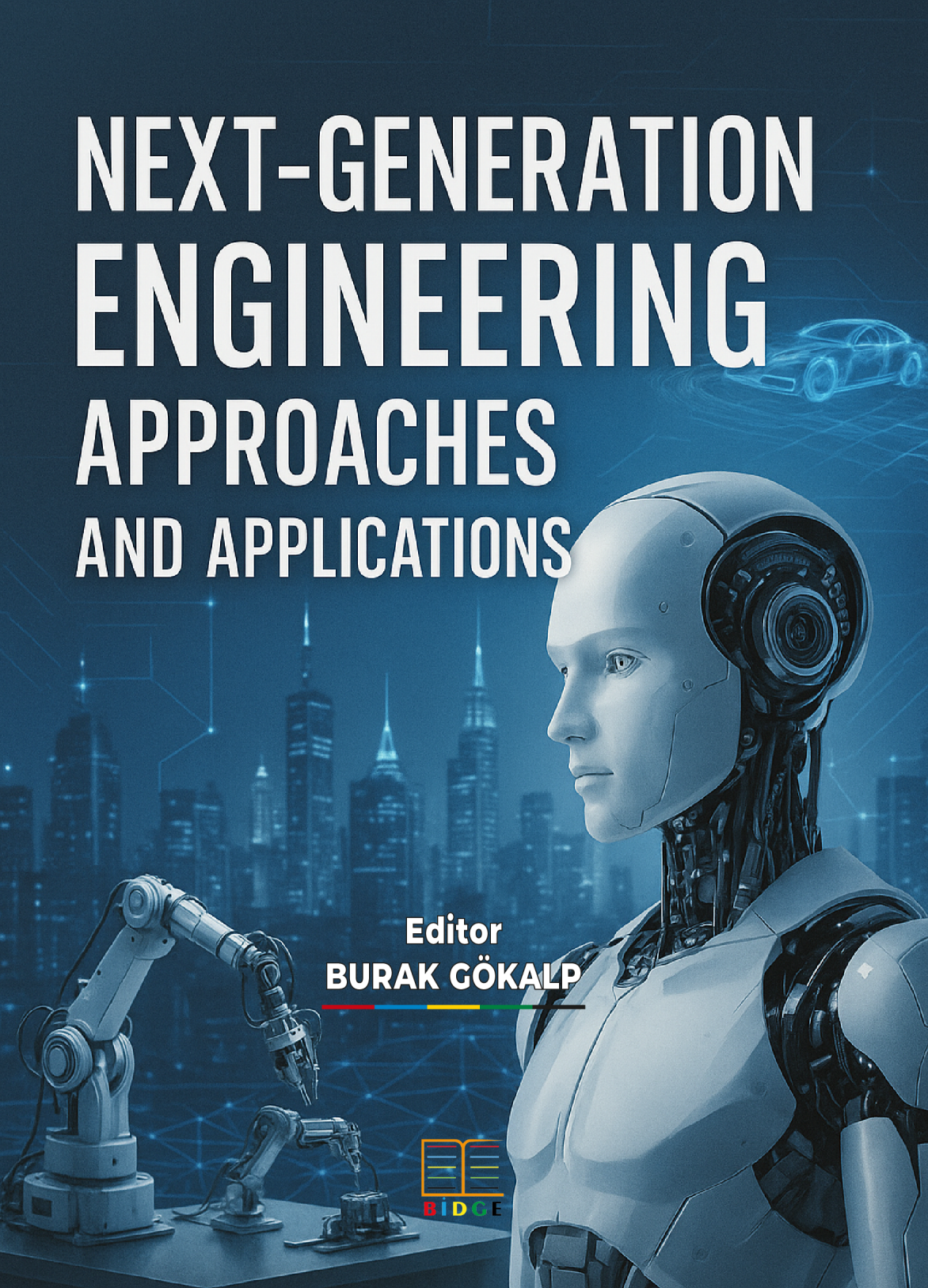
NEXT-GENERATION ENGINEERING APPROACHES AND APPLICATIONS



Editor
BURAK GÖKALP

BİDGE

BİDGE Yayınları

NEXT-GENERATION ENGINEERING APPROACHES AND APPLICATIONS

Editor: BURAK GÖKALP

ISBN: 978-625-372-721-5

1st Edition
Page Layout By: Gözde YÜCEL
Publication Date: 2025-06-25
BİDGE Yayınları

All rights reserved. No part of this work may be reproduced in any form or by any means, except for brief quotations for promotional purposes with proper source attribution, without the written permission of the publisher and the editor.

Certificate No: 71374
All rights reserved © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

İÇİNDEKİLER

A HUMAN-CENTERED OVERHEAD BIN DESIGN ENHANCING IN-CABIN ACCESSIBILITY 1
MEHMET YUSUF DEMİRBAŞ, BURHAN ŞAHİN, MERVE KARATAŞ, RAMAZAN ENSAR

3D YAZICILAR VE ENDÜSTRİDE KULLANIM ALANLARI 17
HALİL İBRAHİM SÜMBÜL, İLYAS KARTAL

EFFECT OF BULLET TYPES ON BALLISTIC BEHAVIOR OF UHMWPE COMPOSITE PLATES 39
AHMET MURAT AŞAN

APPROXIMATE SOLUTION OF DOUBLE SINE–GORDON EQUATION USING MULTIPLE SCALES LINDSTEDT POINCARE METHOD 49
M. M. FATİH KARAHAN

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF CO_2 LASER CUTTING PARAMETERS FOR THERMOPLASTICS USING THE ARAS METHOD 62
GÖKHAN BAŞAR, OĞUZHAN DER, MUHAMMED ORDU

ANALYSIS OF BOLTED BEAMS UNDER VIBRATION EXCITATION 98
MEHMET EFE ÖZKAN, TUNCAY KARAÇAY

KOMPOZİT MALZEMELERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜNÜN GÜNCEL BİLGİLERLE İNCELENMESİ 120
ERSAN KIRAR

MİKRO VE MAKRO ÖLÇEKLİ BİYOGAZ TEKNOLOJİLERİNİN ISITMA, SOĞUTMA VE GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ UYGULAMALARI 141
NEVFEL YUNUS COŞKUN

Dıgıtızatıon ın Shıpyards: Implementatıon of Web-based Engıneerıng Management Systems and Cost Advantages 171
BURAK GÖKALP

SÜPER HİDROFOBİK KAPLAMALAR 195
BURAK GÖKALP

NUMERICAL SIMULATION OF TWO PHASE FLOW IN A CLOSED CHANNEL USING ANSYS FLUENT VOF MODEL221
BEKİR DOĞAN, ÜNSAL AYBEK

Tİ-6AL-4V ALAŞIMI SAC MALZEMELERİN DERİN ÇEKME İLE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ: MALZEME ÖZELLİKLERİ, PROSES PARAMETRELERİ VE DERİN ÇEKMEDE YENİLİKÇİ YÖNTEMLER 237
MEHMET OKAN KABAKÇI, İBRAHİM KARAAĞAÇ

BİYOMALZEMELERDE KIRILMA MEKANİZMALARI: SÜNEK VE GEVREK DAVRANIŞLARIN İNCELENMESİ ...277
ŞAKİR ALTINSOY, BAHAR MAMMADLI

AL VE MG ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA (SKK) VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAKLARI (SKNK): MİKROYAPI, MEKANİK ÖZELLİKLER VE YORULMA DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI 297
İHSAN KIRIK, BURAK DEMİR, EMRE KAYGUSUZ, ANIL İMAK

CHAPTER 1

Design and Analysis of Accessible Aircraft Cabin Luggage Systems

1. Dr. Burhan ŞAHİN[1]
2. Merve KARATAŞ[2]
3. Mehmet Yusuf DEMİRBAŞ[3]
4. Ramazan Ensar İLSAY[4]

Introduction

The design of in-cabin baggage systems is an important element in terms of both passenger comfort and safety. The developing air transportation sector has started to search for more efficient and accessible in-cabin baggage solutions in parallel with passenger demands. There are many factors that affect the design of baggage areas on airplanes; safety, durability, operational efficiency and passenger satisfaction are at the forefront among these (Shoemaker, 2017). Studies on the role of in-cabin baggage systems

[1] Doctor, Turkish Aerospace Industry, Orcid: 0000-0002-8777-7925
[2] Undergraduate Student, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Aeronautics and Astronautics Engineering, Orcid: 0009-0003-2859-478
[3] Undergraduate Student, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Aeronautics and Astronautics Engineering, Orcid: 0009-0000-1804-6531
[4] Undergraduate Student, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Aeronautics and Astronautics Engineering, Orcid: 0009-0002-5925-0517

in aircraft accidents reveal how critical these systems are in terms of safety. For example, fall simulations conducted on B737 type aircraft examined how overhead baggage compartments could affect passenger safety during aircraft accidents and tested the durability of such systems (Abramowitz et al., 2002).

Increasing the durability of baggage systems also means increasing operational efficiency. Airline companies' speeding up aircraft turnaround times and optimizing pre-flight cabin layouts play an important role in aircraft design (Fuchte, 2014). In this context, the design of in-cabin baggage systems can directly affect not only safety but also the speed of flight operations. Especially in narrow-body aircraft, effective placement of in-cabin baggage areas has the potential to shorten passengers' boarding times and increase overall operational efficiency (Vendel et al., 2019).

However, the materials used in the design of in-cabin baggage systems are also of great importance. Composite materials and adhesives are among the materials frequently preferred to increase the durability of baggage racks. Studies have shown that composite materials offer significant advantages in terms of both safety and cost in terms of use in in-cabin baggage systems (Guggenmos, 2018).

In addition to passenger comfort, systems that increase the accessibility of in-cabin baggage areas have also been developed. High-performance baggage storage systems allow passengers to place and remove their bags faster. In addition, proper placement of these systems in the cabin can improve passengers' overall travel experience (Worcester, 2019). In the design of such systems, customer-friendly features and operational conveniences should also be taken into account (Rüger and Graf, 2021).

In addition to increasing the security, efficiency and passenger satisfaction of in-cabin baggage systems on airplanes,

they can also affect the organizational order in the cabin. Fast and safe placement of baggage systems increases operational efficiency, especially during busy flights (Ren et al., 2020). In addition, the baggage layout in the cabin can directly affect the passenger experience; more accessible baggage areas can speed up passengers' entry and exit from the cabin (Darby, 2010).

Finally, studies on the design of in-cabin baggage systems reveal that different baggage placement strategies have significant effects on passenger comfort and flight safety. This study will address design improvements made to make aircraft in-cabin baggage systems more accessible and the analysis of these improvements based on durability tests.

Methodology

The Design Thinking methodology was used in this study's design development process to increase the accessibility of the in-cabin baggage systems. Through the phases of empathy, problem definition, solution generation, and prototyping, Design Thinking produces creative answers to difficult problems using a user-centered methodology (Henriksen et al., 2017). This methodology allows for innovative solutions by integrating different perspectives, especially in the design process.

In the design process, one of the main goals was to deeply understand the needs of users, identify existing problems, and develop solution proposals for these problems. In this context, passenger behavior, ergonomic factors, and safety requirements were taken into consideration for the purpose of increasing the accessibility of in-cabin baggage systems (Tekaat et al., 2021).

First, the difficulties experienced by passengers with the current cabin baggage systems were identified and it was understood that a design should be made to address these problems. Then, design alternatives that could solve this problem were reviewed and the

most appropriate solution was developed. During the design process, the design limits were determined by taking into account the restrictions imposed by airline companies on cabin baggage dimensions. Finally, various analyses were conducted to evaluate the durability of the design, and the safety and longevity of the design were tested. This process was shaped in line with passenger needs and the requirements of the aviation industry.

The aircraft cabin baggage system and drawer section were designed in this study using GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) composite material. Glass fiber reinforced polymer, or GFRP, is a popular choice in the aviation sector, particularly for applications where durability and light weight are crucial considerations. Because of its high strength and low density, this material is essential to aircraft cabin systems and structures (Baker, 2004).

The most important advantages of GFRP are lightness, high durability, corrosion resistance and excellent mechanical properties. These features ensure that aircraft cabin baggage systems are safe and efficient, while also having a positive effect on fuel efficiency. Since weight is a factor that directly affects fuel consumption in aircraft, the use of GFRP offers a great advantage in this respect (Kalanchiam and Chinnasamy, 2012).

GFRP also has high tensile strength, which increases the durability of aircraft cabin interior systems, making this material an ideal choice for operational safety and long life. These properties have led to GFRP being preferred in structural components of aircraft cabin interior baggage systems. In addition, the use of structural steel for the fasteners in the cabin drawer section increases the load-carrying capacity and safety of this design (Whittaker and Hess, 2015).

Table 1. Mechanical Properties of Materials

Property	*GFRP*	*Steel A286*
Density	*1857 kg/m^3*	*7944 kg/m^3*
Young's Modulus	*26.4 GPa*	*203.8 GPa*
Poisson's Ratio	*0.1543*	*0.3163*
Bulk Modulus	*12.728 GPa*	*184.9 GPa*
Shear Modulus	*11.436 GPa*	*77.414 GPa*
Coefficient of Thermal Expansion	*1.688 x 10^{-5} 1/K*	
Tensile Ultimate Strength	*440.1 MPa*	*995 MPa*
Tensile Yield Strength	*440.1 MPa*	*684 MPa*

Results

The design in this study was made in accordance with the cabin baggage dimensions determined by airline companies. During the design process, both the functional and ergonomic requirements of the cabin baggage system were taken into consideration, but at the same time it was carried out within certain limits. These limits were carefully determined in order to comply with the current layout of the aircraft cabin area, baggage placement capacity and the standards determined by the airline companies.

In the analyses performed, the safety, durability and operational efficiency requirements of the design as well as the current dimensions of the cabin area were also taken into consideration. The boundaries of the design were optimized for both user-friendliness and operational efficiency. In this section, the visuals of the design and the boundary conditions determined based on the analyses performed are given in the visuals.

Figure 1-Detailed design of compartments and the integrated connection mechanism

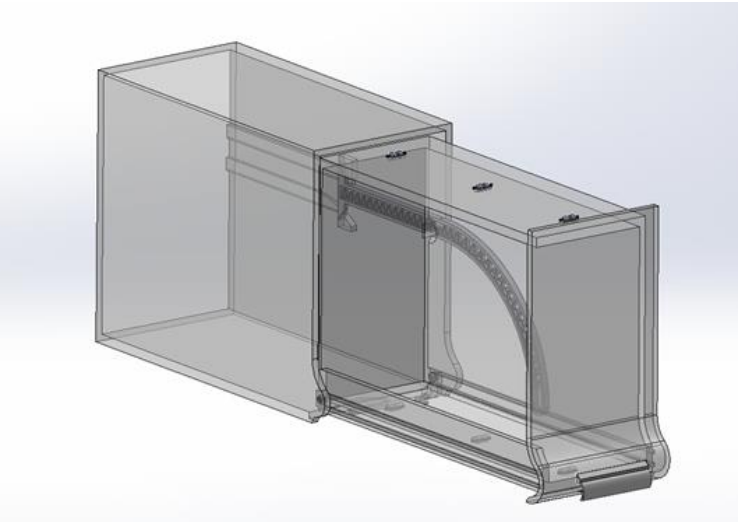


Figure 2-Side view of the cabin storage system design

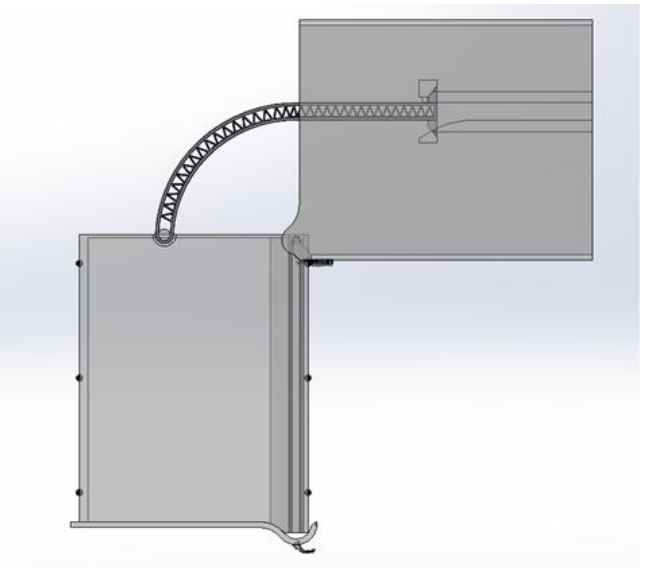
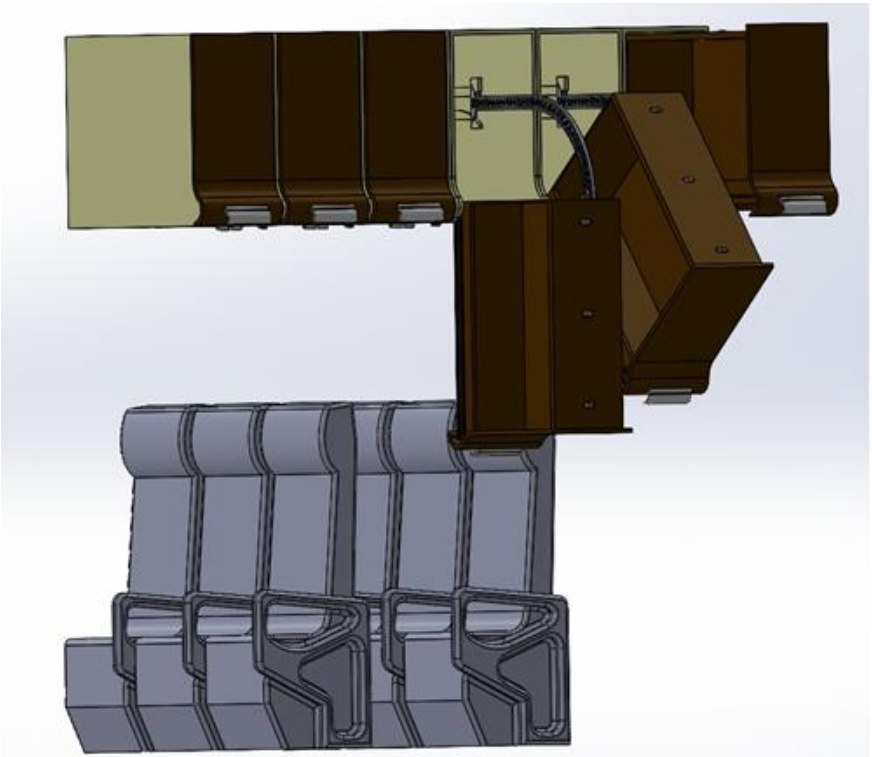


Figure 3 - Depicting the arrangement of seats and storage compartments



Boundary conditions are determined by considering the realistic connection conditions in the aircraft. The movements of the fixed cabin are restricted by giving fix support from the point where it will contact the aircraft interior panel.

Figure 4 - Boundary condition

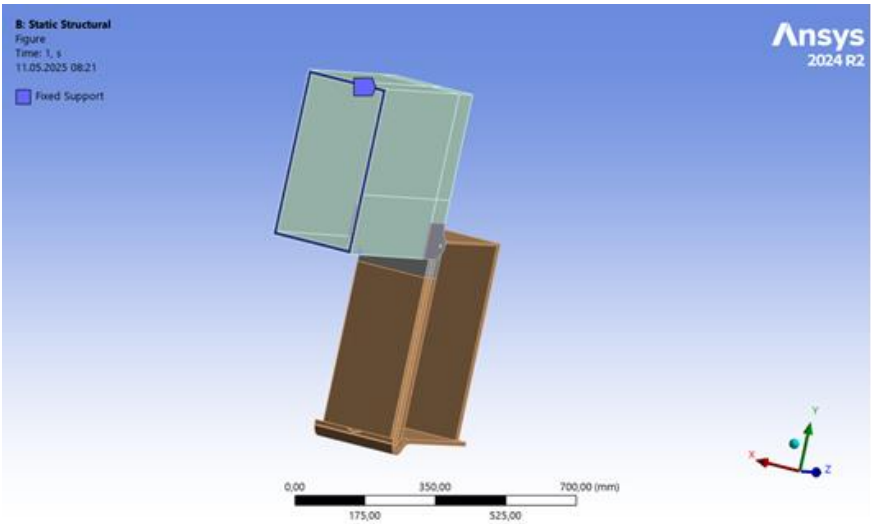
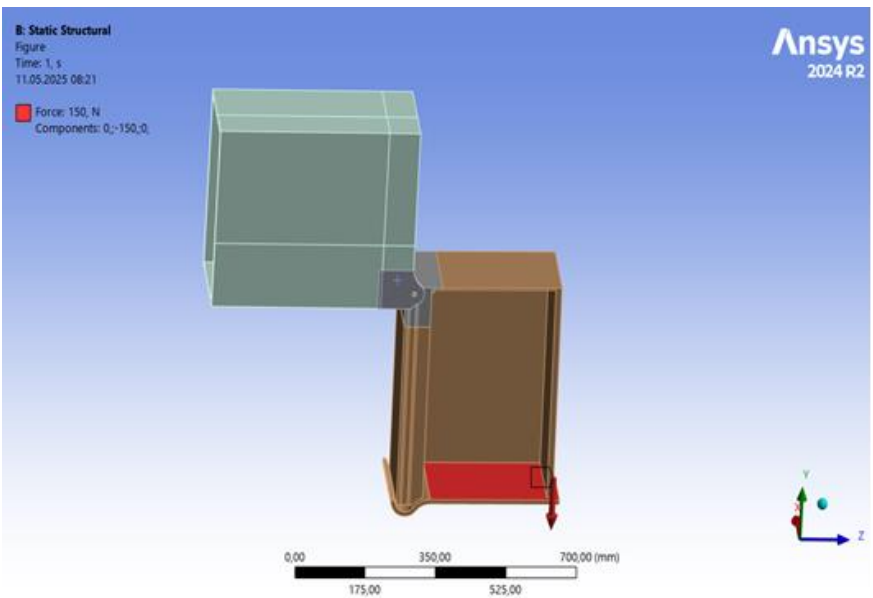


Figure 5 - Load of analysis



Normally, cabin baggage is on average around 8kg. In the analyses, cabin baggage was accepted as approximately 15 kg in case of extra conditions and a force of 150 N was applied to the bottom surface. Performing the analyses under conditions above the real conditions tests the strength limits of the material and enables weight optimizations to be made in the future.

3D mesh was used in our analysis. The vast majority are of the tet10 element type. The skewness value was analysed to check the mesh quality. Skewness value close to 0 indicates that the mesh is of good quality. As can be seen in the figure in the applied mesh, the element density is concentrated in the region close to zero. This shows that the mesh quality is sufficient for the analysis.

Figure 6 - Mesh

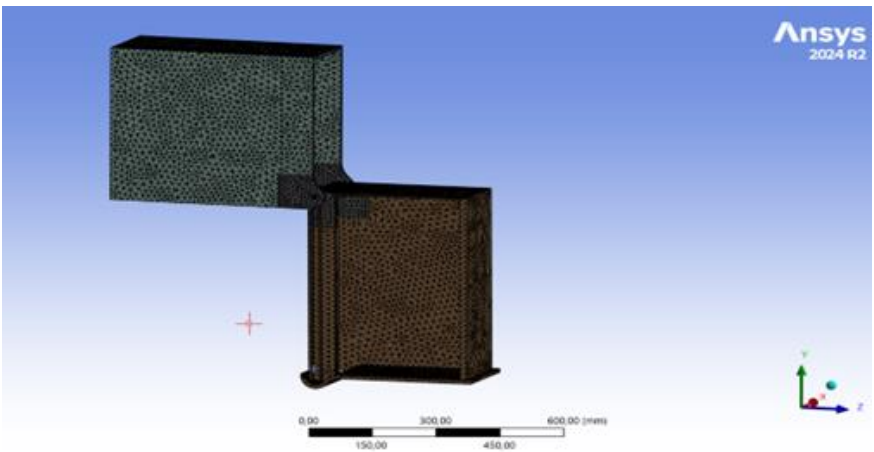
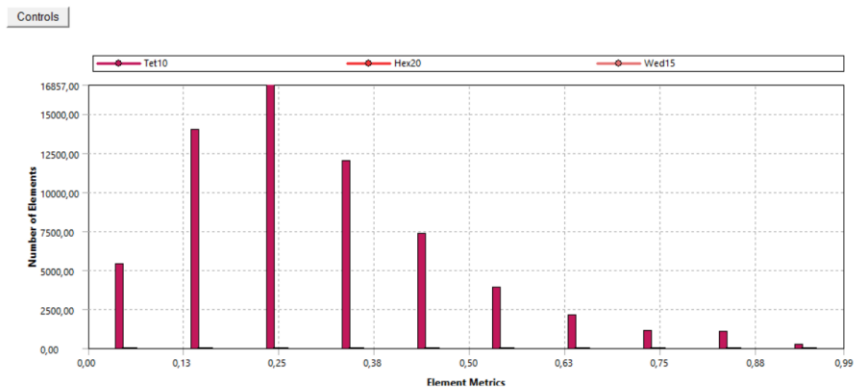


Figure 7 - Mesh quality (Skewness)



Structural analyses were carried out to evaluate the material strength and resistance to loads of this design, which has not yet been put into practice. In these analyses, especially the stresses at the connection points were examined in detail. These points are the basic load-bearing elements of the system and are largely responsible for meeting the load. The A-286 stainless steel material used in these connection areas has a high yield strength as can be seen in the table. It was necessary to choose a material that could carry the entire luggage load when the cabin drawer was suspended. The structural analyses show that this material choice was correct and sufficient.

Figure 8 - Total deformation

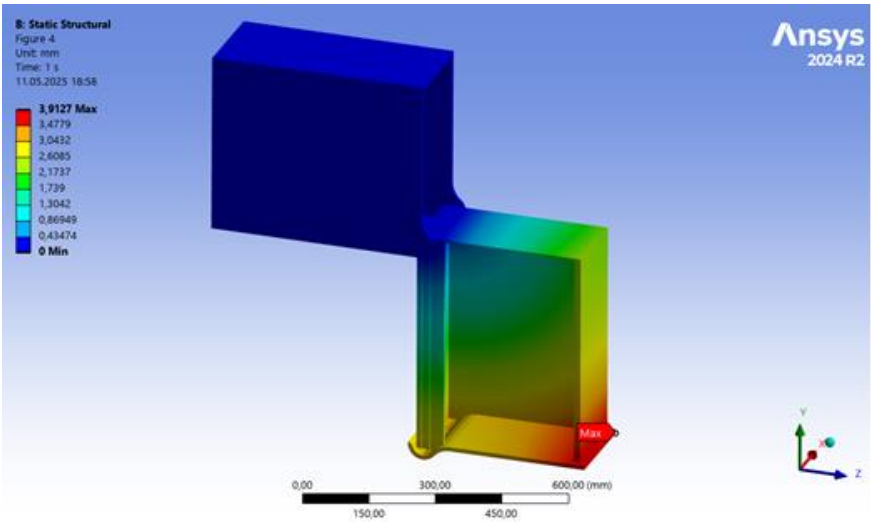


Figure 9 - Von mises stress

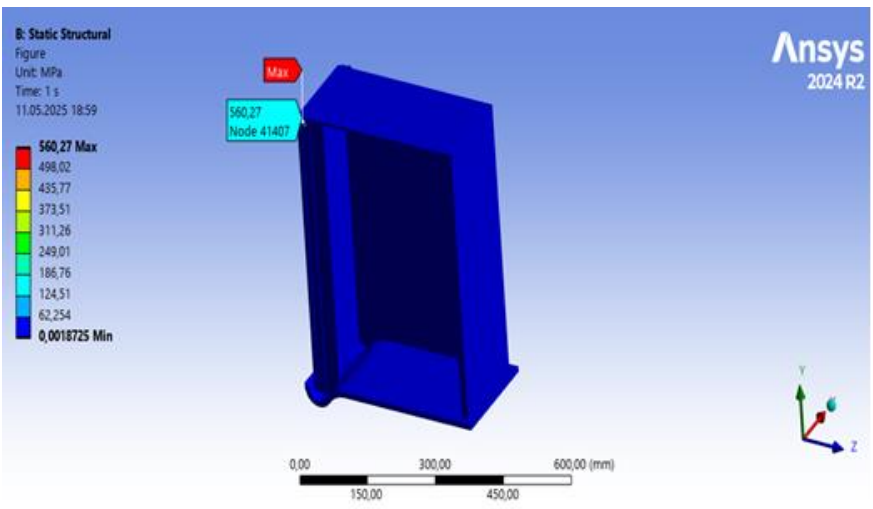


Figure 10 - Maximum von mises stress on the joint

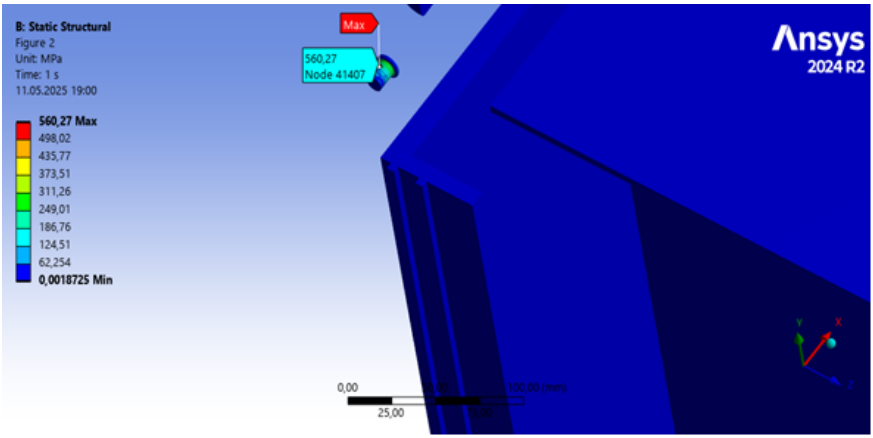


Table 2. Results of the Analysis

Result Type	*Minimum Value*	*Maximum Value*	*Average Value*
Von Misses Stress [MPa]	*0.00187*	*560.27*	*50.392*
Total Deformation [mm]	*0.00000*	*3.9127*	*0.27946*

In the structural analyses, especially the von Mises stresses on the fasteners were examined in detail. Since these regions play a critical role in the load carrying capacity of the structure, it is of great importance to compare the maximum stress values with the mechanical limits of the material used. Accordingly, the maximum von Mises stress values obtained as a result of the analysis were compared with the yield strength of A-286 stainless steel material. The main purpose of this comparison is to evaluate whether the fasteners remain within the safe operating range and to determine whether the calculated safety factor meets the relevant engineering standards. As a result of the calculations, the safety factor was obtained around 1.2. This value is in the range of 1.2-1.5, which is

the commonly accepted lower limit for standards, and indicates that the design can operate safely under the prescribed loading conditions.

$$Safety\ Factor = \frac{Yield\ strenght}{Maximum\ von\ mises\ stress} = \frac{684\ MPa}{560\ MPa} \cong 1.22$$

References

Abramowitz, A., Smith, T. G., Vu, T., & Zvanya, J. R. (2002). Vertical Drop Test of a Narrow-Body Transport Fuselage Section with Overhead Stowage Bins. *SAE Technical Paper Series*. https://doi.org/10.4271/2002-01-2995

Baker, A. A. (2004). *Composite materials for aircraft structures*. AIAA.

Darby, R. (n.d.). *Types of Injuries From Falling Carry-On Items What types of injuries did you experience during the past 12 months from being struck by passenger carry-on items falling out of overhead bins?*

Guggenmos, N. (2018). Adhesives for Overhead Stowage Bins Made of Composite Material. *ADHESION*

ADHESIVES&SEALANTS, *15*(1), 20–21. https://doi.org/10.1007/s35784-018-0006-8

Henriksen, D., Richardson, C., & Mehta, R. (2017). Design thinking: A creative approach to educational problems of practice. *Thinking Skills and Creativity*, *26*, 140–153. https://doi.org/10.1016/j.tsc.2017.10.001

Jörg Clemens Fuchte. (2014). *Enhancement of Aircraft Cabin Design Guidelines with Special Consideration of Aircraft Turnaround and Short Range Operations*. *11*(3).

Kalanchiam, M., & Chinnasamy, M. (2012). Advantages of composite materials in aircraft structures. *Int. J. Aerosp. Mech. Eng*, *6*, 2428–2432.

Ren, X., Zhou, X., & Xu, X. (2020). A new model of luggage storage time while boarding an airplane: An experimental test. *Journal of Air Transport Management*, *84*, 101761. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101761

Rüger, B., & Graf, H.-C. (n.d.). *Requirements for customer friendly luggage storing at the station*.

Shoemaker, W. H. (1965). Discussion of "Baggage Handling: Airline Baggage Handling Systems." *Journal of the Aero-Space Transport Division*, *91*(1), 63–64. https://doi.org/10.1061/jatdaz.0000047

Tekaat, J. L., Anacker, H., & Dumitrescu, R. (2021). *The Paradigm of Design Thinking and Systems Engineering in the Design of Cyber-Physical Systems: A Systematic Literature Review*. https://doi.org/10.1109/isse51541.2021.9582548

Vendel, M., Dangal, S., Coppens, J., Hiemstra-van Mastrigt, S., & Vink, P. (2019). Effects of a hand luggage guiding system on airplane boarding time and passenger experience. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*. https://doi.org/10.15394/ijaaa.2019.1333

Whittaker, J. T., & Hess, D. P. (2015). Ductility of Titanium Alloy and Stainless Steel Aerospace Fasteners. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, *15*(5), 571–575. https://doi.org/10.1007/s11668-015-0007-8

Worcester, R. E. (1963). Baggage Handling: Airline Baggage Handling Systems. *Journal of the Aero-Space Transport Division*, *89*(2), 21–27. https://doi.org/10.1061/jatdaz.0000011

CHAPTER 2

3D YAZICILAR VE ENDÜSTRİDE KULLANIM ALANLARI

1. İLYAS KARTAL[1]
2. HALİL İBRAHİM SÜMBÜL[2]

Giriş

Günlük hayat içerisinde kullandığımız birçok ürünle ilgili teknolojilerde gelişmeler olmaktadır. Özellikle endüstri tarafına baktığımız zaman üretim teknolojileri alanında mevcut kullanılan yöntemlere ek olarak daha hızlı daha verimli daha uygun fiyatlı üretim yöntemleri arayışı bulunmaktadır. Aslında geçmişe baktığımızda da bu böyle devam etmişti. Örneğin endüstrinin tarihsel akışını incelediğimiz zaman , toplumların hayatındaki mühim kırılma noktalarından birisi İngiltrede başlayan sanayi devrimidir. Sanayi devriminde fabrikalarda buharlı makinelerin kullanılması ile ilk aşamasını tamamlamıştı. Fakat bu süreç tabiki durmadı. Elektriğin kullanımıyla seri imalata geçişin ortaya çıkarmış olduğu makineleşmenin giderek önem kazanmış, bu da sanayi

[1] Doç Dr, Marmara Üniversitesi,Malzeme ve Metalurji Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-9677-477X

[2] Doktora Öğrencisi, Marmara Üniversitesi,Makine Mühendisliği, Orcid: 0009-0006-1713-1885

devriminin 2. ve 3. Fazının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Endüstrileşmenin bir diğer unsuruda demiryoludur Demiryolu teknolojisinin gelişmesi ve kullanımındaki artışın etkisi ile hammadde tedarik süresi ve ürünleri son kullanıcıya ulaştırma süresi azalmıştır(Özsoylu, 2017). İnsanlığın endüstrideki bu arayışının sonucu olarak karşımıza sanayi devriminin 4.fazı olan Endüstri 4.0 çıkmaktadır. Endüstri 4.0'ın getirisi internet sayesinde imalat aşamaları akıllı cihazlara entegre edilmesidir.

Bundan dolayı Almanya tarafından 2009 yılında meydana gelen finans krizi akabininde üretimde, Çin'deki ucuz iş gücünün bir sonucu olarak karşımıza çıkan düşük üretim maliyetlerine direnebilmek ve bir alternatif oluşturmak için çok daha az hata payı olan ve insan gücünü minimumda tutan bir imalat modeli önermek için Endüstri 4.0 oluşturulmuştur. (Özenir ve Nakıboğlu, 2019).

Endüstri 4.0, imalat aşamalarında dijitalleşme, nesnelerin internetini ve veri odaklı karar vermeyi sağlayan bir sistem ve dönüşümdür. Bu dönüşümün en önemli unsurlarında biri ise 2D yazıcılardır. Nesnelerin interneti, veri analizi ve yapay zeka ilse 3D yazıcılar imalat aşamalarında daha esnek, değişen koşullara hızlı adapte olabilen çözümler önermektedir. Şuan çoğunlukla ürün prototipleme aşamalarında kullanılsa da kademe kademe seri üretimde kullanılmaktadır. Endüstrideki bazı sektörlerde seri üretim aşamasında deneme çalışmaları yapılmaktadır.

EKLEMELİ İMALAT

Endüstri 4.0.'ın unsurlarından biri olan eklemeli teknolojisi geleneksel imalat proseslerine alternatif olarak yeni bir paradigma kazandırmaktadır. Eklemeli imalat, bir ürünün bilgisayar ortamda 3 Boyutlu tasarlandıktan çizim dosyasının farklı formatlarla 3D yazıcıya aktarılmasıyla yapılabilmektedir. 3D yacıcı elindeki verilerle kullanacağı malzeme eritip birbirinin üzerine katman olarak sermektedir(Özsoy ve Duman, 2017). Temel olarak eklemeli imalatın mantığı bir zemin veya tabla üzerine eritilmiş malzemenin üst üste dökülerek ortaya nihai ürünün çıkartılmasıdır. Yani talaştı imalattaki gibi bir iş parçasını işleyerek ürün çıkarmak değilde, sıfırdan bir zemine ürünü aşama aşama ekleyerek çıkarmaktır.

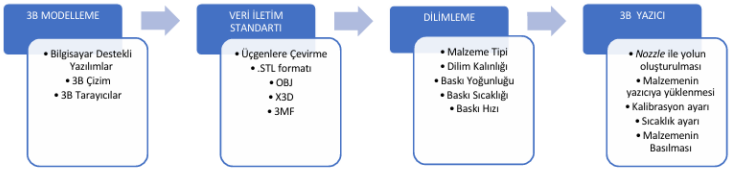
3D yazıcılar ilk olarak 1984 yılında yapılmıştır. Yapan kişi ise Charles Hull'dur. 2 yıl sonra 1986 yılında ise ilk 3D yazıcı üretimi yapan şirleti kurulmuştur. İlk ürünleri ise SLA-250 olup 1988 yılında tanıtılmıştır. Bu yazıcı ilk çıktığında renkli baskı alamamaktaydı. Fakat 1993 yılında renkli baskı almaya başlamıştır.

3D YAZICILARIN TARİHİ

3D yazıcı ABD' de Massachussets Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirilmiştir(Erener ve Boz, 2021). 3D yazıcılar ilk olarak 1984 yılında yapılmıştır. Yapan kişi ise Charles Hull'dur. 2 yıl sonra 1986 yılında ise ilk 3D yazıcı üretimi yapan şirleti kurulmuştur. İlk ürünleri ise SLA-250 olup 1988 yılında tanıtılmıştır. Bu yazıcı ilk

çıktığında renkli baskı alamamaktaydı. Fakat 1993 yılında renkli baskı almaya başlamıştır(Çelik ve Çetinkaya, 2016).

Resim 1 3 Boyutlu Yazıcıların Çalışma Aşamaları

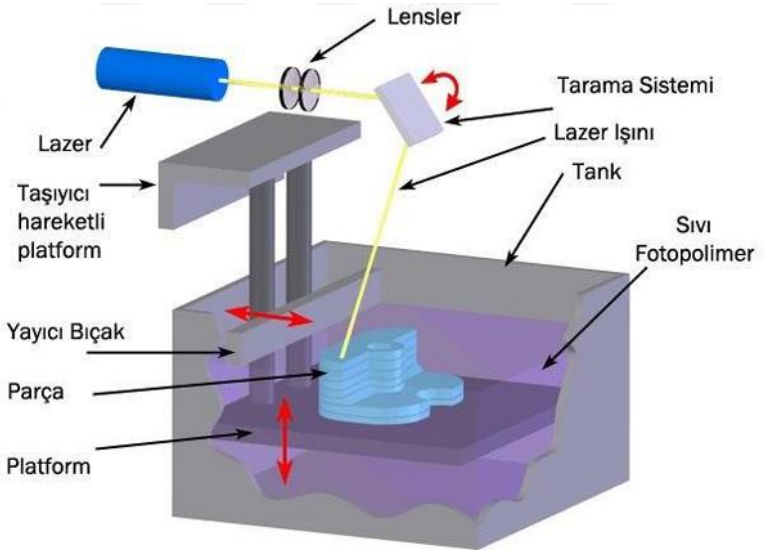


(Takva ve İlerisoy, 2024)

3D yazıcıların genel olarak çalışma mantıkları aynıdır. Ancak bazı noktalarda farklılıklar gözlemlenmektedir. 3D yazıcılar birçok farklı türe sahiptir. Bunlar; Steryolitografi (SLA), Katı Zemin Kürleme (SGC), Lamine Nesne İmalatı (LOM), Eriyik Yığarak Modelleme (FDM), Çok Jetli (Polyjet-Multijet) Modelleme (MJF), Seçmeli Lazer Sinterleme ve Ergitme (SLS/SLE), Elektron Işınlı Ergitme (EBM).

Steryalitografi tekniğinde, sıvı fazdaki fotopolimer reçine malzeme aşama aşama katılaştırılarak 3D ürün üretilir. Bu işlemde lazer kullanılmaktadır. Lazeri ürünün kesitlerini reçine malzeme yüzeyine çizerek bu alanı sertleştirmiş olur. Bu şekilde aşama aşama ürün oluşturulur. Fakat bu sistemde malzeme olarak sadece reçine esaslı malzeme kullanılabilmektedir ve baskı sonrasında parça izopropil alkolle temizlendikten sonra UV ışığı altında son sertleştirme yapılmalıdır.

Resim 2 Katı Kürleme Teknolojisine Sahip 3D Yazıcı



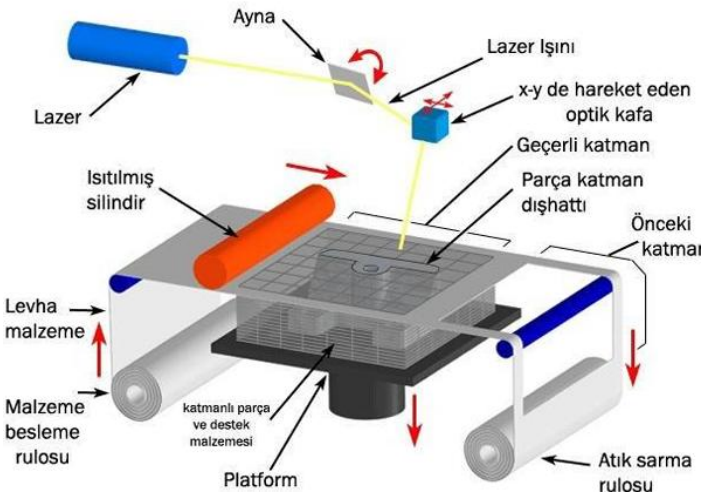
(Çelik ve vd, 2013)

Katı Zemin Kürleme (SGC), teknolojiside aslında streyalitografi ile aynı mantıkta çalışır. Aynı şekilde ışığa duyarlı UV ışığı kullanır, fakat kürleme işlemi lazer ile değilde aynı anda tüm yüzeye etki edecek şekilde UV ışığı ile yapılır. Çok karmaşık ve bakım maliyetinin yüksek olması nedeni ile çok fazla yaygınlaşamamıştır.

Lamine Nesne İmalatı (LOM), tekniğinde ise üretim zemin katmanının üretimi ile başlar. Yazıcının tablasına basılacak malzeme serilir. Belli bir sıcaklıkta tutulan bir silindir tablada bekleyen malzemeye basınç uygulamak suretiyle üzerinden geçirilir. Burada amaç tabladaki malzemenin yapışmasını sağlamaktır. Daha sonra lazerle üretilmek istenen malzemenin dış hatları kesilir. Kesim

işlemi bittikten sonra platform aşağı iner. Diğer katman önceki katmanın üzerine tekrardan basıldıktan sonra ısıtılmış haldeki silindir tekrardan katmanın üzerinden geçerek basınç uygular. Lazer yine dış hatları kestikten sonra tabla aşağı iner ve süreç malzeme basımı bitene kadar bu şekilde devam eder(Çelik ve vd, 2013 ve Diksu, 2021).

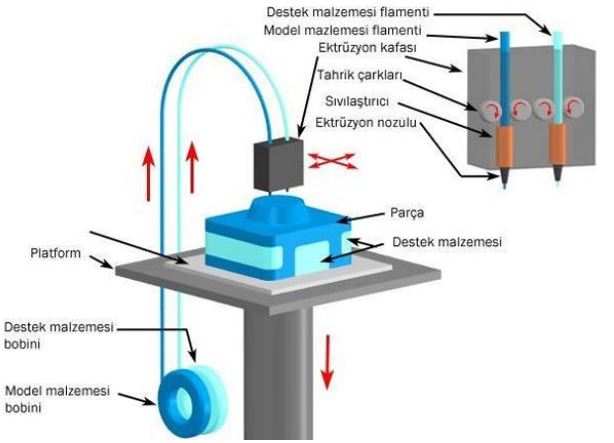
Resim 3 Lamine Nesne İmalatı Teknolojisine Sahip 3D Yazıcı



(Çelik ve vd, 2013)

Eriyik Yığarak Modelleme (FDM), yönteminde baskı malzemesi olarak ABS(Akrilonitril Bütadiyen Stiren) veya PLA(Poliaktik Asit) malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemeler şaryo sistemi ile ekstrüzyon kafasına getirilir. Burada da düşey doğrultuda hareket edebilen bir tablanın üzerine döktürülerek ürün üretimi gerçekleşmektedir. Kişisel kullanımlarda çok tercih edilebilmektedir. Bunun sebesi maliyetlerin düşük olmasıdır. Fakat basım kalitesi düşüktür(Emre vd, 2015).

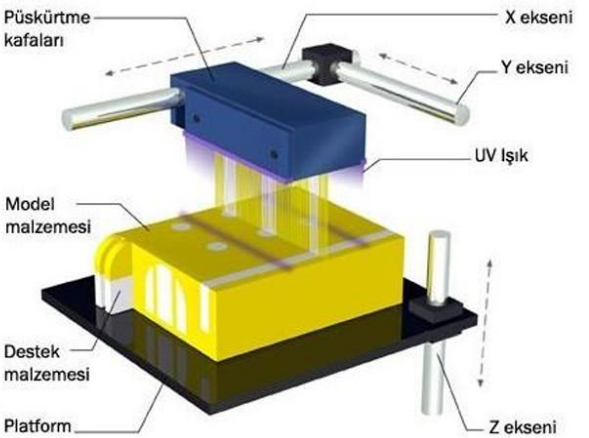
Resim 4 Eriyik Yığarak Modelleme Teknolojisine Sahip 3D Yazıcı



(Çelik ve vd, 2013)

Çok Jetli (Polyjet-Multijet) Modelleme (MJF), tekniğinde 3D yazıcının baskı kafasında termoplastik malzeme ince damla şeklinde püskürtülür ve hemen UV ışık kullanılarak malzeme kürlenir. Kürlenen malzeme ise sıcaklığında etkisiyle katılaşır. İlk katman oluşturulduktan sonra parçanın ek destek noktalarında aynı baskı kafası ile püskürtülür. Parça imalatı bittikten sonra destek noktası olsun diye üretilmiş ek yerleri yıkanarak veya elle temizlenir.

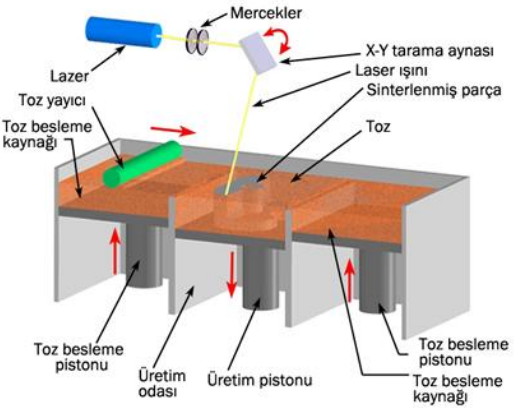
Resim 5 Çok Jetli (Polyjet-Multijet) Modelleme Teknolojisine Sahip 3D Yazıcı



(Çelik ve vd, 2013)

Seçmeli Lazer Sinterleme/Ergitme (SLS/SLE), seçmeli lazer sinterleme tekniğinde termoplastik malzeme toz olarak kullanılmaktadır. Toz malzeme ısıtılıp eritilerek yani sinterlenerek birleştirilir. 3D yazıcı toz yatağının içine modeli çizer. İlk katman oluştuktan sonra platform alçalır ve diğer katmanı oluşturur. Bu şekilde model oluşturulmuş olur. Seçmeli lazer ergitme yöntemi de mantık olarak aynı olup temel farkı malzeme olarak metal tozu kullanması ve sinterleme aşamasında SLS'de tozlar kısmen eritilirken SLE'de tozlar tamamen eritilir. Ayrıca SLS yöntemi ile üretilen malzemeler daha çok ürün prototipleme aşamasında kullanılmakta, SLE yönteminde ise üretilen malzemeler daha çok son ürün mahiyetinde ürünlerdir.

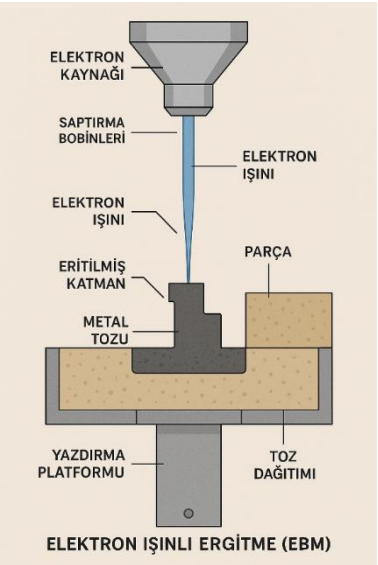
Resim 6 Seçmeli Lazer Sinterleme ve Ergitme Teknolojisine Sahip 3D Yazıcı



(Çelik ve vd, 2013)

Elektron Işınlı Ergitme (EBM), tekniğinde metal tozlarının olduğu tablada, metal tozları yüksek yoğunluklu elektron ışını ile eritilerek ürün katman katman imal edilmektedir. Metal tozlarının eritilmesi için kullanılacak olan elektron ışını için elektronlar filamanlar sayesinde 2500 °C'den fazla ısıtılmaktadır. Işınlar bu filamandan yayılmaktadır. Filamandan yayılan ışınlar metal tozları eritmektedir. Üretilecek malzemenin 3D tasarımına göre ilk katmanı üretildikten sonra üzerine yeni bir toz katmanı serilir. Daha sonra tekrardan elektron ışını ile ilk katman üzerine serilen metal tozları eritilir ve süreç parça imalatı bitene kadar devam eder. Aynı zamanda diğer tekniklerde de olduğu gibi bu teknikte de her katman oluştuğunda tabla aşağıya iner. Bu teknikle birlikte malzeme israfı düşük olur. Hassas parçalar üretilebilir. Özellikle havacılık, uzay gibi sektörlerde kullanılabilmektedir. Fakat hem cihat hemde malzeme maliyeti yüksektir(Çelik vd, 2013).

Resim 7 Elektron Işınlı Ergitme Teknolojisine Sahip 3D Yazıcı



3D YAZICILARIN ENDÜSTRİDE KULLANIMI

3D yazıcılar Endüstri 4.0'dan sonra hayatımıza daha aktif bir şekilde girmeye başlamıştır. Bunun bir sonucu olarak hem endüstride hem de kişisel kullanımda bir alanda kendisine yer bulabilmiştir. Otomotivden havacılığa, sağlıktan gıdaya kadar birçok alanda kullanılan 3D yazıcı teknolojisinin kullanım alanları aşağıdaki gibidir;

3D yazıcıların kullanıldığı önemli sektörlerden bir tanesi mimari alanıdır. Mimaride 3D yazıcı ile yapı malzemesi, yapı bileşeni, yapı elemanı veya yapı üretilebilmektedir. Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi ile yapı üretiminde kullanılan malzemeler, yüksek dayanıklılık, ve şekil koruma özelliklerinin yanı sıra, katmanların bağlarının güçlü olması ile deformasyonu engelleyecek akışkalığa sahip olmalıdır. Ayrıca, bu yapı malzemelerin ısı ve çevresel etmenlere karşı direnci yüksek, esnek, çevre dostu olması elzemdir. Bu bahsedilen özellikler, yapılarda güvenlik ile verimliliği bir araya getirmektedir. 3D yazıcı teknolojisi, yapı malzemesi imalatında, yapıların ihtiyaçlarına en uyan malzemenin bulunmasına imkan sağlayarak hem estetik hemde yapısal bir çözüm sunar. Yazıcıda kullanılacak malzemeler üretim aşaması ve hedefine göre farklılıklar gösterebilmektedir(Uygunoğlu vd, 2019).

Resim 8 3D Yazıcı Teknolojisiyle Üretilmiş Metal Numuneler



(Cruz vd, 2017)

Yapılan bir çalışmada 3D yazıcı ile üretilen düşük karbonlu çelik ve paslanmaz çelik malzeme ile yapılan yapısal numunelerde(Şekilde 8'deki) geleneksel yöntemle üretilen numunelere yakın dayanımda davranış gösterdiği görülmüştür. Aynı zamanda 3D yazıcı kullanılarak yapısal malzemenin haricinde yapı malzemesi de üretilebilmektedir. Örnek vermek gerekirse Londra'da bulunan 6 Bevis Marks binasında teras kısmında, çatı

kanopisinde(Şekil 9) kullanılmak üzere tasarlanan bağlantı bileşeni, 3D yazıcı teknoloji ile üretilmiştir.

Resim 9 3D Yazıcı Teknolojisiyle Üretilmiş Çatı Kanopisi Bağlantı Elemanları



(Leonardo, 2018)

3D yazıcı teknolojisi temel üretiminde yaygın olarak kullanılmamakla birlikte, çelik yapı gibi farklı yapı sistemlerinde kullanılan betonarme temellerin 3D yazıcı teknolojisiyle üretilebildiği örnekler mevcuttur. 3D yazıcı teknolojisiyle kolon üretiminde, kolonun kalıp görevini üstlenen katmanlar halinde basılan yapılar kullanılmaktadır. Kalıcı beton kolon kalıpları, 3D yazıcı teknolojisiyle üretim yöntemiyle bütün olarak ya da parçalar halinde üretilebilmektedir. Bu yöntemle, Shimizu'nun Toyosu 6-Chome projesinde, 4,2 metre yüksekliğindeki dört kolonun üretimini başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Resim 10 3D Yazıcı Teknolojisiyle Taç Yaprağı Şeklinde Kolon





(Uygunoğlu vd, 2019)

3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapılarda, kapı ve pencere doğramalarının 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen örnekler sınırlı sayıda olup, genellikle projenin türüne ve kullanıcı tercihine bağlı olarak geleneksel yöntemlerle üretilen Polyvinyl Chloride (PVC), ahşap veya alüminyum doğramalar kullanılmaktadır. Bu sistemde, kapı ve pencere boşlukları, üretim sürecinin bir parçası olarak önceden planlanmakta ve yazıcının çalışma sırasında bırakacağı boşluklar destek elemanları yardımıyla oluşturulmaktadır(Uygunoğlu vd, 2019).

Resim 11 Dubai'de Üretilen Bir Ofis Yapısının İnşası



(Uygunoğlu vd, 2019)

Üç boyutlu yazıcı teknolojisiyle üretilen yapılar, bireysel konutlardan toplu barınma projelerine, ticari ve kamu binalarına kadar uzanan yenilikçi ve sürdürülebilir tasarımları içermektedir. 3D yazıcı teknolojisinin konaklama ihtiyacına yönelik sunduğu çözümler ilk olarak bilimsel çalışmalar vesilesiyle başlamıştır. Bu alandaki çalışamlardan ilki NASA tarafından yürütülen bir çalışmadır. Güney Kaliforniya Üniversitesi'nden Dr. Behrokh Khoshnevis, geliştirdiği yenilikçi teknolojilerle, kısa sürede mimari yapıların yazdırılmasını mümkün hale getirerek bu sürece önemli katkılar sağlamış ve NASA'nın yapı üretiminde 3D yazıcı kullanımına yönelik ilk adımlarına zemin hazırlamıştır(Çalışkan ve Arpacıoğlu, 2020).

İlk kalıcı şekilde konaklanabilecek yapı çalışmaları, 2015 yılında WinSun firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Firma, Çin'in Suzhou şehrinde 24 saat içinde 10 adet villa inşa etmiş ve devasa boyutlarda, 6,6 metre yüksekliğinde, 10 metre genişliğinde ve 32 metre uzunluğundaki bir 3D yazıcı kullanarak prefabrik yapı elemanlarını katmanlar halinde basmıştır. Yapı malzemesi olarak ise geri dönüştürülmüş malzemeler özel betonu ile karıştırılarak kullanılmıştır(http://www.yhbm.com/En/News/news_inner/id/588)

Resim 12 Winsun Firması Tarafından 3D Yazıcı İle Üretilmiş Villa





(http://www.yhbm.com/En/News/news_inner/id/588)

Otomotiv alanında ise 3D yazıcı teknolojisi birçok aşamada kullanılmaktadır. Özellikle tasarım aşamalarında prototip üretiminde parçaların ilk modelleri 3D yazıcılar ile kullanılmaktadır. Fakat yine de bazı otomobil üreticileri deneyselde olsa 3D yazıcı ile araç üretme girişimlerinde bulunmuşlardır. Örneğin Honda firması CEATEC 2016 fuarı kapsamında mikro elektikli araç kategorisinde olan bir araç üretmiştir.

Resim 13 Honda Firması Tarafından 3D Yazıcı İle Üretilmiş Elektrikli Araç



(https://www.log.com.tr/hondadan-3d-yazici-ile-uretilen-elektrikli-otomobil/)

Gıda sektörüde 3D yazıcıların kullanıldığı bir diğer önemli sektörlerdendir. 3D yazıcılar ile müşteri kitlesine veya taleplerine göre gıda üretilebilmektedir. Şekerleme ve tatlıdan, unlu mamüllere makarnalara varana kadar birçok gıda ürününde 3D yazıcılar kullanılmaktadır. Bu şekilde gıda israfının önüne geçilebilmektedir(Aydın vd., 2019). Endüstriyel tasarımcı Dinara Kasko eklemeli üretim yöntemi ile bilgisayarda tasarladığı tatlıları üretebilmiştir. Bu yöntemle her tatlıyı aynı kalitede ve tasarımda üretebilmektedir. Aynı zamanda bu tatlıların kalıplarını online olarak satarak kendi için gelirde elde edebilmektedir(Anonim, 2016).

Resim 14 Gıda Ürünlerinin Kalıplarının 3D Yazıcılar İle Basılması



(Erener ve Boz, 2021)

Resim 15 Pasta Kalıplarının 3D Yazıcılar İle Basılması



(Erener ve Boz, 2021)

3D yazıcı teknolojisinin kullanıldığı bir diğer alanda sağlık sektöründür. Özellikle cerrahi uygulamalarda, protez yapımında yada cerrahi eğitimlerde kullanmak için 3D yazıcılar aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Her hastanın kendisine ait dijital görüntüleri ile oldukça kısa sürede hastayı özel olarak protez, implant vb. parçalar üretilebilmektedir(Emre vd, 2015).

Resim 16 Dental İmplant Üretimi



(Anonim, 2021)

Resim 17 Protez Üretimi



(https://www.3dnatives.com/en/best-3d-printed-implants-230720195/)

Halihazırda, cerrrai eğitimlerde de 3D teknolojisinden faydalalanılmaktadır. Bu kapsamda bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları ile çeşitli organ ve sistemlerin 3D modelleri üretilerek eğitimlerde kullanılmaktadır.

Resim 18 3D Yazıcıda Üretilmiş Cerrahpaşa Tıp Fakültesinde Eğitim İçin Kullanan Eğitim Modelleri

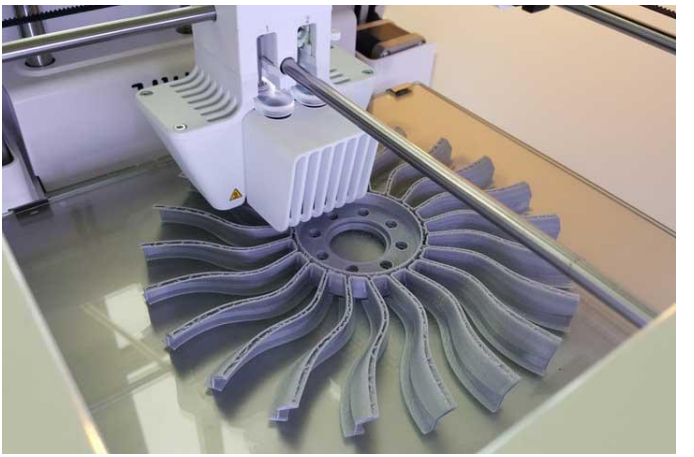


(Emre vd, 2015)

3D yazıcı teknolojisinin kullanıldığı bir diğer önemli alan ise imalat sektörüdür. 3D yazıcı ile metal parça üretimi, geleneksel üretim yöntemlerine alternatif bir seçenek olarak karşımıza çıkan bu yöntemle özellikle karmaşık malzemelerin üretiminde büyük avantajlar elde edilmektedir. Bu yöntemle, metal tozları ya da tel

formundaki metaller lazer, elektron ışını veya bağlayıcı maddeler yardımıyla katman katman eritilerek veya birleştirilerek nihai parça elde edilir. Titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum gibi alaşımlar sıklıkla kullanılırken; üretim sürecinde malzeme israfının minimum düzeye inmesi ve parça başına üretim süresinin azalması, bu teknolojiyi özellikle havacılık, savunma, otomotiv ve medikal sektörlerinde cazip hale getirmiştir.

Resim 19 3D Yazıcıda Üretilmiş Uçak Motoru Parçası



(https://www.researchdive.com/blog/Aerospace-3D-Printing)

SONUÇ

Endüstri 4.0'ın hayatımıza girmesiyle üretim alanında birçok yeni enstrümanla da tanışmış olduk. Bunun bir sonucu olan yeni enstrümanlardan birisi de 3D yazıcılardır. 1980 yıllardan beri 3D

yazıcıların hem teknolojilerini hemde 3D yazıcılarla yapılabileceklere yönelik olarak birçok geliştirme yapılmıştır ve hala da yapılmaya devam etmektedir. Özellikle günümüzde 3D yazıcılarla havacılık gibi yüksek hassasiyet değerlerine sahip olan parçaların üretilmesi bunun bir göstergesidir. Bir diğer önemli gelişme ise 3D yazıcılarla birçok farklı sektörde geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak ürün üretilmesidir. Otomotivden, gıdaya, inşaat ve mimariden cerrahiye kadar birçok farklı sektörde 3D yazıcılar kullanılmaktadır. Bazı sektörlerde henüz deneme aşamasında olsada inşaat sektörü gibi bazı sektörlerde de aktif bir şekilde kullanılmaktadır tıpkı havacılık gibi. Günümüzde firmalar arası rekabetin arttığı ve daha çevreci üretim yöntemlerine yönelik olarak firmaların yönlendirilmesinden dolayı firmaların 3D yazıcı ve eklemeli imalat yöntemine olan ilgisi artmaktadır. Bunun bir sonucu olarakta eklemeli imalat teknolojisinin hem kullanım alanlarında hem de baskı kalitesinde arttış olacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

Anonim, 2016. “Mimar Pastası”, Arkitera, https://www.arkitera.com/haber/mimar-pastasi/ Erişim Tarihi:21.02.2021

Anonim, 2021. “Dental Master Models for Restoratıon: Prosthetıcs and Implants”, https://www.prodways.com/en/industrial_segment/dental/dental-models-for-prosthetics-and-implants/ Erişim Tarihi: 26.02.2021

Aydın H.Y., Kılıç A., Tekin A.R., 2019. “Geleneksel Türk Gıdalarının 3B Yazıcı ile Yazdırılması”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 3(1), 1-10

Cruz P., Knaack U., Figueiredo B., de Witte D., (2017), “Ceramic 3D printing: the future of brick architecture”, International

Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2-10, Hamburg, Almanya, 07-08, Temmuz.

Çalışkan C. İ., Arpacıoğlu Ü., (2020), "Yapı üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi", Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(2), 1117-1136.

Diksu S. , "Eklemeli imalat teknolojisi eriyik biriktirme modelleme yöntemi için kompozit abs filament üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2021

Erener Ş., Boz S., 2021. "Modern Üretim Tekniklerinde Eklemeli İmalat Sistemlerinin Yeri ve Kullanım Alanları", TJFDM, 2021, 3 (1): 47-56

İ. Çelik, F. Karakoç, M. C. Çakır, A. Duysak, "Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları", Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 31, 53-70, 2013.

Özenir ve Nakıboğlu, 2019. Özenir İ., Nakıboğlu G., 2019. "Sürdürülebilir Üretimde Endüstri 4.0'ın Yeri", BMIJ, 2019, 7(5): 2248-2281

Özsoylu, 2017 --"Endüstri 4.0", Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi", 21(1), 41 64

Leonard W. J., (2018), "Case study on 3D printing implementation strategies", Öğrenci Projesi, California Polytechnic State University

Şenol Emre, Musa Batuhan Yolcu, Sinan Celayir. (2015). Üç boyutlu yazıcılar ve çocuk cerrahisi (Vol. 29). Vol. 29. Çocuk Cerrahisi Dergisi.

Takva, ÇAĞATAY And İlerisoy, ZEYNEP Y. . "THE ROLE OF 3D PRINTING TECHNOLOGY IN THE INDUSTRY 4.0 REVOLUTION: DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF

SUSTAINABILITY." 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CITIES AND URBAN LANDSCAPES (ICSULA 2024) , Girne, Cyprus (Kktc), pp.388-411, 2024

Uygunoğlu T., Barlas Özgüven S., Topçu İ. B., ve İ. B. Topçu, (2019), "3D teknolojisi ile üretilen yapı malzemeleri ve özellikleri", International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 3(3), 279-288.

https://eklemeliimalat.net/eklemeli-imalat-teknolojileri-nelerdir/

https://kdmfab.com/tr/elektron-isini-erimesi/

http://www.yhbm.com/En/News/news_inner/id/588

https://www.log.com.tr/hondadan-3d-yazici-ile-uretilen-elektrikli-otomobil/

https://www.3dnatives.com/en/best-3d-printed-implants-230720195/

https://3dgence.com/3dnews/3d-printing-aircraft/

https://www.researchdive.com/blog/Aerospace-3D-Printing

CHAPTER 3

EFFECT OF BULLET TYPES ON BALLISTIC BEHAVIOR OF UHMWPE COMPOSITE PLATES

AHMET MURAT AŞAN[1]

Introduction

The growing need for materials that combine high performance with low weight has broadened the use of fiber-reinforced composites across various industries. Among these advanced fibers, Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) stands out due to its notable attributes, including exceptional damage resistance, excellent abrasion durability, low sensitivity to moisture, and efficient absorption of impact energy (Abtew et al., 2019; Hearle, 2001; Virtue, 2024). With a density of 0.97 g/cm³ and a tensile strength approximately 40% greater than that of aramid fibers (Virtue, 2024), UHMWPE offers considerable benefits for lightweight ballistic applications. Compared to other high-performance reinforcements such as aramid, carbon, and glass fibers, UHMWPE's mechanical and physical characteristics make it particularly advantageous for use in protective composite systems (Abtew et al., 2019; Bajya et al., 2021). When embedded in a

[1] Dr, Dicle Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-9174-7585

polymer matrix, UHMWPE composites have demonstrated superior resistance to ballistic threats, even at reduced areal weights, outperforming high-strength steels (Li et al., 2018), glass fibers (Barros et al., 2023), and Kevlar (Reddy et al., 2017). Numerous studies have explored the impact and ballistic behavior of UHMWPE-based materials (Abtew et al., 2019; Cunniff, 1999; Phoenix & Porwal, 2003). For example, Hu et al. (2022) conducted experimental and numerical evaluations on the ballistic response of UHMWPE composites; Wang et al. (2021) studied the impact performance of UHMWPE fabrics, and Tan & Khoo (2005) analyzed how varying bullet geometries influence performance. Additionally, Zhu et al. (2018) investigated the effect of conical-nosed projectiles, while Karthikeyan et al. (2013) focused on the influence of shear strength in ballistic responses. Studies by Ma et al. (2023) examined ceramic-reinforced UHMWPE systems, and Peng et al. (2024) developed numerical models for hybrid laminated structures. In the present study, a numerical investigation was conducted to assess how different bullet types influence the ballistic response of UHMWPE composite plates.

