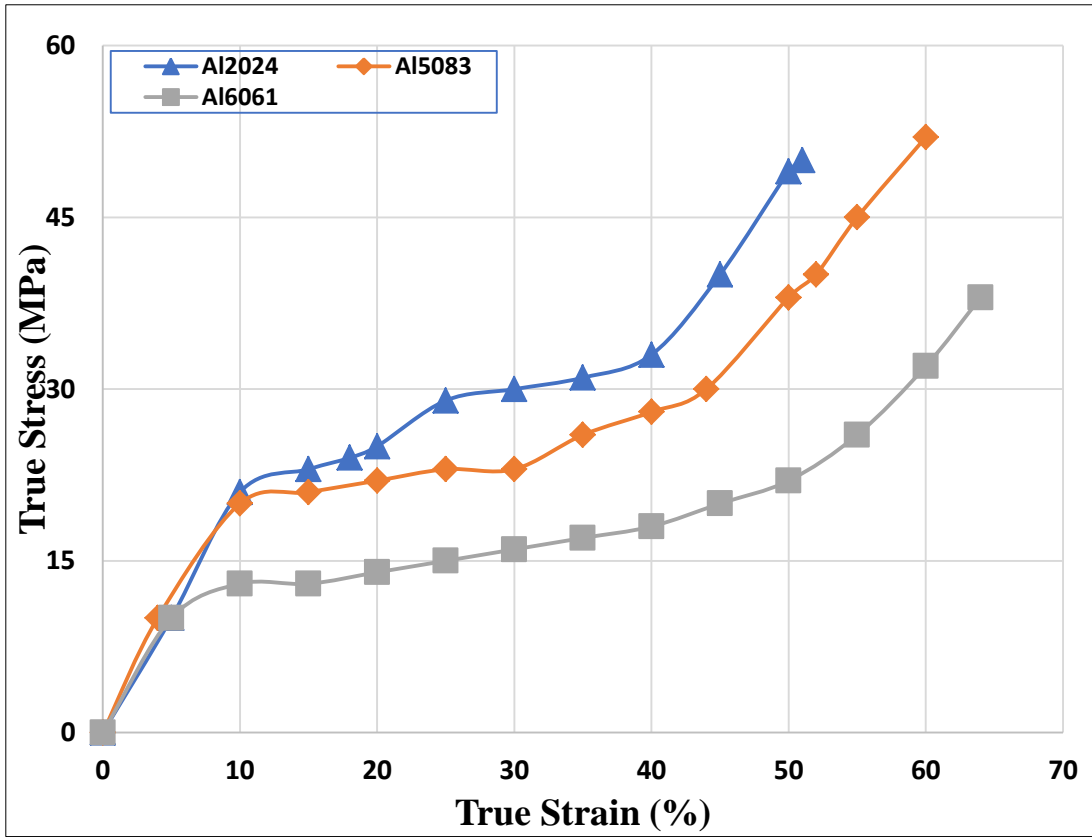


Figure 13. True Stress-Strain graph (Gerçek Gerilim-Gerilme grafiği)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, aluminum foam materials were produced using three different aluminum alloys, and then the compression test was applied to these foams, their energy dissipation characteristics were experimentally investigated, and an empty crash box was compared. According to research results;

- ✓ It can be said that the most ideal alloy in terms of pore structures and homogeneity is Al6061 in terms of foaming pattern and uniform distribution.
- ✓ In the compression tests of Al2024, Al5083 and Al6061 materials, the compressive stress values under maximum load were 42.916 kN, 35.158 kN and 39.829 kN, respectively, while the maximum compressive stress values were determined as 64.391 MPa, 55.941 MPa and 63.617 MPa, respectively.
- ✓ The displacement amounts under maximum pressure were determined as 8.491, 16.103 and 16.120 mm for Al2024, Al5083 and Al6061, respectively.
- ✓ The highest dissipated energy value was obtained in Al6061 alloys with 221.711 J. In Al2024 and Al5083 alloys, this value was 169.556 J and 214.101, respectively. Compared to the empty crash box, it was observed that the amount of energy absorption increased approximately 4-5 times with aluminum foams.

