

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ KONULARI

Editör: Doç.Dr. Ahmet Beyzade DEMİRPOLAT

yaz
yayınları

Makine Mühendisliği Konuları

Editör

Doç.Dr. Ahmet Beyzade DEMİRPOLAT

yaz
yayınları

2025

Makine Mühendisliği Konuları

Editör: Doç.Dr. Ahmet Beyzade DEMİRPOLAT

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5547-75-0

Mart 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Advanced Technologies to Reduce Nitrogen Oxide Emissions in Diesel Engine Systems	1
<i>Hasan Üstün BAŞARAN</i>	
Skull Investigations in Biomechanics: Trauma Modelling, Implant Design and Biomaterials	22
<i>Sinan KÖSE</i>	
Laboratuvar Tipi Lazer Markalama Makinesi Tasarımı	40
<i>Nuri ERGİN, Kübra TARIM, Necati KOÇAK</i>	
Kazanlarda Enerji Verimliliği İyileştirmeleri: Ekserji Analizi Yaklaşımı	66
<i>İbrahim KIRBAŞ</i>	
TiNi/MAX Kompakt Kaplamaların Kendi Kendini İyileştirme Özelliklerinin Araştırılması	91
<i>Semih DURAN, Hikmet ÇİÇEK</i>	
Mikroişleme	106
<i>Yılmaz KÜÇÜK, Bahramuddin JEGAR</i>	
Topology Optimization in the Fluting and Grinding Machine Bearing Part the Effect of Its Application on Mechanical Properties	148
<i>Muhammet BOZKURT, Yiğit Emre BAŞKAN, Mehmet BAĞCI</i>	
Zırh Çeliklerinin Balistik Alanındaki Uygulamalarına Bakış	167
<i>Mehmet ÖZER, Fatih BALIKOĞLU</i>	

Hafif Ateşli Silahlar İçin Mermi Tuzak Sistemleri192
Osman SALTİK

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

ADVANCED TECHNOLOGIES TO REDUCE NITROGEN OXIDE EMISSIONS IN DIESEL ENGINE SYSTEMS

Hasan Üstün BAŞARAN¹

1. INTRODUCTION

Diesel engines own a considerable role in our world. In automotive sector, four-stroke diesel engines are commonly utilized in particularly commercial vehicles due to improved fuel economy compared to gasoline engines. Similarly, small marine vessels are mostly operated by four-stroke diesel engines. In addition to four-stroke types, two-stroke diesel engines are highly useful since large marine vessels are generally propelled through those two-stroke engines due to enhanced fuel consumption and reliability. Moreover, diesel engines are preferred in various power production units due to durability and matured technology. Although those benefits are significant for sustaining many different industries, nitrogen oxide (NO_x) and particulate matter (PM) emissions from diesel engines pose a major challenge to the reliable use of these engines in the future (Da Costa et al., 2024). NO_x, in particular, is found to cause some serious respiratory problems in humans (Boningari and Smirniotis, 2016). Thus, environmental agencies have issued some stringent limits and demand low NO_x and PM rates from diesel vehicles, which requires additional modifications in the engine systems. Many researchers and engine manufacturers constantly explore

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği, hustun.basaran@ikcu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1491-0465.

different methods to minimize tailpipe emission rates of diesel engines (Deng et al., 2021).

Strict emission limits are a considerable challenge for engine producers. As shown in Figure 1, the NO_x emission limits for diesel passenger cars in Europe have continuously reduced since Euro 3 came into force in 2000 (Dieselnet, 2025). It is seen that the permissible limit is reduced from 0.5 g/km to 0.25 g/km and to 0.18 g/km in Euro 4 and Euro 5 stages, respectively. It is further decreased to 0.08 g/km in the current Euro 6 stage, which is considerably strict compared to that in Euro 3 stage. It is estimated that, similar to Euro 6, future Euro 7 standard (expected to be active after November 2026) will demand lower than 0.08 g/km NO_x rate from diesel passenger cars. It can be derived that next generation diesel vehicles will still be required to meet highly stringent NO_x emission regulations. Therefore, innovative on-engine or engine-independent solutions for reduced NO_x rates for diesel-driven vehicles are needed to fulfill the strict emission legislations in the future.

Stage	Date	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN†
		g/km					#/km
Compression Ignition (Diesel)							
Euro 1‡	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)	-
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	-	0.7	-	0.08	-
Euro 2, DI	1996.01 ^a	1.0	-	0.9	-	0.10	-
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05	-
Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025	-
Euro 5a	2009.09 ^b	0.50	-	0.23	0.18	0.005 ^f	-
Euro 5b	2011.09 ^c	0.50	-	0.23	0.18	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
Euro 7	2026.11.29	0.50	-	0.17	0.08	0.0045	6.0×10 ¹¹

Fig. 1 EU emission standards for diesel passenger cars (Dieselnet, 2025)

As seen explicitly in Figure 1, current NO_x limit is highly stringent for diesel vehicles. Future NO_x limits will probably be even more stringent for these vehicles. Therefore, this chapter investigates the modern advanced techniques used to minimize NO_x rates in diesel engine systems. Exhaust gas recirculation (EGR), Miller cycle, direct water injection (DWI), emulsified fuel and selective catalytic reduction (SCR) are seen to be the current dependable techniques to improve engine-out NO_x rates. The application of these methods in diesel engine systems is explained in the following parts of the chapter.

2. ADVANCED TECHNIQUES FOR NO_x REDUCTION IN DIESEL ENGINES

In modern diesel engines, different techniques (either alone or combined) can be applied to minimize NO_x rates during operation. These techniques mostly focus on the control of in-cylinder temperature to keep NO_x rate below a certain level. However, after-treatment units such as SCR controls the NO_x rate through using a catalyst at the downstream of the engine system and is not directly related to the in-cylinder temperature. Therefore, it is derived that both on-engine and after-engine control is significant to curb NO_x rate in compression-ignition engines. EGR, an engine-based NO_x control method, is introduced in the following subsection.

2.1. Exhaust Gas Recirculation (EGR)

In compression-ignition engine systems, EGR is commonly utilized to maintain engine-out NO_x rate at a low level. The objective of the EGR is to redirect some of the engine-out exhaust gas back into the intake manifold and thus, into the cylinder. The recirculated exhaust gas is mixed with the fresh air and the mixture is then directed to cylinder for the next cycle. A typical EGR process is shown in Figure 2 (Gomaa et al., 2011).

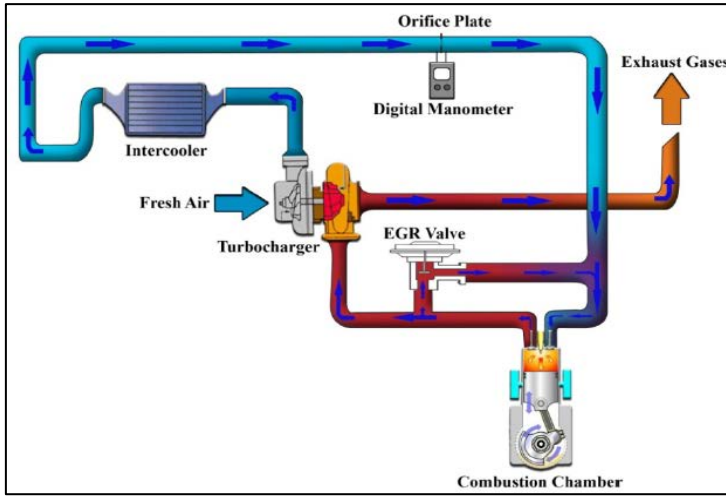


Fig. 2 EGR process in an engine system (Gomaa et al., 2011)

An EGR valve is generally placed at the upstream of the turbocharger, as in Figure 2, to control the amount of exhaust gas to be recirculated in the system. Since the inlet charge is a mixture, not pure fresh air, the combustion effectiveness is not as high as the one achieved in non-EGR mode and thus, in-cylinder temperature is decreased. Considering in-cylinder NO_x production is highly dependent on and proportional to temperature, EGR is an effective way to control temperature and reduce NO_x rate in diesel engines (Youssef and Ibrahim, 2024).

The effect of EGR in engine-out NO_x rate of a diesel engine is illustrated in Figure 3 (Yokomura et al., 2003). It is explicitly seen that as EGR rate (%) is increased, total NO_x (g/h) released is decreased in almost all engine loads. The decrease in NO_x rate can be attributed to the diluted in-cylinder mixture and reduced temperature due to use of EGR in the system. It is also derived that NO_x rate is diminished more at relatively high loads in comparison to low and medium loads. That is due to the different dilution effect of EGR at different loads. As seen, it is highly practical to minimize NO_x in an engine system via application of EGR. However, high EGR rate generally results in

ineffective combustion and undesirable high PM rate in diesel engines (Thangaraja and Kannan, 2016; Deng et al., 2025). Thus, it needs to be carefully implemented in an engine system in order not to boost PM rates above undesirable levels. Combining EGR with other engine measures is one way to control EGR rate while NO_x is reduced in the system (Wang and Chen, 2023).

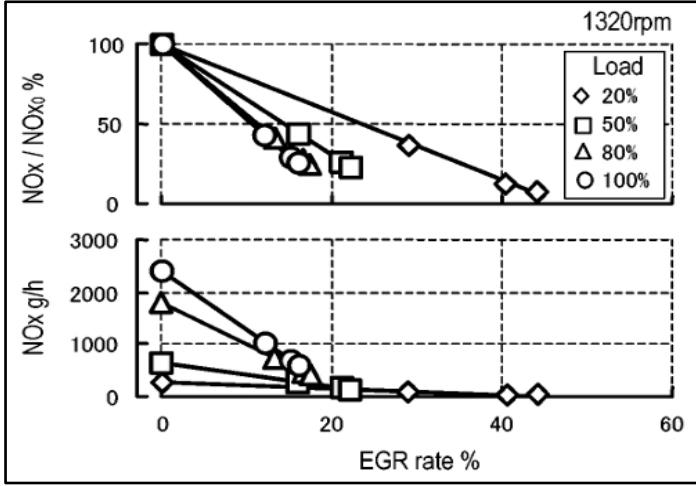


Fig. 3 The impact of EGR in NO_x rate at different engine loads (Yokomura et al., 2003)

2.2. Miller cycle

In addition to EGR, Miller cycle is effective to improve NO_x rates in diesel engines. Miller cycle is applied in an engine system through early or late closure of intake valves. Control of intake valves is generally achieved via variable valve timing (VVT) mechanism (Liu et al., 2022). Unlike conventional fixed cam timing, variable cam timing utilized in that system enables the modulation of intake valve closure in diesel engines. Adjusting intake valve closure through VVT is found to improve fuel consumption (Pelić et al., 2020) and pumping loss in diesel engines (Basaran and Ozsoysal, 2017). Therefore, it is seen as one of the most effective technique to achieve high-efficient, low-emission diesel engines in the future (Dahham et al., 2022).

Miller cycle is directly related to airflow from the intake manifold in an engine system since intake opening is either shortened or lengthened in this thermodynamic cycle. Thus, it significantly affects the total amount of air charged into the engine cylinders. When intake opening is shortened, as in early intake valve closure, effective compression ratio is decreased and the temperature at the end of the compression process is reduced in the system. Similar to EGR, the low temperature medium achieved inside the cylinder limits the NO_x generation (Rinaldini et al., 2013). It is explicitly shown in Figure 4 that NO_x rate can be reduced via Miller cycle (applied as advanced closure of intake valves) for various engine loads (Jiang et al., 2022).

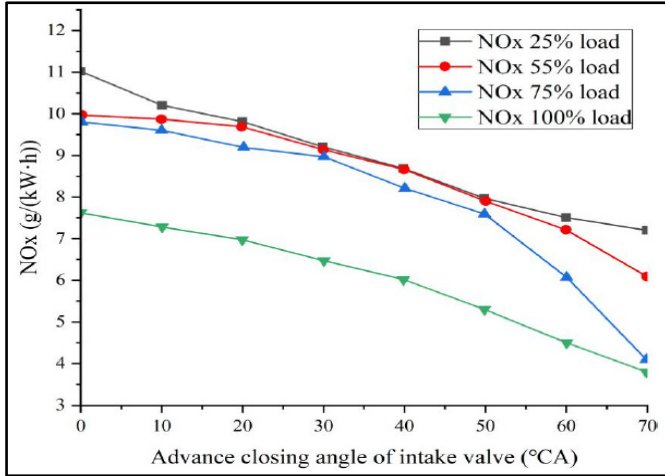


Fig. 4 The impact of Miller cycle (early intake valve closure) in NO_x rate at different engine loads (Jiang et al., 2022)

It can be derived in Figure 4 that moderate and aggressive application of the Miller cycle mostly results in noticeable reduction in NO_x rate. However, the improvement in NO_x rate is more evident, particularly at engine loads 75 % and above. That can stem from the fact that the reduction in volumetric efficiency is more pronounced due to early intake valve closure at high engine loads. Unlike low to moderate engine loads, high engine

loads need high airflow rate to maintain high engine power, which mostly requires relatively high intake opening duration. Therefore, restricting the opening duration via Miller cycle causes a more meaningful reduction in in-cylinder temperature and NOx rate at high engine loads. Similar to advanced intake valve closure, the application of Miller cycle through late intake valve closure results in similar low in-cylinder temperature and thus, reduced NOx rate for compression-ignition engine systems (Gonca et al., 2015; Zhang et al., 2017).

2.3. Direct water injection (DWI)

In automotive engines, in addition to EGR and Miller cycle, direct water injection (namely DWI) into the cylinders can enable decreased NOx rates. There is already an injector placed above the combustion chamber for the fuel in a conventional engine system. However, other than the fuel injector, the engine system can be equipped with an additional injector to maintain the water injection into the cylinder, as shown in Figure 5 (Singh et al., 2020). Water is pumped to that particular injector from a water tank and the desirable amount of water (generally as a percentage of the fuel mass) is inserted into the cylinders at the proper timing of the engine cycle.

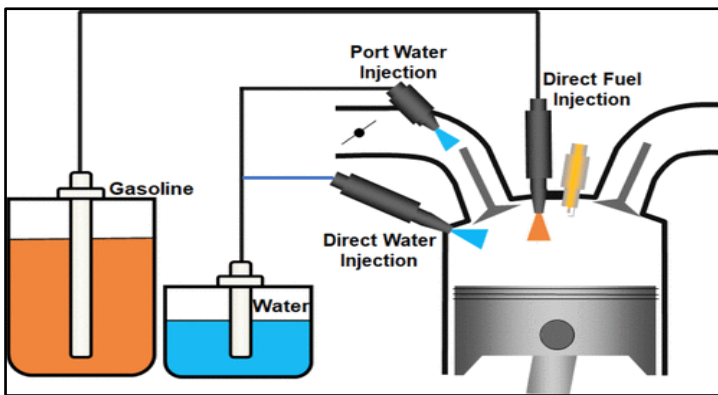


Fig. 5 The mechanism of direct water injection in an engine system (Singh et al., 2020)

The effect of DWI in NO_x emissions (g/kWh) of a marine diesel engine is demonstrated in Figure 6 (Sun et al., 2022). As W/F (water/fuel) ratio rises (more water is injected into the system), total NO_x emission (g/kWh) is steadily reduced. In comparison to conventional mode (without water injection, W/F=0), NO_x emission is improved close to 25 % for a W/F ratio of 0.5 and is almost halved for a W/F ratio of 1.5. Higher reduction in NO_x rate is possible if W/F ratio is further increased. These low NO_x rates are achieved due to decreased in-cylinder temperature, as indicated in Figure 7 (Sun et al., 2022).

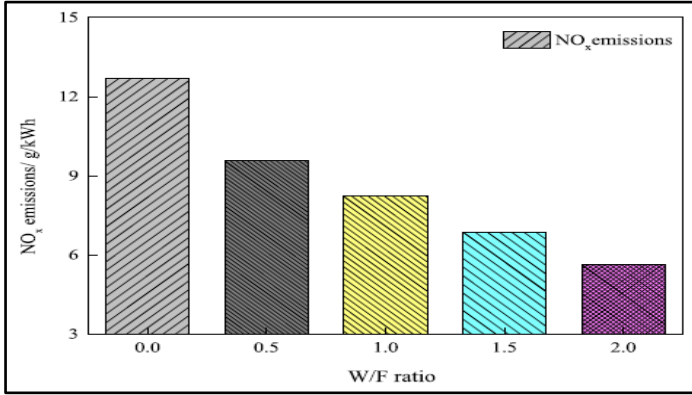


Fig. 6 Effect of water injection quantity in engine-out NO_x emissions (Sun et al., 2022)

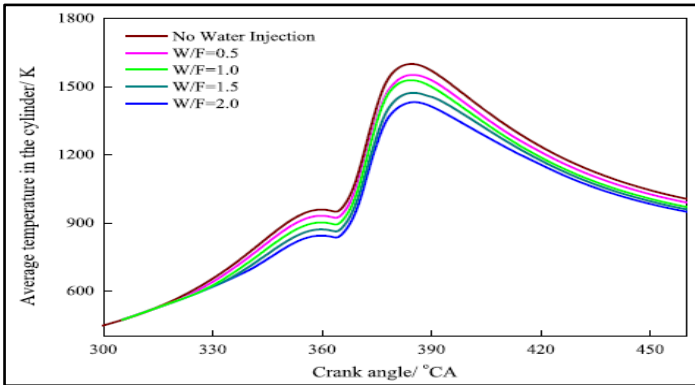


Fig. 7 Effect of water injection quantity in the behavior of in-cylinder temperature (Sun et al., 2022)

It appears that NO_x generation is highly prone to the temperature of the in-cylinder mixture. DWI lowers the temperature of the system during both compression and combustion phases in Figure 7 since the injected water absorbs some part of the in-cylinder heat in these phases. Compared to no water injection mode, in-cylinder medium is less conducive to yield high NO_x rates in water-injected modes and thus, total NO_x release is significantly curbed in these modes, as in Figure 6. It is seen in similar works that thermal NO_x formation is highly restrained with DWI technique due to decreased combustion temperature (Saadeldin et al., 2023; Szöllősi and Kiss, 2024).

2.4. Emulsified fuel

Another useful strategy to diminish NO_x rate is to utilize emulsified fuel in diesel engine systems. Unlike conventional fuel, emulsified fuel achieves to combine combustible diesel fuel with water. The droplet size of pure diesel fuel injected into the cylinders remains relatively large and there is generally inadequate burning time, which causes incomplete combustion and high exhaust emissions. The emulsion fuel enables a micro-explosion process, as in Figure 8 (Attar et al., 2022). As the water at inner layers of the emulsified fuel is vaporized (outer layer is diesel fuel), some small fuel droplets emerge in the process. The elevated surface area to volume ratio in these droplets enhances combustion effectiveness and thus, emissions are lowered.

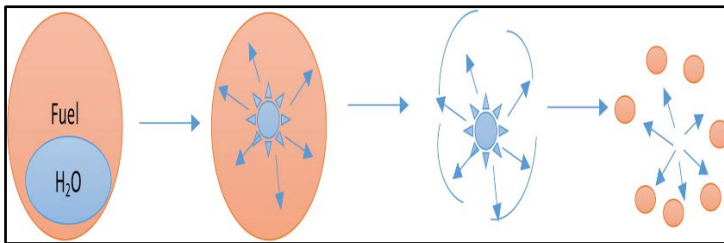


Fig. 8 Micro explosion process in diesel emulsified fuel (Attar et al., 2022)

The effect of water-in-diesel emulsion fuel in NO emissions is compared with base diesel (BD) fuel in Figure 9 (Vellaiyan and Amirthagadeswaran, 2016). 10W/D represents 10% of water-in-diesel in the plot. The impact of zinc oxide addition is also examined in the study, with 50ZnO and 100ZnO showing the added 50 ppm and 100 ppm ZnO in 10% water-in-diesel fuel, respectively. In all engine loads, NO emission rate in 10W/D mode is much lower than that in BD mode. The decreased NO is attributed to lowered peak flame temperature due to the presence of water and heat absorption during the combustion process. It is also seen that NO rate is further reduced as ZnO is added to the emulsified fuel. This further reduction is due to less ignition delay and low combustion temperature in ZnO-incorporated emulsified fuel in the system.

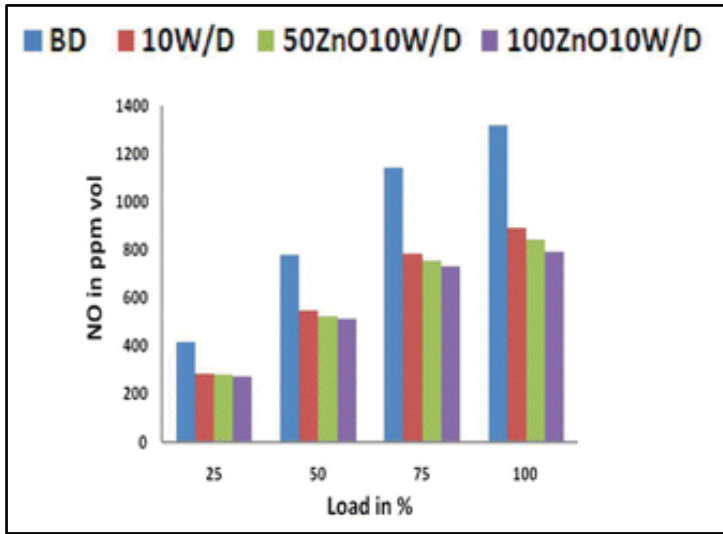


Fig. 9 NO emission variation with BD, 10W/D, 50ZnO10W/D and 100ZnO10W/D (Vellaiyan and Amirthagadeswaran, 2016)

It is seen in other studies in the literature that water-in-fuel emulsion is highly effective to enhance NO_x rates in diesel engines (Gopidesi and Rajaram, 2022; Park and Oh, 2022). Not only the rise in total water content in the emulsion, but also the

rise in the water droplet size used in the emulsion is beneficial to minimize NO_x rate in diesel engines (Attia and Kulchitskiy, 2014).

2.5. Selective catalytic reduction (SCR)

Previous methods focus on the modulation of in-cylinder temperature and combustion via an engine-dependent technique to minimize NO_x rates in diesel engines. However, it is also possible to control NO_x rates in the after-combustion period of the engine operation without any modulation in engine parameters. That is achieved through using a SCR component at the downstream of the exhaust unit in an engine system. The reaction in a typical SCR unit is shown in Figure 10 (Loganathan and Chandrasekaran, 2013).

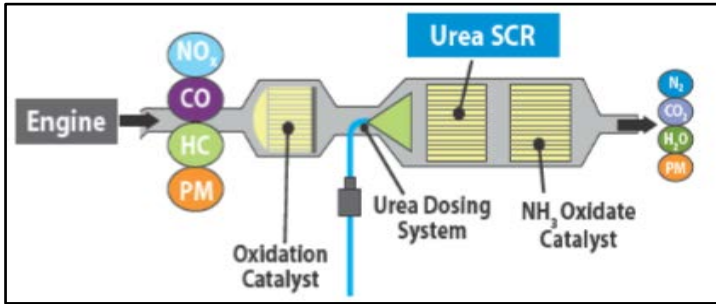


Fig. 10 The chemical process in the SCR system (Loganathan and Chandrasekaran, 2013)

The harmful NO_x released from the engine in Figure 10 is directed to a urea-based SCR equipment for the treatment. Other harmful gases such as CO and HC are treated in a diesel oxidation catalyst (DOC) unit and a diesel particulate filter is utilized to control particulate matter (PM) rates. The SCR unit, specialized to decrease NO_x rate, mostly uses urea or diesel exhaust fluid (DEF) for the treatment of NO_x. Some quantity of DEF is injected into the harmful exhaust gas before its flow through the catalyst in the SCR unit. The vaporization of the urea produces ammonia (NH₃) and carbon dioxide (CO₂). The NH₃ is delivered to the

system at this phase. At the end of the unit, the NH_3 is utilized with the catalyst and through some chemical reactions, the undesirable NO_x is converted to nontoxic nitrogen (N_2), which is then safely released into the atmosphere.

SCR systems are generally highly effective to decrease NO_x rates in highway vehicles. Using these systems, NO_x conversion can be achieved at 90% or more in most cases (Guan et al., 2014). However, the conversion efficiency in a SCR unit is highly sensitive to the catalyst temperature. In general, temperatures above 250°C are required for highly effective NO_x conversion, as in Figure 11 (Kamasamudram et al., 2010). This can be problematic in diesel vehicles since exhaust temperature can remain at low levels (below 250°C) during inner-city transport due to low speed. Therefore, some effective thermal management techniques such as post-injection, cylinder deactivation and VVT are implemented in diesel engine systems to maintain elevated exhaust temperatures and more effective SCR units (Nie et al., 2022; Brinklow et al., 2023; Basaran, 2023).

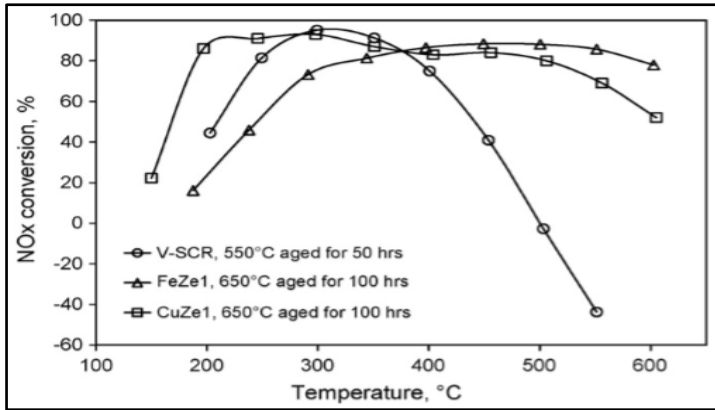


Fig. 11 Temperature-dependent variation of NO_x conversion efficiency for different SCR catalysts (Kamasamudram et al., 2010)

SCR and EGR techniques are the most preferred solutions to control NO_x rate in diesel engine systems as they are more practical and have more improved technological maturity compared to other methods. Recently, combined application of SCR and EGR is also examined to further improve NO_x rates in diesel engines (Zhang et al., 2024; Lou et al., 2022). Some of the pros and cons of these two effective methods are presented in Figure 12 (Hubei Autolin Technology, 2025).

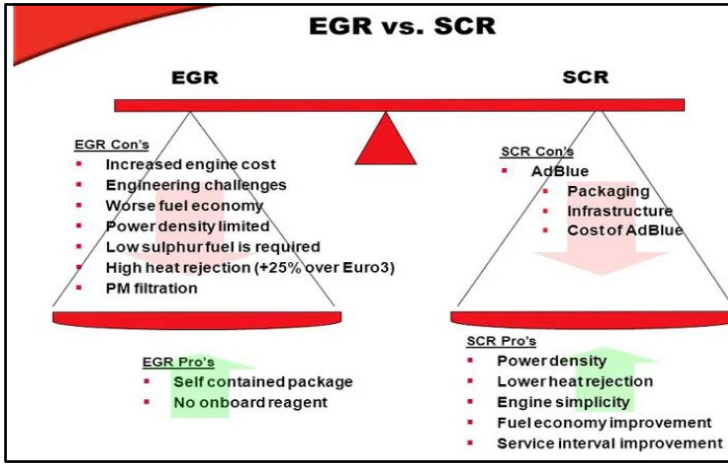


Fig. 12 Comparison of EGR and SCR techniques (Hubei Autolin Technology Co., Ltd., 2025)

EGR has a relatively less complex structure compared to SCR, which enables relatively simple control and maintenance. SCR generally needs high installation space and its maintenance requires relatively high technology. Thus, EGR is generally cost-effective relative to SCR system. Also, while SCR units need high cost fluids for exhaust treatment, EGR does not require any additional fluid for exhaust treatment. However, EGR causes power loss, increased heat rejection and rise in fuel consumption due to less effective in-cylinder combustion. Use of high rates of EGR for high NO_x reduction mostly results in rise in PM rates, which requires high effective PM filtration and can affect engine cost negatively. Unlike EGR, SCR does not directly affect the

engine operation. There is less heat rejection and engine power is not decreased as combustion is maintained stable. Therefore, using SCR does not cause a considerable rise in fuel consumption and PM rates. That is desirable since, unlike high PM rates in EGR application, moderate PM rates in SCR application can be controlled with a less effective PM filtration and thus, be cost effective. It can be derived that both technologies have benefits and challenges. It is estimated that future diesel engine systems will focus on the co-application of these methods, overcoming the above-mentioned challenges to satisfactorily minimize NO_x rates and meet the strict emission regulations (Chen et al., 2024).

3. CONCLUSION

This work focuses on the current advanced technologies used to curb NO_x rates in diesel engine systems. EGR is seen as one those effective technologies to control tailpipe NO_x. It is highly effective. However, high rates of EGR can lead to undesirable PM rates. Another effective technique is to implement Miller cycle via VVT in the engine system. VVT enables decreased NO_x rates. But it is more complex compared to EGR and its control is challenging in the system. In addition to Miller cycle, DWT can be applied to minimize NO_x rate in a CI engine system. NO_x is reduced due to low in-cylinder temperature. However, DWT needs an additional injector and a pump for water injection and is costly for the operation. Unlike DWT, using emulsified fuel in the engine diminishes NO_x emissions and does not need an extra injector. But it needs some challenging chemical process to obtain emulsified fuel and it is difficult to apply it at all conditions. Contrary to aforementioned engine-dependent methods, using an engine-independent SCR device is seen to be the best technique to maintain desirable NO_x rates in diesel engines. Unlike EGR, it does not cause ineffective

combustion and high PM rates. Also, except for some low exhaust temperature cases, the SCR unit can work with a NO_x conversion efficiency of 90 % and above and thus, its potential to achieve ultra-low NO_x rate is higher than EGR and other methods.

REFERENCES

- Attar, A., Waghmare, J. and Mane, S. (2022). Water in diesel emulsion fuel: production, properties, performance, and exhaust emission analysis. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 13, pp. 729-738.
- Attia, A. M. and Kulchitskiy, A. R. (2014). Influence of the structure of water-in-fuel emulsion on diesel engine performance. *Fuel*, Vol. 116, pp. 703-708.
- Basaran, H. U. & Ozsoysal, O. A. (2017). Effects of application of variable valve timing on the exhaust gas temperature improvement in a low-loaded diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 122, pp. 758-767.
- Basaran, H. U. (2023). Enhanced Exhaust After-treatment Warmup in a Heavy-Duty Diesel Engine System via Miller Cycle and Delayed Exhaust Valve Opening. *Energies*, Vol. 16(12), p. 4542.
- Boningari, T. and Smirniotis, P. G. (2016). Impact of nitrogen oxides on the environment and human health: Mn-based materials for the NO_x abatement. *Current Opinion in Chemical Engineering*, Vol. 13, pp. 133 – 141.
- Brinklow, G., Herreros, J. M., Rezaei, S. Z., Doustdar, O., Tsolakis, A., Millington, P. and Kolpin, A. (2023). Impact of cylinder deactivation strategies on three-way catalyst performance in high efficiency low emissions engines. *Chemical Engineering Journal Advances*, Vol. 14, p. 100481.
- Chen, Z. et al. (2024). Recent advances in SCR systems of heavy-duty diesel vehicles – low temperature NO_x reduction technology and combination of SCR with remote OBD. *Atmosphere*, Vol. 14, p. 100481.