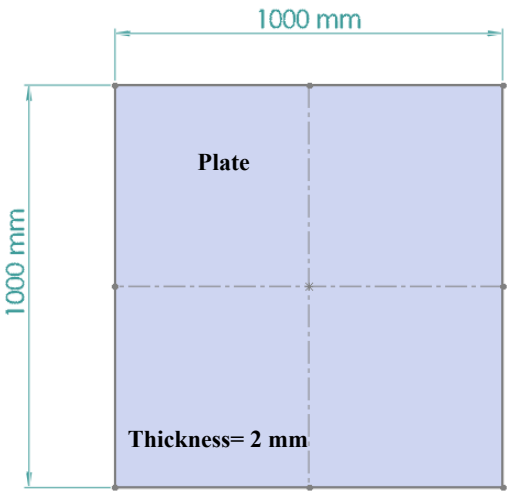
Material and Method

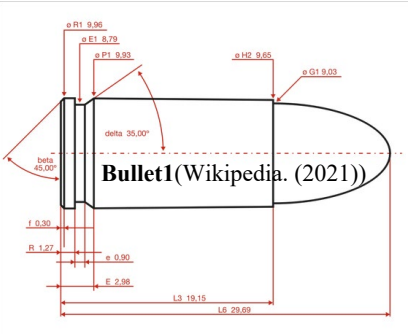
Within the scope of the numerical study, experimental elements with dimensions shown in Figure 1 have been designed. UHMWPE composite was used as the plate material. The dimensions of Bullet 1 were taken from the literature, and the dimensions of Bullet 2 were resized using (Wikipedia, 2025) to obtain a different bullet design. The material of the projectiles used as the striker(bullet) is steel. The mechanical properties of the materials used are given in Table 1. In Table 1, E_x, E_y, and E_z represent the elasticity modules in the x, y and z directions; ν_{xy} represents the Poisson ratio for the $x-y$ plane; ν_{yz} represents the Poisson ratio for the $y-z$ plane; ν_{xz} represents the Poisson ratio for

the $x-z$ plane; G_{xy} represents the shear module in the $x-y$ plane; G_{yz} represents the shear module in the $y-z$ plane; G_{xz} represents the shear module in the $x-z$. The finite element model of the designed test specimens, the boundary conditions applied to the model, and the number of elements and nodes in this model are provided in Table 2. As a boundary condition, the plate is fixed at all four edges. The bullets are rigid, while the plate is flexible.

Table 1. Mechanical properties of materials (Sun et al., 2025; Virtue, T. 2024, ANSYS, 2025)

Material	E_x(MPa)	E_y(MPa)	E_z(MPa)	v_{xy}	v_{yz}	v_{xz}	G_{xy}(MPa)	G_{yz}(MPa)	G_{zx}(MPa)	Density(kg/mm^3)
UHMWPE composite	34257	34257	3260	0	0.013	0.013	173.8	547.8	547.8	970
Structural Steel	200000	-	-	0.3	-	-	-	-	-	7.85 x10^{-6}





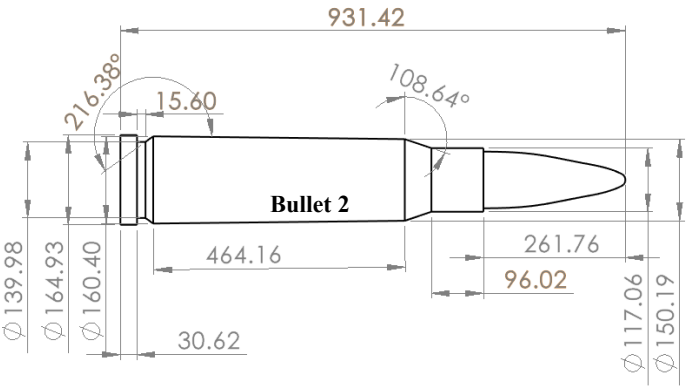
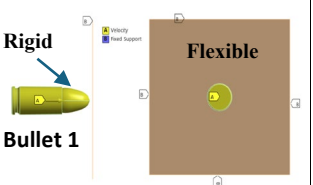
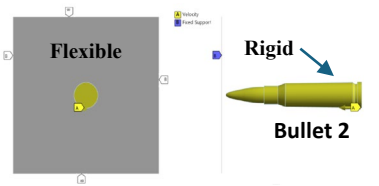
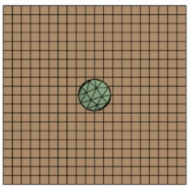
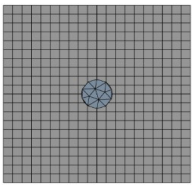


Figure 1. Dimensions of designed plate and bullets

Table 2. Finite element model of the designed plate and bullets, boundary conditions applied to them, number of elements, and number of nodes belonging to them

Finite Element Model with Boundary Conditions		

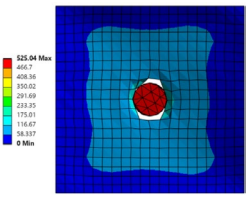
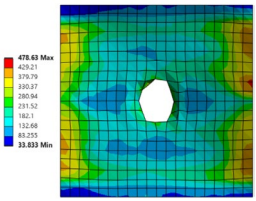
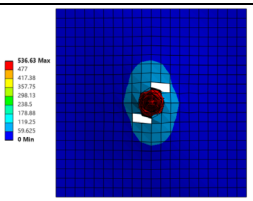
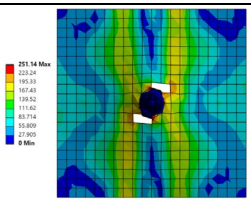
		
Number of Elements	1490	1476
Number of Nodes	1193	1197

Results and Discussion

The deformation and stress results obtained from the ballistic test applied to the plate using two different bullets are presented in Table 3. According to Table 3, the deformation and stress distributions created by different bullet types on the sample show significant differences. The Bullet 1 projectile caused a high deformation of 525.04 mm while also resulting in the highest stress value of 478.63 MPa. This indicates that Bullet 1 causes a more severe structural strain on the sample compared to Bullet 2. On the other hand, although the Bullet 2 projectile creates a higher deformation of 536.63 mm, the maximum stress value it generates is only 251.14 MPa. This situation indicates that Bullet 2 creates a deformation area with a wider but lower stress level due to its softer impact, thereby leaving a more spread-out but less intense stress effect on the sample. As a result, while Bullet 1 has a more brittle,

piercing effect, Bullet 2 exhibits a deformation character that is more elastic or energy-absorbing.

Table 3. Deformation and stress results of the sample according to the bullet type

Bullet Type	Deformation(mm)	Stress(MPa)
Bullet 1		
Bullet 2		

Conclusions

In this study, the effect of different bullet types on the ballistic behavior of the UHMWPE composite plate was numerically examined using the finite element method. The obtained results show that the type of bullet has a decisive effect on the deformation and stress distributions on the sample. According to the analysis results, the Bullet 1 type bullet has created a more piercing and brittle effect on the sample by generating high stress (478.63 MPa) and significant deformation (525.04 mm). In contrast, the Bullet 2 type bullet, despite causing a larger deformation (536.63 mm), has a relatively lower stress level (251.14 MPa). This situation indicates

that Bullet 2 creates an impact effect that spreads over a wider area and possesses energy-absorbing properties. As a result, it is observed that the bullet geometry and impact character directly affect the ballistic performance of UHMWPE composites. While the Bullet 1 type bullet created a more localized and high-stress deformation area, the Bullet 2 type bullet exhibited a wider but low-stress deformation profile. This difference highlights the necessity of considering bullet geometry in ballistic armor designs based on the type of threat.

References

Abtew, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C., & Cristian, I. (2019). Ballistic impact mechanisms–A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Composite Structures, 223*, 110966. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110966

Hearle, J. W. (2001). *High-performance fibres*. Elsevier.

Virtue, T. (2024). *UHMWPE thread*. Retrieved May 13, 2024, from https://www.virtuetextile.com/

Bajya, M., Majumdar, A., Butola, B. S., Arora, S., & Bhattacharjee, D. (2021). Ballistic performance and failure modes of woven and unidirectional fabric based soft armour panels. *Composite Structures, 255*, 112941. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112941

Cunniff, P. M. (1999). Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems. In *Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics* (Vol. 2, pp. 1303–1310). Technomic Publishing Co. Inc.

Phoenix, S. L., & Porwal, P. K. (2003). A new membrane model for the ballistic impact response and V50 performance of multi-ply

fibrous systems. *International Journal of Solids and Structures, 40*(24), 6723–6765.

Li, X., Zhang, X., Guo, Y., Shim, V., Yang, J., & Chai, G. B. (2018). Influence of fiber type on the impact response of titanium-based fiber-metal laminates. *International Journal of Impact Engineering, 114*, 32–42.

Karthikeyan, K., Russell, B. P., Fleck, N. A., & Wadley, H. N. G., & Deshpande, V. S. (2013). The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates. *European Journal of Mechanics - A/Solids, 42*, 35–53. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2013.04.002

Karthikeyan, K., Russell, B., Fleck, N., O'Masta, M., Wadley, H., & Deshpande, V. (2013). The soft impact response of composite laminate beams. *International Journal of Impact Engineering, 60*, 24–36.

Barros, D., Mota, C., Bessa, J., Cunha, F., Rosa, P., & Fangueiro, R. (2023). Blast fragment impact of angle-ply composite structures for buildings wall protection. *Buildings, 13*(8). https://doi.org/10.3390/buildings13081959

Reddy, T. S., Reddy, P. R. S., & Madhu, V. (2017). Response of E-glass/epoxy and Dyneema® composite laminates subjected to low and high velocity impact. *Procedia Engineering, 173*, 278–285. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.014

Carr, D. (1999). Failure mechanisms of yarns subjected to ballistic impact. *Journal of Materials Science Letters, 18*(7), 585–588.

Hu, P., Yang, H., Zhang, P., Wang, W., Liu, J., & Cheng, Y. (2022). Experimental and numerical investigations into the ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene fiber-

reinforced laminates. *Composite Structures, 290*, 115499. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115499

Wang, H., Weerasinghe, D., Mohotti, D., Hazell, P. J., Shim, V., Shankar, K., & Morozov, E. V. (2021). On the impact response of UHMWPE woven fabrics: Experiments and simulations. *International Journal of Mechanical Sciences, 204*, 106574. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106574

Tan, V. B. C., & Khoo, K. J. L. (2005). Perforation of flexible laminates by projectiles of different geometry. *International Journal of Impact Engineering, 31*(7), 793–810.

Zhu, W., Huang, G.-Y., Feng, S.-S., & Stronge, W. J. (2018). Conical nosed projectile perforation of polyethylene reinforced cross-ply laminates: Effect of fiber lateral displacement. *International Journal of Impact Engineering, 118*, 39–49.

Ma, Y., Wang, J., Zhao, G., & Liu, Y. (2023). New insights into the damage assessment and energy dissipation weight mechanisms of ceramic/fiber laminated composites under ballistic impact. *Ceramics International, 49*(13), 21966–21977. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.021

Peng, L., Zhou, J., Wang, Q., Zhang, X., & Guan, Z. (2024). Numerical modelling of the ballistic impact response of hybrid composite structures. *Composites Part C: Open Access, 14*, 100474. https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100474

Sun, Q., Lin, J., Gai, Y., & Li, Y. (2025). Ballistic performance of the UHMWPE fiber-reinforced composite helmet: Experiments and numerical simulations. *Thin-Walled Structures, 210*, 113037. https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113037

Virtue, T. (2024). *UHMWPE thread*. Retrieved May 19, 2025, from https://www.virtuetextile.com/

ANSYS. (2025). *GRANTA Materials Data for Simulation (Sample)*. Retrieved May 19, 2025, from https://www.ansys.com/products/materials

Wikipedia. (2021). *9x19mm Parabellum*. Retrieved December 2, 2021, from https://tr.wikipedia.org/wiki/9x19mm_Parabellum

Wikipedia contributors. (2025). 7.62×51mm NATO. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/7.62%C3%9751mm_NATO

CHAPTER 4

Approximate Solution of Double Sine–Gordon Equation Using Multiple Scales Lindstedt Poincare Method

M. M. Fatih KARAHAN[1]

Introduction

Nonlinear field equations play a central role in many areas of mathematical physics, where they often emerge as effective models describing a wide range of physical phenomena, from condensed matter systems to cosmological models. Among these, the sine-Gordon (SG) equation and its generalizations have attracted significant attention due to their integrability, soliton solutions, and rich mathematical structures. One particularly intriguing generalization is the Double Sine-Gordon (DSG) Equation, which introduces an additional periodic potential term, enhancing the complexity of the model while preserving key analytical features.

The DSGE is typically written as:

[1] Associate Professor, Manisa Celal Bayar University, Department of Mechanical Engineering, fatih.karahan@cbu.edu.tr, Orcid: 0000-0001-9040-5041

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \alpha \sin u + \beta \sin 2u = 0$$

where u(x,t) is a scalar field and α, β are real parameters. This equation extends the well-known sine-Gordon (SG) equation by including a second harmonic term, resulting in richer dynamical behavior, including multikink structures, resonance effects, and internal mode excitations. When β = 0, the equation reduces to the standard SG equation, known for its solitonic (kink and antikink) solutions and integrability properties (Ablowitz & Segur, 1981). The introduction of the second sine term, however, renders the DSG Equation non-integrable for general β, resulting in a richer solution space that includes multi-kink configurations, breathers, and chaotic behavior under perturbations (Kawamoto & Ohta, 1983; Takeno & Homma, 1983).

Historically, the DSG Equation first appeared in studies of commensurate-incommensurate phase transitions in one-dimensional systems (Currie et al., 1977), and has since found applications in diverse areas such as condensed matter physics (e.g., charge-density waves and spin chains), Josephson junctions (Ustinov, 1998), and quantum field theory. In particular, the equation has been used to model the interaction of magnetic flux quanta in layered superconductors, where the presence of multiple harmonics arises naturally due to non-sinusoidal current-phase relations (Kivshar & Malomed, 1989).

Mathematical studies have examined the existence and stability of DSGE solutions using both analytical and numerical methods. The variational approach has been widely employed to construct approximate solutions (Malomed, 1987), while numerical simulations have uncovered a rich tapestry of dynamic phenomena, including kink-antikink collisions, resonance windows, and fractal scattering structures (Campbell et al., 1986; Peyrard & Kruskal,

1984). Furthermore, the spectral properties of the linearized DSGE operator reveal interesting bifurcation behavior as β is varied, affecting the nature of solitary wave stability (Bishop et al., 1980). For more details, one can see (Akinyemi et al., 2021; Akbar et al., 2021; Yao et al., 2022; Rehman et al., 2022; Rezazadeh et al., 2023)

As a nonlinear oscillatory model, the DSG equation has been a focal point of sustained research. Several classical and modern techniques have been deployed to address its complexities. Among these are the Lindstedt–Poincaré method, the Krylov–Bogoliubov–Mitropolsky (KBM) approach, and the harmonic balance (HB) technique (Nayfeh & Mook, 1979; Hagedorn, 1988; Mickens, 1996). More recent contributions include the modified Lindstedt–Poincaré method (Cheung et al., 1991; Chen & Cheung, 1997) and the homotopy analysis method (Liao & Chwang, 1998) , both aimed at improving the accuracy of oscillation period approximations for systems exhibiting large amplitude behavior. Despite their widespread usage, conventional perturbative methods remain limited by their reliance on small parameters, thereby constraining their applicability to problems where such parameters are either absent or yield approximations valid over a narrow range.

Given that the DSG equation often incorporates both small and large parameter regimes, standard perturbation techniques prove inadequate. To overcome this limitation, the present work introduces Multiple Scales Lindstedt Poincare Method (MSLP) (Pakdemirli et al., 2009; Pakdemirli & Karahan, 2010; Pakdemirli et al.,2011; Karahan &Pakdemirli, 2017a, Karahan &Pakdemirli, 2017b, Karahan, 2017). The classical Method of Multiple Scales is enhanced through the integration of a time reparameterization technique characteristic of the Lindstedt–Poincaré method. While the Method of Multiple Scales offers a key advantage in capturing transient dynamics—an aspect where the traditional Lindstedt–Poincaré approach falls short—it is also recognized that by

expanding the natural frequency appropriately, as demonstrated in prior works (Hu & Xiong, 2004; Hu, 2004a; Hu, 2004b), the Lindstedt–Poincaré method can yield convergent solutions even for systems with large parameters. The synthesis of these two approaches aims to leverage the strengths of each: retaining the capability to resolve transient behaviors while improving convergence characteristics.

In this study, the MSLP method is employed to obtain approximate analytical solutions to the double Sine–Gordon equation. These solutions are then systematically compared against corresponding numerical results. The comparative analysis reveals that the MSLP approach provides high-fidelity approximations that are in good agreement with numerical solutions across both weakly and strongly nonlinear systems.

Double Sine-Gordon Equation

Let us examine the system described by the double sine-Gordon equation

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \alpha \sin u + \beta \sin 2u = 0 \tag{1}$$

Let α and β denote arbitrary positive constants. In the analysis of the periodic wavetrain, it is postulated that

$$z = z(\tau) \tag{2}$$

and

$$\tau = \mathrm{kx} - \omega \mathrm{t} \tag{3}$$

In this context, *z, τ, k, x, ω*, and *t* denote, respectively, the periodic wave train, the independent parameter, the wave number,

the spatial coordinate, the angular frequency, and the temporal coordinate.

By substituting Eqs. (2) and (3) into Eq. (1), the governing equation transforms into the following nonlinear second-order differential equation:

$$\Omega^2 \ddot{z} + \omega_0^2 z - \lambda z^3 = 0 \tag{4}$$

where

$$\Omega^2 = \omega^2 - k^2 \tag{5}$$

$$\omega_0^2 = \alpha + 2\beta \tag{6}$$

$$\lambda = \frac{\alpha + 8\beta}{6} \tag{7}$$

The notation $\ddot{z}$ represents the second derivative of z with respect to the independent variable τ.

To address this nonlinear problem, we implement the Multiple Scales Lindstedt–Poincaré (MSLP) perturbation technique and compare the resultant approximate solution with numerical simulations for validation.

Let us introduce the substitution $z = \sqrt{\varepsilon} u$, where ε denotes a perturbation parameter. By substituting this expression into the governing equation and subsequently dividing through by ε, the following form is obtained:

$$\Omega^2 \ddot{u} + \omega_0^2 u - \varepsilon \lambda u^3 = 0 \tag{8}$$

This formulation illustrates that the presence of a perturbation parameter ε can be imposed artificially when it is not naturally inherent in the original problem. The associated initial conditions are specified as:

$$u(0) = a_0 \quad \dot{u}(0) = 0 \tag{9}$$

To facilitate the method, we define multiple temporal scales:

$$T_0 = \tau \quad T_1 = \varepsilon\tau \quad T_2 = \varepsilon^2\tau \tag{10}$$

The chain rule expansion for the time derivatives becomes:

$$\frac{d}{d\tau} = D_0 + \varepsilon D_1 + \varepsilon^2 D_2 + \ldots \tag{11}$$

$$\frac{d^2}{d\tau^2} = {D_0}^2 + 2\varepsilon D_0 D_1 + \varepsilon^2\left({D_1}^2 + 2\varepsilon D_0 D_2\right) + \ldots \tag{12}$$

We expand the solution and the dispersion relation in powers of ε as:

$$u = u_0(T_0, T_1, T_2) + \varepsilon u_1(T_0, T_1, T_2) + \varepsilon^2 u_2(T_0, T_1, T_2) + \ldots \tag{13}$$

$$\omega_0^2 = \Omega^2 - \varepsilon\omega_1 - \varepsilon^2\omega_2 \tag{14}$$

Substituting these into the governing equation and applying the initial conditions, we isolate terms by order of ε:

$$O(1): \Omega^2({D_0}^2 u_0 + u_0) = 0, \qquad u_0(0) = a_0, \quad D_0 u_0(0) = 0 \tag{15}$$

$$O(\varepsilon): \Omega^2\left({D_0}^2 u_1 + u_1\right) = -2\Omega^2 D_0 D_1 u_0 + \omega_1 u_0 + \lambda u_0^3$$
$$u_1(0) = 0, (D_0 u_1 + D_1 u_0)(0) = 0 \tag{16}$$

$$O(\varepsilon^2): \Omega^2\left({D_0}^2 u_2 + u_2\right) = -2\Omega^2 D_0 D_1 u_1 - \Omega^2\left({D_1}^2 + 2D_0 D_2\right)u_0 +$$
$$\omega_1 u_1 + \omega_2 u_0 + 3\lambda {u_0}^2 u_1 \tag{17}$$

The leading-order solution is found as:

$$u_0 = A(T_1, T_2)e^{iT_0} + cc \tag{18}$$

where

$$A = \frac{1}{2}ae^{i\theta} \tag{19}$$

For real amplitude and the phase, the solutions is as follows

$$u_0 = a(T_1, T_2)\, cos\big(T_0 + \theta(T_1, T_2)\big) \tag{20}$$

Enforcing the initial conditions gives:

$$a(0) = a_0 \qquad \theta(0) = 0 \tag{21}$$

Substituting u_0 into Eq. (16) and eliminating secular terms leads to:

$$-2i\Omega^2 D_1 A + A\omega_1 + 3\lambda A^2 \overline{A} = 0 \tag{22}$$

In line with the analysis presented by Pakdemirli et al. (2009), the condition $D_1 A = 0$ is imposed, ensuring that the first frequency correction ω_1 remains real, thereby yielding physically meaningful solutions.

Consequently, $a = a(T_2)$, $\beta = \beta(T_2)$ and:

$$\omega_1 = -3\lambda A\overline{A} = -\frac{3}{4}\lambda a^2 \tag{23}$$

The first-order correction u_1 is then:

$$u_1 = Be^{iT_0} - \frac{\lambda}{8\Omega^2} A^3 e^{3iT_0} + cc$$

$$= b\, cos(T_0 + \gamma) - \frac{\lambda a^3}{32\Omega^2} cos(3T_0 + 3\theta) \tag{24}$$

where

$$B = \frac{1}{2} be^{i\gamma} \tag{25}$$

Applying the initial conditions to this order provides:

$$b(0) = \frac{\lambda {a_0}^3}{32\Omega^2} \qquad \gamma(0) = 0 \tag{26}$$

At second-order, substitution of u_0 and u_1 into Eq. (17) and removal of secular terms yields:

$$-2i\Omega^2 D_2 A - 3\lambda A\bar{A}B + \omega_2 A + 3\lambda A^2 \bar{B} + 6\lambda A\bar{A}B - \frac{3\lambda^2}{8\Omega^2} A^3 \overline{A}^2 = 0 \tag{27}$$

By selecting $D_2A = 0$, which guarantees that ω_2 remains real, further simplifications lead to:

$$a = a_0, \quad b(0) = \frac{\lambda {a_0}^3}{32\Omega^2}, \qquad \beta = \gamma = 0, \quad \omega_2 = -\frac{3\lambda^2 {a_0}^4}{128\Omega^2} \tag{28}$$

Thus, the asymptotic dispersion relation corresponding to the DSG equation is

$$\Omega^2 = \omega_0^2 - \varepsilon\frac{3}{4}\lambda {a_0}^2 - \varepsilon^2\frac{3\lambda^2}{128\Omega^2}{a_0}^4 \tag{29}$$

Solving for Ω in closed form gives:

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\omega_0^2 - \frac{3}{4}\varepsilon\lambda {a_0}^2\right) + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{3}{4}\varepsilon\lambda {a_0}^2 - \omega_0^2\right)^2 - \frac{12}{128}\varepsilon^2\lambda^2 {a_0}^4}} \tag{30}$$

Comparison with Numerical Results

This section presents a comparison between the analytically derived dispersion relation (Eq. 30) and exact numerical results (Ω_e) for periodic wave propagation in DSG equation.

Table 1. *Comparison of Approximate Dispersion Relations with the Exact Solution for* $\alpha = 1, \ \beta = 1$

a_0	Ω	Ω_e
$\frac{\pi}{18}$	1.72212	1.72217
$\frac{\pi}{9}$	1.69194	1.69269
$\frac{\pi}{6}$	1.64015	1.64406

Table 1 presents a comparison between analytical and numerical results for varying initial amplitude values, considering weakly nonlinear system parameters with $\alpha = 1$ and $\beta = 1$. The results show excellent agreement between the two approaches

Table 2. *Comparison of Approximate Dispersion Relations with the Exact Solution for* $\alpha = 10,\ \beta = 50$

a_0	Ω	Ω_e
$\frac{\pi}{18}$	10.4134	10.41373
$\frac{\pi}{9}$	10.1853	10.19136
$\frac{\pi}{6}$	9.791	9.82303

Table 2 presents a comparative analysis of analytical and numerical results corresponding to variations in the initial amplitude, under conditions characterized by strong nonlinearity with parameter values α = 10 and β = 50. The comparison reveals an excellent concordance between the two sets of results

Table 3. *Comparison of Approximate Dispersion Relations with the Exact Solution for* $\alpha = 10,\ \beta = 100$

a_0	Ω	Ω_e
$\frac{\pi}{18}$	14.3845	14.38504
$\frac{\pi}{9}$	14.0581	14.06694
$\frac{\pi}{6}$	13.4932	13.53953

Table 3 presents a comparative analysis of the outcomes derived under conditions of strong nonlinearity, characterized by the parameter values α=10 and β=100. The approximate analytical solution obtained via the MSLP method demonstrates a strong concordance with the corresponding numerical results, indicating the method's reliability in capturing the system's strong nonlinear behavior.

Concluding Remarks

The MSLP technique has been successfully employed to derive an approximate analytical solution for the dispersion characteristics of DSG equation under periodic wave assumptions. The obtained

solutions demonstrate high accuracy when benchmarked against numerical simulations, even in regimes characterized by strong nonlinear effects. The method thus proves robust for analyzing nonlinear wave dynamics across various intensity scales.

References

Ablowitz, M. J., & Segur, H. (1981). Solitons and the Inverse Scattering Transform. SIAM.

Akbar MA, Akinyemi L, Yao SW, Jhangeer A, Rezazadeh H, Khater MM, (2021). Soliton solutions to the Boussinesq equation through sine-Gordon method and Kudryashov method. Results Phys; 29:104228

Akinyemi L, S¸ enol M, Iyiola OS.(2021). Exact solutions of the generalized multidimensional mathematical physics models via sub-equation method. Math Comput Simul.182:211–33.

Bishop, A. R., Campbell, D. K., & Fesser, K. (1980). Soliton excitations in nonlinear models of quasi-one-dimensional systems. Physical Review B, 22(6), 2823.

Campbell, D. K., Schonfeld, J. F., & Wingate, C. A. (1986). Resonance structure in kink-antikink interactions in φ^4 theory. Physica D: Nonlinear Phenomena, 9(1-2), 1-32.

Chen, S.H., Y.K. Cheung (1997). An elliptic Lindstedt–Poincare´ method for certain strongly non-linear oscillators, Nonlinear Dyn. 12 199–213.

Cheung, Y.K., S.H. Chen, S.L. Lau, (1991). A modified Lindstedt–Poincare´ method for certain strongly non-linear oscillators, Int. J. NonLinear Mech. 26,367–378.

Currie, J. F., Krumhansl, J. A., & Bishop, A. R. (1977). Soliton dynamics in the discrete nonlinear Schrödinger equation. Physical Review B, 16(10), 4689.

Hagedorn, P., (1988) Non-linear Oscillations, Clarendon, Oxford.

Hu, H., (2004a). A classical perturbation technique which is valid for large parameters, Journal of Sound and Vibration, 269, 409-412.

Hu, H., (2004b). A classical perturbation technique that works even when the linear part of restoring force is zero, Journal of Sound and Vibration, 271,1175-1179.

Hu, H., ve Xiong, Z. G., (2004). Comparison of two Lindstedt Poincare type perturbation methods, Journal of Sound and Vibration, 278, 437-444

Karahan, M.M.F. and Pakdemirli, M. (2017a), "Free and forced vibrations of the strongly nonlinear cubic-quintic Duffing oscillators", Z. Naturforsch., 72(1), 59-69

Karahan, M. M. F., Pakdemirli, M., (2017b). Vibration Analysis of a Beam on a Nonlinear Elastic Foundation, Structural Engineering and Mechanics, 62(2), 171-178

Karahan, M. M. F., 2017. Approximate Solutions for the Nonlinear Third-Order Ordinary Differential Equations, Zeitschrift für Naturforschung A, 72(6), 547-557.

Kawamoto, N., & Ohta, Y. (1983). Gauge theory and the double sine-Gordon equation. Nuclear Physics B, 212(3), 541–554.

Kivshar, Y. S., & Malomed, B. A. (1989). Dynamics of solitons in nearly integrable systems. Reviews of Modern Physics, 61(4), 763.

Liao, S.J., A.T. Chwang, (1998). Application of homotopy analysis method in nonlinear oscillations, J. Appl. Mech.-Trans. ASME 65 914–922.

Malomed, B. A. (1987). Variational methods in the theory of solitons. Progress in Optics, 24, 69–191.

Mickens, R.E., (1996) Oscillations in Planar Dynamic Systems, Word Scientific, Singapore,

Nayfeh, A.H., Mook, D.T., (1979) Nonlinear Oscillations, Wiley, New York

Pakdemirli M, Karahan MMF, Boyacı H. (2009). A new perturbation algorithm with better convergence properties: Multiple Scales Lindstedt–Poincare Method. Mathematical and Computational Applications; 14:31-44.

Pakdemirli, M. and Karahan, M.M.F. (2010), "A new perturbation solution for systems with strong quadratic and cubic nonlinearities", Math. Meth. Appl. Sci., 33, 704-712.

Pakdemirli, M., Karahan, M.M.F. and Boyacı, H. (2011), "Forced vibrations of strongly nonlinear systems with multiple scales Lindstedt Poincare Method", Math. Comput. Appl., **16**(4), 879- 889

Peyrard, M., & Kruskal, M. D. (1984). Kink dynamics in the highly discrete sine-Gordon system. Physica D: Nonlinear Phenomena, 14(1), 88-102.

Rehman HU, Awan AU, Habib A, Gamaoun F, Tag El Din EM, Galal AM. (2022). Solitary wave solutions for a strain wave equation in a microstructured solid. Results Phys. 39:105755

Rezazadeh Hadi , Ali Zabihi , A.G. Davodi , Reza Ansari , Hijaz Ahmad, Shao-Wen Yao, (2023). New optical solitons of

double Sine-Gordon equation using exact solutions methods, Results Phys, 49:106452

Takeno, S., & Homma, S. (1983). Stability of kinks in a generalized sine-Gordon equation. Journal of the Physical Society of Japan, 52(10), 3888–3896.

Ustinov, A. V. (1998). Solitons in Josephson junctions. Physica D: Nonlinear Phenomena, 123(1-4), 315-329.

Yao SW, Behera S, Inc M, Rezazadeh H, Virdi JPS, Mahmoud W, et al. (2022). Analytical solutions of conformable Drinfel'd–Sokolov–Wilson and Boiti Leon Pempinelli equations via sine–cosine method. Results Phys. 42:105990

CHAPTER 5

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF CO_2 LASER CUTTING PARAMETERS FOR THERMOPLASTICS USING THE ARAS METHOD

OGUZHAN DER[1]
MUHAMMED ORDU[2]
GOKHAN BASAR[3]

Introduction

Laser-cutting services are a popular manufacturing process in contemporary industries because it offers the advantage of high precision, high flexibility, almost negligible tool wear, and extremely efficient service for a vast variety of materials (Caiazzo et al., 2005). Among the different laser types, CO_2 lasers are considered the best choice to cut non-metals, with effective and clean cutting for polymers, woods, textiles, ceremics, and composites (Mushtaq et al., 2020). This is especially important for thermoplastics, which, if

[1] Assist. Prof. Dr., Bandirma Onyedi Eylul University, Faculty of Maritime, Department of Marine Engineering Orcid: 0000-0001-5679-2594
[2] Assoc. Prof. Dr., Osmaniye Korkut Ata University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering, Orcid: 0000-0003-4764-9379
[3] Assist. Prof. Dr., Osmaniye Korkut Ata University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering, Orcid: 0000-0002-9696-7579

processed using mechanical cutting methods, are prone to tool wear, thermal damage, or deformation — all of which are highly undesirable (Davim et al., 2008).

Due to the high absorption capacity of polymers with respect to the CO_2 laser wavelength of 10.6 μm, laser cutting using CO_2 lasers has gained relevance for cutting polymeric materials. Der et al. have mentioned that thermoplastics, especially polyethylene (PE) and polyvinyl chloride (PVC), find wide industrial application in packaging, construction, and automotive industries for being lightweight, durable, and recyclable(Der et al., 2023). According to Der et al., PP, PE, and PVC are well suited for flexible two-phase thermal management systems (FTP-TMS), and CO_2 laser cutting provides smooth and burr-free cutting necessary for microstructural precision in such applications. The authors studied different combinations of variables and used multi-criteria decision-making (MCDM) to find the optimal conditions as follows: power equal to 90 W and cutting speed of 15 mm/s (Der et al., 2024). Moradi et al., using polycarbonate sheets, simulated and experimentally checked the CO_2 laser cutting process by the finite element method. The results indicated increasing the laser speed and reducing laser power minimize the kerf taper and heat affected zone (HAZ), i.e., improves cut quality. They additionally found that focal plane setting greatly reduces thermal distortion and material degradation (Moradi et al., 2021). This research examines the laser cutting of carbon fiber reinforced plastics, with the study by Arshed et al. highlighting its growing importance in remanufacturing, driven by environmental regulations and material costs. Their study further showed that, whereas the laser cutting would accommodate complex geometries and makes the wear of tools irrelevant, any improper choice of parameters will cause the fibers to be damaged/delaminated and may also cause exceedingly large HAZs to occur. The authors present different strategies to reduce the thermal effect on the workpiece

surface and improve the quality of the cut, among which are the trench technique and the installation of a nozzle with double apertures (Arshed et al., 2022). Munoz et al. studied the health and safety considerations regarding the CO_2 laser cutting of poly(methyl methacrylate); they found the emissions of ultrafine particles (15–86 nm), nanoplastics, and volatile organic compounds like methyl methacrylate during and after the cutting operation. These emissions remain in the workspace for some time even after opening the laser cutter lid, thus raising concerns about occupational exposure and hence advocating for excellent fume extraction systems. After examining the above, despite all these major advantages offered by CO_2 laser cutting systems, such as high precision, contactless operation, and the ability to work with complex geometries, the thermal behaviour of polymers, including low melting temperatures and poor thermal conductivities, makes optimization in process parameters necessary (Munoz et al., 2023). Der et al. also used regression modelling and Analysis of Variance (ANOVA) to analyze laser parameters and found that laser power influenced KW the greatest while material type affected HAZ the most (Der et al., 2023). In summary, these contributions clearly demonstrate that the complex application of thermoplastics by laser cutting requires a multidisciplinary approach to include parameter optimization, emission control, and material-specific modeling strategies. Such integrated efforts can significantly increase process efficiency, environmental safety, and the functional performance of polymeric components in varied industrial applications.

The quality of laser cutting on thermoplastic materials depends largely on a variety of process parameters, chief among which are the laser power, cutting speed, and type of material involved in the cutting process (Der et al., 2024). The parameters control the amount of energy that is applied to the material, the duration of interaction between the laser beam and the workpiece,

and the resulting thermal behavior during the cutting (Davim et al., 2008). As a result, the key quality characteristics, such as surface roughness, kerf width, and the depth and extent of HAZ, react greatly to these settings (Davim et al., 2008). An improper combination of settings can ruin the workpiece, causing unwanted thermal degradation, charring, dimensional inaccuracies, and even losing the integrity of the material. To analyze such interactive effects and control them better, several statistical and computational methods have been applied by the literature (Coelho et al., 2004; Tamrin et al., 2015; Varsi & Shaikh, 2019). ANOVA is a common method to quantify the effect and statistical significance of chosen process variables considered simultaneously on two or more output responses (Chen et al., 2022). Whereas the laser cutting quality is commonly determined according to a few quality attributes combined, which likely conflict with each other-for instance, Ra and KW cannot be minimized simultaneously by the same parameter settings-the best solution should be balanced by competing objectives. In this respect, the MCDM methods can be utilized to optimize several quality parameters at once (Ordu & Der, 2023). One of these methods, the Additive Ratio Assessment (ARAS) method, is simple but powerful and ranks the alternatives by comparing the performance of an alternative with an ideal solution. The ARAS method allows combining several responses into a single decision index, thus identifying the best suitable process configuration for any condition (Zavadskas & Turskis, 2010).

The present work aims to study the influence of laser cutting parameters on the cutting performance of 4-mm-thick PP and PVC sheets using a CO_2 laser system. Laser power and cutting speed served as the input parameters, with considered values of 80 W, 90 W, and 100 W and 5 mm/s, 10 mm/s, and 15 mm/s, respectively. For each combination of parameters, Ra, KW, and HAZ are measured as quality responses. Contour plots visualize the relationships between

the parameters and the responses, and ANOVA then analyzes the significance and contribution of each parameter. Subsequently, ARAS was utilized for multi-objective optimization wherein the most effective cutting condition with highest performance on all output characteristics could be determined. This study provides a practical and systematic approach to improving laser cutting quality in thermoplastics and opens new avenues for the development of data-driven decision-making tools in advanced manufacturing processes.

Materials and Methods

Materials

In this study, two widely used thermoplastics—polypropylene (PP) and polyvinyl chloride (PVC)—were selected as workpiece materials for laser cutting experiments. The entire processing setup poses very different kinds of behaviors in terms of physical, mechanical, and thermal properties of these substances. PP is a semicrystalline polymer with a low density and moderate thermal resistance, yet very high elongation at fracture (Shubhra et al., 2013). Hence, it is often used for products requiring lightweight and chemical resistance. It has a melting point of 160 °C and can be used for services having a temperature of around 160 °C, which shows good performance under moderate temperature. Its low thermal conductivity (0.14 $W.m^{-1}.K^{-1}$) allows for some amount of heat to build up around the cutting zone. PVC, on the other hand, is an amorphous polymer of slightly higher density and mechanical strength (Ranjan, 2023). It has a high modulus of Young (3.1 GPa) and tensile strength (53 MPa), rendering it useful in applications where dimensional stability under mechanical load is required, whereas lower elongation at fracture (30%) and melting point (88 °C) render it less ductile and more heat tolerant. However, being low in thermal conductivity (0.22 $W.m^{-1}.K^{-1}$), it allows such CO_2 laser

applications for precise and local heating. The two materials were cut into rectangular samples of 4 mm thickness for the cutting tests. The properties of these thermoplastics are summarized in Table 1.

Table 1. *The physical, mechanical, and thermal properties of PP and PVC*

Properties	Polypropylene (PP)	Polyvinyl Chloride (PVC)
Density (g cm^{-3})	0.90	1.45
Thermal Conductivity $W.m^{-1}.K^{-1}$	0.14	0.22
Tensile Strength (MPa)	35	53
Young's modulus (GPa)	1.5	3.1
Elongation at fracture (%)	120	30
Melting point (°C)	160	88
Service temperature (°C) ($min.max^{-1}$)	-20 to 160	-20 to 60

Laser cutting

The laser cutting experiments for the study were performed using a LazerFix LF7010-type machine with a 100 W continuous-wave CO_2 laser source. The machine has a CNC-controlled three-coordinate table allowing for precise motion and cutting on a large working area. The main aim was to observe the influence of laser parameters on the cut quality of two common thermoplastics, PP and PVC, of 4 mm fixed thickness. The surfaces of all materials tested were thoroughly cleaned before cutting to ensure no surface contamination interfered with laser beam absorption. The cutting paths were designed in CAD software and then loaded into the computer interface connected to the machine. The same focal length of 7 mm was retained during the experiments to concentrate laser beams optimally on the cutting surface and minimize the HAZ. See Table 2 for details of cutting parameters and their levels. Experimental variables were material type (MT) with two levels (PP and PVC), laser power (P) with three levels (80, 90, and 100 W), and speed (V) also with three levels (5, 10, and 15 mm/s).

Table 2. *Laser cutting parameters and their levels*

Control factors	Symbol	Level		
		1	2	3
Material type (-)	MT	PP	PVC	-
Power (W)	P	80	90	100
Cutting speed (mm/s)	V	5	10	15

Cutting under controlled conditions involved adjusting laser power and speed to see how they affected three response variables-one of Ra, KW, and the HAZ. Preliminary test cuts were performed to adjust the settings and provide machine readiness verification. Laser cutting working principle is based on utilizing the high energy density of the CO_2 laser to quickly heat and vaporize the material for clean separation with minimum thermal distortion. Upon completion of the cutting, the samples were left to cool at room temperature. Apart from smoothing the edges, laser cutting requires no post-procedures to be done. All the sheets were placed flat on the cutting table so as not to apply external compression since a thickness of 4 mm is considered rigid enough to not require any other form of support to properly interact with the laser. It should be noted that while stand-off distance and nozzle geometry affect material removal and thrust forces in laser cutting, they were not a focus of this study and were thus held constant.

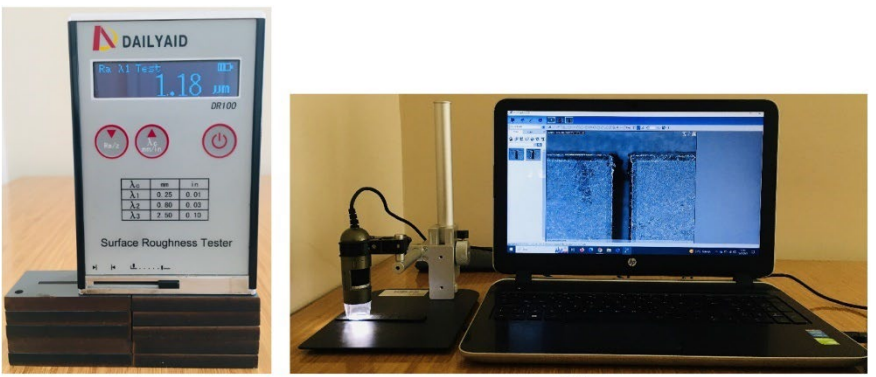
Measuring responses

CO_2 laser cutting was performed on PP and PVC thermoplastic materials. To evaluate the cutting quality, measurements of Ra, KW, and the HAZ were conducted during the cutting process. After laser cutting the thermoplastic materials, which were prepared in dimensions of 130 × 130 mm^2, square specimens measuring 30 × 30 mm were cut for each experimental condition. These specimens were used for Ra measurements. From each side of the square specimens, three measurements were taken—resulting in a total of 12 measurements per specimen. The average

Ra value was then calculated. Ra measurements were carried out using a DAILYAID DR100 model roughness tester. To ensure accurate measurements, the cut specimens were placed in a mold, allowing the roughness tester to be positioned parallel to the material surface, and measurements were precisely taken using the probe.

For the measurements of KW and the HAZ, rectangular plates measuring 100 × 10 mm were prepared. Nine slits were created on each plate at intervals of 10 mm using the laser cutting system. KW and HAZ measurements were conducted along these slits for each experimental condition. Four measurements were taken for both KW and HAZ, and the average values were calculated. Images for KW and HAZ analysis were captured using a Dino-Lite AM4113T model digital optical microscope connected to a computer. These images were measured with high precision using the Dino Capture 2.0 software. The devices used for the measurements are shown in Figure 1.

***Figure 1**. Devices used for measuring responses: (a) Surface roughness tester, (b) Digital microscope*



a) b)

ARAS method

The Additive Ratio Assessment (ARAS) method is a MCDM technique that is generally applied in engineering optimization

problems by virtue of its simplicity and robustness, which also manages to consider both benefit- and cost-type criterion (Zavadskas et al., 2010). ARAS technique compares the performance of each option from the set of alternatives against an ideal (optimal) alternative to determine the best decision alternative (Dahooie et al., 2018). First, the method constructs a decision matrix with the performance values of alternatives with respect to multiple criteria; then these values are normalized so all criteria follow the same direction (maximization). The normalized criteria are subsequently weighted, depending on their relative importance, thus achieving a weighted normalized matrix. Secondly, the optimality function value for each alternative is calculated by aggregating the weighted normalized scores of each alternative. Finally, the ratio of the relative performance of each alternative against the best alternative is obtained, giving an alternative ranking—the utility degree (Zavadskas et al., 2010). This method is both simple and effective in analysing a more complex system with conflicting objectives like optimizing Ra, KW, and HAZ in laser cutting.The steps of the ARAS method are presented below (Zavadskas & Turskis, 2010).

Step 1: Construction of the decision matrix. The decision matrix is presented in Equation (1), where the rows represent the m alternatives and the columns represent the n criteria.

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & \cdot & x_{0j} & \cdot & x_{0n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{i1} & \cdot & x_{ij} & \cdot & x_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{m1} & \cdot & x_{mj} & \cdot & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$i = 0,1,2 \dots, m \qquad j = 0,1,2 \dots, n$$

x_{ij} represents the value of the j-th criterion for the i-th alternative. The top row of the decision matrix contains the optimal values of the criteria. x_{oj} represents the optimal value of the j-th criterion. In decision-making problems, the optimal value of a

criterion is calculated using Equation (2) or (3), depending on whether the criterion has a benefit-type (the higher, the better) or cost-type (the lower, the better) characteristic, respectively.

$$x_{oj} = \max_i x_{ij} \quad \text{if} \quad j. \text{ If the direction of the criterion is maximization}$$
$$x_{oj} = \min_i x_{ij}^* \quad \text{if} \quad j. \text{ If the direction of the criterion is minimization} \tag{2}$$

Step 2: This step involves the normalization of the decision matrix to ensure that all criteria, regardless of their direction, are brought to a common orientation. Having criteria with different directions (i.e., some to be maximized and others to be minimized) complicates the evaluation process. In this method, normalization is performed by dividing the value of each alternative for a given criterion by the corresponding optimal value, thus obtaining a ratio-based comparison. The normalized decision matrix is presented in Equation (3).

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \overline{x_{01}} & \cdot & \overline{x_{0j}} & \cdot & \overline{x_{0n}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \overline{x_{i1}} & \cdot & \overline{x_{ij}} & \cdot & \overline{x_{in}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \overline{x_{m1}} & \cdot & \overline{x_{mj}} & \cdot & \overline{x_{mn}} \end{bmatrix} \tag{3}$$
$$i = \overline{0,1,2 \dots, m} \qquad j = \overline{0,1,2 \dots, n}$$

In the normalization process, Equation (4) is used for criteria with a maximization direction, whereas the two-step procedure given in Equation (5) is applied for criteria with a minimization direction.

$$\overline{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^{m} x_{ij}} \tag{4}$$

$$x_{ij} = \frac{1}{x_{ij}^{*}};\ \overline{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^{m} x_{ij}} \tag{5}$$

Step 3: This step involves transforming the normalized decision matrix into a weighted normalized matrix. The weights of the criteria are denoted by w_j and their total must be equal to 1, as expressed in Equation (6). The weighted normalized decision matrix is presented in Equation (7). The weighted normalized values $\overline{x}_{ij}$ for all criteria are calculated using Equation (8).

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1 \tag{6}$$

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{01} & \cdot & \hat{x}_{0j} & \cdot & \hat{x}_{0n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hat{x}_{i1} & \cdot & \hat{x}_{ij} & \cdot & \hat{x}_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hat{x}_{m1} & \cdot & \hat{x}_{mj} & \cdot & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$i = \overline{0,1,2 \dots, m} \qquad j = \overline{0,1,2 \dots, n}$$

$$\hat{x}_{ij} = \overline{x}_{ij} w_j;\ i = \overline{0, \dots m} \tag{8}$$

Step 4: The values of the optimality function are determined in this step, and this is carried out using Equation (9).

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} \hat{x}_{ij}\ ;\ i = \overline{0, \dots, m} \tag{9}$$

Here, S_i represents the optimality function value of the i^{th} alternative.

A lower value of S_i negatively affects the desirability of the corresponding alternative, whereas a higher value places the alternative in a higher rank. If the goal is merely to rank the alternatives, the S_i values can be used directly for sorting. However, for a more comprehensive evaluation, a ranking based on the superiority of alternatives can be obtained by calculating the K_i values for each alternative, as shown in Equation (10).

$$K_i = \frac{S_i}{S_0} \; ; \; i = \overline{0, \dots, m} \tag{10}$$

Both S_i ve S_0 are the optimality function values of the alternatives calculated using Equation (9). Since Equation (10) involves a ratio calculation, the resulting K_i values fall within the range [0–1]. The K_i value indicates the relative importance or preference level of each alternative. By sorting the K_i values in descending order, the alternatives can be ranked based on their overall performance.

Results and Discussion

The experimental results obtained for CO_2 laser cutting of 4-mm-thick PP and PVC sheets demonstrated that all input parameters, including the type of material, laser power, and cutting velocity, were first thought to be influential on output variables: Ra, KW, and HAZ. Results in Table 3 clearly illustrate that under nearly identical cutting conditions, PP tends to yield lower roughness values compared to PVC. The lowest Ra was observed in Trial 6 (PP, 90 W, 15 mm/s), being 0.270 µm, indicating that high cutting speed combined with moderate laser power produces smoother surfaces in PP. In contrast, PVC specimens gave much higher Ra values, with the maximum being 2.430 µm from Trial 13 (PVC, 90 W, 5 mm/s). This can be explained by the fact that PVC has a lower melting temperature and tends to degrade thermally; especially under the influence of strong

energy input at slow motion, the prolonged heat exposure causes roughness on the surface.

Looking at KW values across trials, it reveals that the combinations of high cutting speed and low laser power exert thinner kerfs. For example, Trial 12 gave the narrowest kerf of 0.359 mm (PVC, 80 W, 15 mm/s), whereas Trial 4 measured the widest kerf of 0.760 mm (PP, 90 W, 5 mm/s). Thus, slower cutting speeds indicate larger energy deposition per unit length, more materials removed, and wider kerf. As demonstrated in other studies in the literature, in CO_2 laser cutting of thermoplastic materials, slower cutting speeds are associated with larger energy deposition per unit length, increased material removal, and wider kerf widths (Aydın & Uğur, 2025; Banerjee & Bhowmick, 2015). This relationship is consistent across various studies and materials, highlighting the importance of optimizing cutting speed to balance cut quality and efficiency. The laser power played a major role in deciding the KW and probably corresponded to broader kerf formation irrespective of the type of material. Drastically varying HAZ sizes were evident within the different setups. For the lowest HAZ value of 0.074 mm, Trial 3 (PP, 80 W, 15 mm/s) was recorded, and the maximum one, at 0.149 mm, was measured in Trial 16 (PVC, 100 W, 10 mm/s). In general, PP showed smaller HAZ values than PVC, probably due to its higher melting point and low thermal diffusivity, which would minimize the liquid heat spread beyond the laser focus zone. Secondly, an increase in laser power or a decrease in cutting speed contributed to the enlargement of HAZ owing to long thermal exposure. As also emphasized by Caiazzo et al., minimizing the HAZ in CO_2 laser cutting of thermoplastics requires careful adjustment of laser power and cutting speed (Caiazzo et al., 2005). Specifically, reducing the laser power and increasing the cutting speed have been shown to effectively limit thermal diffusion, thereby improving cut quality and preserving the mechanical and thermal integrity of the material.

Table 3. *Experimental conditions and responses*

Trial No	Inputs			Outputs		
	Material type (-)	Power (W)	Cutting speed (mm/s)	Ra (μm)	KW (mm)	HAZ (mm)
1	PP	80	5	0.510	0.653	0.082
2	PP	80	10	0.480	0.622	0.079
3	PP	80	15	0.330	0.596	0.074
4	PP	90	5	0.460	0.760	0.089
5	PP	90	10	0.420	0.684	0.085
6	PP	90	15	0.270	0.623	0.080
7	PP	100	5	0.700	0.733	0.097
8	PP	100	10	0.560	0.699	0.091
9	PP	100	15	0.360	0.659	0.086
10	PVC	80	5	2.420	0.445	0.125
11	PVC	80	10	1.850	0.372	0.119
12	PVC	80	15	1.620	0.359	0.107
13	PVC	90	5	2.430	0.492	0.133
14	PVC	90	10	1.750	0.446	0.130
15	PVC	90	15	1.490	0.399	0.124
16	PVC	100	5	2.130	0.545	0.149
17	PVC	100	10	1.520	0.490	0.136
18	PVC	100	15	1.250	0.457	0.129

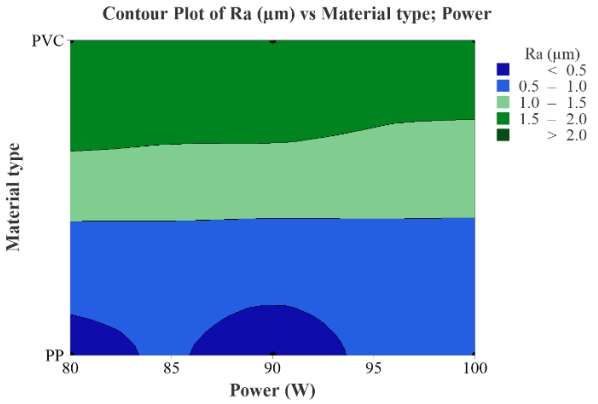
Evaluation of surface roughness

The contour plots in Figure 2 shed light on how Ra varies with different laser cutting parameters for PP and PVC samples. These plots essentially show the dependent parameter Ra ranging with three independent variables-the material type, laser power, and cutting speed. In Figure 2a, which accounts for the interaction between material type and laser power, it is noticeable that across the entire range of power settings, PP consistently has lower Ra values as compared to PVC. Ra values for PP mostly range below 0.5 μm (dark blue region), while PVC surfaces exhibited Ra values greater than 1.5 μm (ranging from light green to dark green zones). This may be due to the high melting temperature and the thermal resistance of PP, which allow cleaner cuts that prevent surface degradation from whatsoever. These thermal characteristics reduce the material's

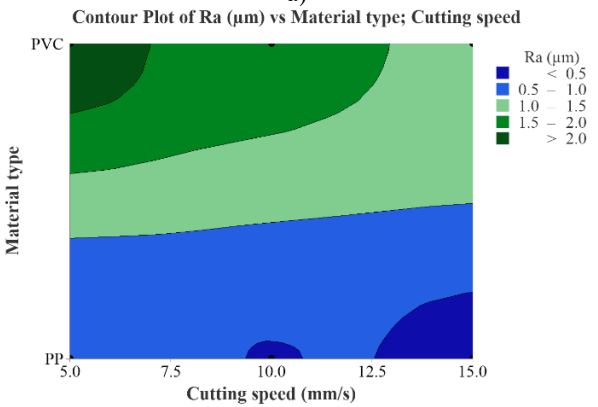
susceptibility to localized overheating and charring during the laser cutting process. As also demonstrated in previous studies, the high melting temperature and thermal resistance of PP are critical factors that enable cleaner cuts and prevent surface degradation during CO_2 laser cutting (Choudhury & Shirley, 2010; Mushtaq et al., 2020). By optimizing laser cutting parameters—particularly by combining moderate laser power with high cutting speed—it is possible to achieve high-quality cuts with minimal thermal damage, as observed in the current experimental results. Such performance not only enhances cut integrity but also makes PP a suitable material for various industrial applications where dimensional precision and surface quality are essential, such as packaging, automotive, and medical device manufacturing. Figure 2b deals with the further influence of the combined parameters of the material type and cutting speed on Ra, thereby establishing that PP performs best. At high cutting speeds of more than 12 mm/s, PP shows the lowest Ra values (dark blue zones), with PVC registering moderate ones (light green zones). The rise in cutting speed decreases the thermal exposure time and thus reduces surface melting and charring of polymers, which is mostly effective for PP. However, in the case of PVC, which has a lower decomposition temperature and poor thermal conductivity, even higher speeds cannot contribute much to suppress its roughness.

Figure 2c analyzes the joint effect of laser power and cutting speed on both materials. The lowest Ra values are observed at moderate power levels (approximately 90 W) and the highest cutting speeds (15 mm/s). This looks like an optimal trade-off between having enough energy for proper cutting and not giving room for thermal damage. Keeping the cutting speeds low and the laser power higher yields higher Ra values as more heat is imparted on the material, which could cause deterioration. This outcome is consistent with the thermal behavior of polymers under excessive energy input,

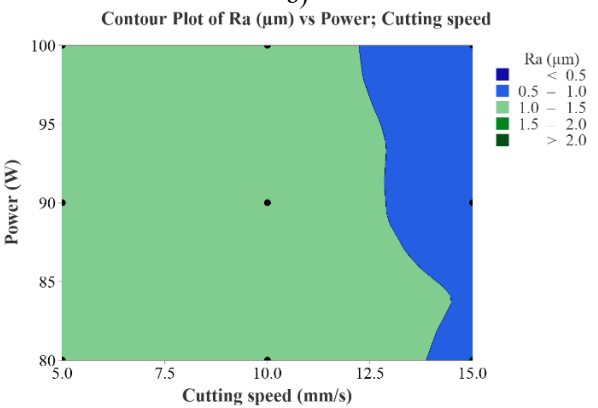
where prolonged exposure leads to melting irregularities and increased Ra. As also noted by Nikinas et al., maintaining higher cutting speeds and lower laser power is crucial for achieving lower Ra values in CO_2 laser cutting of thermoplastics (Ninikas et al., 2021). This approach minimizes the heat imparted to the material, reducing Ra and preventing deterioration. Their findings highlight that adjusting cutting parameters based on the thermal sensitivity of each material is essential to optimize surface quality. In alignment with these insights, the present study also confirms that moderate power settings combined with high cutting speed resulted in the lowest Ra values for PP, indicating an effective balance that minimizes thermal load while ensuring adequate material removal. A gradual change in Ra marking is seen from dark green to blue as the cutting speed increases, irrespective of the power, showing how speed strongly counterbalances Ra. Hence, the above results reveal that using a high cutting speed with moderate laser power is the best way to reduce Ra of PP samples. The fact that PVC also cuts well under these parameters but results in much higher Ra indicates the vital role of material-dependent thermal properties in influencing the quality of laser cutting. Optimization of Ra, therefore, must take into very close consideration the material and cutting speed, while laser power plays somewhat of a less pivotal role in this context with respect to the examined range.



a)



b)



c)

Figure 2. *Contour plots for Ra: a) Material type–Power, b) Material type–Cutting speed, and c) Power–Cutting speed*

Table 4 shows that the ANOVA analysis for Ra indicates that the material type is the major-worth factor (F-value = 185.57, $p < 0.001$), accounting for up to 84.73% of the total variation. This indicates that the thermal and physical differences between PP and PVC play a dominant role in determining surface quality during laser cutting. Cutting speed is also a statistically significant factor ($F = 10.29$, $p = 0.003$), with about 9.39% contribution to the variation in Ra, presumably via its effect on the duration of thermal exposure. On the other hand, the laser power looks rather unimportant for Ra variation ($F = 0.44$, $p = 0.657$), with mere 0.40% contribution. The model's goodness of fit is convincing ($R^2 = 94.52\%$, R^2-adjusted = 92.24%, R^2-predicted = 87.67%), confirming a strong capability to represent the variability in Ra outputs.

Table 4. *ANOVA results for Ra*

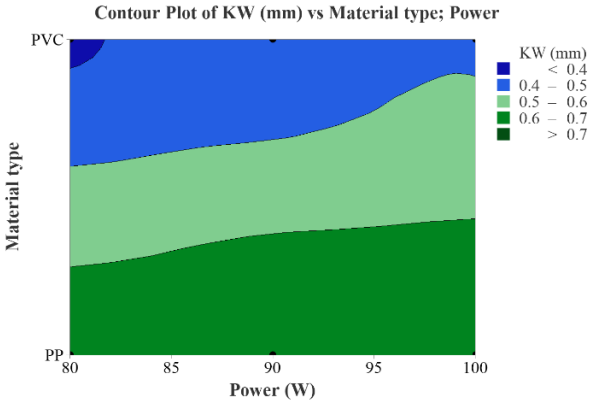
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-value	p-value	Cont. (%)
Material type	1	8.5009	8.50094	8.50094	185.57	0.000	84.73
Power	2	0.0399	0.03990	0.01995	0.44	0.657	0.40
Cutting speed	2	0.9423	0.94230	0.47115	10.29	0.003	9.39
Error	12	0.5497	0.54971	0.04581			5.48
Total	17	10.0329					100
R^2= 94.52%, $R^2(adj)$=92.24%, $R^2(pred)$=87.67%							

Evaluation of kerf width

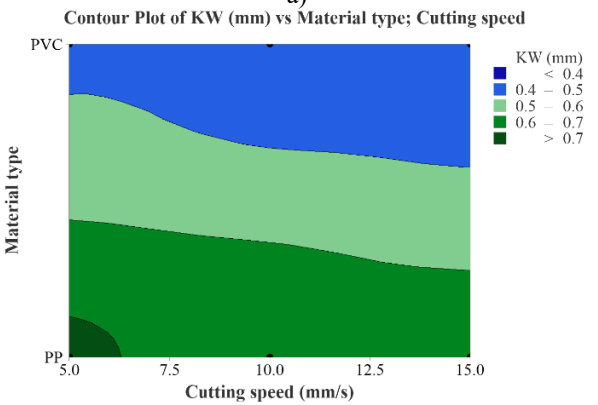
Figure 3 displays contour plots showing the variation in KF with respect to different parameter pairs. Very concretely, graphs highlight interaction between (a) material type and laser power, (b) material type and cutting speed, and (c) laser power and cutting speed. Figure 3a depicts the interaction of material type and power on KW. It can be clearly seen from the figure that PP samples create wider KW (>0.6 mm-the green zones) irrespective of power settings, but PVC samples tend to have narrower kerf widths, especially when the power setting is low. The narrow kerf in PVC is due to its low

thermal conductivity and melting point, whereby the material melts and re-solidifies with very little lateral heat diffusion. However, PP, because of its semicrystalline structure and higher melting point, tends to facilitate removal of more material, especially under higher power levels, thus resulting in broader KW. The combined effect of material type and cutting speed on KW is given below in Figure 3b. This figure indicates that maximum cutting speeds induce minimum KW in the case of both materials, thus a trend very much observed in PVC. For instance, in the upper right section (PVC-15 mm/s), the KW falls below 0.4 mm (blue zone), implying that laser cutting done at very high speed lessens the laser interaction time with the material and hence restricts material evaporation and lateral melting. In contrast, PP retains relatively higher KW values, as indicated by the green zones, suggesting that it is more susceptible to laser-induced thermal removal. This is in coherence with other studies where it is stated that an increase in cutting speed results in a reduction of heat input per unit length to reduce KW and enhance dimensional accuracy of the cut.

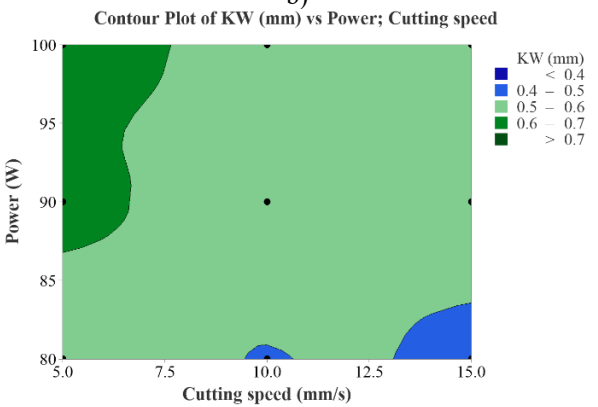
Figure 3, part (c) evaluates the laser power-cutting speed relation. According to the plot, the combination of lower power of 80 W coupled with high speed of 15 mm/s results in very narrow kerfs (KW < 0.4 mm, blue region). Meanwhile, a lower cut speed of about 4 mm/s coupled with moderate to high laser power (90–100 W) produces wide kerfs, probably due to the prolonged period of energy deposition, which promotes an extended area of melting and evaporation. The plot also shows smooth horizontal contours near the mid-range of power and speed parameters, indicating that a reasonable compromise between cut quality and cutting speed can be obtained with intermediate parameter settings.



a)



b)



c)

Figure 3. *Contour plots for KW: a) Material type–Power, b) Material type–Cutting speed, and c) Power–Cutting speed*

All the contour plots, therefore, reflect that speed assumes a dominant role during the minimization of KW using particularly the lower power regions. It is also observed that PVC provides better dimensional accuracies than PP because of its thermal characteristics. Therefore, in terms of CO2 laser cutting of thermoplastics, the optimization must lean toward the highest speed, power kept low to moderate, and PVC preferred to PP, depending on applications.

Table 5, that shows the ANOVA results, informs us about the relative significance of three input parameters on the KW: types of material, laser power, and cutting speed. The material type turns out to give the greatest effect on KW, contributing 81.19% to the total variation. This is further emphasized by its F-value of 718.57--the one that is extremely high--with a p-value of less than 0.001, rendering this phenomenon very highly statistically significant. This means that the thermal and physical properties of materials on their own, such as melting point, thermal conductivity, and structural characteristics, basically determine how a material reacts to the laser beam and consequently how wide the cut ends up being. Laser power and cutting speed also give rise to statistically significant effects upon KW, contributing by 8.85% and 8.60%, respectively, having significant F-values of 39.18 and 38.05. In this regard, it appears that higher powers or lower cutting speeds increase the energy input per unit length, thus producing wider kerfs. Though less influential than the material, these parameters still hold importance in fine-tuning the process to provide better cut quality. Furthermore, the analyzed model stands out for its great explanatory and inferential competence, with R^2 = 98.64%, R^2 (adj) = 98.08%, and R^2 (pred) = 96.95%, thus signifying that the chosen factors explain virtually all the variability in the KW response and that the model is consequently trustworthy to use for prediction in similar scenarios.

Table 5. *ANOVA Results for KW*

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-value	p-value	Cont. (%)
Material type	1	0.227588	0.227588	0.227588	718.57	0.000	81.19
Power	2	0.024821	0.024821	0.012411	39.18	0.000	8.85
Cutting speed	2	0.024103	0.024103	0.012051	38.05	0.000	8.60
Error	12	0.003801	0.003801	0.000317			1.36
Total	17	0.280312					100
R^2= 98.64%, $R^2(adj)$=98.08%, $R^2(pred)$=96.95%							

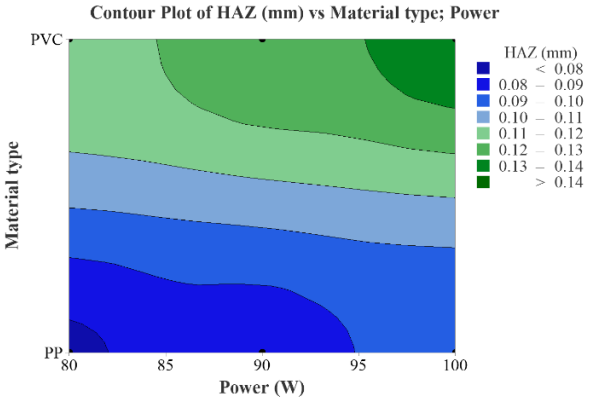
Evaluation of heat-affected zone

Figure 4 illustrates contour plots for the interaction effects of laser cutting parameters with material type, laser power, and cutting speed for the HAZ width for 4 mm thick thermoplastic sheets. It is a very important quality characteristic in laser cutting, depending upon how much thermal damage has been caused next to the cut edge. In general, one desires to have narrower HAZs, implying better control of heat, fewer instances of microstructural degradation, and preservation of engineering properties. Figure 4a gives the effect of material type and laser power on the HAZ. In the entire range of power used (80–100 W), PP gave consistently lower values of HAZ than PVC, as can be seen from the dark blue zones dominating the contour chart of HAZ for PP and greenish ones for PVC. In most power settings, HAZ stays below 0.09 mm for PP, whereas the HAZ surpasses about 0.12 mm for PVC at higher power. This is attributed to melting point of PP higher compared to PVC and its good thermal stability which limits heat diffusion. In the case of PVC, with its low melting point and heat resistivity, the heat is prone to spread even at moderate power settings.

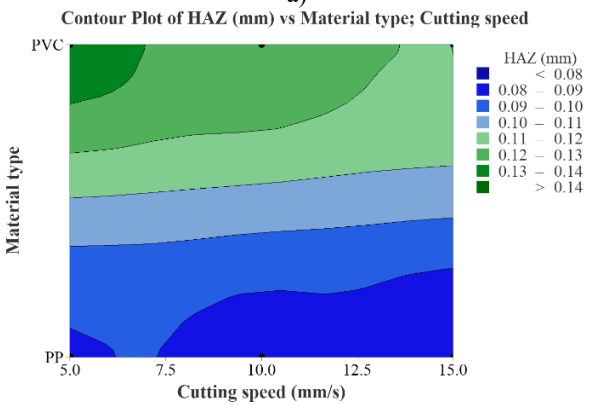
In Figure 4b, the interaction between material type and cutting speed is studied. Again, PP clearly demonstrates superior thermal control by exhibiting narrower HAZ values across the entire speed range, particularly beyond the 10 mm/s threshold. As the speed

climbs, the laser interaction time decreases while the total heat input is reduced, and this results in a smaller HAZ. The rise in speed helps keep both materials down in terms of HAZ, but PVC still maintains a wider HAZ, indicating that it is the thermal properties of the material that dominate. At 15 mm/s, PP carries HAZ values down to as little as 0.074 mm, while PVC is still above 0.11 mm; such a situation confirms that in HAZ management, selecting the appropriate material holds greater significance than considered speed.