As a result, it has been concluded that filling the empty crash boxes with aluminum foam material increases the energy absorption ability and thus its use in automobiles can be used as an effective method to reduce the rate of injury and death in traffic accidents.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported by Karabük University Scientific Research Project numbered FYL-2020-2238.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. I. Kusyairi, H.M. Himawan, M.A. Chiron, Y.S. Irawan, Effects of origami pattern crash box and rectangular pattern crash box on the modelling of MPV car structure on deformation, *Journal Of Energy, Mechanical, Material, And Manufacturing Engineering*, 3(2): 61–68, 2018.
2. N.A.Z. Abdullah, M.S.M. Sani, M.S. Salwani, N.A. Husain, A review on crashworthiness studies of crash box structure, *Thin-Walled Structures*, 153: 106795, 2020.
3. N.N. Hussain, S.P. Regalla, Y.V.D. Rao, Comparative study of trigger configuration for enhancement of crashworthiness of automobile crash box subjected to axial impact loading, *Procedia Engineering*, 173: 1390–1398, 2017.
4. M.A. Chiron and M.A. Yaqin, Optimization of two segments crash box with rubber joint using response surface methodology, *AIP Conference Proceedings*, 2278 (1): 020012, 2020.
5. N.N. Hussain, S.P. Regalla, A. Jusuf, Drop-weight impact testing for the study of energy absorption in automobile crash boxes made of composite material, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part L: Journal Of Materials: Design And Applications*, 235 (1): 114–130, 2020.
6. A. Pavlovic and C. Fragassa, Investigating the crash-box-structure's ability to absorb energy, *International Journal Of Crashworthiness*, 2024.
7. Y. Hwang and J. Han, Energy absorption optimisation of an origami-shaped crash box under axial loading, *International Journal Of Crashworthiness*, 29 (1): 132–141, 2024.
8. F.A.F. Astuti, M.A. Chiron, A. Purnowidodo, Y.S. Irawan, Energy absorption and deformation pattern of honeycomb hybrid crash box under frontal load, *AIP Conf. Proc.*, 3077 (1): 050041, 2024.
9. F. Djamaluddin, Review: deformation and optimisation crashworthiness method for foam filled structures, *Latin American Journal Of Solids And Structures*, 16 (07): 2019.
10. F. Djamaluddin, Optimization of foam-filled crash-box under axial loading for pure electric vehicle, *Results In Materials*, 21: 100505, 2024.
11. G. Sun, S. Li, Q. Liu, G. Li, Q. Li, Experimental study on crashworthiness of empty/aluminum

- foam/honeycomb-filled CFRP tubes, *Composite Structures*, 152: 969–993, 2016.
12. G. Sun, Z. Wang, H. Yu, Z. Gong, Q. Li, Experimental and numerical investigation into the crashworthiness of metalfoam-composite hybrid structures, *Composite Structures*, 209: 535–547, 2019.
 13. S.S. Sharma, S. Yadav, A. Joshi, A. Goyal, R. Khatri, Application of metallic foam in vehicle structure: A review, *Materials Today: Proceedings*, 63: 347–353, 2022.
 14. O. Tripathi, D.P. Singh, V.K. Dwivedi, M. Agarwal, A focused review on aluminum metallic foam: Processing, properties, and applications, *Materials Today: Proceedings*, 47 (19): 6622–6627, 2021.
 15. İ. Yavuz, M.S. Başpınar, H. Bayrakçeken, Metalik köpük malzemelerin taşıtlarda kullanımı, *Electronic Journal Of Vehicle Technologies*, 3: 43–51, 2009.
 16. S. Uslu and M.B. Çelik, Using of metallic foams in the automotive industry, 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials, 22-24 March 2018, Karabük.
 17. R. Rajendran, K.P. Sai, B. Chandrasekar, B. Gokhale, S. Basu, Impact energy absorption of aluminium foam fitted AISI 304L stainless steel tube, *Materials & Design*, 30 (5): 1777–1784, 2009.
 18. M. Altın and H.S. Yücesu, Farklı geometrik yapılarıdaki çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen alüminyum köpük malzemenin enerji sönmleme kapasitesi üzerine etkisinin incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 22 (1): 141–148, 2019.
 19. G. Wang, Y. Zhang, Z. Zheng, H. Chen, J. Yu, Crashworthiness design and impact tests of aluminum foam-filled crash boxes, *Thin-Walled Structures*, 180: 109937, 2022.
 20. G. Valente, H. Ghasemnejad, S. Srimanosaowapak, J.W. Watson, Advancement in design and failure analysis of aluminium foam-filled honeycomb crash absorbers, *Applied Composite Materials*, 30: 705-726, 2023.