- Da Costa, S., Bukkarapu, K. R., Fernandes, R., Krishnasamy, A. and Morajkar, P. P. (2024). Advancements in In-Cylinder and After-Treatment Strategies for Mitigating Pollutants from Diesel Engines: A Critical Review. *Energy & Fuels*, Vol. 38(21), pp. 20057-20083.
- Dahham, R. Y., Wei, H. and Pan, J. (2022). Improving thermal efficiency of internal combustion engines: recent progress and remaining challenges. *Energies*. Vol. 15(17), p. 6222.
- Deng, J., Wang, X., Wei, Z., Wang, L., Wang, C. and Chen, Z. (2021). A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels. *Science of the Total Environment*, Vol. 766, p. 144319.
- Deng, B., Cai, W., Zhang, W., Bian, L., Che, X., Xiang, Y. and Wu, D. (2025). A comprehensive investigation of EGR (exhaust gas recirculation) effects on energy distribution and emissions of a turbocharging diesel engine under World Harmonized Transient Cycle. *Energy*, Vol. 316, p. 134506.
- Dieselnet. <http://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>. EU emission standards for diesel passenger cars. (Retrieved January 26th, 2025).
- Gomaa, M., Alimin, A. J. and Kamarudin, K. A. (2011). The effect of EGR rates on NO_x and smoke emissions of an IDI diesel engine fuelled with Jatropha biodiesel blends. *International Journal of Energy and Environment*, Vol. 2(3), pp. 477-490.
- Gonca, G., Sahin, B., Parlak, A., Ust, Y., Ayhan, V., Cesur, I. and Boru, B. (2015). Theoretical and experimental investigation of the Miller cycle diesel engine in terms of

- performance and emission parameters. *Applied Energy*, Vol. 138, pp. 11-20.
- Gopidesi, R. K. and Selvi Rajaram, P. (2022). A review on emulsified fuels and their application in diesel engine. *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 43(1), pp. 732-740.
- Guan, B., Zhan, R., Lin, H. and Huang, Z. (2014). Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NOx from diesel engine exhaust. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 66(1-2), pp. 395-414.
- Hubei Autolin Technology.
<http://autolintec.com/news/differences-among-scr-egr-poc-doc-dpf.html>. What are the differences among SCR, EGR, POC, DOC, DPF in diesel emission solution? (Retrieved February 5th, 2025).
- Jiang, F., Zhou, J., Hu, J., Tan, X., Cao, W. and Tan, Z. (2022). Study on performance of locomotive diesel engine fueled with biodiesel using two Miller cycle technologies. *Processes*, Vol. 10(2), p. 372.
- Kamasamudram, K., Currier, N. W., Chen, X. and Yezerets, A. (2010). Overview of the practically important behaviors of zeolite-based urea-SCR catalysts, using compact experimental protocol. *Catalysis Today*, Vol. 151(3-4), pp. 212-222.
- Liu, F., Liu, B., Zhang, J., Wan, P. and Li, B. (2022). Study on a novel variable valve timing and lift mechanism for a Miller cycle diesel engine. *Energies*, Vol. 15(22), p. 372.
- Loganathan, K. and Chandrasekaran, M. (2013). Investigation on emission characteristics of CI engine using vegetable oil with SCR technique. *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 3(4), pp. 969-975.

- Lou, D., Kang, L., Zhang, Y., Fang, L. and Luo, C. (2022). Effect of exhaust gas recirculation combined with selective catalytic reduction on NO_x emission characteristics and their matching optimization of a heavy-duty diesel engine. *ACS omega*, Vol. 7(26), pp. 22291-22302.
- Nie, X., Bi, Y., Liu, S., Shen, L. and Wan, M. (2022). Impacts of different exhaust thermal management methods on diesel engine and SCR performance at different altitude levels. *Fuel*, Vol. 324, p. 124747.
- Park, J. and Oh, J. (2022). Study on the characteristics of performance, combustion, and emissions for a diesel water emulsion fuel on a combustion visualization engine and a commercial diesel engine. *Fuel*, Vol. 311, p. 122520.
- Pelić, V., Mrakovčić, T. et al. (2020). Effect of early closing of the inlet valve on fuel consumption and temperature in a medium speed marine diesel engine cylinder. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 8(10), p. 747.
- Rinaldini, C. A., Mattarelli, E. and Golovitchev, V. I. (2013). Potential of the Miller cycle on a HSDI diesel automotive engine. *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 102-119.
- Saadeldin, M. A., Elgoharya, M. M., Abdelnaby, M. and Shouman, M. R. (2023). Effects of Direct Water Injection on the Nitrogen Oxide Emission Characteristics of Marine Diesel Engines. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 31(2), p. 6.
- Singh, E., Hlaing, P. and Dibble, R. W. (2020). Investigating water injection in single-cylinder gasoline spark-ignited engines at fixed speed. *Energy & Fuels*, Vol. 34(12), pp. 16636-16653.

- Sun, X., Ning, J., Liang, X. et al. (2022). Effect of direct water injection on combustion and emissions characteristics of marine diesel engines. *Fuel*, Vol. 309, p. 122213.
- Szöllősi, D. and Kiss, P. (2024). Effects of Water Injection in Diesel Engine Emission Treatment System – A Review in the Light of EURO 7. *Energies*, Vol. 17(20), p. 5107.
- Thangaraja, J. and Kannan, C. (2016). Effect of exhaust gas recirculation on advanced diesel combustion and alternate fuels – A review. *Applied Energy*, Vol. 180, pp. 169-184.
- Vellaiyan, S. and Amirthagadeswaran, K. S. (2016). Zinc oxide incorporated water-in-diesel emulsion fuel: Formulation, particle size measurement, emission characteristics assessment. *Petroleum Science and Technology*, Vol. 34(2), pp. 114-122.
- Wang, J. and Chen, L. (2023). The impact of Miller cycle in combination to exhaust gas recirculation and post-injection on controlling diesel engine NOx. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 45(3), pp. 7914-7931.
- Yokomura, H., Kohketsu, S. and Mori, K. (2003). EGR system in a turbocharged and intercooled heavy-duty diesel engine – expansion of EGR area with venturi EGR System. *Technical review*, Vol. 15, pp. 14-20.
- Youssef, A. and Ibrahim, A. (2024). NOx emissions reduction through applying the exhaust gas recirculation (EGR) technique for a diesel engine fueled with a diesel-biodiesel-diethyl ether blend. *Energy Storage and Saving*, Vol. 3(4), pp. 318-326.
- Zhang, Y., Wang, Z., Bai, H., Guo, C. and Li, Y. (2017). The reduction of mechanical and thermal loads in a high-speed

HD diesel engine using miller cycle with late intake valve closing. SAE Technical Paper No. 2017-01-0637.

Zhang, S., Nie, X., Bi, Y., Yan, J., Liu, S. and Peng, Y. (2024). Experimental Study on NO_x Reduction of Diesel Engine by EGR Coupled with SCR. ACS omega, Vol. 9(7), pp. 8308-8319.

SKULL INVESTIGATIONS IN BIOMECHANICS: TRAUMA MODELING, IMPLANT DESIGN AND BIOMATERIALS

Sinan KÖSE¹

1. INTRODUCTION

The skull is one of the most complex and critical structures of the human body. In addition to protecting the brain from mechanical trauma, it has vital functions such as ensuring the stability of the facial structure (Lieberman, 2011). The discipline of biomechanics analyzes the dynamic and static behavior of the skull with engineering principles, shedding light on clinical applications and investigating the mechanical understanding of the anatomical structure. Understanding the anatomical and mechanical properties of the skull is of great importance for modeling the effects of trauma, determining injury mechanisms and developing biomechanically optimized implants. Especially post-traumatic fracture mechanisms, personalized implant designs and biocompatible materials are the focus of multidisciplinary research (Barthelat et al., 2016). Both the serious consequences of traumatic injuries and issues such as implant design in the reconstruction and treatment of these injuries are at the center of biomechanical studies. From the modeling of artificial tooth roots to implant design, from the properties of biomaterials used to the clinical applications, from the modeling of artificial tooth roots to implant design, from the

¹ Asst. Prof. Dr., Vocational School of Mersin Tarsus Organize Industrial Region Technical Sciences, Department of Mechanical and Metal Technologies, Tarsus University, Tarsus-Mersin, Türkiye, sinankose@tarsus.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6224-3388.

characteristics of biomaterials used to improve patient comfort in dental areas as well as skull traumas, this chapter presents the theoretical background of the subject, while discussing current technological developments and future trends.

By providing an engineering-oriented perspective on cranial biomechanics, this chapter is intended to be an important resource for both researchers at the beginning of their academic studies and clinical practitioners.

2. SKULL ANATOMY AND BIOMECHANICS

The skull, one of the most complex and functional structures of the human body, functions similar to the finest craftsmanship of engineering systems. Beyond traditional anatomical descriptions, the structural features of the skull, when analyzed in terms of the distribution of mechanical loads, energy absorption and deformation mechanisms, offer numerous details of interest to engineering disciplines. While the cranium and facial bones form the basis of this structure, the cranium component functions as a solid “shell” that mechanically protects the central nervous system with the integrated structure of the frontal, parietal, temporal, occipital, sphenoid and ethmoid bones. The facial bones (maxillary, nasal, zygomatic, mandibular, etc.) are crucial for structural balance and aesthetic harmony. The sutures between these bones allow for micro-movements and optimize energy dissipation by preventing the spread of localized damage in cases of sudden/unexpected and high energy transfer. From a biomechanical point of view, although the skull is a rigid structure, it is an anatomical miracle with specific adaptations to dynamic loading conditions. The bones of the skull are composed of cortical (compact) and trabecular (cancellous) bone. Cortical bone has a high elastic modulus and strength, while trabecular bone is lighter and advantageous in terms of energy absorption

(McElhaney et al., 1970; Gümrükçü et al., 2019). The Elastic Modulus (E) varies between approximately 15-20 GPa for cortical bone and 0.1-2 GPa for trabecular bone (McElhaney et al., 1970; Jaslow, 1990) and the density of cortical bone is 1.8-2.0 g/cm³ and trabecular bone is 0.2-1.0 g/cm³ (Peterson and Dechow, 2003). The compressive strength values for the skull are approximately 170 MPa and 5-10 MPa for cortical bone and trabecular bone, respectively (Carter and Hayes, 1977). These properties are the main factors determining how the skull responds to impacts. Especially in high-energy impacts, the cortical bone has a large load-bearing capacity, while the trabecular bone acts as shock absorber. Recent finite element analyses (FEA) show that certain regions are more sensitive to stress concentration (Ptak et al., 2018; Wood, 1971). In particular, the frontal and occipital regions have a high load-bearing capacity during impact, while the zygomatic and maxillary bones are relatively more fragile. Mechanically, the skull behaves like a shell-beam joint in terms of load carrying and the sutures between the bones act as flexible connections, exhibiting a different deformation mechanics behavior than traditional rigid systems. The design of the skull, which is seen as a natural engineering marvel that can maximize load distribution and energy absorption, allows mechanical loads to spread over large areas, especially in moments of impact, due to the microarchitecture of the bone tissue and the separation between cortical (compact) and trabecular (spongy) regions. Thus, the damaged area and damage rate are minimized. The skull has a similar functioning structure that utilizes the concepts of “stress distribution” and “load transfer” frequently used in engineering. Today's technology allows the geometric and mechanical properties of the skull to be analyzed with high accuracy using computer-aided modeling (CAD), finite element analysis and advanced imaging techniques (high-resolution CT, MRI). Engineering parameters such as structural strength, elastic modulus and fatigue life are clearly

demonstrated in impact scenarios and behavior under load. The skull is considered as a natural composite system representing the combination of the principles of optimum stiffness and energy absorption in engineering (Santos et al., 2022; Jasinowski and Reddy, 2012).

Analysis of fracture mechanisms is of great importance in mechanical systems. The skull has adaptive mechanisms such as load distribution, plastic deformation and pre-fracture energy absorption to resist trauma. The maxilla and zygomatic bones stand out as the most fragile regions against impact, while the trabecular structure tries to absorb some of the loads through deformation. Although it is known that living tissues differ from individual to individual, the principles of isotropic and anisotropic materials for generalized results of engineering studies can directly overlap with skull biomechanics (Sahoo et al., 2013; Dannhauer et al., 2011). These principles, which are accepted as assumptions, shorten the research processes and facilitate the solutions of complex problems. These adaptation mechanisms provide critical reference points for the design of protective headgear, biomechanical simulations and optimization of skull implants in biomedical engineering, and a guideline for the establishment of gold application protocols in treatments.

In summary, cranial anatomy and biomechanics are important enough to be of interest to engineering disciplines for the study of load distribution, energy absorption and microstructural properties of natural systems. This optimized structure of nature inspires innovative approaches using engineering principles in post-traumatic reconstruction, implant design and biomechanical simulations. Thus, biomechanical analysis and engineering modeling can be used to achieve more reliable and efficient results in surgical interventions and customized implant solutions.

3. TRAUMA MODELING AND SIMULATION TECHNIQUES

Modeling of cranial trauma is a critical research area in biomechanics and mechanical engineering. Advanced computational methods are required to understand the deformation behavior of a structure subjected to impact, determine material durability and develop preventive measures. In this context, trauma scenarios are modeled using various methods such as finite element analysis (FEA), dynamic impact tests and biomechanical experiments.

Finite element analysis (FEA) is one of the most widely used computational methods to analyze the mechanical loads acting on the skull. The skull is modeled as a multilayered structure with heterogeneous material properties, and the stress distribution, deformation levels, and damage mechanisms at impact are examined in detail (Gonzales et al., 2020; Ruan et al., 1991; Ruan et al., 1994). Material properties, boundary conditions and damage criteria are among the main parameters considered in FEA analysis. While nonlinear elastic-plastic material models are preferred for cortical and trabecular bone, damage predictions based on von Mises stress, maximum stress and yield limit are carried out according to factors such as the direction, intensity and contact time of the force acting on the skull. Recent studies show that FEA provides highly reliable results for modeling the mechanical behavior of the skull, especially in high-velocity trauma (e.g., traffic accidents or gunshot wounds) (Gong et al., 2008). It should be noted that numerical calculations such as the finite element method are motivated by the motivation to get as close as possible to reality. This method, which is a numerical calculation method, provides a simulation opportunity for the results of possible scenarios. Increasing numerical calculations will bring error rates with it, and low numerical calculations that do not approach reality

(rough designs that cannot represent the real structure and the boundary conditions of the model cannot animate the real situation) may lead to questioning the reliability of the results. In addition to numerical calculation methods, experimental setups can also be utilized to observe possible scenarios in laboratory environments.

In addition to numerical modeling to understand the traumas on the skull, dynamic impact tests are performed in laboratory environments to obtain realistic results. These tests are conducted using specialized testing machines equipped with high-speed cameras and force sensors. The most common of these dynamic test methods are drop, ballistic and crash tests, and it should be known that dynamic tests cannot be limited to these topics. Fall tests measure the forces generated by the impact of objects falling from a certain height on the skull, while ballistic tests are bullet impact tests at different speeds, especially to simulate gunshot wounds. Crash tests are a test method used to determine the severity of the impact on the anatomical structure, especially the head region, especially in traffic accidents. Modeling of cranial trauma is directly related to common engineering applications such as structural analysis, fracture mechanics and materials science. These modeling techniques are directly linked to customized implant designs, protective equipment designs and forensic analysis, and these tests provide critical data, especially for biomedical device design and protective equipment development. For engineers, the outputs of these tests are an important reference for material selection, design optimization and energy absorption analysis.

4. CRANIAL IMPLANT DESIGN

The design of cranial implants is directly related to biomechanical principles as well as engineering, materials

science, and manufacturing technologies. Implants used in the cranial and maxillofacial regions have been developed to repair bone/tissue loss due to trauma, tumor surgery or congenital deformities. The design process of these implants is shaped by the integration of biomechanical suitability, mechanical strength, biocompatibility and manufacturing technologies. For a cranial implant to be successful;

Structural Compliance: Due to the complex geometry of the skull, the anatomical fit of the implant must be perfect. This is usually achieved through Patient-Specific Design (PSD) methods,

Mechanical Durability: The implant must have sufficient strength against trauma and daily mechanical loads. For this, criteria such as tensile strength, compressive strength and fatigue life should be taken into account when selecting materials,

Impact Damping Capacity: Post-impact stress propagation and deformation mechanisms of the implant are analyzed and optimized by FEA (Finite Element Analysis) and dynamic load tests,

Implant-Bone Interface Behavior; Load transfer between the implant and bone tissue should be homogeneous in terms of stress distribution. High elastic modulus differences can cause stress concentrations, leading to implant failure, requirements (Miles et al., 2006; Bowers et al., 2015; Albrektsson et al., 2017).

The design of patient-specific skull implants is usually carried out using reverse engineering and computer-aided design (CAD) methods. The design process includes the following steps:

1. *Imaging and 3D Modeling;* Computed Tomography (CT) and Magnetic Resonance (MR) scans are used to determine the patient's skull anatomy. DICOM data is transferred to 3D

modeling software to complete missing bone tissue or intervene in target areas,

2. *Structural Optimization with Finite Element Analysis (FEA)*; The mechanical performance of the implant design is tested with FEA simulations. von Mises stress distribution, maximum axial stress values and fatigue life are analyzed,

After numerical modeling and validation, the process is completed with the production and application stages. In the production phase, titanium is widely used in material selection due to its high mechanical strength, while PEEK and bioceramic materials seem to provide better mechanical compatibility with bone tissue despite their lower modulus of elasticity (Wang et al., 2023; Jiang et al., 2020). While 3D bioprinting method is preferred in the precise production of polymers and ceramic materials in manufacturing processes (Mian et al., 2022; Shim, 2023), CNC technology, which is one of the traditional production methods for high precision production, is preferred for titanium implants. While laser sintering method is used to create porous structures with the developing technology and to ensure better attachment of bone cells to the implant surface (osseointegration), the cost of raw materials and the lack of easy accessibility of the machines used in production are the most important factors preventing the widespread use of these systems (Saffarzadeh et al., 2016).

If we summarize the main points that engineers should consider in implant design; Geometric optimization to minimize stress concentrations, considering parameters that will increase the fatigue life of the implant in material selection and testing the long-term biomechanical stability of the implant are critical study issues. Studies have also shown that composite implants (e.g., titanium-PEEK hybrid structures) can reduce failure rates in implant applications by optimizing stress distribution.

5. BIOMATERIALS AND APPLICATIONS

Biomaterials are materials that can interact with living organisms and are used in medical treatments, implants or in areas such as tissue engineering. These materials are optimized for biocompatibility, mechanical strength and functional properties. The use of biomaterials has revolutionized modern medicine and engineering, leading to major advances in areas such as tissue damage repair, organ transplantation alternatives and drug delivery systems (Hench and Jones, 2005). Biomaterials have been used in medicine since prehistoric times, with their most significant development based on discoveries in the 19th century, when aseptic procedures, antiseptic agents and modern anesthetics were developed (Marin et al., 2020). Biomaterials are divided into two main categories: natural and synthetic. Natural biomaterials include materials of biological origin such as collagen, fibrinogen, chitosan and hyaluronic acid. These materials are highly compatible with biological systems and are often used in areas such as tissue engineering and wound healing (Lee and Mooney, 2001). Synthetic biomaterials consist of polymers, ceramics and metals. Materials such as polylactic acid (PLA), polyglycerol acid (PGA) and hydroxyapatite are widely preferred for their biodegradability and mechanical properties (Middleton and Tipton, 2000).

Biomaterials have a wide range of applications. They are used in areas such as cardiovascular implants, bone and dental prostheses, artificial skin, controlled drug release systems and scaffolding. For example, heart valves and stents are important applications of biomaterials in cardiology (Ratner et al., 2004). Hydroxyapatite used in bone grafts supports bone tissue reconstruction, while biodegradable polymers provide controlled release in drug delivery systems (Langer and Tirrell, 2004). The biggest challenges in the development of biomaterials are factors such as biocompatibility, risk of infection and long-term stability.

Therefore, interdisciplinary studies in materials science, biology and medicine are continuously underway to improve the performance of biomaterials (Williams, 2008). Innovative technologies such as nanotechnology and 3D printing are further advancing the design and manufacturing of biomaterials (Hollister, 2005).

The choice of biomaterials used in skull implants depends on many engineering parameters such as mechanical properties, biocompatibility, corrosion resistance, biodegradation properties and ease of fabrication. The mechanical and biological properties of these materials are summarized in the table below (Table 1) (Mishra and Chowdhary, 2019; Köse and Sofuoğlu, 2014; Verma et al., 2021; Oleksy et al., 2023).

Table 1. Commonly used cranial implant/prosthesis materials and their mechanical properties

Material Type	Modulus of Elasticity (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Biocompatibility	Degradability	Area of Use
Titanium (Ti-6Al-4V)	110	900	High	Low	Cranial and orthopedic implants
PEEK (Polyether-etherketon)	4	100	Medium-High	None	Cranial and spinal implants
PMMA (Polimetilmetakrilat)	2-3	70	Medium	None	Cranial fillings and dental prostheses
Hidroksiapatit (HA)	80	50	Very High	High	Bone grafts and biocomposites

6. CURRENT APPLICATIONS IN SKULL BIOMECHANICS

Recent advances in computational methods have enabled detailed analysis of cranial biomechanics using finite element analysis (FEA) and multibody modeling. FEA has gained significant traction in craniofacial fracture analysis, allowing simulation of impact scenarios and identification of weak areas

susceptible to fracture. This approach can help optimize implant placement and improve safety measures in automobile and sports equipment design (Shobha et al., 2016). FEA has also been applied to study masticatory stress distribution in the skull, which can inform oral rehabilitation planning (Prado et al., 2014). Multibody modeling, although underutilized, offers potential for analyzing bone motion, muscle forces and joint kinematics in craniofacial studies (Curtis, 2011). Validated finite element head models, such as the University of Strasbourg Finite Element Head Model, have been used to simulate experimental head impacts and predict skull fracture patterns, providing valuable information for forensic applications and injury prevention (Asgharpour et al., 2014). Innovations such as artificial intelligence-supported simulations, surgical planning with augmented reality (AR) and implants with biosensors are coming to the forefront (Zhang et al., 2023), while dynamic implants that can react to environmental stimuli are discussed as the trend of the future (Wang and Li, 2024). Preliminary research is still ongoing for these studies, which are called 4D printing technologies. Nanotechnology-supported biomaterials that reduce the risk of infection (Zhang et al., 2023), guiding technologies called Digital Twin technology that accelerate treatment processes by using patient-specific biomechanical simulations (Brown et al., 2024), and biosensor research/applications with the assumption that artificial intelligence is an inevitable part of our daily lives are the main areas where biomechanics is oriented.

7. RESULT

Cranial biomechanics is a multidisciplinary field including trauma modeling, implant design and biomaterials development. In this chapter, starting from the anatomical and

mechanical properties of the skull, modeling of trauma scenarios, personalized implant designs and clinical applications of biomaterials are examined in detail. Recent technological advances, especially 3D printing, artificial intelligence-assisted simulations and the development of biomaterials, have led to significant progress in the field of cranial biomechanics. In the future, with the further advancement of studies in this field, it is expected that personalized treatments will become widespread and post-traumatic reconstruction processes will become more effective.

REFERENCES

- Albrektsson, T., Chrcanovic, B., Jacobsson, M., & Wennerberg, A. (2017). Osseointegration of implants: a biological and clinical overview. *JSM Dental Surgery*, 2(3).
- Asgharpour, Z., Baumgartner, D., Willinger, R., Graw, M., & Peldschus, S. (2014). The validation and application of a finite element human head model for frontal skull fracture analysis. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 33, 16-23.
- Barthelat, F., Yin, Z., & Buehler, M. J. (2016). Structure and mechanics of interfaces in biological materials. *Nature Reviews Materials*, 1(4), 16007. doi:10.1038/natrevmats.2016.7
- Bowers, C. A., McMullin, J. H., Brimley, C., Etherington, L., Siddiqi, F. A., & Riva-Cambrin, J. (2015). Minimizing bone gaps when using custom pediatric cranial implants is associated with implant success. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics PED*, 16(4), 439-444. <https://doi.org/10.3171/2015.2.PEDS14536>
- Brown, R., Kim, S., & Patel, M. (2024). Digital twin applications in cranial biomechanics. *Journal of Biomedical Engineering*, 45(2), 155–170.
- Carter, D. R., & Hayes, W. C. (1977). The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 59(7), 954–962.
- Curtis N. (2011). Craniofacial biomechanics: an overview of recent multibody modelling studies. *Journal of anatomy*, 218(1), 16–25. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2010.01317.x>

- Dannhauer, M., Lanfer, B., Wolters, C. H., & Knösche, T. R. (2011). Modeling of the human skull in EEG source analysis. *Human brain mapping*, 32(9), 1383-1399.
- Gong, S. W., Lee, H. P., & Lu, C. (2008). Dynamic Response of a Human Head to a Foreign Object Impact. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55(3), 1226-1229. doi:10.1109/TBME.2007.912431
- Gonzalez, J., Nacy, S., & Youssef, G. (2020). Finite element analysis of human skull bone adaptation to mechanical loading. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 24(7), 753–764. <https://doi.org/10.1080/10255842.2020.1850703>
- Gümrükcü, Z., Kurt, S., & Köse, S. (2019). Effect of Root Resection Length and Graft Type Used After Apical Resection: A Finite Element Study. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 77(9), 1770.e1771-1770.e1778. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joms.2019.04.029>
- Hench, L. L., Jones, J. R., Institute of Materials, M., & Mining. (2005). *Biomaterials, Artificial Organs and Tissue Engineering*: CRC Press.
- Hollister, S. J. (2005). Porous scaffold design for tissue engineering. *Nature Materials*, 4(7), 518-524. doi:10.1038/nmat1421
- Huang, D., Huang, Y., Xiao, Y., Yang, X., Lin, H., Feng, G., . . . Zhang, X. (2019). Viscoelasticity in natural tissues and engineered scaffolds for tissue reconstruction. *Acta Biomaterialia*, 97, 74-92. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.08.013>
- Jasinowski, S. C., & Reddy, B. D. (2012). Mechanics of cranial sutures during simulated cyclic loading. *J Biomech*,

- 45(11), 2050-2054.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.05.007>
- Jaslow C. R. (1990). Mechanical properties of cranial sutures. *Journal of biomechanics*, 23(4), 313–321.
[https://doi.org/10.1016/0021-9290\(90\)90059-c](https://doi.org/10.1016/0021-9290(90)90059-c)
- Jiang, X., Yao, Y., Tang, W., Han, D., Zhang, L., Zhao, K., ... & Meng, Y. (2020). Design of dental implants at materials level: An overview. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 108(8), 1634-1661.
- Khademhosseini, A., & Langer, R. (2016). A decade of progress in tissue engineering. *Nature Protocols*, 11(10), 1775-1781. doi:10.1038/nprot.2016.123
- Köse, S., & Sofuoğlu, H. (2014). Alt çene kemiğindeki hasarın abutment boyu ve protez dolgu malzemesi kullanılarak giderilmesinin mandibula üzerindeki etkileri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(3), 211-219.
- Langer, R., & Tirrell, D. A. (2004). Designing materials for biology and medicine. *Nature*, 428(6982), 487-492. doi:10.1038/nature02388
- Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2001). Hydrogels for Tissue Engineering. *Chemical Reviews*, 101(7), 1869-1880. doi:10.1021/cr000108x
- Lieberman, D. E. (2011). *The evolution of the human head*. Harvard University Press.
- Marin, E., Boschetto, F., & Pezzotti, G. (2020). Biomaterials and biocompatibility: an historical overview.. *Journal of biomedical materials research. Part A*.
<https://doi.org/10.1002/jbm.a.36930>.
- McElhaney, J. H., Fogle, J. L., Melvin, J. W., Haynes, R. R., Roberts, V. L., & Alem, N. M. (1970). Mechanical

- properties of cranial bone. *J Biomech*, 3(5), 495-511.
doi:[https://doi.org/10.1016/0021-9290\(70\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0021-9290(70)90059-X)
- Mian, S. H., Moiduddin, K., Elseufy, S. M., & Alkhalefah, H. (2022). Adaptive mechanism for designing a personalized cranial implant and its 3D printing using PEEK. *Polymers*, 14(6), 1266.
- Middleton, J. C., & Tipton, A. J. (2000). Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices. *Biomaterials*, 21(23), 2335-2346.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(00\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(00)00101-0)
- Miles, B. A., Sinn, D. P., & Gion, G. G. (2006). Experience With Cranial Implant-Based Prosthetic Reconstruction. *Journal of Craniofacial Surgery*, 17(5).
- Mishra, S., & Chowdhary, R. (2019). PEEK materials as an alternative to titanium in dental implants: A systematic review. *Clinical implant dentistry and related research*, 21(1), 208-222.
- Oleksy, M., Dynarowicz, K., & Aebisher, D. (2023). Advances in biodegradable polymers and biomaterials for medical applications—a review. *Molecules*, 28(17), 6213.
- Peterson, J., & Dechow, P. C. (2003). Material properties of the human cranial vault and zygoma. *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology: An Official Publication of the American Association of Anatomists*, 274(1), 785-797.
- Prado, F. B., Rossi, A. C., Freire, A. R., & Ferreira Caria, P. H. (2014). The application of finite element analysis in the skull biomechanics and dentistry. *Indian Journal of Dental Research*, 25(3), 390-397. doi:[10.4103/0970-9290.138350](https://doi.org/10.4103/0970-9290.138350)

- Ptak, M., Ratajczak, M., Kwiatkowski, A., Sawicki, M., Wilhelm, J., Fernandes, F. A., & Druszcz, A. (2018). Investigation of biomechanics of skull structures damages caused by dynamic loads. *Acta of bioengineering and biomechanics*, 20(4).
- Ratner, B.D., Hoffman, A.S., Schoen, F.J. and Lemons, J.E. (2004) *Biomaterials Science—An Introduction to Materials in Medicine*. 2nd Edition. Academic Press, New York, 159-166.
- Ruan, J. S., Khalil, T., & King, A. I. (1991). Human Head Dynamic Response to Side Impact by Finite Element Modeling. *Journal of Biomechanical Engineering*, 113(3), 276-283. doi:10.1115/1.2894885
- Ruan, J. S., Khalil, T., & King, A. I. (1994). Dynamic Response of the Human Head to Impact by Three-Dimensional Finite Element Analysis. *Journal of Biomechanical Engineering*, 116(1), 44-50. doi:10.1115/1.2895703
- Saffarzadeh, M., Gillispie, G. J., & Brown, P. (2016, April). Selective Laser Sintering (SLS) rapid prototyping technology: A review of medical applications. In *Proceedings of the 53rd Annual Rocky Mountain Bioengineering Symposium, RMBS 2016 and 53rd International ISA Biomedical Sciences Instrumentation Symposium*, Denver, CO, USA (pp. 8-10).
- Sahoo, D., Deck, C., Yoganandan, N., & Willinger, R. (2013). Anisotropic composite human skull model and skull fracture validation against temporo-parietal skull fracture. *J Mech Behav Biomed Mater*, 28, 340-353. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.08.010>
- Santos, P. O., Carmo, G. P., Sousa, R. J. A. D., Fernandes, F. A., & Ptak, M. (2022). Mechanical strength study of a cranial

- implant using computational tools. *Applied Sciences*, 12(2), 878.
- Shim, K. W. (2023). Medical applications of 3D printing and standardization issues. *Brain Tumor Research and Treatment*, 11(3), 159.
- Shobha, E. S., Raghuveer, H. P., Nagesh, S., Vinay, K. S., Kumar, R. D., Prashanth, N. T., & Rangan, V. (2016, 16-18 Dec. 2016). Computational biomechanics in craniofacial fractures. Paper presented at the 2016 IEEE Annual India Conference (INDICON).
- Verma, S., Sharma, N., Kango, S., & Sharma, S. (2021). Developments of PEEK (Polyetheretherketone) as a biomedical material: A focused review. *European Polymer Journal*, 147, 110295.
- Wang, H., & Li, Y. (2024). 4D printing in cranial implant design. *Advanced Materials*, 36(5), 220–235.
- Wang, H., Meng, Z., Zhao, C. Y., Xiao, Y. H., Zeng, H., Lian, H., ... & Han, Q. Q. (2023). Research progress of implantation materials and its biological evaluation. *Biomedical Materials*.
- Williams D. F. (2008). On the mechanisms of biocompatibility. *Biomaterials*, 29(20), 2941–2953. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.04.023>
- Wood, J. L. (1971). Dynamic response of human cranial bone. *Journal of biomechanics*, 4(1), 1-12.
- Zhang, L., Sun, Y., & Lee, C. (2023). Nano-enhanced materials for cranial implants. *Nano Today*, 19, 302–315.