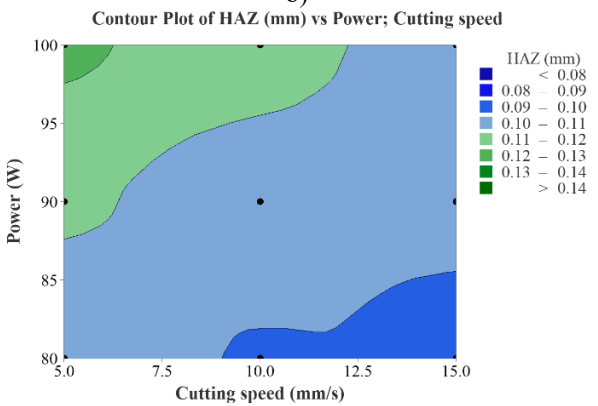
Figure 4c analyses the combined effect of laser power and cutting speed on HAZ. The narrower HAZs (< 0.09 mm) occur when low power (80 W) is coupled with high speed (15 mm/s), highlighting the advantage of maintaining low thermal loads and short exposure times. Increasing laser power or reducing cutting speed during CO_2 laser cutting of thermoplastics substantially widens the HAZ due to deeper heat penetration and longer retention time, as also demonstrated by Tamrin et al. (Tamrin et al., 2015). This intensification of thermal effects can lead to material degradation and dimensional inaccuracy, underscoring the importance of precise parameter control. Optimizing these parameters is therefore crucial for minimizing the HAZ and improving the quality of laser-cut thermoplastic materials. In the transitional zone, 90 W and 10 mm/s represent moderate conditions with HAZ widths averaging around 0.10–0.12 mm, while the top-left corner, corresponding to 100 W and 5 mm/s, produces the widest HAZ, exceeding 0.14 mm. This trend conforms and supports previous investigations in asserting that HAZ extension is raised by both laser power and exposure time with greater thermal input to the material surface being the common cause.



a)



b)



c)

Figure 4. *Contour plots for HAZ: a) Material type–Power, b) Material type–Cutting speed, and c) Power–Cutting speed*

In conclusion, HAZ width is predominantly influenced by the type of thermoplastic used, followed by laser power and cutting speed. PP demonstrated superior performance in maintaining narrower HAZ values across all parameter combinations. The most effective configuration for minimizing HAZ was found to be PP material, 80 W laser power, and 15 mm/s cutting speed.

Table 6 presents the ANOVA for HAZ showing that the material type is the most influential parameter, contributing 85.12% to the total variation with an extremely high F-value of 768.13 and highly significant p-value (<0.001). This affirms that intrinsic thermal properties, including melting point and thermal conductivity, have a crucial influence on the diffusion of heat and thermal damage during CO_2 laser cutting. Laser power (8.80%, F = 39.69, $p < 0.001$) is also important to HAZ as more power means more energy and that equals a larger HAZ. The cutting speed, less dominant (4.75%, F = 21.45, $p < 0.001$), would then be of importance as greater speeds tend to reduce the duration of exposure and further limit heat diffusion. Minimal error contribution (1.33%), combined with exceedingly high determination coefficients (R^2 = 98.67%, R^2 adj = 98.12%, R^2 pred = 97.01%), shows that the model judges and predicts well, thus making it a highly reliable model for predicting the HAZ behaviour under similar laser cutting conditions.

Table 6. *ANOVA results for HAZ*

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-value	p-value	Cont. (%)
Material type	1	0.008407	0.008407	0.008407	768.13	0.000	85.12
Power	2	0.000869	0.000869	0.000434	39.69	0.000	8.80
Cutting speed	2	0.000469	0.000469	0.000235	21.45	0.000	4.75
Error	12	0.000131	0.000131	0.000011			1.33
Total	17	0.009876					100
R^2= 98.67%, $R^2(adj)$=98.12%, $R^2(pred)$=97.01%							

Multi-response optimization using the ARAS method

In complex laser cutting processes, and especially while dealing with thermoplastic material, a single-quality output is seldom enough as a truly efficient assessment. On the contrary, comprehensive evaluation based on multiple criteria of quality is called for, including Ra, KW, and HAZ. For this purpose, the ARAS method was utilized in the present work because it constitutes a very reliable and straightforward MCDM method. Table 7 presented the results from the ARAS method analysis that also showed the weighted normalized values corresponding to each output response, values of optimality functions (S_i), utility degrees (K_i), and ranks of each trial. To ensure fairness and maintain consistency, equal importances were given to all three indicators, with each criterion receiving a weight of 0.333. As all three criteria of Ra, KW, and HAZ were cost-type criteria in nature (i.e., the smaller, the better), the normalization procedure was done accordingly. Afterwards, the optimality function S_i is, respectively, calculated for each trial by summing up the weighted normalized values. Then, the utility degree K_i is calculated by comparing each $S_i$value to that of the ideal (reference) alternative, which is the highest S_i value in the matrix.

From the analysis, it is very apparent that the Trial 6 configuration, being PP, 90 W laser power, and 15 mm/sec cutting speed, stands highest in terms of optimality degree with a utility degree of 0.8612 and an optimality degree function of 0.0771. Trial 6 recorded the least Ra (0.270 μm) throughout all the experiments, although the KW and HAZ numbers were kept reasonably low: 0.623 mm and 0.080 mm, respectively. Such a scenario gives power to the notion that a medium range laser power with high cutting speed causes sufficient material removal without much thermal degradation, especially for PP, which already possesses better thermal resistive and cutting properties owing to its higher melting temperature and low thermal conductivity. With a utility degree of

0.8053, Trial 3 (PP, 80 W, 15 mm/s) ranked second, primarily due to its excellent HAZ value of 0.074 mm—the lowest among all trials—and a low Ra of 0.330 μm. Although its KW was slightly larger than that of Trial 6, it still stands out as one of the best-performing trials, especially when minimizing thermal damage is prioritized. Ranking third, with a utility degree of 0.7214, was Trial 9 (PP, 100 W, 15 mm/s), signifying a balanced trade-off of all three criteria.

In contrast, Trials 10 (PVC, 80 W, 5 mm/s) and 16 (PVC, 100 W, 5 mm/s) were two of the most notably low-performing cutting configurations, with utility degrees of 0.4331 and 0.3734, respectively. These trials produced the highest surface roughness (Trial 10) and the largest HAZ (Trial 16), indicating significant thermal degradation and poor surface quality. Both trials involved PVC, a material with a lower melting temperature and, consequently, high sensitivity to thermal input, making it particularly prone to charring and dimensional inaccuracies during laser processing. As a result, the findings favor PP over PVC in laser cutting applications, particularly when superior surface finish and thermal integrity are required. Among the top five ranked configurations, all belong to PP, whereas the lowest-ranked trials are exclusively associated with PVC. This outcome is attributed to the higher melting point, better thermal stability, and more favorable interaction of PP with the 10.6 μm wavelength of the CO_2 laser.

The rank also exhibits the effect of process parameters. Trials with higher cutting speeds (15 mm/s) held the first places in the ranking on all indices than those with lower speeds (5 mm/s), stressing the need for short laser-material and hence low thermal interaction times. Further, moderate powers (90 W) appeared to give the best compromise between energy input, material removal efficiency, Ra reduction, and controlled HAZ growth, while very high power (100 W) or low speed mostly translated into more extended and broader HAZ formation due to either prolonged

exposure or intense heat flux. In summary, the ARAS method combines multiple performance metrics into a single, integrated decision-making framework that offers both simplicity and effectiveness in multi-response optimization tasks. As also emphasized by Madic et al., the ARAS method, with its ability to amalgamate multiple performance indicators into a unified structure, can serve as a powerful optimization tool for CO_2 laser cutting operations involving thermoplastics (Madić et al., 2017). Its application not only enhances cut quality and dimensional accuracy but also contributes to improved operational efficiency and overall performance in advanced manufacturing environments. The best setup that emerged from research was PP material, 90 W power, and 15 mm/s cutting speed, giving an excellent configuration to reduce surface degradation, dimensional inaccuracies, and thermal impact in CO_2 laser cutting of thermoplastic sheets.

Table 7. *ARAS method results*

Trial No	Weighted Normalized Data			Optimality Function, Utility Degree, and Ranking		
	Ra	KW	HAZ	S_i	K_i	Rank
1	0.0216	0.0138	0.0212	0.0567	0.6332	6
2	0.0230	0.0145	0.0221	0.0596	0.6650	5
3	0.0334	0.0152	0.0235	0.0721	0.8053	2
4	0.0240	0.0119	0.0196	0.0554	0.6190	7
5	0.0263	0.0132	0.0205	0.0600	0.6696	4
6	0.0409	0.0145	0.0218	0.0771	0.8612	1
7	0.0158	0.0123	0.0180	0.0460	0.5141	10
8	0.0197	0.0129	0.0191	0.0518	0.5780	8
9	0.0306	0.0137	0.0203	0.0646	0.7214	3
10	0.0046	0.0203	0.0139	0.0388	0.4331	15
11	0.0060	0.0243	0.0146	0.0449	0.5011	11
12	0.0068	0.0252	0.0163	0.0483	0.5387	9
13	0.0045	0.0184	0.0131	0.0360	0.4019	17
14	0.0063	0.0203	0.0134	0.0400	0.4461	14
15	0.0074	0.0226	0.0140	0.0441	0.4923	12
16	0.0052	0.0166	0.0117	0.0334	0.3734	18
17	0.0073	0.0184	0.0128	0.0385	0.4299	16
18	0.0088	0.0198	0.0135	0.0421	0.4700	13

Table 8 presents the ANOVA results for the performance index K_i derived from the ARAS-based multi-response optimization. Among the input parameters, material type exhibits the most significant influence, contributing 65.35% to the total variation, with an exceptionally high F-value of 125.37 and a p-value < 0.001, indicating strong statistical significance. Cutting speed follows as the second most influential factor, accounting for 21.56% of the variation (F = 20.68, p < 0.001), highlighting its critical role in controlling thermal input and affecting the overall cut quality. Laser power, while contributing only 6.83%, is still statistically significant (F = 6.55, p = 0.012), suggesting it has a moderate effect on performance outcomes. The error term contributes just 6.26%, which confirms the reliability and adequacy of the model. Furthermore, the high determination coefficients R^2=93.74% adjusted R^2=91.14% and predicted R^2=85.93% demonstrate that the model effectively explains and predicts the variability in the optimization performance, making it robust for decision-making in laser cutting applications.

Table 8. *ANOVA results for* K_i

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-value	p-value	Cont. (%)
Material type	1	0.21787	0.21787	0.217866	125.37	0.000	65.35
Power	2	0.02277	0.02277	0.011384	6.55	0.012	6.83
Cutting speed	2	0.07189	0.07189	0.035945	20.68	0.000	21.56
Error	12	0.02085	0.02085	0.001738			6.26
Total	17	0.33338					100
R^2= 93.74%, $R^2(adj)$=91.14%, $R^2(pred)$=85.93%							

Table 9 presents the results of the verification test conducted to validate the effectiveness of the ARAS-based multi-response optimization approach in CO_2 laser cutting of thermoplastics. The initial parameter combination $MT_1P_1V_1$ (PP material, 80 W laser power, and 5 mm/s cutting speed) yielded response values of 0.510 μm for Ra, 0.653 mm for KW, and 0.082 mm for HAZ. In contrast,

the optimized parameter set identified by the ARAS method, $MT_1P_2V_3$ (PP, 90 W, 15 mm/s), significantly improved these outcomes, reducing Ra to 0.270 μm, KW to 0.623 mm, and HAZ to 0.080 mm. These improvements correspond to enhancement rates of 47.06%, 4.59%, and 2.44% respectively. Furthermore, the ARAS utility index K_i increased from 0.6332 to 0.8612, reflecting a 36.01% overall improvement in multi-criteria performance. These results confirm that the ARAS method effectively enhances laser cutting quality by simultaneously optimizing surface finish and minimizing thermal damage.

Table 9. *Verification test results*

Responses	Initial parameter	Optimal ARAS parameter	Improvement Rate (%)
	Response value	Response value	
Ra (μm)	0.510	0.270	47.06
KW (mm)	0.653	0.623	4.59
HAZ (mm)	0.082	0.080	2.44
Control factors	$MT_1P_1V_1$	$MT_1P_2V_3$	
K_i	0.6332	0.8612	36.01

Conclusions

The study attempted to determine the effects of the dependent variables' laser power, cutting speed, and material type on the cutting performance of two generic thermoplastics, namely PP and PVC, for a 100-watt CO_2 laser cutter. Outputs selected for consideration were surface roughness (Ra), kerf width (KW), and heat-affected zone (HAZ), each signifying one common aspect of cut quality. The Additive Ratio Assessment (ARAS) method was then used to evaluate the parameter conditions giving a simultaneous minimum of all the characteristics of the quality. In all, 18 experimental runs were conducted at various process conditions, followed by statistical and multi-criteria decision analyses.

The findings showcase that material type was the prevailing factor for all considered output responses. The ANOVA results

indicated the fact that thermal behaviour during laser cutting was significantly influenced by material properties such as melting point, thermal conductivity, and structure. PP is always better than PVC in all three quality attributes because it has a higher melting point, lower thermal conductivity, and better thermal resistance. For instance, the lowest Ra value of 0.270 μm was obtained for a PP specimen at 90 W power and 15 mm/s cutting speed. On the contrary, PVC specimens gave very rough surfaces particularly at lower speeds and higher powers because it suffers from thermal degradation on extended exposure. KW analysis further reiterates the material's role by contributing more than 81% to the variation, with consistently narrower kerfs produced by PVC than PP. This behaviour stems from PVC's lower melting point and thermal conductivity, which restrict lateral heat spread and limit material removal during cutting. Nonetheless, at high speeds and low to moderate powers, PP kerf widths became competitive, especially in applications where mechanical strength is prioritized.

The HAZ measurements further validated the thermal superiority of PP over PVC. PP samples exhibited narrower HAZs across all trials, with a minimum value of 0.074 mm observed at 80 W and 15 mm/s. In contrast, PVC samples showed wider HAZs, particularly at high power and low speed, highlighting its susceptibility to thermal damage. ANOVA analysis confirmed that material type accounted for over 85% of the variability in HAZ, followed by laser power and cutting speed. The application of the ARAS method enabled a comprehensive multi-objective optimization by integrating all three output criteria into a single performance index. With equal weights assigned to Ra, KW, and HAZ, Trial 6 (PP, 90 W, 15 mm/s) emerged as the best-performing configuration, achieving the highest utility score (K_6 = 0.8612). This parameter set resulted in the best trade-off between smooth surface finish, acceptable KW, and minimal thermal damage. The validation

test confirmed this finding, showing an overall performance improvement of 36.01% in the ARAS utility index compared to the baseline condition. The ARAS-based optimization approach proved to be a robust and practical decision-support tool for selecting optimal cutting conditions in complex laser cutting operations. It effectively balanced conflicting objectives and enabled rational selection based on empirical data. The high R^2 values for the ARAS performance index (R^2 = 93.74%, R^2(adj) = 91.14%) further validated the reliability of the statistical model and optimization framework.

In summation, this study brought out the significance of materials-based process planning in CO_2 laser cutting of thermoplastics. For highly precise applications with minimum thermal damage, PP should be favoured over PVC, especially at highest cutting speeds and moderate power levels. The use of statistical analysis and MCDM methods like ARAS serves to boost understanding of the process and allow for data-driven decision-making in industry. Further work may consider expanding this methodology to other thermoplastics and including environmental factors such as fume generation or energy consumption into the optimization process in pursuit of sustainable manufacturing.

Research funding

This work was supported by the Scientific Research Projects Coordination Unit of Osmaniye Korkut Ata University under grant number OKUBAP-2022-PT1-003.

Reference

Arshed, F., Ahmad, A., Xirouchakis, P., & Metsios, I. (2022). Laser cutting of carbon fiber reinforced plastic components for remanufacturing. Journal of Remanufacturing, 12(3), 411–433. https://doi.org/10.1007/s13243-022-00117-6

Aydın, K., & Uğur, L. (2025). Prediction of kerf and groove widths in CO2 laser cutting process of PMMA using experimental and machine learning methods. Experimental Techniques. https://doi.org/10.1007/s40799-025-00786-5

Banerjee, S. S., & Bhowmick, A. K. (2015). Experimental study on the CO2 laser cutting of novel polyamide 6/fluoroelastomer thermoplastic elastomeric blends. Rubber Chemistry and Technology, 88(1), 125–137. https://doi.org/10.5254/rct.14.85960

Caiazzo, F., Curcio, F., Daurelio, G., & Minutolo, F. M. C. (2005). Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO2 laser beam. Journal of Materials Processing Technology, 159(3), 279–285. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.019

Chen, W.-H., Carrera Uribe, M., Kwon, E. E., Lin, K.-Y. A., Park, Y.-K., Ding, L., & Saw, L. H. (2022). A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM). Renewable and Sustainable Energy Reviews, 169, 112917. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112917

Choudhury, I. A., & Shirley, S. (2010). Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation. Optics & Laser Technology, 42(3), 503–508. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2009.09.006

Coelho, J. M. P., Abreu, M. A., & Carvalho Rodrigues, F. (2004). High-speed laser cutting of superposed thermoplastic films: thermal modeling and process characterization. Optics and Lasers in

Engineering, 42(1), 27–39. https://doi.org/10.1016/S0143-8166(03)00071-X

Dahooie, J., Zavadskas, E., Abolhasani, M., Vanaki, A., & Turskis, Z. (2018). A Novel Approach for Evaluation of Projects Using an Interval–Valued Fuzzy Additive Ratio Assessment (ARAS) Method: A Case Study of Oil and Gas Well Drilling Projects. Symmetry, 10(2), 45. https://doi.org/10.3390/sym10020045

Davim, J. P., Barricas, N., Conceição, M., & Oliveira, C. (2008). Some experimental studies on CO2 laser cutting quality of polymeric materials. Journal of Materials Processing Technology, 198(1–3), 99–104. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.056

Der, O., Başar, G., & Ordu, M. (2023). Statistical investigation of the effect of CO2 laser cutting parameters on kerf width and heat affected zone in thermoplastic materials. Journal of Materials and Mechatronics: A, 459–474. https://doi.org/10.55546/jmm.1359453

Der, O., Ordu, M., & Başar, G. (2024). Multi-objective optimization of cutting parameters for polyethylene thermoplastic material by integrating Data Envelopment Analysis and SWARA-based CoCoSo approach. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(2), 638–661. https://doi.org/10.47495/okufbed.1338169

Der, O., Ordu, M., & Basar, G. (2024). Optimization of cutting parameters in manufacturing of polymeric materials for flexible two-phase thermal management systems. Materials Testing, 66(10), 1700–1719. https://doi.org/10.1515/mt-2024-0127

Madić, M., Antucheviciene, J., Radovanović, M., & Petković, D. (2017). Determination of laser cutting process conditions using the preference selection index method. Optics &

Laser Technology, 89, 214–220. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.10.005

Moradi, M., Moghadam, M. K., Shamsborhan, M., Beiranvand, Z. M., Rasouli, A., Vahdati, M., Bakhtiari, A., & Bodaghi, M. (2021). Simulation, statistical modeling, and optimization of CO2 laser cutting process of polycarbonate sheets. Optik, 225, 164932. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164932

Munoz, A., Schmidt, J., Suffet, I. H. M., & Tsai, C. S.-J. (2023). Characterization of emissions from carbon dioxide laser cutting acrylic plastics. ACS Chemical Health & Safety, 30(4), 182–192. https://doi.org/10.1021/acs.chas.3c00013

Mushtaq, R. T., Wang, Y., Rehman, M., Khan, A. M., & Mia, M. (2020). State-of-the-art and trends in CO2 laser cutting of polymeric materials—A review. Materials, 13(17), 3839. https://doi.org/10.3390/ma13173839

Ninikas, K., Kechagias, J., & Salonitis, K. (2021). The impact of process parameters on surface roughness and dimensional accuracy during CO2 laser cutting of PMMA thin sheets. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 5(3), 74. https://doi.org/10.3390/jmmp5030074

Ordu, M., & Der, O. (2023). Polymeric Materials selection for flexible pulsating heat pipe manufacturing using a comparative hybrid MCDM approach. Polymers, 15(13), 2933. https://doi.org/10.3390/polym15132933

Ranjan, N. (2023). Chitosan with PVC polymer for biomedical applications: A bibliometric analysis. Materials Today: Proceedings, 81, 894–898. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.274

Shubhra, Q. T., Alam, A., & Quaiyyum, M. (2013). Mechanical properties of polypropylene composites. Journal of

Thermoplastic Composite Materials, 26(3), 362–391. https://doi.org/10.1177/0892705711428659

Tamrin, K. F., Nukman, Y., Choudhury, I. A., & Shirley, S. (2015). Multiple-objective optimization in precision laser cutting of different thermoplastics. Optics and Lasers in Engineering, 67, 57–65. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.11.001

Varsi, A. M., & Shaikh, A. H. (2019). Experimental and statistical study on kerf taper angle during CO2 laser cutting of thermoplastic material. Journal of Laser Applications, 31(3). https://doi.org/10.2351/1.5087846

Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. Technological and Economic Development of Economy, 16(2), 159–172. https://doi.org/10.3846/tede.2010.10

Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Vilutiene, T. (2010). Multiple criteria analysis of foundation instalment alternatives by applying Additive Ratio Assessment (ARAS) method. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10(3), 123–141. https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60141

CHAPTER 6

ANALYSIS OF BOLTED BEAMS UNDER VIBRATION EXCITATION

MEHMET EFE ÖZKAN[1]
TUNCAY KARAÇAY[2]

Introduction

Vibration test fixtures are used to attach or securely clamp device under test (DUT) to the vibration shaker. It is important to transfer the vibration energy from a vibration shaker to DUT with a minimum loss. Because of this reason, vibration test fixtures should be rigid and light, and they should have resonance frequencies out of the frequency interval of the test (Barros & Souto, 2017: 348-352). If a vibration test fixture is designed perfectly, it should have optimum mass, high rigidity, good strength, low damping, and high vibration transmissibility (Reddy & Reddy, 2010: 592-595). Taylor et al. (2024), used a different way for vibration test fixture design. It can be over-test or lower-test if the above descriptions of vibration test fixture design are used. In the vibration test fixture design, firstly, the necessity of a dynamic fixture is determined. If it is not

[1] Master's Degree Student, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Orcid: 0009-0002-4256-8713
[2] Prof. Dr., Gazi University, Mechanical Engineering, Orcid: 0000-0002-6014-5610

desired, the dynamic fixture is a fixture of high rigidity that can be used.

Xing et al. (2023: 252) highlighted that in bolted structures, the number of bolts and the location of bolts is important. Their experiment shows that when there are fewer bolts, the rigidity of connection points is reduced, and because of this, the natural frequency of the structure is reduced. Bolted structures should have appropriate pretension of bolts. Pretension bolts should have enough strength, safety factor of limited load in connection location, and enough fracture and fatigue life (NSTS 08307, 1998).

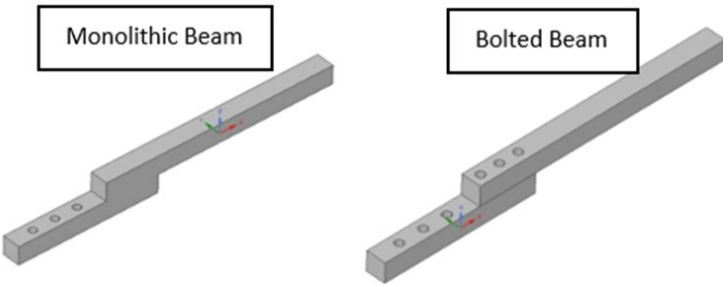
The frequency response function (FRF) is the basis of measurement to search the dynamic characteristics of a mechanical structure. Frequency and mode shapes can be obtained by using FRF. Vibration analyses can be used to find out problems early before they become severe. FRF is a comparison between vibration response signals from mechanical structures due to the vibration excitation force of a system in the frequency domain (Susanto et al., 2019: 132-138). FRF data provide more information about system characteristics than modal data. Because the modal data are extracted from a limited frequency range around the resonance. FRF data can be used to find the dynamic parameters such as mass, stiffness, and damping matrices (Kim & Eun, 2017: 1-10). It is important to determine FRF also for structures subjected to dynamic loads in order to avoid resonance and fatigue problems (Presas et al., 2017: 660).

Material and Method

In this study, the dynamic behaviour of two different beams is examined using modal and frequency response analyses performed in ANSYS 2024 R2 software. For the frequency response analyses, a harmonic load of 1 g (9807 mm/s2) is applied at the beam interfaces. The frequency range for the analysis is selected as 5 Hz

to 2000 Hz. The first beam is considered a monolithic structure, while the second beam is modelled as a bolted structure. The configurations of the beams are shown in Figure 1.

Figure 1 Configuration of beams



The material selected for both beams is an aluminium alloy and the material properties are listed in Table 1.

Table 1 Material properties

Mechanical Properties	Aluminium Alloy
Density (kg / mm^3)	2770
Young modulus (MPa)	71000
Poisson ratio	0,33
Bulk modulus (MPa)	69608
Shear modulus (MPa)	26692
Yield strength (MPa)	280
Maximum tensile strength (MPa)	310

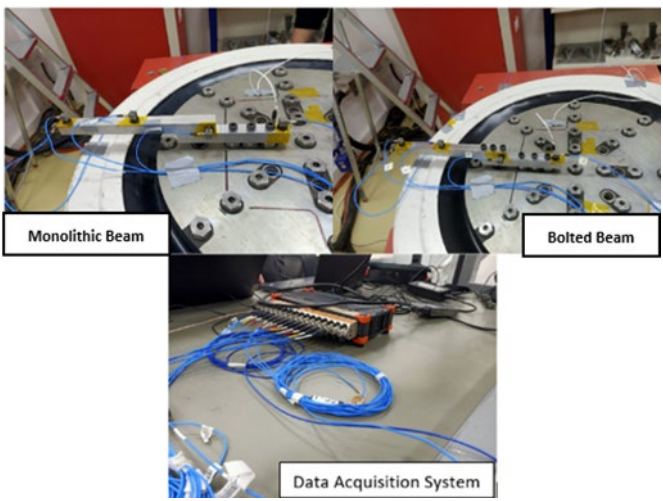
For the bolted beam analyses, M8 bolts are used with bolt pretension applied. Three different torque values and corresponding axial forces are considered for this application (TSF Global Fastening Solutions, 2025): 20,41 Nm (17894,2 N), 28,70 Nm (25163,7 N), and 34,44 Nm (30196,5 N). Two different kinds of connection configurations are employed for the bolted beam: one bolted connection and three bolted connections. The applied analyses are summarized in Table 2.

Table 2 Analyses flow

Configuration	Analysis
Original beam	Modal analysis Frequency response analysis
Bolted beam with one bolt (17894,2 N preload)	Preloaded static analysis Modal analysis Frequency response analysis
Bolted beam with one bolt (25163,7 N preload)	
Bolted beam with one bolt (30196,5 N preload)	
Bolted beam with three bolts (17894,2 N preload)	
Bolted beam with three bolts (25163,7 N preload)	
Bolted beam with three bolts (30196,5 N preload)	

To validate the results of the analyses, modal testing and a 1 g sine sweep test (5-2000 Hz) are performed on the same beams. The tests are conducted using an LDS V850 shaker/slip table, a DEWESOFT SIRIUS data acquisition system, and a PCB 35B21 accelerometer. The data acquisition system and beam configurations are shown in Figure 2.

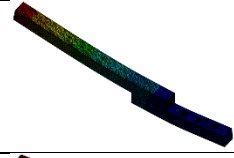
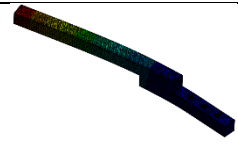
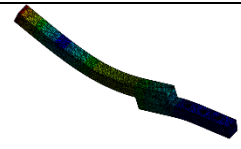
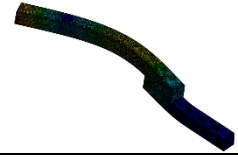
Figure 2 Data acquisition system and configuration of beams



Results and Discussion

Frequency responses, modal tests, and analyses are compared for each configuration. Natural frequencies and mode shapes are obtained from both the modal tests and analyses. The original beam is compared first. Table 3 shows that the mode shapes from the tests and analyses are nearly identical, with the first two modes occurring in Y and Z directions, as expected. The last two modes are in the rotational directions. The error rate between the test and analysis can be considered to be under 4%.

Table 3 Modal results of the original beam

Configuration	Mode	Natural Frequency (Hz) (Test)	Natural Frequency (Hz) (Analysis)	Error Rate (%)	Modal Test	Modal Analysis
Original beam	1	212,6	206,85	2,8		
	2	210,1	210,31	0,1		
	3	1027	1039,4	1,2		
	4	1093	1133,9	3,6		

Secondly, the bolted beam is compared in both tests and analyses. A significant difference is observed between the original beam and the bolted beam when only one bolt is used for the connection. Table 4 shows that the first two natural frequencies of the bolted beam with one bolt (17894,2 N preload) are lower than those of the original beam. This difference is due to the insufficient number of connections, which affects the overall stiffness of the structure.

Table 4 Modal results of the bolted beam with one bolt (17894,2 N preload)

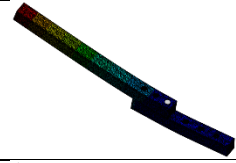
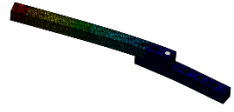
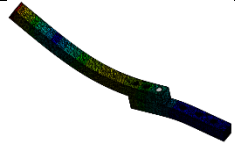
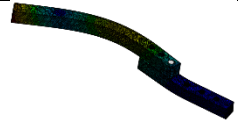
Configuration	Mode	Natural Frequency (Hz) (Test)	Natural Frequency (Hz) (Analysis)	Error Rate (%)	Modal Test	Modal Analysis
Bolted beam with one bolt (17894,2 N preload)	1	169,4	170,26	0,5		
	2	181,9	173,94	4,6		
	3	1015	1009,7	0,5		
	4	1099	1115,2	1,5		

Table 5 and Table 6 show that increasing the preload of the bolt does not significantly affect the natural frequencies of the beam. This observation is consistent in both the analyses and tests.

Table 5: Modal results of the bolted beam with one bolt (25163,7 N preload)

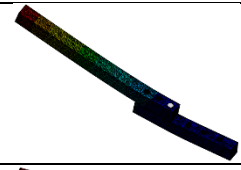
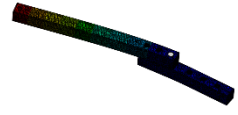
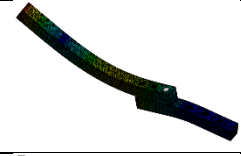
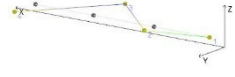
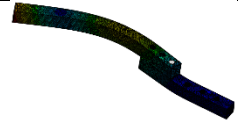
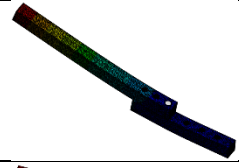
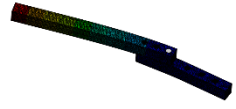
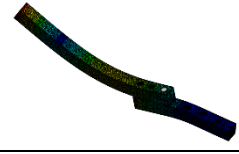
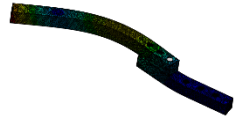
Configuration	Mode	Natural Frequency (Hz) (Test)	Natural Frequency (Hz) (Analysis)	Error Rate (%)	Modal Test	Modal Analysis
Bolted beam with one bolt (25163,7 N preload)	1	169,8	170,54	0,4		
	2	182,8	176,23	3,7		
	3	1014	1010,6	0,3		
	4	1100	1117,2	1,5		

Table 6: Modal results of bolted beam with one bolt (30196,5 N preload)

Configuration	Mode	Natural Frequency (Hz) (Test)	Natural Frequency (Hz) (Analysis)	Error Rate (%)	Modal Test	Modal Analysis
Bolted beam with one bolt (30196,5 N preload)	1	168,6	170,7	1,2		
	2	182,8	177,6	2,9		
	3	1015	1011	0,4		
	4	1101	1118,5	1,6		

By using three bolts in the bolted beam, the first two natural frequencies are nearly the same as those of the original beam, as shown in Table 7. The insufficient number of connections is not an issue in the bolted beam with three bolts, unlike in the bolted beam with one bolt.

Table 7: Modal results of the bolted beam with three bolts (17894,2 N preload)

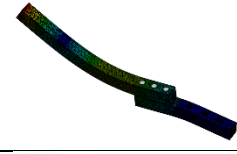
Configuration	Mode	Natural Frequency (Hz) (Test)	Natural Frequency (Hz) (Analysis)	Error Rate (%)	Modal Test	Modal Analysis
Bolted beam with three bolts (17894,2 N preload)	1	204,2	194,46	5		
	2	201,2	200,28	0,5		
	3	994,2	995,12	0,1		
	4	1073	1085,3	1,1		

Table 8 and Table 9 show that increasing the preload of the bolt does not significantly affect the natural frequencies of the beam. It can be said that tightening the bolts is important for ensuring the bolts' functionality. However, this study indicates that there is no significant difference between the different preload values.

Table 8: Modal results of the bolted beam with three bolts (25163,7 N preload)

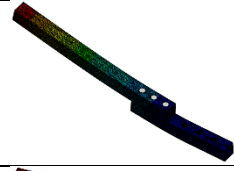
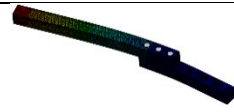
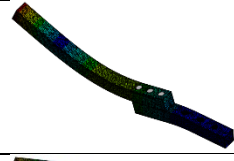
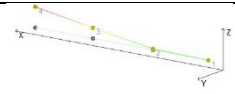
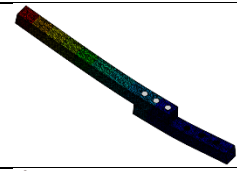
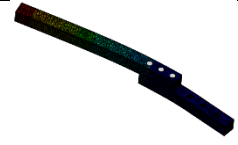
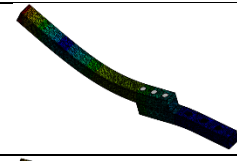
Configuration	Mode	Natural Frequency (Hz) (Test)	Natural Frequency (Hz) (Analysis)	Error Rate (%)	Modal Test	Modal Analysis
Bolted beam with three bolts (25163,7 N preload)	1	204,8	195,86	4,6		
	2	201,6	202,24	0,3		
	3	994,9	996,75	0,2		
	4	1074	1088,1	1,3		

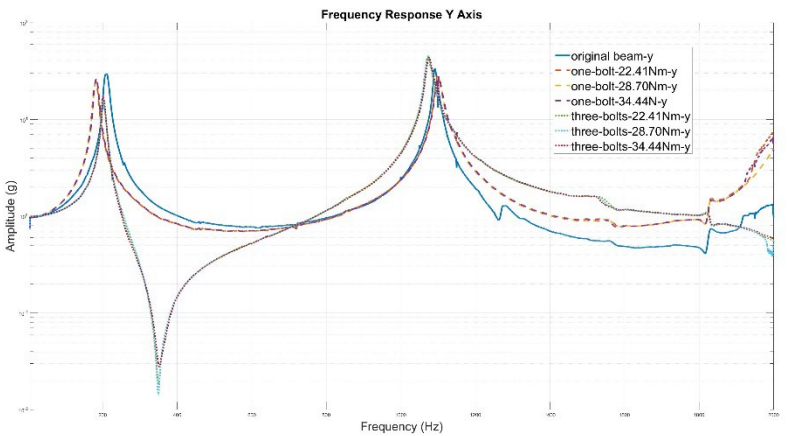
Table 9: Modal results of the bolted beam with three bolts (30196,5 N preload)

Configuration	Mode	Natural Frequency (Hz) (Test)	Natural Frequency (Hz) (Analysis)	Error Rate (%)	Modal Test	Modal Analysis
Bolted beam with three bolts (30196,5 N preload)	1	205,4	196,57	4,5		
	2	204,2	203,24	0,5		
	3	995,6	997,63	0,2		
	4	1076	1089,5	1,2		

Because of the significant mode shapes, frequency response analyses and sine sweep tests were conducted only in the Y and the Z directions. The response location was chosen at the end of the beams for both analyses and tests.

In the Y direction test, the transfer functions of all configurations show similar peak amplitudes. In the transfer function of the bolted beam with three bolts, after the initial amplification, there is a more significant damping compared to the original and bolted beam with one bolt. Because the bolted beam with three bolts configuration provides a stiffer and more stable connection. It allows vibration energy to dissipate more rapidly compared to the original and bolted beam with one bolt. Additionally, at higher frequencies, the transfer function of the bolted beam with one bolt has more amplification compared to both the original and the bolted beam with three bolts. This can be explained by connection looseness in the bolted beam with one bolt. At higher frequencies, the bolted beam with one bolt configuration is more prone to loosening, which can amplify vibrations due to reduced stiffness and unstable contact points.

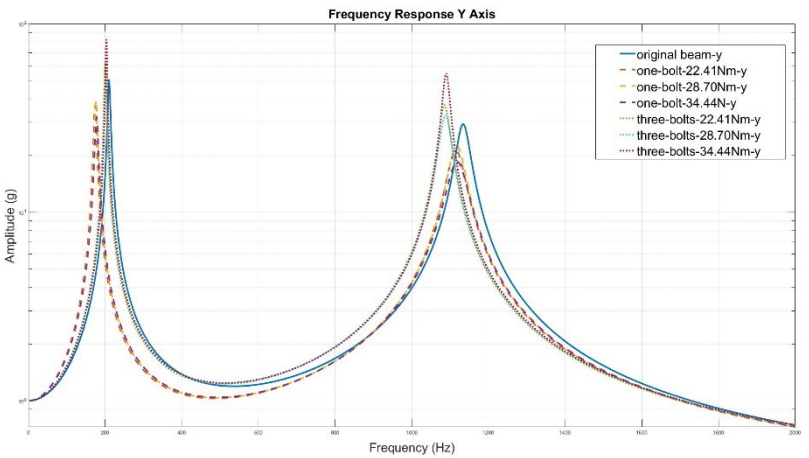
Figure 3 Transfer function of y direction-test



The difference in the first natural frequency of the bolted beam with one bolt is due to the single connection point not providing enough stiffness to constrain the beam's dynamic behaviour fully. This leads to a shift in the first frequency compared to the original beam. On the other hand, the second natural frequency of the bolted beam with one bolt is closer to the original beam because it is generally less affected by the connection stiffness.

The first natural frequency of the bolted beam with three bolts is closer to the original beam due to the increased stiffness from the additional connections. This results in the first mode becoming more stable and similar to the original beam's frequency. However, the second mode's frequency of the bolted beam with three bolts is more affected because the additional bolts might influence the vibration behaviour more significantly in higher modes.

Figure 4 Transfer function of y direction-analysis



In the Z direction tests, at higher frequencies, the transfer function of the bolted beam with one bolt shows more amplification compared to both the original beam and the bolted beam with three bolts. This can be explained by connection looseness in the bolted beam with one bolt. At higher frequencies, the bolted beam with one

bolt configuration is more prone to loosening, which can amplify vibrations due to reduced stiffness and unstable contact points.

Figure 5: Transfer function of z direction-test

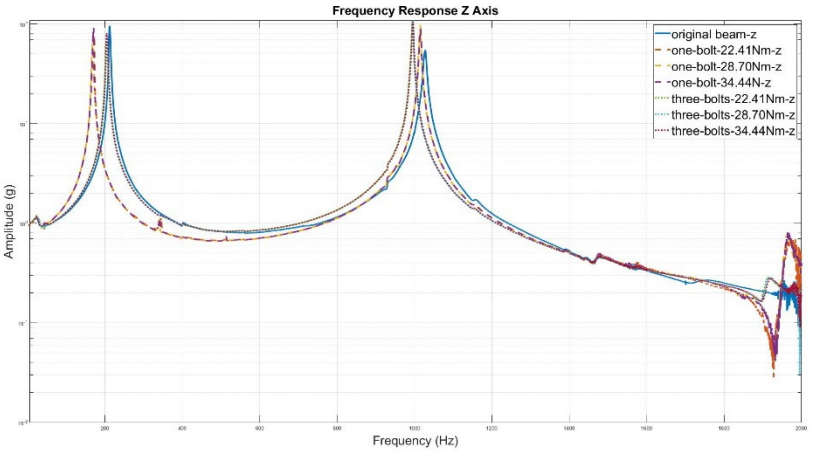
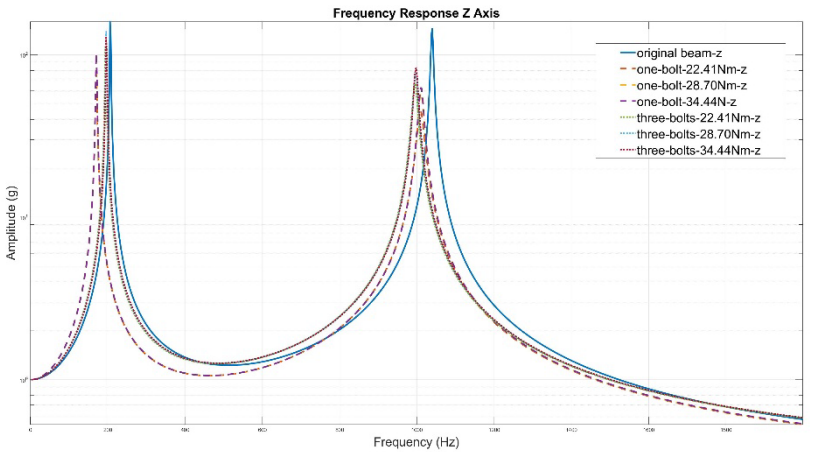


Figure 6: Transfer function of z direction-analysis



Conclusion

This study examines the dynamic behaviours of beams subjected to vibration. The findings from both frequency response analyses and sine sweep tests provide valuable insights into how bolted connections impact the dynamic response. Results confirm

that the bolted connection could be used to produce complex shape parts without changing the required dynamic response of the system. Because modular design, most of the time, is less expensive than the conventional approach that requires manufacturing the part from a bigger raw material.

In future research, the methodologies and conclusions of this study can be applied to more complex vibration test fixtures. This research may also contribute to optimizing vibration test fixtures, improving both their design and predictive accuracy.

References

Barros, E. d., & Souto, C. d. (2017). Evaluation of a Vibration Text Fixture. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 348-352.

Kim, M. J., & Eun, H. C. (2017). Identification of damage-expected members of truss structures using frequency response function. *Advances in Mechanical Engineering*, 1-10.

NASA. (1998). *Criteria for preloaded bolts.* Houstan: NASA.

Presas, A., Valentin, D., Egusquiza, E., Valero, C., Egusquiza, M., & Bossio, M. (2017). Accurate Determination of the Frequency Response Function of Submerged and Confined Structures by Using PZT-Patches. *Sensors*, 660.

Reddy, T. S., & Reddy, K. K. (2010). Design and analysis of vibration test bed fixtures for space launch vehicles. *Indian Journal of Science and Technology*, 592-595.

Susanto, A., Yusuf, S. Q., Hamid, A., Wahyudi, H., & Subekti, S. (2019). Implementation of frequency response function on tapper bearing maintenance. *Sinergi*, 132-138.

Taylor, C., DeClerck, J., Blough, J., Van Karsen, C., Labyak, D., & Joshua, R. (2024). Dynamic fixture development for a structure with two ındependent attachment points. *International Conference on Noise and Vibration Engineering.* Leuven: KU Leuven.

TSF Global Fastening Solutions. (2025, 06 02). *TSF Global Fastening Solutions*. Retrieved from TSF Global Fastening Solutions: https://www.tsftsh.com/docs/documentation/Precargas%20Web.pdf

Xing, W. C., & Wang, Y. Q. (2023). Theoretical and experimental studies on vibration characteristics of bolted joint multi-plate structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 252.

CHAPTER 7

KOMPOZİT MALZEMELERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜNÜN GÜNCEL BİLGİLERLE İNCELENMESİ

ERSAN KIRAR[1]

Giriş

Makro düzeyde bir araya getirilmiş ve birbiri içinde çözünmeyen iki ya da daha fazla bileşenden meydana gelmiş malzemelere kompozit denmektedir. Bu malzemede bileşenlerden bir tanesi matris fazı, diğeri ise takviye fazıdır (Gülmez, 2018:83; Kaya, 2016:5).

Kompozit malzemeler arasında, polimer kompozit malzemeler yüksek mukavemet-ağırlık oranları nedeniyle farklı endüstri alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu malzemeler sürekli otomobil ve uçak endüstrilerinin taleplerini karşılamaktadır (Khalid & ark., 2022:22). Toplam küresel kompozit malzeme üretiminin istatistik verilerini bulmak zor olsa da 2000 yılında 7 milyon tonluk bir çıktı olduğu tahmin ediliyor ve 2006 yılında ise 10 milyona ulaşmıştır. Kompozit malzeme için, polimer-matris pazara hâkim durumdadır, bunların arasında termoset matrisli kompozit

[1] Öğr. Gör. Dr., Harran Üniversitesi, Şanlıurfa Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, Orcid: 0000-0002-7980-4815

malzemeler üçte ikisinden fazlasını oluştururken, ancak termoplastik kompozit malzemeler son yıllarda daha hızlı büyümek katetmiştir (Yang & ark., 2012:16).

Kompozit malzeme üretimin artmasıyla birlikte bertaraf edilecek atık miktarı da gittikçe artıyor. Çöplükler ve yakma gibi geleneksel bertaraf yöntemleri giderek daha kısıtlayıcı hale gelmektedir. Mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm gibi çeşitli teknolojiler ise halihazırda kullanılmaktadır. Ancak kompozit malzemeler için daha sürdürülebilir atık yönetimi üzerine çalışmalar artmıştır (Bernatas & ark., 2021:14).

Bu çalışmada ise farklı takviye ve matris malzemelerinden oluşan kompozit malzemelerin geri dönüşümü üzerinde güncel literatür araştırması yapılmıştır. Yapılan güncel literatür taramasıyla farklı kompozit malzemelerin geri dönüşümünde kullanılan yöntemler/uygulamalar araştırılmıştır. Ayrıca geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanım alanları literatürde incelenmiştir. Elde edilen çalışmayla literatüre güncel geri dönüşüm uygulama metotları ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanım yerlerine ait bilgiler kazandırılmıştır.

Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilen çok fazlı ve yüksek performanslı malzemelerdir. Kompozit malzemeler; sağlamlığı ve esnekliği yeterli olmayan polyester ve/veya plastik matris reçineyle takviye edici aramid, cam ve/veya karbon elyafının bir araya getirilmesi ile elde edilen üstün özelliklere sahip bir malzemedir (Ağırgan, 2023:14; Ulcay & ark., 2002:24; Kaya, 2016:5). Diğer bir deyişe birbirlerinin zayıf yönlerini iyileştirerek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik türdeki bileşenlerden oluşan malzemeler kompozit olarak isimlendirilir (Işık, 2018:102).

Kompozitlerin üretiminin bilinçli ve etkin şekilde kullanılması 1940'lı yıllarda cam takviyeli plastiklerin kullanımıyla başlamıştır. Bunun için radar kubbeleri, ilk uygulamalara örnek olarak gösterilebilir. 1950'li yıllarda ise uçak pervaneleri kompozitlerden üretilmeye başlanmıştır (Eryıldız & ark., 2015:5).

Kompozit malzemede genel olarak aranan özellikler (Işık, 2018:102):

- Kimyasal bileşimleri birbirlerinde farklı yapıda olan ve ber ara yüzeylerle ayrılmış en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmiş olması,
- Kompozitleri oluşturan bileşenlerin hiçbirinin tek başına sahip olmadıkları özellikleri taşıması.

Kompozitler genellikle geleneksel malzemelerin aşağıda belirtilen bazı özelliklerini iyileştirmek için yapılmaktadır. Bu özellikler (Kaya, 2016:5; Ulcay &ark., 2002:24);

• Korozyon dayanımı

• Mukavemet

• Ağırlık

• Elektrik iletkenliği

• Termal dayanım

• Akustik iletkenlik

• Estetik görünüm

Kompozit malzemenin özellikleri (Işık, 2018:102):

-Matris malzemenin özelliklerine

-Takviye malzemesinin özelliklerine

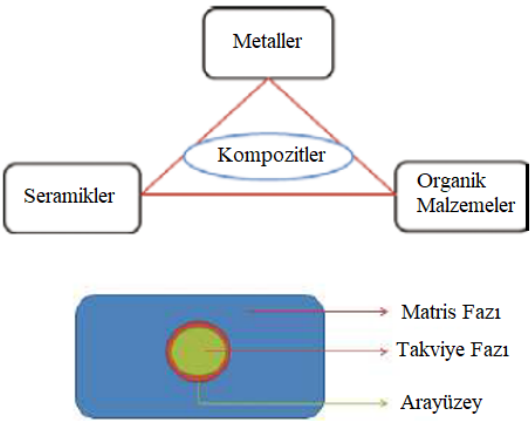
- Matris ve elyaf malzeme oranına

- Elyafların dizilişlerine ve geometriye bağlıdır.

Kompozit Malzemelerin Yapısı

Kompozitler, iki bileşene ait özelliklerin birleşmesi ile daha üstün özellikte kombinasyonlarının elde edildiği çok bileşenli bir malzemedir. Ancak malzemenin bazı özelliklerinde iyileşme sağlanırken, bazılarının ise kötüleşeceği göz önüne alınmalıdır. Kompozit malzemeler genellikle tabakalı, elyaf takviyeli ve parçacık takviyeli olarak üç gruba ayrılır (Özsoy, 2015:192).

Şekil 1. Kompozit malzeme çeşitleri ve yapısı



Kaynak: (Kaya, 2016:5)

-Matris fazı: Matris fazı kompozitlerin ikinci ana bileşenidir. Takviyenin istenilen başarıyı göstermesi uygun olan matris malzemesi seçimine oldukça bağlıdır. Matris fazının görevleri (Ulcay & ark., 2002:24; Işık, 2018:102; Kaya, 2016:5);

• Kuvvetleri takviye elemanına iletmek

• Takviye elemanlarını, oksidasyon ve korozyon gibi ortamın etkilerinden ve olası darbelerden korumak

-Takviye fazı: Takviye fazı, üretimde matris fazın tane büyüklüğünü belirler ve iletilen yükleri paylaşarak hasara karşı direnir (Kaya, 2016:5).

Arayüzey fazı: Takviye elemanı ile matris fazı arasında bağlayıcılık görevi olan ve çoğunlukla kırılgan özellik göstermesine rağmen oluşan herhangi bir kuvveti kırılmaya ve çözülmeye uğramadan takviye elemanına ileten elemandır. Bu bölge kompozit malzemenin elastisite modülünü etkileyen en önemlerden biridir. Bu sebeple kompozit malzemenin dayanıklılığı ara yüzeye oldukça bağlıdır (Kaya, 2016:5).

Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler takviye elemanı (örneğin lif) ve bu elemanları bir arada tutan matristen oluşur. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması çok faklı kriterlere göre yapılabilir. Ancak en yaygın sınıflandırma biçimi, takviye ve matris malzemesine göre yapılmaktadır (Kaya, 2016:5).

Matris malzemeye göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Matris malzemeleri, kompozit malzemenin üretim tekniğine ve kullanım amacına göre polimer, seramik veya metal malzemelerden oluşabilir (Kaya, 2016:5).

-Metal matrisli kompozit malzemeler: Matris fazı çeşitli metal ve metal alaşımı olan kompozit malzemelerdir. Bu kompozit malzemelerde metal esaslı yapı içine gömülen takviye fazı, değişik geometrik biçimlerde olabilir (Kaya, 2016:5).

-Seramik matrisli kompozit malzemeler: Seramik malzemeler, hafif ve yüksek sıcaklığa dayanıklı oldukları için oldukça kullanışlıdırlar. Seramik matrisli kompozit malzemeler çoğunlukla yüksek sıcaklık ortamında çalışması gereken parçalar

için tercih edilir. Kırılgan ve sert olduklarından çok düşük tokluğa ve sünekliğe sahiptirler ayrıca bu malzemeler termal şoklara karşı dayanımları azdır. Bu sebeple genellikle liflerle takviye edilirler (Kaya, 2016:5).

-Polimer matrisli kompozit malzemeler: Polimer matrisli kompozit malzemeler genellikle petrokimya tabanlı ürünlerdir. Polimerik kompozitler korozyona dirençli, işlenmesi kolay, birim kütle başına yük kapasitesi yüksek, uzun süreli kullanıma uygun, şekillendirilebilen malzemelerdir (Kaya, 2016:5).

Takviye ediciye göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozitleri oluşturan takviye elemanına göre sınıflandırma biçimi Şekil 2'de sunulmuştur (Kaya, 2016:5).

Şekil 2. Kompozit malzemenin takviye ediciye göre sınıflandırılması



Kaynak: (Kaya, 2016:5)

Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

-Günlük ve Ticari Hayatta Kullanım: Bu amaçla, çoğunlukla keçe, cam elyafı ve cam dokuma ile polyester reçineden yapılan çeşitli ürünler tercih edilmektedir. Çay tepsisi, küvet, masa–sandalye, tekne, bot ve otomotiv sanayi bu kompozitlerin uygulamalarına örneklerdir (Gülmez, 2018:83).

-Askeri Alanda Kullanım: Kompozit malzemeler askeri alanda yaygın olarak zırh üretiminde de tercih edilmektedir (Gülmez, 2018:83).

-Uzay ve Havacılık Sanayisinde: Kompozitlerin uzay ve havacılık alanında kullanımı başta sağlamlık ve hafiflik özellikleri sayesindedir. Bu alanda amaç daha yüksek hıza ulaşmak, daha az yakıt harcamak ve verimliliği elde etmektir (Gülmez, 2018:83).

Şekil 3. Kompozit malzemelerin kullanım alanları örnekleri



Kaynak: (Gülmez, 2018:83)

Kompozit Malzemelerin Geri Dönüşümü

21. yüzyılda, polimerik kompozit malzemelere olan küresel talep farklı endüstriyel sektörlerde katlanarak artmış ve bu da atık yönetimi zorluklar yaratmıştır. Nüfusun ve farklı polimerlerin tüketiminin katlanarak artması sebebiyle kompozitlerin geri dönüşümü kompozit atıkların yönetimi için oldukça gereklidir. 2050 yılına kadar üretilen plastik türdeki atık miktarının yaklaşık 25 milyar metrik ton olacağı tahmin edilmektedir. Kompozit malzemelerin geri dönüşümü için tek uygulanabilir çözüm ekonomik olarak sürdürülebilir metotlardır (Khalid & ark., 2022:22).

Bir mühendislik malzemesinin geri dönüşümü için genel bir kural olarak, her geri dönüşüm süreci birbirine bağlı olan bir operasyon zincirini içerir. Bu geri dönüşüm zincirinin herhangi bir noktasındaki başarısızlık, geri dönüşüm sürecinin tamamlanamayacağı anlamına gelir (Yang & ark., 2012:16).

Geri dönüşüm çoğunlukla atık malzemelerin yeniden kullanımı olarak ifade edilir ve bazen atıkların geri kazanılması veya malzemelere veya ürünlere, bileşenlere dönüştürülmesi için farklı süreçlere ihtiyaç vardır. Dairesel ekonomi sıfır atık üretimi olarak da bilinir. Çağdaş dünyada, endüstrilerin temel stratejisi kapalı devre geri dönüşüm ile dairesel bir ekonominin yapısını geliştirmektir. Dahası, geri dönüşüm özellikle kompozitler için etkilidir çünkü malzemenin fiziksel özellikleri uygun dönüşüme elverişlidir. Özet ile, dairesel bir ekonomi yalnızca atıkları ve toksik malzemeleri ortadan kaldırmaya yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda uygun mekanik özellikler gösteren ürünler de elde eder (Khalid & ark., 2022:22).

Termoplastik tip matrise sahip kompozitlerin pazar payı termoset olan matris kompozitlere kıyasla çok daha düşük olsa da ilkinin hasar direnci ve kimyasal saldırıya karşı dayanıklılığı, daha iyi geri dönüştürülebilirlik ve daha hızlı bir işleme döngüsü gibi ikincisine göre birkaç avantajı vardır. Isıtıldığı zaman yeniden şekillendirilebilme yetenekleri nedeniyle, termoplastik matris kompozitler yüksek değerli malzemelerin yeniden eritilmesi ve yeniden kalıplanması yoluyla geri dönüştürülebilir (Yang & ark., 2012:16)**.**

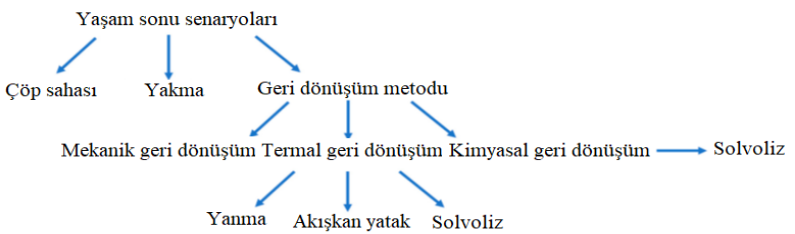
Avrupa Birliği yönergelerine göre, atık geri dönüşümü atık yönetiminin sadece dördüncü en çok istenen yöntemidir. Ancak yönergedeki önleme, en aza indirme ve yeniden kullanım seçenekleri daha elverişlidir. Genel olarak, kompozit malzemelerin atık işleme yöntemleri üç gruba ayrılabilir: mekanik, termal, kimyasal. Bu tür

atıklar için mekanik geri dönüşüm metodu teknolojik süreç açısından en kolay olanlardır, ancak son elde edilen ürün de en az değerlidir. En iyi kalitede malzeme kimyasal geri dönüşüm metotlarıyla elde edilebilir. Ancak kimyasal metotlar hala geliştirilme aşamasındadır ve ticari olarak kullanılmamaktadır (Delvere & ark., 2019:20).

Çöplüklere atılan atıkları sınırlandırmak ve yenilenemeyen kaynakları geri dönüştürerek tekrar kullanmak kompozitlerin birçok uygulama alanları için kullanımını teşvik etmeye yardımcı olacaktır. Kompozit malzemelerin geri dönüşüm sürecinin engelleriyle yüzleşmek, bu sektörün sürdürülebilirliği için oldukça önemlidir. Plastik türdeki kompozitler, bazen bir fiber takviye ile birleştirilmiş bir polimer matristen oluşan malzemelerdir. Hafiflikleri, yüksek termomekanik özellikleri ve uzun ömürleri ile çekici olan bileşimlerinin heterojen yönü, geri dönüşüm sürecini sınırlayan faktörlerden bir tanesidir (Bernatas & ark., 2021:14).

Her ne kadar baskın kompozit malzeme pazarı polimer-matris kompozitlerde termoset tipi olsa da geri dönüşüm aşamasında diğer kompozitler de belirli bir ilgiyi hak ediyor. Özel yapıları nedeniyle, seramik tip matris kompozitler prensip olarak seramikler yüksek sıcaklıklarda eritilmedikçe geri dönüştürülemezken, fiber-metal laminatlar ve metal matris kompozitler iyi geri dönüştürülebilir (Yang & ark., 2012:16).

Şekil 4. Kompozitlerin ömrünün sonundaki senaryolarının temsili gösterimi



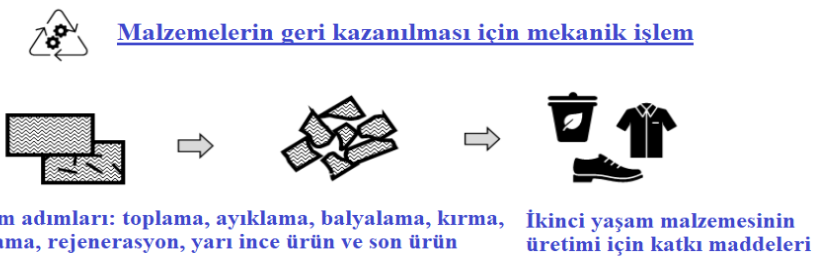
Kaynak: (Krauklis & ark., 2020:33)

Mekanik Geri Dönüşüm

Kompozit malzemelerin mekanik geri dönüşüm süreci, kompozitin 50-100 mm'yi aşmayan daha küçük parçalara ayrılması ile başlar. Daha sonra parçaların boyutu bir çekiç değirmeni veya diğer yüksek hızlı öğütme makinesi kullanılarak 10-50 mm boyut aralığına düşürülür. Daha sonra, elekler yardımı ile kompozit malzeme parçaları iki gruba ayrılır- matris açısından zengin ve lif açısından zengin. Sıralama ve ilk kesme işlemleri daha az enerji tüketir. Süreçteki enerjinin çoğu kırma işleminde tüketilir (Delvere & ark., 2019:20).

Süreç farklı adımlardan oluşur: zorlu ve uzun süreli işleme gerektiren ayırma ve toplama, ardından kırma işlemi ve hurda bileşenlerini daha küçük ve işlenebilir boyutlu parçalara indirgeyen daha ileri ön işlemle devam eder. Daha sonra, malzemeyi küçültmek için yüksek hızlı bir değirmen kullanılır. Geri dönüştürülmüş üründe, 10 mm'ye kadar uzunluktaki küçük lifli malzemeler, 50 mikrondan daha küçük ince tozlara kadar değişen boyutlarda polimer ve lif/dolgu maddelerinin bir karışımıdır. Lifli ürünler lif açısından zengindir ve takviye olarak kullanılırken genellikle dolgu maddesi olarak kullanılır. Bu teknik atmosfer kirliliği üretmediğinden, diğer geri dönüşüm tekniklerine göre ekonomik, sosyal ve çevresel avantajlar sunar (Morici & ark., 2022:12).

Şekil 5. Mekanik geri dönüşüm



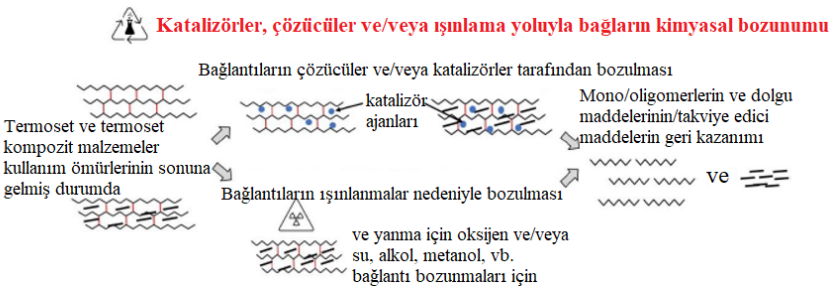
Kaynak: (Morici & ark., 2022:12)

Mekanik geri dönüşüm endüstriyel ölçekte olan bir işlemdir, ancak geri kazanılan dolgu maddeleri bazen silikatlar ve kalsiyum karbonatlar gibi geleneksel dolgu malzemeleriyle ekonomik olarak rekabet edemez. Ayrıca, tekdüze ve kısa olmayan dolgu maddeleri ve lifler geri kazanılabildiğinden, geri dönüştürülmüş olan malzemeler düşük maddi değerlere sahiptir. Bu sebeple, işlem esnasında tasarruf edilen enerji, işlemin genel karlılığını optimize ederek büyük ölçekte daha fazla gelişim için kullanılabilir (Morici & ark., 2022:12).

Termal Geri Dönüşüm

Piroliz, atık maddenin oksijen olmadan 300–700 °C'de ısıtıldığı bir termal atık geri dönüşüm metodur. Isıtma işleminden sonra, sentetik gaz/yağ ve kömür kalır. Geri kazanılan lif takviye malzemesi yeniden kullanılabilir ancak ısıtma sıcaklığına bağlı olarak çok hasarlı olabilir ve kullanımları için çok az seçenekleri olur. Otomotiv alanında, piroliz yöntemiyle geri dönüştürülmüş elyafların kullanımı mümkündür. (Delvere & ark., 2019:20).

Şekil 6. Termal geri dönüşüm



Kaynak: (Morici & ark., 2022:12)

Kimyasal Geri Dönüşüm

Termal ve mekanik işleme teknolojileri ile karşılaştırıldığında, kimyasal geri dönüşüm teknolojisi henüz

geliştirilmemiştir. Çeşitli çözücü malzemeler kullanan farklı kimyasal çözünme sistemleri son zamanlarda laboratuvar ortamında incelenmiştir. Bu yöntemde potansiyel çevresel sorunlar (toksik atıkların oluşumu vb.) çözülmelidir. Proses ölçeğinin artırılması ve daha çevre dostu yapısı sebepleriyle gelecek vaat eden bir yöntemdir. Maliyet ve çevresel sorunları bu yöntemde çözülebilirse, kimyasal geri dönüşüm yöntemi ticari uygulamasında büyük bir potansiyel oluşacaktır. Çünkü bu yöntemde geri dönüştürülmüş elyafta herhangi bir bozunma olmaması ve de-polimerize olmuş reçinenin tekrar yeni reçineye dönüştürülebilmesi mümkündür (Yang & ark., 2012:16).

Kompozit Malzemelerin Geri Dönüşümü Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Literatürde farklı türdeki kompozit malzemeler için farklı geri dönüşüm teknikleri kullanılarak araştırmaların yapıldığı belirlenmiştir. Bu çalışmalara bakıldığında;

Dandy ve ark. (2015), çalışmalarında Polietereterketon termoplastik kompozit malzemenin 623 Kelvin sıcaklıkta 30 dk.'da termal geri dönüşümünü incelemişlerdir. Çalışma sonucunda malzemenin geri dönüşümü için olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Scheelhaase ve ark. (2022), uçaklarda kullanılan kompozit malzemelerin geri dönüşümünü maliyet açısından incelemişlerdir. Çalışma sonucunda uçakların geri dönüşümüyle elde edilebilecek kazancın iyi olduğu bu doğrultuda çalışmaların ilerde hızlanacağını vurgulamışlardır.

Fonte ve ark. (2021), çalışmalarında termoset matrisli kompozit türbin kanatlarının geri dönüşümünün hem mekanik hem de termal yöntemli incelemişlerdir. Mekanik yöntem ucuz olsa da malzemenin dayanımı düşürdüğünü belirtmişlerdir. Termal işlemin ise pahalı bir yöntem olduğunu ifade etmişlerdir.

Ribeiro ve ark. (2015), termoset matrisli kompozit malzemenin geri dönüşümünü mekanik yöntem ile öğüterek araştırmışlardır. Çalışmada belirli boyutlara öğüttükleri atıkları tekrar kompozit malzemeye dolgu olarak kullanmışlardır. Çalışma sonucunda dolgunun dayanıma oluma etkisini belirtmişlerdir.

Zhao ve ark. (2022), çalışmalarında doğal fiber takviyeli termoplastik kompozit malzemenin geri dönüşümünü termal yöntemle incelemişlerdir. Çalışma sonucunda geri dönüşüm tekrarı arttıkça malzeme dayanımlarını düştüğünü belirtmişlerdir.

Fogagnolo ve ark. (2003), Al_2O_3 takviyeli alüminyum matrisli metal matris kompozit malzemenin geri dönüşümünü termal yöntemle incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kullanılan yöntemle geri dönüşümden olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Castro ve ark. (2013), termoset kompozit malzemenin öğütülerek tekrar kompozit malzemeye dolgu olarak kullanımını deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı oranlarda kattıkları dolguların kompozit malzemenin dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir.

Saccani ve ark. (2019), yapı sektöründe kullanılan karbon epoksi termoset kompozit malzemenin mekanik geri dönüşümünü öğüterek incelemişlerdir. Öğüttükleri malzemeleri dolgu olarak tekrar kullanmışlardır. Çalışma sonucunda dayanım artışları elde ederek geri dönüşüm için olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Bruijn ve ark. (2019), çalışmalarında termoplastik matrisli ve uzun fiber takviyeli kompozit malzemenin termal geri dönüşümünü incelemişlerdir. Çalışma sonucunda geri dönüşüm açısından olumlu sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Asmatulu ve ark. (2014), kompozit malzemelerin geri dönüşüm yöntemleri ve geri dönüştürülen malzemelerin kullanım alanlarını kapsayan derleme bir çalışma sunmuşlardır.

Beauson ve ark. (2014), çalışmalarında termoset matrisli kompozit türbin kanatlarının geri dönüşümü üzerine derleme çalışması hazırlayarak önerilerde bulunmuşlardır.

Colucci ve ark. (2017), polipropilen/cam fiber kompozit malzemenin mekanik geri dönüşümü sonrası yeni üretilen kompozit malzemede kullanımını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma sonucunda az miktarda dayanım düşüşleriyle otomotiv sektörü için hala uygun bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir.

Ceclan ve ark. (2013), mekanik öğütülmüş karbon/epoksi kompozit malzeme, kum ve epoksi reçine kullanarak geri dönüşüm yeni bir malzeme elde etmişledir. Elde ettikleri malzemenin inşaat sektörü için betona kıyasla daha iyi mekanik özellikleri olması nedeniyle uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Job ve ark. (2013), çalışmalarında otomotiv ve inşaat sektöründe sıklıkla kullanılan cam fiber kompozit malzemenin geri dönüşümü üzerine literatür verilerine dayanarak önerilerde bulunmuşlardır.

Hagnell ve ark. (2019), cam veya karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin geri dönüşümü sonrası dayanımlarda yaklaşık %50 düşüş olsa da maliyette azalma yönüyle uygulamalarda avantaj sağlayabileceğini belirtmişlerdir.

Khalid ve ark. (2022), çalışmalarında farklı kompozit malzemelerin geri dönüşüm yöntemlerini literatür destekli incelemişlerdir. Çalışma soncunda kompozit malzemelerin geri dönüşümüyle doğaya ve ekonomiye ciddi katkılar sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Giorgini ve ark. (2020), birçok alanda sıklıkla tercih edilen karbon fiber kompozit malzemenin geri dönüşüm yöntemlerini literatürden incelemişlerdir.

Bernatas ve ark. (2021), çalışmalarında termoplastik matrisli kompozit malzemenin geri dönüşümünü incelemişlerdir. Çalışma sonucunda termoset malzemelere kıyasla termoplastik malzemelerin geri dönüşümlerinin tekrar eritilme metoduyla daha kolay olduğunu vurgulamışlardır.

Krauklis ve ark. (2020), kompozit malzemeleri gömerek kurtulmak yerine kullanılabilecek alternatif geri dönüşüm yöntemlerine vurgu yapmışlardır.

Borjan ve ark. (2021), çalışmalarında karbon fiber kompozit malzemenin kimyasal geri dönüşümünü incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda uygulanabilir olumlu sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Morici ve ark. (2022), termoset matrisli kompozit malzemelerin geri dönüşümü için mekanik, termal ve kimyasal yöntemleri avantaj ve dezavantajlarıyla literatürdeki verilerle incelemişlerdir.

Shehab ve ark. (2023), çalışmalarında kullanım ömrünü tamamlayan kompozit malzemelerin gömülerek imha edilmesi haricinde kullanılabilecek yöntemleri ekonomik katkısı ve geri dönüştürme potansiyelleri açısından literatürde araştırmışlardır.

Liu ve ark. (2019), uzun fiber takviyeli termoplastik kompozit malzemeleri kısa boyutlarda keserek tekrar kompozit malzeme üretiminde kullanmışlardır. Çalışma sonucunda katkının dayanıma olumlu etkisinin olduğunu belirtmişlerdir.

Protsenko ve ark. (2019), çalışmalarında epoksi /vinil ester matrisli ve fiber takviyeli kompozit malzemenin geri dönüşümünü termal işlemle denemiştir. Çalışma sonucunda elde ettikleri geri dönüştürülmüş fiber takviye elemanlarında az bir miktarda düşüş ile hala kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Protsenko ve ark. (2022), cam/epoksi kompozit malzemenin termal geri dönüşümü sonrası elde ettikleri geri dönüştürülmüş elyaflarla tekrar kompozit malzeme üretmişlerdir. Çalışma sonucunda malzemenin eğme dayanımında orjinaline kıyasla %8,5 dayanım düşüşü olduğunu tespit etmişlerdir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada çeşitli kompozit malzemelerin farklı yöntemler kullanılarak geri dönüşümü üzerine kapsamlı bir literatür incelemesi yapılmıştır. Literatür araştırmasında güncel çalışmalara daha çok yer vererek güncel yöntemler ve uygulamalar üzerinde durulmuştur. İncelemeler sonucunda aşağıdaki bilgiler belirlenmiştir;

- Literatür incelemesi sonucunda farklı matris/takviye malzemesi türüne sahip kompozit malzemeler için mekanik, termal veya kimyasal geri dönüşüm yöntemlerinin kullanıldığı belirlenmiştir.
- Çalışmalarda kimyasal geri dönüşümün mevcut durumda birçok sıkıntısı olması nedeniyle daha az tercih edildiği görülmüştür.
- Literatür incelemesinde kompozit malzemelerin geri dönüşüm yönteminde en çok tercih edilen yöntemin mekanik geri dönüşüm olduğu tespit edilmiştir. Bu yöntemin daha kolay uygulanabilir ve ucuz olması nedeniyle kullanıldığı görülmüştür.

Kaynakça

Gülmez, S. (2018). Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. Putech & Composites, 45.

Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Ahmed, W. & Arshad, H. (2022). Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials. Sustainable Materials and Technologies, 31, 00382.

Yang, Y., Boom, R., Irion, B., Heerden, D., Kuiper & P., Wit, H. (2012). Recycling of composite materials. Chemical Engineering and Processing, 51, 53– 68.

Bernatas, R., Dagreou, S., Despax-Ferreres, A. & Barasinski A. (2021). Recycling of fiber reinforced composites with a focus on thermoplastic composites. Cleaner Engineering and Technology, 5, 100272.

Ağırgan, M. (2023). Otomotiv endüstrisinde kompozit malzeme kullanımı. Electronic Journal of Vocational Colleges-December/Aralık 2023; 13(2); 51-64.

Ulcay, Y., Akyol, M., Gemci, R. (2002). Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metotlarının etkisinin incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Cilt 7, Sayı 1.

Işık, A. (2008). Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Eryıldız, E. & Eker, A. A. (2015). Savunma sanayinde kullanılan ileri kompozit malzemeler ve uygulama alanları. International Journal of Engineering Research and Development, Vol.7, No.4, 2015, 1st International Defense Industry Symposium Special Issue.

Özsoy, N. (2015). Polimer esaslı fiber takviyeli kompozit malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Delvere, I., Iltına, M., Shanbayev, M., Abıldayeva, A., Kuzhamberdıeva, S., Blumberga, D. (2019). Evaluation of polymer matrix composite waste recycling methods. Environmental and Climate Technologies, vol. 23, no. 1, pp. 168–187.

Krauklis, A. E., Karl, C. W., Gagani, A. I. & Jørgensen, J. K. (2020). Composite material recycling technology—state-of-the-art and sustainable development for the 2020s. J. Compos. Sci., 5, 28.

Morici, E., Dintcheva, N.T. (2022). Recycling of Thermoset Materials and Thermoset-Based Composites:Challenge and Opportunity. Polymers, 14, 4153.

Dandy, L.O., Oliveux, G., Wood, J., Jenkins, M.J., Leeke G.A. (2015). Accelerated degradation of Polyetheretherketone (PEEK) composite materials for recycling applications. Polymer Degradation and Stability, 112, 52-62.

Scheelhaase, J., Müller, L., Ennen, D. & Grimme, W. (2022). Economic and environmental aspects of aircraft recycling. Transportation Research Procedia, 65, 3–12.

Fonte, R. & Xydis, G. (2021). Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. Journal of Environmental Management, 287,112269.

Ribeiroa, M.C.S., Meira-Castro, A.C., Silva, F.G., Santosb J., Meixedo, J.P., Fiúzaa, A., Dinisa, M.L. & Alvimb, M.R. (2015). Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate andfiller replacement for concrete-polymer composite materials: A casestudy regarding GFRP pultrusion wastes. Resources, Conservation and Recycling, 104, 417–426.

Zhao, X., Copenhaver, K., Wang, L., Korey, M., Gardner, D. J., Li, K., Lamm, M. E., Kishore, V., Bhagia, S., Tajvidi, M., Tekinalp, H., Oyedej,i O., Wasti, S., Webb, E., Ragauskas, A. J., Zhu, H., Peter, W. H. & Ozcan, S. (2022). Recycling of natural fiber composites: Challenges and opportunities. Resources, Conservation & Recycling, 177, 105962.

Fogagnolo, J.B., Ruiz-Navas, E.M., Simón, M.A. & Martinez, M.A. (2003). Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion. Journal of Materials Processing Technology, 143–144, 792–795.

Meira Castro, A.C., Ribeiro, M.C.S., Santos, J., Meixedo, J.P., Silva, F.J.G., Fiúza, A., Dinis, M.L. & Alvim, M.R. (2013). Sustainable waste recycling solution for the glass fibre reinforced polymer composite materials industry. Construction and Building Materials, 45, 87–94.

Saccani, A., Manzi, S., Lancellotti, I. & Lipparini, L. (2019). Composites obtained by recycling carbon fibre/epoxy composite wastes in building materials. Construction and Building Materials, 204, 296–302.

Bruijn, T. A. de, Vincent, G. & Hattum, F. W.J. van. (2017). Recycling c/pps laminates ınto long fibre thermoplastic composites by low shear mixing. 21st International Conference on Composite Materials, 20-25th August.

Asmatulu, E., Twomey, J. & Overcash, M. (2014). Recycling of fiber-reinforced compositesand direct structural compositerecycling concept. Journal of Composite Materials, Vol. 48(5) 593–60.

Beauson, J., Lilholt, H. & Brøndsted, P. (2014). Recycling solid residues recovered fromglass fibre-reinforced composites –A review applied to wind turbineblade materials. Journal of Reinforced Plastic sand Composites, Vol. 33(16) 1542–1556.

Colucci, G., Simon, H., Roncato, D., Martorana, B. & Badini, C. (2017). Effect of recycling on polypropylene composites reinforced with glass fibres. Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 30(5) 707–723.

Ceclan, V. A, Bere, P., Borzan, M., Grozav, S. & Borzan, C. (2013). Development of Environmental Technology for Carbon Fibre Reinforced Materials Recycling. Materiale Plastice, 50, No. 2.

Job, S. (2013). Recycling glass fibre reinforced composites – history and progress. Reinforced plastics, 0034-3617/13.

Hagnell, M.K. & Åkermo, M. (2019). The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials. Journal of Cleaner Production, 223, 957-968.

Giorgini, L., Benelli, T., Brancolini, G. & Mazzocchetti, L. (2020). Recycling of carbon fiber reinforced composite waste to close their life cycle in a cradle-to-cradle approach. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 26:100368.

Borjan, D., Knez, Ž. & Knez, M. (2021). Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Composites—Difficulties and Future Perspectives. Materials, 14, 4191.

Shehab, E., Meiirbekov, A., Amantayeva, A. & Tokbolat, S. (2023). Cost Modelling for Recycling Fiber-Reinforced Composites: State-of-the-Art and Future Research. Polymers, 15, 150.

Liu, B., Zhu, P., Xu A. & Bao, L. (2019). Investigation of the recycling of continuous fiber-reinforced thermoplastics. Journal of Thermoplastic Composite, Materials, Vol. 32(3) 342–356.

Protsenko, A.E., Pimenova, E.D. & Petrov, V.V. (2019). Recycling of glass fibers sheets from thermoset reinforced plastic using thermolysis method. Mater. Sci. Eng. 734 012185.

Protsenko, A. E. & Petrov, V. V. (2022). Recycling of Fiberglass fillers obtained from polymer composites based on an epoxy vinyl ester binder, Mechanics of Composite Materials, Vol. 58, No. 4, September.

CHAPTER 8

MİKRO VE MAKRO ÖLÇEKLİ BİYOGAZ TEKNOLOJİLERİNİN ISITMA, SOĞUTMA VE GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ UYGULAMALARI

NEVFEL YUNUS COŞKUN[1]

Giriş

Küresel enerji talebinin artması ve fosil yakıtların çevresel etkilerinin giderek daha fazla fark edilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarını stratejik bir öncelik haline getirmiştir. Yenilenebilir enerji, doğada kendini sürekli yenileyebilen kaynaklardan elde edilen enerji türlerini ifade etmektedir (Panwar vd., 2011; Pata, 2025). Bu kaynaklar, fosil yakıtların aksine, sınırsız ve çevresel sürdürülebilirlik ilkelerine uygun bir enerji teminini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, enerji arz güvenliğini artırır ve karbon emisyonlarını azaltarak iklim değişikliği ile mücadelede kritik bir rol oynar (Irena, 2019; Yana vd., 2025).

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik, jeotermal enerji ve biyokütle enerji sistemleri yer almaktadır. Her bir enerji kaynağının kendine özgü avantajları bulunmakla birlikte, biyokütle enerji sistemleri özellikle enerji

[1] Öğr. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri, Orcid: 0000-0002-0464-3818

üretiminde organik atıkların etkin bir şekilde değerlendirilmesini sağlamasıyla öne çıkmaktadır (Demirbaş, 2008; Mohaghegh vd., 2025; Bektaş ve Altaş, 2025).

Biyokütle, bitkisel ve hayvansal kaynaklı organik maddelerin enerji üretiminde kullanılmasını ifade etmektedir. Bu enerji kaynağı; odun, tarımsal atıklar, hayvansal atıklar, belediye katı atıkları ve algler gibi geniş bir yelpazeye sahiptir (McKendry, 2002). Biyokütlenin temel avantajı, doğada yaygın olarak bulunması ve farklı ölçeklerde enerji üretimine uyarlanabilir olmasıdır. Biyokütle enerjisi, karbon nötr bir süreçle enerji üretimi sağlayarak çevresel etkileri minimuma indirmektedir. Bununla birlikte, atık yönetimini entegre bir biçimde gerçekleştirerek ekonomik fayda sağlamaktadır (Zhang, 2025; Liu vd., 2025).

Biyogaz, biyokütlenin anaerobik fermantasyon yoluyla mikrobiyal bir süreçte ayrışması sonucu üretilen metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) ağırlıklı bir gaz karışımıdır. Bu süreçte, organik materyaller oksijensiz bir ortamda mikroorganizmalar tarafından parçalanır ve enerji üretimi için kullanılabilecek biyogaz ortaya çıkar (Weiland, 2010). Biyogazın temel bileşeni olan metan, yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir gaz olup elektrik, ısıtma ve soğutma gibi çeşitli enerji uygulamalarında kullanılabilir ().

Biyogaz teknolojisi, sürdürülebilir enerji sistemlerinin önemli bir bileşenidir. Özellikle, organik atıkların enerji üretiminde değerlendirilmesi, atık yönetimi sorunlarının çözümüne katkı sağlarken, enerji arzında çeşitlilik ve güvenlik sağlar (Holm-Nielsen vd., 2009). Biyogaz üretim sistemleri, karbon emisyonlarını azaltarak iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol oynamaktadır (Jepleting vd., 2025). Ayrıca, enerji üretimi sırasında oluşan yan ürünler, tarımda gübre olarak kullanılabilir ve böylece döngüsel ekonomi ilkelerini destekleyebilir. Hem mikro hem de makro ölçeklerde uygulanabilirliği sayesinde, biyogaz teknolojisi, yerel enerji ihtiyaçlarını karşılamanın yanı sıra endüstriyel enerji

üretimiyle de ne kadar geniş bir kullanım alanı sunmaktadır (Rodrigues vd., 2025).

Biyogazın enerji sektöründeki rolü, enerji verimliliğini artırmaya yönelik gelişmiş teknolojiler ve inovasyonlarla daha da güçlenmektedir. Özellikle yenilikçi kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri, biyogazın kullanımını daha etkili ve sürdürülebilir hale getirmiştir (Angelidaki vd., 2011). Dolayısıyla, biyogaz teknolojisi, enerji güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik faydalar açısından stratejik bir öneme sahiptir (Luo vd., 2024).

Mikro ve makro sistemlerin enerji sektöründeki rolü

Mikro biyogaz sistemleri, genellikle küçük ölçekli enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tasarlanır. Bu sistemler, özellikle kırsal alanlarda ve bireysel tüketiciler için yerel enerji üretimini mümkün kılar (Castillo-Leon vd., 2024). Anaerobik fermantasyon yoluyla hayvansal gübre, tarımsal atıklar veya organik evsel atıklardan enerji üreten mikro sistemler, şu temel avantajları sunar (Vindiš vd., 2024):

- Yerel Enerji Üretimi ve Enerji Güvenliği: Mikro biyogaz sistemleri, enerji kaynağına bağımlılığı azaltarak yerel enerji ihtiyaçlarını karşılar. Bu sistemler, enerji altyapısının sınırlı olduğu veya enerjiye erişimin zor olduğu bölgelerde önemli bir çözüm sunmaktadır (Bond ve Templeton, 2011).
- Atık Yönetimi ve Çevresel Katkılar: Mikro sistemler, organik atıkları enerjiye dönüştürerek çevresel sorunların azaltılmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca, atıkların bertarafı sırasında oluşan metan gazının atmosfere salınımını engelleyerek karbon ayak izini düşürmektedir (Irena, 2017).

- Esneklik ve Düşük Kurulum Maliyeti: Mikro sistemlerin kurulumu, genellikle düşük maliyetlidir ve teknolojik açıdan basit çözümler sunar. Bu da bireysel kullanıcılar ve küçük işletmeler için uygulanabilirliğini artırmaktır (Rodrigues vd., 2025).
- Yerel Ekonomiye Katkılar: Mikro biyogaz sistemleri, yerel iş gücü oluşturabilir ve enerji üretiminden elde edilen yan ürünlerin (örneğin organik gübre) kullanılabilirliği sayesinde kırsal ekonomilere katkı sağlayabilir (Jameel vd., 2024),

Makro biyogaz sistemleri, geniş ölçekli enerji üretimi için tasarlanmış büyük tesislerdir. Endüstriyel seviyede enerji üretimi sağlayan bu sistemler, enerji sektöründe kapsamlı etkiler yaratmaktadır (Grabovskyi vd., 2023):

- Endüstriyel ve Bölgesel Enerji Üretimi: Makro sistemler, büyük miktarda biyokütleyi işleyerek geniş ölçekli enerji üretimi gerçekleştirir. Bu enerji, elektrik şebekesine entegre edilebilir ve bölgesel enerji ihtiyaçlarını karşılayabilir (Weiland, 2010).
- Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik: Kojenerasyon (Combined Heat and Power-CHP) ve trijenerasyon teknolojilerinin kullanımı, makro sistemlerin enerji verimliliğini artırır. Aynı süreçte hem elektrik hem de ısı üreterek kaynakların maksimum düzeyde kullanılmasını sağlar (Angelidaki vd., 2011).
- Karbon Emisyonlarının Azaltılması: Fosil yakıtların yerine biyogazın kullanımı, karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, endüstriyel ölçekte biyogaz üretimi, ulusal ve uluslararası karbon azaltım hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olabilir (Pietsch vd., 2002).

- Enerji Şebekesine Entegrasyon: Makro sistemler, merkezi enerji şebekesine enerji sağlayarak enerji arzını çeşitlendirilebilir ve güvence altına alabilir. Bu durum, özellikle enerji tüketiminin yüksek olduğu bölgelerde talebi karşılamak açısından önemlidir (Holm-Nielsen vd., 2009).
- Ekonomik Katkılar ve Döngüsel Ekonomi: Büyük ölçekli biyogaz sistemleri, enerji üretiminden elde edilen gübre ve diğer yan ürünlerin ticari olarak değerlendirilmesini mümkün kılar. Bu, döngüsel ekonomi anlayışını destekler ve enerji üretiminin ekonomik sürdürülebilirliğini artırır (Dobre vd., 2014).

*Tablo1. Mikro ve Makro Sistemlerin Karşılaştırması (*Jin *vd., 2017)*

Kriter	Mikro Sistemler	Makro Sistemler
Kapasite	Küçük ölçekli, bireysel veya yerel enerji ihtiyaçları	Endüstriyel ve bölgesel enerji üretimi
Kurulum Maliyeti	Düşük	Yüksek
Uygulama Alanı	Kırsal bölgeler, bireysel kullanım	Kırsal bölgeler, tesis kullanımı
Çevresel Katkı	Yerel atık yönetimi	Geniş ölçekli karbon azaltımı

Mikro ve makro biyogaz sistemleri, enerji sektöründe hem yerel hem de endüstriyel ölçekte sürdürülebilir enerji çözümleri sunar. Mikro sistemler, bireysel ve yerel enerji ihtiyaçlarını karşılamada esneklik sağlarken, makro sistemler geniş ölçekli enerji üretiminde verimlilik ve sürdürülebilirlik sunar. Her iki sistem de enerji güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır (Marchi vd., 2015; Jin vd., 2017).

Mikro Biyogaz Teknolojisi

Mikro biyogaz teknolojisi, yerel ve küçük ölçekli enerji ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanmış yenilikçi bir çözüm olup, genellikle bireysel hanelerde, küçük çiftliklerde veya kırsal alanlarda uygulanmaktadır. Bu sistemler, tarımsal atıklar, hayvansal gübre ve organik evsel atıkların anaerobik fermantasyon yoluyla enerjiye dönüştürülmesini sağlamaktadır (MosayebNezhad vd., 2019). Mikro biyogaz sistemleri, düşük maliyetli kurulumu ve kolay işletilebilirliği sayesinde enerjiye erişimin sınırlı olduğu bölgelerde enerji güvenliğini artırırken, çevresel faydalar sunmaktadır. Elde edilen biyogaz, ısıtma, pişirme veya küçük ölçekli elektrik üretiminde kullanılabilirken, fermantasyon sonucu ortaya çıkan yan ürünler, yüksek kaliteli organik gübre olarak değerlendirilebilir. Mikro biyogaz teknolojisi, karbon emisyonlarını azaltması ve döngüsel ekonomiyi desteklemesiyle, sürdürülebilir enerji dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır (DeSouza vd., 2013; Deng vd., 2020).

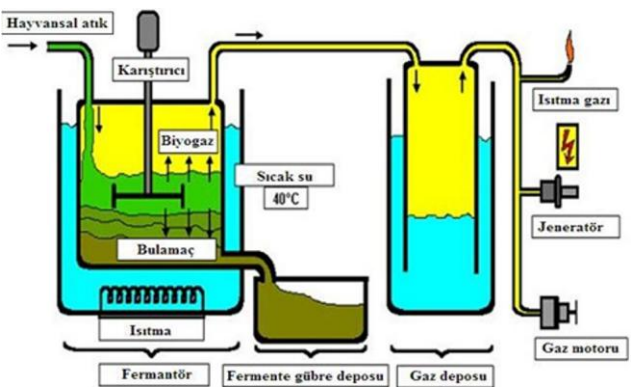
Endüstriyel ve bölgesel enerji üretiminde mikro sistemler

Endüstriyel ve bölgesel enerji üretiminde mikro sistemler, geleneksel enerji üretim ve dağıtım sistemlerine alternatif bir yaklaşım sunarak verimlilik, sürdürülebilirlik ve güvenilirlik açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu sistemler, küçük ölçekli ve modüler yapıda olup, enerji ihtiyacının olduğu yere yakın konumlandırılarak iletim kayıplarını minimize eder ve enerji verimliliğini artırmaktadır (Knowles vd., 2004). Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştıran mikro sistemler, güneş, rüzgar, hidroelektrik ve biyokütle gibi kaynaklardan elde edilen enerjiyi kullanarak karbon emisyonlarını azaltmakta ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, merkezi şebekeye bağımlılığı azaltarak enerji güvenliğini artırır ve özellikle kırsal veya ulaşılması zor bölgelerde enerji erişimini sağlar (Ahmad vd., 2019).

Endüstriyel alanda, mikro sistemler fabrikalar, veri merkezleri ve ticari binalar gibi enerji yoğun tesislerde kullanılarak enerji maliyetlerini düşürebilir ve kesintisiz enerji sağlayabilir. Üretim süreçlerinde ortaya çıkan atık ısıyı geri kazanarak enerji verimliliğini daha da artırabilir ve işletmelerin çevresel etkilerini azaltabilirler. Mikro sistemler, endüstriyel tesislerin enerji yönetimini optimize ederek, enerji tüketimini izleme, kontrol etme ve talep tarafı yönetimi gibi olanaklar sunar. Bu sayede, enerji maliyetleri düşürülürken aynı zamanda enerji arz güvenliği de sağlanmış olur (Fabrizio vd., 2017).

Bölgesel ölçekte ise, mikro şebekeler oluşturarak yerel toplulukların enerji ihtiyaçlarını karşılamak, şebeke kesintilerine karşı direnci artırmak ve enerji bağımsızlığını desteklemek mümkündür. Mikro şebekeler, özellikle ada toplulukları, kırsal alanlar ve afet bölgeleri gibi merkezi şebekeye erişimin sınırlı olduğu yerlerde kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, yerel kaynakları kullanarak enerji üretimine olanak tanır ve toplulukların kendi enerjilerini yönetmelerine imkân sağlar (DeSouza vd., 2013).

Şekil 1 Mikro biyolojik gaz prosesi



Kaynak: Gaz Üretimi ve Biyogaz Ekipmanları, 2025

Mikro sistemler, endüstriyel ve bölgesel enerji üretiminde merkezi şebekelere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Bu

sistemler, merkezi olmayan coğrafi olarak dağınık konfigürasyonları sayesinde enerji iletim kayıplarını minimize eder, yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu kolaylaştırır ve karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlar. Özellikle endüstriyel uygulamalarda atık ısının geri kazanımı gibi yöntemlerle enerji verimliliği artırılırken, bölgesel ölçekte mikro şebekeler enerji güvenilirliğini ve bağımsızlığını desteklemektedir. Şekil 1'de gösterilen mikro biyolojik gaz prosesi, bu sistemlerin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla nasıl entegre edilebileceğine dair somut bir örnek sunmaktadır. Biyokütle gibi yerel kaynakların kullanımıyla enerji üretimi, sürdürülebilirliği artırmanın yanı sıra kırsal ve izole bölgelerde enerji erişimini de kolaylaştırmaktadır. Mikro sistemlerin akıllı şebeke teknolojileri ve enerji depolama çözümleriyle birleştirilmesi, gelecekte enerji sistemlerinin daha esnek ve verimli hale gelmesini sağlayacaktır (Yanine ve Sauma, 2013).

Isıtma ve güç sistemlerinde mikro biyogaz uygulamaları

Mikro biyogaz sistemleri, organik atıkların anaerobik çürümesiyle elde edilen biyogazı kullanarak küçük ölçekli ısı ve elektrik üretimi sağlayan teknolojilerdir. Bu sistemler, özellikle kırsal alanlarda, çiftliklerde ve küçük işletmelerde enerji ihtiyacını karşılamak için sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Organik atıklar, hayvan gübresi, bitki artıkları, gıda atıkları ve evsel atık sular gibi çeşitli kaynaklardan elde edilebilir. Bu atıkların mikro biyogaz sistemlerinde işlenmesi hem atık yönetimine katkıda bulunmakta hem de yenilenebilir enerji üretimine olanak sağlamaktadır (Farhad vd., 2010).

Mikro biyogaz sistemlerinin en önemli avantajlarından biri, enerji üretimi ile atıkların değerlendirilmesini ve çevresel etkilerinin azaltılmasını sağlamasıdır. Biyogaz üretimi sırasında ortaya çıkan fermantasyon artığı, değerli bir organik gübre olarak kullanılabilir. Bu sayede, kimyasal gübre kullanımının azaltılması ve toprak

sağlığının iyileştirilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca, mikro biyogaz sistemleri, metan gazının atmosfere salınımını önleyerek sera gazı emisyonlarının azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır. Metan, karbondioksite göre çok daha güçlü bir sera gazı olmasından dolayı küresel ısınmaya önemli ölçüde zararı bulunmaktadır (Hosseini vd., 2016).

Mikro biyogaz sistemleri, farklı kapasitelerde ve konfigürasyonlarda tasarlanabilir. Sistemin boyutu ve karmaşıklığı, işlenecek atık miktarına, enerji ihtiyacına ve uygulama alanına bağlı olarak değişir. Evsel uygulamalarda kullanılan küçük ölçekli sistemler, genellikle mutfak atıklarını işleyerek yemek pişirme ve sıcak su ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir. Daha büyük ölçekli sistemler ise, çiftliklerde hayvan gübresini işleyerek elektrik üretimi, ısıtma ve seraların ısıtılmasında kullanılabilir (Su vd., 2018).

Sistem tasarımı ve kapasitesi, atık miktarı, enerji ihtiyacı ve uygulama alanına göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin, Hindistan'da 1-10 m^3 kapasiteli ev tipi sistemler mutfak atıklarının değerlendirilmesinde kullanılırken (Gillon vd., 2024), Çin'de 50-500 m^3 kapasiteli çiftlik sistemleri hayvansal atıkların yönetiminde yaygın olarak uygulanmaktadır (Wang vd., 2020). Avrupa Birliği ülkelerinde ise mikro biyogaz teknolojileri, Yenilenebilir Enerji Direktifi (2018) kapsamında desteklenmekte ve özellikle Almanya, Danimarka ve İtalya'da tarımsal işletmelerde entegre enerji sistemleri olarak kullanılmaktadır (Avrupa Biyogaz Birliği, 2020; European Commission, 2020; Vindiš vd., 2024). Türkiye'de ise GAP Bölgesi'nde pilot uygulamalar başlatılmış ve 5-20 kW elektrik üretim kapasiteli sistemler test edilmiştir (Hesar vd., 2021).

Sonuç olarak, mikro biyogaz sistemleri, atık yönetimi, yenilenebilir enerji üretimi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması gibi çoklu faydalar sunan sürdürülebilir bir teknolojidir. Bu sistemlerin yaygınlaşması, özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji erişiminin artırılması, kırsal kalkınmanın desteklenmesi ve çevresel

sürdürülebilirliğin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Mikro biyogaz teknolojisinin geliştirilmesi ve uygulanması, geleceğin enerji sistemlerinde önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir (Ahmad vd., 2019

Güç sistemlerinde mikro biyogaz uygulamaları

Mikro biyogaz sistemleri, organik atıkların anaerobik çürümesi yoluyla elde edilen biyogazı kullanarak küçük ölçekli enerji üretimi sağlayan teknolojilerdir. Bu sistemler, merkezi enerji şebekelerine erişimin sınırlı olduğu kırsal alanlarda, çiftliklerde ve küçük işletmelerde enerji ihtiyacını karşılamak için sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Hayvan gübresi, bitki artıkları, gıda atıkları ve evsel atık sular gibi çeşitli organik atık kaynakları, mikro biyogaz sistemlerinde değerlendirilerek enerjiye dönüştürülebilir. Bu sayede, hem atık yönetimine katkıda bulunulur hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilir (MosayebNezhad vd., 2019; Vindiš vd., 2024).

Mikro biyogaz sistemlerinin güç sistemlerine entegrasyonu, enerji verimliliğini artırmak ve farklı enerji ihtiyaçlarını karşılamak için çeşitli teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilir. Kojenerasyon sistemleri, biyogazın yakılmasıyla aynı anda hem elektrik hem de ısı üretimi sağlar. Bu sistemler, özellikle ısıtma ihtiyacının yüksek olduğu konutlarda, seralarda ve endüstriyel tesislerde enerji maliyetlerini düşürmek ve enerji verimliliğini artırmak için ideal bir çözümdür. Trijenerasyon sistemleri ise, kojenerasyon sistemine ek olarak soğutma üretimi de sağlayarak enerji kullanımını optimize etmektedir (Pietsch vd., 2002).

Biyogazın elektrik üretiminde kullanımı, içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri ve yakıt hücreleri gibi farklı teknolojilerle gerçekleştirilebilir. İçten yanmalı motorlar, yaygın olarak kullanılan ve farklı biyogaz kalitelerine uyum sağlayabilen bir teknolojidir. Gaz türbinleri, daha yüksek verimlilikte çalışırken, yakıt hücreleri ise

daha temiz ve sessiz bir enerji üretim yöntemi sunmaktadır. Biyogazın elektrik üretiminde kullanımı, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak, sera gazı emisyonlarını düşürmekte ve enerji güvenliğini artırarak sürdürülebilir bir enerji geleceğine katkıda bulunmaktadır (Yana vd., 2025).

Mikro biyogaz sistemlerinin güç sistemlerine entegrasyonu, akıllı şebekeler ve enerji depolama sistemleri gibi yenilikçi teknolojilerle daha da geliştirilebilir. Akıllı şebekeler, enerji üretimini ve tüketimini optimize ederek enerji verimliliğini artırırken, enerji depolama sistemleri ise yenilenebilir enerji kaynaklarının aralıklı doğasını dengeleyerek enerji arz güvenliğini sağlamaktadır. Bu sayede, mikro biyogaz sistemleri, enerji sektörünün karbonsuzlaştırılmasında ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Bagdadee vd., 2025; Farhad vd., 2010)

1. Kojenerasyon ve trijenerasyon teknolojileri

Mikro biyogaz sistemlerinde kojenerasyon ve trijenerasyon teknolojileri, enerji verimliliğini maksimize etmek ve farklı enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Kojenerasyon, aynı anda hem elektrik hem de ısı üretimini sağlayan bir sistemdir (Ahmad vd., 2019). Biyogaz, bir motor veya türbinde yakılarak elektrik üretirken, atık ısı da ısıtma, soğutma veya endüstriyel proseslerde kullanılabilir. Trijenerasyon ise, kojenerasyon sistemine ek olarak soğutma üretimi de sağlayan bir teknolojidir. Absorpsiyonlu soğutma sistemleri veya konveksiyonel soğutma sistemleri kullanılarak, atık ısı soğutma enerjisine dönüştürülebilir. Bu sayede, mikro biyogaz sistemleri, elektrik, ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını aynı anda karşılayarak enerji verimliliğini ve ekonomik faydayı artırabilir (Grabovskyi vd., 2023)

2. Biyogazın elektrik üretimindeki etkisi

Bruno vd., (2009) göre biyogaz, içten yanmalı motorlarda, gaz türbinlerinde veya yakıt hücrelerinde kullanılarak elektrik enerjisi üretilebilmektedir. İçten yanmalı motorlar, en yaygın kullanılan teknolojidir ve farklı biyogaz kalitelerine uyum sağlayabilir. Gaz türbinleri, daha yüksek verimlilikte çalışır ancak daha yüksek yatırım maliyetleri gerektirir. Biyogazın elektrik üretimindeki etkisi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak, sera gazı emisyonlarını düşürerek ve enerji güvenliğini artırarak değerlendirilebilir. Ayrıca, biyogazın yerel kaynaklardan üretilmesi, enerji arz güvenliğini artırır ve bölgesel kalkınmaya katkıda bulunur.

3. Yenilikçi güç sistemlerinde biyogazın kullanımı

Biyogaz, geleneksel enerji üretim teknolojilerinin yanı sıra yenilikçi güç sistemlerinde de kullanılmaktadır. Mikro biyogaz sistemleri, akıllı şebekelerle entegre edilerek enerji depolama, talep tarafı yönetimi ve şebeke stabilizasyonu gibi uygulamalarda rol oynayabilir. Biyogaz, biyoyakıtlara dönüştürülerek ulaşım sektöründe de kullanılabilir. Biyometan, doğal gazın yerine kullanılabilir ve mevcut doğal gaz altyapısı ile uyumludur. Ayrıca, biyogazdan hidrojen üretimi de gelecek vaat eden bir teknolojidir. Hidrojen, temiz ve çok yönlü bir enerji taşıyıcısıdır ve yakıt hücrelerinde kullanılarak elektrik enerjisi üretilebilir. Yenilikçi güç sistemlerinde biyogazın kullanımı, enerji sektörünün karbonsuzlaştırılmasına ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine geçişe katkıda bulunabilir (Evangelisti vd., 20179.

4. Soğutma Sistemlerinde mikro sistemler

Soğutma sistemlerinde mikro sistemler, geleneksel büyük ölçekli sistemlere alternatif olarak enerji verimliliği, esneklik ve çevresel sürdürülebilirlik avantajları sunan yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu sistemler, küçük ölçekli ve modüler yapıları sayesinde soğutma ihtiyacının olduğu yere yakın konumlandırılarak iletim kayıplarını minimize eder ve soğutma verimliliğini artırır (Coşkun vd., 2023).

Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilebilir ve merkezi soğutma sistemlerine olan bağımlılığı azaltarak enerji güvenliğini artırabilir (Jabari vd., 2018).

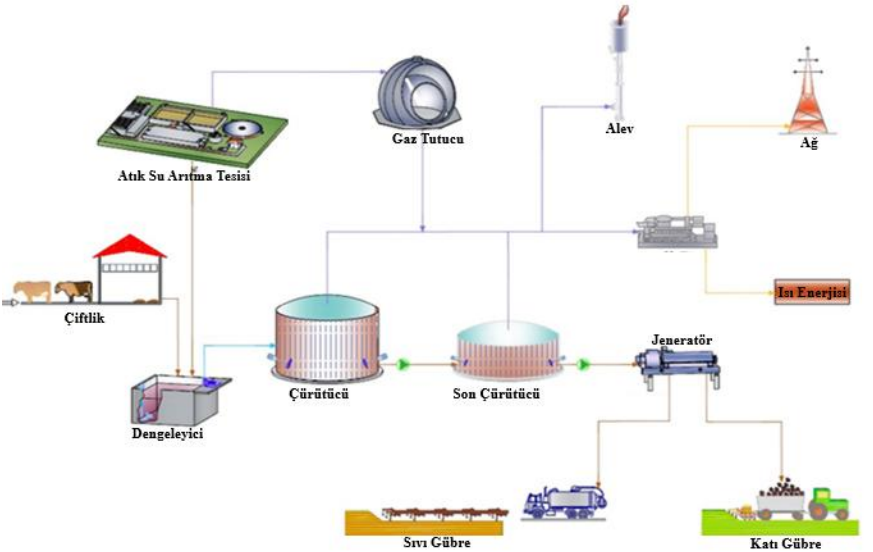
Mikro biyogaz enerjili soğutma sistemlerinin avantajlarından biri de, farklı soğutma teknolojileriyle uyumlu olmalarıdır. Buhar sıkıştırmalı soğutma, absorpsiyonlu soğutma ve adsorpsiyonlu soğutma gibi çeşitli teknolojiler, mikro sistemlerde kullanılarak farklı ihtiyaçlara ve uygulama alanlarına uygun çözümler sunabilir. Örneğin, atık ısıyı kullanabilen absorpsiyonlu soğutma sistemleri, endüstriyel tesislerde enerji verimliliğini artırmak için ideal bir seçenek olabilir.

Soğutma sistemlerinde mikro sistemler, enerji verimliliği, esneklik ve çevresel sürdürülebilirlik avantajları sunan gelecek vaat eden bir teknolojidir. Endüstriyel ve ticari soğutma uygulamalarında yaygınlaşması, enerji tüketimini azaltarak, sera gazı emisyonlarını düşürerek ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunacaktır. Mikro soğutma sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması, soğutma sektöründe inovasyonu teşvik edecek ve daha sürdürülebilir bir geleceğe geçişi hızlandıracaktır.

Makro Biyogaz Teknolojisi

Makro biyogaz teknolojisi, büyük ölçekli biyogaz üretim tesislerini kapsayan ve endüstriyel, bölgesel ve ulusal düzeyde enerji üretimini destekleyen bir yaklaşımdır. Bu sistemler, geniş çaplı tarımsal, endüstriyel ve belediye atıklarını kullanarak biyogaz üretimini maksimize eder ve sürdürülebilir enerji çözümleri sunmaktadır. Büyük ölçekli biyogaz tesisleri, enerji arz güvenliğini sağlarken, karbon emisyonlarını azaltma ve döngüsel ekonomi süreçlerine katkıda bulunma açısından da önemli bir rol oynamaktadır (Weiland, 2010).

Şekil 2 Makro biyolojik gaz prosesi



Kaynak: Biyogaz Tesisi Akım Şeması,2025

Endüstriyel ve bölgesel enerji üretiminde makro sistemler

Makro biyogaz sistemleri, endüstriyel ve bölgesel enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanmış, yüksek kapasiteli anaerobik çürütme tesisleridir. Bu tesisler genellikle tarımsal işletmeler, gıda endüstrisi ve belediye atık yönetimi kapsamında büyük ölçekli biyokütle kaynaklarını işleyerek biyogaz üretmektedir (Holm-Nielsen vd., 2009). Biyogaz, doğrudan enerji üretiminde kullanılabileceği gibi, arıtılarak doğalgaz şebekesine de entegre edilebilir. Avrupa ülkelerinde biyogazın şebekeye entegre edilmesi yaygın bir uygulama olup, Almanya ve Danimarka gibi ülkelerde biyometan üretimi enerji arz güvenliğinde önemli bir rol oynamaktadır (Angelidaki vd., 2011).

Makro biyogaz tesislerinin avantajları şunlardır:

- Büyük ölçekli enerji üretimi: Endüstriyel ve bölgesel seviyede elektrik ve ısı enerjisi sağlayarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır (Marchi vd., 2015).
- Atık yönetimi: Organik atıkların enerjiye dönüştürülmesi sayesinde çevresel sürdürülebilirlik sağlanır (Grabovskyi vd., 2023).
- Ekonomik fayda: Enerji maliyetlerini düşürerek sanayi ve yerel yönetimler için ekonomik avantaj yaratır (Angelidaki vd., 2011).

Isıtma ve güç sistemlerinde makro biyogaz uygulamaları

Biyogazın ısıtma ve güç üretiminde kullanımı, özellikle kojenerasyon (CHP) ve trijenerasyon sistemleri ile entegre edilerek verimlilik açısından optimize edilmektedir. Makro ölçekli sistemlerde biyogaz, doğrudan kazanlarda yakılarak ısı üretimi için kullanılabilir veya kojenerasyon sistemlerinde elektrik ve ısı üretimini bir arada sağlayabilir (Weiland, 2010).

Endüstriyel ölçekte biyogazın ısıtma sistemlerinde kullanımı şu avantajları sağlamaktadır:

- Enerji verimliliği: Kojenerasyon sistemleri sayesinde biyogazın enerjisi hem elektrik hem de ısı üretimi için yüksek verimle kullanılır (Raza ve Malik, 2018).
- Endüstriyel süreçlerde kullanım: Gıda işleme, kimya ve kâğıt sanayi gibi sektörlerde proses ısısı ihtiyacını karşılamak için biyogaz kullanılabilir (Raza ve Malik, 2018).
- Bölgesel ısıtma sistemleri: Büyük ölçekli biyogaz tesisleri, merkezi ısıtma sistemlerine entegre edilerek şehirlerin veya sanayi bölgelerinin ısıtma ihtiyacını karşılayabilir (Pietsch vd., 2002).

Güç sistemlerinde makro biyogaz uygulamaları

Makro biyogaz sistemleri, güç üretimi açısından büyük ölçekli çözümler sunarak sürdürülebilir enerji üretimini desteklemektedir. Geleneksel fosil yakıt bazlı enerji üretimine alternatif olarak biyogaz, çevre dostu ve ekonomik bir seçenek oluşturmaktadır. Elektrik üretimi için doğrudan içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri veya yakıt hücreleri kullanılabilirken, kojenerasyon (CHP) ve trijenerasyon sistemleri gibi yüksek verimli teknolojiler sayesinde enerji üretim süreçleri optimize edilmektedir. Biyogazın elektrik üretimi ve güç sistemlerindeki yenilikçi uygulamaları, enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra karbon emisyonlarını da önemli ölçüde azaltmaktadır (Weiland, 2010).

a. Kojenerasyon ve trijenerasyon teknolojileri

Kojenerasyon (Combined Heat and Power - CHP) ve trijenerasyon sistemleri, biyogazın enerji verimliliğini artırarak sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunan ileri teknolojiler arasındadır. Kojenerasyon sistemleri, biyogazın kullanımı ile aynı anda hem elektrik hem de ısı üretimini sağlarken, trijenerasyon sistemleri bu sürece soğutma fonksiyonunu da ekleyerek biyogazın çok yönlü kullanımına olanak tanımaktadır (Wellinger vd., 2013).

Kojenerasyon sistemleri, biyogazın enerji üretiminde en yüksek verimlilikle kullanılmasını sağlayan teknolojilerdendir. Geleneksel elektrik üretim sistemlerinde yakıtın yalnızca %30-40'ı elektrik üretimi için kullanılırken, kojenerasyon sistemlerinde bu oran %80’e kadar çıkmaktadır (Holm-Nielsen vd., 2009). CHP sistemlerinde biyogaz, içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri veya Stirling motorları kullanılarak yakılır ve bu süreçte hem elektrik hem de atık ısı elde edilir (Ahmad vd., 2019).

Kojenerasyonun başlıca avantajları şunlardır:

- Enerji verimliliğini artırır: Atık ısının da kullanılması sayesinde toplam sistem verimliliği yükselir (Feng vd., 2012).
- Endüstriyel uygulamalara uygundur: Sanayi tesisleri, hastaneler ve büyük ticari binalarda yüksek verimli enerji çözümleri sunmaktadır (Marchi vd., 2015).
- Karbon emisyonlarını azaltır: Fosil yakıt bazlı enerji üretimine kıyasla CO_2 salınımını düşürebilir (Bidart vd., 2014).

Trijenerasyon, kojenerasyon sistemlerine soğutma sürecini de entegre ederek biyogazın çok daha geniş bir kullanım alanına sahip olmasını sağlamaktadır. Bu sistemlerde üretilen ısı, absorpsiyonlu soğutma sistemleri aracılığıyla soğutma enerjisine dönüştürülerek, özellikle sıcak iklimlerde veya büyük ticari binalarda enerji tüketimini optimize eder (Angelidaki vd., 2011).

Trijenerasyonun temel avantajları:

- Elektrik, ısı ve soğutmayı bir arada sunar, böylece enerji kaynaklarının maksimum verimlilikle kullanılmasını sağlamaktadır sağlanır (Grabovskyi vd., 2023).
- Sanayi ve ticari binalarda büyük ölçekli enerji tasarrufu sağlar ve işletme maliyetlerini düşürür (Pietsch vd., 2002).
- Soğutma yükünün fazla olduğu yerlerde enerji tüketimini dengeler ve sürdürülebilir çözümler sunar (Bidart vd., 2014).

b. Biyogazın elektrik üretimindeki etkisi

Biyogaz, elektrik üretiminde giderek daha fazla kullanılan bir enerji kaynağı haline gelmiştir. Fosil yakıtların tükenmesi ve çevresel etkilerinin artması, biyogazın enerji üretiminde daha yaygın

bir alternatif olarak değerlendirilmesine yol açmıştır. Biyogazdan üretilen elektrik, doğrudan sanayi tesislerinde veya yerel enerji şebekelerine entegre edilerek ulusal enerji arzına katkı sağlayabilir (Ahmad vd., 2019).

Biyogazın elektrik üretimindeki temel katkıları şunlardır:

- Kesintisiz enerji kaynağı: Güneş ve rüzgar enerjisinin aksine, biyogaz kontrollü üretim sağlayarak kesintisiz elektrik üretimine olanak tanır (Marchi vd., 2015).
- Şebeke stabilitesini artırır: Dalgalanmalara karşı güvenilir bir enerji kaynağı olarak elektrik şebekesinin dengesini korur (Pietsch vd., 2002).
- Enerji güvenliğini artırır: Fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak ülkelerin enerji arz güvenliğini güçlendirir (Holm-Nielsen vd., 2009).

Elektrik üretiminde biyogaz, gaz motorları, mikro türbinler veya yakıt hücreleri kullanılarak farklı teknolojik sistemlerle entegre edilebilmektedir. Biyogazdan üretilen elektriğin verimli bir şekilde kullanılması, özellikle kojenerasyon sistemleriyle birlikte değerlendirildiğinde, fosil yakıtlara kıyasla çok daha çevreci bir çözüm sunmaktadır (Raza ve Malik, 2018).

c. Yenilikçi güç sistemlerinde biyogazın kullanımı

Biyogazın enerji üretiminde verimli kullanımını artırmak amacıyla, yeni nesil güç sistemleri geliştirilmektedir. Bu sistemler, biyogazın enerji dönüşümünü optimize ederek hem verimliliği artırmakta hem de karbon salınımını düşürmektedir (Feng vd., 2012).

Yakıt hücreleri, biyogazın hidrojen içeriğini kullanarak doğrudan elektrik üreten sistemlerdir. Geleneksel içten yanmalı

motorlara kıyasla daha yüksek verimlilik sunan bu sistemler, daha az atık üretir ve daha sessiz çalışır (Weiland, 2010).

Son yıllarda, biyogazın hidrojen üretimi için kullanımı üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Biyogaz, kimyasal dönüştürme yöntemleriyle hidrojene dönüştürülerek yakıt hücrelerinde enerji üretimi için kullanılabilir. Bu yöntem, sıfır karbon emisyonu hedefleyen enerji projeleri için büyük bir potansiyele sahiptir (Marchi vd., 2015).

d. Soğutma Sistemlerinde makro sistemler

Makro biyogaz sistemleri, büyük ölçekli soğutma sistemlerinde de etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Trijenerasyon sistemleri aracılığıyla biyogazdan üretilen ısı, absorpsiyonlu soğutma sistemlerine yönlendirilerek endüstriyel soğutma ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir (Grabovskyi vd., 2023).

Biyogazın soğutma sistemlerinde kullanımı:

- Gıda sanayinde soğutma ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir (Bidart vd., 2014).
- Binalarda ve hastanelerde enerji tüketimini azaltabilir (Feng vd., 2012).
- Verimlilik açısından büyük avantajlar sunarak süt üretim çiftliklerinde süt soğutma sistemlerinde enerji tasarrufu sağlar (Coşkun vd., 2023).

Soğutma sistemlerinde biyogazın kullanılması, özellikle enerjiyi önemli ölçüde tüketen sektörlerde büyük ölçekli enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu sistemler, biyogazın çok yönlü kullanımını teşvik ederek enerji üretim süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirmektedir (Coşkun vd., 2023).

Sonuç ve Öneriler

Biyogaz teknolojilerinin ısıtma, soğutma ve güç sistemlerinde mikro ve makro ölçekte uygulanması, sürdürülebilir enerji dönüşümünde kritik bir rol oynamaktadır. Mikro biyogaz sistemleri, özellikle kırsal alanlarda yerel enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve atık yönetimini iyileştirmek için önemli bir çözüm sunarken, makro biyogaz tesisleri, sanayi ve bölgesel enerji arzına katkıda bulunarak karbon emisyonlarının azaltılmasına ve enerji güvenliğinin artırılmasına yardımcı olmaktadır. Mikro sistemler esneklik, düşük yatırım maliyeti ve yerel sürdürülebilirliği desteklerken, makro sistemler büyük ölçekli enerji üretimiyle fosil yakıt bağımlılığını azaltmakta ve ekonomik ölçek avantajları sağlamaktadır.

Mikro ve makro biyogaz sistemlerinin uygulamadaki etkileri, enerji sektöründe hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunarak yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesine olanak tanımaktadır. Mikro sistemler, bireysel ve topluluk temelli enerji çözümleriyle enerji erişimini artırırken, makro sistemler endüstriyel enerji üretiminde biyogazın potansiyelini en üst düzeye çıkarmaktadır. Kojenerasyon ve trijenerasyon teknolojilerinin entegrasyonu, biyogazın verimli kullanımını sağlamakta ve enerji arzının istikrarlı hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, biyogazın doğalgaz şebekelerine entegrasyonu ve hidrojen üretimi gibi yenilikçi çözümler, biyogazın gelecekteki rolünü daha da güçlendirebilir.

Gelecek araştırmalar açısından, biyogaz sistemlerinin teknik verimliliğini artırmaya yönelik çalışmaların derinleştirilmesi gerekmektedir. Anaerobik fermantasyon süreçlerinin optimizasyonu, biyogaz veriminin artırılması ve biyogazın çeşitli kullanım alanlarına entegrasyonu üzerine yapılan araştırmalar, biyogaz teknolojilerinin rekabet gücünü artıracaktır. Ayrıca, biyogazın enerji depolama sistemleriyle entegrasyonu ve akıllı

şebeke uygulamalarına dahil edilmesi, sistem verimliliğini artırarak biyogazın yenilenebilir enerji karışımındaki payını artırabilir. Bunun yanı sıra, biyogaz üretiminde kullanılan organik atıkların çeşitlendirilmesi ve biyogaz üretiminin farklı endüstriyel sektörlerde yaygınlaştırılması, sektörün ekonomik sürdürülebilirliğine katkıda bulunacaktır.

Politika ve regülasyonların biyogaz sektörünün gelişimindeki rolü büyük önem taşımaktadır. Biyogaz üretimi ve kullanımı için teşvik mekanizmalarının oluşturulması, yenilenebilir enerji hedefleri doğrultusunda biyogazın daha yaygın bir enerji kaynağı haline gelmesini sağlayacaktır. Biyogaz üretim tesisleri, yenilenebilir enerji destek mekanizmaları ve doğrudan yatırım teşvikleri, sektörün ekonomik fizibilitesini artırabilir. Ayrıca, biyogazın elektrik üretimi, ulaşım yakıtı ve ısıtma sistemlerinde daha etkin kullanımı için ulusal ve uluslararası düzeyde yasal çerçevelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Enerji politikalarının biyogaz teknolojilerini destekleyici bir yapıya kavuşturulması, fosil yakıtlardan bağımsız ve düşük karbonlu bir enerji sistemine geçişi hızlandıracaktır.

Sonuç olarak, mikro ve makro biyogaz sistemleri, yenilenebilir enerji üretiminde çok yönlü bir çözüm sunarak enerji güvenliği, atık yönetimi ve karbon azaltım hedeflerine katkıda bulunmaktadır. Gelecekte biyogazın rolünü daha da güçlendirmek için teknik inovasyonlar, sektörel teşvikler ve düzenleyici çerçevelerin güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, biyogaz sistemlerinin daha geniş çapta benimsenmesi ve enerji sistemlerine entegrasyonu, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kilit bir strateji olacaktır.

Kaynakça

Ahmad, M., Beddu, S., Itam, Z. B., & Alanimi, F. B. I. (2019). State of the art compendium of macro and micro energies. Advances in Science and Technology. Research Journal, 13(1), 88-109. https://doi.org/10.12913/22998624/103425

Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2011). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances, 40*, 107502. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.09.001

Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances, 36*(2), 452–469. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011

Avrupa Biyogaz Birliği (European Biogas Association). (2020). Statistical report of the European biogas industry. https://www.europeanbiogas.eu

Bagdadee, A. H., Maitraya, A. M., Islam, A., & Siddique, M. N. E. A. (2025). A review on hybrid energy generation: Cow dung biogas, solar thermal and kinetic energy integration for power production. Energy and built environment, 6(1), 109-120. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.09.004

Bektaş, S. Ç., & Altaş, İ. (2025). Yenilenebilir enerji kaynakları ve depolama birimlerinden oluşan, şebeke bağlantılı bir dağıtım şebekesinin çok amaçlı gün öncesi optimum enerji planlaması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 40(2), 1335-1346. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1430132

Bidart, C., Fröhling, M., & Schultmann, F. (2014). Livestock manure and crop residue for energy generation: macro-assessment at a national scale. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, 537-550. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.005

Bond, T., & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development, 15*(4), 347–354. https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003

Biyogaz tesisinin akım şeması, Site Erişim Adresi: https://www.arbiogaz.com/tr/cozum/444/biyogaz-ve-enerji Erişim Tarihi: 22.05.2025

Bruno, J. C., Ortega-López, V., & Coronas, A. (2009). Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: case study of a sewage treatment plant. Applied energy, 86(6), 837-847. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.08.007

Castillo-Leon, N. Y., Tarazona-Romero, B. E., Gamarra, M. C., Acosta-Cardenas, O. A., Quizena-Fernandez, Y. P., & Alarcon-Guerrero, M. Y. (2024, March). Evaluation of the anaerobic digestion process for low and micro-scale biogas production: a review. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1299, No. 1, p. 012008). IOP Publishing. Doi: 10.1088/1757-899X/1299/1/012008

Coşkun, N. Y., Atalay, H. & Çoban, M., (2023). Experimental performance analysis of a biogas energy assisted hybrid milk cooling system. Internatıonal Journal Of Refrıgeratıon, vol.1, no.1, 1. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.09.018

Demirbaş, A. (2008). Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion*

and Management, 49(8), 2106–2116. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.02.020

Deng, L., Liu, Y., & Wang, W. (2020). Biogas technology (pp. 109-156). Singapore: Springer.

DeSouza, S. N. M., Werncke, I., Marques, C. A., Bariccatti, R. A., Santos, R. F., Nogueira, C. E. C., & Bassegio, D. (2013). Electric energy micro-production in a rural property using biogas as primary source. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 28, 385-391. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.035

Dobre, P., Nicolae, F. ve Matei, F. (2014). Biyogaz üretimini etkileyen ana faktörler - genel bir bakış. Romanya Biyoteknoloji Mektupları.

European Commission. (2018). *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II).* Official Journal of the European Union, L 328, 82-209. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj

European Commission (EC). (2020). *The role of biogas in the EU Green Deal*. Publications Office of the European Union. https://energy.ec.europa.eu

Evangelisti, S., Clift, R., Tagliaferri, C., & Lettieri, P. (2017). A life cycle assessment of distributed energy production from organic waste: Two case studies in Europe. Waste Management, 64, 371-385. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.028

Fabrizio, E., Branciforti, V., Costantino, A., Filippi, M., Barbero, S., Tecco, G., ... & Molino, A. (2017). Monitoring and managing of a micro-smart grid for renewable sources exploitation in an agro-industrial site. Sustainable Cities and Society, 28, 88-100. https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.026

Farhad, S., Hamdullahpur, F., & Yoo, Y. (2010). Performance evaluation of different configurations of biogas-fuelled SOFC

micro-CHP systems for residential applications. International journal of hydrogen energy, 35(8), 3758-3768. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.052

Feng, Y., Guo, Y., Yang, G., Qin, X., & Song, Z. (2012). Household biogas development in rural China: On policy support and other macro sustainable conditions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(8), 5617-5624. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.019

Gaz Üretimi ve Biyogaz Ekipmanları, Site Erişim Adresi: *https://ihousetop.decorexpro.com/en/gazosnabzhenie/gazifikatsiya-chastnogo-doma/* Erişim Tarihi: 22.05.2025

Gillon, P., Bostyn, S., Jean-Marie, A., Aziza, M., Scherzinger, M., Kayser, K., ... & Brule, M. (2024). Vil2Bio: Combining village-scale biogas production with pyrolysis in biomass stoves for off-grid sustainable clean cooking and cold production (Doctoral dissertation, GEPEA, UMR CNRS 6144, 37 boulevard de l'Université, 44600 Saint-Nazaire). https://hal.science/hal-04659980v1

Grabovskyi, M., Kucheruk, P., Pavlichenko, K., & Roubík, H. (2023). Influence of macronutrients and micronutrients on maize hybrids for biogas production. Environmental Science and Pollution Research, 30(27), 70022-70038. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27235-3

Hesar, L., Gürdil, G., & Demirel, B. (2021). Türkiye'de Çiftlik Gübresinden Biyogaz Üretim Potansiyeli. Erciyes Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi, 4(1), 27-32.

Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology, 100*(22), 5478–5484. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046

Hosseini, S. E., Barzegaravval, H., Wahid, M. A., Ganjehkaviri, A., & Sies, M. M. (2016). Thermodynamic assessment of integrated biogas-based micro-power generation system. Energy conversion and management, 128, 104-119. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.064

International Renewable Energy Agency (Irena), (2017). *Biogas for domestic cooking: Technology brief*. https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Biogas-for-Domestic-Cooking

International Renewable Energy Agency (Irena), (2019). *Transforming the energy system – and holding the line on the rise in global temperatures*. https://www.irena.org/publications

Jameel, M. K., Mustafa, M. A., Ahmed, H. S., jassim Mohammed, A., Ghazy, H., Shakir, M. N., ... & Kianfar, E. (2024). Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. Results in Chemistry, 101549. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101549

Jabari, F., Mohammadi-ivatloo, B., Bannae-Sharifian, M. B., & Ghaebi, H. (2018). Design and performance investigation of a biogas fueled combined cooling and power generation system. Energy Conversion and Management, 169, 371-382. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.08.007

Jepleting, A., Mecha, A. C., Sombei, D., Moraa, D., & Chollom, M. N. (2025). Potential of low-cost materials for biogas purification, a review of recent developments. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 210, 115152. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115152

Jin, Q., Yang, Y., Li, A., Liu, F., & Shan, A. (2017). Comparison of biogas production from an advanced micro-bio-loop

and conventional system. Journal of Cleaner Production, 148, 245-253.

Knowles, M., Burdon, I., & Beith, B. (Eds.). (2004). Micro energy systems: Review of technology, issues of scale and integration.

Kougias, P. G., Treu, L., Benavente, D. P., Campanaro, S., & Angelidaki, I. (2018). Industrial symbiosis in biogas production: The case of Denmark and Sweden. *Renewable Energy, 124*, 392–398. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.054

Liu, H., Zhang, H., Chen, Y., & Wei, Y. (2025). The impact and carbon reduction effect on biomass energy in power system. Biomass Conversion and Biorefinery, 1-10. https://doi.org/10.1007/s13399-025-06562-0

Luo, T., Shen, B., Mei, Z., Hove, A., & Ju, K. (2024). Unlocking the potential of biogas systems for energy production and climate solutions in rural communities. Nature Communications, 15(1), 5900. https://doi.org/10.1038/s41467-024-50091-9

Marchi, M., Biagini, A., Mangiavacchi, S., Menghetti, F., Vigni, F., Pulselli, F. M., ... & Marchettini, N. (2015). Integration of anaerobic-aerobic digestion of organic wastes: GHG emission impacts at micro and macro scale. Procedia Environmental Science, Engineering and Management, 2, 263-269.

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology, 83*(1), 37–46. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3

Mohaghegh, M. R., Heidari, M., Tasnim, S., Dutta, A., & Mahmud, S. (2025). Latest advances on hybrid solar–biomass power plants. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 47(1), 4901-4924. https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1887974

MosayebNezhad, M., Mehr, A. S., Lanzini, A., Misul, D., & Santarelli, M. (2019). Technology review and thermodynamic performance study of a biogas-fed micro humid air turbine. Renewable Energy, 140, 407-418. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.064

Murphy, J. D., Power, N., & McKeogh, E. (2011). A technical, economic and environmental analysis of biogas utilization. *Renewable Energy, 36*(3), 789–797. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.025

Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*(3), 1513–1524. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037

Pata, U. K. (2025). How to progress towards sustainable development by leveraging renewable energy sources, technological advances, and human capital. Renewable Energy, 122367. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122367

Pietsch, T., Mehrwald, R., Grajetzki, R., Sens, J., Pakendorf, T., Ulrich, R., ... & Märkl, H. (2002). Macro-and microscopic in-situ observation of gas bubbles and sludge particles in a biogas tower reactor. Water research, 36(11), 2836-2842. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00511-5

Raza, A., & Malik, T. N. (2018). Biogas supported bi-level macro energy hub management system for residential customers. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 10(2). https://doi.org/10.1063/1.4996271

Rodrigues, B. C. G., de Mello, B. S., Grangeiro, L. C., Dussan, K. J., & Sarti, A. (2025). The most important technologies and highlights for biogas production worldwide. Journal of the Air

& Waste Management Association, 75(2), 87-108. https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2393192

Scarlat, N., Dallemand, J. F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy, 129*, 457–472. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006

Su, B., Han, W., Zhang, X., Chen, Y., Wang, Z., & Jin, H. (2018). Assessment of a combined cooling, heating and power system by synthetic use of biogas and solar energy. Applied Energy, 229, 922-935. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.037

Vindiš, P., Pažek, K., Prišenk, J., & Rozman, Č. (2024). The Economic Efficiency of Micro Biogas Plants: A Sustainable Energy Solution in Slovenia—Case Study. Energies (19961073), 17(20). Doi: 10.3390/en17205066

Yana, S., Mufti, A. A., Hasiany, S., Viena, V., & Mahyudin, M. (2025). Overview of biomass-based waste to renewable energy technology, socioeconomic, and environmental impact. International Journal of Engineering and Technology (IJET), 1(1), 30-62.

Yanine, F. F., & Sauma, E. E. (2013). Review of grid-tie micro-generation systems without energy storage: Towards a new approach to sustainable hybrid energy systems linked to energy efficiency. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, 60-95. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.002

Zhang, K. (2025). A Review of Biomass Energy: Comparison of Utilization Methods and Future Prospects. In E3S Web of Conferences (Vol. 606, p. 05007). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560605007

Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology, 85*(4), 849–860. https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7

Wang, X., Yan, R., Zhao, Y., Cheng, S., Han, Y., Yang, S., ... & Li, Z. (2020). Biogas standard system in China. Renewable energy, 157, 1265-1273. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.064

Wellinger, A., Murphy, J., & Baxter, D. (Eds.). (2013). *The biogas handbook: Science, production and applications*. Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9780857097415

CHAPTER 9

DIGITIZATION IN SHIPYARDS: IMPLEMENTATION OF WEB-BASED ENGINEERING MANAGEMENT SYSTEMS AND COST ADVANTAGES

BURAK GÖKALP[1]

Giriş

Digitization in shipyards refers to a transformation process that enhances industry efficiency and cost-effectiveness, particularly through the integration of web-based engineering management systems. These systems enable the monitoring and management of every stage of shipyard projects in a digital environment. They facilitate the execution of critical processes such as project management, material tracking, scheduling, and workforce management more quickly and accurately. Additionally, features like data analytics and reporting help managers make more informed decisions. Through digitization, manual tasks are reduced, communication becomes faster, and labor costs are lowered. This process also shortens project delivery times, increasing customer satisfaction and providing a competitive advantage in the industry.

[1] Doç.Dr., Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Orcid: 0000-0001-9603-8588

In the long run, digitization plays a crucial role in sustainability and profitability within shipyards.

In recent years, digitization has led to profound transformations in the industrial sector, and the shipbuilding and maintenance industry has been significantly impacted by this change. Traditional production methods are being replaced by processes integrated with digital technologies, resulting in significant gains in efficiency, quality, cost advantages, and sustainability within the sector. The use of digital technologies, particularly in shipbuilding and maintenance processes, enables businesses in the industry to gain a global competitive edge.

Shipyards, with the advent of digital transformation, have integrated numerous advanced technologies such as next-generation manufacturing techniques, robotic automation, artificial intelligence, IoT (Internet of Things), big data analytics, and digital twins. As a result, production times have been reduced, costs have been minimized, and error rates have been brought to a minimum. Additionally, digitization in ship maintenance processes enables the implementation of proactive maintenance strategies, reducing maintenance costs and enhancing operational efficiency.

This section will explore the digitalization process in shipyards, focusing on how digital technologies are integrated into shipbuilding and maintenance processes, how these processes are optimized, and the advantages they provide to the industry. The cost advantages of digitization, workforce efficiency, improvements in quality control processes, and the importance of investments in environmental sustainability will be emphasized. Furthermore, the application of digital engineering management systems and STEP technologies in shipyards, how challenges related to data management are overcome, and the tangible benefits these technologies offer to shipyards will be examined.

1.The Role of Digitization in the Shipbuilding and Maintenance Industry

Digitization has brought revolutionary changes to the shipbuilding and maintenance industry. Compared to traditional methods, it offers significant gains in efficiency, cost advantages, quality, and sustainability. This article examines in detail how digitization is utilized in shipyards and maintenance processes, the technologies that are most prominent, and the advantages it provides to the industry.

1.1 Impact of Digitization on Shipbuilding Processes

Digitization enhances every stage of the shipbuilding process, from design to production. Today, shipyards use technologies such as CAD/CAM software, robotic automation, IoT-based systems, and big data analytics to produce ships that are faster, more cost-effective, and of higher quality.

Digitization in shipbuilding includes systems like Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Manufacturing (CAM), and Building Information Modeling (BIM).

- **CAD Systems:** 3D modeling reduces errors during the design process.
- **CAM Systems:** Production processes are simulated, allowing for time and cost calculations.
- **BIM Usage:** An integrated database is created for shipyards, enabling all parties to work on the same system throughout the production process.

In shipbuilding, robotic welding systems, autonomous production lines, and AI-supported quality control systems are becoming more common. With Industry 4.0, shipyards are utilizing

smart manufacturing technologies to reduce error rates and shorten production times. IoT-based systems collect data from machines during the shipbuilding process, allowing for analysis.

- **Sensors:** Potential malfunctions in the production process can be detected in advance.
- **Big Data Analytics:** Material procurement and inventory management are optimized.

1.2 Impact of Digitization on Ship Maintenance and Repair Processes

Digitization also creates significant changes in ship maintenance and repair processes. Traditional maintenance methods are often reactive, with intervention taking place after a failure occurs. However, with digitization, proactive maintenance strategies are implemented, reducing maintenance costs and increasing operational efficiency.

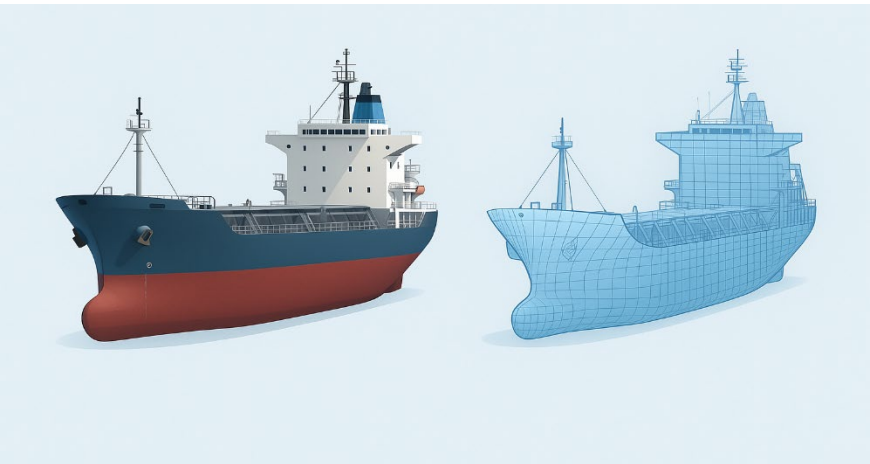


Figure.1 Digital Twin Layout

Digital Twins are systems that enable the creation of a real-time virtual replica of a ship. Through this technology, the following benefits are achieved:

All data on the ship can be continuously monitored. Machine performance is tracked through sensors. Preventive maintenance systems are implemented, allowing malfunctions to be detected before they occur. Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) technologies enhance maintenance personnel training processes and provide remote maintenance support.