LABORATUVAR TİPİ LAZER MARKALAMA MAKİNESİ TASARIMI

Nuri ERGİN¹

Kübra TARIM²

Necati KOÇAK³

1. GİRİŞ

Lazer markalama, köklü bir endüstriyel lazer uygulaması olarak, ürün tanıma ve tanımlama süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Günümüzde, ürün sorumluluğu ve çevresel kaygıların artmasıyla birlikte bu teknoloji, endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla önem kazanmıştır. Lazer markalama, otomotiv sektöründe kaput altı parçalar, yapısal bileşenler, gövde panelleri, farlar ve tamponlar gibi uygulamalarda; elektrik ve elektronik endüstrisinde anahtarlar, fişler, konektörler, kapasitör muhafazaları ve bobinlerin etiketlenmesinde; gıda sektöründe ambalaj etiketlemesi, ev ve yaşam tarzı ürünleri, inşaat ve tarım gibi farklı alanlarda da yaygın uygulama alanlarına sahiptir. Markalama sürecinde kalite, esneklik, hız ve üretim maliyeti gibi katı gereklilikler dikkate alınmaktadır. Lazer işaretleme, alfanümerik kodlar, barkodlar (örneğin, teknik veriler, seri numaraları, onay numaraları, üretim

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, nergin@subu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9025-9419

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, kubratarim@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2560-3049.

³ Araştırma Görevlisi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, necatikocak@subu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0768-3479.

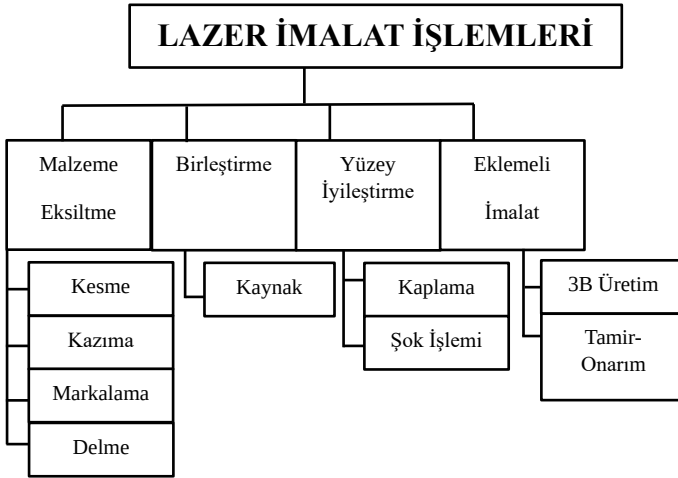
ve son kullanma tarihleri) ile işlevsel semboller ve şirket logoları gibi çeşitli formatlarda uygulanabilmektedir. Kodlanmış bilgiye sahip bu işaretlemeler, üretim süreçleri ve tedarik zinciri boyunca ürünlerin izlenebilirliğini sağlamaktadır. Özellikle servis parçaları ve tamir gereksinimleri için bu özellikler, izlenebilirliği kolaylaştırarak hesap verebilirlik ve garanti süreçlerine önemli katkılarda bulunmaktadır. Birçok endüstride, "Ürün Üzerinde Doğrudan İşaretleme" (Direct Part Marking, DPM) yöntemi, endüstriyel ürünlerin etkin bir şekilde tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Lazer teknolojisi, tüm malzeme türlerinde uygulanabilirliği sayesinde imalat endüstrisinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir [1-4].

Bu çalışmada, lazer modülü kullanılarak markalama, kazıma, oyma ve kesme işlemlerini gerçekleştirebilen laboratuvar tipi bir lazer markalama makinesi geliştirilmiştir. Geliştirme sürecinin ilk aşamasında, makinenin 3B tasarımı SolidWorks yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Tasarım aşamasını takiben, malzeme listesi hazırlanmış ve imalat süreci detaylı bir şekilde planlanmıştır. Üretim aşaması, belirlenen tasarım ve süreçler doğrultusunda başarıyla tamamlanmıştır. Geliştirilen lazer markalama makinesi, farklı malzemeler üzerinde markalama işlemleri için kullanılabilmektedir. Makine, reklamcılık, hobi, tekstil ve deri gibi çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. Bu özellikleriyle, lazer teknolojisinin esnek ve çok yönlü kullanımını destekleyen bir platform olarak öne çıkmaktadır.

2. LAZER TEKNOLOJİSİNİN TEMEL PRENSİPLERİ

Herhangi bir ortamda, belirli bir elementin atomları, molekülleri veya iyonları, farklı enerji düzeylerine sahiptir. Bu enerji düzeyleri arasında geçiş yaparken, iki enerji düzeyi

arasındaki enerji farkına eşit olan fotonlar yayar veya soğururlar. Yüksek enerjili bir atom, belirli bir frekansta foton yayma eğilimindeyken, aynı frekansta gelen bir ışıkla uyarılarak foton yayması teşvik edilebilir. Bu süreç sonucunda yayılan ışık, uyarıcı ışıkla senkronize olur ve faz uyumu sağlar. Tüm elementlerin atom yapılarında, yalnızca o elemente özgü olan bir elektron yerleşim düzeni bulunmaktadır. Bu düzen, atomların kararlı yörüngelerinde bulunan elektronlarının, dışarıdan bir enerji ile uyarılarak daha yüksek bir enerji düzeyine geçmesi ve ardından eski kararlı durumlarına geri dönmesi sırasında enerjiyi foton olarak dışarı salması ile karakterize edilir. Bu süreç, lazer teknolojisinin temelini oluşturan Uyarılmış Işınım ile Işık Güçlendirme (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) prensibidir. Lazer yöntemi, özellikle imalat uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 1’de lazer teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen imalat işlemlerine ilişkin şematik bir gösterim sunulmaktadır [5-8].



Şekil 1. Lazer Yöntemi ile Yapılan İmalat İşlemleri [1]

Lazer teknolojisi, üretim süreçlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir ve bu uygulamalardan en yaygın olanı lazer ile kesim işlemidir. Bu yöntem, farklı kalınlıklardaki birçok

malzeme türünü yüksek hassasiyetle kesebilme yeteneği sunmaktadır. Lazer teknolojisi, bilgisayar destekli tezgahlarla entegre edildiğinde, parçaların üzerinde konum ve boyut açısından yüksek doğrulukta delik delme işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Lazer kazıma ve oyma işlemleri, malzeme yüzeyinde ince yollar oluşturarak veya kanallar açarak kısmi malzeme kaldırma işlemlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, lazer teknolojisinin bir diğer önemli uygulama alanı, plastik ve metallerin lazer ışın kaynağı ile birleştirilmesi sürecidir. Lazerin temassız çalışma özelliği, erişimi zor kaynak işlemleri için büyük avantaj sağlamaktadır. Lazer teknolojisi, malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için de etkili bir araçtır. Yüzey kaplama, temizleme ve alaşımlama gibi işlemler lazer yardımıyla yüksek hassasiyetle gerçekleştirilebilmektedir. Bunun yanı sıra, lazer teknolojisi, eklemeli imalat (additive manufacturing) alanında da önemli bir rol oynamaktadır. Tel veya toz esaslı hammaddeler, lazer kafasının eksenel hareketi ile ergitme veya sinterleme işlemi uygulanarak karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesini mümkün kılmaktadır [9-11].

3. LAZER MARKALAMA: YÜKSEK KALİTELİ VE KALICI İŞARETLEME TEKNOLOJİSİ

Lazer markalama, parçalara yüksek kaliteli ve kalıcı kodlar yazdırmak için kullanılan etkili bir üretim yöntemidir. Bu işlem, mürekkep yerine ısı kullanılarak gerçekleştirildiği için, diğer markalama yöntemlerine kıyasla daha temiz, daha hızlı ve daha az bakım gerektiren bir alternatif sunmaktadır. Lazer markalama yöntemiyle doğrusal ve 2B kodlar ile optik karakterler içeren alfasayısal mesajlar, çeşitli yüzeylere yüksek hassasiyetle işlenebilmektedir. Markalama işleminin kalitesi ve türü, kullanılan lazer kafası, lens özellikleri ve dalga boyundaki farklılıklarla değişiklik gösterebilmektedir. Bu değişiklikler,

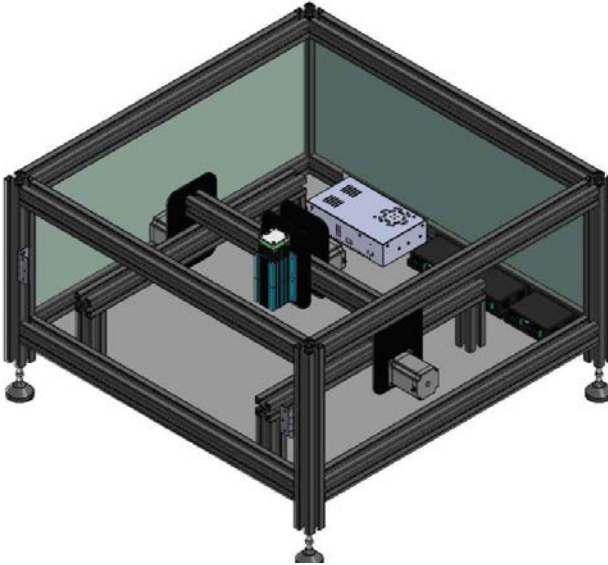
işlenen yüzeyde farklı markalama efektlerinin oluşmasına neden olur. Örneğin, ürün ve lazer arasındaki kimyasal reaksiyon sonucunda yüzeyde renk değişiklikleri meydana gelebilir. Ayrıca, yüzey renginin çıkarılması veya kaplamasının kesilerek alttaki farklı bir rengin görünmesi sağlanabilir. Lazer markalama, farklı malzeme türlerine özgü yöntemlerle uygulanabilmektedir. Örneğin, mukavva veya ahşap bazlı malzemelerde kontrollü yakma veya kömürleştirme işlemleri gerçekleştirilirken, polimerik malzemelerde girinti veya kabartma efektleri oluşturmak için malzemenin eritilmesi mümkündür. Bu çok yönlülük, lazer markalamayı farklı sektörler ve uygulamalar için ideal bir çözüm haline getirmektedir [12,13].

Lazer markalama sistemleri, geniş bir esneklik sunarak birçok sektörde imalat süreçlerinde yüksek düzeyde otomasyonu mümkün kılmaktadır. Bu yöntem, düşük bakım gereksinimi ve yüksek işlem hızları nedeniyle üretim uygulamaları için uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Gelişmiş lazer markalama teknolojileri, bileşen tepsisinin ya da lazerin konumunu değiştirmeye gerek kalmadan birden fazla malzeme üzerinde işlem yapabilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, daha geniş markalama alanları sağlayarak üretim hacmini artırmakta ve güç ayarlarının optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Lazer markalama yöntemi, malzeme yüzeyinde son derece hassas ve yüksek okunabilirlik sağlayan işaretlemeler üretmektedir. Bu özellik, lazer markalama sistemlerini, elektrokimyasal kazıma, mürekkep püskürtme ve nokta vuruşlu yazdırma gibi alternatif yöntemlere kıyasla daha avantajlı hale getirmektedir. Lazer markalama, özellikle daha hızlı bir süreç sunduğu için üretim verimliliği ve kapasitesini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Ek olarak, lazer markalama sistemlerinin sarf malzeme gerektirmemesi, bakım ve işletme maliyetlerini düşürmekte ve bu durum, sistemin ekonomik olarak sürdürülebilir olmasını

sağlamaktadır. Tüm bu avantajlar, lazer markalamayı imalat süreçlerinde önemli bir teknoloji haline getirmektedir [14-16].

4. CİHAZ TASARIMI VE İMALAT SÜRECİ

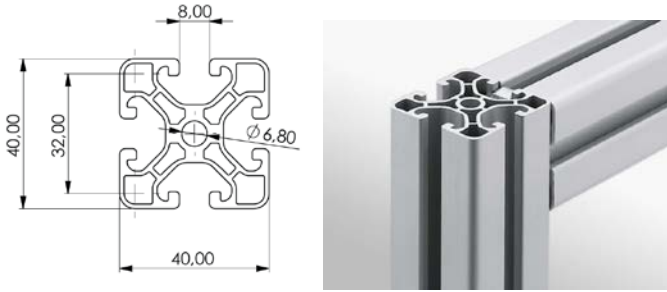
Kullanım şartlarına uygun olarak boyutsal ön tasarımı gerçekleştirilen cihaz için malzeme seçimi, standart elemanlar, kullanılacak lazer modülü ve güç aktarım sistemleri titizlikle belirlenmiştir. Cihazın üç boyutlu tasarımı, imalat çizimlerinin oluşturulması ve malzeme listesinin hazırlanması süreçlerinde SolidWorks yazılımı etkin bir şekilde kullanılmıştır. İmalat aşamasında kullanılan malzemeler ve uygulanan yöntemler, yapım sürecindeki sıralamaya uygun şekilde alt başlıklar halinde detaylı olarak açıklanmıştır. Bu sistematik yaklaşım, cihazın tasarım ve üretim sürecindeki her adımın açık bir şekilde dokümanite edilmesini sağlamış, imalat süreçlerinin izlenebilirliğini artırmıştır.



Şekil 2. Makina Tasarımı

4.1. Mekanik Sistem Montajı

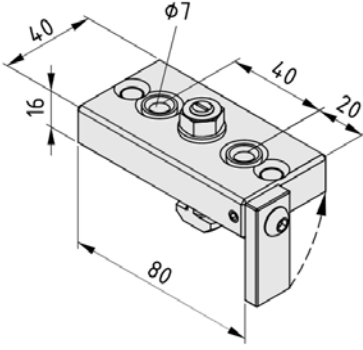
Makinenin işleme alanı X:520 mm ve Y:480 mm olarak belirlenmiş ve bu alanı çevreleyen kabinin boyutları 700x700 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. İşleme sırasında lazer modülünün Z eksenini sabit tutulmuş, işlemler X ve Y eksenlerinde gerçekleştirilmek üzere yapılandırılmıştır. Tahrik sistemi, motorlardan gelen gücün triger kayışı aracılığıyla iletilmesi esasına dayandırılmıştır. Makine tasarımında dikkate alınması gereken temel özellikler; yüksek mukavemet, yüksek rijitlik, hafiflik ve dinamik kararlılık olarak belirlenmiştir. Bu kriterlere uygun olarak, makine şasesinde 40x40 Alüminyum sigma profiller kullanılmıştır (Şekil 3). Alüminyum sigma profillerin tercih edilmesinin başlıca nedenleri; hafiflikleri, kolay montajlanabilir olmaları, sağlam yapıları ve düzgün geometrik özellikleridir. Ayrıca, bu profillerin yüksek hızlarda düşük eylemsizlik momenti oluşturarak ivmelenme sırasında titreşimi minimize etme yeteneği, makinenin dinamik performansını artırmaktadır. Böylece, işleme sırasında oluşabilecek hassasiyet kayıpları önlenmekte ve sistemin genel stabilitesi sağlanmaktadır.



Şekil 3. 40x40 Alüminyum Sigma Profil

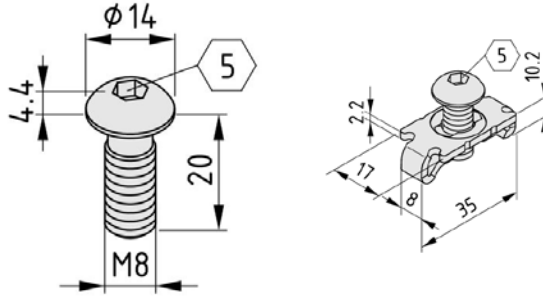
Alüminyum sigma profillerin montajlanabilmesi için, profiller üzerinde belirlenen noktalardan delik delme ve vida açma işlemlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlemlerin hassas ve doğru bir şekilde yapılabilmesi için delik mastarları kullanılmıştır (Şekil 4). Delik mastarları, delme

işlemleri sırasında gerekli olan doğruluğu sağlamak ve montaj sürecindeki hata payını minimize etmek amacıyla tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, profil bağlantılarının yüksek hassasiyetle yapılmasına olanak tanıyarak, montaj işleminin hızını ve güvenilirliğini artırmıştır.



Şekil 4. Delik Mastarları

Sigma profillerin birleştirme işlemleri, boyutlarına uygun bağlantı elemanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler, geçme yöntemi ve vida yardımıyla uygulanmıştır. Kullanılan profil boyutlarına ve kanalların yapısına uygun olarak M8 bağlantı elemanları tercih edilmiştir. Montaj işlemi sırasında kullanılan bağlantı elemanları, profillerin sağlam ve rijit bir şekilde birleştirilmesini sağlarken aynı zamanda kolay montaj avantajı sunmuştur. Bağlantı seti, Şekil 5'te detaylı olarak gösterilmiştir. Bu yaklaşım, tasarımın genel stabilitesini artırarak sistemin dinamik performansına katkıda bulunmuştur.



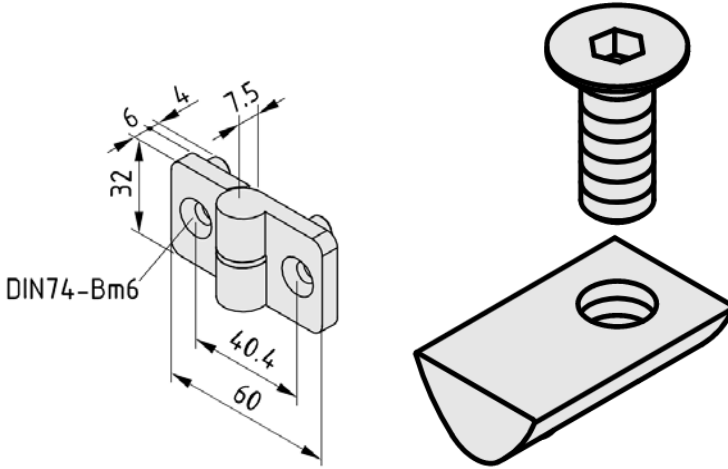
Şekil 5. Profil Bağlantı Seti

Profil bağlantıları, kayma ve gevşeme olmaksızın istenilen rijitlik sağlanarak profil içerisine yerleştirilmiş ve montaj işlemleri tamamlanmıştır. Sigma profillerin hızlı montajlanabilirliği ve ergonomik yapısı, bu malzemelerin tercih edilmesinde önemli bir etken olmuştur. Montaj sırasında kullanılan bağlantı elemanları, profillere istenilen noktalardan kolaylıkla bağlanabilir ve gerektiğinde aynı kolaylıkla çıkarılabilir bir yapıya sahiptir. Lazer markalama işlemi sırasında çalışanların güvenliğini sağlamak amacıyla makine, bir kabinle çevrelenmiştir. Kabinin dış yüzeyleri, profil oluklarına uyacak şekilde kesilmiş plakalarla kaplanmıştır. Tüm kabin boyunca, 8 mm kalınlığında polikarbon plakalar kullanılmıştır. Polikarbon plakalar, makine koruma camı olarak yaygın bir şekilde tercih edilmekte olup, özellikle kırılma ve darbeye karşı yüksek direnç göstermeleri, yüksek mekanik dayanım ve elastikiyet özellikleri nedeniyle güvenlik açısından idealdir. Bu yapı, lazer işlemleri sırasında hem güvenli bir çalışma ortamı sağlamakta hem de kabinin sağlamlığını ve dayanıklılığını artırmaktadır.



Şekil 6. Polycarbon Plakaların Montajlanması

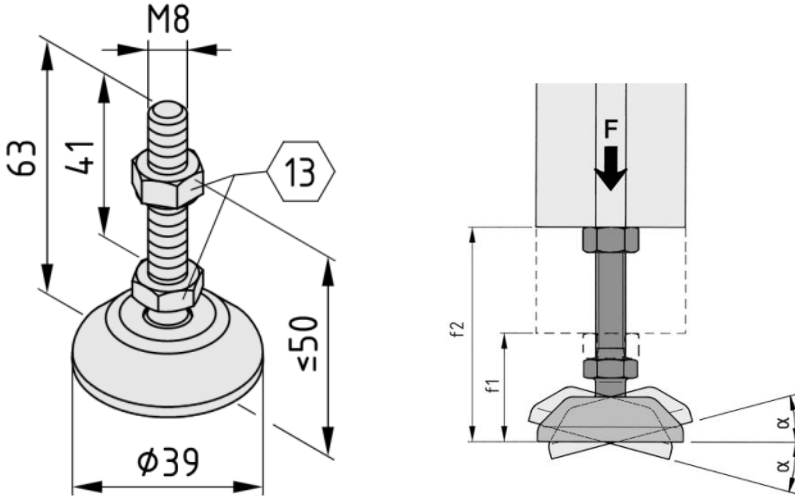
Makine koruma sisteminin ön kısmına menteşeler yardımı ile kapak montajı yapılmıştır. Profil kanallarına uygun şekilde tasarlanmış sabitleme seti ile polycarbon plakalar profile montajlanmıştır. Sigma profile uygun tasarlanan menteşe ve montaj resimleri Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Menteşelerin Bağlanması

Makine koruma sisteminin dış iskeleti montaj işlemi tamamlandıktan sonra, yerden yüksekliğini ayarlanabilmesi için

sigma profillere ait ayaklar monte edilmiştir. Bu yüksekliği ayarlanabilir ayaklar, eğimli plaka ayakları sayesinde düz olmayan zemin koşullarında da dengeleme sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ayaklar, profilin göbek deliğine yerleştirilen dişli mekanizma aracılığıyla monte edilmiştir. Bu yapı, ayakların kolayca monte edilip çıkarılabilmesine ve zemine uyum sağlayarak sistemin genel stabilitesinin artırılmasına olanak tanımaktadır. Ayakların teknik resimleri ve montajlanmış hali, Şekil 8'de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu özellikler, makinenin farklı zemin koşullarında güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 8. Yüksekliği Ayarlanabilir Ayakların Bağlanması

Step motor ve lazer modülünün X ve Y eksenlerinde hareket etmesini sağlamak amacıyla, alüminyum plakalar hazırlanmıştır. Bu plakalar, sigma profiller üzerinde tekerlekler yardımıyla hareket etmektedir. Hareket sisteminin sorunsuz çalışabilmesi için sigma profillere uyumlu tekerlekler seçilmiş ve bağlantılar vida, somun ve pul kullanılarak güvenli bir şekilde yapılmıştır. Tekerleklerin işlevlerini yerine getirebilmesi için 625ZZ rulmanlar kullanılmıştır. Bu rulmanlar, düşük sürtünme ve

yüksek dayanıklılık özellikleri ile hareket sisteminin verimliliğini artırmıştır. Hazırlanan alüminyum plakaların sigma profillere bağlı ve montajlanmış hali, Şekil 9'da detaylı olarak gösterilmektedir. Bu tasarım, hareket sisteminde yüksek hassasiyet, düşük sürtünme ve dinamik kararlılık sağlarken, sistemin uzun ömürlü ve stabil çalışmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 9. Plakaların Profile Bağlanması

4.2. Motor ve Sürücü Montajı

Sistemde kullanılan motorlar, makinenin X ve Y eksenlerinde hareket sağlamaktadır. Z ekseninde herhangi bir hareket gereksinimi bulunmadığı için bu eksene yönelik motor bağlantısı yapılmamıştır. Makinenin senkronize ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla, X ve Y eksenlerinde kullanılan motorların aynı özelliklere sahip olması tercih edilmiştir. Bu seçim, eksenler arası uyumu artırmakta ve hareket sisteminin hassasiyetini desteklemektedir. Sistemde kullanılan motorların teknik özellikleri, Tablo 1'de detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Kullanılan Step Motor Özellikleri

X Eksen		Y Eksen		Diyagram
Hybrid Stepper Motor Tipi 57HS76				
Özellikler				
Adım	1.8° +/- %5	Direnç	1.1 +/-	
Açısı			%10 Ω	
Faz	2	İndüktans	3.6 +/-	
Sayısı			%20	
			mH	
Yalıtım	100MOhm	Tutma	19	
Direnci	(500 V DC)	Torku	kg.cm	
Yalıtım	B	Akım	3.0 A	
Sınıf				



4.3. Hareket Sistemi ve Güç İletimi

Makine eksenlerinin hareketini sağlamak için çeşitli tahrik sistemleri kullanılabilmektedir. Bu sistemler arasında somun ve vidalı mil tahrik sistemi, kremayer dişli mekanizması, trigger kayış mekanizması ve lineer kızak-araba mekanizmaları bulunmaktadır. Tasarımda, hareketin güvenilir ve hassas bir şekilde iletilmesi amacıyla standart trigger kayış mekanizması ve kaplin tercih edilmiştir (Şekil 10). Y ekseninde ileri-geri hareket ve X ekseninde sağa-sola hareket, motorun dönme hareketi ile birlikte kaplini saran trigger kayışının rulmanları döndürmesi sayesinde sağlanmaktadır. Bu mekanizma, sistemin düzgün ve senkronize bir şekilde hareket etmesine olanak tanımaktadır. Trigger kayış mekanizmasının kullanımı, düşük bakım gereksinimi, yüksek hızlarda çalışma yeteneği ve hareketin hassas bir şekilde iletilmesi gibi avantajlar sunarak sistemin performansını artırmaktadır.

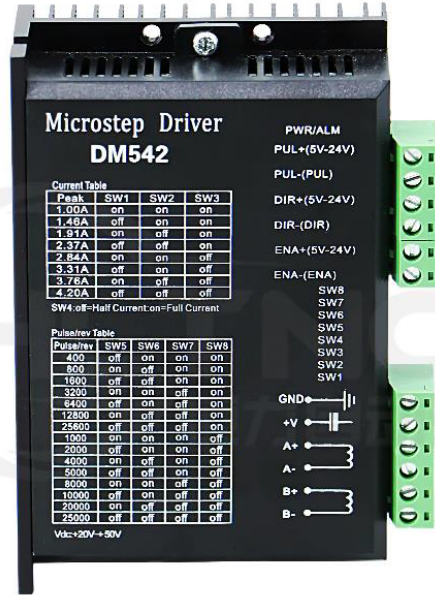


Şekil 10. Step Motor Kaplin Bağlantısı

4.4. Step Motor Sürücüleri ve Kontrol Mekanizması

Step motor sürücüleri, step motorların hassas bir şekilde kontrol edilmesi için kullanılmaktadır. G kodları aracılığıyla verilen komutlar, sürücüler tarafından işlenerek motorun belirtilen yönde ve hızda hareket etmesi sağlanmaktadır. Step motorların belirli bir yönde ve hızda çalıştırılabilmesi için sargılara belirli bir sırayla darbeler uygulanması gerekmektedir. Motorun adım sayısı, uygulanan darbe sayısına bağlıdır. Fazlara uygulanacak darbeler, basit bir anahtarlama sistemi ile kontrol edilebilir. Bu işlemi gerçekleştiren elektronik devreler, step motor sürücü devreleri olarak adlandırılmaktadır. Günümüzde, elektronik devre teknolojilerinin gelişimi sayesinde bu işlem oldukça kolay ve hassas bir şekilde yapılabilmektedir.

Step motorların çalışma özelliklerine ve kullanılacak uygulama alanına göre tasarlanmış mikroişlemci kontrollü sürücü kartları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sürücü kartları, motorların istenilen hızda ve hassasiyette çalışmasını sağlamak için optimize edilmiştir. Bu özellikleri sayesinde, adım motorlar karmaşık hareket kontrol sistemlerinde kolaylıkla entegre edilerek yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılabilmektedir.

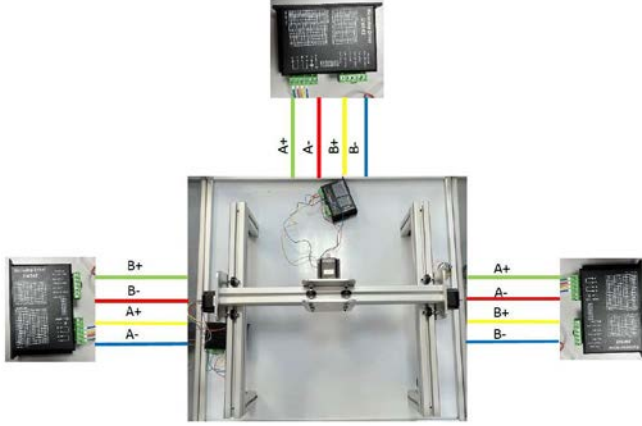


Şekil 11. Lazer Markalama Tezgâhında Kullanılan Step Motor Sürücüsü

Tablo 2. Motor sürücü teknik bilgiler

Mikro Adım Sürücüsü DM542			
Teknik Özellikler			
İsim	DM542 Adım Motoru Sürücüsü		
Gerilim	24 - 50 V DC		
Akım	1.0 - 4.2 EIN		
Mikro Akım	256		
Açıklama	Min.	Önerilen	Max.
Besleme Gerilim VDC(3A)	24	36	50
Çıkış Akımı (Tepe Değeri)A	1	/	4.2
Mantıksal Kontrol Giriş Akımı(mA)	8	10	20
Adım Impuls Tepki Frekansı (kHz)	0	/	200
Soğutma	Doğal Soğutma		
Çevre Kullanımı	Çevre	Toz, yağ ve korozyonlu gazlar	
	Nem	40 – 90 %RH	
	Sıcaklık	0 – 50 °C	
	Titreme	5.9 m/s*s Max	

Makinenin X ve Y eksenlerindeki hareketini sağlamak amacıyla toplamda üç adet step motor sürücüsü kullanılmıştır. Y ekseninde kullanılan iki motorun senkronize bir şekilde ileri ve geri hareket edebilmesi için, motorlardan biri sürücüye ters bağlantı yapılarak monte edilmiştir. Sürücülerin doğru çalışmasını sağlamak ve kısa devre riskini önlemek amacıyla, sürücü devrelerinde DIR- (yön kontrolü) ve PUL- (darbe sinyali) bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Bu bağlantılar, sürücünün sinyal akışını ve motor hareketini kontrol ederek eksenler arasında uyumlu bir hareket sistemi oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu yapı, makinenin hareket sisteminde güvenilirlik ve hassasiyet sağlarken, senkronize hareket gerektiren uygulamalar için uygun bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 12. Motor ve Motor Sürücü Bağlantı Şeması

4.5. Lazer Modülü

Diyot lazer sistemleri, yayıcılarından dikey (y eksen) ve yatay (x eksen) eksenlerde toplanmayan ışık yaymaktadır. Bu sistemlerde, y eksenindeki sapma, x eksenindeki sapmadan önemli ölçüde daha yüksektir. Bu farklılık nedeniyle, y eksen "hızlı eksen", x eksen ise "yavaş eksen" olarak adlandırılmaktadır. Yüksek güçlü diyot lazer üreticileri, lazerlerin sapma dağılımı için teknik spesifikasyonlar sağlamaktadır.