Maintenance technicians can receive real-time guidance with AR glasses. VR simulations make staff training more effective. Drones and Remotely Operated Vehicles (ROVs) enable inspections in the ship maintenance process to be carried out more quickly and safely. Underwater robots are used for hull inspections, reducing the need for human labor. Drones can quickly detect cracks or damages in the ship's structure.

1.3 Cost Advantages of Digitization

The cost advantages provided by digitization to shipyards and maintenance processes are as follows:

Reduced Operational Costs: By utilizing smart systems and automation, labor costs are reduced, and production times are shortened. The automation of tasks such as welding, inspection, and assembly decreases the need for manual labor, resulting in significant savings.

Optimized Maintenance Costs: Preventive maintenance strategies implemented through digital tools, such as sensors and digital twins, allow for early identification of potential issues. This reduces the occurrence of costly, emergency repairs and extends the lifespan of equipment.

Improved Resource Management: Big data analytics help optimize the procurement and management of materials, ensuring that stock levels are balanced, waste is minimized, and resources are utilized more efficiently.

Time Savings: Faster production times due to automated processes and reduced downtime for maintenance help to accelerate delivery times, increasing overall productivity and efficiency.

Reduced Risk of Errors: Digitization helps minimize human errors in both design and manufacturing processes, leading to fewer defects and rework costs.

These digital solutions lead to more cost-effective and sustainable operations in shipbuilding and maintenance by optimizing various processes, improving efficiency, and reducing resource consumption. By automating tasks, enhancing data accuracy, and streamlining workflows, shipyards can achieve significant cost savings in labor, materials, and time. Additionally, real-time monitoring and predictive maintenance capabilities reduce downtime and extend the lifespan of equipment, lowering maintenance costs.

Sustainability is also a key benefit, as digital solutions help minimize waste, reduce energy consumption, and optimize material usage. With the ability to track and manage resources more effectively, shipyards can reduce overproduction, lower environmental impact, and improve their overall environmental footprint.

In the long term, these improvements create a competitive advantage by enabling shipyards to deliver high-quality ships and maintenance services more efficiently, at lower costs, and with reduced environmental impact. This positions shipyards to remain competitive in the global market while also contributing to a more sustainable and responsible industry.

Digitization has revolutionized the shipbuilding and maintenance industry, enabling shipyards to produce ships faster, at lower costs, and with greater reliability. Technologies such as IoT, BIM, CAD/CAM, robotic manufacturing, digital twins, and artificial

intelligence are reducing costs and increasing production efficiency in shipyards. In the future, digitalization investments will become even more widespread, allowing shipyards to become smarter, more efficient, and more sustainable. This continued evolution will not only enhance operational efficiency but also contribute to greater environmental sustainability and competitiveness in the global market.

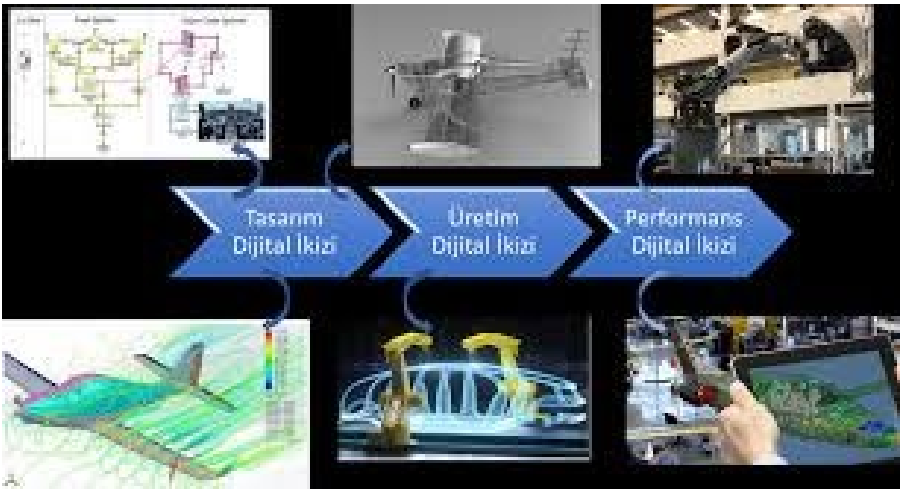


Figure 2. Types of Digital Twins

2. Traditional Shipyard Management Processes and Challenges

Shipbuilding and maintenance processes have historically been quite complex. Traditional shipyard management systems are largely dependent on manual labor, paper-based documentation, and processes that require individual expertise. However, these traditional methods result in inefficiencies, high costs, and operational risks. This section will explore how traditional shipyard management operates and the main challenges these systems face.

2.1 Traditional Shipyard Management Processes

Shipyards manage shipbuilding and maintenance processes based on specific stages. Traditional shipyard management includes the following processes:

- **Project Planning and Management:**

In most shipyards, project management is carried out with paper-based planning and manual work tracking. Efficient planning of specialized personnel is often done through experience-based forecasts. Material orders and logistics processes are usually not synchronized between different departments, leading to delays and inefficiencies.

- **Design and Production Processes:**

Traditional design processes largely involve 2D drawings and physical prototypes. Production processes are mostly carried out through manual labor, which makes them longer and increases the likelihood of errors. Welding, assembly, and outfitting processes heavily rely on human labor.

- **Inventory and Material Management:**

Due to manual tracking of inventories, material shortages or surpluses can occur. Supply chain management, being based on manual processes, causes delays and excess inventory costs. Manual material tracking leads to inaccurate inventory calculations and production delays.

- **Quality Control and Maintenance Processes:**

Traditional quality control processes typically rely on manual inspections and experience-based reviews. Maintenance processes

are predominantly reactive, meaning interventions occur only after a failure or issue arises. Inspection processes, which involve manual measurements and observational reviews, are prone to errors.

2.2 Challenges Faced in Traditional Shipyard Management

Traditional shipyard management faces several structural problems that now require digitization. These challenges can be grouped into three main areas: inefficiencies in production processes, rising costs, and workforce management issues. In shipyards, manual and paper-based systems lead to time losses in production processes.

Disruption in Information Flow: The lack of synchronization in production processes makes it difficult to manage efficiently. When work orders are tracked using paper forms instead of digital systems, delays and errors occur. Incorrect production planning reduces capacity utilization and increases costs.

Complex Workforce Management: With a large workforce in shipyards, managing labor efficiently becomes challenging. Due to a lack of training, the workforce is not used effectively. Inadequate placement of workers according to their skills leads to increased production errors.

Inefficient Tracking of Work Processes: Manual workforce management systems make it difficult to track work processes efficiently. Shipyards struggle to manage costs effectively with traditional methods. Excessive inventory or material shortages disrupt production processes. Reactive maintenance processes increase long-term shipyard costs. Inefficient production planning leads to unnecessary expenditures.

As a result, traditional shipyard management is no longer sustainable in the modern era, where digitalization can provide significant improvements in efficiency, cost management, and risk mitigation.



Şekil 3. Shipyard Management

2. Traditional Shipyard Management and Challenges

Traditional shipyard management processes rely heavily on manual systems, paper-based procedures, and decision-making based on human error, which result in significant challenges. These processes lead to inefficiencies, high costs, and increased operational risks. As a result, digital transformation has become an inevitable shift for the shipbuilding industry. Digitalization allows shipyards to streamline production processes, optimize workforce management, improve the precision of quality control and maintenance processes, and reduce costs, thus increasing profitability. Therefore, it is essential for shipyards to transition from traditional methods to digital systems to enhance productivity and maintain global competitiveness.

3. Why Digital Transformation is Critical for Shipyards

Digital transformation has become a critical factor in the shipbuilding and maintenance industry for gaining competitive advantages, improving operational efficiency, and reducing costs. While traditional shipyard management processes rely on manual labor, paper-based systems, and planning methods that are prone to human error, digitalization enables shipyards to become more

efficient and profitable through automation, data analytics, and artificial intelligence.

The shipbuilding industry operates in a global market dominated by countries like China, South Korea, and Japan, which have enhanced their shipyards' efficiency using automation, digital production systems, and advanced engineering software. Through digitalization, production times have been shortened, costs have been reduced, and errors have been minimized. Shipyards operating with traditional methods, on the other hand, face the risk of losing their competitive edge. In particular, European and American shipyards must accelerate their digital transformation to compete with their Asian counterparts. Digital transformation is critical for improving production efficiency and reducing error rates in shipyards.

Traditional shipyard management is largely based on manual planning, paper-based documentation, and labor-intensive processes. These methods lead to time losses and human errors. With digital systems (such as CAD/CAM, BIM, MES), processes can be monitored and optimized in real-time.

High costs in the shipbuilding and maintenance industry, such as labor costs, raw material prices, and operational expenses, are major issues for shipyards. Digitalization allows shipyards to produce more with fewer resources. Smart production systems prevent excessive stock and optimize supply chain management.

Digital transformation is turning shipyards into "smart shipyards."

- **Robotic Automation:** Reduces error rates in welding, assembly, and painting processes.

- **Digital Twin Technology:** Optimizes maintenance and production processes through a digital model that mirrors the real ship.
- **IoT (Internet of Things):** Enables real-time monitoring of machines and tools used in shipbuilding, allowing for early detection of maintenance needs.
- **AI-assisted Planning:** Ensures more efficient production planning and helps prevent delays.

Workplace safety is a critical issue in shipyards. Digitalization minimizes workplace accidents and risks. Wearable technologies (smart helmets, sensor-enabled work clothes) enhance worker safety, and drones and autonomous inspection tools can carry out inspections in high-risk areas without human intervention. Autonomous machines and robotic systems replace heavy and dangerous manual tasks, increasing worker safety.

The shipbuilding industry must also move toward environmentally conscious production processes. Digitalization helps shipyards reduce their carbon footprint and become more sustainable. Smart systems that optimize energy consumption create resource-efficient and environmentally friendly production processes. Digital twin technology eliminates the need for physical prototypes, reducing waste.

Digital transformation also improves data management in shipyards. Shipyards need centralized digital platforms that consolidate data from various departments. Big data analytics ensures that operational decisions are more accurate, and real-time data tracking makes work processes more flexible, enabling rapid adaptation to sudden changes.

In conclusion, digital transformation has become crucial for shipyards to maintain their competitive edge, reduce costs, improve

safety, and become more sustainable. Shipyards need to increase their investments in digitalization. Otherwise, those relying on traditional methods will fall behind in global competition. Digital transformation not only reduces costs but also makes processes safer, more eco-friendly, and more efficient.

4. Key Components and Opportunities of Web-Based Engineering Management Systems

Web-based engineering management systems allow shipyards to manage production, maintenance, inventory, project tracking, and workforce planning through a centralized digital platform. These systems provide significant efficiency gains by enabling real-time data sharing, automation, and AI-assisted analytics, thanks to their cloud-based and internet-accessible nature. In this section, the key components of web-based engineering management systems and the opportunities they offer to the shipbuilding and maintenance industry will be discussed in detail. Web-based engineering management systems consist of various components that optimize engineering processes, integration, and data management.

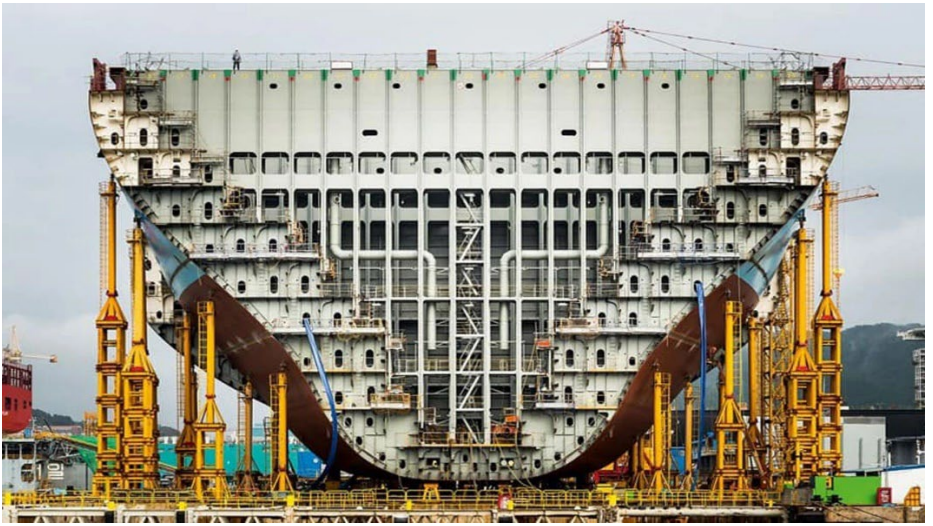


Figure 4. Shipbuilding Assembly

Web-Based Engineering Management Systems in Shipyards: Key Modules and Features

Web-based engineering management systems (WEMS) are essential tools for modern shipyards to streamline their processes, reduce costs, and improve operational efficiency. These systems integrate various functions such as project management, design, manufacturing, material management, and maintenance. Below are some of the key modules and features of WEMS in shipyards.

1. Project Management and Planning Module

This module helps shipyards organize their shipbuilding and maintenance projects, create timelines, and control costs. Key features include:

- **Gantt Charts and Timelines:** These tools are used to plan the entire project process, ensuring that each stage

of the shipbuilding and maintenance operations is scheduled effectively.

- **Workload Forecasting:** This feature helps optimize labor and material needs by accurately predicting the resources required for each phase of the project.
- **Real-Time Project Tracking:** Enables the real-time monitoring of project progress, providing instant updates on any changes or delays in the project timeline.

2. CAD/CAM and BIM Integration

The integration of Computer-Aided Design/Manufacturing (CAD/CAM) and Building Information Modeling (BIM) systems optimizes the design and production processes in shipyards. Key features include:

3D Modeling and Simulations: Helps improve the accuracy of the production process by providing detailed visualizations and simulations of the ship design.

Real-Time Design Updates: Reduces error rates in production by providing instant updates on design modifications and their impact on the production process.

Cross-Platform Integration: WEMS integrates seamlessly with various software platforms, including AutoCAD, SolidWorks, Siemens NX, and Catia, ensuring smooth collaboration between design and production teams.

3. Material and Supply Chain Management

Material costs are one of the largest expenses for shipyards. Web-based engineering systems help reduce these costs by optimizing inventory management and supply chain processes. Key features include:

- **Automated Material Ordering:** Integrates with ERP systems to automate material procurement and reduce human errors in the ordering process.
- **Real-Time Inventory Tracking:** Helps reduce unnecessary stock costs by providing up-to-the-minute data on inventory levels and material usage.
- **Supplier Performance Analysis:** Facilitates better purchasing decisions by analyzing supplier performance and identifying the most cost-effective sourcing options.

4. IoT-Based Sensors for Real-Time Monitoring

IoT-based sensors provide real-time data flow on production machinery, ship components, and maintenance processes. Key features include:

- **Machine Performance Monitoring:** Continuously tracks the performance of production machines and predicts potential failures before they occur.
- **Automated Quality Control Systems:** Enhances production efficiency by automating the quality control process across the production line.
- **Energy Optimization:** Smart systems that optimize energy consumption, reducing operational costs and improving the energy efficiency of the production process.

5. Digital Twin Technology

Digital twin technology creates a virtual copy of a ship or production process, enabling shipyards to run virtual simulations during production or maintenance. Key features include:

- **Ship Design and Maintenance Simulations:** Allows shipyards to preemptively analyze potential problems by simulating design and maintenance processes.
- **Real-Time Tracking of Ship Systems:** Enables the real-time monitoring of a ship's systems, allowing for predictive maintenance and improving performance monitoring.
- **Machine Performance Analysis:** Provides insights into machine efficiency, enabling the improvement of energy consumption and optimization of operational costs.

These modules and features make web-based engineering management systems an invaluable tool in modernizing shipyard operations, improving efficiency, and reducing costs. Through integration of digital technologies such as IoT, CAD/CAM, BIM, and digital twins, shipyards can streamline their operations, reduce human error, and enhance overall productivity. Web-based engineering systems provide the following advantages to shipyards:

Real-Time Monitoring and Control: These systems allow for real-time tracking of production, maintenance, inventory, and workforce processes, enabling quick intervention and decision-making.

Increased Efficiency: Automation of tasks like material procurement, project tracking, and workforce management reduces manual labor and accelerates processes, improving overall efficiency.

Cost Reduction: By optimizing production processes, supply chains, and resource management, web-based systems help reduce operational costs and minimize waste.

Improved Collaboration: These systems enable seamless communication and collaboration between different stakeholders,

including designers, contractors, suppliers, and project managers, through a centralized platform.

Enhanced Data Accuracy: Automation and digital systems reduce the risk of human errors, ensuring more accurate and reliable data, leading to better decision-making.

Better Project Management: With integrated tools for scheduling, workload forecasting, and progress tracking, project management becomes more streamlined, ensuring timely project delivery.

Optimized Resource Management: Web-based systems provide tools for real-time inventory tracking and efficient allocation of resources, leading to better material management and reduced excess stock.

Predictive Maintenance: Real-time data from IoT devices allows for predictive maintenance, helping to identify and address potential issues before they become major problems.

Sustainability: These systems can help reduce energy consumption and waste, promoting more sustainable practices in shipbuilding and maintenance operations.

Scalability and Flexibility: Web-based systems are often cloud-based, making them scalable and adaptable to the evolving needs of shipyards as they grow and adopt new technologies. Overall, web-based engineering systems enable shipyards to enhance productivity, improve quality control, reduce costs, and stay competitive in the global market.

5. Application of STEP Technology in Ship Repair Data Management in Shipyards

Ship repair processes are complex and require comprehensive data management, involving multiple stages and

tight coordination among various stakeholders. STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) technology is used in shipyards to standardize data management, enable integration between different software systems, and streamline processes.

This section will discuss how STEP technology is applied in shipyards, the problems it addresses, and the advantages it provides. The ship repair process involves extensive data exchange between ship owners, shipyards, suppliers, contractors, and regulatory bodies. This process includes several different stages, such as project planning, maintenance and repairs, material procurement, and quality control. Existing Data Management Challenges in Shipyards:

Incompatibility Between Data Formats:

Shipyards, ship owners, and suppliers use different data formats and software. Manual data entry and paper-based systems are often used, leading to inefficiencies and potential errors.

Supply Chain Management Issues:

Shipyards face delays and excess inventory problems in the material procurement process. Material orders are often managed via email, phone, or fax, which can cause delays and miscommunication.

Workforce and Resource Management Challenges:

Coordination between contractors and in-house workers is often done manually, slowing down the processes. Tracking work orders and maintenance requests becomes difficult.

Lack of Data Analysis and Reporting:

Due to paper-based or incompatible systems, accessing past maintenance records quickly is not possible. Reactive maintenance is often performed, instead of implementing preventive maintenance systems.

How STEP Technology Solves These Challenges:

STEP technology integrates all these data management processes, improving speed and accuracy. Based on the ISO 10303 standard, STEP allows product data to be stored and shared in a standardized format. The core components of STEP technology, as outlined below, convert all data formats in shipyards into a single common model, facilitating smoother data flow and improving overall efficiency.

By implementing STEP, shipyards can overcome compatibility issues between different systems and formats, streamline supply chain management, improve workforce coordination, and enable better data access for maintenance records and reporting. This leads to more efficient and effective operations, as well as reduced errors and delays in the ship repair process.

STEP Technology's Key Cost Advantages for Shipyards

In the ship repair process, document and data sharing is crucial. This process involves the flow of information between ship owners, shipyards, contractors, and suppliers. In the current system, several challenges arise, such as:

- **Data Loss:** Information is stored in different software systems, leading to data loss.
- **Integration Issues:** Different companies use different systems, resulting in integration challenges.
- **High Error Rates:** Manual data entry increases the likelihood of errors.

With STEP Integration, the following improvements can be achieved: All parties can use the same data model for seamless integration. Automated data sharing replaces paper-based processes,

reducing the risk of errors and delays. Real-time data sharing between shipyards and contractors accelerates the process. The key cost advantages that STEP technology provides to shipyards include:

Reduced Administrative Costs: Automation of data sharing and integration eliminates the need for manual data entry, reducing labor costs and administrative overhead.

Increased Efficiency: With real-time data sharing, processes are streamlined, reducing delays and improving project timelines. This leads to faster turnarounds and increased productivity.

Lower Error Rates: STEP technology minimizes human errors in data entry and communication, reducing the cost of rework and corrections.

Improved Decision-Making: By ensuring that all stakeholders are working with the same set of accurate data, decisions can be made more effectively, leading to fewer mistakes and better resource allocation.

Optimized Resource Management: With integrated data, materials and resources are better tracked, leading to fewer instances of excess inventory, delays in material procurement, and better utilization of resources.

Faster Maintenance and Repair: Real-time updates and streamlined communication reduce downtime, allowing for faster maintenance and repair cycles, ultimately saving costs.

By implementing STEP technology, shipyards can achieve significant cost reductions while enhancing operational efficiency and collaboration across all stakeholders involved in the ship repair process.

STEP technology optimizes ship repair processes in shipyards, offering significant advantages in terms of both time and

cost. The key benefits of implementing STEP technology are summarized as follows:

Faster and Error-Free Data Sharing: STEP enables efficient and accurate data exchange between all parties involved, reducing the risk of errors and delays.

Improved Data Flow Between Shipyards, Contractors, and Suppliers: Real-time communication and integration enhance the data flow, speeding up the entire repair process.

Digitization of Paper-Based Processes: STEP replaces manual, paper-based processes with automated digital workflows, improving accuracy and efficiency.

Increased Workforce Efficiency: By automating data sharing and reducing manual tasks, workforce productivity is significantly enhanced.

Optimization of Supply Chain and Inventory Management: The integration of STEP technology allows for better material tracking, reducing excess inventory and improving procurement cycles.

Savings in Maintenance Costs (25%-40%): STEP technology helps shipyards save on maintenance costs by streamlining the repair process, reducing errors, and enhancing resource utilization.

In summary, STEP technology brings substantial improvements to shipyard operations by reducing time and costs, improving data management, and increasing overall efficiency in the ship repair process.

Kaynakça

VENTURA, M., VITÓRIA, J., AND GUEDES SOARES, C. 2000a Implementation of STEP translators using the ship hull product model, Proceedings, First International EuroConference on Computer Applications and Information Technology in the Marine Industries—COMPIT'2000, Potsdam.

KAWAMURA, Y., AND SUMI, Y. 2004 A study on an information system for structural integrity of ships—STEP technologies based proto-type system for evaluation of corrosion damages, Proceedings, Ninth Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS'2004, Germany.

ZHANG, Y., ZHANG, C., AND WANG, H. P. 2000 An internet based STEP data exchange framework for virtual enterprises, Computers and Industry 41, 51-63.

MEHLI-QUASSI, J., COULIBALY, A., AND MUTEL, B. 1999 Product data for production management and logistics, Computers & Industrial Engineering, 37, 27–30.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION 1998 Industrial Automation Systems and Integration—Product Data Representation and Exchange— Part 22: Implementation Methods: Standard Data Access Interface Specification, ISO 10303-Part 22.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION 1994b Industrial Automation Systems and Integration—Product Data Representation and Exchange: Description Methods: The EXPRESS Language Reference Manual, ISO 10303- 11:1994(E).

Blanco-Novoa, O.; Fernández-Caramés, T.M.; Fraga-Lamas, P.; Castedo, L. An Electricity-Price Aware Open-Source Smart Socket for the Internet of Energy. Sensors 2017, 17, 643.

Arumugan, D.D.; Engels, D.W. Characterization of RF propagation in helical and toroidal metal pipes for passive RFID

Systems. In Proceedings of the IEEE International Conference on RFID, Las Vegas, NV, USA, 16–17 April 2008; pp. 269–276.

Engelseth, P.; Le, B.T.N. Strategic organizing of piping supplies for ship construction. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 10–13 December 2017; pp. 1975–1979.

Santos, R.; Botelho, S.; Amaral, M.; Duarte, N.; Espíndola, D. Toogle: A CPS Platform for Equipment Tracking in Shipyards. In Proceedings of the 2014 Symposium on Automation and Computation for Naval, Offshore and Subsea (NAVCOMP), Rio Grande, Brazil, 11–13 March 2014; pp. 5–9.

Lee, J.; Bazheri, B.; Kao, H.A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manuf. Lett. 2015, 3, 18–23.

Kim, H.; Lee, S.S.; Park, J.H.; Lee, J.G. A model for a simulation-based shipbuilding system in a shipyard manufacturing process. Int. J. Comput. Integr. Manuf. 2007, 18, 427–441.

Deavours, D.D. Improving the near-metal performance of UHF RFID tags. In Proceedings of the IEEE International Conference on RFID, Orlando, FL, USA, 14–16 April 2010; pp. 187–194.

CHAPTER 10

SÜPER HİDROFOBİK KAPLAMALAR

BURAK GÖKALP[1]

Giriş

Süperhidrofobik yüzeyler, 150°'nin üzerinde su temas açısına sahip olup, kendini temizleme, su iticilik, korozyon önleme, kirlenme karşıtı ve buzlanma önleyici kaplamalar gibi çeşitli uygulamalar için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Özellikle zorlu hava koşullarında buzlanmayı önlemek**,** uçaklar, rüzgâr türbinleri ve enerji iletim kabloları gibi kritik ekipmanların yüzeyleri açısından büyük bir zorluk oluşturmaktadır (Mehmet Hancer, Harun Arkaz**,** 2015).

Buz birikimi, süper soğutulmuş su damlacıkları ile temas sonucunda bu yüzeylerde meydana gelmektedir. Oluşan buz tabakası**,** mekanik arızalara, bileşenlerin aerodinamik ve elektriksel özelliklerinde değişikliklere yol açarak çeşitli sorunlara neden olmaktadır. Bu sorunlar yalnızca ekonomik kayıplara yol açmakla kalmaz, aynı zamanda önemli güvenlik riskleri de oluşturabilir**.** Örneğin, buzlanma, ölümcül uçak kazalarına neden olabilir ve ulusal ulaşım güvenlik kurulu tarafından en çok iyileştirilmesi istenen güvenlik önlemleri arasında listelenmiştir**.**

[1] Doç.Dr., Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Orcid: 0000-0001-9603-8588

Süperhidrofobik kaplamalar, su damlacıkları ile yüzey arasındaki teması azaltarak buzlanmayı önleyebilir veya geciktirebilir. İdeal bir kaplama, su damlacıklarını yüzeyden uzaklaştırarak buz oluşumunu tamamen engellemelidir. Bunu mümkün kılmak için su temas açılarının teorik sınır olan 180°'ye mümkün olduğunca yakın olması gerekmektedir **(**Mehmet Hancer, Harun Arkaz, 2015). Süperhidrofobik kaplamalar, düşük maliyetli olmalı ve farklı yüzeylere hızlı ve kolay uygulanabilmelidir. Bu, pratik kullanım açısından kritik bir gerekliliktir.

Denizcilik sektörü, tarih boyunca sürekli gelişen mühendislik çözümleriyle daha verimli, dayanıklı ve sürdürülebilir hale gelmeye çalışmıştır. Modern deniz taşımacılığında en büyük zorluklardan biri, hidrodinamik sürtünme, biyolojik kirlenme ve korozyon gibi unsurların gemilerin performansını düşürmesi ve yakıt tüketimini artırmasıdır. Bu sorunların üstesinden gelmek için geliştirilen süperhidrofobik kaplamalar, su itici yüzey özellikleri sayesinde gemi gövdelerinin suyla temasını minimize ederek sürtünmeyi azaltmakta, biyolojik kirlenmeyi önlemekte ve operasyonel verimliliği artırmaktadır.

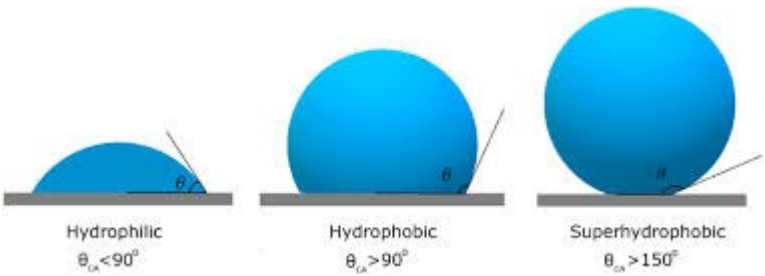
Son yıllarda süperhidrofobik kaplamalar üzerine yapılan bilimsel araştırmalar ve endüstriyel gelişmeler, bu teknolojinin askeri ve ticari gemiler, denizaltılar, torpidolar, feribotlar ve yatlar gibi farklı deniz araçlarında uygulanabilirliğini artırmıştır. Özellikle ABD Donanması, NATO ve büyük denizcilik firmaları, düşük sürtünmeli ve çevre dostu kaplamaların kullanımını yaygınlaştırmak için çalışmalar yürütmektedir. Ayrıca, biyomimetik (doğadan ilham alan) kaplama teknolojileri, köpekbalığı derisi ve lotus yaprağı gibi doğal su itici yüzeylerden ilham alarak daha uzun ömürlü ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır.

Bu bölümde, süperhidrofobik kaplamaların denizcilik sektöründeki önemi, kullanım alanları, askeri ve ticari

uygulamalardaki potansiyeli, biyolojik kirlenmeye karşı sağladığı avantajlar ve gelecekteki gelişmeler detaylı olarak ele alınacaktır. Ayrıca, sürdürülebilir deniz taşımacılığına katkıda bulunabilecek yatırım stratejileri ve yeni nesil yüzey teknolojilerinin nasıl geliştirileceği üzerine öneriler sunulacaktır.

1.Süperhidrofobik Kaplamaların Temel İlkeleri

Süperhidrofobik kaplamalar, su itici (hidrofobik) yüzeylerin geliştirilmiş versiyonlarıdır. Bu kaplamalar, su damlalarının yüzeyle temas açısını artırarak yüzeye tutunmadan yuvarlanmasını sağlar. Süperhidrofobik kaplamaların performansı, ıslaklık mekanizmaları, sürtünme azaltımı, plastron etkisi, mikro/nano yapı tasarımları, kimyasal modifikasyon teknikleri ve kaplamanın dayanıklılığına bağlıdır. Bu bölümde, süperhidrofobik kaplamaların temel ilkelerini detaylı bir şekilde ele alacağız.



Şekil 1: Yüzeylerin Temas Açısı Aralığına Göre Sınıflandırılması

Islaklık, bir sıvının katı bir yüzeyle temas ettiğinde nasıl davrandığını belirleyen fiziksel bir fenomendir. Süperhidrofobik kaplamaların etkinliği, ıslaklık mekanizmaları ve yüzeyin sıvıyla etkileşimine dayanır. Bir sıvı damlası, katı bir yüzeye temas ettiğinde belirli bir açı oluşturur. Bu açı, temas açısı (θ) olarak adlandırılır ve yüzeyin hidrofobikliğini belirleyen önemli bir parametredir:

Hidrofobik yüzeyler: $90° < \theta < 150°$

Süperhidrofobik yüzeyler: $\theta \geq 150°$

Süperhidrofobik kaplamalar, su damlacıklarının yüzeye yapışmasını önleyerek hem yüzeyin korunmasını sağlar hem de suyun kolayca yüzeyden akıp gitmesine neden olur. Süperhidrofobik kaplamalar için iki temel ıslaklık modeli vardır:

*Cassie-Baxter Modeli (Hava Kapanımı ve Düşük Sürtünme***)**

Bu modelde, su damlası yüzeye tam olarak temas etmez. Yüzeyin pürüzlülüğü ve nano-mikro yapı özellikleri nedeniyle hava cepleri (plastron) oluşur. Sonuç: Sürtünme kuvveti azalır, yüzey kendini temizler, su damlacıkları kolayca akar.

Wenzel Modeli (Tam Islaklık ve Yüksek Sürtünme)

Yüzey pürüzlülüğüne rağmen su damlası yüzeyi tamamen ıslatır. Bu durumda sürtünme artar ve yüzey süperhidrofobik özelliğini kaybedebilir. Sonuç: Su damlaları yüzeyde kalır, bu istenmeyen bir durumdur. Çoğu denizcilik ve askeri uygulama için Cassie-Baxter modeli tercih edilir, çünkü daha az sürtünme ve daha fazla su iticilik sağlar.

1.1.Plastron Etkisi ve Mikro/Nano Yapılar

Plastron etkisi, süperhidrofobik yüzeylerde hava tabakasının su ile katı yüzey arasında kalmasını sağlar. Bu sayede sıvı ile doğrudan temas en aza indirilir. Özellikle denizcilik ve su altı uygulamalarında büyük avantaj sağlar. Bu mikro/nano yapılar suyun yüzeyle temasını azaltarak ince bir hava tabakası (plastron) oluşturur. Plastron, su altındaki yüzeylerin sürtünmesini azaltır ve enerji kayıplarını minimum seviyeye indirir. Süperhidrofobik kaplamalar, fiziksel yüzey tasarımına bağlı olarak iki temel yapı tipine sahiptir:

Yüzeyde gözle görülebilen kaba pürüzler bulunur. Lotus yaprağı benzeri yapı sayesinde su damlaları hemen yüzeyden kayar.

Endüstriyel uygulamalarda daha yaygın kullanılır. Daha düşük sürtünme katsayısı sağlar. Tıbbi cihazlar ve askeri donanmalarda kullanılır. Denizaltılar ve insansız su altı araçları için optimize edilir. Bu nano-mikro yapı kombinasyonu, özellikle denizcilik sektöründe sürükleme kuvvetlerini azaltmada etkilidir (S. Farhadi, M. Farzaneh, S. Kulinich, 2011).

1.2.Kimyasal Modifikasyon ve Malzeme Seçimi

Süperhidrofobik kaplamalar, kimyasal modifikasyonlarla daha dayanıklı ve uzun ömürlü hale getirilebilir. Bu süreçte kullanılan malzeme seçimi büyük önem taşır. Floropolimerler (PTFE, PFOA içeren malzemeler) Teflon bazlı malzemeler, ultra düşük yüzey enerjisine sahiptir. Su ve yağlara karşı yüksek direnç gösterir. Siloksan Türevleri (Polidimetilsiloksan - PDMS) Şeffaf, esnek ve biyouyumlu kaplamalar için idealdir. Deniz suyuna ve UV ışınlarına karşı dayanıklıdır. Metal Oksit Kaplamalar (TiO_2, SiO_2, ZnO gibi malzemeler) Fotokatalitik temizleme özellikleri vardır. Güneş ışığı altında kendini temizleyebilir (self-cleaning) (References 3-12).

Farklı uygulamalara göre kullanılan süperhidrofobik malzemeler Tablo.1'de görülmektedir.

Tablo.1 Süperhidrofobik Malzemelerin Özellikleri

Malzeme	**Kullanım Alanı**	**Avantajları**
PTFE (Teflon)	Gemi gövdeleri	Sürtünmeyi azaltır, deniz biyolojisine karşı dayanıklıdır
Siloksan Kaplamalar	Denizaltılar	UV dayanımı yüksektir, kimyasal olarak kararlıdır
TiO_2 Kaplamalar	Deniz üstü platformlar	Kendini temizleme özelliği sunar, uzun ömürlüdür

1.3.Süperhidrofobik Kaplamaların Dayanıklılığı

Süperhidrofobik kaplamaların uzun ömürlü olması için mekanik ve kimyasal olarak dayanıklı hale getirilmesi gerekir. Özellikle denizcilik ve askeri uygulamalarda yüksek dayanıklılık büyük önem taşır. Aşınmaya Karşı Direnç: Süperhidrofobik kaplamaların fiziksel sürtünmeye ve darbelere dayanıklı olması gerekir. Esneklik: Özellikle gemi gövdeleri ve denizaltılar için kaplamanın esnekliği önemlidir. Denizcilik uygulamalarında kaplamaların tuzlu su korozyonuna dayanıklı olması gerekir. Güneş ışığına maruz kalan yüzeylerde UV ışınlarına dayanıklı malzemeler tercih edilmelidir.

Süperhidrofobik kaplamalar, ıslaklık ve sürtünme mekanizmalarını optimize ederek, denizcilik sektöründe sürtünmeyi azaltmada büyük avantajlar sunmaktadır. Plastron etkisi sayesinde denizaltılar ve su altı araçları için düşük sürtünme ve enerji tasarrufu sağlar. Kullanılan kimyasal modifikasyonlar ve nano-mikro yapı tasarımları, kaplamaların dayanıklılığını artırarak uzun süreli kullanım imkânı sunar (J. Genzer, K. Efimenko, 2006).

2.Denizcilikte Süperhidrofobik Kaplamaların Kullanımı

Süperhidrofobik kaplamalar, denizcilik sektöründe enerji verimliliğini artırma, biyolojik kirlenmeyi önleme ve hidrodinamik performansı iyileştirme gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Gemi gövdeleri, su altı araçları, pervaneler ve diğer yüzeylerde kullanılarak sürtünmeyi azaltmak ve uzun ömürlü kullanım sağlamak amacıyla uygulanmaktadır (Hongyu Dong, Mengjiao Cheng, Yajun Zhang,a Hao Wei and Feng Shi, 2013).

Şekil 2: Süperhidrofobik Yüzey ve Süperhidrofollik Yüzey



Bu bölümde, ticari gemilerde, yat ve feribotlarda, denizaltılar ve uzaktan kumandalı su altı araçlarında (ROV'ler) süperhidrofobik kaplamaların nasıl kullanıldığına dair detaylı bir inceleme sunulacaktır.

2.1.Ticari Gemilerde Süperhidrofobik Kaplamaların Uygulamaları

Ticari gemiler, uzun süre su içinde hareket eden büyük ölçekli deniz taşıtlarıdır. Süperhidrofobik kaplamalar, bu gemilerin hidrodinamik sürüklenmesini azaltarak yakıt tasarrufu sağlamaya ve bakım maliyetlerini düşürmeye yardımcı olur. Yakıt tasarrufu sağlar: Gemi gövdelerindeki sürtünme %10-30 oranında azalabilir, bu da %5-15 arasında yakıt tasarrufu sağlar. Biyolojik kirlenmeyi önler: Yosun, midye ve diğer deniz organizmalarının gemi yüzeyine yapışmasını engeller. Daha düşük bakım maliyeti: Geleneksel boyalar gibi sık bakım gerektirmez. Hız artışı sağlar: Daha düşük su direnci, geminin aynı motor gücüyle daha hızlı gitmesine imkân tanır (Hongyu Dong, Mengjiao Cheng, Yajun Zhang,a Hao Wei and Feng Shi, 2013).

Tablo.2 Ticari Gemilerde Süperhidrofobik Kaplamaların Kullanım Alanları

Kullanım Alanı	**Avantajları**
Kargo Gemileri	Yakıt tüketimini azaltır, uzun seferlerde maliyet avantajı sağlar
Tankerler	Ağır yük taşıyan gemilerde sürtünmeyi azaltarak yakıt tasarrufu sağlar
Balıkçı Tekneleri	Deniz organizmalarının yapışmasını önleyerek geminin temiz kalmasını sağlar
Petrol Platformları	Tuzlu suyun neden olduğu korozyona karşı koruma sağlar

Maersk Line gibi büyük lojistik şirketleri, yakıt tasarrufunu artırmak amacıyla süperhidrofobik kaplamalar kullanmaya başlamıştır. Japon ve Güney Kore tersaneleri, düşük sürtünmeli süperhidrofobik gövdeleri yeni nesil gemi üretiminde test etmektedir. Süperhidrofobik kaplamalar, ticari gemilere ek olarak lüks yatlar, feribotlar ve yolcu gemileri için de büyük avantajlar sunmaktadır.

Şekil 2: Biyolojik kirlenme aşamaları ve kirli gemi yüzeyi



Yat ve feribotlarda süperhidrofobik kaplamaların avantajları vardır. Bunlar; temizlik ve estetik koruma sağlar: Lüks yatlar için gövdede lekelenmeyi ve kir birikimini önler. UV dayanıklılığı artırılmış kaplamalar, güneş ışığı altında rengin solmasını engeller. Feribotlarda yakıt tüketimini azaltır ve bakım sürelerini kısaltır.

Tablo.3 Süperhidrofobik Kaplama Uygulama Alanları

Kullanım Alanı	**Faydaları**
Özel Yatlar	Leke ve kir birikimini önler, UV koruma sağlar
Hızlı Feribotlar	Daha düşük yakıt tüketimi, daha hızlı yolculuklar
Turistik Gemiler	Dış yüzeyin uzun süre temiz ve parlak kalmasını sağlar
Deniz Taksi ve Yolcu Gemileri	Tuzlu suya dayanıklılığı artırır, bakım maliyetlerini düşürür
Askeri Denizaltılar	Daha az ses üretimi, daha uzun görev süresi
Torpidolar ve Füzeler	Sürtünmeyi azaltarak hız ve menzili artırır
Deniz Keşif Araçları (ROV)	Daha uzun ömürlü operasyon, düşük enerji tüketimi
Otonom Deniz Araçları (AUV)	Düşük sürtünme ile daha fazla mesafe kat eder

2.2.Askeri Gemilerde Süperhidrofobik Kaplamalar

Askeri gemiler, stratejik operasyonlar için yüksek hız, düşük yakıt tüketimi, düşük akustik iz ve uzun ömürlü dayanıklılık gerektiren özel deniz araçlarıdır. Süperhidrofobik kaplamalar, bu gemilerin daha sessiz, daha hızlı ve daha verimli çalışmasını sağlayarak hem taktik hem de ekonomik avantajlar sunar (Hongyu Dong, Mengjiao Cheng, Yajun Zhang,a Hao Wei and Feng Shi, 2013).

Bu bölümde, süperhidrofobik kaplamaların savaş gemileri, destroyerler, denizaltılar ve torpidolar üzerindeki etkileri, gürültü azaltma teknolojileri ve kavitasyon önleme stratejileri ayrıntılı olarak incelenecektir. Savaş gemileri ve destroyerler, yüksek hız, güçlü silah sistemleri ve radar teknolojileri ile donatılmış askeri deniz araçlarıdır. Süperhidrofobik kaplamalar, bu gemilerin manevra

kabiliyetini artırırken yakıt tüketimini azaltarak operasyonel süreyi uzatmaktadır.

Hidrodinamik sürüklenmeyi azaltır: Geminin su içinde daha rahat hareket etmesini sağlayarak daha az yakıt harcamasına neden olur. Yüksek hızda stabiliteyi artırır. Yakıt tasarrufu sağlar: Destroyerler ve savaş gemileri genellikle uzun menzilli operasyonlar için tasarlanmıştır. %10-15 oranında yakıt tasarrufu, bu gemilerin daha uzun süre denizde kalmasını sağlar. Süperhidrofobik kaplamalar gemi gövdelerinin korozyona karşı direncini artırarak bakım ihtiyacını azaltır. Deniz biyolojik kirlenmesini önler, bu da uzun süre temiz bir yüzey anlamına gelir (Su, B.; Li, M. Lu, Q. H., 2010).

Destroyerler, deniz savaşlarında hızlı hareket kabiliyeti ve ateş gücü sağlayan ana gemilerdir. Süperhidrofobik kaplamalar, bu gemilerin hız avantajlarını destekler, Periskop, sonar ve pervanelerdeki ses dalgalarını minimize eder, tuzlu su korozyonuna karşı ekstra dayanıklılık ve destroyerin daha hızlı hareket etmesini sağlar. Denizaltılar, gizlilik ve operasyon süresi açısından en gelişmiş askeri deniz araçlarıdır. Süperhidrofobik kaplamalar, denizaltıların su altında daha hızlı ve daha sessiz hareket etmesine yardımcı olur. Ses yansıtmayı önleyerek sonar algılanabilirliğini azaltır. Düşük sürtünme sayesinde daha uzun menzil sağlar. Tuzlu suyun neden olduğu korozyona karşı dayanıklılık artırılır.

Torpidolar, düşman gemilerini veya denizaltıları hedef alan su altı mühimmatlarıdır. Süperhidrofobik kaplamalar, torpidoların hızını artırarak hedefe daha hızlı ulaşmasını sağlar. Sonar sistemlerinden kaçmayı kolaylaştırır ve enerji tüketimini azaltarak daha uzak hedeflere ulaşmasını sağlar.

2.3.Su Altı Araçlarında (Denizaltılar ve Rov'lar) Süperhidrofobik Kaplamalar

Denizaltılar, torpidolar ve insansız su altı araçları (ROV'ler) için sürtünmeyi azaltmak ve operasyonel verimliliği artırmak amacıyla süperhidrofobik kaplamalar büyük önem taşımaktadır. Düşük sürtünme sayesinde daha sessiz hareket sağlar, bu da düşman sonarları tarafından tespit edilme olasılığını azaltır. Yakıt ve enerji tüketimini optimize ederek menzili artırır. Kavitasyonu engelleyerek denizaltıların su altındaki performansını artırır.

Denizaltı keşif dronları ve uzaktan kumandalı araçlar (ROV'ler) için sürüklenme direncini azaltır. Otonom su altı araçlarının (AUV) daha uzun süre operasyon yapmasını sağlar. Derin su araştırmalarında cihazın kirliliğe karşı dayanıklı kalmasını sağlar (Dong, H. Y. Cheng, M. J. Zhang, Y. J. Wei, H. Shi, F.,2013).

ABD ve Çin donanmaları, süperhidrofobik kaplamalar kullanarak denizaltılarının akustik izlerini minimize etmeye çalışmaktadır. BP ve Shell gibi enerji şirketleri, ROV'lerin bakım süresini uzatmak için bu teknolojiyi kullanmaktadır. Ticari gemilerde yakıt tasarrufu sağlamak, biyolojik kirlenmeyi önlemek ve bakım maliyetlerini düşürmek için süperhidrofobik kaplamalar giderek daha fazla kullanılmaktadır. Yat ve feribot sahipleri için estetik ve koruma avantajları sunarak kaplamaların popülaritesini artırmaktadır. Denizaltılar, ROV'ler ve askeri araçlarda, operasyonel verimliliği artırarak daha uzun ve gizli görevler için büyük bir stratejik avantaj sağlamaktadır.

Yeni su itici kaplamalar, savaş gemilerinin yakıt maliyetlerini azaltarak yakıt ekonomisini artırabilir ve gemilerin suyu daha kolay kesmesini sağlayabilir. Bu yeni kaplama özellikle denizaltılar başta olmak üzere gemileri daha hızlı ve daha sessiz hale getirebilir. Gemi gövdeleri için dayanıklı "süperhidrofobik" su kaplamaları geliştirmeye çalışılmaktadır.

Su, hava kabarcıklarının üzerinden geçerken gemi gövdesine kıyasla daha az sürtünme ile karşılaşır. Bu nedenle çözüm, gövdeyi milyonlarca küçük hava kabarcığı ile kaplamaktır. Bu sayede sürtünme azalır, dolayısıyla gemiyi hareket ettirmek için gereken enerji miktarı da düşer. Bu da, savaş gemileri için daha yüksek yakıt verimliliği ve daha uzun menzil anlamına gelir.

Bir geminin yakıtının yüzde 60'ı veya daha fazlası sürtünmeyi yenmek için harcanmaktadır. Sürtünmede sadece yüzde 20'lik bir azalma bile önemli ölçüde yakıt tasarrufu sağlayacaktır. Ancak kaplamanın yıllarca su altında dayanıklı kalması sağlandığında, Donanma'nın sürekli bakım yapmasına gerek kalmamasını sağlanacaktır.

Yakıt verimliliğinin yanı sıra, süperhidrofobik kaplamaların iki potansiyel avantajı daha bulunmaktadır. Bunlardan biri, sürtünmenin azalmasıyla birlikte kaplamayla kaplanmış gemilerin biraz daha hızlı hale gelmesidir. Diğer önemli avantaj ise, yine sürtünmenin azalmasıyla sağlanan sessizliktir. Denizaltı savaşlarında sessizlik her şeydir; bu sayede denizaltılar hedeflerine fark edilmeden yaklaşabilir ve saldırıdan sonra izlerini kaybettirebilir. ABD Donanması, halihazırda denizaltılarının gövdelerini anekoik kaplamalarla kaplamaktadır. Bu, gövdeye yapıştırılan kauçuk veya polimer karolar aracılığıyla belirli sonar frekans bantlarında tespit edilme olasılığını azaltmak için tasarlanmış bir tekniktir.

Ancak 2017 yılı itibarıyla Donanma, bu anekoik kaplamaların denizde zamanla aşındığını ve döküldüğünü tespit etmiştir. Öte yandan, süperhidrofobik bir kaplamanın daha dayanıklı bir çözüm sunabilir ve ek olarak denizaltının tüm sonar türleri tarafından tespit edilmesini zorlaştırabilir (Kyle Mizokami, 2018).

Süperhidrofobik kaplamaların yalnızca askeri kullanım için değil, aynı zamanda ticari deniz taşımacılığı sektörü için de büyük etkileri olabilir. Bu kaplamalar, ticari taşımacılıkta yakıt maliyetlerini düşürerek küresel ölçekte yük taşımacılığı için kullanılan yakıt miktarını azaltabilir.

2.4.Gürültü Azaltma ve Kamuflaj Teknolojileri

Savaş gemileri, denizaltılar ve su altı araçları düşman sonarları tarafından tespit edilmemek için düşük akustik iz stratejileri geliştirmektedir. Süperhidrofobik kaplamalar, bu araçların su altındaki akustik izlerini azaltarak daha gizli hareket etmelerine yardımcı olur (Cheng, M. J.; Song, M. M.; Dong, H. Y.; Shi, 2014).

Kavitasyon kontrolü: Süperhidrofobik kaplamalar, pervanelerde ve gemi gövdelerinde suyun neden olduğu baloncuk oluşumunu önler. Sonar sinyallerini yansıtmaz: Akustik emici özellikler eklenerek düşman sonarları tarafından tespit edilme olasılığı düşürülür. Su altındaki akışkan dinamiğini optimize eder: Dalgıçlar ve insansız deniz araçları için kritik bir avantaj sağlar.

Tablo.7 Kavitasyon *Kontrolünün Faydaları*

Teknoloji	**Askeri Avantaj**
Akustik İz Azaltma	Düşman sonarları tarafından tespit edilmemeyi sağlar
Görünmezlik	Düşük radar izi için uyumlu kaplamalarla kullanılabilir
Su Altı Sabit Ses Seviyesi	Daha az mekanik titreşim ve gürültü yayılımı

2.5.Kavitasyon Önleme Stratejileri

Kavitasyon, sıvı içindeki düşük basınçlı bölgelerde oluşan hava kabarcıkları nedeniyle gemi pervanelerinin aşınmasına ve gürültü oluşumuna neden olan bir olaydır. Süperhidrofobik kaplamalar, bu sorunu önlemeye yardımcı olur. Gemi pervanelerinde aşınmaya neden olur. Sonar sistemlerinde gereksiz gürültü üretir. Yakıt tüketimini artırır ve operasyon süresini kısaltır. Pervane yüzeylerine süperhidrofobik kaplamalar uygulanarak suyun yapışması engellenir. Hava filmi (plastron etkisi) oluşturarak kavitasyonun etkileri minimize edilir. Askeri denizaltılar için özel olarak geliştirilmiş sürtünme azaltıcı kaplamalar test edilmektedir (Wu, Y. Liu, Z. l. Liang, Y. M. Pei, X. W. Zhou, F. Xue, Q. J. 2014).

Süperhidrofobik kaplamalar, denizcilik sektöründe gemilerin enerji verimliliğini artırarak yakıt tasarrufu sağlamada önemli bir rol oynar. Deniz taşımacılığında en büyük enerji kayıpları hidrodinamik sürtünme nedeniyle meydana gelir. Süperhidrofobik kaplamalar, gemilerin suyla temasını azaltarak sürüklenme kuvvetini minimize eder ve böylece yakıt tüketimini düşürür. Bu bölümde, süperhidrofobik kaplamaların gemilerde enerji verimliliği, sürtünme azaltma mekanizmaları, gemi gövdelerindeki etkisi ve karbon salınımı üzerindeki sonuçları detaylandırılacaktır.

2.6.Gemilerde Enerji Verimliliği ve Yakıt Tasarrufu Üzerine Etkileri

Denizcilik sektöründe, gemilerdeki yakıt tüketimi büyük ölçüde hidrodinamik sürüklenme kuvvetlerine bağlıdır. Süperhidrofobik kaplamalar, yakıt tüketimini düşürerek işletme maliyetlerini azaltır ve karbon emisyonlarını düşürür. Daha düşük sürtünme katsayısı sayesinde gemi motorları daha az güç harcar. Plastron etkisi ile suyun yüzeyle temasını azaltarak türbülansı düşürür.

Gemi gövdesindeki biofouling (biyolojik kirlenme) sorunlarını ortadan kaldırarak sürtünmeyi azaltır (McHale, G.; Newton, M. I.; Shirtcliffe, N. J., 2010).

Tablo.8 Yakıt Tüketim Bilgileri

Gemi Türü	**Ortalama Yakıt Tüketimi (Ton/Gün)**	**Süperhidrofobik Kaplama ile Tasarruf (%)**
Kargo Gemisi (Container)	150-300	%8-12
Tanker Gemisi	250-400	%6-10
Yolcu Gemisi (Cruise)	200-350	%10-15
Hızlı Feribot	50-150	%8-10

2.7.Hidrodinamik Sürtünme Azaltma Mekanizmaları

Süperhidrofobik kaplamalar, sürtünmeyi azaltan çeşitli mekanizmalar aracılığıyla gemilerin su içinde daha verimli hareket etmesini sağlar. Süperhidrofobik kaplamalar, yüzeyde ince bir hava tabakası oluşturarak suyun gövdeyle temasını azaltır. Bu hava tabakası sayesinde gemi gövdesi su içinde daha az dirençle hareket eder. Süperhidrofobik yüzeyler, suyun türbülanslı akışını azaltarak gemi hareketini daha verimli hale getirir. Daha düzgün akış koşulları, gemi hızını artırırken motorun daha az enerji tüketmesini sağlar. Nano ölçekli yapılar, suyun yüzeye tutunmasını engelleyerek hidrodinamik kayıpları en aza indirir. Mikro-kanallar sayesinde suyun akış yönü optimize edilir ve sürtünme azalır (Lauga, E.; Stone, H. A., 2003).

CFD (Computational Fluid Dynamics – Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) simülasyonları, süperhidrofobik kaplamaların gemi gövdesi üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılan bir mühendislik yöntemidir. Süperhidrofobik kaplamalar ile geleneksel kaplamaların karşılaştırılması. Plastron etkisinin gemi üzerindeki hidrodinamik sürtünmeye etkisinin ölçülmesi..

Tablo.9 Farklı Deniz Koşullarında Kaplamaların Performans Değerlendirmesi

Kaplama Türü	**Sürtünme Katsayısı (Cf)**	**Hidrodinamik Direnç Azalması (%)**
Geleneksel Anti-Fouling Boya	0.0055	0% (Referans)
Süperhidrofobik Kaplama	0.0042	%15-25
Mikro-Nano Yapılı Süperhidrofobik Kaplama	0.0038	%20-30

2.8.Biyolojik Kirlenme ve Antı-Foulıng Özellikleri

Biyolojik kirlenme (biofouling), gemi gövdelerinin yosun, midye, kabuklu deniz canlıları ve mikroorganizmalar tarafından kaplanmasıdır. Bu durum, hidrodinamik sürtünmeyi artırarak yakıt tüketimini yükseltir ve geminin hızını düşürür. Geleneksel anti-fouling boyalar, biyolojik kirlenmeyi önlemek için toksik kimyasallar içerirken, süperhidrofobik kaplamalar çevre dostu bir alternatif sunar (Choi, C.-H. Kim, C.-J., 2006). Bu bölümde, biyolojik kirlenmenin gemilere etkisi, yosun ve deniz canlılarının yüzeye tutunmasını engelleme yöntemleri, geleneksel anti-fouling boyaların süperhidrofobik kaplamalarla karşılaştırılması ve uzun vadeli kaplama performansı incelenecektir.

Deniz ortamındaki organizmalar, gemi gövdelerine yapışarak zamanla yüzeyi kaplar ve geminin hidrodinamik performansını önemli ölçüde etkiler. Hidrodinamik sürtünmeyi artırır: Geminin su içindeki direnci artar, bu da daha fazla yakıt tüketimine neden olur. Yakıt maliyetlerini yükseltir: %20'ye varan yakıt tüketimi artışı gözlemlenmiştir. Geminin hızını azaltır: Ağır biofouling durumlarında hız %5-10 oranında düşebilir. Korozyonu artırır: Deniz canlılarının asidik salgıları metal yüzeylerde korozyonu

hızlandırır. Biyolojik istilalar için risk oluşturur: Gemiler, bir limandan diğerine giderken yabancı türleri farklı ekosistemlere taşıyarak deniz ekosistemlerine zarar verebilir. Süperhidrofobik kaplamalar, yosun ve kabuklu deniz canlılarının gemi gövdesine yapışmasını engellemek için yenilikçi bir yöntem sunar. Düşük temas açısı sayesinde suyun yüzeyden hızlı akmasını sağlar ve organizmaların tutunmasını engeller. Hava filmi (plastron etkisi) oluşturarak su altı mikroorganizmalarının yüzeye ulaşmasını önler. Nano yapılandırılmış yüzeyler, deniz canlılarının yapışmasını zorlaştırır (Su, B. Li, M. Lu, Q. H., 2010).

*Mekanik ve Kimyasal Önleme Yöntemler olarak; m*ikro ve nano yapılar, yüzeyin yapısını değiştirerek organizmaların tutunmasını engeller ve kimyasal içermediği için çevre dostudur. Süperhidrofobik Kaplamalar; hava cepleri oluşturarak su altı mikroorganizmalarını uzak tuttuğu için uzun ömürlüdür, sürtünmeyi azaltır. Bunun yanında anti-Fouling boyalar ise; biyosit içeren kimyasallar salgılayarak organizmaları öldürdüğünden etkili ancak çevreye zarar verebilir. Geleneksel anti-fouling boyalar, deniz organizmalarını öldüren kimyasal maddeler (biyositler) içerir. Ancak, bu kimyasallar deniz ekosistemine zarar verdiğinden dolayı yeni nesil süperhidrofobik kaplamalar daha çevre dostu bir alternatif olarak görülmektedir (Y. Yan, N. Gao, W. Barthlott, 2011).

Tablo.11 Karşılaştırmalı Analiz

Özellikleri	**Geleneksel Anti-Fouling Boyalar**	**Süperhidrofobik Kaplamalar**
Biofouling Önleme	Kimyasal biyositler ile organizmaları öldürür	Yapışmayı fiziksel olarak engeller
Çevresel Etki	Yüksek, toksik maddeler içerebilir	Düşük, çevre dostudur
Bakım Süresi	1-2 yılda bir yenilenmeli	5-10 yıl arası dayanıklıdır
Sürtünme Azaltma	Orta düzeyde	Yüksek düzeyde

2.9.Süperhidrofobik Kaplamaların Avantajları

Biyosit içermez, çevre dostudur. Daha uzun ömürlüdür, bakım ihtiyacını azaltır. Sürtünmeyi düşürerek ek olarak yakıt tasarrufu sağlar. Süperhidrofobik kaplamalar, geleneksel anti-fouling boyalara kıyasla daha uzun süre etkin kalmaktadır. 10 yıl veya daha uzun süre etkisini koruyabilen kaplamalar geliştirilmiştir. Geleneksel boyalar ise sık sık yenilenmelidir, bu da ek maliyet ve kimyasal atık oluşturur. Süperhidrofobik kaplamalar, biyosit içermediği için deniz ekosistemine zarar vermez. Deniz yaşamını koruyarak sürdürülebilir gemi taşımacılığına katkıda bulunur. Geleneksel anti-fouling boyalar, deniz suyuna kimyasal karışmasına neden olarak ekosistemlere zarar verebilir. Biyolojik kirlenme, gemilerin performansını düşüren ve bakım maliyetlerini artıran önemli bir sorundur. Süperhidrofobik kaplamalar, toksik kimyasallar kullanmadan biyolojik kirlenmeyi önleyen çevre dostu bir çözümdür. Geleneksel anti-fouling boyalara kıyasla daha uzun ömürlüdür, daha az bakım gerektirir ve yakıt tasarrufu sağlar. Uzun vadeli performansları sayesinde sürdürülebilir gemi taşımacılığına önemli katkılar sunmaktadır (Dong, H. Y. Cheng, M. J. Zhang, Y. J. Wei, H. Shi, F., 2013).

3.Denizcilik Sektöründeki Güncel Araştırmalar ve Gelişmeler

Denizcilik sektöründe süperhidrofobik kaplamalar üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda büyük bir ivme kazanmıştır. Bu kaplamalar, özellikle askeri ve ticari gemilerde sürtünmeyi azaltma, biyolojik kirlenmeyi önleme, yakıt tasarrufu sağlama ve çevresel etkiyi minimize etme gibi kritik alanlarda uygulanabilirlik kazanmaktadır. Günümüzde, çeşitli akademik ve endüstriyel araştırmalar, bu teknolojilerin daha dayanıklı ve uzun ömürlü hale getirilmesine odaklanmaktadır.

Bu bölümde, son beş yılda yapılan araştırmalar, ABD Donanması ve NATO'nun süperhidrofobik kaplamalara yönelik savunma sanayi uygulamaları, biyomimetik yüzey kaplama teknolojileri ve gelişmekte olan yeni nesil kaplama teknolojileri detaylandırılacaktır. Savunma sanayiinde süperhidrofobik kaplamalar, askeri gemi ve denizaltıların sonar izini azaltmak, yakıt tasarrufu sağlamak ve biyolojik kirlenmeyi engellemek amacıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır. Özellikle denizaltı ve insansız su altı araçlarında bu kaplamalar, sürtünmeyi düşürerek daha düşük enerji tüketimi sağlamaktadır.

Virginia Sınıfı Denizaltılar ve Akustik İz Azaltma: ABD Donanması, Virginia sınıfı denizaltılarda süperhidrofobik kaplamalar kullanarak akustik iz azaltma ve su altı sürtünmesini düşürme testleri gerçekleştirmektedir. Bu testler, denizaltıların daha sessiz hareket etmesini sağlayarak düşman sonar sistemlerinden gizlenmelerine yardımcı olmaktadır (Xinghua Wu, Minghao Xiao, Junting Zhang, Guohuang Ta, Yuton g Pan, Yuekun Lai, Zhong Chen, 2023).

Torpido ve İnsansız Su Altı Araçları: ABD Donanması'na bağlı araştırma laboratuvarları, torpidolar ve insansız su altı araçlarında (UUV – Unmanned Underwater Vehicle) sürtünmeyi minimize eden süperhidrofobik kaplamaları test etmektedir. Bu sayede araçların hızının artırılması ve enerji verimliliğinin maksimize edilmesi hedeflenmektedir.

İngiltere Kraliyet Donanması ve Stealth Teknolojisi: İngiltere Kraliyet Donanması, stealth (gizlilik) teknolojisi kapsamında radar ve sonar izini azaltan süperhidrofobik kaplamalar üzerinde çalışmalar yürütmektedir. Bu kaplamalar, özellikle düşük frekansta çalışan sonar sistemlerinin yansımalarını azaltarak tespit edilme riskini minimize etmektedir.

NATO ve Biyolojik Kirlenme Karşıtı Kaplamalar: NATO'nun savunma araştırmaları birimi, süperhidrofobik kaplamaların askeri gemilerde biyolojik kirlenmeye karşı etkinliğini değerlendirmektedir. Deniz yüzeyinde bakteri, yosun ve kabuklu organizmaların birikmesini engelleyerek gemilerin hız kaybını önleyen bu kaplamalar, yakıt tüketimini de düşürmektedir (Xinghua Wu, Minghao Xiao, Junting Zhang, Guohuang Ta, Yuton g Pan, Yuekun Lai, Zhong Chen, 2023).

Biyomimetik yaklaşımlar, doğadan ilham alarak geliştirilmiş yüzey teknolojilerini içermektedir. Denizcilik sektöründe süperhidrofobik kaplamalar genellikle lotüs yaprağı, köpekbalığı derisi ve su böceklerinin bacak yapılarından ilham alınarak tasarlanmaktadır.

Lotus Etkisi: Doğada lotüs yapraklarının suyu tutmayan yüzeyi, süperhidrofobik kaplamalar için temel bir model olarak kullanılmaktadır. Geliştirilen nanoteknolojik kaplamalar, yüzey gerilimini azaltarak suyun ve kirleticilerin yüzeyden kolayca akmasını sağlamaktadır.

Köpekbalığı Derisi Modifikasyonu: Köpekbalıklarının derisi, düşük sürtünme özellikleri ile bilinmektedir. Mikro-dalga benzeri yapılar içeren süperhidrofobik kaplamalar, deniz araçlarında akışkan direncini azaltmak ve biyolojik kirlenmeyi önlemek için uygulanmaktadır.

Su Böceklerinden İlham Alan Kaplamalar: Su böceklerinin hidrofobik bacak yapısı, hava ceplerinin korunmasına yardımcı olur. Bu mekanizma, denizaltı araçlarının su altında düşük direnç ile hareket etmesine ve enerji tasarrufu sağlamasına katkıda bulunabilecek kaplama teknolojilerinin geliştirilmesine ilham vermektedir.

3.1.Yeni Nesil Süperhidrofobik Kaplama Teknolojileri

Gelişmekte olan süperhidrofobik kaplama teknolojileri, dayanıklılık, kendini yenileyebilme ve uzun ömürlü kullanım gibi özellikleri içermektedir. Yeni nesil kaplamaların geliştirilmesi için nanokompozit malzemeler ve hibrit polimer sistemleri üzerinde yoğun araştırmalar yürütülmektedir.

Dayanıklılığı Artırılmış Nanokompozit Kaplamalar: Geleneksel süperhidrofobik kaplamalar, mekanik aşınmaya karşı hassas olduğu için uzun süreli kullanımda verimliliğini kaybedebilmektedir. Karbon nanotüpler ve grafen bazlı kaplamalar, aşınmaya dayanıklı süperhidrofobik yüzeylerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Kendini Yenileyebilen Kaplamalar: Deniz ortamında sürekli olarak maruz kalınan fiziksel ve kimyasal etkilere dayanıklı kaplamalar büyük önem taşımaktadır. Kendini yenileyebilen polimerler, yüzeydeki aşınmayı onararak süperhidrofobik özelliğin korunmasını sağlamaktadır.

Çevre Dostu Antifouling Kaplamalar: Geleneksel antifouling kaplamalar, biyosit bazlı kimyasallar içermesi nedeniyle çevreye zarar verebilmektedir. Yeni nesil biyolojik olarak parçalanabilen süperhidrofobik kaplamalar, hem çevre dostu hem de biyolojik kirlenmeye karşı etkili çözümler sunmaktadır.

4.SONUÇ

Son yıllarda süperhidrofobik kaplamalar üzerine yapılan akademik çalışmalar hızla artmaktadır. ABD Donanması ve NATO, askeri uygulamalar için bu teknolojileri test etmektedir. Biyomimetik yüzeyler, denizcilikte hidrodinamik avantajlar sunmaktadır. Gelişmekte olan yeni nesil kaplamalar, çevre dostu, dayanıklı ve daha uzun ömürlü hale getirilmektedir. Süperhidrofobik kaplamalar, denizcilik sektöründe yakıt tasarrufu sağlama, biyolojik kirlenmeyi önleme, korozyon direncini artırma ve hidrodinamik sürtünmeyi azaltma açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır.

Denizcilik sektörü, süperhidrofobik kaplamalar konusunda aktif Ar-Ge çalışmaları yürütmektedir. Gelecekte, kendini onarabilen mikro ve nano yapılar içeren akıllı kaplamalar geliştirilerek aşınma ve yüzey hasarı durumunda kendi kendini tamir edebilen sistemler oluşturulacaktır. Plastron etkisini uzun süre koruyabilen kaplamalar sayesinde su altında daha uzun süre havayı tutarak sürtünme azaltılacaktır. Grafen bazlı kaplamalar, yüksek aşınma direnci ve esneklik sunarak gemi ve denizaltılar için daha dayanıklı hale getirilecektir.

Çevre dostu çözümler kapsamında flor içermeyen hidrofobik kaplamalar geliştirilerek deniz ekosistemine zarar vermeyen anti-fouling çözümleri yaygınlaştırılacaktır. NATO ve IMO gibi uluslararası kuruluşlar, biyosit içermeyen kaplamaların deniz taşımacılığına entegrasyonunu desteklemektedir. Isı ve tuzluluk değişimlerine uyum sağlayan kaplamalar, gemi yolculukları sırasında ortam şartlarına göre yüzey özelliklerini değiştirebilecektir.

Elektriksel olarak uyarılabilen yüzeyler, buzlanma önleme veya yakıt verimliliği artırma gibi özel uygulamalarda kullanılabilecektir. Süperhidrofobik kaplamaların ticari ve askeri kullanımlarında benimsenmesi için konteyner ve tanker gemilerinde geniş ölçekli uygulamalar başlatılmalı, saha testleri artırılmalı ve yatırım stratejileri geliştirilmelidir. Deniz taşımacılığı şirketleri, bu kaplamaların enerji verimliliği üzerindeki etkisini analiz ederek IMO'nun sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yatırımlarını artırmalıdır.