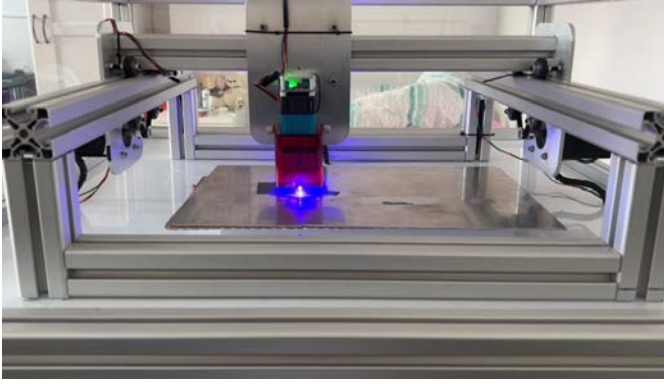
Standart lazer sistemlerinde, lazer ışınını odaklamak için genellikle yalnızca dışbükey bir lens kullanılmaktadır. Bu tasarım, dikdörtgen lazer noktası oluşumuna neden olmakta ve birçok lazer gravürcü tarafından kullanılmaktadır. Ancak, daha gelişmiş lazer gravür sistemlerinde, dışbükey lense ek olarak Hızlı Eksen Kolimatör (FAC) Lens adı verilen bir optik düzenek de kullanılmaktadır. FAC lens, yarı iletken bir lazer diyottan (LD) yayılan ışığı hızlı eksen yönünde toplayan bir optik mercek işlevi görmektedir. LD'nin hızlı eksen yönünde büyük bir sapma açısı bulunduğundan, çıkış ışığı toplanmadıkça verimli bir şekilde kullanılamaz. FAC lens, LD'den yayılan ışığı birkaç miliradyan (mrad) veya daha düşük bir radyasyon açısına sahip dar bir ışın haline getirir. Bu şekilde, lazer ışını verimli bir şekilde kullanılarak sistemin genel performansı artırılmaktadır.

Sistemde kullanılan lazerin genel özellikleri;

- Lazer dalga boyu: 445nm-450nm mavi lazer
- Nokta tipi: Sabit odaklı, odak uzunluğu 50mm
- Çıkış gücü: 5.5W
- Sürücü modu: harici ACC sabit akım sürücü
- Soğutma yöntemi: hava soğutma
- Çalışma gerilimi: 12V DC
- Kabuk malzemesi: alüminyum, yüzey anodize
- Kolimatör lens: optik cam kaplama



Şekil 13. Sistemde Kullanılan Lazer Modülün Teknik Özellikleri



Şekil 14. Lazer Markalama Makinası

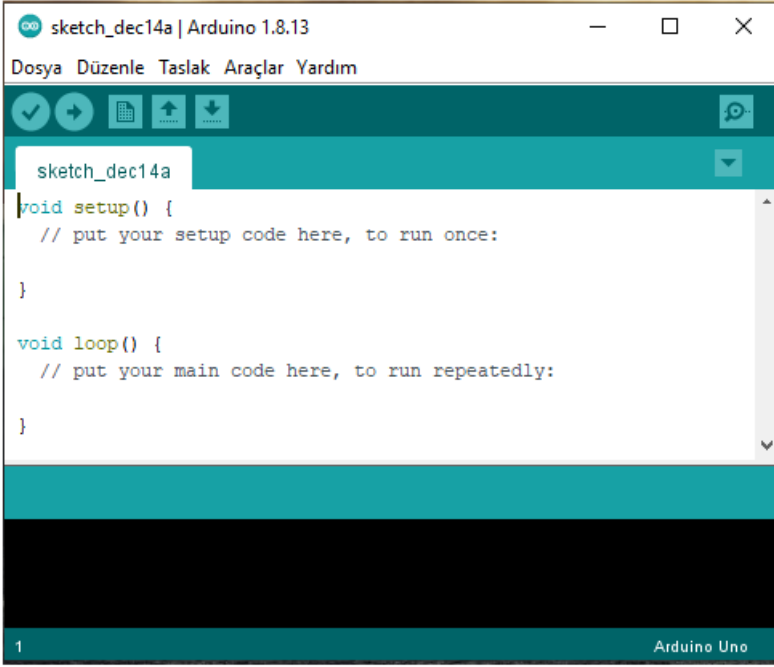
4.6. Kontrol Kartları ve Sistem Yönetimi

Bu tür tezgahlarda motor hareketlerini kontrol etmek için kontrol kartları kullanılmaktadır. Kontrol kartları, genellikle .stl ve .dxf uzantılı dosyaları okuyabilen bir arayüz üzerinden çalışmaktadır. Kullanılan kontrol kartı, motorların eksen konumlarının ve hızlarının hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Seçilen kontrol kartı, yalnızca eksen hareketlerini yönetmekle kalmayıp, aynı zamanda soğutma, limit switch bağlantıları, acil durdurma (emergency stop) gibi özellikler sunarak sistemin işlevselliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır. X, Y ve Z eksenlerinin hareketi için farklı kontrol kartları ve yazılımlar tercih edilebilir. Ancak, bu çalışmada

sistemin kontrolü için bir Arduino kartı kullanılmıştır. Arduino kartı, esnek ve programlanabilir yapısıyla, hareket kontrolü ve diğer fonksiyonlar için uygun bir çözüm sağlamıştır. Bu kontrol sistemi, lazer tezgahının güvenilir ve verimli bir şekilde çalışmasını mümkün kılarak, tasarım ve uygulama süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır.

4.7. Arduino Platformu ve Lazer Makinesinde Kullanımı

Arduino, açık kaynak kodlu yazılım ve donanım altyapısına sahip, esnek ve kullanıcı dostu bir mikrodenetleyici platformudur. Bu çalışmada, lazer makinesinin istenilen programı kolaylıkla çalıştırabilmesi nedeniyle Arduino UNO kart sistemi tercih edilmiştir. Arduino UNO kart üzerinde, kartı bir bilgisayara bağlamak için bir USB girişi bulunmaktadır. Bu USB bağlantısı, kart ile iletişim kurulmasını ve programlama işlemlerinin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Arduino kartın çalışması için gerekli olan güç, USB hattı üzerinden ya da harici bir güç kaynağı ile sağlanabilmektedir. Harici güç kaynağı ile kullanım durumunda, kartın üzerindeki güç girişine çıkışı 7V-12V aralığında olan bir adaptör bağlanmaktadır. Makinedeki motorların manuel olarak hareket ettirilmesi, programlama arayüzünde adımlar tanımlanarak gerçekleştirilmektedir. Lazer modülünün çalıştırılması için ise önceden hazırlanmış bir yazılım programı kullanılmıştır. Bu yazılım, lazer modülünün hassas ve senkronize bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Arduino kartın arayüzü ve bağlantıları, Şekil 15'te detaylı olarak gösterilmiştir. Bu arayüz, kullanıcıların kart ile etkileşime geçmesini kolaylaştırarak, sistemin genel işlevselliğine katkıda bulunmaktadır.

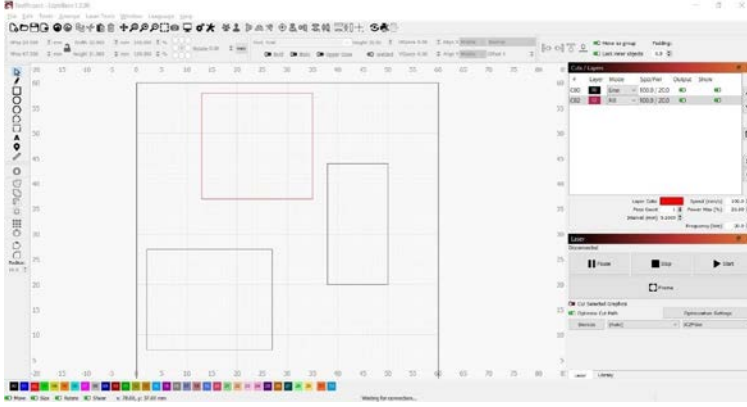


Şekil 15. Arduino Kart Arayüzü

4.8. LightBurn Yazılımı ve Lazer Makinesi Kontrolü

LightBurn, lazer kesiciler için tasarlanmış kapsamlı bir düzenleme, düzenleme ve kontrol yazılımıdır. Bu yazılım, ek bir araca ihtiyaç duymadan lazer cihazı ile doğrudan bağlantı kurabilmektedir. LightBurn, kullanıcı dostu arayüzü sayesinde lazer işlemleri için verimli ve kolay bir çözüm sunmaktadır. LightBurn, çeşitli vektör grafik ve görüntü formatlarını desteklemektedir. Yazılım, AI, PDF, SVG, DXF, PLT, PNG, JPG, GIF ve BMP gibi geniş bir dosya formatı yelpazesi ile uyumludur. Bu formatlardaki resim ve grafiklerin içe aktarılmasını ve kazıma işlemlerinin hassasiyetle gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Programın arayüzü, kullanıcıların lazer kesim ve kazıma işlemlerini kolayca planlayıp yönetmelerine olanak tanımaktadır. Şekil 16, LightBurn yazılımının arayüzüne ait bir görsel sunarak, programın genel işleyişine dair bir fikir vermektedir. LightBurn,

lazer kazıma ve kesim işlemlerinde etkinlik, doğruluk ve kullanıcı kolaylığı açısından güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 16. LightBurn Arayüzü

4.9. Lazer Markalama Makinesinin Test Edilmesi ve Malzeme Üzerindeki Etkileri

Tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen lazer markalama makinesi ile çeşitli malzemeler üzerinde markalama işlemleri uygulanmıştır. Bu testler, üretilen cihazın çalışmasının doğruluğunu kontrol etmek ve lazer markalama işleminin farklı malzeme türleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Test sürecinde, farklı malzeme türleri üzerinde lazer ile işlem yapılmış ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Bu süreç, makinenin çeşitli malzeme türlerinde sağlayabileceği hassasiyet, kalite ve uygulama performansının belirlenmesi açısından önemli bir değerlendirme sağlamıştır. Malzeme türlerine göre lazer işlemi sonrasında elde edilen sonuçlar, Tablo 3'te detaylı olarak sunulmuştur. Bu tablo, lazer markalama makinesinin farklı yüzeyler üzerindeki performansını karşılaştırmalı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu testler, makinenin farklı sektörlerdeki uygulama potansiyelini ve lazer markalama işlemlerindeki etkinliğini değerlendirme açısından kritik bir adım olmuştur.

Tablo 3. Malzeme Çeşitlerine göre Lazer ile İşlem

Malzemeler	Markalama	Kazıma	Kesme	Not
Gri Kağıt< 0.5 mm	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
3mm Kontrplak	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Kontrplak < 5mm	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Kontrplak < 8mm	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
MDF< 2 mm	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Tuval	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Plastik	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Akrilik	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
ABS Pano < 2mm	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
PVC Pano < 2mm	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
PVC Pano	✓	✓	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Baskılı Devre Kartı	✓	✓	✓	
Bakalit	✓	✓	X	
Karbonfiber	✓	✓	X	
Metal Boyama	✓	✓	X	
Bambu	✓	✓	X	
Polipropilen Levha	✓	✓	X	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Dokuma Olmayan Kumaş	X	X	✓	
Pamuk	X	X	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Keten	X	X	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Kadife	X	X	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Koyu Alümina	✓	X	X	
Açık Alümina	✓	X	X	
İnci Pamuğu	X	X	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Kt Pano	X	X	✓	Kesim sonrası kenarlarda siyah çizgi
Paslanmaz Çelik	✓	X	X	



Şekil 17. Deneysel Olarak Gerçekleştirilen Markalama İşlemi

5. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, reklamcılık, hobi, tekstil ve deri gibi alanlarda kullanılabılme potansiyeline sahip, lazer modül kullanılarak markalama, kazıma, oyma ve kesme işlemlerini gerçekleştirebilen düşük bütçeli bir lazer markalama makinesi geliştirilmiştir. SolidWorks programı yardımıyla tasarlanan ve uygun malzeme seçimi ile üretilen bu lazer markalama makinesi ile elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

5.1. Makine Üretimi

Endüstride küçük ölçekli üretimlerde ve çeşitli malzemelerin markalanmasında kullanılabilecek, 5,5 kW gücüne sahip bir lazer markalama makinesi başarılı bir şekilde üretilmiştir.

5.2. Test İşlemleri

Geliştirilen cihaz ile farklı malzemeler üzerinde kesme, kazıma ve markalama işlemleri test edilmiştir.

5.3. Ahşap Malzemelerde İşlem

Ahşap malzemelerde kesme ve kazıma işlemleri doğru sonuçlar vermiştir. Ancak kesim işlemi sonrasında kenarlarda

siyah kalıntılar oluştuğu gözlemlenmiştir. Kesme işlemi için güç (power max) %80, hız (speed) 5 mm/s olarak ayarlanmıştır.

5.4. Metal Malzemelerde İşlem

Metal yüzeylerde lazer modül yansıması nedeniyle markalama işlemi ilk denemelerde başarılı olmamıştır. Metal yüzey boyandıktan sonra markalama işlemi doğru bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Metal kazıma işlemi sırasında güç (power max) %100 ve geçiş sayısı (pass count) 1 olarak ayarlanmış, bu parametrelerle başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, üretilen lazer markalama makinesinin farklı malzeme türlerinde kullanılabilirliğini ve lazer işlemlerindeki hassasiyetini ortaya koymaktadır. Makinenin geliştirilmesiyle, özellikle küçük ölçekli üretim ve özel uygulamalarda etkili bir çözüm sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Tarım, K. (2023). Lazer markalama makinesi tasarımı ve imalatı (Master's thesis).
- [2] Wagner, S., Angerschmid, A., Saranti, A., Gollob, C., Ritter, T., Krassnitzer, R., ... & Nothdurft, A. (2024). Automatic detection of color markings and numbers on trees in point clouds from Personal Laser Scanning (PLS) and Terrestrial Laser Scanning (TLS). *Ecological Informatics*, 82, 102709.
- [3] Velotti, C., Astarita, A., Leone, C., Genna, S., Minutolo, F. M. C., & Squillace, A. (2016). Laser marking of titanium coating for aerospace applications. *Procedia Cirp*, 41, 975-980.
- [4] Denkena, B., Grove, T., & Seibel, A. (2016). Direct part marking by vibration assisted face milling. *Procedia Technology*, 26, 185-191.
- [5] Mungan, M. C. (2006). Lazer ile kesme ve Endüstriyel Uygulamaları (Master's thesis, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi).
- [6] Smith, W. V., (1970), *Laser Applications*. Artech House Inc, USA, 1- 3,
- [7] Karaaslan, A. (2009). Lazer İle Malzeme İşlemleri. Birinci Basım, Literatür Yayınları, İstanbul, 80-90.
- [8] Najeeb, S., Khurshid, Z., Zafar, M. S., & Ajlal, S. (2016). Applications of light amplification by stimulated emission of radiation (lasers) for restorative dentistry. *Medical Principles and Practice*, 25(3), 201-211.
- [9] Bayraktar Ş. (2015), Farklı Kesme Yöntemleri ile Üretilen Silisli Sac Paketlerinin Elektrik Makinalarının

Performansı Üzerine Etkisi, (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [10] Cherif, M., (1990). Precision cutting of hardwoods by using a high energy carbon dioxide laser. Michigan State University Institute of Science. Metallurgy Mechanics and Materials Science. Master's Thesis, pp. 81.
- [11] Chen, Z., Yang, S., Wang, C., Hu, X., Shao, X., Wang, J. 2014. A study of fiber laser welding of galvanized steel using a suction method. Journal of Materials Processing Technology, 214(7):, 1456–1465.
- [12] J. Qi, K.L. Wang, Y.M. Zhu, 2003, A study on the laser marking process of stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, Volume 139, Issues 1–3, Pages 273-276.
- [13] P. Czyżewski, D. Sykutera, M. Rojewski, 2022, The Impact of Selected Laser-Marking Parameters and Surface Conditions on White Polypropylene Moldings.
- [14] Gorny S.G.Emelcekov I.R, (1990) Laser technology and its application in metalworking, LDNTP, 42-47.
- [15] Ezpelata D.T. (2013), Contribution to Laser Milling Process Parameters Selection for Process Planning Operations, (Ph.D Thesis), University of Girona, Girona.
- [16] Kaminski D., (2011), Laser Marking. How to choose the best laser for your marking application, Laserfocusworld.

KAZANLARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ İYİLEŞTİRMELERİ: EKSERJİ ANALİZİ YAKLAŞIMI

İbrahim KIRBAŞ¹

1. GİRİŞ

Bir toplumun veya ülkenin enerji ihtiyacını karşılamakta ciddi zorluklar yaşaması durumu enerji krizi olarak tanımlanabilir. Bu kriz, çeşitli sebeplerle enerji kaynaklarının yetersiz veya erişilebilir olmaması sonucu ortaya çıkar.

Enerji krizi, yalnızca bir ülkede değil, global ölçekte de büyük etkiler yaratabilir. Bu tür krizler, enerji arzında kesintiler ve yüksek fiyatlar nedeniyle ekonomileri sarsabilir, yaşam kalitesini düşürebilir ve sosyal huzursuzluklara yol açabilir. Bu nedenle, enerji krizlerini önlemek için sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmek, enerji verimliliğini artırmak ve enerji altyapılarını güçlendirmek oldukça önemlidir.

Enerjinin verimli kullanılması, sadece bireyler için değil, tüm toplumlar ve gezegen için önemli bir gereklilik haline gelmiştir. Bu hem ekonomik hem de çevresel anlamda daha sürdürülebilir bir geleceğin temelini oluşturur.

Enerjinin verimli kullanılması, birçok açıdan önemlidir. Enerji tasarrufu ve enerji verimliliği, aşağıda sıralanan bir dizi önemli nedenlerden dolayı gereklidir:

1. **Çevresel Etkiler:** Fosil yakıtların aşırı kullanımı, sera gazı emisyonlarının artmasına ve dolayısıyla iklim

¹ Doç. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, ikirbas@mehmetakif.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5560-638X.

değişikliğine yol açmaktadır. Enerji tasarrufu ve verimliliği, daha az enerji tüketerek çevresel zararları azaltmaya yardımcı olur.

2. **Doğal Kaynakların Korunması:** Fosil yakıtlar sınırlı kaynaklardır. Enerji verimliliği, bu kaynakların daha uzun süre kullanılmasını sağlar. Aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek, doğal kaynakların tükenme hızını yavaşlatır.
3. **Ekonomik Tasarruflar:** Enerji verimli cihazlar ve sistemler kullanmak, enerji tüketimini azaltarak işletmelerin ve hanelerin maliyetlerini düşürür. Bu da ekonomiye genel bir katkı sağlar.
4. **Enerji Bağımsızlığı:** Enerji tasarrufu ve verimliliği, enerji talebini azaltarak, dışa bağımlılığı ve enerji ithalatını azaltmaya yardımcı olur. Bu, ülkenin enerji güvenliğini artırır.
5. **Enerji Erişiminin Artırılması:** Enerji tasarrufu sayesinde, enerji daha verimli bir şekilde kullanılabilir ve bu sayede daha geniş alanlara ve topluluklara enerji sağlanabilir.
6. **Sosyal ve Sağlık Faydaları:** Daha verimli enerji kullanımı, hava kirliliğini azaltarak halk sağlığına katkı sağlar. Ayrıca, sürdürülebilir enerji çözümleri, toplumların yaşam kalitesini artırabilir.

Ülkemizde de enerji verimliliği çalışmaları önem kazanmıştır. Bu sebeple yürürlüğe konulmuş bazı yönetmelikler ile enerji verimliliği konuları çerçevesi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda 11 Kasım 1995 tarih ve 22460 sayılı Resmî gazetede “*Sanayi Kuruluşlarının Enerji Tüketiminde Verimliliğin Arttırılması İçin Alacakları Önlemler Hakkında*

Yönetmelik'' ikinci kısım Enerji Verimliliğini Arttırıcı Önlemler başlığı Madde 6-A bendi kapsamında yer alan ifade;

Mevcut tesisler aşağıda belirtilen alanlarda önlemler olarak enerjinin verimli kullanımı için çaba gösterirler.

- a) Yakıtların, mevcut yakma sisteminin en verimli şekilde kullanımı ile yakılması,
- b) Isıtma, soğutma, iklimlendirme ve ısı transferinde en yüksek verimin elde edilmesi,
- c) Isı yalıtımının standartlara uygun olarak yapılması, ısı üreten, dağıtan ve kullanan tüm ünitelerin yalıtılarak ısı kaybının en aza indirilmesi,
- d) Atık ısı geri kazanımı,
- e) Isının işe dönüştürülmesinde verimliliğin arttırılması,
- f) Elektrik tüketiminde kayıpların önlenmesi,
- g) Elektrikten iş, ısı ve benzeri dönüşümlerde verimliliğin artırılması, mümkün olduğu takdirde bileşik ısı-güç üretimine geçilmesi,
- h) Otomatik kontrol uygulamaları ile insan faktörünün en aza indirilmesi,
- ı) Hava kirletici emisyonların minimuma çekilmesi ve tüketilen enerji atıklarının çevreyi en az kirletecek şekilde saklanması için azami çaba gösterilmesi (Resmi Gazete, 1995).

Aynı yönetmelikte Madde 6'nın B bendi ise, *“Yeni Kurulacak Tesislerde Enerji Verimliliğini Arttırıcı Önlemler”* hakkındaki düzenlemeleri içermektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere ülkemizde yaklaşık 30 yıllık bir süreç boyunca enerji verimliliği ile ilgili çalışmalar sürdürülmektedir. Bu çalışmaların yürütülmesi için yönetmelikler çıkartılmaktadır.

1.1. Termodinamik Temeller

Ekserji analizi, ikinci yasanın uygulanmasını içerdiğinden, termodinamiğin temel yasalarının (özellikle ikinci yasa) anlaşılması önemlidir. Bununla birlikte bazı temel kavramların (İç Enerji, Entalpi, Entropi, Ekserji vb.) tanımlanması ve kazanlarda nasıl kullanılacaklarının belirlenmesi gerekir.

Termodinamiğin ikinci yasası; Enerjinin niceliğinin (miktarının) yanın da niteliğinin (kalitesinin) de dikkate alınması gerektiği üzerinde durur ve doğadaki değişimlerin enerjinin niteliğinin azaldığı yönde gerçekleştiğini belirtir (Çengel & Boles, 2008).

İç Enerji; sistemin *mikroskopik*² enerjilerinin tümünün toplamına denir. Yani sistemin iç enerjisi, nükleer enerji, kimyasal enerji, duyulur ve gizli enerjiler toplamıdır (Çengel & Boles, 2008).

Entalpi; özellikle güç üretimi ve soğutmayla ilgili bazı sistemler ve hal değişimleri incelenirken, birkaç özeliğin bileşiminden oluşan $u + PV$ terimi için entalpi kavramı kullanılır (Çengel & Boles, 2008).

Termodinamiğin İkinci Yasası, enerji dönüşümlerinde entropi artışını tanımlar ve bu, sistemlerde enerji kayıplarının her zaman olacağı anlamına gelir. Yasa, enerjinin tamamen iş yapacak şekilde dönüşmesinin mümkün olmadığını, bir kısmının kaybolacağını belirtir.

Farklı sıcaklıklar arasında ısı transferinde ısı, sadece daha sıcak cisimden daha soğuk cisme doğru akar. Bu süreç, entropi artışına yol açar. Başka bir deyişle izole bir sistemde, enerji dönüşümleri sırasında karışıklık veya düzensizlik ölçüsü olan

² *Mikroskopik enerjiler*: sistemin moleküler yapısı ve moleküler hareketliliği ile ilgilidir ve dış referans noktalarından bağımsızdır.

entropi her zaman artar. Bu durum *Entropi Artışı* olarak tanımlanır.

Ekserji, enerjinin sadece miktarını değil, aynı zamanda bu enerjinin ne kadar verimli bir şekilde işe dönüştürülebileceğini de ifade eder. Başka bir ifadeyle, enerjinin bir başka enerjiye tamamen dönüşen faydalı kısmına ekserji denir (Söğüt, vd. 2018). Ekserji, potansiyel iş ve enerjinin kalitesi açısından bir sistemin ne kadar verimli çalıştığını anlamamıza yardımcı olur.

İkinci yasaya dayanarak, bir enerji dönüşümü sırasında sadece enerjinin miktarı değil, aynı zamanda bu enerjinin iş yapabilme kapasitesi de değişir. Bu iş yapma kapasitesini kaybetmiş enerji (yani kaybolan ekserji), entropinin artışıyla doğrudan ilişkilidir.

2. ISIL SİSTEMLER

İmalat işletmelerindeki enerji tüketiminin büyük bir kısmının ısı sistemlerinden gerçekleştiği bilinmektedir. Bu nedenle imalat işletmelerindeki ısı sistemleri enerji verimliliği gibi çalışmalarda önem arz eden bölümler olmuştur. İmalat sektöründeki ısı sistemleri kazanlar, fırınlar ve buhar sistemleri şeklinde üç grupta incelenebilir (Keskin, 2013).

2.1. Kazanlar

Kazanlar, çeşitli yakıtlarda bulunan kimyasal enerjinin ısı enerjisine çevrilmesini ve bu şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Bu amaçla çeşitli yakıtlar kullanılabileceği gibi, ısıyı elde edilebilmesi için farklı kazan türlerinde değişik yöntemlerden yararlanılması da mümkündür. Bu doğrultuda kullanılan farklı kazan çeşitleri bulunmaktadır.

2.1.1. Kazan Çeşitleri

Kazanlar, enerji üretiminde ve ısıtma sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Farklı uygulama alanlarına ve enerji kaynaklarına göre tasarlanmış birçok kazan türü bulunmaktadır. Bu kazanlar, verimlilik, yakıt türü, çalışma prensibi ve uygulama alanı gibi çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir. Kazanlar için çeşitli kriterlere göre yapılan detaylı sınıflandırma aşağıda verilmiştir. Kazanların çeşitleri, endüstriyel uygulamalardan konut ısıtmasına kadar geniş bir yelpazeyi kapsar ve her bir tür, belirli avantajlar ve dezavantajlar sunar.

Birincil olarak, kazanlar yakıt türüne göre sınıflandırılabilir. Doğalgaz, kömür, fuel oil ve biyokütle gibi farklı yakıt türleri, kazanların çalışma prensiplerini ve verimliliklerini etkileyen önemli faktörlerdir. Örneğin, doğalgazla çalışan kazanlar, temiz yanma özellikleri ve yüksek verimlilikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, kömürle çalışan kazanlar, özellikle enerji maliyetlerinin yüksek olduğu bölgelerde hala önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, kömürün yanması sırasında ortaya çıkan emisyonlar, çevresel etkileri artırmakta ve bu nedenle bu tür kazanların kullanımı giderek azalmaktadır (Köseoğlu vd., 2015).

Kazanların bir diğer önemli sınıflandırma kriteri, çalışma prensipleridir. Basit kazanlar, suyu ısıtmak için doğrudan yanma işlemi kullanırken, kombine kazanlar (kombi) hem merkezi ısıtma hem de sıcak kullanım suyu üretimi için tasarlanmıştır. Kombi kazanlar, özellikle konutlarda popülerdir, çünkü hem ısıtma hem de sıcak su ihtiyacını tek bir cihazla karşılayabilmektedir (Köseoğlu vd., 2015). Ayrıca, kazanlar, suyun basıncına göre de sınıflandırılabilir; düşük basınçlı kazanlar, genellikle konutlarda kullanılırken, yüksek basınçlı kazanlar endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir.

Kazanların verimliliği, tasarımına ve kullanılan teknolojilere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Modern kazanlar, enerji verimliliğini artırmak için çeşitli teknolojilerle donatılmıştır. Örneğin, yoğunlaşmalı kazanlar, yanma gazlarının ısıtılmasında daha fazla enerji geri kazanımı sağlamak için tasarlanmıştır. Bu tür kazanlar, geleneksel kazanlara göre daha yüksek verimlilik sunmakta ve enerji maliyetlerini düşürmektedir. Ayrıca, kazanların otomasyon sistemleri, işletme verimliliğini artırmak ve enerji tüketimini optimize etmek için kullanılmaktadır.

Kazanların uygulama alanları da çeşitlilik göstermektedir. Endüstriyel kazanlar, genellikle büyük ölçekli enerji üretimi ve ısıtma sistemlerinde kullanılırken, konut kazanları daha küçük kapasitelerde tasarlanmıştır. Endüstriyel kazanlar, genellikle yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışarak, buhar üretimi için kullanılır. Bu buhar, enerji santrallerinde elektrik üretimi veya çeşitli endüstriyel süreçlerde kullanılmaktadır. Konut kazanları ise, genellikle daha düşük kapasitelerde çalışarak, bireysel ısıtma ihtiyaçlarını karşılamaktadır.

Kazanlar, enerji üretimi ve ısıtma sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yakıt türü, çalışma prensibi, verimlilik ve uygulama alanı gibi kriterlere göre sınıflandırılan kazanlar, her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Modern teknolojilerle donatılmış kazanlar, enerji verimliliğini artırmakta ve çevresel etkileri azaltmaktadır. Bu nedenle, kazanların seçimi, enerji maliyetlerini düşürmek ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Isıtma tesislerinde kullanılan kazanların sınıflandırılması çeşitli kriterlere bağlı olmak üzere aşağıdaki gibi yapılır (Megep, 2012).

- 1- Kazan yapımında kullanılan malzemenin cinsine göre;
 - Dökme dilimli kazanlar
 - Çelik kazanlar
- 2- Kullanılan yakıtın cinsine göre;
 - Gaz yakıtlı kazanlar (Doğalgaz)
 - Sıvı yakıtlı kazanlar (Motorin, fuel –oil)
 - Katı yakıtlı kazanlar (Taş kömürü, odun vb.)
- 3- Yanma odasının basıncına göre;
 - Karşı basınçlı kazanlar
 - Karşı basınçsız kazanlar
- 4- Isıtıcı akışkan cinsine göre;
 - Sıcak sulu kazanlar
 - Kaynar sulu kazanlar
 - Buharlı kazanlar
- 5- Kazanın yapısal tasarımı açısından;
 - Alev borulu kazanlar
 - Alev duman borulu kazanlar
 - Duman borulu kazanlar
 - Su borulu kazanlar
- 6- Kazanın biçimi açısından;
 - Yarım silindirik kazanlar
 - Tam silindirik kazanlar
 - Prizmatik paket kazanlar

2.1.2. Kazanların Verimliliğini Etkileyen Faktörler

Kazanlarda enerji verimliliği, yanmanın kalitesine, yanma sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin ısı taşıyıcı akışkana maksimum şekilde aktarılmasına ve baca gazı emisyonlarına bağlıdır. Baca gazı emisyonlarına etki eden faktörler ise yanmanın kalitesi, yanma bölgesinin tasarımı, brülör tasarımı ve seçimi, kullanılan yakıtın özellikleri ve içindeki kirleticilere bağlıdır. Bu yüzden kazanların çalışma esnasında ısı verimin en üst düzeyde

gerçekleşmesi için emisyonların kontrol edilmesi ve baca gazı bileşenlerinin sürekli veya belirli aralıklarla izlenmesi gerekir. Yanmayı olumsuz yönde etkileyen durumların tespit edilmesi ve zamanında müdahale edilmesiyle verimliliğe olumlu katkılar yapılmış olacaktır. Bunlara ek olarak brülörlerin çalışmadığı dönemlerde kazanlarda meydana gelen iç soğuma kayıplarının en alt seviyede olması enerji verimliliği bakımından önem arz etmektedir (Bilgin, 2006).

Yakıt tüketim miktarının fazla olduğu yüksek kapasiteli kazanlarda, kazan verimin takibi büyük önem kazanmaktadır. Yapılacak en ufak bir iyileştirmenin bile faturalara kayda değer bir yansıması olacaktır. Bunun için yakma kontrolünün sağlanması için tam otomatik mikro modülasyonlu sistemler ile birlikte oksijen kontrol sistemleri de kullanılmaktadır. Bu sistemler sayesinde baca gazı analizleri de düzenli bir şekilde yapılmaktadır. Atık gaz içeriği (O_2 , CO , CO_2 , SO_2 , HC , NO , NO_2) ve baca gazı sıcaklığı gibi değişkenler sürekli olarak izlenmektedir. Yanma verimine olumsuz etki yapan bir durum söz konusu olduğunda sistem hızlı bir şekilde müdahale ederek yakıt/hava oranını yeniden ayarlamak suretiyle yanma verimini maksimum kılacak şekilde düzenlemektedir. Ayrıca yakma sisteminde frekans konvektörlü brülör kullanıldığı durumlarda bu takip sistemleri brülör fanları ile eşgüdümlü çalışarak fan enerji tüketiminden tasarruf sağlanmaktadır. Sonuç olarak mikro modülasyonlu yakma yönetim sistemleri sayesinde hassas ve oransal kontrol ile tam yanma sonucu sistem verimi yükseltilmektedir. Yakma veriminin yükseltilmesi ile yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. (Bilgin, 2006).

Kazanlarda verimliliği etkileyen başlıca faktörleri:

- Eksik yanma,
- Fazla hava,
- Baca gazında su buharı nedeniyle olan ısı kaybı,

- Baca gazı sıcaklığı,
- Yakıt cinsi,
- Brülörler,
- Kazan yükü,
- Kazan yüzeyinden olan ısı kayıpları,
- Isıtıcı yüzey kirliliği

şeklinde sıralamak mümkündür (Kaya & Eyidoğan, 2014).

Kazanların verimliliğini etkileyen kayıplar, enerji üretim süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu kayıplar, çeşitli faktörlerden kaynaklanmakta ve genellikle termodinamik, mekanik ve kimyasal süreçlerin etkileşimi ile ilişkilidir. Kazanların verimliliğini etkileyen başlıca kayıplar arasında ısı kayıpları, yakıt kayıpları, su kayıpları ve kimyasal kayıplar bulunmaktadır. Bu kayıpların her biri, kazanların genel performansını ve enerji verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

Isı kayıpları, kazanların verimliliğini etkileyen en belirgin faktörlerden biridir. Kazanlar, yanma işlemi sırasında yüksek sıcaklıklarda çalıştıkları için, ısı kayıpları kaçınılmazdır. Bu kayıplar, genellikle baca gazı ile dışarı atılan ısıdan, kazan yüzeyinden yayılan ısıdan ve su buharı kaybından kaynaklanmaktadır. Baca gazı sıcaklığı, kazan verimliliğini etkileyen en önemli unsurlardan biridir; çünkü yüksek sıcaklıklar, daha fazla ısı kaybına yol açar (Canka Kılınç, 2017). Ayrıca, kazan yüzeyinin yalıtımı da ısı kayıplarını etkileyen bir diğer önemli faktördür. Yetersiz yalıtım, ısı kaybını artırarak verimliliği düşürmektedir (Cura & Ögüt, 2022).

Yakıt kayıpları, kazanların verimliliğini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Yanma sürecinde, yakıtın tamamının enerjiye dönüşmemesi nedeniyle belirli bir miktar enerji kaybı yaşanır. Bu kayıplar, yakıtın kalitesi, yanma koşulları ve yakıtın

türü gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, düşük kaliteli yakıtlar, yanma verimliliğini düşürerek daha fazla yakıt tüketimine neden olur. Ayrıca, yanma odasındaki hava-yakıt oranının uygun olmaması da yakıt kayıplarını artırmaktadır. Yanma sürecinin optimize edilmesi, bu kayıpların azaltılmasına yardımcı olabilir (Rahim & Gündüz, 2013).

Su kayıpları, kazanların verimliliğini etkileyen faktörlerden üçüncüsüdür. Kazanlarda su kaybı, genellikle buharlaşma, sızıntılar ve kondensat kaybı gibi nedenlerle gerçekleşir. Bu kayıplar, kazanların su tüketimini artırarak işletme maliyetlerini yükseltmektedir. Ayrıca, su kalitesi de kazan verimliliğini etkileyen bir faktördür; çünkü kirli su, kazan içinde tortu birikmesine ve bu da verimliliğin düşmesine neden olmaktadır (Ermiş, vd. 1997). Su kayıplarının minimize edilmesi, kazanların genel verimliliğini artırmak için önemlidir.

Kimyasal kayıplar, kazanların verimliliğini etkileyen bir diğer faktördür. Yanma sırasında oluşan atık gazlar, enerji kaybına neden olmaktadır. Özellikle, yanma sonrası oluşan CO₂ ve diğer gazların, enerji üretim sürecinde kaybedilen enerji miktarını artırdığı bilinmektedir. Ayrıca, yanma sırasında oluşan kül ve diğer katı atıklar da enerji kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle, kazanların tasarımı ve işletim koşulları, kimyasal kayıpların minimize edilmesine yönelik olarak optimize edilmelidir (Söğüt, vd. 2018).

Kazanların verimliliğini artırmak için, yukarıda belirtilen kayıpların her birinin dikkate alınması gerekmektedir. Isı kayıplarının azaltılması için, kazanların yalıtımının iyileştirilmesi, baca gazı sıcaklığının düşürülmesi ve yanma koşullarının optimize edilmesi önemlidir. Yakıt kayıplarının minimize edilmesi için, yakıt kalitesinin artırılması ve hava-yakıt oranının doğru bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Su

kayıplarının azaltılması için, su kalitesinin iyileştirilmesi ve sızıntıların önlenmesi önem taşımaktadır. Son olarak, kimyasal kayıpların azaltılması için yanma süreçlerinin optimize edilmesi ve atık gazların geri kazanım yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir.

Yanma verimin artırılması kazan verimliliğini artıracaktır. Fakat bununla birlikte yapılacak bazı iyileştirmeler ile de kazan verimliliğinin dahada artırılması mümkündür. Bunlar;

- Baca gazı sıcaklığı düşürülmesi; baca gazı sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda kazan veya yakma sistemi kontrol edilmeli. Kazan kapasitesi düzenlenmeli veya kazan borularına türbülatorler eklenmesiyle baca gazı sıcaklığı düşürülmelidir.
- Dönüş suyu sıcaklığının yükseltilmesi ile baca gazı sıcaklıkları düşürülebilir. Bunun için yoğunlaşmalı kazanlar ve yoğunlaşmalı yakma sistemleri kullanılmalı, baca gazlarında bulunan su buharının yoğunlaşması sağlanılarak sistem dönüş suyu sıcaklığı yükseltilebilir.
- Ekonomizer kullanımı; sıvı ve gaz yakıt kullanılan sistemlerde baca çıkışına eklenecek olan ekonomizer ile baca gazı sıcaklığı düşürülebilir. Ekonomizerde elde edilen ısı enerjisi (atık ısı) bina ısıtılması, kullanım sıcak su üretimi gibi alanlarda kullanılabilir. Değişken sıcaklık değerlerinde çalışan katı yakıtlı sistemlerde ekonomizerlerin kullanımı zordur.
- Endüstriyel uygulamalarda brülör kapasitelerinin iyi belirlenmesi ve baca boyutlarının hesaplanması önem arz etmektedir. Gereğinden fazla seçilen brülör ve baca kesiti yanama verimini olumsuz yönde etkileyecektir (Söğüt, vd. 2018).

Sonuç olarak, kazanların verimliliğini etkileyen kayıplar, enerji üretim süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Isı, yakıt, su ve kimyasal kayıpların her biri, kazanların performansını ve enerji verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Bu kayıpların minimize edilmesi, enerji tasarrufu sağlamak ve işletme maliyetlerini düşürmek için kritik öneme sahiptir. Kazanların verimliliğini artırmak amacıyla, bu kayıpların her birinin dikkate alınması ve uygun önlemlerin alınması gerekmektedir.

2.2. Isı Transfer Mekanizmaları

Isı transferi, bir sistemden diğerine enerji akışıdır ve iletim, taşınım ve ışıınım üç ana mekanizma ile gerçekleşir. Kısaca bahsedecek olursak;

2.2.1. İletim (Kondüksiyon)

İletim, ısı enerjisinin bir maddeden diğerine, moleküller arasındaki doğrudan temas yoluyla geçiştir. Isı, yüksek sıcaklık bölgesinden düşük sıcaklık bölgesine doğru akar. Bu, katı maddelerde genellikle en verimli ısı transfer mekanizmasıdır. Metal bir çubuğun bir ucunu ısıttığınızda, diğer ucu da ısınır, çünkü ısı moleküller aracılığıyla yayılır.

2.2.2. Taşınım (Konveksiyon)

Konveksiyon, ısı transferinin bir sıvı veya gazdaki hareketli moleküller aracılığıyla gerçekleşmesidir. Isınan madde genişleyerek daha hafif hale gelir ve yükselir; soğuyan madde ise yoğunlaşarak alçalır. Bu döngüsel hareket, ısının bir yerden diğerine taşınmasını sağlar. Örnek olarak, bir suda kaynayan suyun yüzeye çıkması ve soğuk suyun aşağıya inmesiyle ısı transferi gerçekleşir.

2.2.3. Işınım (Radyasyon)

Isı enerjisi, elektromanyetik dalgalar (genellikle infrared ışıınım) şeklinde bir maddeden diğerine aktarılır. Bu mekanizma, bir ortamın veya maddenin sıcaklığının yükselmesiyle yaydığı

ışınım enerjisinin bir başka madde tarafından emilmesiyle gerçekleşir. Işınım, herhangi bir ortamda (gaz, sıvı veya vakumda) gerçekleşebilir. Örneğin, güneş ışınları Dünya'ya ışıma yoluyla ulaşır.

Bu üç mekanizma, ısıнын bir ortamda farklı yollarla yayılmasını sağlar ve her birinin uygulama alanları farklıdır.

3. EKSERJİ TANIMI VE HESAPLAMASI

Ekserji; herhangi bir termodinamik yasasına karşı gelmeden, bir düzeneğin verebileceği işin miktarındaki üst sınırı temsil etmektedir (Çengel & Boles, 2008).

Ekserji, iş yapabilme kapasitesini belirlediği için, entropi artışı ekserji kayıplarıyla doğrudan ilişkilidir. Yani, entropi ne kadar fazla artarsa, kaybolan ekserji de o kadar fazla olur.

Ekserji kaybı şu şekilde anlaşılabilir: Bir enerji kaynağından alınan ısı, sistemin verimli bir şekilde çalışmasını sağlar, ancak bu ısıнын bir kısmı çevreye kaybolur. Bu kayıp, entropinin artışı ile ilişkilidir. İdeal bir çevrimde (tersinir bir çevrimde), sistemin entropisi değişmez ve enerji tamamen işe dönüşebilirken, gerçek bir çevrimde ise, entropi artar, bu da enerji kaybına yol açar ve çevrimdeki verimlilik düşer.

3.1. Ekserji Kayıplarının Kaynağı

İkinci yasa gereği, aşağıdaki faktörler ekserji kayıplarına neden olabilir:

Isı Kaybı: Sistemden dışarıya doğru kaybedilen ısı, ekserji kaybına yol açar.

Sürtünme ve Direnç: Akışkanların hareketi sırasında sürtünme, ısı kaybına ve entropi artışına neden olur.

Tersinmezlik: Gerçek işlemler her zaman geri alınamaz, bu da iş yapılabilir enerjinin kaybolmasına yol açar. Örneğin, bir pompa çalışırken, pompanın verimliliği %100 olmayacaktır, bir kısmı ısıya dönüşecektir.

3.2. Ekserji ve Verimlilik

İkinci yasayı ekserji analizi ile bağdaştırdığımızda, ekserji verimliliği kavramı ortaya çıkar. Ekserji verimliliği, sistemde kaybolan ekserjinin, yani kaybolan işe dönüşemeyen enerjinin belirlenmesine olanak tanır. Yani bir sistemin içindeki enerjinin ne kadarının işe dönüşebildiğini gösteren bir ölçüttür. Bu kayıplar genellikle entropinin artması nedeniyle meydana gelir. Ekserji verimliliği, genellikle şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Ekserji Verimliliği} = \frac{\text{Çıkan ekserji}}{\text{Giren Ekserji}} \quad \eta = \frac{\Sigma \dot{E}x_c}{\Sigma \dot{E}x_g} \quad (1)$$

Çıkan Ekserji: Sistemin ürettiği işe dönüşebilen enerji miktarı.

Giren Ekserji: Sisteme giren toplam enerjinin (yakıt, ısı, vb.) ekserjisi.

Kayıp kullanılabilir ekserji, sistemdeki tersinmezliğine eşittir. Sisteme giren toplam ekserji, sistemden çıkan ekserji ile kaybolan ekserjinin toplamına eşittir. Buna göre ekserji dengesi,

$$\Sigma \dot{E}x_c = \Sigma \dot{E}x_g + \Sigma \dot{E}x_{kayıp} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir (Filiz, vd. 2014).

4. KAZANDAKİ EKSERJİ KAYIPLARININ ANALİZ EDİLMESİ

Ekserji kaybı, sistemin performansını değerlendirmenin en etkili yollarından biridir. Kazanlar, türbinler ve diğer termal makinelerde entropi artışı (ve dolayısıyla ekserji kaybı) oldukça yaygındır. Ekserji analizi, bu kayıpların kaynağını belirlemeye

yardımcı olur ve verimliliği artırmak için gerekli iyileştirmeleri önerir.

Kazanların verimliliğini etkileyen başlıca kayıplar şöyle sıralanabilir: eksik yanma, fazla hava, baca gazında su buharı nedeniyle olan ısı kaybı, baca gazı sıcaklığı, yakıt cinsi, kazan yükü, kazan yüzeyinden olan ısı kayıpları, ısıtıcı yüzey kirliliği şeklinde sıralamak mümkündür (Canka Kılınç, 2017). Ayrıca besleme suyunun miktarı, sıcaklığı ve basıncı, yakıt besleme miktarı, yakıtın alt ısı değeri gibi etkenlerinde göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Fakat kayıpların büyüklüğü ve önem derecesi açısından bazılarının hesaplanması ihmal edilebilir. Önem derecesine ve büyüklüğüne göre kazan verimliliğini etkileyen konuların dört ana grupta incelenmesi ve bu konu başlıklarının ekserji analizlerin yapılması ilk başta yeterli olacaktır.

Kazanlarda ekserji analizinin yapılabilmesi için;

- Yakıt ekserjisi,
- Baca gazı ekserjisi,
- Kazan yüzeylerinden olan ekserji kayıpları,
- Sıcak suyun ekserjisi,

gibi konuların detaylı incelenmesi gerekmektedir.

Örneğin bir kazan ekserji kaybını inceleyecek olursak, kazana giren yakıt enerjisinin tamamı iş yapmak için kullanılamaz. Bir kısmı çevreye ısı olarak kaybolur ve bir kısmı da ekserji kaybına yol açan tersinmez süreçlere dönüşür. İkinci bir durum ise kazanın içindeki buhar üretim süreci, bir enerji dönüşümü olduğu için, bu dönüşümde kaybolan iş kapasitesi, yani ekserji kaybı söz konusudur. Ekserji analizi, bu kayıpları hesaplamak ve kaybın nedenlerini tespit etmek için kullanılır.

4.1. Yakıt Ekserji Analizi

Bir yakıtın içerdiği kimyasal enerjinin ne kadarının iş yapabilen (yani dönüşüme uğrayabilen) kısmı olduğunu belirlemek için yapılır. Bu analizde, yakıtın içerdiği toplam enerji ve bu enerjinin dönüşümde kaybolan kısmı dikkate alınarak ekserji kaybı hesaplanır. Yakıtın ekserji analizi, çevresel verimliliği artırmaya ve enerji sistemlerini optimize etmeye yardımcı olur.

4.1.1. Yakıtın Kimyasal Enerjisinin Hesaplanması

Yakıtın içerdiği toplam kimyasal enerji, genellikle yakıtın *ısıl değeri* ile ilişkilidir. Bu, yakıtın tamamen yandığında açığa çıkan toplam ısı enerjisidir.

Toplam kimyasal enerji şu formülle hesaplanabilir:

$$E_{kimyasal} = H_u \times m_{yakıt} \quad (3)$$

Burada:

$E_{kimyasal}$ = Yakıtın içerdiği toplam kimyasal enerji (J veya kJ),

H_u = Yakıtın ısıl değeri (kJ/kg veya kJ/m³),

$m_{yakıt}$ = Yakıtın kütlesi veya hacmi (kg veya m³).

4.1.2. Yakıtın Ekserjisi Hesaplanması

Yakıtın ekserjisi, içerdiği kimyasal enerjinin, çevresel koşullarla (örneğin, ortam sıcaklığı ve basıncı) olan farkı göz önünde bulundurularak hesaplanır. Ekserji, sadece ısıl enerjiyi değil, aynı zamanda enerjinin çevrede iş yapabilecek kısmını da ifade eder.

Yakıtın ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$E_{ex, yakıt} = (h_{yakıt} - h_0) - T_0(s_{yakıt} - s_0) \quad (4)$$

Burada:

$E_{ex, yakıt}$ = Yakıtın ekserjisi (Joule veya kJ),

$h_{yakıt}$ = Yakıtın entalpisini (J/kg),

h_0 = Çevresel koşullarda (genellikle ortam sıcaklığında) entalpi (J/kg),

T_0 = Çevre sıcaklığı (K),

$s_{yakıt}$ = Yakıtın entropisi (J/kg.K),

s_0 = Çevresel koşullarda entropi (J/kg.K).

Bu denklemde, yakıtın içerdiği entalpi ve entropi değerleri, yakıtın kimyasal enerjisinin çevre ile etkileşimi ve dönüşebilirliği hakkında bilgi verir.

4.1.3. Yakıt Ekserjisi Verimliliği

Yakıtın ekserji verimliliği, yakıtın içerdiği enerjinin ne kadarının kullanışlı (iş yapabilir) enerjiye dönüştüğünü gösteren bir parametredir. Ekserji verimliliği şu şekilde hesaplanabilir:

$$\eta_{ex, yakıt} = \frac{E_{ex, yakıt}}{E_{kimyasal}} \quad (5)$$

Burada:

$\eta_{ex, yakıt}$ = Yakıtın ekserji verimliliği (%),

$E_{ex, yakıt}$ = Yakıtın ekserjisi (Joule veya kJ),

$E_{kimyasal}$ = Yakıtın içerdiği toplam kimyasal enerji (J veya kJ).

Bu verimlilik oranı, yakıtın enerji dönüşümünün ne kadar verimli olduğunu ve hangi noktada kayıpların fazla olduğunu anlamaya yardımcı olur.

4.2. Baca Gazı Ekserji Analizi

Bir enerji sisteminin veya kazanın yanma süreci sonucu ortaya çıkan atık gazların içerdiği ekserjiyi ifade eder. Baca gazları, genellikle yanma sonucunda açığa çıkan sıcak gazlar

(karbon dioksit, su buharı, oksijen, nitrojen vb.) olup, bu gazlar çevreye atılır. Ancak, bu gazlar hala ekserji içerebilir ve bu enerjinin bir kısmı, sisteme geri kazandırılabilir veya daha verimli şekilde kullanılabilir.

Baca gazı ekserji analizi, atık gazlardaki enerji kayıplarını belirlemeye, çevreye salınan enerjiyi optimize etmeye ve daha verimli enerji dönüşümü sağlamaya yardımcı olur.

4.2.1. Baca Gazı Ekserji Kaybı Hesaplama

Baca gazları, bir enerji sisteminde genellikle verimsizliklerin bir göstergesidir. Yanma işlemi sırasında, yakıtın içerdiği enerji büyük bir kısmı sıcak gazlar aracılığıyla çevreye verimsiz bir şekilde atılır. Bu kayıpların analizi, daha verimli sistemler tasarlamak için çok önemlidir. Ekserji kayıpları, sadece enerji kayıplarını değil, aynı zamanda çevresel etkileri de gösterir.

Baca gazlarının ekserji kaybı şu şekilde hesaplanabilir:

$$E_{ex, \text{ baca gazı}} = \dot{m}_{\text{gaz}}(h_{\text{çıkış}} - h_{\text{giriş}}) - T_0(s_{\text{çıkış}} - s_{\text{giriş}}) \quad (6)$$

Burada:

$E_{ex, \text{ baca gazı}}$ = Baca gazının ekserji kaybı (J/s veya kJ/s),

$\dot{m}_{\text{gaz}}$ = Baca gazlarının debisi (kg/s),

$h_{\text{çıkış}}$ ve $h_{\text{giriş}}$ = Baca gazlarının çıkış ve giriş entalpisini (J/kg),

$s_{\text{çıkış}}$ ve $s_{\text{çıkış}}$ = Baca gazlarının çıkış ve giriş entropisi (J/kg.K),

T_0 = Çevre sıcaklığı (K).

Bu denkleme dayanarak, baca gazlarının içerdiği enerji ve ekserji kaybı hesaplanabilir. Sonuç, sistemin enerji verimliliğini artırmak için hangi noktalarda iyileştirme yapılabileceğine dair bilgiler verir.

4.3. Kazan Yüzeylerinde Ekserji Analizi

Kazanlardaki ısıнын çevreye kaybı ile ilgilidir. Bu kayıplar genellikle kazan yüzeylerinde, ısı iletimi yoluyla çevreye taşınan enerjiden kaynaklanır. Kazanın yüzeylerinde ısı kayıpları, genellikle **konveksiyon**, **Radyasyon** ve bazen de **iletim** yoluyla meydana gelir. Bu kayıpların ekserjisi, ısıнын çevreye iş yapabilecek miktarını gösterir.

4.3.1. Kazan Yüzeylerinde Ekserji Kaybı Hesaplama

Kazan yüzeylerinden gerçekleşen ekserji kaybı, genellikle ısıнын çevreye taşınma süreci üzerinden hesaplanır. Bu ekserji kaybı hem ısı kaybının büyüklüğünü hem de bu kaybın çevreye iş yapabilme potansiyelini dikkate alır. Kazan yüzeylerinden olan ekserji kaybı, bu ısı kaybı değerleri ile birleştirilerek hesaplanabilir:

Kazan yüzeylerindeki ekserji kaybı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$E_{ex, kazan} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T_y} \right) \quad (7)$$

Burada:

$E_{ex, kazan}$ = Kazan yüzeylerindeki ekserji kaybı (J/s veya kJ/s),

$\dot{Q}_{kazan}$ = Kazan yüzeylerinden kaybolan ısı enerjisi (J/s veya kJ/s),

T_0 = Çevre sıcaklığı (K), genellikle ortam sıcaklığı (298K),

T_y = Kazan yüzeyinin sıcaklığı (K), yüzeyin sıcaklığı genellikle buhar, su veya diğer proses akışkanlarının sıcaklığına yakındır.

Isı Kaybı Debisi ($\dot{Q}$):

Kazan yüzeylerinden kaybolan ısı enerjisi, genellikle **taşınım** (hava ile ısı transferi) ve **ışınım** (ısıнын elektromanyetik

dalgalarla yayılması) yoluyla kaybedilir. Konveksiyon yolu ile kaybedilen ısıyı hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılır. Eğer yüzeyden kaybolan ısıнын bir kısmı radyasyon yoluyla kayboluyorsa, bu kayıp da dikkate alınmalıdır.

Taşınım yolu ile ısı kaybı formülü şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{Q}_{\text{taşınım}} = h \cdot A \cdot (T_y - T_0) \quad (8)$$

Burada:

$\dot{Q}$ = Taşınım yoluyla kaybedilen ısı (W)

h = Taşınım katsayısı ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),

A = Kazan yüzey alanı (m^2).

T_y = Kazan yüzeyi sıcaklığı (K).

T_0 = Çevre sıcaklığı (K).

Eğer kazan yüzeyi yüksek sıcaklıklara sahipse, radyasyon kaybı önemli bir rol oynar. Kazan yüzeylerinden radyasyon yoluyla kaybolan ısı şu şekilde hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{\text{ışınım}} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot (T_y^4 - T_0^4) \quad (9)$$

Burada:

$\dot{Q}_{\text{ışınım}}$ = Işınım yoluyla kaybedilen ısı (W),

σ = Stefan- Boltzman sabiti ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$),

ϵ = Yüzeyin emisyon katsayısı,

A = Kazan yüzey alanı (m^2),

T_y = Kazan yüzeyi sıcaklığı (K),

T_0 = Çevre sıcaklığı (K).

4.4. Kazanlardaki Sıcak Suyun Ekserjisi Analizi

Suyun içerdiği enerjinin, çevre koşullarına göre iş yapabilen kısmını ifade eder. Ekserji analizi, suyun sıcaklığı ve basıncına göre belirli bir ortamda (genellikle çevre koşulları olarak kabul edilen sıcaklık T_0 ve basınç P_0) iş yapabilecek potansiyel enerjiyi gösterir.

Sıcak suyun ekserjisi hesaplanırken, genellikle suyun **entalpisi** ve **entropisi** dikkate alınır. Bu parametreler, suyun içerdiği enerjinin çevreyle olan etkileşimini ve dönüşebilirliğini gösterir.

Sıcak suyun ekserjisi aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$E_{ex, su} = (h_{su} - h_0) - T_0(s_{su} - s_0) \quad (10)$$

Burada:

$E_{ex, su}$ = Sıcak suyun ekserjisi (J/kg veya kJ/kg),

h_{su} = Sıcak suyun entalpisini (J/kg veya kJ/kg),

h_0 = Çevresel koşullardaki ortamın entalpisini (J/kg veya kJ/kg), genellikle suyun sıcaklık ve basınca göre belirlenmiş referans değeridir.

T_0 = Çevre sıcaklığı (K),

s_{su} = Sıcak suyun entropisi (J/kg.K),

s_0 = Çevresel koşullardaki ortamın entropisi (J/kg.K).

5. SONUÇ

Kazan sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik iyileştirmeler yapmak hem enerji verimliliği hem de çevresel etkiyi optimize etmek için önemlidir. Kazan sistemlerinin verimliliğinin hesaplanması için ekserji kayıplarının bilinmesi gerekmektedir. Kazanlarda meydana gelen önemli ekserji

kayıplarının yakıt, baca gazı, sıcak su ve kazan yüzeyinden meydana geldiği kabulüne göre;

- Yakıtın kimyasal enerjisinin çevresel koşullarla etkileşimde ne kadarının iş yapabileceğini ve ne kadarının kaybolduğunu hesaplamak için yakıt ekserji analizi yapılır.
- Baca gazlarında ekserji kayıplarının azaltılması hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlar. Bu analiz, enerji üretim sistemlerinde atık enerjilerin geri kazanılmasına olanak tanır ve aynı zamanda emisyonların azaltılmasına yardımcı olur.
- Kazan yüzeylerinden kaybolan ekserji kayıpları, yüzey sıcaklığı ve çevre koşulları arasındaki farkla doğru orantılıdır. Kazan yüzeyindeki ısı kaybı ne kadar büyükse, ekserji kaybı da o kadar büyük olacaktır. Kazan yüzeyindeki ısı kaybının hesaplanması kazan sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yapmak için önemli bilgiler sağlamaktadır, örneğin ısı geri kazanım sistemlerinin (ekonomizerler, ısı değiştiriciler) tasarlanmasında kullanılır.
- Sıcak suyun ekserji analizi, enerji verimliliğini değerlendirmek ve sistemdeki kayıpları optimize etmek için kullanılır. Ekserji kaybı, genellikle kayıpların en büyük olduğu noktaları belirlemeye yardımcı olabilir ve bu kayıpların minimize edilmesi için sistemde yapılacak iyileştirmeleri ortaya çıkarabilir.

KAYNAKÇA

- Bilgin, A. (2006). Kazanlarda enerji verimliliği. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 95, 13-18.
- Canka Kılıç, F. (2017). Endüstriyel Kazanlarda Enerji Verimliliği ve Emisyon Azalımı Fırsatları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(2), 147-158.
- Cura, Ö., & Ögüt, E. (2022). Bir İşletmeye Ait Yardımcı Tesislerin Enerji Tüketimi ve Verimliliğinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10, 1910-1925.
- Çengel, Y.A., & Boles, M.A. (2008). Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla. İzmir Güven Kitabevi. 55-56,126-127.
- Ermiş, K., İslamoğlu, Y., & Yılmaz, M. (1997). Buhar Kazanlarında Blöf İşleminden Isı Geri Kazanımı. III. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, 97' *Teskon Program Bildirileri*, 167-177.
- Filiz. Ç., Uysal, C., Kılıç, E., Kurt, H. (2014). Bir Buhar Kazanının Enerji ve Ekserji Analizi Yoluyla Performansının Değerlendirilmesi. *ISITES2014 Karabük – Türkiye*, 551-562.
- Kaya, D., & Eyidoğan, M. (2014). Karışık Yakıtlı (Katı ve Gaz) Endüstriyel Buhar Kazanlarında Enerji Tasarrufu ve Çevresel Etki, Karabük Üniversitesi, Enerji ve Çevre Teknolojileri Birimi.
<https://www.termodinamik.info/makale/karisik-yakitli-kati-ve-gaz-endustriyel-buhar-kazanlarinda-enerji-tasarrufu-ve-cevresel-etki>
- Keskin, C. (2013). *Endüstriyel Enerji Verimliliği Çalışmalarında Değer Akış Haritalarının Kullanımı. (Yüksek Lisans Tezi).*

İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknolojisi Anabilim Dalı, İstanbul.

- Köseoğlu, M.F., Başkaya, Ş., & Çalışır, T. (2015). Farklı ısı eşanjörlerine sahip kombi cihazlarının performanslarının deneysel olarak karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 29-37. <https://doi.org/10.17341/gummfd.80505>
- MEGEP, (2012). Kazanlar, Kimya Teknolojisi, T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara, 524KI0097, 5-6.
- Rahim, M., & Gündüz, D. (2013). Dolaşımli Akışkan Yataklı Bir Isıl – Güç Çevrim Santralinin Simülasyonu ve Duyarlılık Analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 1(2), 37-47.
- Resmî Gazete 22460 sayı, (1995). Sanayi Kuruluşlarının Enerji Tüketiminde Verimliliğin Arttırılması İçin Alacakları Önlemler Hakkında Yönetmelik.
- Söğüt, Z., Üren, S., Çelik, C., Durmaz, Ş., & Orhan, İ. (2018). Sanayide Enerji Ekonomisi. Editör: Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ, T.C. Anadolu Üniversitesi Yayını No: 2578. E-ISBN: 978-975-06-2758-6.