Kaynakça

Mehmet Hancer, Harun Arkaz, A facile fabrication of superhydrophobic nanocomposite coating with contact angles approaching the theoretical limit, Applied Surface Science 354 (2015) 342–346.

S. Farhadi, M. Farzaneh, S. Kulinich, Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces, Appl. Surf. Sci. 257 (2011) 6264–6269.

Y. Yan, N. Gao, W. Barthlott, Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: a review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces, Adv. Colloid Interfac. 169 (2011) 80–105.

P.Manoudis,I.Karapanagiotis,A. Tsakalof,I. Zuburtikudis,C. Panayiotou, Superhydrophobic composite films produced on various substrates, Langmuir 24 (2008) 11225–11232.

B. Sahoo, B. Kandasubramanian, Recent progress in fabrication and characterisation of hierarchical biomimetic superhydrophobic structures, RSC Adv. 4 (2014) 22053–22093.

J. Ou, J.B. Perot, J.P. Rothstein, Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces, Phys. Fluids, 16 (2004) 4635-4660.

S. Srinivasan, W. Choi, K.-C. Park, S.S. Chhatre, R.E. Cohen, G.H. McKinley, Drag reduction for viscous laminar flow on spray-coated non-wetting surfaces, Soft Matter, 9 (2013) 5691–5702.

J. Genzer, K. Efimenko, Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review, Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, 22 (2006).

W. Barthlott, C. Neinhuis, Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, Planta, 202 (1997) 1-8.

D.L. Hu, B. Chan, J.W.M. Bush, The hydrodynamics of water strider locomotion, Nature, 424 (2003) 663-666.

Hongyu Dong, Mengjiao Cheng, Yajun Zhang,a Hao Wei and Feng Shi, Extraordinary drag-reducing effect of a superhydrophobic coating on a macroscopic model ship at high speed, Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1, 5886–5891.

Zhang, X.; Shi, F.; Niu, J.; Jiang, Y. G.; Wang, Z. Q. Superhydrophobic Surfaces: from Structural Control to Functional Application. J. Mater. Chem. 2008, 18, 621−633.

Shiu, J.-Y.; Kuo, C.-W.; Chen, P.; Mou, C.-Y. Fabrication of Tunable Superhydrophobic Surfaces by Nanosphere Lithography. Chem. Mater. 2004, 16, 561−564.

Kenneth, K. S. L.; Jose, B.; Kenneth, B. K. T.; Manish, C.; Gehan, A. J. A.; William, I. M.; Gareth, H. M.; Karen, K. G. Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests. Nano Lett. 2003, 3, 1701−1705.

Dong, H. Y. Cheng, M. J. Zhang, Y. J. Wei, H. Shi, F. Extraordinary Drag-Reducing Effect of a Superhydrophobic Coating on a Macroscopic Model Ship at High Speed. J. Mater. Chem. A 2013, 1, 5886−5891.

Su, B. Li, M. Lu, Q. H. Toward Understanding Whether Superhydrophobic Surfaces Can Really Decrease Fluidic Friction Drag. Langmuir 2010, 26, 6048−6052.

Cheng, M. J. Song, M. M. Dong, H. Y. Shi, F. Surface Adhesive Force: a Metric Describing the Drag-Reducing Effects of Superhydrophobic Coatings. Small 2014, DOI: 10.1002/ smll.201402618.

Wu, Y. Liu, Z. l. Liang, Y. M. Pei, X. W. Zhou, F. Xue, Q. J. Switching Fluid Slippage on pH-Responsive Superhydrophobic Surfaces. Langmuir 2014, 30, 6463−6468.

Cassie, A. B. D.; Baxter, S. Wettability of Porous Surface. Trans. Faraday Soc. 1944, 40, 546−551.

Wenzel, R. N. Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. Ind. Eng. Chem. 1936, 28, 988−994.

McHale, G.; Newton, M. I.; Shirtcliffe, N. J. Immersed Superhydrophobic Surfaces: Gas Exchange, Slip and Drag Reduction Properties. Soft Matter 2010, 6, 714−719.

Choi, C.-H.; Kim, C.-J. Large Slip of Aqueous Liquid Flow over a Nanoengineered Superhydrophobic Surface. Phys. Rev. Lett. 2006, 96, 066001.

Lauga, E.; Stone, H. A. Effective Slip in Pressure-Driven Stokes Flow. J. Fluid Mech. 2003, 489, 55−77.

Kyle Mizokami, Navy Testing Superhydrophobic Hull Coatings For Submarines, https://www.popularmechanics.com/military/research/a22063315/navy-testing-superhydrophobic-hull-coatings-for-submarines/

Xinghua Wu, Minghao Xiao, Junting Zhang, Guohuang Ta, Yutong Pan, Yuekun Lai, Zhong Chen, An underwater stable superhydrophobic surface for robust ultra-long-lasting biofouling resistance, Chemical Engineering Journal, 2023, Volume 462, 1-10.

CHAPTER 11

NUMERICAL SIMULATION OF TWO PHASE FLOW IN A CLOSED CHANNEL USING ANSYS FLUENT VOF MODEL

BEKİR DOĞAN[1]
ÜNSAL AYBEK[2]

Introduction

ANSYS Fluent is the most powerful CFD solver and one of the core software within ANSYS. It is a general purpose computational fluid dynamics (CFD) tool that can solve many processes such as internal flow, external flow, turbulence, combustion, heat transfer. It covers a variety of topics, from airflow over aircraft wings to combustion in furnaces, from blood flow to oil platforms, from bubble columns to semiconductor manufacturing, and wastewater treatment plants. Flow modeling is a challenging field that requires in-depth theoretical knowledge.

The majority of flows encountered in nature are two-phase flows. Two-phase regimes can be gas-liquid, liquid-liquid, gas-solid,

[1] Asst. Prof. Dr. Tokat Gaziosmanpasa University, Tokat Vocational School, Department of Machine and Metal Technologies, Orcid: 0000-0002-8986-7174
[2] Asst. Prof. Dr. Tokat Gaziosmanpasa University, Tokat Vocational School, Department of Electricity and Energy, Orcid: 0000-0003-3573-9385

and liquid-solid. Computational fluid dynamics programs such as Fluent offer some approaches to solving two-phase flow problems.

The most important reason that makes the numerical solution of two-phase flow difficult is the lack of a universal solution model. Since the solution models used vary greatly, the problem must be examined well and the solution model must be decided accordingly.

Two phase flow models and comparison

The first step in solving a two-phase problem is to choose a two-phase flow regime and an appropriate two-phase flow model for that flow pattern. There is no general model that can be used to solve two-phase flows numerically; each problem is unique. Computational fluid dynamics programs such as Fluent provide approaches to solving two-phase flow problems.

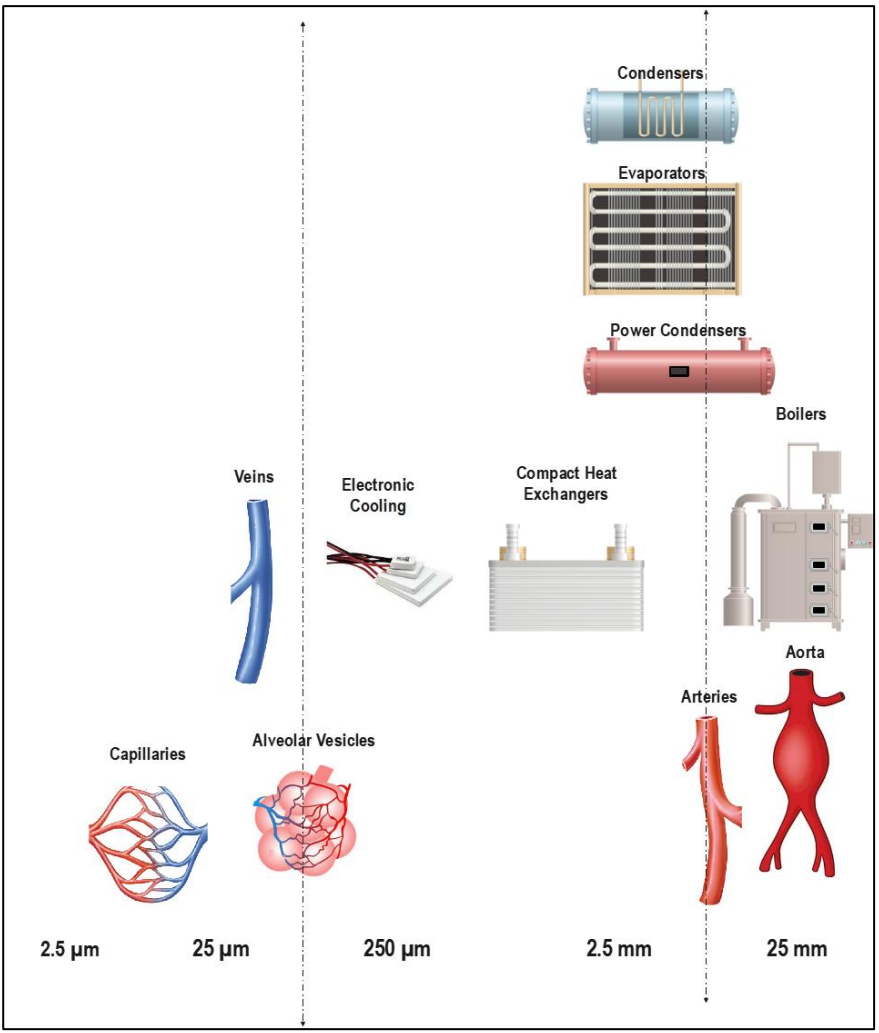
Two phase flow models that are widely used in ANSYS Fluent; VOF, Mixture and Eulerian models can be given as examples. VOF model is preferred when it is desired to examine the location, shape and formation of the interface between two or more immiscible liquids. Mixture model solves the equations of energy, momentum continuity and average volume fraction of the mixture for the secondary phase, but unlike VOF model, it allows the phases to mix. Eulerian is the most complex two-phase flow model in ANSYS Fluent and is designed for two or more miscible liquids.

Classification of channels

In applications, heat, momentum and mass transfer processes can be carried out in a wide range from nano-sized channels to meter-sized channels. Channel dimensions of different systems are shown in Figure 1. Nano-sized channel structures are widely used in biological systems where mass transfer is important and are called biological channels. When fluid mechanics and heat transfer applications are taken into account, channel diameters have shifted

from 25 mm to smaller diameters. The widespread use of channel structures, whose dimensions are expressed in micrometers, in engineering has led to the formation of a classification called microscale.

Figure 1 Classification of channels according to their size



Source: Created by the author

Although there is no general definition in the literature to classify channels, various classifications have been created based on engineering applications. In the literature, hydraulic diameter is generally used as a size criterion independent of the process type to classify channel sizes and determine transitions between sizes (Kandlikar and King 2014). Considering the limitations of manufacturing techniques of small systems in engineering applications where miniaturization is important, channels are classified according to their hydraulic diameters as in Table 1.

Table 1 Classification of channels according to hydraulic diameter

Classification	**Hydraulic Diameter, D_h**
Macrochannels	$D_h > 3$ mm
Minichannels	3 mm $\geq D_h >$ 200 μm
Microchannels	200 μm $\geq D_h >$ 10 μm
Transition microchannels	10 μm $\geq D_h >$ 1 μm
Transition nanochannels	1 μm $\geq D_h >$ 0,1 μm
Nanochannels	0,1 μm $\geq D_h$

Source: Kandlikar and Grande 2003

Flow in microchannels

Micro-scale flow is a field of research limited to micro-scale geometries where surface forces are much more dominant than volumetric forces in order to precisely control fluid motion. Micro-flow is a sub-branch of fluid mechanics. The fundamental equations that describe the physics of much larger volume flows are the same as those used in micro-flow systems. The dimensions in a micro-flow system are 1 million times smaller than the dimensions that fluid mechanics generally deals with. These dimensional differences also lead to differences in flow regimes.

While both laminar and turbulent flows can be observed in classical fluid mechanics, only laminar flows can be observed in microflow systems due to their small size. Gravitational forces can often be neglected due to the small amount of liquid used in

microflow systems. In this study, two-phase flow analysis in a microchannel will be analyzed using the VOF method.

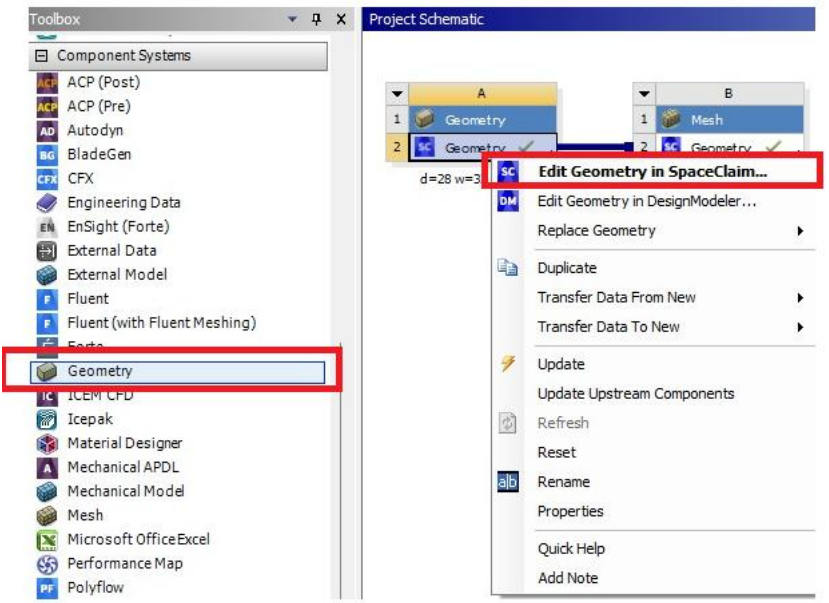
Numerical modeling of flow in microchannel

In the study, the model was designed in 3D and solutions for 3D were made in the Fluent program.

Creating the geometry

The Workbench Program is opened on the computer and the Geometry is selected from the Toolbox section and transferred to the worksheet. The drawing page is opened with the Edit Geometry in SpaceClaim command.

Figure 2 Geometry modeling with Workbench

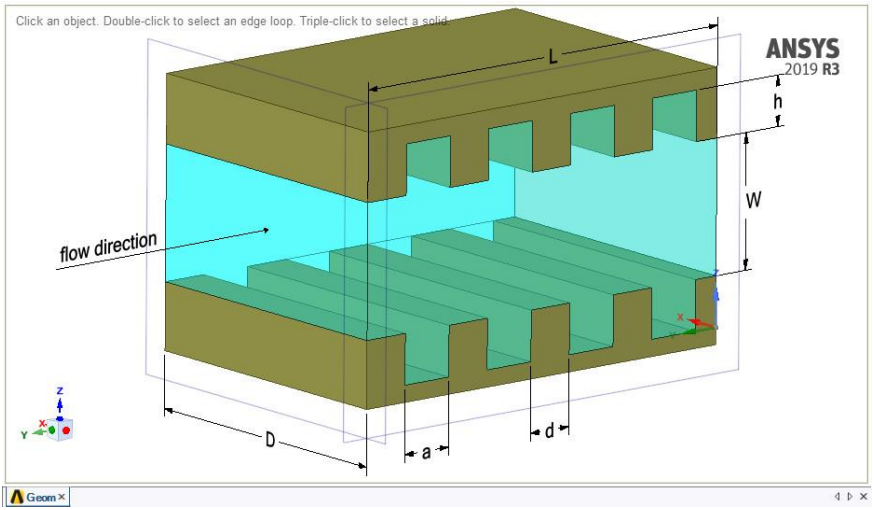


Source: Created by the author

Figure 3 shows the schematic diagram and some physical dimensions of the microchannel. The length of the microstructured channel is shown as L, the height of the channel is W, the width of

the channel is D, the width between asperities is a, the roughness thickness is d and the roughness height is h. The width between asperities, the roughness thickness and the roughness height (a = h = d = 0) of the smooth microchannel are assumed to be zero. The geometric dimensions of the microchannel structures are shown in Table 2 (Doğan et al. 2023)

Figure 3 Design of microchannel



Source: Dogan et al. 2023

Table 2. Geometric dimensions of microchannels

Channel Length (L)mm	Channel Width (D)µm	Channel Height (W)µm	Roughness Thickness (d)µm	Width Between Asperities (a)µm	Roughness Height (h)µm
24	180	102	0	0	0
24	180	102	28	32	30
24	180	102	28	62	30

Source: Dogan et al. 2023

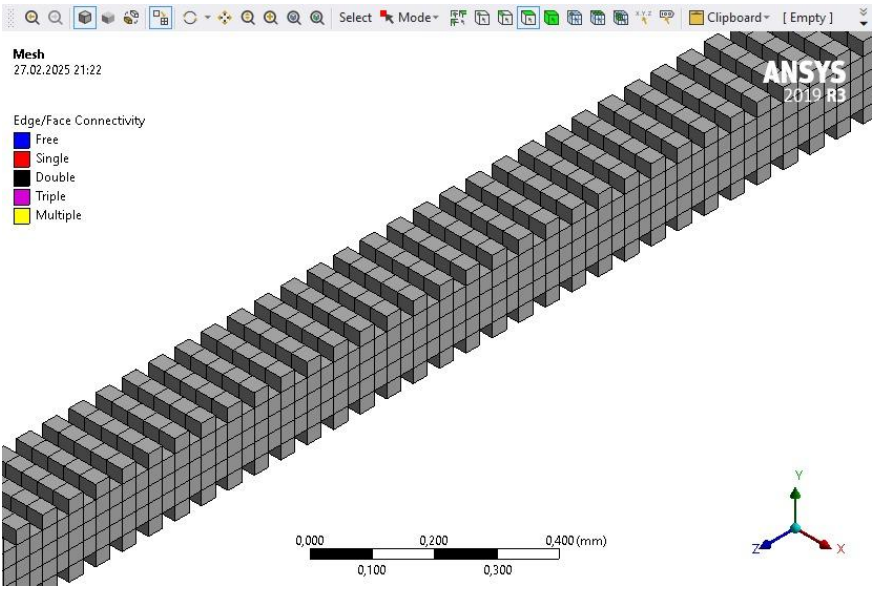
Mesh design

The numerical method used to solve problems such as solid and fluid mechanics, heat transfer and vibration using computers is

called the finite element method and is a very advanced technique. With the Finite Elements Method, models are divided into a finite number of elements. These finite number of elements are connected to each other at certain points and these connection points are called nodes.

Mesh designs were created by transferring the geometries prepared in the ANSYS SpaceClaim module to the Meshing Module to create the mesh structure.

Figure 4 Mesh view



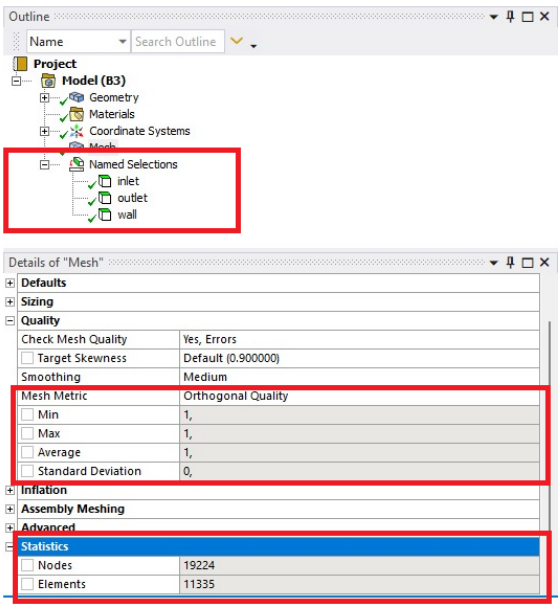
Source: Created by the author

The structure called Mesh is created by dividing the volumes transferred from the geometry into small calculable structures. An important point in this section is to determine the dimensions of these small volumes. Since choosing very small dimensions in the Mesh structure will affect the computer performance excessively, this will result in loss of time and delay in convergence. Using very large

dimensions reduces the accuracy of the results. In order to prevent such errors, the results are tested using different numbers of elements. This method is called "mesh optimization" or "independence from the number of elements" (Paz et al., 2019).

For this reason, firstly the mesh independence test was performed and the mesh number for which the solution is independent of the mesh structure was determined. The analyses were performed by changing the dimensions of the mesh elements with the command “Mesh> Details of Mesh> Element Size”. Mesh quality values, node and element numbers are shown in Figure 5 with the ANSYS Fluent Meshing> Mesh command.

Figure 5 Mesh information



Source: Created by the author

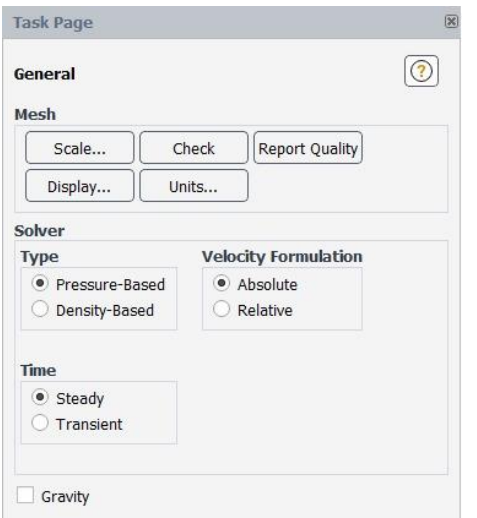
Another factor to be considered when preparing the mesh is the optimization of the geometric shapes of the small elements into which the volume is divided. Whether the geometric shapes are

suitable or not is called “Skewness and Orthogonal Quality” in CFD analyses. It has a value between 0 and 1. It is desired that the “maximum skewness and minimum orthogonal quality” values are within the acceptable range at the end of the mesh operations. It is desired that the “maximum skewness” figure does not exceed 0.95 as much as possible, and the “minimum orthogonal quality” figure does not fall below 0.1 as much as possible (Fatchurrohman and Chia 2017). When Figure 5 is examined, it is seen that the mesh structures are suitable because the orthogonal quality values provide reference values. The channel entrance is defined as Inlet, the part where the fluid will exit is defined as Outlet, and the remaining parts of the channel are defined as Wall.

Determining solver properties in ANSYS Fluent software

Solver properties are edited as shown in the figure with the General command from the main menu.

Figure 6 Defining the solution in the Fluent program

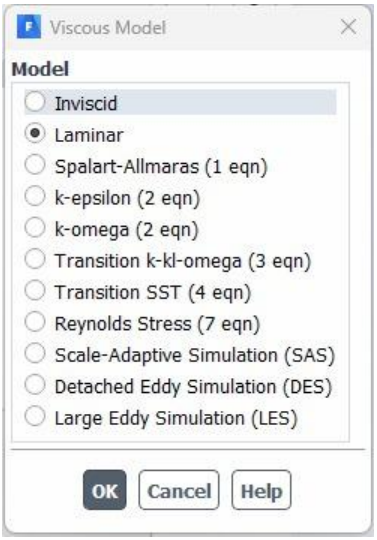


Source: Created by the author

Defining the flow type

It is determined with the Setup / Models / Viscous command from the main menu. The Laminar option is selected in the analysis for the laminar region.

Figure 7. Definition of flow pattern

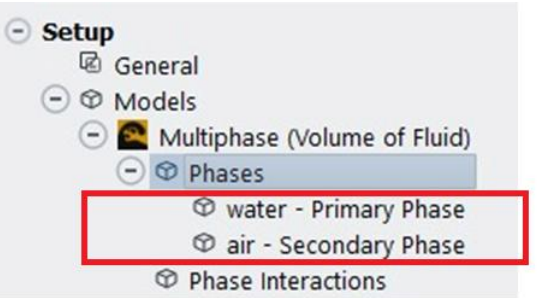


Source: Created by the author

Selection of phases

In the ANSYS Fluent program, the VOF two-phase flow model was used to monitor the gas-liquid interface (Zhu et al., 2021). In the ANSYS Fluent program, the VOF model was selected with the "Models>Multiphase>Volume of Fluid" option. The phases must be selected along with the VOF model selection. As seen in Figure 8, water was set as the primary phase and air as the secondary phase in the flow with the "Multiphase>Volume of Fluid>Phases" option.

Figure 8. Selection of phases

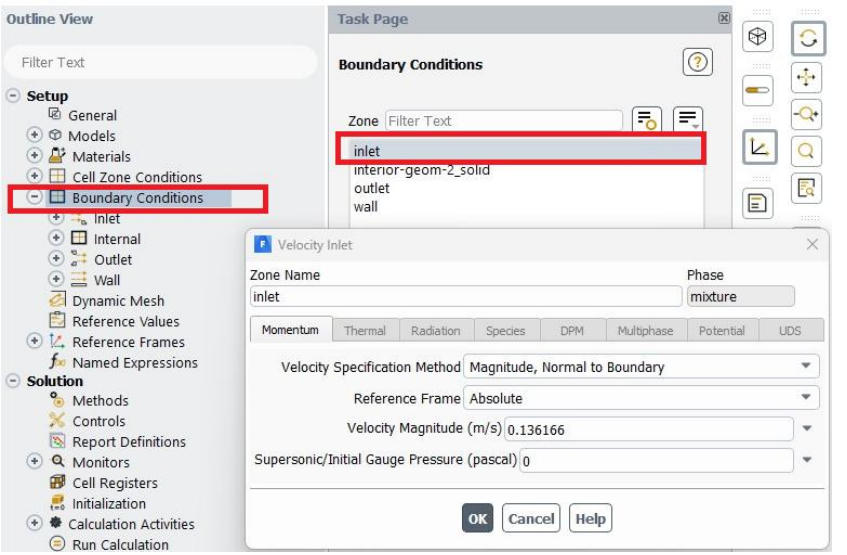


Source: Created by the author

Determination of boundary conditions

The Define / Boundary Conditions command is used from the main menu. The velocity values of the fluid are entered from the "Velocity Inlet" tab.

Figure 9 Boundary conditions

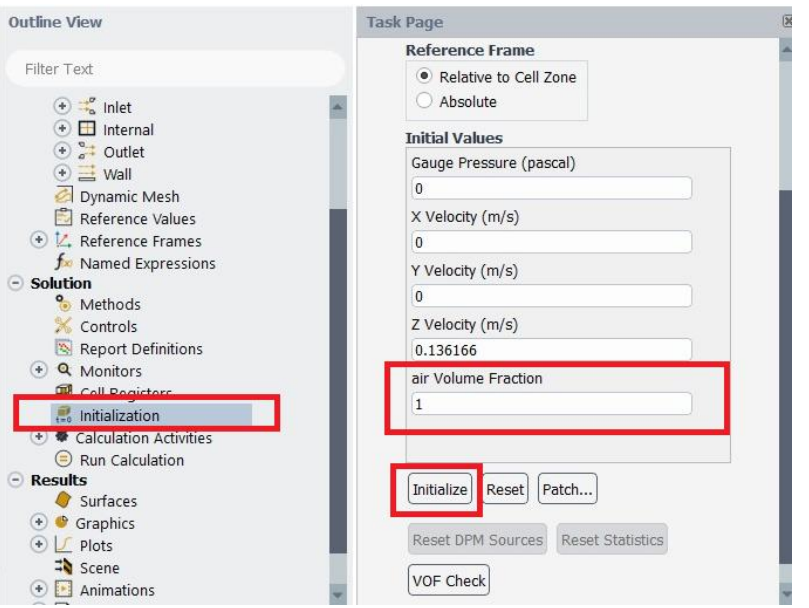


Source: Created by the author

Defining initial values

The Solve / Initialize / Initialize command determines where the program will start the solution. At the beginning of the flow, the channel is considered to be completely filled with air and the "Air Volume Fraction" value is entered as 1. The effect of gravity is ignored during the calculation. CFD analysis consists of two phases that do not mix with each other.

Figure 10 Defining Initialization values

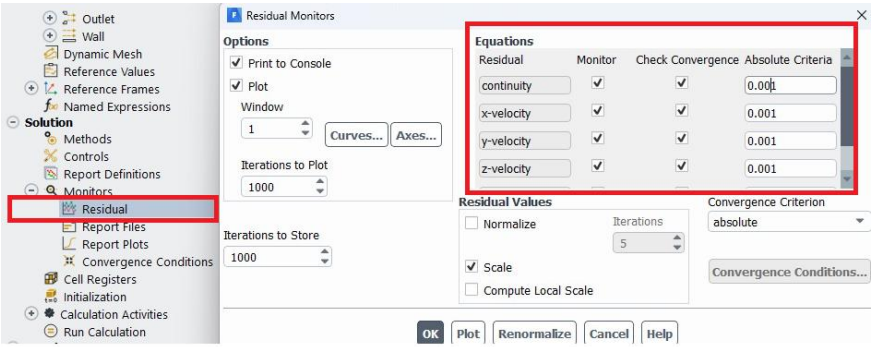


Source: Created by the author

Determination of iteration parameters

The Solve / Monitors / Residual command determines the value to which the solution will converge. The Solve / Iterate command starts the iteration.

Figure 11 Determination of iteration parameters



Source: Created by the author

The calculation is started with the command “Solution>Run Calculation”. When the solution converges, it is reported graphically. Information about the flow simulation is given in Table 3.

Table 3 Simulation settings

Numerical Method	**Adjustments**
Multiphase Flow Model	Volume of fluid (VOF)
Primary Phases	Water
Water Density	998.2 kg/m^3
Water Viscosity	0.001003 Pa s
Secondary Phase	Air
Air Density	1.225 kg/m^3
Air Viscosity	1.7894×10^{-5} Pa s
Surface Tension	0.073 N/m
Flow Type	Laminar flow
Calculation Type	Steady model
Input Setting	Velocity inlet
Output Setting	Pressure outlet

Source: Dogan et al. 2023

Results

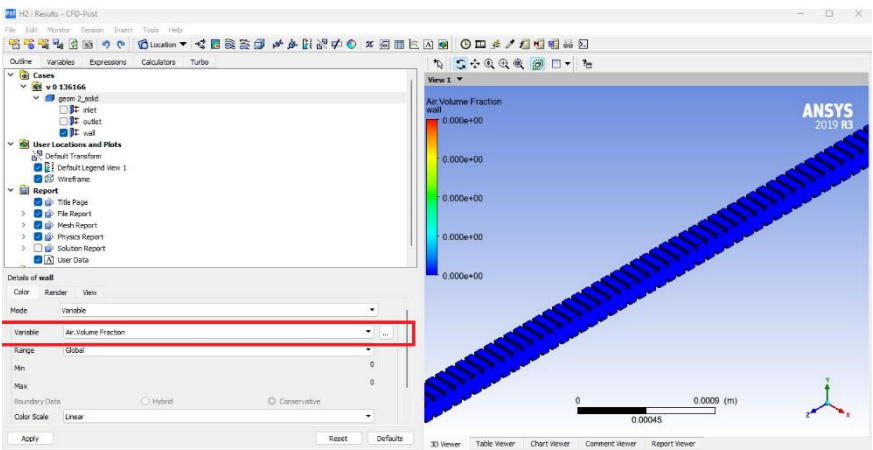
The friction reduction effects of hydrophobic surfaces with different properties were investigated numerically by changing parameters such as the shape, size and distances between the columns on the surface in microchannel flow with micro-sized and regular structured irregularities.

Results Air retention capabilities of the surfaces were examined from the CFD Post module. Figure 12, Figure 13 and Figure 14 show the air plastron status of micro channel surfaces with micro-sized roughness.

As can be clearly seen in Figure 13 of the microchannel with dimensions d = 28 µm a = 32 µm h = 30µm, air is observed to remain between the irregularities during flow (Hao et al. 2009).

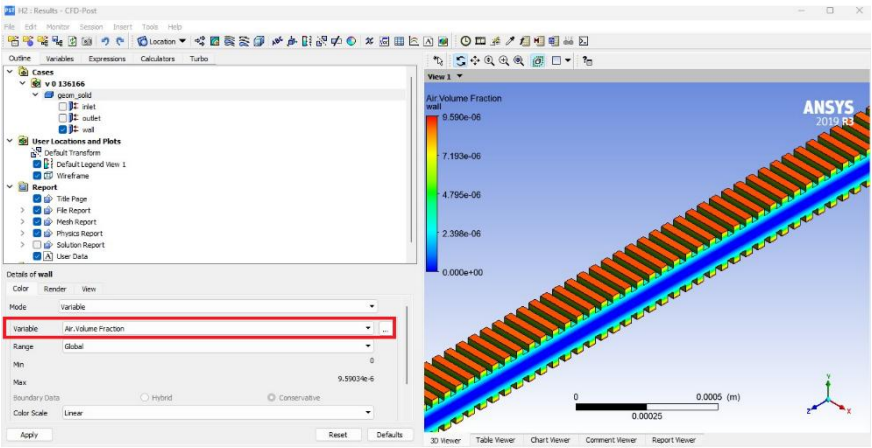
In the microchannel with dimensions d = 28 µm a = 62 µm h = 30µm, the air plastron has completely collapsed. It is seen in Figure 12 that as the roughness width (a) value increases, all the air in the pore is discharged during flow (Hao et al. 2009).

Figure 12 Air volume fraction images (d = 28 µm a = 62 µm h = 30µm)



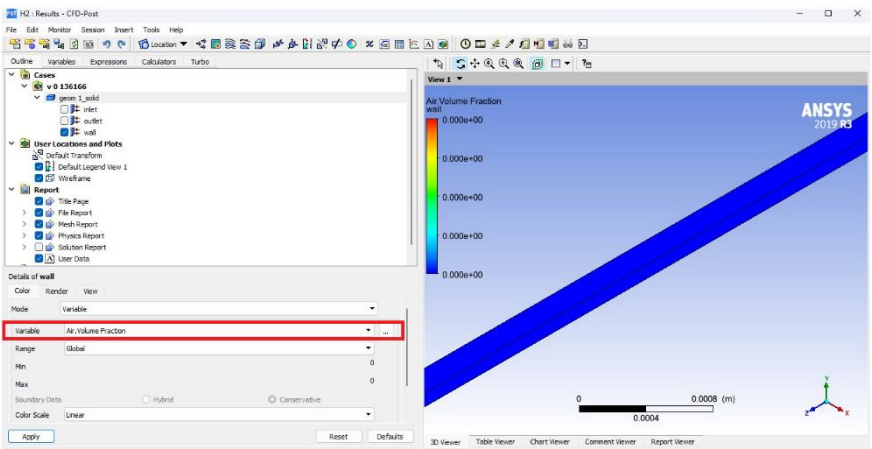
Source: Created by the author

Figure 13 Air volume fraction images (d = 28 µm a = 32 µm h=30µm)



Source: Created by the author

Figure 14 Air volume fraction images (smooth)



Source: Created by the author

The applicability of the VOF model in channel flows has been tested. In cases where experimental work is too time consuming and expensive, the VOF model can be preferred as an alternative method with its realistic solution success.

References

Dogan, B., Ozbey, M., Namli, L., & Aybek, U. (2023). Numerical simulation of slip behaviors and friction reduction effects in hydrophobic micro-channel in laminar flow conditions. *Thermal Science*, *27*(4 Part B), 3405-3411.

Fatchurrohman N. and Chia S.T. (2017). Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: simulation approach, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 257 - 012060, pp. 1-7w

Hao, P., Wong, C., Yao, Z., Zhu, K.-Q., (2009). Laminar drag reduction in hydrophobic microchannels. Chemical Engineering Technology. 32. 912 - 918. 10.1002/ceat.200900001

Kandlikar, S. G., and Grande, W. J. (2003). Evolution of microchannel flow passagesthermohydraulic performance and fabrication technology, *Heat Transfer Engineering*, 24 (1): 3-17.

Kandlikar, S. G., and King, M. R. (2014). Chapter 1, In: Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels. Butterworth-Heinemann, *Elsevier*, 1-9, Oxford, UK.

Paz, C., Suárez, E., Vence, J., and Cabarcos, A. (2019). Analysis of the volume of fluid (VOF) method for the simulation of the mucus clearance process with CFD, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 22:5, 547-566, DOI: 10.1080/10255842.2019.1569637

Zhu, J., Jia, C., and Xiao, H. (2021). Numerical simulation of slip characteristics of superhydrophobic surface. In Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Big Data and Artificial Intelligence (ISBDAI '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 366–370. https://doi.org/10.1145/3436286.3436421

CHAPTER 12

Ti-6Al-4V Alaşımı Sac Malzemelerin Derin Çekme ile Şekillendirilebilirliği: Malzeme Özellikleri, Proses Parametreleri ve Derin Çekmede Yenilikçi Yöntemler

1. Mehmet Okan KABAKÇI[1]
2. İbrahim KARAAĞAÇ[2]

Giriş

Ti-6Al-4V alaşımı sac malzemelerin derin çekme yöntemi ile şekillendirilebilirliği, malzemenin sahip olduğu özellikler, proses parametreleri ve mikroyapı özellikleri arasında karmaşık ve birbirine bağlı bir etkileşim göstermektedir. Bu derleme çalışması, literatürde yer alan bilgileri bir araya getirerek, titanyum alaşımlarının derin çekme ile şekillendirilmesinde karşılaşılan zorlukları, şekillendirmeye etki eden parametreleri ve şekillendirilebilirliği artırmak için yapılan mevcut iyileştirme çalışmalarını ortaya koymaktadır.

[1] Arş. Gör., Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği ABD., Orcid: 0000-0003-0086-9294
[2] Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6727-3650

Ti-6Al-4V Alaşımı Sac Malzemelerin Şekillendirilebilirliği

Günümüzde yüksek teknolojinin kullanıldığı endüstriyel çalışmalarda kritik performans göstermesi gereken bileşenlerin üretiminde, α-β tipi alaşımı olan Ti-6Al-4V titanyum alaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımları, yüksek dayanım/özgül ağırlık oranı, mükemmel korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi üstün özellikleri bir arada barındırmaktadır (Ao et al. 2020). Bu özellikler sayesinde; havacılık sektöründe gövde ve motor bileşenlerinde, otomotiv endüstrisinde hafif ve yüksek performanslı parçaların üretimi ve biyomedikal alanında ise implantlar/cerrahi cihazlar gibi zorlu alanlarda vazgeçilmez bir alaşım olarak görülmektedir (Ao et al. 2020). Alaşımın oda sıcaklıklarında ki mikroyapısı genellikle hekzagonal sıkı paket (HCP) yapılı α-fazının yoğun olduğu ve α-fazı tanelerinin sınırlarında dağılmış hacim merkezli kübik (BCC) yapılı β-fazından oluşmaktadır (Badr et al. 2016). Bu fazların birbirine göre oranları, morfolojileri ve tane boyutları, alaşımın mekanik davranışını önemli oranda etkilemekte ve proses karakteristiğini belirlemektedir. Özellikle HCP kristal yapısındaki α-fazı'nın yapısal özellikleri, oda sıcaklığındaki alaşımın şekillendirme davranışını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Bu durum, özellikle sac metal şekillendirme yöntemleriyle elde edilen karmaşık ve hafif bileşenlerin üretiminin yoğun olduğu otomotiv ve havacılık gibi uygulamalarda büyük bir sınırlama oluşturmaktadır.

Ti-6Al-4V alaşımının oda sıcaklıklarında zayıf şekillendirilebilirliğe sahip olması; özellikle HCP yapıdaki α-fazının baskın oranda olması, yüksek teorik dayanımı, düşük süneklik ve belirgin geri esneme eğiliminden kaynaklanmaktadır.

Oda sıcaklığı veya düşük sıcaklıklarda α-fazı'nın HCP kristal yapısı içinde etkili olan aktif kayma sistemlerinin sayısının sınırlı

olması, alaşımın sünekliğinin düşük olmasına neden olmaktadır (Ao et al. 2020; Kotkunde et al. 2014). Kristalografik yapıdan kaynaklanan bu kısıtlamalar, plastik deformasyon etkilerinin malzeme üzerinde homojen bir şekilde dağılmasını engellemektedir.

Ti-6Al-4V alaşımının yüksek akma dayanımı, plastik deformasyonun başlaması ve sürdürülebilmesi için oldukça yüksek şekillendirme kuvvetlerinin uygulanmasını gerektirmektedir (Eric Carton 2003). Bu durum hem şekillendirme kalıpları üzerinde daha büyük bir yük oluşturmakta hem de bölgesel gerilme yığılmaları nedeniyle malzemenin hızlıca hasara uğramasına neden olmaktadır. Ayrıca, belirgin miktarda gözlemlenen elastik geri toparlanma olarak da bilinen geri esneme davranışı; şekillendirme sorunlarını daha da karmaşık hale getiren önemli bir diğer etken olarak bilinmektedir (Eric Carton 2003). Geri esneme davranışı, şekillendirilen parçalarda hedeflenen geometri ve boyutsal hassasiyetin sağlanmasını son derece zorlaştırmaktadır (Karaağaç, Kabakçi, and Başdoğan 2023). Geri esnemenin neden olduğu ölçüsel hataların önlenmesi için çoğu zaman karmaşık kalıp telafi yöntemleri ya da ardıl ölçülendirme işlemleri uygulanmaktadır.

Titanyum alaşımlarının sahip olduğu bu malzeme özellikleri; karmaşık geometrilere sahip sac metal parçaların soğuk şekillendirme işlemleri ile Ti-6Al-4V alaşımı bileşenlerin üretilmesini son derece zorlu proseslere haline getirmektedir. Dolayısıyla, Ti-6Al-4V alaşımı parçaların üretimi, genel olarak kolay şekillendirilebilen çeşitli alüminyum alaşımı veya çelik türlerine kıyasla daha yüksek maliyet ve daha karmaşık üretim yöntemleri gerektirmektedir. Karşılaşılan metalurjik zorluklar ve ekonomik engeller, alaşımın üstün dayanım/özgül ağırlık oranı ve korozyon direncine rağmen geniş uygulama alanı bulmasını sınırlamaktadır. Bu sınırlamaların aşılması için yapılan araştırmalarda, ılık ve sıcak şekillendirme yöntemleri ile malzeme davranışını kontrol altına almaya yönelik ileri şekillendirme

teknolojileri üzerine önemli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalar ile Ti-6Al-4V alaşımına, özellikle derin çekme gibi yüksek deformasyon gerektiren sac şekillendirme işlemlerine uygunluk sağlayacak mekanik davranışların kazandırılması hedeflenmektedir.

Ti-6Al-4V Alaşımının Derin Çekilebilirliği

Derin çekme işlemi, düzlemsel sac metal plakaların üç boyutlu, içi boş veya bardak şeklinde parçaların üretimi için kullanılan temel ve yaygın bir sac metal şekillendirme yöntemidir (Önder and Tekkaya 2008). Derin çekme ile üretilebilen geometrilere, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla ihtiyaç duyulmaktadır (Takalkar and Mailan Chinnapandi 2019). Bu alanlarda araç ağırlığını azaltma, yakıt verimliliğini ve genel performansı artırma açısından önemli bir potansiyeli bulunan Ti-6Al-4V alaşımına olan ilgi artan şekilde devam etmektedir (Önder and Tekkaya 2008). Ti-6Al-4V sac malzemelere etkili şekilde derin çekme işlemi uygulanabilmesi, daha bütünleşik ve geometrik olarak karmaşık parçaların üretimine izin verebilmektedir. Bu durumda da birden fazla küçük bileşenin birleştirilmesi yerine, tek bir parça kullanılarak hem ağırlık hem de yapısal bütünlük açısından optimize edilmiş ürünlerin elde edilmesi sağlanabilecektir.

Bu potansiyelin yanı sıra, Ti-6Al-4V alaşımının ve diğer metallerin klasik derin çekme işlemlerinde çeşitli şekillendirme kusurları ile karşılaşılmaktadır. Yaygın olarak karşılaşılan şekillendirme kusurları arasında, flanş ya da duvar bölgesinde buruşma, aşırı incelme, gerilme yığılması nedeniyle oluşan yırtılma ve kırılma, düzensiz duvar kalınlığında ve düzlemsel anizotropiye bağlı olarak ortaya çıkan kulaklanma gözlemlenmektedir (Kotkunde et al. 2014). Derin çekme sırasında karşılaşılan şekillendirme kusurları, elde edilebilecek sınır çekme oranını (Limit Drawing Ratio-LDR) ve parça geometrisinin karmaşıklığını doğrudan

etkileyerek; malzeme israfına ve üretim maliyetlerini artıracak proses düzenlemelerine neden olmaktadır. Bu nedenle malzeme özellikleri, proses parametreleri ve mikroyapısal değişimler gibi değişkenlerin Ti-6Al-4V alaşımının derin çekme ile şekillendirilebilirliğine etkilerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, şekillendirme uygulamalarının ilerlemesi ve yaygınlaşması açısından son derece önem taşımaktadır.

Ti-6Al-4V Alaşımının Derin Çekilebilirliğini Etkileyen Temel Malzeme Özellikleri

Ti-6Al-4V alaşımının derin çekme ile şekillendirilebilirliği, işlem sırasında ortaya çıkan karmaşık gerilme ve şekil değiştirme durumlarına karşı malzemenin tepkisini belirleyen temel malzeme özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu özellikler çoğu zaman birbirleriyle karmaşık şekilde ilişkilidir ve malzemenin genel davranışını birlikte belirlemektedir.

Ti-6Al-4V alaşımı, α ve β fazlarının bir arada bulunduğu çift fazlı (α+β) bir titanyum alaşımıdır. Alaşımda bulunan α-fazı hekzagonal sıkı paket (HCP) kristal yapısına, β-fazı ise hacim merkezli kübik (BCC) kristal yapısına sahiptir. Oda sıcaklığı ve ılık şekillendirme sıcaklıklarında, α-fazının genellikle baskın oranda olduğu gözlemlenmektedir (Badr et al. 2016). α-fazının HCP kristal yapısı; BCC ya da FCC (yüzey merkezli kübik) yapılara kıyasla daha az sayıda kolay etkinleşebilen kayma sistemlerine sahiptir. Bu nedenle, α-fazındaki alaşımın oda sıcaklığındaki sünekliği göreceli olarak daha düşük olmakta ve anizotropik davranış eğilimi gözlemlenmektedir. Diğer yandan, BCC yapıdaki β-fazı genellikle daha sünektir ve özellikle yüksek sıcaklıklardaki hacimsel oranın artması, şekillendirilebilirlik üzerinde olumlu etki etmektedir.

Çok kristalli Ti-6Al-4V alaşımı sac malzemeler genellikle anizotropik mekanik özellikler sergilemektedir. Bu durum, akma ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerin plaka düzlemi içindeki

yöne bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceği anlamına gelmektedir (Ao et al. 2020). Anizotropi, malzeme içerisindeki tanelerin belirgin bir şekilde görülebilen tercihli yönelimi ya da diğer adıyla tekstüründen kaynaklanmaktadır (Meng et al. 2023) ve bu tekstür, malzemeye uygulanan haddeleme ve tavlama gibi termo-mekanik işlemler sırasında oluşmaktadır (Ao et al. 2020). Tane yönelimi; malzemeye uygulanan sıcaklık ve üretim proses geçmişi gibi faktörler ile ilişkilidir ve bu nedenle hassas bir şekilde kontrol edilmesi oldukça zorlayıcıdır (Ao et al. 2020). Haddelenmiş Ti-6Al-4V sac levhalarda yaygın olarak bazal tekstür gözlemlenmekte ve α-fazı'na ait (0001) düzlemleri, levha yüzeyine paralel ya da paralele yakın şekilde hizalanma eğilimi göstermektedir. Bazal tekstürün yoğunluğu, şekillendirilebilirliğe doğrudan etki ederek derin çekilmiş kaplardaki kulaklanmayı ve malzemenin akış düzenini belirgin biçimde etkilemektedir (Ao et al. 2020; Meng et al. 2023). Bu nedenle, anizotropinin iyi şekilde anlaşılması ve mümkünse prosesin faydasına olacak şekilde yönlendirilmesi, Ti-6Al-4V alaşımının derin çekilebilirliğini iyileştirmek için stratejik bir önem taşımaktadır.

HCP kristal yapısına bağlı olarak görülen düşük süneklik, yüksek akma gerilmesi, sınırlı deformasyon sertleşmesi kapasitesi ve belirgin anizotropi arasındaki karmaşık etkileşim, Ti-6Al-4V alaşımının şekillendirilmesindeki zorlukların temelini oluşturmaktadır. α-fazı'nın sınırlı kayma sistemleri, deformasyona karşı yüksek içsel direnç (yüksek akma gerilmesi) oluşturmakta ve aynı zamanda anizotropiye de katkıda bulunmaktadır (Ao et al. 2020). Bu kısıtlı kayma sistemleri malzemenin homojen şekil değiştirme kabiliyetini sınırlayarak düşük süneklik ve düşük pekleşme göstermesine neden olmaktadır (Eric Carton 2003). Sac malzemelerde anizotropi, doğrudan malzeme akışında düzensizliğe yol açarak derin çekme işleminde bir şekillendirme kusuru olarak görülen kulaklanmanın temelini oluşturmaktadır (Ao et al. 2020;

Engler 2025). Bu malzeme davranışları, özellikle düşük sıcaklıklarda bir araya gelerek malzemenin derin çekilebilirliğini ciddi şekilde sınırlamaktadır.

Akma Gerilmesi ve Deformasyon Sertleşmesi

Özellikle oda sıcaklığında yüksek akma gerilmesine sahip olan Ti-6Al-4V alaşımını plastik deformasyona başlatmak ve deformasyonu sürdürmek için önemli düzeyde şekillendirme kuvvetleri gerekmektedir (Ao et al. 2020). Bu durum, doğrudan kalıp tasarımı, pres kapasitesinin belirlenmesi ve şekillendirme takımlarının hızlı aşınma eğilimine etki etmektedir. Ayrıca, yüksek akma gerilmesi, lokal incelmeleri artırmakta ve derin çekme sırasında kapların kırılma riskini yükseltmektedir.

Bir malzemenin deformasyon sertleşmesi (pekleşme) davranışı, genellikle pekleşme katsayısı (n-değeri) ile nicel olarak ifade edilmektedir ve malzemenin plastik deformasyon sırasında dayanımının artması ile deformasyona karşı ek direnç gösterme kabiliyetini tanımlamaktadır. Yüksek değerlerdeki pekleşme katsayısı, genellikle plastik şekil değişiminin daha homojen dağılmasını ve boyun verme oluşumunu geciktirmektedir. Titanyum alaşımları ise genel olarak düşük bir pekleşme katsayısı değerine sahiptir ve çoğu zaman yüksek şekillendirme sıcaklıklarındaki pekleşme katsayısı azalmaktadır (Chen et al. 2015; Yang and Jiang 2024). Malzemenin belirli bir bölgesinde şekil değiştirmeye bağlı olarak incelme başladığında, düşük n-değeri nedeniyle daha az şekillenmiş çevre bölgelerine kıyasla deformasyon işlemi daha kolay ilerlemektedir. Bu durum şekil değiştirmenin belirli bir bölgede yoğunlaşarak aşırı incelme ve erken hasar riskinin artmasına yol açmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımının yüksek sıcaklıklarda belirgin bir pekleşme göstermemesi kayma kırılması modlarına katkıda bulunmaktadır (Kotkunde et al. 2014). Ayrıca Ti-6Al-4V alaşımının akma gerilmesi, sıcaklık ve şekil değiştirme hızına karşı oldukça

hassastır (Badr et al. 2016; Kotkunde et al. 2014). Sıcaklığın artması ile genel olarak alaşımın akma gerilmesi düşmekte ve malzemeyi şekillendirmeye daha elverişli duruma getirmektedir. Buna karşılık, şekil değiştirme hızının artması malzemede uzama kabiliyetinin sınırlandırılmasına neden olmaktadır. Alaşımın sahip olduğu hız hassasiyeti, derin çekme proses tasarımı açısından kritik bir parametredir. Ilık ya da sıcak koşullar altında gerçekleştirilen şekillendirme işlemleri, ısı etkisi kullanılarak akma gerilmesinin azalmasını, şekillendirme kuvvetlerinin düşmesini ve sünekliğin artmasını hedeflemektedir. Ancak, sıcaklık ve şekillendirme hızının hassas şekilde kontrol edilmesi, tutarlı malzeme davranışının sağlanması ve öngörülebilirliği şekillendirme sonuçlarının elde edilmesi için zorunludur. Bu nedenle, farklı sıcaklıklar ve şekil değiştirme hızları aralığında akma eğrilerinin, pekleşme (n-değeri) ve şekillendirme hızı duyarlılığı katsayılarının (m-değeri) deneysel olarak belirlenmesi; malzemenin modellemesi ve derin çekme prosesinin gerçeğe yakın olarak simüle edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Narayanan and Dixit 2015). Yüksek sıcaklıklar, sünekliği artıran dinamik yeniden kristalleşme (DRX) ya da β-fazının hacimsel oranındaki artış gibi mekanizmaları aktive ederek büyük plastik deformasyonların gerçekleşmesini mümkün kılarken; n-değerindeki azalma nedeniyle deformasyonun başladığı bölgede lokal boyun vermenin daha hızlı ilerlemesine yol açabilmektedir (Eric Carton 2003). Bu durum, şekillendirme işlemlerinde uygulanan sıcaklığın hassas bir dengede tutulmasını zorunlu kılmaktadır. Sıcaklık etkisiyle oluşan DRX, boyun vermeyi geciktirebilmekte; ancak pekleşmenin neden olduğu bölgesel dayanım artışı sınırlı ise deformasyon süreci hızla kararsızlaşabilmektedir. Kararlı bir deformasyonun işleminin gerçekleştirilmesi için şekillendirme hızı ve yağlama gibi proses parametrelerinin dikkatle kontrol edilerek düzenlenmesi gerekebilmektedir.

Sıcaklık Hassasiyetinin Deformasyon Mekanizmalarına Etkisi

Sıcaklık, Ti-6Al-4V alaşımının temel özelliklerini şekillendirilebilirlik açısından olumlu yönde değiştirebilen en etkili parametre olarak öne çıkmaktadır. Şekillendirme sıcaklığının artırılması hem süneklik hem de genel şekillendirilebilirlik üzerinde belirgin bir iyileşmeler sağlamaktadır (Ao et al. 2020; Boyer, Welsch, and Collings 1994; Sha and Malinov 2009; Sieniawski and Ziaja 2013). Bu iyileşmeler, ısıyla etkinleşen birden fazla mekanizma ile açıklanabilmektedir. Şekillendirme proseslerinde yüksek sıcaklıkların kullanılması ile HCP yapıdaki α-fazı içinde ilave kayma sistemlerinin etkinleşmesi için gerekli termal enerji sağlanmakta ve α-fazının plastik deformasyon kapasitesi artmaktadır. Ek olarak, sıcaklık arttıkça daha sünek olan BCC yapıdaki β-fazı'nın hacimsel oranı artmaktadır. Bu artış, özellikle β-dönüşüm sıcaklığı (β-transus) yaklaştıkça daha belirgin hale gelmektedir (Amini, Farzin, and Mohammadi 2023). Fazla sayıda kayma sistemine sahip olan β-fazı, sünekliğin artmasına önemli oranda katkı sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklar deformasyon sırasında dinamik toparlanma (Dynamic Recovery - DRV) ve dinamik yeniden kristalleşme (DRX) olgularını meydana getirmektedir (Ao et al. 2020). Yeni ve gerilimsiz tanelerin oluşumunu ifade eden *DRX*; malzemenin plastik şekil değiştirme kabiliyetini artırmakta, tane yapısı incelmekte ve akma gerilmesini azaltmaktadır (Chang and Yang 2024).

Akma yumuşaması, şekillendirmenin başlaması ile birlikte akma gerilmesinin azalması anlamına gelmektedir ve malzemenin deformasyona karşı direncinin azalarak şekillendirilebilirliğin artacağını göstermektedir. β-fazı, Ti-6Al-4V alaşımında şekillendirilebilirliği en yüksek faz olarak kabul edilmektedir (Amini et al. 2023). Alaşımın tamamen β-fazına dönüştüğü sıcaklık olan β-dönüşüm sıcaklığı (β-transus), Ti-6Al-4V'nin sıcak şekillendirme işlemlerinde kritik bir referans noktasıdır. Bu sıcaklığa

yakın veya bu sıcaklığın üzerinde şekillendirme yapmak, mikroyapı dönüşümü ve deformasyon davranışı üzerinde önemli değişikliklere neden olabilmektedir. Ancak, bu kadar yüksek sıcaklıklarda şekillendirme işlemi gerçekleştirmek prosesin hassas ve dikkatlice kontrol edilmesini gerektirir. Özellikle tane irileşmesi gibi durumlar kontrol edilemezse şekillendirme sonrasındaki mekanik özellikler açısından olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.

Ti-6Al-4V Alaşımının Derin Çekme İşleminde Proses Sınırlamaları

Oda sıcaklığında veya ılık sıcaklıklarda gerçekleştirilen klasik derin çekme işleminin başarısı, Ti-6Al-4V alaşımına özgü malzeme akış mekaniklerine bağlıdır ve şekillendirmeyi doğrudan sınırlayan çeşitli kusurlar ile sıklıkla karşılaşılmaktadır.

Düz bir sac metal plakanın, bir şekillendirme zımbası aracılığıyla kalıp boşluğuna itilmesi yoluyla içi boş üç boyutlu bir kap formuna dönüştürülmesi derin çekme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu plastik şekillendirme işlemi, karmaşık ve homojen olmayan bir malzeme akışı barındırmaktadır (Önder and Tekkaya 2008). Derin çekilen sac plakanın farklı bölgeleri, aynı anda birbirinden farklı gerilme ve şekillendirme durumlarına maruz kalmaktadır.

Ti-6Al-4V alaşımına başarılı bir derin çekme işlemi uygulanması için temel proses parametresinin dikkatli bir şekilde seçilmesi ve prosesin kontrollü şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Malzeme akışı, kusur oluşumu ve şekillendirilen parçanın genel kalitesi üzerinde önemli etkileri olan bu proses parametreleri arasında karmaşık bir etkileşim bulunmaktadır.

Sıcaklık Etkisi

Ti-6Al-4V alaşımının akma gerilmesi, süneklik ve aktif deformasyon mekanizmaları gibi temel malzeme özelliklerini

değiştirme kapasitesi nedeniyle sıcaklık etkisi; şekillendirilebilirliği en yoğun biçimde etkileyen proses parametresi olarak ele alınmaktadır. Yüksek sıcaklığın titanyum alaşımları üzerindeki başlıca etkileri; akma gerilmesinin azalması, sünek olan *β-fazı* içeriğinin artması ile süneklikte önemli bir artış, dinamik yeniden kristalleşme (*DRX*) ve tane incelmesi olarak özetlenebilmektedir (Ao et al. 2020; Han et al. 2023; Zhang et al. 2023).

Ilık Derin Çekme (150 °C – 400 °C): Bu sıcaklık aralığında çalışmak, oda sıcaklığındaki işlemlere kıyasla derin çekme oranının artması ve şekillendirme kuvvetlerinin azalması gibi faydaları ile Ti-6Al-4V'in şekillendirilebilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Kotkunde et al. 2014). Kotkunde ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, 150 °C'nin altındaki sıcaklıklarda şekillendirilebilirliğin çok zayıf olduğunu, ancak 150 °C ile 400 °C arasında 1,8 düzeyinde LDR elde edilebildiğini göstermiştir (Kotkunde et al. 2014)., Li ve ark. tarafından ılık şekillendirme rejimi içerisinde daha yüksek sıcaklıkları araştıran diğer bir çalışmada da; yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma ile Ti-6Al-4V alaşımının 700 °C'ye ısıtılmasının, şekillendirme kuvvetini önemli ölçüde düşürdüğünü ve şekillendirilmiş parçaların geometrik doğruluğunu artırdığını ortaya koymuştur (Li, Attallah, and Essa 2022). Ancak, titanyum malzemelerin yüzeyinde olumsuz reaksiyonların oluşma ihtimali nedeniyle sıcaklık uygulamalarında dikkat edilmesi gerekmektedir. 400 °C ve üzeri sıcaklıklarda, Ti-6Al-4V alaşımında oksijen hassasiyeti başlamakta ve yüzeyde gevrek alfa katmanı (*α-scale*) oluşumu gözlemlenebilmektedir. Mekanik özellikleri olumsuz etkileyen bu durum şekillendirme sırasında koruyucu atmosferler ya da özel kaplamaların kullanımını gerektirebilmektedir (Kotkunde et al. 2014). Bu durum, ılık şekillendirme işlemleri için 150 °C ile 400 °C arasındaki optimum sıcaklıkların; bazı uygulamalar için yeterli olabilecek şekillendirilebilirlik avantajları sağladığını, oksidasyon kaynaklı

sorunların yüksek seviyelere ulaşmadığını ve çevresel kontrol ihtiyacının en aza indirildiğini göstermektedir.

Sıcak Derin Çekme (>700 °C, ~950 °C'ye kadar): Yüksek sıcaklıklar, α-fazı'nın yeniden kristalleşmesi ile oluşan mikroyapısal iyileşme mekanizmalarını aktive eden ve şekillendirilebilirliği olumlu etkileyen optimum işlem koşulları sağlayabilmektedir. Ayrıca, sıcak çekme rejimine geçildiğinde, akma gerilmesinde daha fazla azalma ve süneklikte önemli artışlar elde edilebilmektedir (Kotkunde, Gupta, and Singh 2015; Li et al. 2022). Yang ve arkadaşların, 900 °C sıcaklık kullanarak gerçekleştirdikleri deneysel sıcak derin çekme çalışmalarında, çekme derinliğinde artış ve bölgesel incelmelerde iyileşme elde ettiklerini bildirmişlerdir (Yang, Wang, and Zhou 2020). Ayrıca, 900 °C üzerindeki yüksek sıcaklıklar ve kontrollü düşük şekil değiştirme hızlarında, süper-plastik şekillendirme (SPF) davranışı sergileyen Ti-6Al-4V alaşımı; son derece büyük ve karmaşık deformasyonlar ile şekillendirilebilmektedir.

Yağlayıcı Etkisi

Titanyum alaşımlarının derin çekme işlemlerinde, özellikle yüksek sıcaklıklarda, sac malzeme ile kalıp elemanları arasındaki sürtünmeyi azaltmak için etkili şekilde yağlama yapılması büyük önem taşımaktadır (Kotkunde et al. 2014). Yağlayıcılar; şekillendirme kuvvetlerini azaltmakta, kalıp aşınmasını en aza indirmekte, yapışma kaynaklı aşınmayı (galling) (Ao et al. 2020) önlemekte ve homojen malzeme akışı sağlayarak, elde edilebilecek derin çekme oranını ve parça kalitesini iyileştirmektedir (Narayanan and Dixit 2015). Ayrıca, yağlayıcılar ile azaltılmaya çalışılan sürtünme katsayısı; sabit bir değer olmayıp, şekillendirme işlemi boyunca farklılık gösteren temas alanı, baskı kuvvetleri, kayma hızları ve yüzey topolojisi gibi etkenlere bağlı olarak dinamik şekilde değişmektedir (Trzepieciński and Szpunar 2021). Bu

nedenle, plastik deformasyon çalışmalarında çeşitli yağlayıcı türleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer yandan; şekillendirmenin uygulandığı sıcaklık, yağlayıcı performansını doğrudan etkilemektedir. Optimum sıcaklık ve uygun yağlama ile Ti-6Al-4V alaşımının şekillendirilebilirliği en üst düzeye çıkarılabilmektedir (Narayanan and Dixit 2015). Ti-6Al-4V alaşımı malzemelerin şekillendirmesinde kullanılan yağlayıcılar aşağıda verilmiştir.

Katı Yağlayıcılar: Yüksek sıcaklıklarda kimyasal stabilitelerinin iyi olması nedeniyle molibden disülfit (MoS_2) ve grafit bazlı bileşikler gibi katı yağlayıcılar, sıklıkla tercih edilmektedir. MoS_2 ve MoS_2 esaslı bir yağlayıcı markası olan Molykote, Tİ-6AL-4V alaşımının farklı sıcaklıklarda şekillendirildiği deneysel çalışmalarda yağlayıcı olarak kullanıldığı gözlemlenmektedir (Ao et al. 2020; Kotkunde et al. 2014).

Sıvı Yağlayıcılar: Mineral bazlı yağlar ve biyolojik olarak geri dönüşebilir yağlar gibi sıvı yağlayıcılara da plastik şekillendirme uygulamalarında yer verilmektedir. Şerit çekme testleri ile Ti-6Al-4V alaşımının şekillendirilebilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada yapılan deneyler, SAE10W-40 motor yağının sürtünme katsayısını (COF) etkin şekilde düşürdüğünü göstermiştir (Trzepieciński and Szpunar 2021).

Nano Yağlayıcılar: Al_2O_3, CuO vb. nano parçacıkların baz bir sıvı içerisinde süspanse edilmesiyle elde edilen nano yağlayıcılar, özellikle Minimum Miktarda Yağlama (MQL) yöntemi ile uygulanmakta ve takım ile parça arayüzündeki sıcaklığı azaltarak sürtünmeyi düşürme potansiyeli göstermiştir (Wang et al. 2018).

Kalıp Tasarımı

Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilecek derin çekme işlemleri için kalıp malzemesi seçimi, kritik bir öneme sahiptir. Kalıp elemanlarının, sıcak şekillendirme koşullarına dayanabilmesi için yüksek sıcak sertlik, iyi aşınma direnci, termal şok direnci ve iyi

kimyasal kararlılığa sahip olması gerekmektedir. Bu tür uygulamalar için, mükemmel yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyon direnci sunmaları ile nikel esaslı süperalaşımlar uygun adaylar olarak değerlendirilebilir. Ancak, bu malzemelerin yüksek maliyeti nedeniyle özel takım çelikleri ya da diğer yüksek performanslı alaşımlar gibi daha ekonomik alternatiflerin araştırılmasına yol açmıştır. Ayrıca, etkili yağlama yapılması ve uygun yüzey kaplamalarının uygulanması ile birlikte, şekillendirilmiş parçaların kalitesi artırabilmekte ve kalıp ömrü önemli ölçüde uzatılabilmektedir (Odenberger et al. 2011). Derin çekme işlemlerinde, özellikle zımba ve kalıp radyüsleri ile zımba-kalıp arasındaki boşluk gibi kalıp geometrisi değerleri; gerilme yığılmalarının homojenleştirilmesinde, malzeme akışının kontrolünde ve kusur oluşumunun önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Önder and Tekkaya 2008).

Zımba ve Kalıp Radyüsleri: Genellikle zımba ve dişi kalıp radyüslerindeki artış, sac malzemenin büküldüğü noktalarda oluşan gerilme yığılmalarını azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Gharehchahi, Kazemzadeh-parsi, and Afsari 2021; Kardan, Parvizi, and Askari 2018). Bu sayede, kap duvarında veya kalıp girişinde meydana gelebilecek yırtılma eğilimini azaltılabilmektedir. Ancak, aşırı büyük radyüs kullanımında da malzeme üzerindeki baskı yastığı kuvveti kısıtlamayı azalarak malzeme akışı düzensizleşmekte ve buruşma riskini oluşabilmektedir.

Boşluk (Clearance): Zımba ile kalıp arasındaki boşluk, meydana gelen ütüleme (duvar incelmesi) miktarını ve çekilen kabın duvar kalınlıklarını doğrudan etkilemektedir. İstenen duvar kalınlığına ulaşmak ve aynı zamanda şekillendirme yüklerini kontrol altında tutmak için uygun boşluk kritik öneme sahiptir. Örneğin, yedi köşeli çelik kupaların şekillendirilmesinde radyal boşluğun etkisine ilişkin yapılan çalışmalar, bu parametrenin önemini vurgulamakta olup, bu ilke Ti-6Al-4V için de genel geçerliliğe sahiptir

(Gharehchahi et al. 2021). Ayrıca, kalıp radyüsünün (Rd) etkisinin, ticari saflıktaki (*CP*) titanyumun sıcak derin çekme işlemlerinde de önemli olduğu bildirilmiştir (Chartrel and Massoni 2013).

Baskı Yastığı Kuvveti (Blank Holder Force-BHF)

Baskı yastığı kuvveti, sac plakanın flanş bölgesinden kalıp boşluğuna doğru olan malzeme akışını sınırlayarak prosesi kontrol eden kritik bir parametre olarak bilinmektedir (Groover 2012; Kardan et al. 2018; Kotkunde and Gupta 2015; Tran et al. 2021). Baskı kuvveti uygulanmasının temel işlevi, flanş bölgesindeki çevresel basma gerilmeleri baskılayacak miktarda basıncın uygulanması ile buruşmayı önlemektir. Eğer *BHF* çok düşük olursa, flanş bölgesindeki malzeme yeterince sınırlandırılamamakta ve bu durum buruşma oluşumuna yol açmaktadır (Önder and Tekkaya 2008). Buruşan sac metalin kalıp içerisine çekilmesi, presin sıkışması ya da çekilen kabın yırtılması gibi ciddi proses sorunlarına neden olabilmektedir. Buna karşılık, *BHF* çok yüksek olduğunda, kalıp boşluğuna malzeme akışını aşırı derecede sınırlandırılmaktadır. Yüksek BHF; zımba radyüsü bölgesindeki çekme gerilmelerini artırarak, çekilen kap duvarlarında aşırı incelme ve kırılma riski oluşturmaktadır (Önder and Tekkaya 2008). Bu nedenle, deneysel çalışmalar ve FEA simülasyonları ile optimal BHF değer aralığının belirlenmesi ve prosese aktarılması gerekmektedir. Kotkunde ve ark. tarafından Ti-6Al-4V alaşımı ile gerçekleştirilen deneysel çalışmaların Yapay Sinir Ağı (*ANN*) modellemesinde; 450 °C altındaki şekillendirme sıcaklıklarında, BHF etkisinin, belirleyici olmadığı ancak artan sıcaklıklarda önemli bir giriş parametresi olarak değerlendirilmiştir (Dengiz and Şahin 2024; Kotkunde et al. 2013).

Şekillendirme Hızı ve Gerinim Oranı Etkisi

Ti-6Al-4V alaşımının akma gerilmesi ve şekillendirilebilirliği, şekil değiştirme hızına duyardır ve derin

çekme işlemlerinde zımbanın hareket hızı şekillendirme hızını belirlemektedir (Badr et al. 2016). Derin çekilmiş Ti-6Al-4V kaplardaki kalınlık dağılımı üzerinde en belirleyici etkiye sahip parametrenin zımba hızı olduğunu tespit edilen çalışmalar literatürde gözlemlenebilmektedir (Kardan et al. 2018; Kotkunde et al. 2013). Şekillendirme hızının etkisi karmaşıktır ve sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yüksek şekil değiştirme hızları, genel olarak Ti-6Al-4V alaşımının akma gerilmesini artırmakta ve sıcak şekillendirme uygulansa da sünekliğin azalmasına yol açabilmektedir. Özellikle Ti-6Al-4V alaşımı gibi düşük pekleşme katsayısına sahip malzemelerde; patlayıcı şekillendirme gibi çok yüksek hızlı şekillendirme işlemleri, şekillendirme hızına bağlı atalet etkileri ve boyun vermenin gecikmesini sağlayarak daha homojen şekil değiştirme dağılımı sağlayabilmektedir (Eric Carton 2003). Sıcak şekillendirme yada süperplastik şekillendirme uygulamaları için ise genellikle düşük şekil değiştirme hızları tercih edilmektedir. Yüksek sıcaklıkta uygulanan yavaş deformasyon hızları; dinamik yeniden kristalleşme ve tane sınırı kayması gibi ısıyla etkinleşerek, hem süneklikte önemli artış hem de akma gerilmesinde azalma sağlayan deformasyon mekanizmalarının meydana gelmesi için zaman tanımaktadır (Naka et al. 2001).

Sıcaklık, yağlama, kalıp geometrisi, BHF, şekillendirme hızı gibi temel proses parametreleri arasında birbirini etkileyen oldukça karmaşık bir ilişki bulunmaktadır. Bir parametrenin optimize edilmesi, genellikle diğer parametrelerde de güncellemeler yapılmasını gerektirmektedir. Örneğin, işlem sırasında malzemeye uygulanan sıcaklığa bağlı olarak akma gerilmesinde meydana gelen değişimler, optimum BHF değerini de etkilemektedir. Yağlayıcı seçimi de büyük ölçüde proses sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bu durum, çok değişkenli bir optimizasyon problemi olan Ti-6Al-4V alaşımı için başarılı bir derin çekme işleminin; Taguchi yöntemleri gibi sistematik deneysel yaklaşımlar ile FEA ve

Yapay Sinir Ağı (ANN) gibi ileri düzey sayısal modelleme araçlarının bir arada kullanılması gerektiğini göstermektedir (Kotkunde et al. 2013).

Tablo 1. Proses Parametrelerinin Derin Çekme İşlemi Üzerindeki Etkileri

Parametre	Etkisi	Muhtemel Kusurlar
Sıcaklık	Artan sıcaklık; akma gerilmesini düşürmekte, sünekliliği artırmakta ve faz oranlarını değiştirerek şekillendirilebilirliği iyileştirmektedir. Dinamik yeniden kristalleşme (DRX) ve tane incelmesi gibi mekanizmaları aktive etmektedir.	Yetersiz sıcaklıkta yırtılma, geri esneme, kulaklanma
Yağlama	Uygun yağlayıcılar, sürtünmeyi azaltarak şekillendirmeyi kolaylaştırmaktadır. Kalıp ve sac aşınmasını önleyerek, homojen malzeme akışı sağlamakta ve çekme oranını (LDR) artırabilmektedir.	Yırtılma, kulaklanma, duvar kalınlığı düzensizliği
Kalıp Geometrisi	Zımba ve kalıp radyüslerinin arttırılması, gerilme yığılmalarını azaltarak yırtılmayı engellemektedir; kalıp boşluğu ise duvar kalınlığı kontrolünü ve ütüleme (ironing) davranışını belirlemektedir.	Yırtılma, aşırı incelme, kulaklanma
Baskı Plakası Kuvveti	Yetersiz BHF, flanş bölgesinde buruşmaya yol açabilmekte; aşırı BHF ise malzeme akışını kısıtlayarak duvar incelmesine ve yırtılmaya neden olabilmektedir.	Buruşma, yırtılma, duvar kalınlığı düzensizliği
Şekillendirme Hızı	Yüksek şekillendirme hızları, akma gerilmesini artırmakta ve düşük sıcaklıklarda sünekliği azaltabilmektedir.	Yırtılma, geri esneme, yerel boyun verme

Mikro Yapının Ti-6Al-4V Alaşımlarında Derin Çekme İşlemine Etkisi

Ti-6Al-4V alaşımının özellikle yüksek sıcaklıklardaki şekillendirilebilirliği, mikroyapı düzeyinde meydana gelen dinamik değişimlerden doğrudan etkilenmektedir. Dinamik yeniden kristalleşme (DRX) ve faz dönüşümlerinden oluşan bu mikroyapı

hareketlilikleri, malzemenin mekanik davranışını ve deformasyona karşı gösterdiği dayanımı önemli ölçüde değiştirmektedir.

Başlangıç mikroyapısının etkisi

Ti-6Al-4V sac malzemelerde α ve β fazlarının; morfolojisi, tane boyutu ve dağılımı gibi başlangıç mikroyapısı şekil değiştirme davranışını ve şekillendirme prosesi boyunca meydana gelen mikroyapısal dönüşümü belirlemede önemli bir faktördür (Lv et al. 2023; Moore et al. 2017; Roy, Madhavan, and Suwas 2014). Şekillendirme çalışmalarında genel olarak, daha homojen bir deformasyon ve daha düzgün bir dinamik yeniden kristalleşme (DRX) sağlayarak sünekliği ve şekillenebilirliği artırabilen, ince ve eş eksenli (globüler) bir başlangıç tane yapısı tercih edilmektedir. Diğer yandan, iri taneli ve plaka benzeri yüksek oranda uzamış olan Lameller veya Widmanstätten tipi tane yapıları anizotropik davranışı ve homojen olmayan malzeme akışına neden olarak kusur oluşum eğilimini artırabilmektedir (Fan et al. 2005; Hosseini et al. 2017; Sugahara et al. 2010).

Dinamik Yeniden Kristalleşme (DRX) ve Tane İncelmesinin Etkisi

Dinamik Yeniden Kristalleşme (DRX); yüksek sıcaklıkta şekillendirme sırasında Ti-6Al-4V ve diğer titanyum alaşımlarında meydana gelen, kritik bir yumuşama mekanizması ve birincil tane inceltme yöntemidir (Li et al. 2023; Nugroho et al. 2020; Roy, Arróyave, and Sundararaghavan 2023). DRX, şekil değiştiren malzeme içerisinde yeni, gerilimsiz tanelerin çekirdeklenmesi ve büyümesini sağlamaktadır. Bu sayede; malzemenin akma gerilmesini düşürerek ve mikroyapıyı incelterek plastik deformasyon kabiliyetini artırmaktadır. TA18 titanyum alaşımı tüplerin bölgesel olarak ısıtılarak şekillendirildiği ve mikroyapı değişimlerinin de değerlendirildiği deneysel bir çalışmada, meydana gelen *DRX'in* önemli düzeyde tane incelmesine yol açtığı ve

başlangıç bölgesindeki ortalama tane boyutunun yaklaşık 3,7 μm, şekillendirme bölgesinde ise yaklaşık 2,7–2,9 μm olarak gözlemlenmiştir (Xie et al. 2025). Benzer şekilde, Ti-6Al-4V'nin elektrik darbeleri ile artırımlı şekillendirildiği bir çalışmada, elektrik darbelerinin (electropulsing) uygulanması ile meydana gelen DRX'in daha homojen bir mikroyapı oluşmasına katkı sağladığı belirtilmiştir (Ao et al. 2020).

Ti-6Al-4V'nin sıcak şekillendirilmesinde; dinamik yeniden kristalleşmeye bağlı olarak tanelerin incelmesi ve küreselleşmesi, şekillendirilebilirliği artırmaktadır. Bu olgular tane yapısını sürekli olarak incelterek, malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnci azaltmakta ve alaşımın yüksek sıcaklıklarda karmaşık ürünlere dönüştürülmesini mümkün hale getirmektedir. Etkin şekilde DRX gerçekleşmesini sağlayan proses koşullarının oluşturulması, bu alaşım için sıcak şekillendirme ve derin çekme operasyonlarının tasarımında stratejik bir konumda yer almaktadır.

Tane Yönelimi ve Anizotropinin Etkisi

Derin çekme yöntemi ile üretilen kaplarda, malzemenin kristalografik yönlenmesinden kaynaklanan düzlemsel anizotropinin bir sonucu olarak kulaklanma problemi meydana gelebilmektedir (Hlavacs et al. 2021; Singh et al. 2010). Kulaklanma oluşumu, tane yönlenmesinin doğrudan bir sonucu olan akma gerilmesi ve Lankford katsayısı (r-değeri) parametreleri kullanılarak geliştirilen analitik modeller ile öngörülebilmektedir (Athale et al. 2018). Bu nedenle, derin çekme işleminin tane yönlenmesini kontrol ederek gerçekleştirilmesi; anizotropiye bağlı bir hataların oluşumunu en aza indirme ve şekillendirilen üründe homojen malzeme özellikleri elde etme açısından fayda sağlamaktadır (Shi et al. 2020; Tran et al. 2021).

Faz Dönüşümünün (α↔β) Şekillendirilebilirliğe Etkisi

Sıcaklık, Ti-6Al-4V alaşımında α-β fazlarının denge koşulları ve kinetiğini belirlemekte ve yüksek sıcaklıklarda gözlemlenen şekillenebilirlik artışının temel nedeni, α↔β faz dönüşümü olarak bilinmektedir. β geçiş (β-transus) sıcaklığına yaklaştıkça daha sünek olan BCC yapıdaki β-fazının oransal hacmi artmakta ve HCP yapıdaki α- fazının oransal hacmi azalmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda Ti-6Al-4V alaşımının şekillenebilirliğine önemli katkı sağlayan β-fazının sahip olduğu kristal yapısı, α-fazına kıyasla daha fazla sayıda aktif kayma sistemi barındırmaktadır. Bu durum β-fazını daha sünek hale getirerek daha yüksek plastik şekil değişimini sağlamaktadır. Ayrıca, kontrollü ısıtma yoluyla β-fazının oransal hacminin artırılması, bu alaşımda ılık ve sıcak şekillendirme tekniklerinin efektifliğini artırmaktadır. Daha şekillenebilir olan bu fazın varlığından yararlanmak ve oluşumunu tetiklemek, Ti-6Al-4V alaşımı için yüksek sıcaklıkta şekillendirme yöntemlerinin çıkış noktasını oluşturmaktadır (Ahmadian and Morakabati 2020; Guo et al. 2024; Zhang et al. 2024).

Ti-6Al-4V Malzemesinin Derin Çekilebilirliğini Artırmaya Yönelik Yenilikçi Yöntemler

Ti-6Al-4V alaşımının klasik derin çekme kalıpları ile yapılan şekillendirme işlemlerinde ısıl destek olmasına rağmen devam eden proses sınırlamaları dikkate alındığında, güncel araştırmaların büyük ölçüde ileri şekillendirme tekniklerinin geliştirilmesine ve uygulanmasına yöneldiği gözlemlenmektedir. Bu yöntemler geleneksel derin çekme işlemlerinde karşılaşılan engelleri aşmak için deformasyon sırasında malzemenin bölgesel gerilme durumlarını hedef alan deformasyon mekaniklerinden faydalanmaktadır.

Artırımlı Sac Şekillendirme (ISF) Yöntemi ve Çeşitleri

Artımlı sac şekillendirme (ISF), kalıpsız ya da tek bir kalıp yarımının kullanıldığı bir şekillendirme yöntemidir. ISF prensibi; genellikle basit küresel uçlu bir şekillendirme takımının, belirli bir takım yolu boyunca hareket etmesi ile sac malzemenin bölgesel olarak kademeli şekilde deforme edilmesine dayanmaktadır (Ajay 2020). ISF yöntemi, özellikle Ti-6Al-4V gibi geleneksel yöntemlerle şekillendirilmesi zor olan malzemelerden karmaşık geometrilerin elde edilmesinde kayda değer bir potansiyel koymaktadır.

Elektro- darbe Destekli Artımlı Sac Şekillendirme (EAISF/EP-SPIF): Bu yenilikçi yaklaşımda, ISF işlemi sırasında sac malzemenin deformasyon bölgesine yüksek yoğunluklu elektrik darbeleri iletilmektedir. Ti-6Al-4V için EAIF, şekillendirilebilirlikte kayda değer bir artış sağlamaktadır. Ao ve arkadaşları, elektro-pals destekli SPIF (Single Point Incremental Forming) yöntemiyle şekillendirdikleri Ti-6Al-4V malzemede, oda sıcaklığında yapılan klasik SPIF işlemine kıyasla %417.9 gibi dramatik bir deformasyon yüksekliği artışı tespit etmişlerdir (Ao et al. 2020). Bu önemli gelişmeye katkı sağlayan çok yönlü mekanizmalar aşağıdaki giib sıralanabilir:

- Akımın geçtiği bölgedeki Joule ısınması etkisi ve dislokasyon hareketliliğini artıran elektro-plastik etkiler ile malzemenin akma gerilmesinde azalma gözlenmiştir.
- Ti-6Al-4V alaşımında genel olarak mevcut olan güçlü bazal kristalografik tekstürün zayıflamasıyla birlikte üniform deformasyonu artıran izotropik davranış eğilimi meydana gelmiştir.
- Tane incelmesini sağlayan dinamik yeniden kristalleşme (DRX) ile plastik deformasyon desteklenmiştir.

- Dislokasyonların hareketliliğinin artması ile malzeme akışı daha kolay gerçekleşmiştir. Bu etkiler bir araya geldiğinde, şekillendirilen parçada daha homojen bir et kalınlığı dağılımı elde edilmiş, çatlak ilerlemesi ve hasar oluşumunun başlangıcı geciktirilebilmiştir.

Ultrasonik Titreşim Destekli Sıcak Artımlı Şekillendirme (U-EHIF): Bu yöntem, elektriksel sıcak artırımlı şekillendirme (Electrical Hot Incremental Forming-EHIF) yönteminde bölgesel ısıtmanın sağladığı avantajları; şekillendirme takımına uygulanan yüksek frekanslı, düşük genlikli, boylamasına ultrasonik titreşimler ile birleştirmektedir (Amini et al. 2023). Ultrasonik destekli EHIF yönteminin Ti-6Al-4V sac plakalar üzerinde uygulandığı deneysel çalışmalar, geleneksel EHIF prosesine kıyasla şekillendirilen parçanın yüzey kalitesinde iyileşme, safsızlıkta azalma ve maksimum şekillendirme açısında yaklaşık %20'lik bir artış sağladığını göstermiştir (Amini et al. 2023). Şekillendirmede elde edilen iyileşmeleri; ultrasonik enerjiye bağlı olarak akma gerilmesinin azalması, elektriksel ısıtmanın neden olduğu termal yumuşama ve takım ile sac malzeme arasındaki sürtünmenin azalması sağlamaktadır. Ayrıca, ultrasonik titreşimlerin α→β faz dönüşümü için gereken aktivasyon enerjisini düşürerek Ti-6Al-4V alaşımında daha şekillenebilir olan BCC yapıdaki β-fazının hacim oranını artırdığı da tespit edilmiştir (Amini et al. 2023).

Bu gelişmiş tekniklerde ortak hedef, deformasyon işlemi boyunca tam olarak ihtiyaç duyulan bölgede ve zamanda; akma gerilmesini azaltmak, sünekliliği artırmak, tekstürü değiştirmek ve sürtünmeyi kontrol etmek gibi malzeme özelliklerini şekillendirmeye uygun biçimde değiştirmektir. Bu yaklaşımlar ile iş parçasının tümünün hacimsel olarak ısıtılmasına kıyasla daha hassas bir kontrol sağlanmakta ve karmaşık şekillendirme işlemi süresince malzeme tepkisi optimize edilebilmektedir.

Yüksek Enerjili Şekillendirme (High-Energy-Rate Forming-HERF)

Yüksek enerjili şekillendirme (High-Energy-Rate Forming-HERF); bir patlayıcı yükün patlatılması yada manyetik/elektro-manyetik olarak tetiklenen bir kapasitör ile oluşan yoğun enerjili basınç dalgasının, sac metali şekillendirmek amacıyla kullanıldığı bir deformasyon yöntemidir sürecidir. Proses genellikle şok dalgasını doğrudan sac plaka üzerine ileten ve sac malzemeyi çok yüksek hızla tek taraflı bir kalıp yarımı üzerine iten sıvı ortam içerisinde gerçekleştirilmektedir. Yüksek hızlarda (strain rate) şekillendirilen malzeme içindeki eylemsizlik kuvvetleri, plastik deformasyonun daha eşit şekilde dağılmasına yardımcı olabilir ve boyun vermenin başlangıcını geciktirebilmektedir. Sac plakanın kalıp yüzeyine yüksek hızda çarpması, elastik geri toparlanmanın en aza indirilmekte ve bu durum daha iyi boyutsal doğruluk sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek enerjili şekillendirme işlemleri genellikle bir soğuk şekillendirme olarak gerçekleştirilmektedir. Bu durum da titanyum alaşımlarının yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesinde gerekli olan ısıtma sistemleri ve koruyucu atmosferlerle ilgili maliyetleri azaltma potansiyeli taşımaktadır. Düşük süneklik, yüksek akma dayanımı ve geri esneme gibi temel şekillenebilirlik sorunları taşıyan titanyum alaşımları için patlayıcı ile şekillendirme yönteminin değerlendirildiği çalışmalar gerçekleştirilmiş ve düşük pekleşme katsayısına (n-değeri) sahip olan titanyum alaşımları gibi malzemeler için yüksek enerjili şekillendirme işlemleri önemli avantajlar taşıdığı belirtilmiştir (Bhaduri 2018; Eric Carton 2003; Jagadeesha 2024).

Termal Destekli ve Hibrit Prosesler

Günümüzde, Ti-6Al-4V'in şekillendirilebilirliğini artırmak amacıyla tüm kalıp elemanları ve sac malzemenin ısıtılması yerine

daha gelişmiş termal yöntemler ve hibrit üretim yaklaşımları araştırılmaya devam etmektedir.

Farklı Sıcaklıkta Şekillendirme / Lokal Isıtma: Bu yöntem, şekillendirme sırasında sac metal üzerinde homojen olmayan bir sıcaklık dağılımı oluşturarak gerçekleştirilmektedir. Belirli bölgelerin geçici olarak ısıtılması veya soğutulması sayesinde, malzeme akışı istenilen şekilde yönlendirilebilmekte ve uygun plastik deformasyon elde edilebilmektedir (Xie et al. 2025). Şekillendirilebilirlik bakımından Ti-6Al-4V ile benzer özellikler gösteren bir *yakın-α* alaşımı olan TA18 alaşımı boruların şekillendirilmesinde; uygulanan farklı sıcaklık profillerinin, izotermal olarak şekillendirilen borularla karşılaştırıldığında, duvarlardaki et kalınlığı dağılımı üzerinde daha iyi kontrol sağladığı belirtilmiştir (Xie et al. 2025). Li ve diğerleri tarafından yapılan bir şekillendirme çalışmasında; Ti-6Al-4V alaşımının lokal olarak 700 °C'ye kadar ısıtılması ile şekillendirme kuvvetlerinde önemli ölçüde düşüş, geometrik hassasiyet ve kalınlık dağılımında ise iyileşme sağlanmıştır (Li et al. 2022). Bu sonuçlar yüksek frekanslı indüksiyon kullanılarak yapılan lokal ısıtmanın da oldukça etkili olabileceğini göstermektedir.

Hidro-mekanik Derin Çekme (HDD) / Hidroforming: HDD, sac metalin *sıvı basıncı* yöntemiyle şekillendirilmesi olarak da bilinmektedir ve klasik zımba yerine sac metal yüzeyine uygulanan kontrollü akışkan basıncı şekillendirmeyi sağlamaktadır (Karaağaç and Özdemir 2013; Kocańda and Sadłowska 2008; Mousa, Khleif, and Jweeg 2022; Önder and Tekkaya 2008; Zhang et al. 2016). HDD, geleneksel derin çekme yöntemine kıyasla; yüksek LDR değerleri, dengeli gerinim ve et kalınlığı dağılımı, akışkanın bir yastık görevi görmesi sayesinde iyileştirilmiş yüzey kalitesi ve daha yüksek boyutsal hassasiyet gibi birçok avantaj sunmaktadır (Singh and Ravi Kumar 2008). Kalıp içerisindeki akışkan basıncı, sac malzemenin zımbaya sıkıca bastırılmasını sağlamaktadır. Sıvı

basıncı, zımba uç bölgesinde kırışma oluşumunun önlenmesini ve kalıp yüzeyi ile sac metal arasındaki sürtünme kuvvetlerinin azaltılmasını sağlamaktadır. Bu sayede, daha etkili bir malzeme akışı sağlanarak, aşırı incelme ve kopma gibi şekillendirme kusurlarının başlaması geciktirilebilmektedir (Forouhandeh et al. 2013). Titanyum alaşımlarında HDD'nin araştırıldığı çalışmalarda; şekillendirme tahmini için teorik FLD modellerini kullanan ABAQUS ve DEFORM-3D tabanlı sonlu elemanlar simülasyonları gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar; HDD prosesi ve sıcaklık, akışkan basıncı, baskı yastığı kuvveti, sürtünme katsayısı gibi proses parametrelerin *titanyum alaşımlarının* şekillendirilebilirliğini iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Forouhandeh et al. 2013; Nezami Esfahlan, Abbasnejad Dizaji, and Djavanroodi 2009).

Lazer Katmanlı İmalatın Ön Şekillendirilmiş Sac Metal Malzemeler Üzerine Uygulanması (Hibrit Yapılar): Gelişmekte olan bu yöntem; önceden şekillendirilmiş ince sac metal malzemeler üzerine, lazer ışın ergitme (Laser Beam Melting-LBM) veya lazer metal biriktirme (Laser Metal Deposition-LMD) (Zhong et al. 2020) gibi yöntemler ile eklemeli yapılar örülmesi ile uygulanmaktadır (Ahuja et al. 2015). Bu hibrit yaklaşım, geleneksel yöntemlerle şekillendirilmiş sac parçalar üzerine bölgesel olarak karmaşık fonksiyonel özelliklere sahip bileşenlerin üretilmesine imkân tanımaktadır. Hibrit yapıların üretilmesinde; LBM/LMD işlemi sırasında ortaya çıkan ısı kaynaklı gerilmelerin kontrol edilmesi, eklemeli yapı ile sac metal arasındaki mekanik bütünlük ve metalurjik bağın sağlanması gibi zorluklar yer almaktadır (Ahuja et al. 2015). Üretilen hibrit parçalara uygulanan şekillendirme işlemlerinde de düşük sünekliğe sahip sac malzemelerin yapısı gereği, genellikle yüksek sıcaklık kullanılması önerilmektedir (Bambach et al. 2017). Bu tür hibrit üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, basit geometriler için sac şekillendirme işlemlerinin

verimliliğini ve karmaşık geometriler için eklemeli imalatın geometrik serbestliğini birleştirerek; üretimi oldukça zor yada mümkün olmayan bileşenlerin üretilmesine olanak sağlamaktadır.

Kaynaklanmış Saclar (Tailor Welded Blanks-TWB) ve Eklemeli Saclar (Patchwork Blanks): Kaynaklanmış saclar kavramı, şekillendirme öncesinde farklı malzemelerin veya kalınlıkların birleştirilmesini ifade etmektedir. Bu yaklaşım ile bitmiş parçanın ihtiyaç duyulan bölgelerine; yük taşıyan alanlara daha yüksek mukavemetli malzeme, şiddetli deformasyona maruz kalan bölgelere ise daha iyi şekillendirilebilir malzeme kullanımı gibi bölgesel olarak belirli özelliklere sahip malzemelerin yerleştirilmesi sağlanmaktadır (Basile et al. 2022; Kinsey, Liu, and Cao 2000; Kumar and Kumar 2022; Saunders and Wagoner 1996). TWB üzerine yapılan araştırmaların çoğu çelikler ve alüminyum alaşımlarına odaklansa da (Basile et al. 2022; Pallett and Lark 2001), bu prensip Ti-6Al-4V ve diğer titanyum alaşımları için de uygulanabilir niteliktedir ve literatürde yer almaktadır (Erdoğan, Sevinç, and Ertan 2024; Karpagaraj et al. 2020; Karpagaraj, Siva Shanmugam, and Sankaranarayanasamy 2016). TWB'ler üzerine yapılan çalışmalarda, kaynak bölgelerinin genellikle değiştirilmiş mikro yapı ve sertlik nedeniyle daha düşük şekillendirilebilirliğe sahip olduğu gözlemlenmektedir (Pallett and Lark 2001). LMD yada kaynakla yöntemi ile bölgesel olarak farklı malzemeler ile takviye edilebilen eklemeli saclar ise sac metalin belirli bölgelerine şekillendirme işlemi öncesinde malzeme eklenerek kalınlık, mukavemetin ve şekillendirilebilirliğin artırılmasını sağlamaktadır (Ahuja et al. 2015; Ye, Kim, and Kim 2017; Zhang, Ouyang, and Zhu 2022). Her iki yaklaşımda da malzeme kullanımının optimize etmesi, şekillendirilebilirliğin artırılması ve ürün performansının iyileştirmesi hedeflenmektedir.

Kademeli Derin Çekme (Yeniden Çekme) Prosesi

Yüksek derin çekme oranlarına veya tek adımlı derin çekme işleminin şekillendirme sınırlarını aşan karmaşık geometrilere sahip kap formundaki ürünlerin üretiminde, kademeli şekillendirme yöntemi kullanılmaktadır (Chan et al. 2010; Han et al. 2022; Harada, Fukaura, and Mori 2007). Başlangıç aşamasında derin çekme ile oluşturulan bir kap; çapının daha da küçültülmesi ve yüksekliğinin artırılması amacıyla bir veya daha fazla yeniden çekme işlemine tabi tutulmaktadır. Her derin çekme adımında meydana gelen deformasyon sertleşmesi nedeniyle azalan şekillendirilebilirliği geri kazandırmak amacıyla, kademeler arasında ara tavlama işlemlerinin uygulanması şekillendirme kusurlarının oluşumunu engelleyebilmektedir.

Geeta ve diğerleri, 150 °C – 400 °C aralığındaki ılık şekillendirme sıcaklıklarında Ti-6Al-4V sac metal malzemenin yeniden çekme işlemine yönelik deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 74 mm çap ve 0.9 mm kalınlığa sahip Ti-6Al-4V sac numunenin iki kademeli çekme prosesi ile elde edilen toplam LDR; bu alaşım için tek kademede elde edilen LDR ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde artarak 2.642'ye yükselmiştir. Bu da alaşım için klasik derin çekme ile elde edilen LDR değeri olan ~1.8'e kıyasla önemli bir artışın meydana geldiğini göstermektedir (Geeta Krishna, Venugopal, and Ram Prabhu 2017).

Sonuç

Literatürde Ti-6Al-4V alaşımının şekillendirilebilirliğini ele alan araştırmalar; proses parametreleri, mikroyapı ve malzeme özellikleri ile şekillendirme kabiliyeti arasında önemli bir ilişki olduğunu göstermektedir. Şekillendirilebilirliğin, uygulanan şekillendirme parametrelerinden (sıcaklık, şekillendirme hızı, gerilme durumu vb.) ve malzemenin mikroyapı dönüşümünden (tane boyutu, faz dengesi, tane yönlenmesi vb.) doğrudan etkilediği

gözlemlenmiştir. Mikroyapı değişimi ise, şekillendirme sürecinde karmaşık şekilde değişen akma gerilmesi, süneklik, anizotropi gibi mekanik özellikleri belirlemektedir. Bu proses parametreleri; elde edilebilecek LDR, kusur oluşumu ve bitmiş ürün kalitesi gibi şekillendirme performansını doğrudan belirlemektedir. Bu karmaşık ilişkileri yeterince analiz ederek prosesinin avantajına göre yönlendirebilmek, Ti-6Al-4V alaşımının derin çekme yöntemi ile şekillendirilebilirliğinin gelişmesi için kilit rol oynamaktadır.

Ti-6Al-4V alaşımının düşük süneklik, yüksek akma mukavemeti, yüksek geri esneme ve anizotropik davranış gibi özellikleri nedeni ile oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirliği oldukça sınırlıdır. Bu durumun temel sebebi, Ti-6Al-4V alaşımının oda sıcaklığında HCP α-fazı kristal yapısından ve güçlü kristalografik yönelimidir. Şekillendirme sıcaklığının artması ile malzemenin akma gerilmesi azalmakta, daha fazla kayma sistemi aktif hale gelmekte ve daha sünek olan β-fazının oransal hacmi artmaktadır. Ancak, 400–450 °C gibi ılık şekillendirme sıcaklıkları kullanılsa dahi Ti-6Al-4V'nin LDR değeri oldukça düşük (ß≈1.8) ve endüstriyel kullanım için yetersizidir. Bu durum, ısıl girdinin proses için faydalı olmasına karşın, klasik derin çekme yöntemleriyle yüksek deformasyon seviyelerinin elde edilmesi veya karmaşık geometrilerin şekillendirilmesi için tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Buruşma, yırtılma, aşırı incelme ve kulaklanma gibi şekillendirme kusurlarının önlenebilmesi için yüksek sıcaklıkta kararlı yağlayıcılar, uygun kalıp ve zımba geometrisi (kalıp radyüsü, zımba radyüsü boşluk vb.), yeterli baskı kuvveti ve zımba hızı (şekillendirme hızı) gibi kritik proses parametreleri aralarındaki karmaşık etkileşim dikkate alınarak dikkatlice optimize edilmesi gerekmektedir.

Ti-6Al-4V'nin derin çekme sırasında ortaya çıkan zorluklarının aşılabilmesi için prosesin çok yönlü bir yaklaşım ile ele alınması gerekmektedir. Bu durum; yalnızca malzemenin temel ve

mikroyapısal özelliklerinin termal şartlandırmalar yoluyla değiştirilmesi değil, aynı zamanda klasik derin çekme işlem parametrelerin optimize edilmesi yada yenilikçi şekillendirme tekniklerinin uygulanması gibi çekme prosesi mekaniğinin iyileştirilmesini de kapsamaktadır. Ayrıca, malzeme davranışı tahminleri yapmak, prosesi uygun şekilde optimize etmek ve maliyetli deneysel denemelere olan bağımlılığı azaltmak için detaylı modelleme ve simülasyon çalışmaları önem arz etmektedir.

Ti-6Al-4V alaşımı sac malzemelerin şekillendirilebilirliğinin artırılması için yapılan çalışmalarda ortak amacın; çeşitli yaklaşımlar ile malzeme özelliklerinin düzenlenerek, aktif kayma sistemlerinin artırılması ve deformasyon mekanizmalarının iyileştirilmesi olduğu gözlemlenmektedir. Ancak geliştirilen yöntemlerin birim parça başına düşen maliyetlerin oldukça yüksek olması nedeniyle endüstriyel uygulamalar için yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüksek dayanım/şekillendirilebilirlik oranları ve hızlı üretim gibi endüstriyel anlamdaki talepler hala sağlanamamaktadır. Bu durum, Ti-6Al-4V alaşımının şekillendirilebilirliği üzerine yenilikçi çalışmaların yapılması ve farklı yöntemlerin geliştirilmesine duyulan ihtiyacı göstermektedir.

Kaynakça

Ahmadian, Peyman, and Maryam Morakabati. 2020. “The Effect of Lamellar and Globular α-Phase on Mechanical Behavior of Strongly Textured Ti–6Al–4V Alloy.” *Transactions of the Indian Institute of Metals* 73(5):1301–9. doi:10.1007/s12666-020-01957-1.

Ahuja, Bhrigu, Adam Schaub, Michael Karg, Roman Schmidt, Marion Merklein, and Michael Schmidt. 2015. “ High Power Laser Beam Melting of Ti 6 Al 4 V on Formed Sheet Metal to Achieve Hybrid Structures .” *Laser 3D Manufacturing II* 9353(March):93530X. doi:10.1117/12.2082919.

Ajay, C. Veera. 2020. “Prediction of Forming Force in Incremental Forming of Ti-6Al-4V Alloy Material.” *Materials Today: Proceedings* 39:1594–99. doi:10.1016/j.matpr.2020.05.709.

Amini, Saeed, Mahmoud Farzin, and Aminollah Mohammadi. 2023. “An Experimental Study on Ultrasonic-Assisted Hot Incremental Sheet Metal Forming of Ti–6Al–4 V.” *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering* 47(4):1923–35. doi:10.1007/s40997-023-00602-8.

Ao, Dongwei, Jun Gao, Xingrong Chu, Shuxia Lin, and Jun Lin. 2020. “Formability and Deformation Mechanism of Ti-6Al-4V Sheet under Electropulsing Assisted Incremental Forming.” *International Journal of Solids and Structures* 202:357–67. doi:10.1016/j.ijsolstr.2020.06.028.

Athale, Madhura, A. K. Gupta, S. K. Singh, and Anurag Vaidyanathan. 2018. “Analytical and Finite Element Simulation Studies on Earing Profile of Ti-6Al-4V Deep Drawn Cups at Elevated Temperatures.” *International Journal of Material Forming* 11(4):479–90. doi:10.1007/s12289-017-1358-3.

Badr, Ossama Mamdouh, Frédéric Barlat, Bernard Rolfe, Myoung Gyu Lee, Peter Hodgson, and Matthias Weiss. 2016. “Constitutive Modelling of High Strength Titanium Alloy Ti-

6Al-4 v for Sheet Forming Applications at Room Temperature." *International Journal of Solids and Structures* 80:334–47. doi:10.1016/j.ijsolstr.2015.08.025.

Bambach, Markus, Alexander Sviridov, Andreas Weisheit, and Johannes Henrich Schleifenbaum. 2017. "Case Studies on Local Reinforcement of Sheet Metal Components by Laser Additive Manufacturing." *Metals* 7(4). doi:10.3390/met7040113.

Basile, Dario, Raffaella Sesana, Manuela De Maddis, Luca Borella, and Pasquale Russo Spena. 2022. "Investigation of Strength and Formability of 6016 Aluminum Tailor Welded Blanks." *Metals* 12(10). doi:10.3390/met12101593.

Bhaduri, Amit. 2018. "High-Energy Rate Forming." Pp. 721–36 in *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*. Vol. 264, edited by A. Bhaduri. Singapore: Springer.

Boyer, Rodney, Gerhard Welsch, and E. W. Collings. 1994. *Materials Properties Handbook : Titanium Alloys*.

Chan, L. C., M. W. Fu, N. Li, and J. Lu. 2010. "FEA-Aided Design of Multi-Stage Drawing Process and Tooling for Production of a Miniature Sheet Metal Component." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46(9–12):993–1000. doi:10.1007/s00170-009-2163-z.

Chang, Caihong, and Junzhou Yang. 2024. "The Constitutive Equation-Based Recrystallization Mechanism of Ti-6Al-4V Alloy during Superplastic Forming." *Coatings* 14(1). doi:10.3390/coatings14010122.

Chartrel, Benjamin, and Elisabeth Massoni. 2013. "Deep Drawing of Ti6Al4V: Experiments and Modeling over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures." *Key Engineering Materials* 554–557:190–94. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.190.

Chen, Guang, Chengzu Ren, Xuda Qin, and Jun Li. 2015. "Temperature Dependent Work Hardening in Ti-6Al-4V Alloy over Large Temperature and Strain Rate Ranges: Experiments

and Constitutive Modeling." *Materials and Design* 83:598–610. doi:10.1016/j.matdes.2015.06.048.

Dengiz, Cengiz Görkem, and Fevzi Şahin. 2024. "Prediction of Forming Limit Diagrams for Steel Sheets with an Artificial Neural Network and Comparison with Empirical and Theoretical Models." *Research on Engineering Structures and Materials* 10(2):651–77. doi:10.17515/resm2023.32ma0825rs.

Engler, Olaf. 2025. "Correlating Crystallographic Texture with Anisotropic Properties and Sheet Metal Forming of Aluminium Alloys." *Journal of Materials Research and Technology* 35(January):514–22. doi:10.1016/j.jmrt.2025.01.059.

Erdoğan, Özgür, Sami Sevinç, and Rukiye Ertan. 2024. "Formability Capabilities and Mechanical Properties of Titanium Tailor-Welded Blanks." *Materiali in Tehnologije* 58(3):421–27. doi:10.17222/mit.2024.1118.

Eric Carton, Cyril Wentzel. 2003. "Utilisation of Explosive Welding and Foil Cladding for Titanium Alloy Sheet." in *10th International Titanium Conference*.

Fan, Yajun, Zhishang Yang, Peng Cheng, Keith Egland, and Y. Lawrence Yao. 2005. "Effects of Phase Transformations on Laser Forming of Ti-6Al-4V Alloy." *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME* 33:235–42.

Forouhandeh, F., S. Kumar, S. N. Ojha, and T. Omkar Prakash. 2013. "A Generative CAPP System for Sheet Hydroforming of CP Titanium." *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website: Www.Ijetae.Com ISO Certified Journal* 3(6):644–59.

Geeta Krishna, P., L. Venugopal, and T. Ram Prabhu. 2017. "Experimental Investigation of Failures in Redrawing of Ti-6Al-4V Alloy at Warm Conditions." *Materials Today: Proceedings* 4(8):8478–85. doi:10.1016/j.matpr.2017.07.194.

Gharehchahi, Hamidreza, Mohammad Javad Kazemzadeh-parsi, and Ahmad Afsari. 2021. "Numerical Study of Effective

Parameters in the Deep Drawing Process of a Cylindrical Cup and Comparison with Experimental Results." *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production* 9(4):47–59.

Groover, Mikell P. 2012. "Metal Forming and Sheet Metalworking." Pp. 493–503 in *Fundamental of Modern Manufacturing Material, Processes, and System*. USA: John Wiley & Sons.

Guo, Baoqi, Huicong Chen, Yan Chong, Wenqi Mao, Stefanus Harjo, Wu Gong, Zhongwu Zhang, John J. Jonas, and Nobuhiro Tsuji. 2024. "Direct Observations of Dynamic and Reverse Transformation of Ti-6Al-4V Alloy and Pure Titanium." *Acta Materialia* 268(January):119780. doi:10.1016/j.actamat.2024.119780.

Han, Lin, Haoyu Zhang, Chuan Wang, Ge Zhou, Siqian Zhang, and Lijia Chen. 2023. "Dynamic Recrystallization Behavior of β Grains in Hot Deformed Ti-6Mo-5 V-3Al-2Fe Alloy." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (0123456789). doi:10.1007/s00170-023-11165-y.

Han, Peisheng, Yu Lin Xing, Guofeng Yuan, Xiaoyu Zhu, and Xiaogang Wang. 2022. "Experimental Investigation of the Multi-Stage Micro-Deep Drawing of Pure Titanium Foils with Different Grain Sizes." *Journal of Materials Science* 57(31):15094–108. doi:10.1007/s10853-022-07556-3.

Harada, Yasunori, Kenzo Fukaura, and Kenichiro Mori. 2007. "Formability of Beta Titanium Alloy in Multi-Stage Deep Drawing Process." *Key Engineering Materials* 345–346:121–24. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.345-346.121.

Hlavacs, Adrienn, Mate Szucs, Valeria Mertinger, and Marton Benke. 2021. "Prediction of Earing of Hot-Rolled Al Sheets from Pole Figures." *Metals* 11(1):99. doi:10.3390/met11010099.

Hosseini, Ramin, Maryam Morakabati, Seyed Mahdi Abbasi, and Alireza Hajari. 2017. "Development of a Trimodal Microstructure with Superior Combined Strength, Ductility and

Creep-Rupture Properties in a near Alpha Titanium Alloy." *Materials Science and Engineering: A* 696(April):155–65. doi:10.1016/j.msea.2017.04.068.

Jagadeesha, Thimmaiah. 2024. "High-Energy Rate Forming." Pp. 58–72 in *Analysis and Optimization of Sheet Metal Forming Processes*, edited by A. Mulay, S. K. Singh, and A. Kocanda. Boca Raton: CRC Press.

Karaağaç, İbrahim, Mehmet Okan Kabakçi, and Zübeyde Başdoğan. 2023. "The Effects of Laser-Assisted Heat Treatment on Warm Formability of Dual-Phase Materials." *Ironmaking and Steelmaking* 50(8):984–90. doi:10.1080/03019233.2023.2169222.

Karaağaç, İbrahim, and Ahmet Özdemir. 2013. "Experimental Investigation On The Formability of Square- Shaped Cups by Hydromechanical Deep Drawing Process." *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 28(1):33–41.

Kardan, Masoud, Ali Parvizi, and Ali Askari. 2018. "Experimental and Finite Element Results for Optimization of Punch Force and Thickness Distribution in Deep Drawing Process." *Arabian Journal for Science and Engineering* 43(3):1165–75. doi:10.1007/s13369-017-2783-9.

Karpagaraj, A., N. Rajesh Kumar, N. Thiyaneshwaran, N. Siva Shanmugam, Murali Mohan Cheepu, and R. Sarala. 2020. "Experimental and Numerical Studies on Gas Tungsten Arc Welding of Ti–6Al–4V Tailor-Welded Blank." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 42(10):1–11. doi:10.1007/s40430-020-02629-3.

Karpagaraj, A., N. Siva Shanmugam, and K. Sankaranarayanasamy. 2016. "Studies on Mechanical Behavior and Microstructural Analysis of Tailor Welded Blanks of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Sheet." *Journal of Materials Research* 31(14):2186–96. doi:10.1557/jmr.2016.152.

Kinsey, Brad, Zhihong Liu, and Jian Cao. 2000. "Novel Forming

Technology for Tailor-Welded Blanks." *Journal of Materials Processing Technology* 99(1):145–53. doi:10.1016/S0924-0136(99)00412-4.

Kocańda, A., and H. Sadłowska. 2008. "Automotive Component Development by Means of Hydroforming: A Review." *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 8(3):55–72. doi:10.1016/s1644-9665(12)60163-0.

Kotkunde, Nitin, Aditya D. Deole, A. K. Gupta, and S. K. Singh. 2013. "Effect of Process Parameters on Deep Drawing of Ti-6Al-4V Alloy Using Finite Element Analysis." *AIP Conference Proceedings* 1567(1):1065–68. doi:10.1063/1.4850155.

Kotkunde, Nitin, Aditya D. Deole, Amit Kumar Gupta, Swadesh Kumar Singh, and B. Aditya. 2014. "Failure and Formability Studies in Warm Deep Drawing of Ti-6Al-4V Alloy." *Materials and Design* 60:540–47. doi:10.1016/j.matdes.2014.04.040.

Kotkunde, Nitin, and Amit Kumar Gupta. 2015. "Analysis of Forming Limit Diagram for Ti-6Al-4 V Alloy." *Materials Today: Proceedings* 2(4–5):3762–69. doi:10.1016/j.matpr.2015.07.178.

Kotkunde, Nitin, Amit Kumar Gupta, and Swadesh Kumar Singh. 2015. "Formability Study of Ti-6Al-4V Alloy under Warm Conditions." *Advances in Materials and Processing Technologies* 1(1–2):210–22. doi:10.1080/2374068X.2015.1118994.

Kumar, Arvind, and Kaushal Kumar. 2022. "Recent Advancements in Tailor Welded Blanks." *Materials Today: Proceedings* 69:556–59. doi:10.1016/j.matpr.2022.09.317.

Li, Ping, Le Liu, Lei Hu, Yue Zhang, Si liang Yan, and Ke min Xue. 2023. "Flow Softening Rules and Mechanisms in Ti–6Al–4V Alloy Sheet during Electrically Assisted near-Isothermal Tension." *Journal of Materials Science* 58(4):1925–38. doi:10.1007/s10853-023-08140-z.

Li, Weining, Moataz M. Attallah, and Khamis Essa. 2022.

"Experimental and Numerical Investigations on the Process Quality and Microstructure during Induction Heating Assisted Increment Forming of Ti-6Al-4V Sheet." *Journal of Materials Processing Technology* 299(August 2021):117323. doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117323.

Lv, Zhoujin, Haofeng Li, Lida Che, Shuo Chen, Pengjie Zhang, Jing He, Zhanfang Wu, Shanting Niu, and Xiangyang Li. 2023. "Effects of HIP Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by SLM." *Metals* 13(5):1–14. doi:10.3390/met13050991.

Meng, Jinkui, Xiangguang Chen, Jiantang Jiang, and Li Liu. 2023. "Investigation on Anisotropic Mechanical Behavior of Ti-6Al-4V Alloy via Schmid Factor and Kernel Average Misorientation Distribution." *Metals* 13(1). doi:10.3390/met13010089.

Moore, John A., Nathan R. Barton, Jeff Florando, Rupalee Mulay, and Mukul Kumar. 2017. "Crystal Plasticity Modeling of β Phase Deformation in Ti-6Al-4V." *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 25(7). doi:10.1088/1361-651X/aa841c.

Mousa, Ali Abd Ameer, Ali Abbar Khleif, and Muhsin J. Jweeg. 2022. "Numerical and Experimental Studies of the Formability of the Low Carbon Steel (11008-AISI) by Using Hydromechanical Deep Drawing." *Materials Today: Proceedings* 60:1721–30. doi:10.1016/j.matpr.2021.12.305.

Naka, Tetsuo, Gaku Torikai, Ryutaro Hino, and Fusahito Yoshida. 2001. "The Effects of Temperature and Forming Speed on the Forming Limit Diagram for Type 5083 Aluminum–Magnesium Alloy Sheet." *Journal of Materials Processing Technology* 113(1–3):648–53. doi:10.1016/S0924-0136(01)00650-1.

Narayanan, R. Ganesh, and Uday Shanker Dixit. 2015. *Advances in Material Forming and Joining*.

Nezami Esfahlan, H., S. Abbasnejad Dizaji, and F. Djavanroodi. 2009. "Experimental and Numerical Analysis for

Hydroforming of Ti6Al4V Alloy Used in Aerospace, Assisted by Floating Disk." *Journal of Applied Sciences* 9(16):2925–32. doi:10.3923/jas.2009.2925.2932.

Nugroho, Janu Ageng, Ghozali Suprobo, Nokeun Park, and Eung Ryul Baek. 2020. "Investigation of Dynamic Recrystallization Phenomenon in Drawn Ti-6al-4v Alloy." *Materials Science Forum* 1000 MSF:419–27. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1000.419.

Odenberger, E. L., M. Oldenburg, P. Thilderkvist, T. Stoehr, J. Lechler, and M. Merklein. 2011. "Tool Development Based on Modelling and Simulation of Hot Sheet Metal Forming of Ti-6Al-4V Titanium Alloy." *Journal of Materials Processing Technology* 211(8):1324–35. doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.03.001.

Önder, Erkan, and A. Erman Tekkaya. 2008. "Numerical Simulation of Various Cross Sectional Workpieces Using Conventional Deep Drawing and Hydroforming Technologies." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48(5):532–42. doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.06.012.

Pallett, R. J., and R. J. Lark. 2001. "The Use of Tailored Blanks in the Manufacture of Construction Components." *Journal of Materials Processing Technology* 117(1–2):249–54. doi:10.1016/S0924-0136(01)01124-4.

Roy, Arunabha M., Raymundo Arróyave, and Veera Sundararaghavan. 2023. "Incorporating Dynamic Recrystallization into a Crystal Plasticity Model for High-Temperature Deformation of Ti-6Al-4V." *Materials Science and Engineering: A* 880(March):145211. doi:10.1016/j.msea.2023.145211.

Roy, Shibayan, R. Madhavan, and Satyam Suwas. 2014. "Crystallographic Texture and Microstructure Evolution during Hot Compression of Ti-6Al-4V-0.1B Alloy in the (α + β)-Regime." *Philosophical Magazine* 94(4):358–80. doi:10.1080/14786435.2013.853141.

Saunders, F. I., and R. H. Wagoner. 1996. “Forming of Tailor-Welded Blanks.” *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* 27(9):2605–16. doi:10.1007/BF02652354.

Sha, Wei, and Savko Malinov. 2009. *Titanium Alloys: Modelling of Microstructure, Properties and Applications*. 1st ed. Woodhead Publishing.

Shi, Xiaohui, Zuhan Cao, Zhiyuan Fan, and Junwei Qiao. 2020. “Texture Evolution Behavior and Its Triggered Mechanical Anisotropy of CP Ti During Severe Cold Rolling and Subsequent Annealing.” *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 33(9):1271–82. doi:10.1007/s40195-020-01047-7.

Sieniawski, Jan, and Waldemar Ziaja. 2013. *TITANIUM ALLOYS - ADVANCES IN PROPERTIES CONTROL*.

Singh, Swadesh Kumar, K. Mahesh, Apurv Kumar, and M. Swathi. 2010. “Understanding Formability of Extra-Deep Drawing Steel at Elevated Temperature Using Finite Element Simulation.” *Materials and Design* 31(9):4478–84. doi:10.1016/j.matdes.2010.04.049.

Singh, Swadesh Kumar, and D. Ravi Kumar. 2008. “Effect of Process Parameters on Product Surface Finish and Thickness Variation in Hydro-Mechanical Deep Drawing.” *Journal of Materials Processing Technology* 204(1–3):169–78. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.11.060.

Sugahara, T., D. A. P. Reis, C. Moura Neto, M. J. R. Barboza, E. A. C. Perez, F. Piorino Neto, and A. C. O. Hirschmann. 2010. “The Effect of Widmanstätten and Equiaxed Microstructures of Ti-6Al-4V on the Oxidation Rate and Creep Behavior.” *Materials Science Forum* 636–637:657–62. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.657.

Takalkar, Atul S., and Lenin Babu Mailan Chinnapandi. 2019. “Deep Drawing Process at the Elevated Temperature: A Critical Review and Future Research Directions.” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 27:56–67.

doi:10.1016/j.cirpj.2019.08.002.

Tran, Minh Tien, Zhengtong Shan, Ho Won Lee, and Dong Kyu Kim. 2021. “Earing Reduction by Varying Blank Holding Force in Deep Drawing with Deep Neural Network.” *Metals* 11(3):1–23. doi:10.3390/met11030395.

Trzepieciński, Tomasz, and Marcin Szpunar. 2021. “Assessment of the Effectiveness of Lubrication of Ti-6al-4v Titanium Alloy Sheets Using Radial Basis Function Neural Networks.” *Acta Polytechnica* 61(3):489–96. doi:10.14311/AP.2021.61.0489.

Wang, Yaogang, Changhe Li, Yanbin Zhang, Min Yang, Benkai K. Li, Lan Dong, and Jun Wang. 2018. “Processing Characteristics of Vegetable Oil-Based Nanofluid MQL for Grinding Different Workpiece Materials.” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* 5(2):327–39. doi:10.1007/s40684-018-0035-4.

Xie, Jun, Xuefeng Xu, Liming Wei, Feng Cui, and Jiawei Nie. 2025. “Microstructure and Properties Study of TA18 Titanium Alloy Tube Differential Temperature Necking and Thickening Forming Based on Temperature Gradient Positioning.” *Coatings* 15(4). doi:10.3390/coatings15040392.

Yang, D., and Z. W. Jiang. 2024. “Strain Rate- and Temperature-Dependent Mechanical Properties of Ti-6Al-4V in Dynamic Compression: Hardening and Softening Behaviour Analysis Using Strain Energy-Based Method.” *Bulletin of Materials Science* 47(3):1–11. doi:10.1007/s12034-024-03251-y.

Yang, Xiaoming, Baoyu Wang, and Jing Zhou. 2020. “Numerical and Experimental Study on Formability of TC4 Alloy in a Novel Multi-Layer Sheet Hot Stamping Process.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 110(5–6):1233–47. doi:10.1007/s00170-020-05802-z.

Ye, Kwang Young, Jae Hong Kim, and Byung Min Kim. 2017. “Effect of Spot-Weld Line Orientation on Formability for Patchwork Blank.” *Key Engineering Materials* 729:86–90. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.729.86.

Zhang, Haoyu, Shuo Zhang, Shuai Zhang, Xuejia Liu, Xiaoxi Wu, Siqian Zhang, and Ge Zhou. 2023. “High Temperature Deformation Behavior of Near-β Titanium Alloy Ti-3Al-6Cr-5V-5Mo at α + β and β Phase Fields.” *Crystals* 13(3). doi:10.3390/cryst13030371.

Zhang, Rongjing, Lihui Lang, Rizwan Zafar, Lijing Lin, and Wenshang Zhang. 2016. “Investigation into Thinning and Spring Back of Multilayer Metal Forming Using Hydro-Mechanical Deep Drawing (HMDD) for Lightweight Parts.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82(5–8):817–26. doi:10.1007/s00170-015-7415-5.

Zhang, Wenjing, Leilei Xing, Shubo Zhang, Kai Wang, Junyu Chen, Jinhan Chen, Gang Fang, and Wei Liu. 2024. “The Reverse Transformation Mechanism of β Phase and Its Stability of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated via Laser Powder Bed Fusion.” *Materials and Design* 241(December 2023):112926. doi:10.1016/j.matdes.2024.112926.

Zhang, Zhiqiang, Xiao Ouyang, and Lijuan Zhu. 2022. “Study on the Hot Stamping Simulation and Experiment of A-Pillar Patchwork Blanks.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 122(1):365–76. doi:10.1007/s00170-022-09694-z.

Zhong, Chongliang, Jianing Liu, Tong Zhao, Thomas Schopphoven, Jinbao Fu, Andres Gasser, and Johannes Henrich Schleifenbaum. 2020. “Laser Metal Deposition of Ti6Al4V-A Brief Review.” *Applied Sciences (Switzerland)* 10(3):1–12. doi:10.3390/app10030764.

CHAPTER 13

BİYOMALZEMELERDE KIRILMA MEKANİZMALARI: SÜNEK VE GEVREK DAVRANIŞLARIN İNCELENMESİ

BAHAR MAMMADLI[1]
ŞAKİR ALTINSOY[2]

Giriş

Malzeme bilimi, mühendislik ve teknolojinin pek çok alanında temel bir role sahiptir. Malzemelerin mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri, bulundukları uygulama alanlarında güvenilirlik ve dayanıklılığı doğrudan etkiler. Bu nedenle bir malzemenin yapısal bütünlüğünü koruyabilme kabiliyeti, hem mühendislik sistemlerinin başarısı hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Malzemelerde karşılaşılan başlıca hasar türlerinden biri olan kırılma, dış yükler veya çevresel etkiler sonucu oluşur ve yapının bir ya da daha fazla parçaya ayrılarak bütünlüğünü kaybetmesiyle sonuçlanır (Barsoum et al., 2007; Bai et al., 2008).

[1](Yüksek Lisans Öğrencisi) TC Istanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Istanbul/Türkiye, Orcid:0009-0005-3133-0023.memmedlibahar01@gmail.com
[2]Dr. Ögr. Üyesi, TC Istanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisligi Bölümü, Istanbul/Türkiye, Orcid: 0000-0002-1893-2266. sakir.altinsoy@yeniyuzyil.edu.tr

Bu kırılma olgusu, özellikle biyomedikal uygulamalarda kullanılan biyomalzemeler açısından daha da büyük bir önem kazanır. Biyomalzemeler, canlı organizmalarla doğrudan etkileşim içinde olan, biyolojik işlevleri desteklemek, iyileştirmek veya yeniden yapılandırmak amacıyla kullanılan özel malzemelerdir. Bu malzemeler, tıbbi implantlardan doku mühendisliği ürünlerine kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmakta olup, insan vücudu ile biyouyumlu olmaları beklenmektedir. Biyomalzemelerin mekanik özellikleri, yalnızca dayanım açısından değil; hücre davranışları, biyomalzeme bozunabilirliği ve doku yenilenmesini etkileyen biyolojik süreçler açısından da hayati bir rol oynar. Özellikle yük taşıyan uygulamalarda kullanılan biyomalzemeler, hem yeterli yapısal destek sağlamalı hem de biyolojik uyumu koruyabilmelidir. Aksi takdirde, yetersiz veya aşırı sert malzemeler rejeneratif süreci olumsuz etkileyebilir (Dee et al., 2003).

Biyomalzemelerde karşılaşılan başlıca hasar mekanizmalarından biri de yine kırılmadır. Kırılma, bu malzemelerde genel olarak sünek ve gevrek kırılma olmak üzere iki temel biçimde ortaya çıkar. Sünek kırılma, plastik deformasyonla birlikte gerçekleşirken; gevrek kırılma uyarı vermeden ani bir şekilde oluşabilir. Her iki durum da özellikle protez ve implant gibi hayati fonksiyon üstlenen yapılar için ciddi riskler taşır. Bu nedenle biyomalzemelerde kırılma davranışlarının detaylı şekilde analiz edilmesi, malzeme seçimi ve tasarımı sırasında dikkate alınmalı; güvenilir ve uzun ömürlü biyomedikal ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlamalıdır. Bu çalışma kapsamında, biyomalzemelerde gözlenen sünek ve gevrek kırılma davranışları incelenecek ve bu mekanizmaların biyomedikal uygulamalardaki önemi ele alınacaktır (Ayhan H., 2002).

1. Biyomalzemelerde Hasar

Biyomalzemeler tıbbi implantlarda, protezlerde, doku mühendisliği ürünlerinde ve diğer biyomedikal uygulamalarda

kullanılmaktadır. Bu nedenle bu malzemelerin güvenilirliği ve oluşabilecek hasarın önlenmesi hayati açıdan oldukça önemlidir (Batchelor et al., 2004).

Biyomalzeme tasarımlarında ciddi sorunların nedenleri üç ana gruba ayrılabilir:

- **Yanlış tasarım veya yanlış malzeme seçimi:** Biyomalzemelerde tasarım ve malzeme seçimi, kullanım amacı ve içinde bulunduğu biyolojik çevre ile uyumlu olmalıdır. Hatalı tasarım veya yanlış malzeme seçimi; statik çatlaklar, kırılgan kırılmalar, karmaşık geometrilerdeki gerilim yoğunlaşmaları ve buna bağlı olarak yorulma hasarları gibi ciddi yapısal sorunlara yol açabilir. Örneğin, eklem protezinde kullanılan malzemenin yeterli mekanik dayanıklılığa sahip olmaması, protezin işlevini kaybetmesine ve hastada ciddi sağlık komplikasyonlarının ortaya çıkmasına neden olabilir (Ritchie R. O., 2011).
- **İmalat süreci kusurları:** Üretim sürecinde meydana gelen hatalar, malzemenin iç yapısına zarar vererek biyomalzemelerin mekanik dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebilir. Kimyasal içerikteki kusurlar, döküm ve mekanik işlemler sırasında oluşan yapısal bozukluklar, yüzey pürüzlülüğü ve montaj hataları, malzemenin bütünlüğünü zayıflatır. Örneğin, diş implantlarının üretimi sırasında oluşabilecek mikroskobik çatlaklar, implantın ağız boşluğundaki mekanik yüklere karşı dayanımını azaltarak erken hasara neden olabilir (Sedlakova et al., 2020).
- **Çalışma koşullarının bozulması:** Biyomalzemeler, uzun süreli kullanımları boyunca çeşitli çalışma koşullarına maruz kalmaktadır. Bu çevresel etkiler, biyomalzemelerin orijinal özelliklerini bozarak yapısal ve fonksiyonel bozulmalara yol açabilir. Aşınma, biyolojik ortamın kimyasal etkileri, korozyon ve radyasyon gibi faktörler,

malzemenin performansını ve hizmet ömrünü önemli ölçüde azaltır. Örneğin, vücutta kullanılan stentler zamanla yapısal bütünlüklerini kaybedebilir; bu durum hem cihazın işlevselliğini azaltır hem de ciddi sağlık riskleri oluşturabilir (Rimna et al., 2021).

Başlıca Hasar Mekanizmaları:

- Kırılma;
- Yorulma;
- Sürünme;
- Şekil değişimi;
- Korozyon + Gerilme

Kırılma: Bir malzemenin uygulanan gerilme veya darbe sonucunda bütünlüğünü kaybederek iki veya daha fazla parçaya ayrılmasıdır.

Yorulma: Malzemenin tekrarlayan mekanik yüklemelere maruz kalması sonucu, mikroyapıda zamanla oluşan çatlakların ilerleyerek kırılmaya neden olmasıdır.

Sürünme: Malzemenin, yüksek sıcaklıklarda uzun süreli sabit yük altında kalması durumunda zamanla kalıcı şekil değiştirmesidir.

Şekil Değişimi (Plastik Deformasyon): Uygulanan gerilme sonucu elastik sınırın aşılmasıyla malzemenin kalıcı biçimde form değiştirmesidir.

Korozyon + Gerilme (Gerilmeli Korozyon Çatlaması): Kimyasal olarak aktif bir ortamda çekme geriliminin etkisiyle malzeme üzerinde çatlak oluşumunun hızlanmasıdır.

2. Kırılma

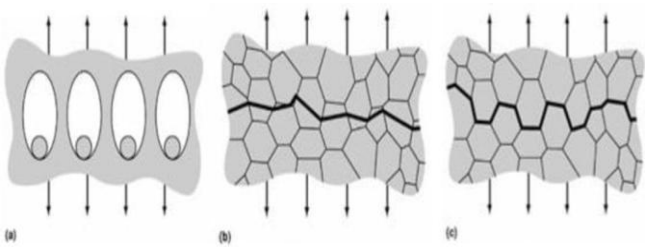
Kırılma, genel olarak bir yapının birden fazla parçaya ayrılarak yapısal bütünlüğünü kaybetmesi olarak tanımlanır. Malzemeler; çevresel koşullar (örneğin korozyon, sıcaklık) ve içsel malzeme kusurları gibi çeşitli faktörlerden etkilenerek farklı kırılma mekanizmalarına maruz kalabilir.

Kırılma süreci genellikle iki aşamada gerçekleşir:

1. **Çatlak oluşumu**,
2. **Çatlağın ilerlemesi**.

Kırılmanın esas olarak çatlak ilerleme mekanizmasıyla ilişkili olduğu kabul edilmektedir. Şekil 1'de bu çatlak ilerleme mekanizmaları gösterilmektedir. Çatlak ilerleme mekanizmaları genel olarak üç ana başlık altında sınıflandırılır (K. Bardsley et al., 2016):

- Mikro boşlukların birleşmesiyle çatlağın ilerlemesi,
- Ayrılma ile çatlağın ilerlemesi,
- Taneler arası çatlak ilerlemesi.



Şekil 1. Mikro boşlukların birleşmesiyle çatlağın ilerlemesi (a), Ayrılma ile çatlağın ilerlemesi (b), Taneler arası çatlağın ilerlemesi (c)

Kaynak: https://images.app.goo.gl/afS252pWSJcL5hk38

2.1. Gevrek Kırılma

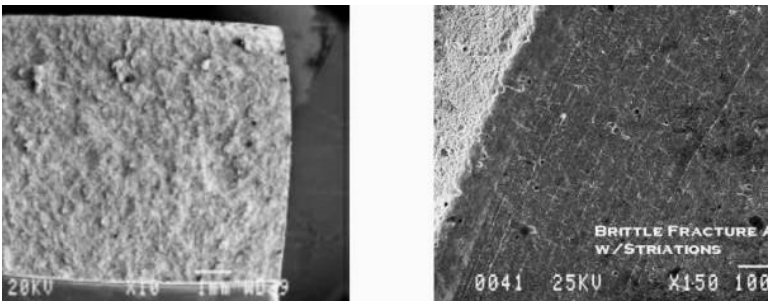
Gevrek kırılma, malzemenin kırılması sırasında minimum düzeyde veya hiç plastik deformasyon göstermediği bir kırılma türüdür (Salman C., 1999). Bu kırılma tipi, genellikle gerilme kuvvetine dik yönde meydana gelen ani bir ayrılma ile karakterize edilir. Dışarıdan bakıldığında herhangi bir şekil değişikliği gözlemlenmez; ancak kırılma yüzeyi detaylı yöntemlerle incelendiğinde, yüzeye yakın ince bir deformasyon tabakası tespit edilebilir.

Gevrek kırılma, çoğunlukla yüksek mukavemetli çelikler ve sıkı paketlenmiş hekzagonal (SPH) kristal yapısına sahip metaller gibi yüksek dayanımlı malzemelerde görülür. Bu tür malzemelerde kırılma sırasında genellikle sadece kırık yüzey çevresinde sınırlı miktarda plastik deformasyon meydana gelir. Gevrek kırılmanın ayırt edici özelliği, kırılmanın ani ve uyarı vermeden gerçekleşmesidir. Çoğunlukla bir çatlak ya da yüzey kusuru üzerinde biriken gerilim, kritik bir seviyeye ulaştığında aniden serbest kalarak malzemenin kırılmasına neden olur.

Gevrek kırılma eğilimi, kristal yapı, içsel kusurlar, çevresel sıcaklık ve yükleme hızı gibi birçok faktöre bağlı olarak değişebilir. Örneğin, SPH kristal yapısına sahip metaller, atom düzeyinde kayma düzlemlerinin sınırlı olması nedeniyle çatlak ilerlemesine daha açıktır ve bu da gevrek kırılmayı kolaylaştırır (Li et al., 2019).

Gevrek kırılmanın anlaşılması, malzeme mühendisliği ve yapısal tasarım açısından kritik bir öneme sahiptir. Bir malzemenin kırılma davranışının doğru bir şekilde analiz edilmesi, güvenli ve uzun ömürlü ürünlerin tasarlanmasına doğrudan katkı sağlar. Bu nedenle, malzeme bilimi ve mühendisliği alanlarında gevrek kırılma üzerine yapılan araştırmalar; malzeme davranışlarının iyileştirilmesi ve beklenmedik kırılmaların önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 2'de gevrek kırılma örneği gösterilmektedir.

Şekil 2.*Gevrek kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü*



Kaynak: https://images.app.goo.gl/vk1mpdpzfVweVe5J8

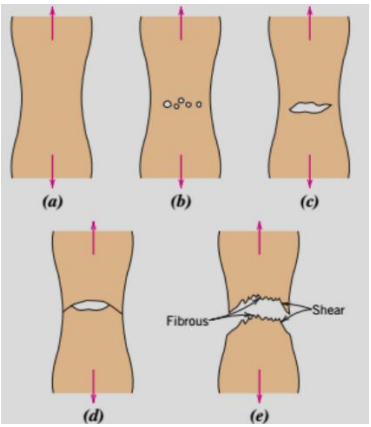
2.2. Sünek Kırılma

Sünek kırılma, malzemenin kırılmadan önce belirgin bir plastik deformasyona uğraması durumudur. Bu kırılma türünün gerçekleşebilmesi için, malzemenin elastik sınırını aşan bir gerilme altında plastik deformasyon göstermesi gereklidir. Sünek kırılma, plastik deformasyonun varlığıyla karakterize edildiğinden, bu deformasyonu sağlayacak yeterli büyüklükte bir gerilme uygulanmalıdır (Anderson T. L., 2017).

Sünek kırılma farklı şekillerde ortaya çıkabilir. Örneğin, sıkı paketlenmiş hekzagonal (SPH) yapısına sahip tek kristalli malzemelerde, belirli düzlemler boyunca kayma meydana gelerek kristalin ayrılması söz konusu olabilir. Altın ve kurşun gibi yüksek süneklik gösteren çok kristalli metaller, kırılmadan önce önemli ölçüde incelme gösterirler. Bu incelme, malzemenin plastik olarak deformasyon kapasitesinin yüksek olduğunu gösterir. Orta derecede sünek metallerde ise, çekme yükü altında plastik deformasyon sonucu boyun oluşumu gözlenir. Bu durumda kırılma genellikle numunenin merkezinden başlar. Oluşan çatlak, kayma düzlemleri boyunca ilerleyerek malzemenin tamamen kopmasına neden olur (Niinomi M., 2008).

Sünek kırılma, yapısal tasarım açısından avantajlıdır; çünkü bu tür kırılmalar genellikle önceden plastik deformasyon belirtileri gösterir ve böylece ani, beklenmedik kırılmaların önüne geçilebilir. Şekil 3'te sünek kırılma mekanizması gösterilmektedir.