TiNi/MAX KOMPAKT KAPLAMALARIN KENDİ KENDİNİ İYİLEŞTİRME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI^{1,2}

Semih DURAN³

Hikmet ÇİÇEK⁴

1. GİRİŞ

Bir malzemenin herhangi bir dış müdahaleye ihtiyaç duymadan, zamanla bozulmamış özelliklerini geri kazanarak orijinal yapısına dönme kabiliyeti, kendi kendini iyileştirme süreci olarak adlandırılır. Günümüzde, mühendislik malzemelerinin dayanıklılığını ve güvenilirliğini artırmak amacıyla birçok bilimsel çalışma, bu kendini iyileştiren konsept üzerine yoğunlaşmaktadır. Özellikle polimerler ve polimer bazlı kompozitler, biyolojik sistemlerdeki kemik yapıları, çimento esaslı seramikler gibi farklı malzemeler üzerinde bu mekanizmanın uygulamalarına rastlanmaktadır. Metalik malzemeler açısından değerlendirildiğinde, kendi kendini iyileştirme mekanizmasının başarılı örnekleri arasında pasif oksidasyon süreçleri, atomik difüzyon ve şekil hafızalı

¹ Bu çalışma doktora tezinden türetilmiştir. Duran, Semih. “TiNi/MAX kompakt kaplamaların üretilmesi, yapısal, mekanik, tribolojik ve kendi kendini onarma özelliklerinin araştırılması”. Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Erzurum.

² Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 221M429 numaralı hibe kapsamında desteklenmiştir.

³ Dr. Öğr. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kars/Türkiye, semih.duran@kafkas.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7107-1461.

⁴ Prof. Dr., Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, hikmet.cicek@erzurum.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3038-4466.

alaşımların (SMA) köprüleme etkisi yer almaktadır (Tavangarian et al., 2018).

Seramik esaslı malzemeler, mekanik ve termal gerilmelere karşı oldukça hassastır. Özellikle kırılğan yapıları nedeniyle bazı mühendislik uygulamalarında sınırlamalar ortaya çıkabilir. Örneğin, yüksek sıcaklık koşullarında ani ısı değişimleri, yani termal şok, malzeme içinde mikro çatlakların oluşmasına neden olabilir. Bu tür çatlaklar zamanında tespit edilip kontrol altına alınmazsa, malzemenin yapısal bütünlüğü bozulabilir ve hatta tamamen başarısızlıkla sonuçlanabilecek hatalar meydana gelebilir. Bu durumu engellemek ve seramiklerin hizmet ömrünü uzatmak amacıyla araştırmacılar farklı stratejiler geliştirmiştir. Bu yaklaşımlar arasında seramiklerin kırılma tokluğunu artırmak için ikincil partiküller eklemek, faz dönüşümlerinden yararlanmak ve mikroyapıyı optimize etmek gibi yöntemler yer almaktadır. Bunun yanı sıra, çatlakların tespit edilmesi ve onarılması için çeşitli tahribatsız muayene teknikleri uygulanmaktadır. Son olarak, malzemeye kendi kendini iyileştirme özelliği kazandırarak, çatlakların kendiliğinden kapanmasını sağlayan gelişmiş seramik sistemleri geliştirilmektedir. Son yıllarda, seramiklerin çatlak iyileştirme özelliğinden faydalanan yöntemler, birçok çalışmada öne çıkan bir araştırma alanı haline gelmiştir. Seramik malzemelerde çatlakların iyileşmesi, fiziksel değişimler veya kimyasal reaksiyonlar yoluyla gerçekleşmektedir. Kimyasal reaksiyonlara dayalı çatlak iyileştirme süreci genellikle oksidasyon mekanizması ile sağlanırken, fiziksel değişimlere bağlı iyileşme ise faz dönüşümü ve difüzyon mekanizmaları aracılığıyla gerçekleşmektedir (Tavangarian et al., 2018).

MAX fazlı alaşımlar, metalik ve seramik özelliklerin benzersiz bir birleşimini sunar. Metal malzemeler gibi yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olmalarının yanı sıra iyi bir işlenebilirlik gösterirler. Aynı zamanda, seramiklerin sağladığı

oksidasyon direnci ve termal şoka karşı dayanıklılık gibi avantajları da bünyelerinde barındırır (Eklund et al. 2010). MAX fazlı alaşımlar, katmanlı bir yapıya sahip olan ve altıgen kristal sisteminde düzenlenen üçlü karbür veya nitrür seramikler ailesine aittir. Genel formülleri $M_{n+1}AX_n$ şeklinde ifade edilir ve bu yapıda M bir geçiş metali, A genellikle IIIA veya IVA grubuna ait bir element, X ise karbon (C) veya azot (N) olarak tanımlanır. Genellikle n değeri 1 ile 5 arasında değişmektedir. Son yıllarda, bazı MAX fazlarında karbon veya azot yerine bor (B) elementi de tercih edilerek, farklı bileşimlerin sentezlenmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Ali et al. 2021; Rackl 2020). MAX fazlarında, A katmanları ile $M_{n+1}X_n$ katmanları arasındaki bağlar nispeten zayıf olduğundan, A atomları yüksek sıcaklıklarda yayılım göstererek oksijenle reaksiyona girer ve oksit oluşturur. Oluşan bu oksitler hacimce daha büyük olduğu için mikro çatlakları doldurarak malzemenin kendini iyileştirmesine olanak tanır. Bu özellik, MAX fazlarını öne çıkan bir malzeme grubu haline getirmektedir (Liu et al. 2009; Farle et al. 2015; Farle et al. 2016).

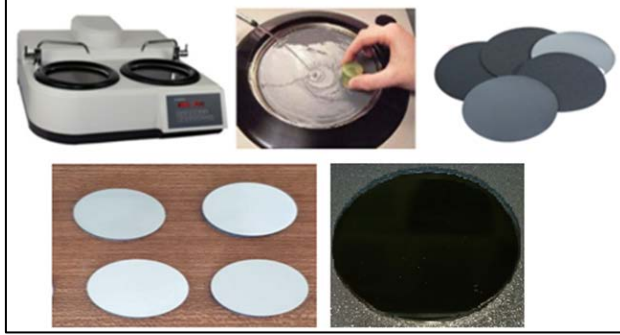
Bu çalışmada, magnetron sıçratma yöntemi ile üretilmiş olan çok katmanlı ve bal peteği yapısına sahip TiNi/MAX kompakt kaplamaların kendi kendi iyileştirme özellikleri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

TiNi/MAX kompakt kaplamalar, M2 ve Inconel 718 taban malzemeleri üzerine uygulanmıştır. Bu taban malzemeler, 30 mm çapında ve 3 mm kalınlığına sahiptir. Kaplama işlemi öncesinde her taban malzeme, yüzeylerindeki kirleri temizlemek, pasif tabakayı ortadan kaldırmak ve gerekli pürüzlülük seviyesini sağlamak amacıyla çeşitli hazırlık adımlarından geçirilmiştir. Bu süreçte, her numune SiC zımpara kâğıtları kullanılarak uygun bir

şekilde parlatılmıştır. Kaplama işlemi yapılmadan önce her malzeme, kral suyu çözeltisinde kısa bir süre bekletilip kurutulmuş ve ardından kaplama için hazırlanmıştır.

Şekil 1. Taban malzemelerin parlatma işlemi

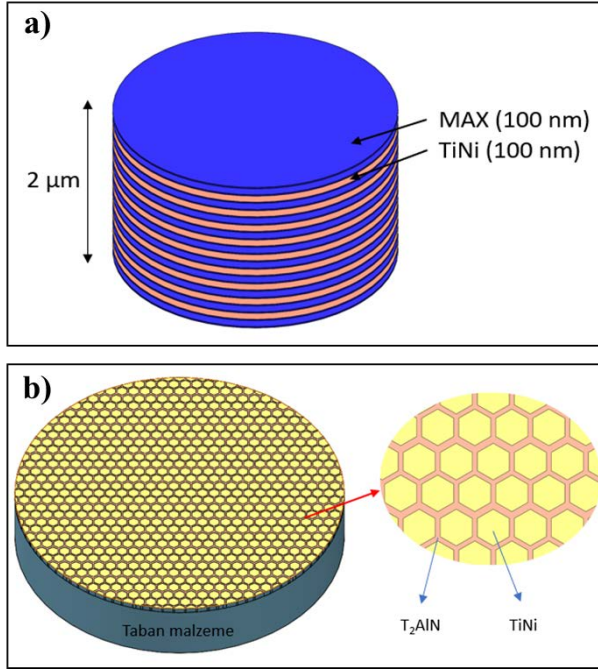


TiNi/MAX kompakt kaplamaların üretimi için Kapalı Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma Sistemi (CFUBMS) kullanılmıştır. Kaplamalar taban malzemesinin türüne, sahip oldukları katman sayılarına ve kaplamanın türüne göre isimlendirilmiştir. M2 üzerine biriktirilen çok katmanlı kaplamalar M2 10K, M2 16K ve M2 20K olarak isimlendirilirken, Inconel 718 üzerine biriktirilen kaplamalarda benzer şekilde Inc 10K, Inc 16K ve Inc 20K olarak isimlendirildi. Bal peteği yapıya sahip filmler ise R1-M2 ve R1-Inc olarak isimlendirildi. İlk aşamada, Ti_2AlN MAX fazı yapısının elde edilmesi amacıyla, Ti ve Al hedef güçleri sabit tutularak, farklı azot akış oranlarında filmler üretilmiştir. Ardından, bu filmlere çeşitli sıcaklıklarda ısıtılma işlemleri uygulanmış ve $750^{\circ}C$ 'de tavlanan filmlerde Ti_2AlN MAX fazı yapısının baskın olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama ve ısıtılma işlem parametreleriyle ilgili bu bulgular, önceki çalışmamızda (Cakir et al., 2024) detaylı olarak sunulmuştur.

TiNi/MAX kompakt kaplamalar, çok katmanlı ve bal peteği yapısına sahip olacak şekilde üretilmiştir. Çok katmanlı yapıya sahip filmler, 10, 16 ve 20 katmandan oluşacak şekilde

toplamda 2 mikrometre kalınlıkta biriktirilmiştir. Filmlerin yapısı oluşturulurken, Ti_2AlN MAX fazı katmanları üzerine TiNi katmanları biriktirilmiştir. Ardından, tüm filmler belirlenen uygun ısıtım işlem sıcaklıklarında tavlınmıştır. Çok katmanlı filmlerin üretiminde kullanılan parametreler, önceki çalışmamızda (Duran, 2024) detaylı olarak verilmiştir.

Şekil 2. TiNi/MAX kompakt kaplamaların mimarisi (a) çok katmanlı kaplama (b) bal peteği yapısına sahip kaplama



Bal peteği yapısına sahip filmlerde ise, taban malzemeler üzerine ilk etapta 2 mikron kalınlığında Ti-Al-N filmleri biriktirilmiştir. Bu filmlerin yüzeyine, litografi işlemleri ile 50 mikron köşegen uzunluğuna ve 10 mikron kenar kalınlığına sahip petek deseni kazandırılmıştır. Son aşamada, bu filmler Endüktif Bağlı Plazma (ICP) Aşındırma cihazına yerleştirilerek, belirlenen aşındırma parametreleri ve uygun gaz akış oranlarıyla iç kısımları boşaltılmış ve kenar kısımları Ti₂AlN film yapısına

sahip petek desenli filmler üretilmiştir. Ti_2AlN MAX fazı filmlere petek yapısının kazandırılması ile ilgili tüm işlem adımları ve çalışma parametreleri, önceki çalışmamızda (Duran et al., 2024) detaylı olarak açıklanmıştır. Petek yapısı kazandırılmış Ti_2AlN MAX fazı filmlerin iç kısımları, $TiNi$ filmler ile doldurularak bal peteği desenine sahip hibrit $Ti_2AlN/TiNi$ kaplamaları elde edilmiştir. İç kısımlar $TiNi$ kaplamalar ile doldurulduktan sonra, mekanik parlatma işlemleri gerçekleştirilmiş ve önceden belirlenen ısıl işlem parametreleri kullanılarak tavlama işlemi yapılmıştır. $TiNi$ /MAX bal peteği kaplamaların üretimi sırasında uygulanan tüm parametreler ve işlem adımları, önceki çalışmamızda (Duran & Çiçek, 2025) detaylı olarak verilmiştir.

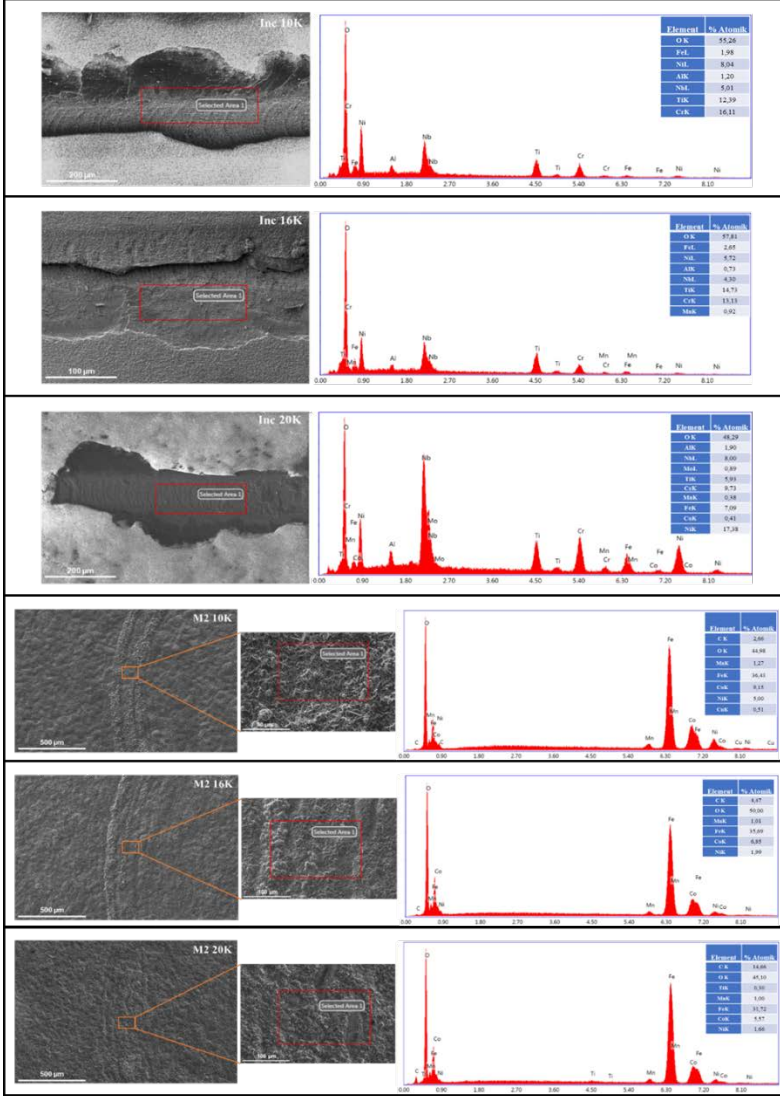
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

$TiNi$ /MAX çok katmanlı ve bal peteği desenine sahip filmlerin kendi kendini iyileştirme özelliklerinin incelenmesi amacıyla, filmlerin yüzeyinde oluşturulan multi-pass çizik izleri, aşınma izleri ve batıcı uç izleri analiz edilmiştir. Bu izlerin çevresinde ve içinde oluşan çatlakların kendi kendini iyileştirmesi için, literatürde yer alan benzer çalışmalar dikkate alınarak çeşitli ısıl işlemler uygulanmıştır. Song ve ark. (2012), Ti_3AlC_2 MAX fazına sahip malzemenin her iki ucundan uyguladıkları çekme kuvvetiyle yapısında çatlaklar oluşturmuşlardır. Çatlakların kendi kendini iyileştirme yeteneklerini belirlemek için bu malzemeye 2 saat boyunca $1100^{\circ}C$ 'de tavlama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan incelemeler, oluşan çatlakların Al_2O_3 ve TiO_2 ile dolarak iyileştiğini göstermiştir. Lee ve ark. (2023), Ti_2AlC MAX fazına sahip bulk malzeme üzerinde, 1,98 mm çapındaki WC bir bilye ile 3500 N yük uygulayarak büyük izler ve çatlaklar oluşturmuşlardır. Ardından bu malzemeye $1000^{\circ}C$ 'de 2 saat süreyle ısıl işlem yaparak, batıcı uç hasarının ve çatlakların oksit oluşumu ile büyük oranda kendi kendine iyileştiğini ortaya

koymuşlardır. Wang ve ark. (2020), magnetron püskürtme yöntemiyle MAX fazı yapısına sahip $Ti_2(Al_{0,6}Sn_{0,4})C$ filmlerini üretmiştir. Bu filmlerin yüzeyinde Vickers batıcı uç ile oluşturdukları çatlakların kendi kendini iyileştirebilme kabiliyetine sahip olduklarını ve Ti_2AlC MAX fazının yapısına eklenen Sn elementinin, çatlakların kendi kendini iyileştirme kapasitesini artırabileceğini incelemişlerdir. Yapılan analizler sonrasında batıcı uç ile oluşturulan hasarların ve bu hasarlar etrafındaki çatlakların önemli derecede kapanarak iyileştiğini göstermiştir. İyileşen bölgelerden alınan analiz sonuçları ise SnO_2 ve TiO_2 oksitlerinin varlığını ortaya koymuştur.

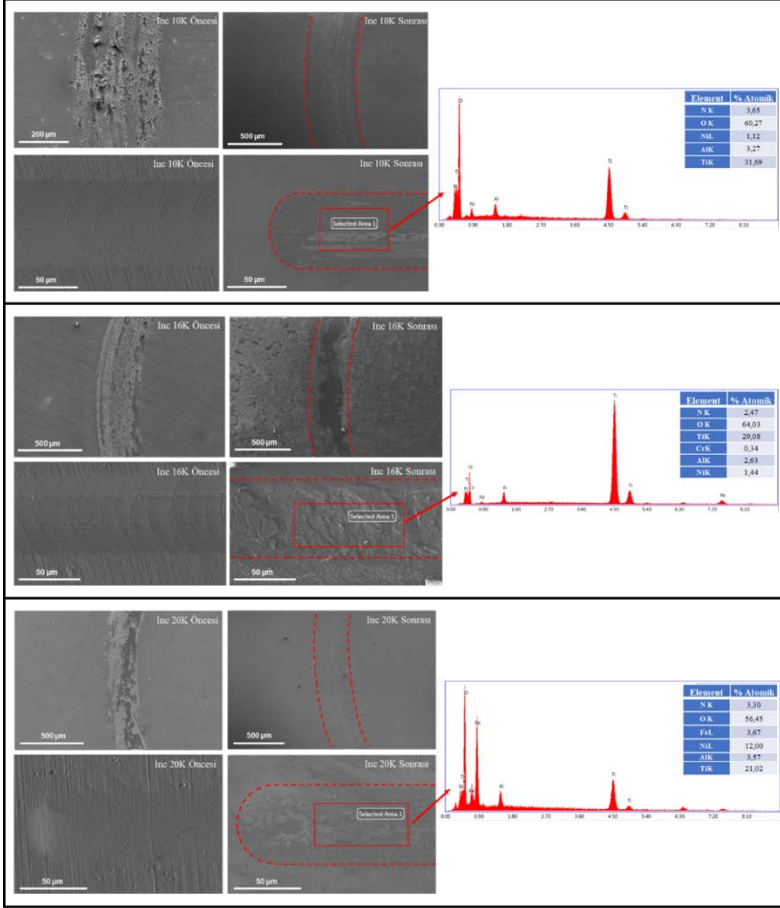
$TiNi/MAX$ çok katmanlı ve bal peteği desenine sahip kompakt kaplamaların yüzeylerinde oluşturulan hasarların (aşınma, multi-pass çizik ve batıcı uç izleri) kendi kendini iyileştirebilme özelliklerinin incelenmesi için literatürdeki benzer çalışmalar göz önünde bulundurularak ilk etapta 2 saat boyunca $1000^{\circ}C$ 'de tavlama işlemleri yapılmıştır. Isıl işlem sonrası herhangi bir iyileşmenin olup olmadığını tespit etmek için filmlerin yüzeyindeki hasarlı bölgelerden SEM görüntüleri alınıp ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 2'de sunulmuştur. SEM görüntüleri incelendiğinde, filmlerin yüzeyinde kalın bir oksit tabakasının varlığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda hasarlı bölgelerden alınan EDS sonuçlarına göre belirlenen yüksek oksijen miktarı bu oksit oluşumunu doğrulamıştır. Ek olarak, Inconel 718 taban malzeme üzerine büyütülen filmlerde büyük oranda Ni ve Cr, M2 taban malzeme üzerine büyütülen filmlerde ise Fe tespit edilmiştir. Taban malzemelerden gelen elementlerin Ni-O, Cr-O ve Fe-O oluşumlarına yol açtığını gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, $TiNi/MAX$ kompakt kaplamaların $1000^{\circ}C$ 'lik ısıtıl işlem sonrası yapısal bütünlüğünü kaybettiği tespit edilmiştir.

Şekil 3. TiNi/MAX kompakt kaplamaların yüzeyindeki hasarların 1000°C ısıl işlem sonrası örnek SEM ve EDS sonuçları



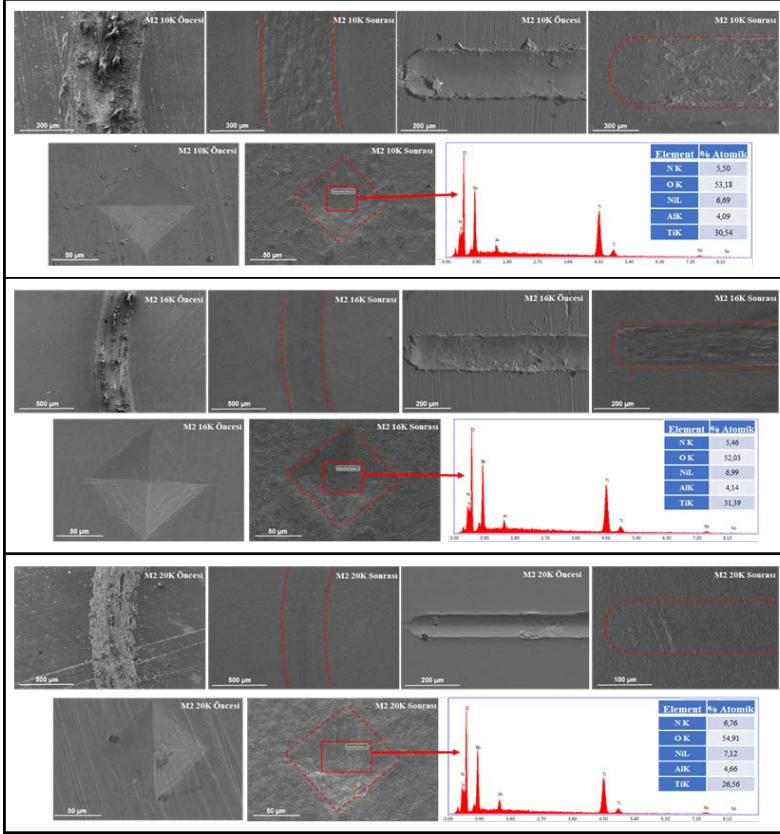
TiNi/MAX kompakt kaplamaların kendi kendini iyileştirme yeteneklerinin tespit edilebilmesi için ısıl işlem sıcaklığı 800°C'ye düşürülerek yeni numuneler için tekrar SEM ve EDS analizleri yapılmıştır.

Şekil 4. Inc 10K, Inc 16K ve Inc 20K filmlerin üzerindeki hasarların ısıtıl işlem öncesi ve sonrası SEM ve EDS sonuçları



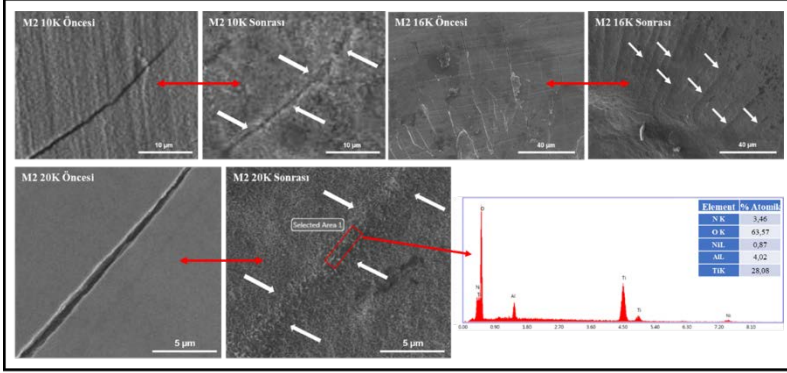
Şekil 4'te, ısıtıl işlem sonrasında, Inconel 718 üzerine büyütülen çok katmanlı filmlerden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. TiNi/MAX çok katmanlı filmlerde katman sayısının artışı ile birlikte hasarlı bölgelerdeki iyileşmenin daha etkili olduğu tespit edilmiştir. İyileşme bölgelerinden alınan EDS sonuçları, Ti_2AlN MAX fazı yapısından gelen Ti ve Al elementlerinin yanı sıra, yüksek oranda O elementinin varlığını göstermiştir. Bu durumda filmlerin iyileşmesinde Ti-O ve Al-O oluşumlarının etkin olduğunu açıklar.

Şekil 5. M2 10K, M2 16K ve M2 20K filmlerin üzerindeki hasarların ısıtılma öncesi ve sonrası SEM ve EDS sonuçları



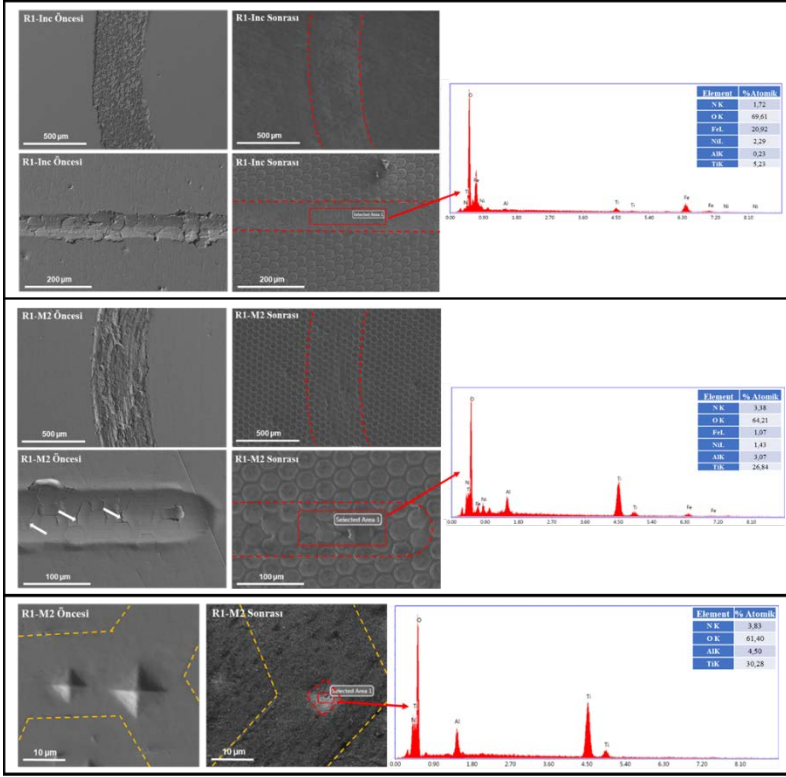
Şekil 5'te, ısıtılma sonrasında, M2 üzerine büyütülen çok katmanlı filmlerden elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Katman sayısındaki artışa bağlı olarak TiNi-Ti₂AlN sisteminin daha uyumlu bir yapı sergileyerek iyileşme kapasitesini arttırdığı görülmüştür. M2 20K filmindeki aşınma ve çizik izlerinin neredeyse tamamen iyileşmiş olması, bu iyileşme trendinin en belirgin örneğidir. Ayrıca, batıcı uç izlerinde de önemli bir iyileşme gözlemlenmiş olup, izlerin içindeki ve çevresindeki çatlaklar tamamen kapanmış durumdadır. EDS analiz sonuçları, bu iyileşmenin gerçekleşmesinde O, Ti ve Al elementlerinin katkısını açıkça ortaya koymuştur.

Şekil 6. M2 10K, M2 16K ve M2 20K filmlerin üzerindeki çatlakların ısıt işlem öncesi ve sonrası SEM ve EDS sonuçları



Inconel 718'e kıyasla M2 üzerine biriktirilen çok katmanlı filmlerden alınan SEM ve EDS analizlerine göre iyileşmenin daha iyi seviyelerde gerçekleştiği görülmüştür. Bu nedenle Şekil 6'da M2 üzerine biriktirilen çok katmanlı filmlerdeki çatlak hasarlarının ısıt işlem öncesi ve sonrasına ait örnek SEM görüntüleri 50 µm'den daha düşük ölçeklendirme kullanılarak alınmıştır. SEM görüntüleri üzerinde beyaz oklar ile belirtilen çatlaklar, ısıt işlem sonrasında artan katman sayısı ile birlikte daha etkili bir iyileşme sürecine girmiştir. M2 10K filminde, ısıt işlem sonrası çatlak bölgesinde kısmi bir iyileşme gerçekleşmiş olsa da tam kapanmanın sağlanamadığı tespit edilmiştir. Buna karşın, M2 20K filmindeki derin çatlak bölgesinin tamamen kapandığı ve iyileşme gösteren bu bölgelerde yüksek miktarda O, Ti ve Al elementlerinin bulunduğu belirlenmiştir. Elde edilen veriler, çatlakların Al-O ve Ti-O gibi yeni oluşan oksit bileşikleriyle dolarak kendi kendini iyileştirebildiğini ortaya koymuştur.

Şekil 7. R1-M2 ve R1-Inc filmlerin üzerindeki hasarların ısıl işlem öncesi ve sonrası SEM ve EDS sonuçları



Şekil 7'de, R1-M2 ve R1-Inc filmlerindeki hasarlı bölgelere ait ısıl işlem öncesi ve sonrası SEM ve EDS analiz sonuçları sunulmuştur. Isıl işlem sonrası elde edilen SEM görüntülerinde, R1-Inc filminin aşınma ve multi-pass çizik izlerinin petek yapısını tamamen kaybettiği ve bu bölgelerde büyük oranda Fe ve O elementlerinin tespit edildiği görülmüştür. Bu durum, kendi kendini iyileştirme mekanizmasının bu filmde etkili olmadığını ortaya koymuştur. Ancak R1-M2 filminde aşınma izi içindeki petek yapısının bütünlüğünü koruduğu gözlemlenmiştir. Isıl işlem öncesinde multi-pass çizik izi üzerinde belirlenen çatlakların, ısıl işlem sonrası tamamen iyileştiği tespit edilmiştir. R1-M2 filminde, Ti_2AlN bölgesinde

oluşan batıcı uç izlerinin tamamen kapandığı ve EDS sonuçlarının Ti-O ve Al-O bileşiklerinin oluşumunu doğruladığı belirlenmiştir.

Bu bulgular, 800°C’de gerçekleştirilen ısıtıl işlemin Ti₂AlN filmlerinin kendi kendini iyileştirme mekanizmasını etkin bir şekilde desteklediğini ortaya koymuştur.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, kapalı alan dengesiz magnetron sıçratma tekniği kullanılarak üretilen TiNi/MAX kompakt kaplamaların kendi kendini iyileştirme yeteneği araştırılmıştır.

Elde edilen bulgular, TiNi/MAX çok katmanlı ve bal peteği desenli filmler için en uygun iyileşme sıcaklığının 800°C olduğunu göstermiştir. Çok katmanlı yapıdaki filmlerde, katman sayısındaki artış ile Ti₂AlN-TiNi sisteminin daha iyi bir uyum sağladığı ve iyileşme performansının arttığı belirlenmiştir. Bal peteği yapısına sahip filmler incelendiğinde, özellikle R1-M2 filmlerinde iyileşmenin daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Hasarlı bölgelerde gerçekleştirilen EDS analizleri, filmlerde gözlemlenen iyileşmenin, yeni oluşan Al-O ve Ti-O oksit bileşikleri sayesinde gerçekleştiğini doğrulamıştır.