Şekil 3. *Sünek kırılmanın mekanizması*



Kaynak: https://images.app.goo.gl/yKtUJmCHELY3bjNX8

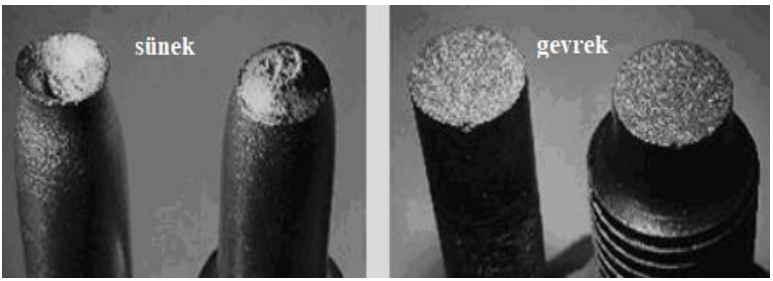
Sünek ve Gevrek Kırılma Arasındaki Farklar

İki kırılma türü arasındaki temel farklar şu şekilde özetlenebilir. Sünek kırılmada, çatlak ucunda yüksek miktarda plastik deformasyon gözlemlenirken, gevrek kırılmada bu deformasyon oldukça sınırlıdır (Hertzberg R. W., 1996).

- Sünek kırılmada çatlak ilerlemesi yavaş ve kontrollü bir şekilde gerçekleşirken, gevrek kırılmada çatlak hızlı ve ani bir şekilde yayılır.
- Sünek kırılmanın oluşabilmesi için malzeme üzerinde yüksek gerilme uygulanmalı ve önemli miktarda plastik şekil değişimi meydana gelmelidir. Kırılma genellikle mikroskobik çatlakların oluşması ve zamanla birleşmesiyle başlar; ardından çatlak yavaşça ilerleyerek kırılmaya neden olur. Kırılma yüzeyi genellikle lifli ve mat görünümde olur.
- Gevrek kırılmada ise çatlak oluştuktan sonra kırılma ani şekilde gerçekleşir. Kırılma yüzeyi parlak,

kristalimsi bir yapıya sahiptir. Bu kırılma türü genellikle ani yüklemeler, düşük sıcaklıklar ve çok eksenli gerilmeler gibi etkiler altında oluşur.

- Sünek kırılmalar genellikle tek parça halinde oluşurken, gevrek kırılmalar çoğunlukla çok parçalı bir yapı ile sonuçlanır (Eberl et al., 2006).



Şekil 4. *Sünek ve Gevrek kırılma örneği*

Kaynak: https://images.app.goo.gl/18BbewDsPT13u6f78

3. Metallik Biyomalzemelerde Kırılma

Metallik biyomalzemeler genellikle sünek kırılma özellikleri gösterirler, yani yük altında şekil değiştirirken kırılmaya dirençlidirler. Ancak düşük sıcaklık, yüksek hızda yükleme veya var olan mikroçatlaklar gibi faktörler, hatta sünek metalik malzemelerde bile gevrek kırılmaya yol açabilir. Bu durum, malzemenin kullanıldığı ortama ve koşullara bağlı olarak değişebilir.

Metallik biyomalzemelerin mukavemet ve dayanıklılığını artırmak için çeşitli yüzey işleme teknikleri kullanılır. Örneğin, elektro polisaj gibi teknikler çatlakların oluşumunu geciktirerek kırılma direncini artırabilir. Bu sayede malzemeler, biyomedikal uygulamalarda daha uzun ömürlü ve güvenilir olabilirler.

Metalik biyomalzemeler arasında en yaygın kullanılanlar titanyum alaşımları, paslanmaz çelikler ve kobalt-krom alaşımlarıdır. Bu malzemeler, biyolojik uyumlulukları ve mekanik

özellikleri nedeniyle cerrahi implantlarda ve diğer tıbbi uygulamalarda tercih edilirler. Bu özellikler, malzeme seçimi ve tasarımında önemli bir rol oynar, özellikle de uzun süreli implant uygulamalarında sağlık ve güvenlik açısından kritik önem taşır (Geetha et al., 2009).

Kırılma Türleri:

Sünek kırılma: En yaygın kırılma türüdür. Malzeme, kırılmadan önce belirgin plastik deformasyona uğrar.

Yorulma kırılması: Özellikle kalça ve diz protezleri gibi sürekli yüklemeye maruz kalan implantlarda görülür. Tekrarlayan mekanik gerilmeler sonucunda yüzeyde mikroçatlaklar oluşur, bu çatlaklar zamanla büyüyerek nihai kırılmayla sonuçlanır.

Gerilmeli korozyon çatlaması: Biyolojik sıvılarla temas halinde gelişebilir. Özellikle paslanmaz çelik ve titanyum alaşımları gibi malzemelerde, hem mekanik gerilme hem de korozyon etkisiyle çatlamalar meydana gelebilir.

Biyodegradasyon kaynaklı çatlamalar: Magnezyum (Mg) ve çinko (Zn) gibi biyobozunur metallerde, zamanla oluşan kimyasal bozulmalar çatlakların gelişmesine neden olur. Bu durum, implantın taşıyıcı yapısının zayıflamasına ve mekanik bütünlüğünün azalmasına yol açabilir (Chen et al., 2004).

4. Seramik Biyomalzemelerde Kırılma

Seramikler, doğaları gereği gevrek malzemelerdir. Süneklikleri son derece düşüktür ve plastik deformasyon neredeyse hiç gözlenmez. Bu nedenle, çatlaklar genellikle kristal taneleri boyunca ilerler ve kırılma ani bir şekilde gerçekleşir. Seramiklerin bu kırılgan yapısı ve düşük çatlak tokluğu, biyomedikal uygulamalarda önemli bir sınırlayıcı faktördür.

Seramik malzemelerde mikrometre ve nanometre ölçeğindeki gözeneklilikler, çatlakların başlama ve ilerleme

olasılığını artırarak yapısal bütünlüğü zayıflatabilir. Bu durum, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini olumsuz etkileyerek biyolojik performansını da düşürebilir. Özellikle kalsiyum fosfat temelli seramikler, örneğin hidroksiapatit (HA), düşük çatlak tokluğu gösterir ve bu nedenle kırılmaya karşı hassastır. Bu özellik, implant gibi uzun süreli yapısal destek gerektiren uygulamalarda önemli bir dezavantaj oluşturur.

Buna bağlı olarak, seramik malzemelerle üretilen implantlarda *slow crack growth* (SCG) olarak adlandırılan yavaş çatlak ilerlemesi önemli bir problemdir. Bu tür çatlaklar zamanla büyüyerek ani kırılmaya neden olabilir (Hannink et al., 2000).

Seramik Biyomalzemelere Örnekler:

- Alümina (Al_2O_3)
- Zirkonya (ZrO_2)
- Biyoglass (biyouyumlu camlar)

Seramiklerde Kırılma Türleri:

Gevrek kırılma: En yaygın kırılma türüdür. Çatlaklar hızlı ve ani şekilde yayılır, önceden belirgin bir deformasyon gözlenmez.

Termal kırılma: Hızlı sıcaklık değişimleri nedeniyle oluşabilir. Özellikle farklı ısıl genleşme katsayısına sahip bölgelerde gerilmeler çatlak başlatabilir.

Yorulma kırılması: Seramiklerde nadiren görülür; ancak mikroskobik çatlakların zamanla ilerlemesiyle oluşabilir.

Slow Crack Growth (SCG): Mikroskobik çatlakların zaman içinde büyümesiyle oluşan gecikmeli kırılma türüdür. Bu mekanizma, özellikle biyoseramik implantlar için uzun dönem kullanımda ciddi bir sınırlayıcı faktördür (Wang et al., 2014).

5. Polimer Biyomalzemelerde Kırılma

Polimer malzemeler, biyolojik ortamlarda sıvı emilimi nedeniyle şişme eğilimi gösterebilir. Bu şişme, polimer zincirleri arasındaki boşlukları artırarak mekanik zayıflamaya ve zamanla mikroçatlak oluşumuna yol açabilir. Polimerler, hem sünek hem de gevrek kırılma davranışı sergileyebilir. Bu davranış, malzemenin kristalin oranına, sıcaklığa, moleküler yapısına ve yükleme hızına bağlı olarak değişir. Oda sıcaklığında birçok polimer sünek davranış gösterirken, düşük sıcaklıklarda veya hızlı yükleme koşullarında gevrekleşebilir. Bu nedenle, kullanım ortamı ve koşulları polimer biyomalzemelerin performansı üzerinde belirleyici rol oynar (Lu et al., 1999).

Polimer Biyomalzemelere Örnekler:

- Polietilen (PE)
- Silikon
- Polilaktik asit (PLA)
- Polikarbonat (PC)

Bu malzemeler, esneklikleri, biyouyumlulukları ve işlenebilirlikleri sayesinde protezler, damar stentleri, dikiş iplikleri ve yumuşak doku destekleri gibi pek çok biyomedikal uygulamada kullanılmaktadır.

Polimerlerde Kırılma Türleri:

Sünek kırılma: Amorf veya düşük kristalin yapıya sahip polimerlerde yaygındır. Kırılma öncesi belirgin plastik deformasyon görülür.

Gevrek kırılma: Yüksek kristalin yapıya sahip polimerlerde veya düşük sıcaklık koşullarında meydana gelir. Deformasyon olmadan ani kırılma gerçekleşir.

Çevresel gerilim çatlaması: Biyolojik sıvılarla temas ve eşzamanlı gerilme etkisi altında oluşur. Bu durum uzun vadeli implantlar için risk oluşturabilir.

Yorulma kırılması: Özellikle damar stentleri ve esnek ortopedik implantlar gibi dinamik yüklemeye maruz kalan uygulamalarda görülür. Tekrarlayan gerilmeler sonucu mikroçatlaklar gelişerek zamanla büyür.

Polimerlerin kırılma davranışını etkileyen başlıca faktörler sıcaklık, moleküler yapı, kristalinite derecesi ve yükleme hızıdır. Bu değişkenler dikkate alınarak uygun polimer biyomalzeme seçimi, uygulamanın güvenliği ve dayanıklılığı açısından büyük önem taşır (Garlotta D., 2001).

6. Kompozit Biyomalzemelerde Kırılma

Kompozit yapılar, birden fazla faz içermeleri nedeniyle hem sünek hem de gevrek kırılma davranışı sergileyebilirler. Bu davranış, kullanılan matris (polimer, seramik vb.) ve takviye malzemeye (lif, partikül vb.) bağlı olarak değişir. Özellikle çok malzemeli 3D baskı teknolojisiyle üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitler, yumuşak ve sert bölgelerin belirli bir düzende birleştirilmesiyle kırılma davranışını iyileştirebilir.

Bu yapılar, çatlak ilerlemesine karşı daha dirençli olacak şekilde tasarlanabilir. Böylece, dokuya benzer mekanik dayanım ve uyum sağlanarak biyomedikal uygulamalarda daha güvenilir implantlar elde edilebilir. Özellikle kolineer (aynı doğrultudaki) çatlaklar gibi kritik durumlarda, bu kompozitler daha yüksek dayanım ve enerji absorpsiyonu gösterebilir (Naseri et al., 2022).

Kompozit Biyomalzemelere Örnekler:

- Karbon fiber takviyeli PEEK (Polyetheretherketone)
- Cam fiber takviyeli reçineler

- Biyoseramik–polimer karışımları (örneğin hidroksiapatit–PLA)

Bu tür kompozitler, ortopedik implantlardan dental materyallere kadar birçok biyomedikal alanda kullanılmaktadır.

Kompozitlerde Kırılma Türleri:

Tabaka ayrılması: Lifli yapıya sahip kompozitlerde katmanlar arası yapışmanın zayıflaması sonucu oluşur. Mekanik dayanımı ciddi şekilde düşürebilir.

Matris çatlağı: Kompozitin matris fazında (genellikle polimer veya seramik) oluşan çatlaklardır. Bu çatlaklar liflere taşınan gerilmeyi artırarak diğer kırılma mekanizmalarını tetikleyebilir.

Fiber kırılması: Takviye liflerin doğrudan kopmasıdır. Bu, genellikle malzemenin nihai dayanım sınırına ulaştığını gösterir.

Süneklik ve gevreklik, kompoziti oluşturan matrisin ve takviye elemanının türüne, oranına ve aralarındaki bağ kuvvetine bağlıdır. Uygun tasarım ve malzeme seçimiyle, biyomalzeme olarak kullanılan kompozitlerin mekanik dayanımı artırılarak uzun ömürlü ve güvenli implant çözümleri geliştirilebilir (Xie et al., 2021).

7.Meta-Biyomalzemeler ve Kırılma

Meta-biyomalzemeler, özel geometrik yapıları sayesinde yorgunluk direnci ve çatlak gelişimine karşı üstün performans sergiler. Özellikle **TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces)** gibi tasarımlar, trabeküler kemik yapısına benzerlik göstererek hem mekanik hem de biyolojik açıdan önemli avantajlar sağlar. Bu yapıların eğrisel yüzey geometrisi, hücre proliferasyonunu ve doku yenilenmesini teşvik eden mekanik özellikler gösterir (Kolken et al., 2020).

Auxetik yapılara sahip meta-biyomalzemeler, çatlakların yönünü değiştirerek ilerlemesini yavaşlatabilir veya tamamen durdurabilir. Bu özellik, bilhassa protezler ve omurga implantları gibi uzun süreli mekanik yüke maruz kalan uygulamalarda büyük avantaj sağlar. Auxetik meta-biyomalzemelerde kırılma ve çatlak ilerlemesine yönelik güncel araştırmalar, bu yapıların mekanik dayanımı açısından çarpıcı bulgular ortaya koymaktadır (Kolken et al., 2022).

Negatif Poisson oranına sahip auxetik yapılarda:

- Çatlaklar genellikle mikro yapısal düzensizliklerde, özellikle strut birleşim noktalarında başlar.
- Çatlak başlangıcı, yüzey pürüzlülüğü ve üretim kaynaklı kusurlar tarafından hızlandırılabilir.
- Auxetik geometriler, çatlak ilerlemesini yön değiştirici hâle getirerek yayılmayı geciktirebilir.
- TPMS, re-entrant veya chiral gibi yapılarda gerilim dağılımı daha homojen olup çatlak başlangıcını azaltabilir.
- Ancak, **bükülme baskın (bending-dominated)** hücre yapıları çatlak oluşumuna karşı daha zayıf kalabilir.
- Yorulma testlerinde çatlakların genellikle yüzeyden başladığı, hücresel yapı boyunca ilerlediği; iç boşlukların ise çatlak ilerlemesini yönlendirme veya durdurma etkisi gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bu veriler, özellikle kalça protezleri, omurga implantları ve doku mühendisliği iskeleleri gibi uzun süreli mekanik yüke maruz kalan uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Auxetik

yapılar, bu tür uygulamalarda çatlak oluşumu ve yayılımını engellemede etkili bir rol oynamaktadır (Mirzaali et al., 2019; Yavari et al., 2020).

Sonuç

Biyomalzemelerde gözlemlenen sünek kırılmalar, malzemenin plastik deformasyona uğramasına izin vererek enerjiyi absorbe etmesini sağlar ve çatlak ilerlemesini geciktirir. Buna karşılık, gevrek kırılmalar ise çok daha düşük enerji absorpsiyonu ile ani ve hızlı bir şekilde meydana gelir. Malzemenin mikroyapısı, iç yapısal kusurlar, çevresel koşullar ve yükleme türü gibi birçok faktör bu kırılma davranışlarını doğrudan etkilemektedir. Biyomalzemelerin kırılma davranışlarının doğru bir şekilde anlaşılması, özellikle implant, protez ve doku mühendisliği uygulamalarında hem güvenlik hem de uzun ömürlülük açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, malzeme seçimi yapılırken yalnızca biyouyumluluk değil, aynı zamanda mekanik dayanım ve kırılma karakteristikleri de mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

Kaynakça

Anderson, T. L. (2017). Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications (4th ed.). CRC Press.

Ayhan, H., "Biyomalzemeler", Bilim ve Teknik, Temmuz, 2-11, (2002).

Bai, Y., Wierzbicki, T. (2008). A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. International Journal of Plasticity, 24, 1071–1096.

Bardsley, K., Wimpenny, I., Wechsler, R., Shachaf, Y., Yang, Y., El Haj, A. J. (2016). Defining a Turnover index for the correlation of biomaterial degradation and cell based extracellular matrix synthesis using fluorescent tagging techniques. Acta Biomater., 45, 133–142.

Barsoum, I., Faleskog, J. (2007). Rupture mechanisms in combined tension and shear—Experiments. International Journal of Solids and Structures, 44, 1768–1786.

Batchelor, A., Chandrasekaran, M. (2004). Service Characteristics Of Biomedical Materials And Implants. London, UK: Imperial College Press.

Chen, G., Sato, T., Ushida, T., Ochiai, N., Tateishi, T. (2004). Tissue engineering of cartilage using a hybrid scaffold of synthetic polymer and collagen. Tissue Eng., 10, 323–330.

Dee, K. C., Puleo, D. A., & Bizios, R. (2003). An introduction to: Tissue biomaterial interactions. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

Eberl, C., Lilleodden, E. T. (2006). In situ studies of size effects and fracture mechanisms in micro/nanoscale plasticity. Philosophical Magazine, 86(33–35), 5567–5585.

Garlotta, D. (2001). A literature review of poly(lactic acid). Journal of Polymers and the Environment, 9(2), 63–84.

Geetha, M., Singh, A. K., Asokamani, R., & Gogia, A. K. (2009). Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. Progress in Materials Science, 54(3), 397–425.

Hannink, R. H. J., Kelly, P. M., & Muddle, B. C. (2000). Transformation toughening in zirconia-containing ceramics. Journal of the American Ceramic Society, 83(3), 461–487.

Hertzberg, R. W. (1996). Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials (4th ed.). John Wiley & Sons.

Kolken, H., Lietaert, K., van der Sloten, T., Pouran, B., Meynen, A., Van Loock, G., Weinans, H., Scheys, L., Zadpoor, A. A. (2020). Mechanical performance of auxetic meta-biomaterials. J. Mech. Behav. Biomed. Mater., 104, 103658.

Kolken, H. M. A., et al. (2022). Mechanisms of fatigue crack initiation and propagation in auxetic meta-biomaterials. Acta Biomaterialia.

Li, Y., Jahr, H., Zhang, X., Leeflang, M., Li, W., Pouran, B., Tichelaar, F., Weinans, H., Zhou, J., Zadpoor, A. (2019). Biodegradation-affected fatigue behavior of additively manufactured porous magnesium. Addit. Manuf., 28, 299–311.

Lu, L., Garcia, C. A., & Mikos, A. G. (1999). In vitro degradation of thin poly(DL-lactic-co-glycolic acid) films. Journal of Biomedical Materials Research, 46(2), 236–244.

Mirzaali, M. J., Herranz de la Nava, A., Gunashekar, D., Nouri-Goushki, M., Vena, P., Doubrovski, E. L., Zadpoor, A. A. (2019). Fracture behavior of bio-inspired functionally graded soft–hard composites made by multi-material 3D printing: The case of colinear cracks. Materials, 12, 2735.

Naseri, N., Hakkarainen, M., & Grijpma, D. W. (2022). Natural fiber reinforced polymer composites for biomedical applications: A review. ACS Applied Bio Materials, 5(5), 2057–2075.

Niinomi, M. (2008). Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 1(1), 30–42.

Rimna, D., Ismail, H., & Ang, B. C. (2021). Fatigue behavior of bioresorbable magnesium alloys: A review. Journal of Magnesium and Alloys, 9(1), 1–16.

Ritchie, R. O. (2011). The conflicts between strength and toughness. Nature Materials, 10(11), 817–822.

Salman, C. (1999). Metalik Malzemelerde Çentik Derinliği ve Açısının Kırılma Özelliklerine Etkisi (Master's thesis, Bursa Uludağ University, Turkey).

Sedlakova, K., & Dzugan, J. (2020). Crack propagation behavior of biomedical CoCr alloys. Procedia Structural Integrity, 28, 1047–1053.

Wang, X., Zhang, G., & Thomas, D. F. (2014). The fracture behavior of porous hydroxyapatite ceramics. Ceramics International, 40(3), 4571–4577.

Xie, J., Zhang, H., & Zhao, Y. (2021). Fracture behavior and interfacial bonding of biodegradable composite bone scaffolds. Materials Science and Engineering: C, 124, 112078.

Yavari, S. A., Croes, M., Akhavan, B., Jahanmard, F., Eigenhuis, C., Dadbakhsh, S., Vogely, H., Bilek, M., Fluit, A., Boel, C. (2020). Layer by layer coating for bio-functionalization of additively manufactured meta-biomaterials. Addit. Manuf., 32, 100991.

CHAPTER 14

AL VE MG ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA (SKK) VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAKLARI (SKNK): MİKROYAPI, MEKANİK ÖZELLİKLER VE YORULMA DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI

1. İHSAN KIRIK[1]
2. BURAK DEMİR[2]
3. EMRE KAYGUSUZ[3]
4. ANIL İMAK[4]

Giriş

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) üzerinde deneysel çalışmalarının geliştirilmesi, farklı malzemelerin endüstriyel uygulamalarına

[1] Prof. Dr., Bingöl Üniversitesi, Bingöl Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu / Makine ve Metal Teknolojileri, Orcid: 0000-0002-8361-319X
[2] Arş. Gör., Bingöl Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-5126-1890
[3] Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü/ Arı ve Arı Ürünleri Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0001-9356-2149
[4] Doç. Dr., Bingöl Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-6091-1584

ilişkin iyi bir eğilim sağlamalı ve bu nedenle endüstriyel gelişimlerini artırma büyük önem kazanmıştır (Badarinarayan, 2009:4,)(Badarinarayan, Hunt & Okamoto, 2007:51) (Badarinarayan & ark. 2009:814)(Badarinarayan, Yang, & Zhu, 2009:142)(Badkoobeh & ark. 2021:6726)(Bagheri & ark. 2022:2333) (Bilici, Yükler, & Kurtulmuş, 2011:4074) (Celikyurek, Torun, & Baksan, 2011:8530)(Changbin, Zhang, & Ge, 2011:33) (Freeney, Sharma, & Mishra, 2006:1)(Fujimoto & ark. 2008:63) (Hirasawa & ark. 2010:1455). Özellikle imalat sektöründe olmak üzere çeşitli endüstrilerdeki çok sayıda uygulama, benzer ve farklı malzemeler için SKK ve SKNK gibi proseslerin geliştirilmesine yol açmıştır. Alüminyum ve magnezyum alaşımlarının erime sıcaklıkları da dahil olmak üzere farklı özellikleri nedeniyle farklı özellikte olan bu malzemenin birleştirilmesi zordur. Devir sayısı, kaynak hızı, takım dalma derinliği ve bekleme süresi gibi uygun parametreleri seçmek, ideal SKK ve SKNK işlemlerinin gerçekleştirilmesi için oldukça önemlidir.

Kaynaklı Birleştirmelere Genel Bakış

Kaynak erime sıcaklıkları aynı ya da farklı iki veya daha fazla malzemeyi (metal, kompozit seramik veya termoplastik) ısı veya basınç yardımıyla, ilave bir malzeme kullanarak ya da kullanmadan birleştirme işlemidir. Ergitme işlemleri ile yapılan birleştirmelerde birleşme bölgesi arayüzeyleri ilave malzemelerle birlikte eritilir. MIG/MAG, TIG veya örtülü kaynak gibi çeşitli ergitme kaynak türleri bulunmaktadır ve her birinin kendine özgü avantajları ve ideal kullanım alanları olduğu gibi kullanımlarının sınırlı olduğu yerlerde vardır. Ancak ergitmenin olmadığın sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) gibi katı hal kaynak teknikleri gibi birçok kaynak tekniği olduğu gibi, son yıllarda farklı kaynak işlemlerinin sayısı artmaktadır.

Kaynak Kalitesini Etkileyen Faktörler

1. Kaynak Yöntemi: MIG, TIG, MAG vb. kaynak türlerinden hangisinin olduğu ve ekipmanları, kaynak başarısını etkiler.
2. Çevresel Koşullar: Ortamdaki nem oranı ve ortamın sıcaklığı kaynak kalitesini etkiler.
3. Malzeme Özellikleri: Kullanılacak malzemenin kimyasal bileşimi ya da fiziksel özellikleri, kaynak kalitesini etkiler.
4. Hazırlık Aşaması: Uygulanacak teknikte yapılacak olan ön işlemlere dikkat edilmelidir. (Ön ısıtma, soğutma vs.)
5. Kaynak Parametreleri: Kaynağa uygun hız, direnç, akım vs. olmalıdır.
6. Operatör Yetkinliği: Kaynak yapacak kişinin yeterli donanıma, tecrübeye ve eğitime sahip olması gerekmektedir.
7. Isıl İşlem ve Soğutma Oranı: Kaynak öncesi ve sonrasında gerekli ısıtma ve soğutma işlemleri yapılmalıdır.
8. Kontrol: Uygun olan tahribatlı veya tahribatsız muayene ile kontrol edilmelidir.

Ark Kaynağı

Yaygın kullanım alanı olan, ekonomik ve pratik olan bir kaynak tekniğidir. Bu teknikte ısı üretimi için bir üreteç yardımı ile sağlanan ark kullanılır. Bu ark esas malzemeleri ve dolgu metalini eriterek bir kaynak havuzu oluşturur ve daha sonra katılaşan dolgu metali ve esas malzeme arasında birleşme olur. Ark kaynağı birçok avantaj sağladığı gibi bazı durumlarda dezavantajları da vardır.

Bunları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür (Kilic & ark., 2013:544).

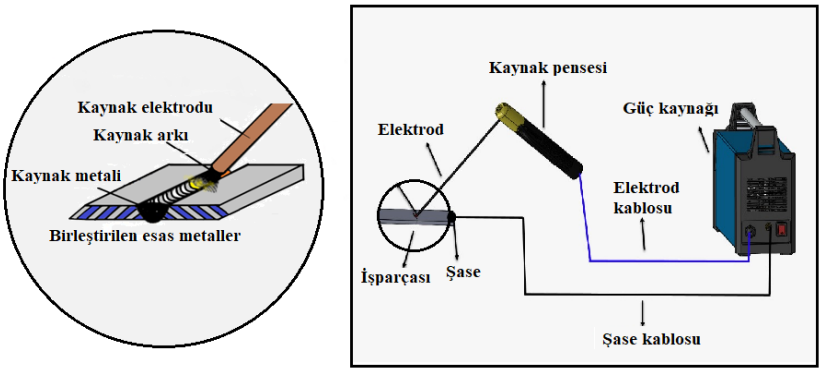
Avantajları:

1. Ark kaynağı örtülü elektrodla yapılıyorsa açık ve kapalı alan sınırı olmayıp her durumda uygulanabilir.
2. Çok farklı konstrüksiyonda ve pozisyonda kaynak yapmaya olanak sağlar.
3. Diğer kaynak yöntemlerine nazaran sınırlı alanlarda ve dar olan bölgelere ulaşmada kolaylık sağlar.
4. Kaynak ekipmanlarının temini ve taşınması kolaydır.
5. Çok uzak mesafedeki bağlantılarda kaynak yapılabilir.
6. Elektrod örtüsü yardımı ile birçok malzeme kimyasal bileşimine yakın birleştirilebilir ve böylelikle esas malzemelerin özellikleri korunmuş olur.

Dezavantajları:

1. Elektrodun kısalığı ve sürekli olmaması bir dezavantajdır. Çünkü sürekli elektrod değişimi olmalıdır.
2. Ayrıca kaynak sonrası cüruf temizleme ve kaynak kontrollüde zahmetlidir.
3. Atık üretimi fazla olması, yüksek beceri gerektirmesi ve bazı ince metallerde kullanımları sınırlıdır.

Şekil 1. Elektrik ark kaynağının şematik resmi



Gaz Kaynağı

Gaz kaynağı asetilen gazının yakılması ile oluşan yüksek sıcaklıktaki bir alev yardımı ile metalin ve dolgu malzemesinin eritilmesi yardımıyla yapılır. Eriyen bölgedeki metal malzemeler soğuyup katılaştıkça birleşim oluşturmalarını sağlar.

Yaygın olarak kullanılan gaz kaynak türü asetilenin oksijende yakıldığı Oksijen-yakıt kaynaklamadır (Mukuna, Akinlabi, & Makhatha, 2018). Her kategori altında birçok çeşitli alt tipler mevcuttur bunlar: SMAW, TIG, MIG, SAW, Oksi-propan Kaynağı ve Oksi-hidrojen Kaynağı olarak sıralanabilir. Gaz kaynak tekniğinin bize sunduğu avantajları ve dezavantajlara şu şekilde sıralaya biliriz.

Avantajları:

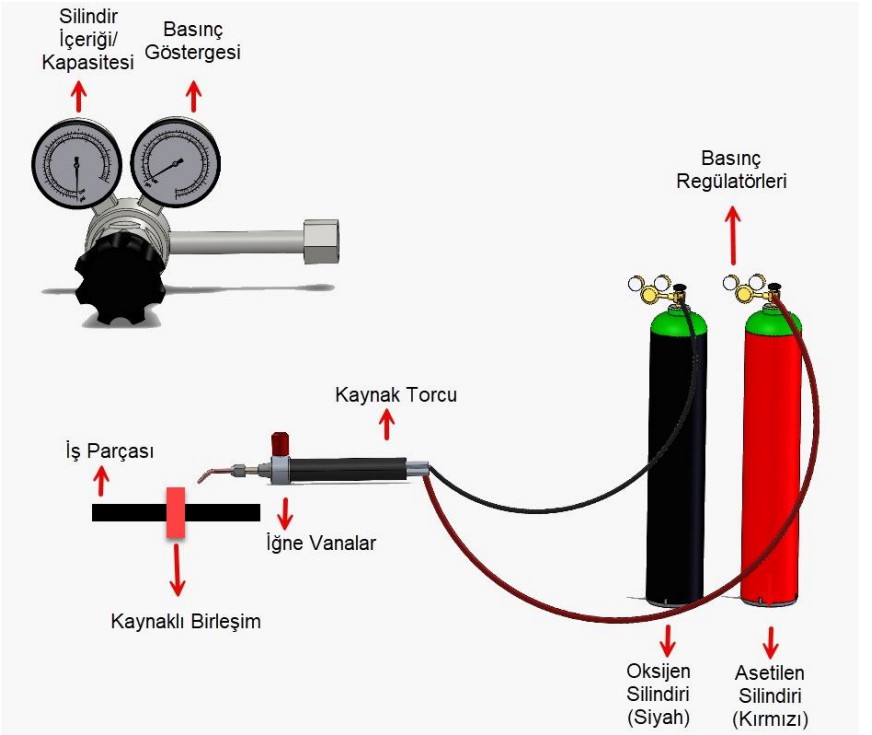
1. Gaz kaynağında elektriğe ihtiyaç olmadığından, elektriğin olmadığı yerlerde kullanım olanağı sağlar.
2. Çok yönlü kaynak tekniklerinden biridir ve farklı metal türünü birleştirmek için kullanılabilir.
3. Demirli ve demir dışı metalleri birleştirmek için kullanılabilir ve ekipman maliyetleri ucuzdur.

4. Çok uzmanlaşmış iş gücü gerektirmez ve kaynak Ekipmanların taşınması diğer kaynak usullerine göre daha kolaydır.

Dezavantajları:

1. Daha kalın iş parçaları verimli bir şekilde birleştirilemez. Ayrıca, gaz kaynağı düşük yüzey kalitesinden ötürü kaynaklarının genellikle kaynak sonrası son işlem gerektirir.
2. Yüksek dayanımlı çelik için kullanılması zordur ve ısıtılmış bölgenin doğası gereği ana metallerin mekanik özelliklerini etkileyebilmesidir.
3. Diğer kaynak yöntemlerine göre ısıtma ve metal birleştirme hızı yavaştır ve diğer ark birleştirme sıcaklıklarına ulaşılması güçtür.
4. Özel bir kaynak akısını koruma düzeneği veya gazı yoktur. Bu nedenle çok ciddi kaynak kusurları ile karşılaşmak mümkündür.

Şekil 2. Gaz Kaynağı



Direnç kaynağı

Direnç kaynağı, kaynak esnasında akım kullanılması ve birleşme bölgesinde gereken ısının yerel olarak oluşan direnç ve kaynaklama yönteminin basınçlandırılması anlamına gelir. Böylelikle, plastik hale gelen bir metal bağının oluşturulduğu bir birleştirme yöntemdir. Direnç kaynağını, Nokta kaynağı, dikiş kaynağı, projeksiyon kaynağı ve uçtan uca kaynak olmak üzere dört ana direnç kaynağı yöntemi vardır. Nokta direnç kaynağı özellikle beyaz eşya sektörü ve otomobil parçalarının üretiminde başlıca imalat yöntemleri içinde yer alır. Ayrıca, üretim hızı yüksek bir kaynak eldesi sağladığından, seri üretim yapılan işletmelerde tercih edilmektedir. Direnç kaynağının şematik resmi şekil 3'te verilmiştir.

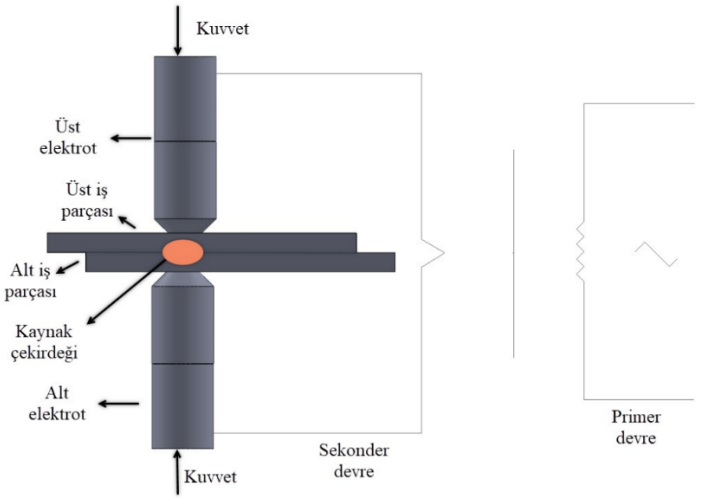
Avantajları:

1. Çok farklı metal birleştirebilir, ancak çeliklerin birleştirilmesinde daha iyi sonuçlar verir.
2. Çok hızlı kaynak elde etmek mümkündür.
3. Elektrodların eksenel kilitlenme özellikleri, otomasyon ve imalat için iyi sonuçlar sağlar.
4. Herhangi bir dolgu malzemesi gerektirmez ve çok İnce saclar direnç nokta kaynağı ve direnç dikiş kaynağı ile mükemmel şekilde birleştirilebilir.

Dezavantajları:

1. İlk yatırım ve ekipman maliyetleri diğer ark kaynağı ekipmanından çok daha fazladır.
2. Kaynak birleştirme bölgelerinin görsel muayenesi imkansızdır.
3. Çok yüksek akımlar gerektirdiklerinden, şebekeden yüksek yüksek güç hattı talebine neden olur.
4. Kaynak ekipmanları taşına bilir olmadığı gibi kullanılan elektrotlarda aşınır.
5. Nokta kaynağı gibi işlemler, kaynak kenarındaki keskin geometrik özellikler nedeniyle mekanik özelliklerin düşmesine neden olur.

Şekil 3. Nokta direnç kaynağının şematik resmi



Yüksek Enerji Yoğunluklu Kaynak (Lazer Kaynağı)

Birleştirme bölgelerinde çok küçük alanların kaynaklanmasında meydana gelen sınırlamaları ortadan kaldırmak için gerekli enerjinin o bölgeye odaklanması gerekir (Jeyaprakash ve ark. 2023: 560) Lazer kaynağı, işleminde birleştirilen parçaların ısı girdisi çok düşük olduğu için, metal bozulmaları ve artık gerilimler ihmal edilebilir. Lazer ışın kaynağı ve elektron ışın kaynağı, aşırı enerji yoğunluklarıyla bilinen iki ana prosedürdür (Phillips, 2016). Phillips ‘’Welding engineering: an introduction ‘’ isimli kitabında, Lazer ışın kaynağı ve elektron ışın kaynağı işlemleri hakkında detaylı bilgi sunmaktadır (Phillips, 2016). Lazer kaynağı mevcut ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirmeleri güç ve problemli olan hafif metallerin birleştirilmesinde ortaya çıkan problemleri azalttığı ya da asgari düzeye indirgediği için son yıllarda geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Kökey & ark. 2016: 68)

Katı hal kaynağı

Katı hal kaynağı, herhangi bir dolgu metali kullanılmadan, temel malzemelerin erime noktasının altındaki sıcaklıklarda birleştirmenin yapıldığı bir yöntem olarak bilinir. Sürtünme kaynağı (SK), (Sarsılmaz, Kırık, & Ozdemir, 2018: 49) (Kirik, & Ozdemir, 2012a: 683) (Kirik, & Ozdemir, 2012b: 61) (Kirik, & Ozdemir, 2012c: 24), sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), (Lambiase, Paoletti, & Di Ilio, 2017: 3005) (Lienert, & ark., 2003: 154) (Mitelea, & Craciunescu, 2011: 19) (Ozdemir, 2005) (Ozdemir, & Orhan, 2005: 63) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) (Lin, & ark., 2012: 350) gibi birçok katı hal birleştirme işlemi vardır. Bu yöntemlerde birleşme bölgesi erime sıcaklıklarına ulaşmadığından hata ve kusur sayısı oldukça azdır (Mukuna & ark, 2018). Bu, iki sürecin mevcut durumu hakkında bir fikir verebilir; SKK ve SKNK Al/Mg alanında daha fazla araştırma yapılarak tekniklerin optimizasyonuna yol açabilir (Luo, & Yang, 2013: 1949) (Mengran, & ark., 2020: 1071) (Mironov, & ark., 2015 :301) (Mishra, & Mahoney, 2005: 51). Ayrıca, iki tekniğin kullanımına ilişkin gelecekteki kapsam ele alınmaktadır. Üretilen kaynakların kalitesi, nokta kaynakları ve kaynakların çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çeşitli özelliklerinin açıklamaları sunulmakta ve özetlenmektedir.

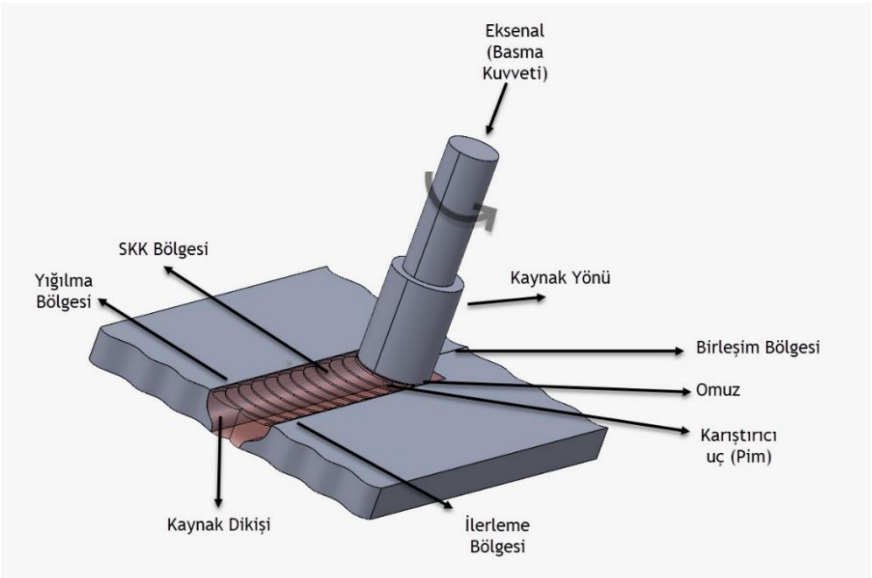
Sürtünme Karıştırma Kaynağı

SKK, Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından 1991 yılında demirli, demir dışı metallerin ve plastiklerin uç uca ve üst üste birleştirilmesi için geliştirilmiş ve patenti alınan katı hal kaynak tekniklerinden biridir (Karlsson, Berqvist, & Larsson, 2002: 11) SKK, Al ve Mg gibi hafif metalleri birleştirmek için kullanılan en popüler kaynak tekniklerinden biridir (Khan, 2023: 4902). SKK, bir katı hal işlemidir, yani birleştirilecek temel malzemeler birleştirme işlemi sırasında erimeden, dönen takım, birleştirme malzemelerine

ve kaynak koşullarına bağlı olarak değişen ve çevreleyen malzemede değişken deformasyona neden olarak gerçekleşir (Lienert & ark, 2003). Al ve alaşımlarının ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmelerinde SKK 'nın tercih edilmesinin avantajlı olduğu yapılan araştırmalarla tespit edilmiştir. Ergitme kaynaklarında meydana gelen gözeneklilik, katılaşma çatlakları ve sıvılaşma gibi olumsuzluklar SKK ile ortadan kalkmış olur (Pathak, & ark., 2013: 131) (Sarsılmaz, Ozdemir, & Kırık, 2012: 259) (Shankar, & Chattopadhyaya, 2020: 664) (Shankar, & ark., 2018: 24378) (Şık, 2011) (Singh, Singh, & Singh, 2018: 293) (Singh, & Dubey, 2023: 1217) (Su, & ark., 2007: 585).

Şekil 4, Sürtünme Karıştırma Kaynak yönteminin şematik bir resmini göstermektedir. Genellikle alın kaynağında kullanılan sürtünme karıştırma kaynağı titanyum, çelik ve nikel malzemelerin birleşiminde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde malzeme sıvılaşmadığından ITAB küçüktür. Bu yüzden bu yöntem malzemeye metalürjik açıdan zarar vermemektedir. SKK işlemi, geleneksel kaynak işlemlerine kıyasla birçok avantaj sağlar (Feng, & ark., 2004: 101). Ayrıca SKK, lazer kaynağı için gereken enerjinin yalnızca %2,5'inin kullanılması ve hafif uçak, otomotiv ve gemi üretiminde yakıt tüketiminin azaltılması da dahil olmak üzere çok sayıda enerji avantajı sağlar (Mishra & Mahoney, 2007). SKK kaynağının avantajları yanında birçok çevresel yararları da vardır (Mroczka, & ark. 2023: 3953) (Suhuddin, & ark.,2009: 5406) (Bolshakov, 1972: 60).

Şekil 4. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin şematik resmi



SKK avantajları

1. Katı hal kaynak işlemi olduğundan ve sıvılaşma olmadığından oksitlenme riskinin olmayacağı için herhangi bir koruyucu gaz gerekmez.
2. Bozulmaların fazla olmaması ve kaynak yüzey kalitesinin fazla bozulmamasından dolayı, yüzey temizliği minimum düzeydedir.
3. SKK kaynağında boyutsal kararlılık ve tekrarlanabilirlik gibi özelliklerin iyi olması işleme atıklarını ortadan kaldırır.
4. Kaynak bölgesinde kimyasal yapıdaki alaşım elementlerinde kayıpların neredeyse olmaması ve yüzey temizleme için gereken çözücülerin kullanımını da ortadan kaldırır.

5. SKK kaynak bağlantılarının mekanik özellikleri açısından iyidir ve sarf malzemeleri kullanımı açısından tasarrufludur, ilave tel veya diğer koruyucu gazların kullanımını ortadan kaldırır.
6. SKK işleminde, kaynak sonrası malzeme ince yeniden kristalleştirilmiş mikro yapıya sahiptir ve malzemede gözeneklilik, katılaşma çatlakları ve sıvılaşma yoktur.

SKK dezavantajları

1. Geometrik cisimler üzerinde sınırlılıkları vardır.
2. Kaynak bitiminde birleştirilen malzemeler eksenel olarak kısaldıkları için malzeme israfına neden olmaktadır.
3. Büyük parçalarda ısıtma her yere eşit dağılmadığından kaynak yapmak zordur.
4. Sürtünme kaynağı ve makine donanımlarının maliyeti yüksektir.
5. Sürtünme kaynağı iş gücü maliyetini uzmanlık gerektirdiğinden arttırır. Bu konuda eğitimli ve deneyimli olunması gerekir.

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK)

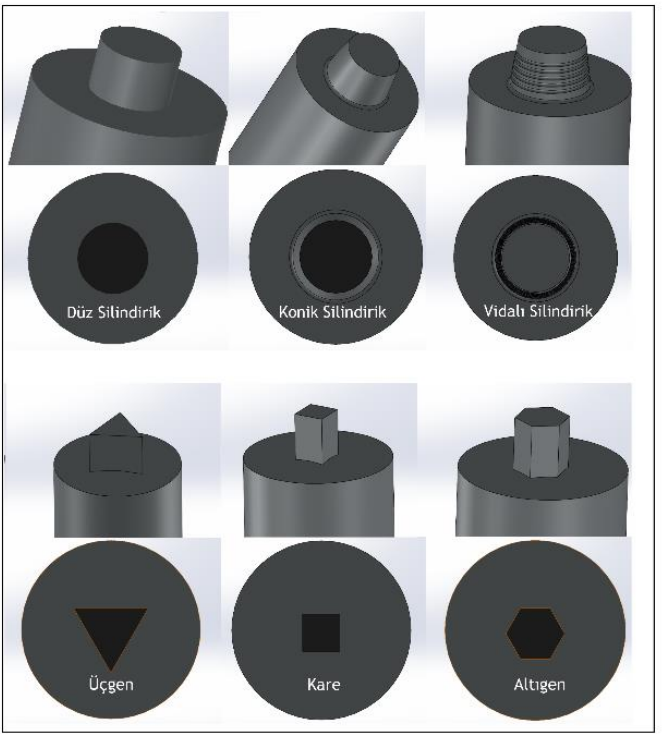
SKNK ile birleştirme işlemi SKK'ye dayalı bir işlemdir (Mubiayi, Akinlabi, & Makhatha, 2018: 1). SKNK SKK'ya benzer bir işlem kullanmasına rağmen, SKNK, kaynak işleminde kullanılan ucun çevrilmesi ve yatay hareketi olmadan sabit bir konumda üst üste bindirilmiş metal levhaları birleştirmek için kullanılır. SKNK' nın diğer birleştirme tekniklerinden en büyük farkı, temel metali eritmeden bir birleştirme yapılabilmesidir. Bu nedenle, SKNK kullanılarak kaynak yapıldıktan sonra deformasyon, geleneksel ark

kaynağı kullanılarak yapılan deformasyondan önemli ölçüde daha azdır (Murugan, Haq, & Sathiya, 2020: 483). SKNK işlemi kullanılarak birleştirilen AA5754 ve AA7075 serisi alüminyum alaşımlarına ait makro resim Şekil 6'da gösterilmiştir. SKNK işleminde, Şekil 5.'te verilen karıştırma pimine sahip tüketilemeyen dönen bir uç, alüminyum levhalara daldırılır. Dönen uç daha sonra, sürtünme ısısı üretmek için bekleme süresi olarak bilinen uygun bir süre boyunca tutulur. Birleşme, sürtünmeyle elde edilen ısı yardımı ile pim etrafında plastik akışı sağlanarak elde edilir. SKNK sonrası dönen takım çıkarıldıktan sonra birleştirilen levhalarda bir delik kalır. Kalan bu deliğe daha önce bu konuda çalışma yapan araştırmacılar 'anahtar deliği' ismini vermiştir (Zhang, & Shirzadi, 2018: 394) (Bilici, & Yükler, 2012: 145).

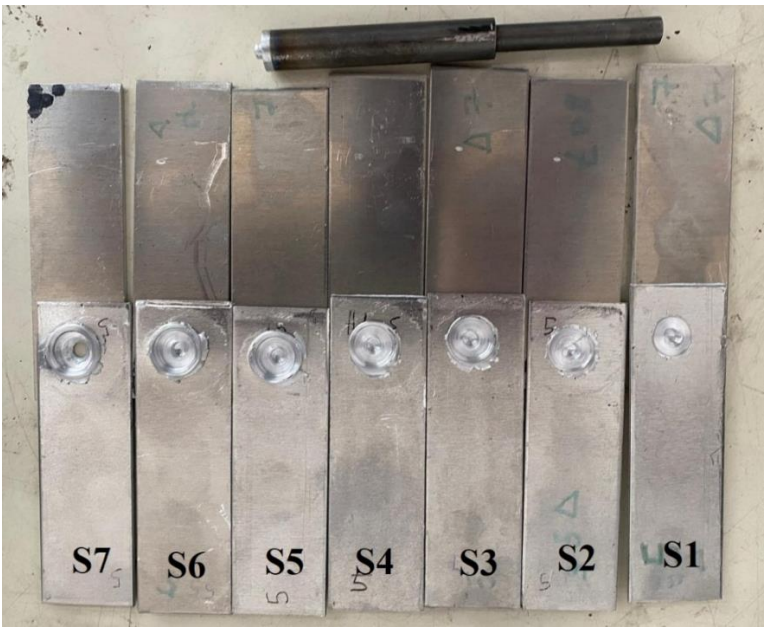
Birleştirilen malzemeler, işlem parametreleri ve kullanılan takımın geometrisi, SKNK kaynağının yapılması için gerekli üç unsurdur (Su, & ark., 2006:163). Daha önce yapılan birçok çalışma, bu parametrelerin etkilerini görmek için yapılmıştır. Önceki çalışmalarda takım geometrisini sabit tutup işlem parametrelerinin etkisini birçok yazar çalışmıştır (Lin & ark, 2012) (Mitlin, & ark., 2026: 79) (Moiduddin, & ark., 2021: 6924). Daha önce yapılan birçok çalışmada takım geometrisinin kaynak bölgesindeki malzeme akışını üzerine büyük etkisinin olduğunu ve sonuç olarak bu geometrinin kaynak birleşme mukavemetini de etkilediğini ifade etmişler (Badarinarayan, 2009; Hirasawa & ark, 2010; Mishra & Mahoney, 2007; Sarsılmaz, Ozdemir, & Kırık, 2012; Su & ark, 2007; Yang & ark, 2010; Yin, Ikuta, & North, 2010; Yin, Sun, & ark, 2010; Yuana & ark, 2011). SKNK kaynağının mikro yapı incelemelerinde tanımlan farklı bölgeler mevcuttur. Bu bölgeleri ana malzeme (AM), ısıdan etkilenen bölge (ITAB), termomekanik olarak etkilenen bölge (TMEB) ve karıştırma bölgesi (KB) olarak isimlendirirler. SKNK farklı konfigürasyonlarda ve farklı şekilli malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan çok farklı takım profilli

uçlar kullanılabilir (Yuana, & ark., 2011: 972). SKNK kaynağında kullanılan uç profilleri Şekil 5.'te de verilmiştir.

Şekil 5. SKNK da kullanılan uc profilleri



Şekil 6. SKNK ile birleştirilen farklı 7075 ve 5754 alüminyum alaşımları



Al ve Mg alaşımlarının SKK ve SKNK kaynakları

Hızlı gelişen teknolojik araştırmalarla, benzer ve farklı temel malzemeler kullanarak SKK ve SKNK üzerine birçok araştırma çalışması yürüttüler. Bu bölüm SKK (Lin & ark, 2012) ve SKNK kullanılarak Al ve Mg alaşımlarının birleştirilmesi üzerine bugüne kadar yürütülen araştırmaların mevcut durumunu işlemiştir.

Al ve Mg alaşımlarının SKK' larının mevcut durumunu araştırma türü ve yıllık sayıları araştırma dergilerinden, farklı uluslararası konferanslardan ve Web of Science 'tan çıkarıldı.

Tablo 1. Son on yılda AL ve Mg alaşımlarının SKK ile ilgili yapılan yayın sayıları

SKK Kitap	SKK Kitap bölümü	SKK Araştırma makalesi	SKK Rewiev makale	Yıl ve araştırma türü
1	3	279	21	**2025**
8	2	434	29	**2024**
8	4	421	31	**2023**
9	5	403	23	**2022**
2	14	397	23	**2021**
1	6	337	18	**2020**
1	21	307	5	**2019**
1	8	293	12	**2018**
1	10	228	10	**2017**
1	6	214	3	**2016**
0	5	227	0	**2015**

Tablo 2. Son on yılda yapılan AL ve Mg alaşımlarının SKNK ile ilgili yayın sayıları

Yıl ve araştırma türü	SKNK-Rewiev makale	SKNK Araştırma makalesi	SKNK Kitap bölümü	SKNK Kitap
2025	2	28	0	0
2024	6	43	1	2
2023	2	32	2	0
2022	3	37	3	4
2021	3	38	4	1
2020	2	43	2	0
2019	3	35	1	0
2018	2	29	2	0
2017	0	30	2	0
2016	0	22	1	0
2015	1	23	0	1

Tablo 1., son on yılda, Al ve Mg alaşımlarının SKK ile ilgili yapılan yayın sayılarını göstermektedir. Tablo 2. ise son on yılda yapılan Al ve Mg alaşımlarının SKNK ile ilgili yayın sayılarını göstermektedir.

Tablo 1 ve 2'den Al ve Mg alaşımlarının arasındaki SKK konularında çok sayıda araştırma olduğu görülmektedir. Ancak, bu alaşımların SKNK işleminin hala yeterince araştırılmamış bir alan olduğu açıkça görülebilir ve işlemi tam olarak anlamak için daha fazla bilimsel çalışma yapılması gerekir. SKNK kaynağının endüstrideki kullanımı ve optimize edilmesi oldukça önemlidir. Ayrıca, sürtünme karıştırma nokta kaynağı, direnç kaynağına alternatif bir birleştirme işlemi olması ve çok farklı malzemelere

uygulanabilmesi onu önemli kılmaktadır. 2015 yılından bu yana yayınlanan araştırma sayısında bir iyileşme olduğu görülebilir, bu da araştırmacıların Al ve Mg alaşımlarını SKNK üzerinde daha fazla çalışma yürütmeye ilgi duyduğunu göstermektedir.

Al ve Mg alaşımlarının mekanik özellikleri ve yorulma davranışları

SKK ve SKNK kaynaklı Alüminyum ve magnezyum alaşımlı sac bağlantılarının yorulma davranışı ve çekme dayanımları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. (Arıcı ve Mert, 2008: 2003)(Sunil, & ark., 2015: 330) (Thomas, & ark., 1991) (Tozaki, Uematsu, & Tokaji, 2007: 2230) (Yang, & ark., 2010: 4389). Neredeyse bütün araştırmacılar kırılmanın (kopmanın) sac bağlantılarının karıştırma bölgesinde meydana geldiğini ve tüm çatlakların üst ve alt sac arasındaki karıştırma bölgesinin dış kenarında başladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, kaynak işlemi koşulları altında birleştirilen Al ve Mg alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynaklı yorulma davranışları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Yin, Ikuta, & North, 2010: 4764). Farklı uc profillerinin etkisi, dalma derinliği, takım devir sayısı ve tutulma sürelerindeki değişikliklerinin mekanik davranışlara olan etkisi incelenmiştir. Al ve Mg alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynaklarının yorulma davranışı işlem koşulları tarafından belirlendiğini göstermektedir (Ugender, 2018: 205) (Xie & ark., 2022: 23) Yin, & ark., 2010: 1018).

Sonuç

Bu araştırmada, alüminyum/magnezyum ve bakır gibi metallerin SKNK ve SKK kaynaklarının önemine vurgu yapılmıştır. SKK ve SKNK kaynaklarının avantajları ve dezavantajları diğer teknikler ile karşılaştırılmış ve yapılan çalışmaların geçmişteki durumu ve mevcuttun nasıl olacağı açıklanmıştır. Özellikle Al/Mg/Cu gibi farklı metallerin SKNK geliştirilmesi, uygulama alanlarının genişletilmesi ve direnç kaynaklarına olan ihtiyacın

azaltılması için alternatif yöntem olarak kalacaktır. Kullanılan takımın geometrisi kırılma yapısı ve sürtünme karıştırma nokta kaynaklarının dayanımı belirleyen önemli bir parametredir.

Al ve Mg alaşımları SKK ve SKNK kaynağı birçok araştırmacı tarafından başarıyla kullanılmıştır. SKK ve SKNK kaynağının sayısız avantajları olması bu işlemlerin kullanılmasında olumlu bir etki yaratmıştır. Literatürde yapılan incelemede, bu iki işlem ile Al alaşımları ve Mg alaşımlarının da içinde bulunduğu farklı malzemeler başarıyla birleştirilmiştir. Ayrıca iyileştirilmiş çekme mukavemeti, iyi yorulma özellikleri ve korozyon direncine sahip sağlam kaynaklar üretmişlerdir.

Kaynakça

Arici, A., & Mert, Ş. (2008). Friction stir spot welding of polypropylene. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 27(18), 2001–2004.

Badarinarayan, H. (2009). Fundamentals of friction stir spot welding. (Doctoral dissertation, Missouri University of Science and Technology).

Badarinarayan, H., Hunt, F., & Okamoto, K. (2007). Friction Stir Spot Welding. In R. S. Mishra & M. W. Mahoney (Eds.),

Friction stir welding and processing pp. 235-250. ASM International.

Badarinarayan, H., Shi, Y., Li, X., & Okamoto, K. (2009). Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(11), 814–823.

Badarinarayan, H., Yang, Q., & Zhu, S. (2009). Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(2), 142–148.

Badkoobeh, F., Mostaan, H., Rafiei, M., Bakhsheshi-Rad, H. R., & Berto, F. (2021). Damage mechanics analysis of friction stir welded joints of dissimilar aluminum alloys. Materials, 14(21), 6726. https://doi.org/10.3390/ma14216726

Bagheri, B., Alizadeh, M., Mirsalehi, S. E., Shamsipur, A., & Abdollahzadeh, A. (2022). The effect of rotational speed and

dwell time on Al/SiC/Cu composite made by friction stir spot welding. Welding in the World, 66(11), 2333–2350.

Bilici, M. K., Yükler, A. İ., & Kurtulmuş, M. (2011). The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethylene sheets. Materials & Design, 32(7), 4074–4079.

Bilici, M. K., & Yükler, A. İ. (2012). Influence of tool geometry and process parameters on macro-structure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets. Materials & Design, 33, 145–152.

Bolshakov, M. V. (1972). The vacuum friction welding of high-melting and high-temperature alloys. Automat. Weld. (Avtom. Svarka), 25(6), 60–62.

Celikyurek, I., Torun, O., & Baksan, B. (2011). Microstructure and strength of friction welded Fe-28Al and 316L stainless steel. Materials Science and Engineering: A, 528(30), 8530–8536. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.021

Changbin, S., Zhang, J., & Ge, J. (2011). Microstructures and electrochemical behaviors of the friction stir welding dissimilar weld. Journal of Environmental Sciences, 23(1), 32–35. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)61072-3

Feng, Z., Diamond, S., Santella, M. L., Pan, T. Y., & Li, N. (2004). High strength weight reduction materials-friction stir welding and processing of advanced materials. Oak Ridge National Laboratory Report DE-AC05-00OR22725, 101-108.

Freeney, T. A., Sharma, S. R., & Mishra, R. S. (2006). Effect of welding parameters on properties of 5052 Al friction stir spot welds. SAE Technical Paper, 01-0969. https://doi.org/10.4271/2006-01-0969

Fujimoto, M., Koga, S., Abe, N., Sato, S. Y., & Kokawa, H. (2008). Analysis of plastic flow of the Al alloy joint produced by friction stir spot welding. Journal of the Japan Welding Society, 26(1), 63-67.

Hirasawa, S., Badarinarayan, H., Okamoto, K., Tomimura, T., & Kawanami, T. (2010). Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. Journal of Materials Processing Technology, 210(11), 1455-1463.

Jeyaprakash, N., Yang, C. H., Susila, P., & Karuppasamy, S. S. (2023). Laser cladding of NiCrMoFeNbTa particles on Inconel 625 alloy: Microstructure and corrosion resistance. Transactions of the Indian Institute of Metals, 76(2), 599–612.

Karlsson, L., Berqvist, E. L., & Larsson, H. (2002). Application of friction stir welding to dissimilar welding. Welding in the World, 46(1), 10–14. https://doi.org/10.1007/BF03266360

Khan, Y. S., Abidi, M. H., Malik, W., Lone, N. F., Aboudaif, M. K., & Mohammed, M. K. (2023). Tribological performance of friction stir welded AA6061-T6 aluminum alloy joints: A comprehensive review. Materials, 16(14), 4902. https://doi.org/10.3390/ma16144902

Kilic, M., Kirik, I., Celik, F., & Orhan, N. (2013). The effect of plasma arc process parameters on the properties of dissimilar AISI 1040/AISI 304 steel plate welds. Materials Testing, 54(7-8), 543-549.

Kirik, I., & Ozdemir, N. (2012a). Microstructure and mechanical behavior of friction welded AISI 2205/AISI 1040 steel joints. Materials Testing, 54(10), 683–687. https://doi.org/10.3139/120.110379

Kirik, I., & Ozdemir, N. (2012b). The design of friction welding machine used in automotive industry and weldability of AISI1040/AISI304L couples by using frictional energy. Technological Applications of the Sciences, 7(3), 60–74. https://doi.org/10.12739/2A0077

Kirik, I., & Ozdemir, N. (2012c). Design and manufacture of PLC controlled continuous drive friction welding machine. In International Conference on Welding Technologies and Exhibition, pp. 23–25, Ankara, Turkey.

Kökey, C., Sezgin, S., Çavuşoğlu, N., Gençalp İrizalp, S., & Saklakoğlu, İ. E. (2016). İnce Paslanmaz Çelik Sacların Fiber Lazer ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi. Mühendis ve Makine Dergisi, 57(674), 68-75.

Lambiase, F., Paoletti, A., & Di Ilio, A. (2017). Effect of tool geometry on mechanical behavior of friction stir spot welds of polycarbonate sheets. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88, 3005–3016.

Lienert, T. J., Stellwag Jr, W. L., Grimmett, B. B., & Warke, R. W. (2003). Friction stir welding studies on mild steel. American Welding Society and The Welding Research Council.

Lin, B. Y., Liu, J. J., & Lu, L. D. (2011). Mechanical Properties and Fracture Behavior of Friction Stir Spot Welded AZ61 Magnesium Alloys. Advanced Materials Research, 154-155, 498-507.

Lin, Y. C., Liu, J. J., Lin, B. Y., Lin, C. M., & Tsai, H. L. (2012). Effects of process parameters on strength of Mg alloy AZ61 friction stir spot welds. Materials & Design, 35, 350–357.

Luo, T.-J., Shi, B.-L., Duan, Q.-Q., Fu, J.-W., & Yang, Y.-S. (2013). Fatigue behavior of friction stir spot welded AZ31 Mg alloy sheet joints. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 23(7), 1949-1956.

Mengran, Z., Yufeng, S., Yoshiaki, M., Kohsaku, U., & Hidetoshi, F. (2020). The role of tool geometry and rotation speed on the microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded AZ31 Mg alloy. Journal of Magnesium and Alloys, 8(4), 1071–1083. https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.05.015

Mironov, S., Onuma, T., Sato, Y. S., & Kokawa, H. (2015). Grain boundary structure and texture evolution during friction stir welding of aluminum alloys. Acta Materialia, 100, 301–312. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.08.066

Mishra, R. S., & Mahoney, M. W. (2005). Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering R 50 (2005) 1–78.

Mitelea, I., & Craciunescu, C. M. (2011). Investigations on joining surface hardened steels by friction welding. Materials Testing, 53(1-2), 19–25. https://doi.org/10.3139/120.110196

Mitlin, D., Radmilovic, V., Pan, T., Chean, J., Feng, Z., & Santella, M. L. (2026). Structure properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welding) 6111 aluminum. Materials Science and Engineering: A, 441(1-2), 79-96.

Moiduddin, K., Siddiquee, A. N., Abidi, M. H., Mian, S. H., & Mohammed, M. K. (2021). Experimental investigation of friction stir spot welding of different aluminum alloys. Materials, 14(22), 6924. https://doi.org/10.3390/ma14226924

Mroczka, K., Dymek, S., Aleksandrowska, W., & Hamilton, C. (2023). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar joints of AA5083 and AA6061 aluminum alloys. Materials, 16(11), 3953. https://doi.org/10.3390/ma16113953

Mubiayi, M. P. Akinlabi, E. T. & Makhatha, M. E. (2018). Current Trends in Friction Stir Welding (FSW) and Friction Stir Spot Welding (FSSW). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92750-3

Murugan, S., Haq, N., & Sathiya, P. (2020). Effect of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the friction welded dissimilar joints of AA6063 alloy and faying surfacetapered AISI304L alloy. Welding in the World, 64(3), 483–499. https://doi.org/10.1007/s40194-020-00846-x

Ozdemir, N. (2005). Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function of rotational speed. Materials Letters, 59(29-30), 2504–2509. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.03.034

Ozdemir, N., & Orhan, N. (2005). Microstructure and mechanical properties of friction welded joints of a fine-grained hypereutectoid steel with 4% Al. Journal of Materials

Processing Technology, 166(1), 63–70. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.095

Pathak, N., Bandyopadhyay, K., Sarangi, M., & Panda, S. K. (2013). Microstructure and mechanical performance of friction stir spot-welded aluminum-5754 sheets. Journal of Materials Engineering and Performance, 22(1), 131–144.

Phillips, D. H. (2016). Welding engineering: An introduction. Wiley.

Sarsılmaz, F., Kırık, I., & Ozdemir, N. (2018). Microstructure and mechanical properties of friction welded AISI 1040/AISI 304L steels before and after electrochemical corrosion. Materials Testing, 60(1), 49–54. https://doi.org/10.3139/120.111115

Sarsılmaz, F., Ozdemir, N., & Kırık, I. (2012). Evaluation of microstructure and fatigue properties of dissimilar AA7075/AA6061 joints produced by friction stir welding. Kovove Materialy, 50(4), 259–268.

Shankar, S., & Chattopadhyaya, S. (2020). Friction stir welding of commercially pure copper and 1050 aluminum alloys.

Materials Today: Proceedings, 25(2), 664–667. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.719

Shankar, S., Saw, K., Chattopadhyaya, S., & Hloch, S. (2018). Investigation on different type of defects, temperature variation and mechanical properties of friction stir welded lap joint of aluminum alloy 6101-T6. Materials Today: Proceedings, 5(11), 24378–24386. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.233

Şık, A. (2011). Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen magnezyum levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Singh, K., Singh, G., & Singh, H. (2018). Evaluation of microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6082-T6 aluminum alloy. Journal of Magnesium and Alloys, 6(3), 292–298. https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.05.004

Singh, U. K., & Dubey, A. K. (2023). Tribological behavior of friction stir processed aluminum matrix composites: A review. Materials and Corrosion, 74(2), 1217–1232. https://doi.org/10.1002/maco.202313798

Su, P., Gerlich, A., North, T. H., & Bendzsak, G. J. (2007). Intermixing in dissimilar friction stir spot welds. Metallurgical and Materials Transactions A, 38(3), 584-595.

Su, P., Gerlich, A., North, T. H., & Bendzsak, G. J. (2006). Energy utilisation and generation during friction stir spot welding. Science and Technology of Welding and Joining, 11(2), 163–169.

Suhuddin, U. F. H. R., Mironov, S., Sato, Y. S., Kokawa, H., & Lee, C. (2009). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar AA2024-T3 and AA6061-T6 aluminum alloys. Acta Materialia, 57(18), 5406–5418. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.041

Sunil, B. R., Reddy, G. P. K., Mounika, A. S. N., Sree, P. N., Pinneswari, P. R., Ambica, I., Babu, R. A., & Amarnadh, P.

(2015). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ31 magnesium alloy. Journal of Magnesium and Alloys, 3(4), 330–334. https://doi.org/10.1016/j.jma.2015.10.002

Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Temple-Smith, P., & Dawes, C. J. (1991). Friction stir butt welding. (International Patent No. PCT/GB92/02203, GB patent application No. 9125978.8).

Tozaki, Y., Uematsu, Y., & Tokaji, K. (2007). Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47(15), 2230–2236.

Ugender, S. (2018). Effect of tool geometry on mechanical properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy. Journal of Magnesium and Alloys, 6(2), 205–213. https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.05.001

Xie, L., Zhu, X., Fan, Y., Sun, W., Wang, P., Jiang, C., Xiao, X., Yang, S., & Song, Y. (2022). Mechanical properties and

microstructure of friction stir welded dissimilar aluminum alloys. Materials, 15(1), 23. https://doi.org/10.3390/ma15010023

Yang, Q., Mironov, S., Sato, Y. S., & Okamoto, K. (2010). Material flow during friction stir spot welding. Materials Science and Engineering: A, 527(16-17), 4389–4398.

Yin, Y. H., Ikuta, A., & North, T. H. (2010). Microstructural features and mechanical properties of AM60 and AZ31 friction stir spot weld. Materials and Design, 31(10), 4764–4776.

Yin, Y. H., Sun, N., North, T. H., & Hu, S. S. (2010). Microstructures and mechanical properties in dissimilar AZ91/AZ31 spot welds. Materials Characterization, 61(10), 1018–1028.

Yuana, W., Mishra, R. S., Webb, S., Chen, Y. L., Carlson, B., Herling, D. R., & Grant, G. J. (2011). Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds. Journal of Materials Processing Technology, 211(5), 972–977.

Zhang, C., & Shirzadi, A. A. (2018). Measurement of residual stresses in dissimilar friction stir-welded aluminium and copper plates using the contour method. Science and Technology of Welding and Joining, 23(5), 394–399. https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1402846

NEXT-GENERATION ENGINEERING APPROACHES AND APPLICATIONS