5. ÖNERİLER

Gelecekte yapılacak çalışmalar kapsamında, TiNi/MAX çok katmanlı kaplamaların kendi kendini iyileştirme kabiliyetinin artırılmasına yönelik olarak, farklı katman sayıları ve katman kalınlıkları için optimum seviyeler belirlenebilir. Bu sayede iyileştirme mekanizmasının en etkin şekilde çalışması sağlanabilir. Ayrıca, TiNi/MAX petek yapıli filmlerde farklı geometrik özelliklerin incelenmesiyle iyileşme performansının en üst düzeye çıkarılması mümkün olabilir.

KAYNAKÇA

- Ali, M. A., Hossain, M. M., Uddin, M. M., Hossain, M. A., Islam, A. K. M. A., & Naqib, S. H. (2021). Physical properties of new MAX phase borides M₂SB (M= Zr, Hf and Nb) in comparison with conventional MAX phase carbides M₂SC (M= Zr, Hf and Nb): Comprehensive insights. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 1000-1018.
- Cakir, M., Cicek, H., Duran, S., Yilmaz, A. M., Gulen, G., & Efeoglu, I. (2024). The effect of different annealing temperatures on the mechanical and tribological properties of the Ti₂AlN MAX phase films. *Surface Engineering*, 40(2), 157-167.
- Duran S., (2024). *TiNi/MAX kompakt kaplamaların üretilmesi, yapısal, mekanik, tribolojik ve kendi kendini onarma özelliklerinin araştırılması*. ETÜ (Doktora Tezi).
- Duran, S., & Çiçek, H. (2025). Production of honeycomb-patterned hybrid Ti₂AlN/TiNi films and examination of Mechanical, Tribological, Adhesion and Fatigue properties. *Surfaces and Interfaces*, 56, 105549.
- Duran, S., Çiçek, H., Korkmaz, İ. H., & Efeoglu, İ. (2024). Application of honeycomb pattern to Ti₂AlN MAX phase films by plasma etching. *Applied Physics A*, 130(5), 272.
- Eklund, P., Beckers, M., Jansson, U., Högberg, H., & Hultman, L. (2010). The Mn+ 1AX_n phases: Materials science and thin-film processing. *Thin Solid Films*, 518(8), 1851-1878.
- Farle, A. S., Kwakernaak, C., van der Zwaag, S., & Sloof, W. G. (2015). A conceptual study into the potential of Mn+ 1AX_n-phase ceramics for self-healing of crack

- damage. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(1), 37-45.
- Farle, A., Boatemaa, L., Shen, L., Gövert, S., Kok, J. B. W., Bosch, M., ... & Sloof, W. G. (2016). Demonstrating the self-healing behaviour of some selected ceramics under combustion chamber conditions. *Smart Materials and Structures*, 25(8), 084019.
- Lee, K. S., Ahn, H., Lee, G. W., & Sloof, W. G. (2023). Self-healing of indentation damage in Ti₂AlC MAX phase ceramics. *Materials Letters*, 334, 133683.
- Liu, B., Wang, J. Y., Zhang, J., Wang, J. M., Li, F. Z., & Zhou, Y. C. (2009). Theoretical investigation of A-element atom diffusion in Ti₂AC (A= Sn, Ga, Cd, In, and Pb). *Applied Physics Letters*, 94(18).
- Rackl, T. (2020). *Increasing the chemical diversity of MAX phases* (Doctoral dissertation, lmu).
- Song, G. M. (2012). Self-healing of MAX phase ceramics for high temperature applications: evidence from Ti₃AlC₂. In *Advances in science and technology of Mn+ 1AXn phases* (pp. 271-288). Woodhead Publishing.
- Tavangarian, F., Hui, D., & Li, G. (2018). Crack-healing in ceramics. *Composites Part B: Engineering*, 144, 56-87.
- Wang, Z., Sun, J., Xu, B., Liu, Y., Ke, P., & Wang, A. (2020). Reducing the self-healing temperature of Ti₂AlC MAX phase coating by substituting Al with Sn. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(1), 197-201.

MİKROİŞLEME

Yılmaz KÜÇÜK¹

Bahramuddin JEGAR²

1. GİRİŞ

Mikroişleme kavramı, genellikle çok küçük ölçekte malzeme işlemeyi tanımlamaktadır. Mikro-ekranlar, mikro-sensörler, mikro-piller vb. gibi mikro-bileşenler/ürünler günlük hayatımızın tüm önemli alanlarına yerleşmiştir. Günümüzde, çok küçük boyutlu parçalar yüksek hassasiyette üretilebilmektedir. Böylece, düşük malzeme ve güç tüketimi, kolay taşınabilme, yüksek ısı transferi ve daha iyi süreç entegrasyonu ve otomasyonu sağlanabilmektedir. Mikroişleme, özellikle mikroelektronik, biyoteknoloji, optik ve mikromekanik sistemler gibi ileri teknoloji alanlarında kritik öneme sahip olduğu gibi otomotiv, havacılık, fotonik, yenilenebilir enerji ve tıbbi aletler gibi sektörlerde geniş uygulama alanı bulabildiği için büyük ilgi görmüştür (Jain et al., 2020; Çiçek, & Adem, 2011). Makine mühendisliğinde mikro işleme, malzemelerin yüzeylerini, şekillerini veya özelliklerini değiştirmek amacıyla çeşitli fiziksel, kimyasal ve termal yöntemlerin uygulanmasıyla yapılır. Bu yöntemler, mikromekanik, mikroelektronik ve biyoteknoloji gibi alanlarda kritik uygulamalara sahiptir ve çok çeşitli işleme teknikleri, malzeme türlerine ve istenen sonuca göre değişir. İşlem, genellikle 1 mm'den daha küçük olan

¹ Doç. Dr., Bartın Üniversitesi, Müh. Mim. ve Tas. Fak., Makine Müh. Böl. ykucuk@bartin.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7559-8794.

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Fakültesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, jegar.bahram2015@gmail.com, ORCID: 0009-0004-2601-116X.

özelliklerin işlenmesini ifade eder. Mikro üretim teknikleri, mikrometre ölçeğinde boyutlara sahip küçük bileşenlerin ve ürünlerin oluşturulmasını içerir (Chavan, Vishwanath, & B. Rajiv, 2023). Mikro mekanik işleme, geleneksel işleme operasyonlarına benzerdir, ancak kullanılan kesici takımlar minyatür ölçülerdedir (Jiang et al., 2024).



Şekil 1: Mikroişlemenin çalışma boyutları (Serje, David, Jovanny Pacheco, & Eduardo Diez, 2020).

Bu bölümde, dünya genelinde giderek artan önemiyle dikkat çeken bir işleme tekniği olan mikroişleme üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş, işleme yöntemlerine göre kategorize edilerek üretim sürecine sağladığı katkılar ele alınmıştır. Bu alanlar, teknolojiyi önemli ölçüde ilerletme, daha verimli ve hassas hale getirme ve çeşitli endüstriyel sektörlerde daha yaygın olarak uygulanabilir hale getirme potansiyeline sahiptir.

1.1. Mikroişlemenin Endüstriyel Alanlarda Kullanımı

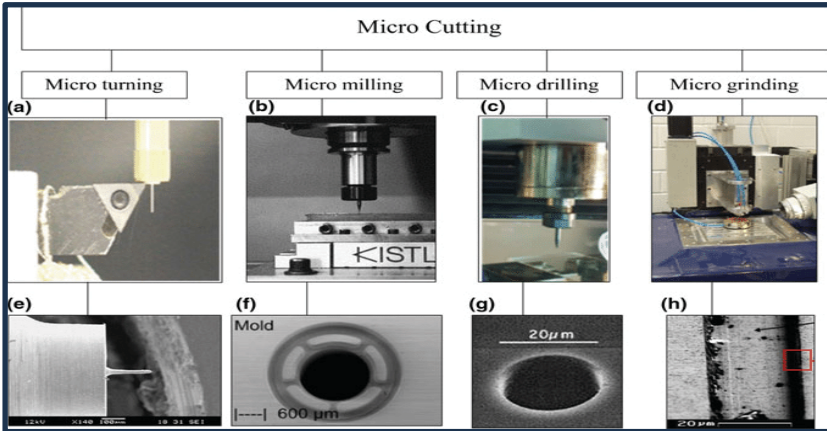
Modern üretim taleplerindeki sürekli artışla birlikte, mikroskobik desenler ve yapılar hazırlama yeteneği birçok teknolojinin ve cihazın ilerlemesi için çok önemlidir. Ultra yüksek hassasiyet elde etmek için mikro ölçekli malzemeleri çıkarmak da zordur. Yüzey mikro yapıları genellikle benzersiz dokusal yapılara sahiptir ve belirli bir periyodiklik sergiler, bu da onu çeşitli cihazlarda önemli performans özelliklerine ulaşmak için tercih edilen seçim haline getirir. Geçtiğimiz on

yılda, teknolojik ilerlemeler ve maliyet etkin üretim yöntemlerinin ortaya çıkmasıyla, endüstriyel uygulamalarda kendi kendini temizleme özelliğine sahip tasarlanmış yüzeylerin başarılı bir şekilde uygulanması sağlanmıştır. Üstün elektriksel ve mekanik performanslara sahip daha küçük, çok işlevli mikrocihazlar ve bütünleşmiş mikrosistemlere olan ilgi, mikro-üretim teknolojisinde çığır açan gelişmelere yol açmıştır. Yaygın olarak kullanılan mikro-üretim yöntemleri arasında elektrokimyasal işleme (ECM), elektriksel deşarj işleme (EDM), geleneksel mekanik işleme ve lazer ışını işleme (LBM) yer almaktadır. Örneğin, beyin elektrodunu mikroskobik ölçekte üretmek, böylece dokuya ve sinir sistemine verilen hasarı en aza indirebilmek için ECM ve EDM yöntemleri uygulanmıştır. Ultrasonik işleme, yüksek frekanslı titreşim kullanarak yapı yüzeyleri oluşturmak için de kullanılmaktadır. Malzeme yüzey mikro yapısının, süper hidrofilik veya süper hidrofobik yüzey olarak düzenlenmesi için lazer veya kimyasal işlemler gerçekleştirilmektedir. Fotovoltaik panelde kullanılan telin kalınlığını 40 μm 'den daha küçük ölçüde üretmek ve böylece yüksek fotoelektrik dönüşüm verimliliği sağlamak için lazer transfer baskı teknolojisi kullanılmıştır. Mikro üretim sürecinde, yüksek güç tüketimi, düşük entegrasyon ve zayıf performans gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Karmaşıklıklara ve yüksek maliyetlere rağmen mikro üretim, ultra büyük ölçekli bütünleşmiş devre üretimi, nanoölçekli elektronik, optoelektronik, yüksek yoğunluklu manyetik depolama aygıtları, mikroeletromekanik sistemler, biyoçipler ve nanoteknolojiye genişleyen yüksek performanslı ürünler ve yapılara olanak tanımaktadır. Bu uygulamalar, mikro üretim için daha da büyük geliştirme fırsatları sunmaktadır (Kodihalli et al., 2023; Ma, Zeyu et al., 2024; Lu, Jiajun, Sanjun Liu, and Yonghua, 2023; Wang, Yan et al., 2023; Zhang et al., 2024).

Mikro işleme, enerji verimliliği, yüksek hassasiyet ve miniaturizasyon gerektiren birçok endüstride hayati bir rol oynamaktadır. Gelişen teknolojilerle birlikte, mikro işlemenin endüstriyel ve malzeme alanlardaki uygulama alanlarının daha da genişlemesi beklenmektedir.

2. MEKANİK MİKRO İŞLEMLER

Mekanik mikroişleme, minyatürleştirilmiş 3D bileşenlerin üretimi için en etkili ve en uygun maliyetli yöntemlerden biridir. Mekanik mikroişleme süreçleri, geleneksel boyutlu işleme teknolojilerinin analogisine göre kategorize edilebilir. Mikro frezeleme, mikro delme, mikro tornalama En yaygın olarak uygulanan mekanik mikroişleme teknolojileridir (Balázs et al., 2021).



Şekil 2: Mikro kesme işleminin türleri, (a) mikro tornalama. (b) mikro frezeleme. (c) mikro delme. (d) mikro taşlama. (e) Tornalama ile üretilen 22 µm çaplı mikro çubuk. (f) Frezeleme ile üretilen mikro kalıp. (g) mikro delme işlemi ile delinmiş delik. (h) Taşlama ile üretilen mikro yarık (Hasçelik, A., & Aslantaş, K., 2021).

2.1. Mikro Frezeleme

Mikro frezeleme, artan gereksinimleri kolaylaştırmak için geliştirilen hassas bir mikromekanik kesme işlemidir (O'Toole, L., Kang, CW. & Fang, FZ., 2021). Mikro freze kesiciler veya mikro frezeler, yeterli geometrik ve boyutsal doğruluk ve işlenmiş yüzey bütünlüğüne sahip minyatür cihazlar üretmek için benzersiz ve önemli mikro aletlerdir. Mikro frezeleme teknolojisi, yüksek işleme hassasiyeti, esnekliği ve karmaşık üç boyutlu yüzeylerin işlenmesine uygunluğu nedeniyle mikroelektronik, optik, havacılık ve diğer endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen et al., 2021; Gao et al., 2024). Minyatürleştirme eğilimiyle birlikte, mikro işleme teknolojisi, nispeten yüksek bir malzeme çıkarma oranı sağlama ve karmaşık üç boyutlu yapılar üretme kabiliyeti nedeniyle hassas mikro bileşenlerin, özellikle mikro uç frezelerin üretiminde giderek daha önemli bir rol oynamaktadır, bunun sonucunda mikro kesici takımlara olan talep artmaktadır. Geleneksel frezeleme yöntemlerinden farklı olarak, mikro frezeleme, benzersiz bir doğrulukla karmaşık bileşenler oluşturmak için son teknoloji CNC makineleri ve titizlikle kalibre edilmiş aletler kullanmayı içerir. Mikro takım üretimi, ultra küçük çapları, karmaşık yapıları ve ultra sert malzemeleri nedeniyle zordur. Mikro frezelemenin anahtarı, yüksek hızlı ve gelişmiş kontrol sistemlerine sahip son teknoloji CNC makinelerinin kullanılmasıdır. Bu makineler olağanüstü bir doğrulukla çalışır ve karmaşık geometrilerin ve sıkı toleransların oluşturulmasını sağlar. Mikro frezelemede elde edilen hassasiyet eşsizdir ve bu da onu en ufak bir sapmanın bile performansı etkileyebileceği projeler için ideal bir seçim haline getirir. Taşlama, odaklanmış iyon demeti (FIB), elektriksel deşarj işleme vb. dahil olmak üzere çeşitli tekniklerle mikro takımları tasarlamak veya üretmek için birçok çalışma yapılmıştır (Sun et al., 2020; Rawal, Sunil, Ajay M. Sidpara, and Jinu Paul, 2022).

De Assis (de Assis et al., 2020) ve diğerleri, toz yatak füzyon (PBF) ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin mikro frezelemesini incelediler. 600 μm ve 800 μm çaplarındaki kaplamasız karbür küresel burunlu uç frezelerinin kullanıldığı çalışmada mikro takım çapının, takım yolu yörüngesinin, dış başına ilerlemenin, yukarı ve aşağı frezelemenin mikro kanal oluşumu ve her bir mikro kanalın yüzey kalitesi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Analizleri sonucunda en büyük mikro takımla (800 μm çap) üretilen mikro kanalların daha iyi yüzey kalitesi ve daha az çapak oluşumu sağladığı sonucuna varmışlardır. Duan (Duan et al., 2024) ve arkadaşları, mikro frezeleme kuvveti, mikro-morfoloji, 3B yüzey morfolojisi, alet aşınması ve yüzey pürüzlülüğü (Sa) ilişkisini incelemişlerdir. İşlemden kullanılan Al_2O_3 nano-yaglayıcının mikro frezeleme kuvvetini, takım aşınmasını ve Sa'yı azaltmada mükemmel performans gösterdiği bildirilmiştir. De Oliveira (De Oliveira et al., 2020) ve diğerleri, seçici lazer eritme (SLM) ve döküm yoluyla üretilen Ti6Al4V alaşımının mikro frezeleme işlemi için işlenebilirliğini karşılaştırmışlardır. Bunun için 2 kanallı ve 500 μm çaplı kaplamasız karbür mikro takımlar kullandılar. 18.000 rpm mil hızı, 40 μm aksel kesme derinliği kullanarak, dış başına ilerlemeyi 0,5'ten 4,0 μm 'ye değiştirdiler. Yazarlar, SLM ile üretilen malzeme daha yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen, bu malzeme için elde edilen kesme kuvvetlerinin ve takım aşınmasının döküm malzemesinden daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, SLM malzemesinin yüzey pürüzlülüğünün daha iyi olmasının kesme sırasında daha az plastik akış gösteren bu malzemenin daha düşük süneklik ve daha yüksek sertliğinden kaynaklandığı ifade edilmiştir.

2.2. Mikro Tornalama

Mikro boyutlu bileşenlere ve ürünlere artan taleple yönlendirilen minyatürleştirmedeki artış, son zamanlarda ivme kazanmıştır. Üretim doğruluğunun artmasıyla birlikte,

tasarlanmış mikro boyutlu bileşenlerin geliştirilmesinde de büyük ilerleme kaydedilmiştir. Mikroişleme, geleneksel işleme ile mikroeletromekanik sistem (MEMS) teknolojisi arasındaki boşluğu daraltarak mikro üretim alanındaki ilerlemelere öncülük etmektedir. Adından da anlaşılacağı gibi mikroişleme, 1 μm ile 999 μm aralığında, malzemeyi işleyerek veya kaldırarak mikron rejiminde parça üretimini ifade eder. Belirli bir minyatür parça olan mikro çubuk elektrot, çeşitli mikroişleme ve ölçüm uygulamalarında hızla popülerlik kazanmaktadır. İşlem, birkaç mikron kadar düşük toleranslara sahip parçalar üretebilir ve bu da onu yüksek hassasiyet seviyeleri gerektiren karmaşık şekiller ve özellikler oluşturmak için ideal hale getirir.

Mikro tornalama oldukça verimli bir işlemdir, çünkü nispeten kısa bir sürede çok sayıda parça üretebilir (Rahman et al., 2019). Mikro tornalama işlemi, konvansiyonel tornalama işleminin mikro seviyedeki hali olup, boyut farklılığı talaş kaldırma mekanizmasını da etkilemektedir. Mikro tornalama işleminde karşılaşılan problemlerin başında iş parçasındaki elastik deformasyon olup, kesme işlemi sırasında iş parçasında eğilmeye ve dolayısıyla kesme derinliğinin de değişmesine neden olabilmektedir. Bu işlemdeki bir diğer problem ise, ilerleme ve kesme derinliğinin takım kenar yarıçapına göre çok küçük seçilmesi sonucu kesme işlemi gerçekleşmeyip kazıma meydana gelmektedir. İlerleme değerinin takım kenar yarıçapından küçük seçilmesi ilerleme ile kesme kuvveti oranını arttırırken, kesme derinliğinin küçük seçilmesi de pasif kuvvet ile kesme kuvveti arasındaki oranın artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, mikro tornalama işleminde kesme kuvvetlerinin tahminine yönelik çalışmalar önem kazanmıştır (Hasçelik A., & Aslantaş K., 2021; Hasçelik A., & Aslantaş K., 2021). Le Coz (Le Coz et al., 2017) ve diğerleri, seçici lazer eritme (SLM) ile elde edilen ve dökümle elde edilen titanyum alaşımını (Ti-6Al-4V), mikro tornalama işleminde 8° nominal eğim açısına sahip

IFANGER MTNY 41015-R-TiAlN mikro torna takımlarını kullanarak işlenmesini incelemiştir. Analiz edilen kesme parametreleri olarak, 10 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızı ve 6–500 m/dak aralığındaki kesme hızları seçilmiştir. Kesme kuvveti, oluşan talaşlar ve yüzeyin altındaki mikro yapılar bakımından sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki malzemeyi de tornalarken, SLM ile elde edilen malzemeler için kesme kuvvetlerinin daha yüksek olduğu, bu artışın en düşük ilerleme hızında %3, en yüksek ilerleme hızında %24'e kadar değiştiği bildirilmiştir. Oluşan talaşların analizine ilişkin olarak, analiz edilen iki malzeme için de talaş morfolojisinin benzer olduğu, düşük talaş kalınlığı için konik helezon talaş, daha yüksek besleme oranları kullanıldığında ise uzun talaş elde edildiği ve yüzey altı mikro yapılarının analizinde ise herhangi bir mikroyapı değişikliğinin meydana gelmediği bildirilmiştir. Chavan (Chavan et al., 2024) ve diğerleri, Ti6Al4V alaşımının mikro tornalanmasında TiAlN kaplı tungsten karbür uçlar kullanılarak bir çalışma ortaya koymuşlardır. Yapılan mikro tornalama operasyonunda TiAlN kaplı tungsten karbür takım kullanılmıştır. Çalışma, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin mikro torna operasyonunda daha önemli faktörler olduğunu ve üretilen talaşların daha hızlı ısı dağılımı ile sonuçlanan toz formunda olduğunu, dolayısıyla sıcaklık ölçümünün daha zor hale geldiğini göstermiştir. Agari (Agari et al., 2024) ve diğerleri, kuru tornalama işlemi, ıslak tornalama işlemi ve işleme süreci sırasında iki bağımsız dokulu takım ile dört farklı takım kullanılarak deneysel bir araştırma yürütmüşlerdir. Amaç, kesme sıvısının takımla daha uzun süre temas halinde kalmasını sağlayarak yağlamayı ve soğutmayı iyileştirecek bir yüzey bağlantısı oluşturmak. Mikro dokulu takımın kullanılmasıyla, kesme kuvveti, güç ve yüzey pürüzlülüğü açısından karşılaştırmalar yapıldığında, takımın işleme operasyonu üzerinde derin bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Mikro dokulu takım, sürtünmeyi veya teknik olarak sürtünme katsayısını azaltmaya yardımcı olarak

metal kesme sırasında enerji kaybını azaltmıştır. Dokulu takım, dokusuz takımlarla karşılaştırıldığında üstün performans sergilemiştir. İşlem sırasında takım ucu ile iş parçası arasındaki temas alanında önemli bir iyileşme görüldüğü bildirilmiştir. İşlemin yüksek kesme hızlarında gerçekleştirildiğinde dokulu takımlarda sürekli bir talaş oluşturduğu ifade edilmiştir. Daha düşük hızlarda, işlem sırasında zayıf yapışma nedeniyle BUE gözlemlenmiştir. Kuru tornalama işlemi için daha büyük krater ve yanak aşınması oluşmuş olup, bu aşınmaların dokulu takımlar kullanıldığında kademeli olarak azaldığı vurgulanmıştır. Béjar (Béjar et al., 2019; Béjar et al., 2020) ve arkadaşları, yüksek narinlikteki bileşenlerde tornalama parametrelerinin paralellik, doğruluk, eksantriklik, yuvarlaklık, eş merkezlilik ve silindiriklik üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuçları, daha sert parçalarla gerçekleştirilen önceki testle karşılaştırmışlar ve ilerleme hızının kesme hızına kıyasla çoğu sapma üzerinde daha fazla etkiye sahip parametre olduğu sonucuna varmışlardır. Daha fazla sertliğe sahip parçalar, farklı kesme parametreleriyle yapılan teste daha az duyarlılık göstermiştir.

2.3. Mikro Delme

Son zamanlarda daha küçük, daha hızlı ve daha ucuz minyatür ürünler ve cihazlar üretme isteği, elektronik, havacılık, tıp ve otomotiv gibi endüstrilerde oldukça artmıştır. PCB (baskılı devre kartı), mikroskobik nozullar, mikro kalıplar, kimyasal mikoreaktör, diş implantasyonu, yüksek teknoloji tıbbi cihazlar, yakıt filtreleri ve yakıt ateşleme sistemleri gibi minyatür bileşenler, mikro işleme tekniklerinin yardımıyla üretilmektedir. Bunlar arasında mikro delme en temel mikro işleme tekniklerinden biridir ve genellikle 1 μm ile 1 mm arasındaki çapların delinmesi olarak tanımlanır. Mikro delme, hassas mühendislik, MEMS, tüketici ürünleri, biyomedikal mühendisliği, optik ekranlar, kablosuz ve optik iletişim ve PCB endüstrileri gibi alanlarda yaygın olarak

kullanılmaktadır. Tüm bu endüstriler arasında PCB üretimi, mikro delmenin en çok kullanıldığı işlemlerin başında gelmektedir (Hasan, Mahadi, Jingwei Zhao, & Zhengyi Jiang, 2017). Delme, PCB işlemede kritik bir adımdır çünkü ortaya çıkan delik kalitesi, devre katmanları arasındaki sinyal iletimini ve nihayetinde elektronik cihazların performansını etkileyecektir. PCB delmede, mikro matkap kırığı, mikro matkap aşınması, mikro delik konum sapması, reçine erimesi gibi işleme kusurları ortaya çıkmaktadır (Huang et al., 2023). Mekanik mikro delmede, takım kompozitle doğrudan temas ettiğinden takım aşınması ve işleme kuvveti kaynaklı geometrik hasarlar (örneğin delaminasyon, elyaf çekilmesi) ve olası takım kırılması, lifli kompozitlerin mekanik mikro delmesini zorlaştırmaktadır. Ancak, ulaşılabilir delik kalitesi mükemmeldir (Geier et al., 2023). Rajan (Rajan et al., 2016) ve arkadaşları tarafından açıklanan araştırmada mekanik mikro delme, elektrodeşarj işleme (EDM) ve lazerle delme olmak üzere üç mikro delme tekniği incelenmiştir. Sen (Sen et al., 2005) ve arkadaşları, elektrokimyasal delme (ECD), asit bazlı ECM delme işlemleri, şekillendirilmiş boru elektrolitik işleme (STEM), kılcal delme (CD), elektro-akış delme (ESD) ve jet elektrolitik delme (JED) dahil olmak üzere yalnızca elektrokimyasal işleme (ECM) mikro delme tekniklerini incelemişlerdir. Ayrıca, EDM (elektrodeşarj işleme) mikro delme, lazer mikro delme ve çeşitli ECM mikro delme işlemlerini karşılaştırdılar. Lee (Lee et al., 2014) ve diğerleri, yardımıyla tek kanallı bir mikro matkap tasarlayarak matematiksel olarak geometrik bir analiz gerçekleştirdiler. Çalışma sonucunda, matkap mukavemetini artırarak ve delme işlemi sırasında oluşan kesme torkunu azaltarak, geleneksel büküm tipi mikro matkaba kıyasla takım ömrünün arttığı bildirilmiştir.

Mikroişleme, geleneksel işleme yöntemlerinin küçültülmüş versiyonlarıyla yapılabileceği gibi, özel tekniklerle de gerçekleştirilebilir. Geleneksel olmayan mikroişleme yöntemleri terimi, mikroişlemede geleneksel yöntemlerden sapan üretim tekniklerini ifade eder. Bu yöntemler genellikle mikro ölçekte hassas işleme elde etmek için yenilikçi veya geleneksel olmayan yaklaşımları içerir. Mikro lazer ve mikro elektro erozyon işleme (μ -EDM), mikro işlemede yaygın olarak kullanılan iki önemli teknolojidir.

3. LAZER MİKRO İŞLEME

Lazer mikro işleme süreci (LMMP), kesme, oluk açma, tornalama, delme ve frezeleme gibi çeşitli endüstriyel uygulamalar için kullanılan yeni bir teknolojidir (Kar et al., 2022). Günümüzde, malzeme yüzeylerindeki mikro yapıları işlemek için yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında lazer işleme, ultra hassas tornalama, kimyasal aşındırma, nano baskı veya bunların kombinasyonları yer almaktadır. Ancak, ultra hassas tornalama pahalı ekipman gerektirir ve düşük işleme verimliliği gösterirken, kimyasal aşındırma karmaşıklığı, yüksek maliyeti ve çevresel etkisi nedeniyle zorluklar ortaya koymaktadır. Ek olarak, nano baskılama dar bir malzeme yelpazesine uygulanabilirliğiyle sınırlıdır. Buna karşılık, lazer işleme basitliği, yüksek verimliliği, kararlılığı ve kontrol edilebilirliği ile öne çıkmaktadır (Long et al., 2018; Mao et al., 2020; Ahmed et al., 2016). Özellikle, dokulandırma, sertleştirme, lazer kaplama ve litografi gibi yüzey modifikasyon yöntemleri cerrahi müdahaleler için tıbbi uygulamalarda, LiDAR gibi askeri uygulamalarda ve uydulardaki iletişimlerde uygulanmıştır. Endüstri 4.0'ın başlamasıyla birlikte lazer teknolojisi, yapay zeka (AI), sensörler, nanoteknolojide

uygulama ve katkı üretimi gibi daha fazla alana yayılmaktadır (Arulvel et al., 2023).

3.1. Lazer İşleme Parametreleri

Lazer kaplama, lazer yeniden eritme, lazer ablasyon, lazer yüzey dokulandırma, lazer alaşımlama ve lazer camlama gibi lazer tabanlı işleme yöntemleri, bir malzemenin yüzey veya yığın özelliklerini değiştirmek için yüksek yoğunluklu bir lazer ışını kullanmayı içermektedir. Lazer, eritme, yeniden kristalleşme, faz dönüşümü ve termal gradyan gibi çeşitli mekanizmalar aracılığıyla mikro yapısal değişikliklere neden olmaktadır. Islatılabilirlik, sertlik, sürtünme ve aşınma gibi yüzey özellikleri, doğrudan lazer işleme parametrelerinden etkilenmektedir. Yüzey özelliklerini etkileyen ana lazer parametreleri, lazer gücü, ışın boyutu, tarama hızı ve darbe süresidir (Liu et al., 2023). Pimenov (Pimenov et al., 2019) ve arkadaşları, yağlanmış kayma koşulları altında filmlerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için elmas benzeri nanokompozitin (DLN) femtosaniye lazerle ablasyonlu yüzey mikrotekstürlemesini kullanmışlardır. Sonuçlar, mikro kraterlerin alan yoğunluğunun ve yağ viskozitesinin, sürtünmeyi sınırdan karışık yağlama rejimine geçiren ana parametreler olduğunu ve dolayısıyla DLN filimlerinde aşınma ve sürtünmenin azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Ek olarak, lazer desenli DLC filmlerinin krater kenarlarının yağlanmış kayma sırasında düzleştiği ve aşınma izlerindeki yüzey pürüzlülüğünün azaldığı da belirtilmiştir. Barath (Barath et al., 2019) ve diğerleri, lazer gücünü modüle etmek için yinelemeli bir sayısal yaklaşım kullanarak karmaşık geometrilerde tekdüze sertlik elde etme zorluğunu ele almış ve işlem bölgesi boyunca sabit bir yüzey sıcaklığı sağlamışlardır. Yang ve Harris (Yang et al., 2020), 3B lazer tarama verilerini FEM'e dönüştürmek için doğrudan tarama-modelleme stratejisini tanıtmışlardır. Böylece, bir yapının hasarlı

kısımlarının belirlenmesine ve güncellenmesine yardımcı olarak hesaplama maliyetleri azaltılmıştır. Julian (Julian et al., 2024) ve arkadaşları, çok ölçekli lazer işleme optiklerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu üzerine odaklanmışlardır. Mikrometre altı modifikasyonlardan metre ölçeğindeki işlemlere kadar geniş bir yelpazede malzeme modifikasyonları incelenmiştir. Bu çalışma, farklı ölçeklerde lazer işleme için optik tasarım ve performans özelliklerine dair kapsamlı bir bakış sunmaktadır. Kechagias (Kechagias et al., 2022) ve diğerleri, lazerle kesilmiş kenarların yüzey pürüzlülüğünü doğru bir şekilde tahmin etmek için Beslemeli İleri ve Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağlarının (FFBP-ANN) topolojisini ve öğrenme parametrelerini optimize etmek için bir metodoloji sunmuşlardır. Metodoloji, gizli katmandaki optimum nöronları ve eğitim parametresi değerlerini belirlemek için gereken deneme sayısını azaltmak için Taguchi Deney Tasarımını (TDE) kullanmaktadır. Çalışma, dört değişkenin dokuz kombinasyonunu inceleyerek Ortalama Karesel Hatayı (MSE) en aza indirmeyi ve genel regresyon indeksini (Rall) en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Optimize edilmiş FFBP-ANN yöntemi ile ince termoplastik plakaların lazerle kesilmesi sırasında çeşitli kesim derinliklerindeki yüzey pürüzlülüğünü başarıyla tahmin etmişlerdir. Horník (Horník et al., 2022) ve diğerlerinin araştırması, lazer yüzey sertleştirmenin iki tip grafit dökme demir üzerindeki etkilerini karşılaştırarak, gri dökme demir durumunda daha yüksek sertleştirilmiş derinlik elde edilmiş ve sünek dökme demir durumunda ise daha yüksek sertlik gözlenmiştir. Sistaninia (Sistaninia et al., 2009) ve diğerlerinin çalışmasında, lazer yüzey sertleştirme sırasında ısı transferinde termoelastik sıcaklık, yer değiştirme ve stresi çözmek için Lagrangian ve Eulerian formülasyonları karşılaştırılmıştır. Isı akışını uzayda sabit olarak ele alan Eulerian formülasyonunun hesaplama verimliliğini artırdığını ve ayrık ısı iletimi sorunları için analitik çözümlerle iyi bir şekilde uyumlu olduğu vurgulanmıştır. Evdokimov (Evdokimov et al.,

2022) ve diğerleri, eğimli bir lazer ışınıyla lazer yüzey sertleştirmesini simüle etmek için bir Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) modeli sunmuşlardır. Çalışmada, lazer ışınının açısının malzemedeki ısı dağılımını ve faz dönüşümlerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Modelin tahminlerinin deneysel verilerle doğrulandığı ve iyi bir uyum gösterdiği bildirilmiştir. Bulgular, lazer ışınının eğiminin ayarlanmasının sertleştirme sürecini optimize edebileceğini ve üretim uygulamaları için değerli içgörüler sağlayabileceğini göstermektedir.

3.2. Malzeme Türlerine Göre Mikro Lazer İşleme

3.2.1. Metaller: Mikro lazer işleme, lazer ışının çok küçük bir noktaya odaklanmasıyla yüksek enerji yoğunluğu sağlar. Bu süreçte lazer ışını kullanılarak metaller üzerinde şekillendirme, kesme, gravür veya delme gibi işlemler gerçekleştirilir. Metal yüzeyine ulaştığında ısı oluşturarak malzemeyi buharlaştırır, eritir veya fiziksel yapısını değiştirir. Genellikle ince filmler veya mikro yapılar için tercih edilir. Yüksek erime sıcaklıkları ve ısı iletkenliği gibi özellikler işlem parametrelerini etkiler (Chen et al., 2022; He et al., 2024; Liu et al., 2022). Mikro lazer işleme, çelik, alüminyum, titanyum, bakır, nikel, altın ve gümüş gibi farklı metal türlerinde uygulanabilir. Her metalin optik özellikleri ve termal iletkenliği, lazer parametrelerinin optimize edilmesini gerektirir (Grigoriev et al., 2022). Xinlei (Xinlei et al., 2022) ve diğerleri, klimalı bir ortamda Ti6Al4V titanyum alaşım yüzeylerini ısınlamak için kullanılan bir femtosaniye lazer önermişlerdir. Çalışmalarında, yüzey mikro sertliğin %16,6 oranında iyileştirildiği ve lazer enerjisi 150 μJ 'ye ulaştığında kalıntı gerilmenin 746 MPa'ya ulaştığı ancak enerji 240 μJ olduğunda dinamik toparlanmanın termal gevşemesinden kaynaklanan kalıntı gerilmede belirgin bir düşüş (424 MPa) meydana geldiği bildirilmiştir. Tarchoun (Tarchoun et al., 2020) ve diğerleri, AISI 4340 çeliği üzerindeki ısıtma parametrelerinin ve tarama desenlerinin etkilerini

değerlendirmek için 3 boyutlu FEM termal analizini kullanarak sayısal ve deneysel araştırmalar yürütmüş ve modelin sıcaklık dağılımını ve sertlik profillerini tahmin etmedeki doğruluğunu göstermişlerdir. Sohrabpoor (Sohrabpoor et al., 2019) ve arkadaşları çalışmalarında, lazer dokulu 316L paslanmaz çeliğin özelliklerini tahmin etmede Yapay Sinir Ağları (ANN) ile Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemlerini (ANFIS) karşılaştırarak, tahmin doğruluğunda ANFIS'in üstünlüğünü vurgulamışlardır.

3.2.2. Polimerler: Günümüzde, yüksek hassasiyet, üretim hızı ve kullanım kolaylığı nedeniyle lazerlerin mikroakışkan üretim endüstrilerinde kullanımı artmıştır. Lazer mikroişleme, mikroakışkan cihazların üretimi için alt tabakanın optimum yüzey pürüzlülüğüne sahip hassas bir temassız üretim yöntemidir. Sıcak kabartma ve enjeksiyon kalıplama gibi çoğaltma yöntemleri olarak bilinen mikroakışkan yapıların üretimi için diğer dolaylı teknikler, lazer mikroişlemeye kıyasla daha karmaşık ve maliyetlidir (Madić et al., 2012; Li et al., 2004). 10 ila 500 μm arasında değişen kesişimlere sahip mikroakışkan yapılar, kimyasal ve biyokimyasal endüstrilerde kompozisyon ve ayırıştırma reaktörleri ile tıbbi endüstrilerde teşhis kitleri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Zeng et al., 2013; Yen et al., 2006; Yamada et al., 2015; Xia, Younan, & George M. Whitesides, 1998; Chen et al., 2012). Silikon, cam vb. gibi mikroakışkan cihazların yapımında kullanılan tüm mevcut malzemeler arasında, düşük maliyetleri ve üretim kolaylıkları, biyoyumlulukları ve yüksek kimyasal ve termal dirençleri nedeniyle çok çeşitli polimerler kullanılmaktadır (McDonald et al., 2000; Abgrall et al., 2007). Son yıllarda, polimerler üzerinde lazer mikroişleme alanında birçok deneysel ve teorik araştırma yürütülmüştür. Bunlardan bir kaç, Zhan (Zhan et al., 2021) ve arkadaşları, kendi kendini yağlayan PTFE üzerinde farklı aralıklarla 20 μm –30 μm derinlikte mikro oluk

yapıları ürettiler. Femtosecond (Fs) lazer işleminden sonra, mikro oluklarda birçok düzensiz mikro boşluk oluştuğu ve PTFE yüzeyinde mükemmel buzlanma direnci oluşturduğu bildirilmiştir. Fang (Fang et al., 2018) ve arkadaşları, ablatif alanın genişliğini (200–700 µm) ve tarama sayısını kontrol ederek PDMS yüzeylerine üç seviyeli tek yönlü mikro oluk yapıları tanıtmışlardır. Lazer ablasyon işlemi, tabanda katmanlı mercan benzeri bir yapı ve büyük bir pürüzlülük oluşturmuştur. Tarama sayısının artırılmasıyla daha derin mikro oluklar elde edildiği ve mikro oluk duvarları boyunca daha yüksek bir direnç etkisine ve kararlı bir direnç durumuna katkıda bulunduğu ifade edilmiştir. Prakash [54] ve arkadaşları, CO₂ lazer işleme yoluyla bir PMMA tabakası üzerinde bir dizi mikrokanal işlemişlerdir. PMMA mikrokanallarının, biyomedikal ve kimyasal analiz için uygun olan yüksek en boy oranlarına sahip pürüzsüz duvarlara sahip olduğu vurgulanmıştır. Madeira (Madeira et al., 2020) ve diğerleri, implantları bakterilerden korumak için yapay doku ile sıkı bir sızdırmazlık sağlayabilen, mikrokanal dizisine sahip lazerle işlenmiş zirkonya yüzeyleri geliştirmişlerdir. Wang (Wang et al., 2020) ve diğerleri, pikosaniyelik bir lazer kullanarak erimiş silika üzerinde mikrokanallar oluşturdular. Lazer parametrelerinin optimizasyonu sayesinde erimiş döküntü azaltılmış ve mikrokanal profilinin simetrisi iyileştirilmiştir. Üretilen mikrokanalların, çalışma sıvısını hücrelerle veya reaktiflerle sorunsuz bir şekilde taşımak için kullanılabileceği ifade edilmiştir.

3.2.3. Seramikler: Seramikler; mikroelektronik, yarı iletken üretimi, tıbbi cihazlar, havacılık ve uzay, kesici takımlar, hassas optikler, MEMS ve NEMS cihazları, yalıtım bileşenleri ve seramik kalıplarda yaygın olarak kullanılır. Ancak seramik bazlı malzemelerin geleneksel proseslerle üretimi ve işlenmesi, daha yüksek sertlikleri ve mekanik özellikleri nedeniyle her zaman zordur. Bu nedenle, bu gelişmiş malzemeler için gelişmiş

üretim teknikleri tercih edilmektedir ve bunun dışında lazer tabanlı prosesler yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramiklerin lazerle üretimi ve işlenmesinin faydaları arasında yüksek hassasiyet, azaltılmış termal hasar, temassız işleme ve karmaşık geometrilerle çalışma yeteneği yer almaktadır. Lazer teknolojisi gelişmeye devam ederek seramikler için çok çeşitli endüstrilerde daha da karmaşık ve çeşitli uygulamalara olanak tanımaktadır (Gopal et al., 2023; De Zanet et al., 2021). Seramik malzemeler, yüksek sertlikleri nedeniyle lazer mikro işlemede zorluk yaratır. Ancak, femtosaniye lazerler bu zorlukları aşmak için etkili bir araç sunar (Grossin et al., 2021). Wang (Wang et al., 2021) ve arkadaşları, 3 mm kalınlığında bir Cf/ SiC seramik kompozitinin trepan delme işlemine bir CW lazer uygulamışlardır. Yazarlar, CW lazerlerin Cf/ SiC kompozitlerinin sabit, uygun maliyetli ve hassas işlenmesini gerçekleştirebileceğini belirtmişlerdir. 1 mm'den daha küçük çaplı delikler açmak için bir CW lazer (1067 nm, 100 Hz, 80 μ s, 30–80 W) kullanılmış ve lazer parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. CW lazer delme işleminin oldukça verimli ve uygun maliyetli olduğu kanıtlanmıştır. Shen (Shen et al., 2019) ve Feng, acal modelini kullanarak YSZ seramiğinin pikosaniye darbeli lazer delme işlemi sırasında çatlak davranışını araştırdılar. 0,5 mm kalınlığındaki YSZ'nin trepan delme işlemi için 1030 nm, 8 ps, 125 μ J, 400 kHz, 20 μ m pikosaniye lazer kullanılmıştır. Düşük güç ve daha yüksek tarama hızının delme verimliliğinin artırabileceği ve ısı birikimini azaltabileceği kanıtlanmıştır. Wang (Wang et al., 2017) ve arkadaşlarının çalışmalarında, zamansal olarak şekillendirilmiş femtosaniye lazer darbeleri ile mekansal olarak şekillendirilmiş Bessel ışınları birleştirilmiştir. Bu yaklaşım, malzeme modifikasyonunu güçlendirmiş, enerji biriktirme verimliliğini ve aşındırma derinliğini 13 kat artırdığını gözlemlemişlerdir. Zhao (Zhao et al., 2020) ve arkadaşlarının çalışmasında, silisyum karbürdeki yüksek sıcaklık basınç

sensörleri için hassas diyaframların imalatında femtosaniye lazerin gerçek işleme kalitesi araştırılmıştır. 350 µm kalınlığındaki 4H-SiC yonga üzerinde fs lazerle 1200 µm çapında ve 270 µm derinliğinde kör delikler açılmış ve basınç sensörü için hassas diyafram olarak 80 µm kalınlığında bir membran oluşturulmuştur. Genel olarak çalışmada, fs-lazer mikroişlemenin, yüksek sıcaklık basınç sensörünün hassas diyaframının imalatında uygulanabilir bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Li (Li et al., 2018) ve arkadaşları, statik su destekli milisaniye lazer delme yönteminin, havada delmeye kıyasla delik kalitesini önemli ölçüde artırabileceğini kanıtlamışlardır.

Bu çalışmalar toplu olarak, mikro lazer işleme süreçlerini optimize etmede, gelişmiş malzeme özellikleri ve verimli endüstriyel uygulamalar sağlamada analitik modellerin kritik rolünün altını çizmektedir. Endüstriler belirli performans gereksinimlerini karşılamak için sürekli olarak yeni metal bileşimleri geliştirdikçe, mevcut modeller bu yeni malzemeler için sık sık güncellenmeli ve doğrulanmalıdır.

4. MİKRO ELEKTRO EROZYON İŞLEME

Mikro elektro erozyon işleme (µ-EDM), yüksek doğrulukta küçük ölçekli bileşenler üretmek için elektriksel deşarj kullanan hassas bir işleme sürecidir. Bu işlemde bir metal iş parçası, bir takım elektrodu ile iş parçası arasında tekrar tekrar kıvılcım üreterek ve malzeme kontrollü bir şekilde işlenir. µ-EDM'nin önemi, yüksek yüzey kalitesine sahip son derece hassas ve karmaşık bileşenler üretme yeteneğinde yatmaktadır. µ-EDM, tıbbi, otomotiv ve havacılık dahil olmak üzere çok çeşitli endüstrilerde kullanılan mikroeletromekanik sistemler (MEMS), mikroakışkan cihazlar ve diğer minyatür bileşenlerin üretiminde büyük bir öneme sahiptir (Korgal et al.,

2024). μ -EDM, mikro ölçekli düzeyde malzemelerde çok küçük özellikler ve karmaşık şekiller üretmek için kullanılan özel bir EDM biçimidir (Meena et al., 2017). μ -EDM, geleneksel EDM ile aynı prensipler üzerinde çalışır, ancak çok daha küçük bir ölçekte çalışır. μ -EDM'de, elektriksel deşarj çok küçük bir elektrot (genellikle çapı 50 mikrondan az) ile iş parçası arasında üretilir (Prakash et al., 2019). Elektrot genellikle yüksek erime sıcaklığına sahip malzemelerden veya yüksek sıcaklıklara dayanabilen ve işleme sürecinde elektrotta daha az aşınmaya neden olan diğer yüksek mukavemetli malzemelerden yapılır. μ -EDM'nin temel avantajlarından biri, son derece küçük özellikler ve karmaşık şekilleri yüksek hassasiyet ve doğrulukla üretme yeteneğidir. Bu, onu hassasiyetin kritik olduğu mikroakışkan kanalların, sensörlerin ve diğer minyatür bileşenlerin üretiminde değerli bir araç haline getirir. μ -EDM ayrıca diğer mikro işleme tekniklerini kullanarak elde edilmesi zor olan karmaşık üç boyutlu şekiller ve özellikler üretmek için de kullanılabilir (Sushil Kumar Choudhary, & R.S.J., 2017). Ancak, μ -EDM'nin elektrot aşınması potansiyeli ve elektriksel deşarjın boyutunu ve yerini kontrol etme zorluğu gibi bazı sınırlamaları da vardır. Bu sınırlamalar, özellikle μ -EDM için tasarlanmış gelişmiş kontrol sistemleri ve özel takımların kullanımıyla ele alınabilir (Hung, Wayne NP, & Mike Corliss, 2019). μ -EDM işleminin malzeme çıkarma mekanizması, darbe üreticinin tipi, plazma kanalının yarıçapı, eksen hareketlerinin çözünürlüğü ve takım elektrot boyutu açısından farklılıklara sahip olmakla birlikte EDM işlemininkiyle hemen hemen aynıdır (Modica et al., 2017). μ -EDM'nin çeşitli endüstriyel uygulamalara sahip çeşitli işlenmesi zor malzemeler üzerinde minyatürleştirilmiş şekil özellikleri oluşturmada verimli bir geleneksel olmayan işleme süreci olarak geliştiği daha önce belirtilmişti. Bu doğrultuda, mikro-EDM süreçlerinin parametrik optimizasyonu geçmiş araştırmacıların dikkatini çekmiş ve sorunu çözmek için çeşitli matematiksel

teknikler kullanılmıştır. Madhavi ve Srikanth (Madhavi, M., & P. Srikanth, 2023), çok çaplı elektrot kullanılarak 316 kalite paslanmaz çeliğin yüzey dokusunu iyileştirmek için yeni bir tekniğe odaklanmışlardır. Malzeme sabit voltajlı çok çaplı elektrotun ön kısmı ve darbe süreleri kullanılarak mikro elektrot tarafından delinmiştir. Sonuçlar, delme süresini değiştirmeden belirli voltaj ve darbe sürelerinde çok çaplı bir elektrot kullanmanın yüzey kalitesini iyileştirdiğini göstermektedir. Bu yenilikçi teknolojinin paslanmaz çelik 316 mikro delik delme alanında uygulanabilir ve yararlı olduğunu göstermektedir. Ali (Ali et al., 2021) ve diğerleri, iletken malzemeleri ve iletken olmayan malzemeleri μ -EDM kullanarak kesme modelleri uygulamaları açısından karşılaştırılmıştır. İletken malzemelerin kesilmesi için doğru teorik modelin pek mümkün olmadığını, dolayısıyla iletken olmayan malzemeler için neredeyse imkansız olduğunu belirtmişlerdir. Bu inceleme, μ -EDM kullanarak iletken olmayan malzemeleri kesmek için araştırma yapmaya büyük bir ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Venugopal (Venugopal et al., 2022) ve arkadaşları, μ -EDM işlemi için piezo aktüatör tabanlı bir döner takım besleme sistemi geliştirmişlerdir. Sistem, optimum kıvılcım aralığını koruyarak stabil işleme sağlamayı amaçlamaktadır. Deneysel sonuçlar, geliştirilen döner takım besleme sisteminin, daha büyük besleme ve daha yüksek mil hızlarında %1'den az hata ile çalıştığını göstermektedir. Takım dönüşü ile gerçekleştirilen işleme deneyleri, dönüşsüz işleme ile karşılaştırıldığında kör delik derinliğinde %29,21'lik bir artış sağlamıştır. D'urso (D'urso, G., and Chiara Ravasio, 2017) ve Ravasio, μ -EDM delme işlemi kullanılarak takım ve iş parçası malzemelerinin işleme parametreleri, termal ve elektriksel özelliklerinin etkisini incelemişlerdir. Çeşitli iş parçası malzemeleri (alüminyum, tungsten karbür ve paslanmaz çelik) ve takım malzemeleri (tungsten karbür ve pirinç) kullanılarak deneysel bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçları,

elektriksel parametrelerin ve elektrot özelliklerinin talaş kaldırma oranı (MRR) üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir.

Son yirmi yılda, EDM'deki mikro özelliklerin geliştirilmesi istikrarlı bir şekilde artmıştır. Üretim süreçlerinde üretilen öğelerin kalitesi ve doğruluğu, en iyi üretim koşullarının seçilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Malzemelerin belirli bir hızda çıkarılması ve takım aşınmasını en aza indirirken yüzey kalitesi gibi çok sayıda süreç değişkenini performans ölçümlerine bağlamak genellikle gereklidir. Parametreler düzgün bir şekilde kalibre edilirse μ -EDM ile yüksek hassasiyetli işleme gerçekleştirilebilmektedir.

5. ULTRASONİK MİKRO İŞLEME

Litografi, aşındırma, lazer, elektriksel deşarj işleme (EDM) ve elektrokimyasal işleme (ECM) gibi birçok üretim süreci, mikro ölçekli parçalar ve ürünler üretmek için uygulanmaktadır. Silikon, cam, yarı iletken malzemeler, kuvars kristali ve seramik gibi malzemeler mikroeletromekanik sistem (MEMS) aygıtlarında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Geleneksel ultrasonik işleme (USM)'den farklı olarak, ultrasonik mikro işleme (HR- μ USM) işlemi yüksek çözünürlük ve yüksek yüzey kalitesi sağlayarak düşük işleme hızlarını hedefler. Ultrasonik işleme (USM), sert ve kırılgan malzemelerin bir kısmını işlemek için çekici bir alternatif sunmaktadır. Ancak, mikro-ultrasonik işlemede takım aşınması işleme doğruluğunu olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle, işleme sırasında takım aşınmasını hesaba katmak ve telafi etmek gerekir. İşleme hızı, mikro alet ucunu iş parçasından sabit bir mesafede tutarak ve küçük bir genlikte titreştirerek azaltılır. Yüzey pürüzlülüğü, aşındırıcı parçacıkların uygun şekilde seçilmesiyle iyileştirilir (Yu et al., 2004; Kataria et al., 2016; Viswanath et al., 2014). Liu (Liu et al., 2023) ve diğerleri, mikro kanal dizilerinin yanı

sıra karmaşık iki ve üç boyutlu cam mikro yapıları üretmek için kullanılan ultrasonik titreşim destekli mikro elektrokimyasal frezeleme olarak bilinen bir teknik önerdiler. Wang (Wang et al., 2023) ve arkadaşları, hem ultrasonik enerjiyi hem de gaz alanlarını birleştiren hava korumalı ultrasonik destekli EMM konseptini tanıtır uygulamışlardır. EMM ile karşılaştırıldığında, AUA-EMM işlemi işlenmiş oluğun derinliğinde %9,78'lik bir artış sağlarken, genişliğini aynı anda %10,41 oranında azaltmıştır. Wu (Wu et al., 2023) ve arkadaşları, ultrasonik titreşim uygulamasının taşlama kuvvetlerinde azalma ve yapışmada azalma ile sonuçlandığını belirtmişlerdir. Ayrıca, malzeme çıkarma oranında iyileştirmelere yol açmıştır. Wang ve arkadaşları, SiC parçacıklarının, Al matrisinin ve SiC parçacıkları ile Al matrisi arasındaki arayüz tabakasının özelliklerinin dikkate alındığı bir mikro yapı tabanlı sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Ek olarak, %45 hacim kesirli SiCp/Al içeren bir deney, ultrasonik titreşim destekli taşlama işleminde kompozitlerin deformasyon ve arıza davranışını analiz etmek için kullanılmıştır (Wang, Haotao, Haijun Zhang, & Ming Zhou, 2023).

Özetle ultrasonik işleme, yüksek enerji verimliliği, yüksek güvenilirlik ve ölçeklenebilirlikle birlikte düşük bakım maliyetleri nedeniyle ticari olarak geniş şekilde uygulama alanı bulmuş bir tekniktir.

6. SONUÇLAR

Mikro işleme denilince en yaygın kullanılan teknik mikro mekanik işlemedir ve minyatürleşen dünyada hassas üretimin temelini oluşturmaktadır.

Mikro mekanik işleme türlerinden mikro frezeleme, mikro delme ve mikro tornalama işlemlerinin her biri, mikro ölçekte hassas üretim için önemli araçlardır. Bu işlemler

sayesinde çok küçük parçalar yüksek doğrulukla işlenebilmekte ve ileri mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek düzeye getirilebilmektedir. Ancak, her üç işlemde de bazı zorluklar bulunmaktadır. Takım aşınması, ısınma sorunları, malzeme seçimindeki zorluklar ve işlem sırasındaki hassasiyetin korunması, bu tür işlemler sırasında dikkate alınması gereken başlıca faktörlerdir ve işleme parametrelerinin optimizasyonunu gerektirir. Bunların yanında, bu mikro işlemlerin avantajları arasında yüksek hassasiyet, karmaşık geometrilerin işlenebilmesi ve minyatür parçaların üretimi sayılabilir. Bu nedenle mikro üretim süreçleri, özellikle mikroelektronik, biyoteknoloji, tıbbi cihazlar ve otomotiv gibi hassas uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, mikro frezeleme, mikro delme ve mikro tornalama işlemleri, mikro üretim süreçlerinin temel bileşenleri olarak önemli bir rol oynamaktadır.

Lazer mikro işleme, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren ve küçük boyutlu parçaların üretiminde çok etkili bir yöntemdir. Bu işlem, temassız işleme imkanı, yüksek yüzey kalitesi, karmaşık geometrilerin işlenmesi ve malzeme çeşitliliği gibi önemli avantajlar sunar. Bununla birlikte, işlem hızının genellikle düşük olması, enerji tüketimi ve büyük parçaların işlenmesindeki zorluklar gibi sınırlamaları da vardır.

Lazer mikro işleme, farklı malzeme türlerinde farklı özellikler ve sonuçlar elde edilmesini sağlar. Lazer ışınının malzeme üzerinde oluşturduğu etkiler, malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu nedenle lazer mikro işleme, metaller, seramikler ve polimerler gibi çok çeşitli malzemelerde farklı sonuçlar doğurur. Her bir malzeme türü, lazer ışınına farklı tepki verir ve bu da işleme sürecini etkiler. Aşağıda her bir malzeme türü üzerindeki lazer mikro işleme etkileri özetlenmiştir:

Metaller Üzerindeki Lazer Mikro İşleme Etkisi

Metaller, lazer mikro işleme için yaygın olarak kullanılan malzeme türlerindendir. Metal malzemeler lazer ışınının yüksek enerji yoğunluğuna çok duyarlıdır ve bu özellik, metal yüzeylerini kesme, delme, markalama veya yüzey modifikasyonu işlemleri için oldukça etkilidir.

Etkiler ve Sonuçlar:

- Kesme ve Delme: Lazer ışını, metal yüzeyine odaklandığında, yüksek ısıya yol açarak metalin buharlaşmasına veya erimesine neden olur. Bu, ince ve hassas delikler ile kesimler elde edilmesini sağlar. Özellikle ince metal levhaların kesilmesinde çok etkilidir. Lazerle işleme, oldukça dar ve düzgün kesim kenarları sağlar.
- Yüzey Modifikasyonu: Lazer ışınının metale etkisiyle, yüzeyde pürüzsüzlük, sertlik değişiklikleri ve morfolojik modifikasyonlar olabilir. Örneğin, lazerle yüzey sertleştirme işlemi, metalin mikro yapısını değiştirerek, yüzey sertliğini artırabilir. Bu tür işlemler genellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde, yüksek aşınma direnci isteyen parçalar için kullanılır.
- Buharlaşma ve Erime: Lazer ışını, metallerin genellikle buharlaşma noktasını aşacak kadar ısındığında, malzemenin buharlaşmasına neden olabilir. Metalin erimesi veya buharlaşması, işlem sırasında dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli faktördür. Fazla ısınma, malzemenin çevresinde geniş ısı etki alanları yaratabilir, bu da malzemenin mekanik özelliklerini değiştirebilir.
- Yüzey Pürüzlülüğü: Metalin lazerle işlenmesi, çok düzgün ve pürüzsüz yüzeyler elde edilmesini sağlar.

Yüksek hassasiyetli lazer mikro işleme, çok düşük pürüzlülük değerleriyle sonuçlanabilir.

- Aşırı Isınma: Bazı metallerin lazerle işlenmesi sırasında, işlem bölgesinde ısının aşırı birikmesi malzemenin mikroyapısını bozabilir ve mekanik özelliklerinde olumsuz değişiklikler yaşanabilir. Özellikle sıcaklık toleransına duyarlı alaşımlar bu durumu daha belirgin bir şekilde gösterir.

Seramikler Üzerindeki Lazer Mikro İşleme Etkisi

Seramikler, özellikle yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve sert malzemeler olmalarına rağmen, lazerle işlenmeleri zorlu bir süreçtir. Lazer mikro işleme, seramikler üzerinde çoğunlukla yüksek hassasiyetle yüzey işleme, delik açma veya markalama gibi işlemler için kullanılır.

Etkiler ve Sonuçlar:

- Kesme ve Delme: Seramikler, yüksek sertlikleri nedeniyle genellikle mekanik işleme yöntemlerine karşı dirençlidir, ancak lazerle işleme bu sert malzemeler üzerinde oldukça etkili olabilir. Lazer ışınının seramiği hedef alması, yerel ısınmayı artırarak, seramiğin kırılmasına veya çatlamasına neden olmadan delik açılmasını veya kesilmesini sağlar. Ancak, seramikler kırılğan malzemeler olduğu için, aşırı ısınma veya hızla soğuma çatlamalara yol açabilir.
- Yüzey Modifikasyonu: Lazer ışını, seramik yüzeylerinde özellikle pürüzlülük azaltma ve mikro yapıyı değiştirme amacıyla kullanılabilir. Lazerle yüzey sertleştirme veya yüzeyde mikroskobik değişiklikler yapılabilir. Ancak seramikler, lazer ışınının çok yüksek enerjiye sahip olmasından dolayı işleme sırasında termal çatlamalar veya yüzeyde deformasyonlar gösterebilir.

- **Çatlama Riski:** Seramikler genellikle termal genleşme farklarından dolayı kırılındır. Lazerle işleme sırasında sıcaklık değişimleri çok hızlı olursa, seramiğin çatlaması veya kırılması olasılığı artar. Bu nedenle, lazerle işleme sürecinde doğru soğutma yöntemlerinin kullanılması önemlidir.
- **İnce Çizim ve Markalama:** Lazerle işleme, seramik malzemelerde de detaylı desenler, yazılar veya markalamalar yapmak için kullanılabilir. Lazer ışını, seramik yüzeylerinde çok ince çizimler veya yazılar bırakabilir, bu da özellikle seramik bileşenlerin işaretlenmesi ve izlenebilirliği için önemlidir.
- **Düşük Termal Direnç:** Seramikler, lazer ışını tarafından ısıtıldıklarında hızla ısınabilirler. Ancak, lazerin etkisiyle seramiklerin termal genleşmesi kontrollü bir şekilde yapıldığında, istenilen mikro yapısal değişiklikler elde edilebilir.

Polimerler Üzerindeki Lazer Mikro İşleme Etkisi

Polimerler, lazer mikro işleme ile çok hassas bir şekilde işlenebilir. Bu malzeme türü, genellikle düşük erime noktalarına sahip olduğu için lazerin etkisiyle kolayca şekillendirilebilir veya işlenebilir. Polimerler üzerinde lazer mikro işleme genellikle kesme, delme, markalama ve yüzey modifikasyonu gibi işlemler için yaygın olarak kullanılır.

Etkiler ve Sonuçlar:

- **Kesme ve Delme:** Polimer malzemeler lazer ışınlarına karşı oldukça hassastır. Lazer ışını, polimeri çok düşük sıcaklıklarla ısıtarak, buharlaştırma veya eriyerek malzemeyi keser. Bu işlem, çok ince ve düzgün kenarlı kesimler sağlar. Lazerle işlenmiş polimer parçalar genellikle yüksek hassasiyetle üretilir.

- **Yüzey Modifikasyonu:** Polimerler üzerinde lazerle yüzey modifikasyonu yapmak mümkündür. Lazer, polimerin yüzeyini ısıtarak, kimyasal bağlarını kırabilir ve yüzeyde bazı değişiklikler oluşturabilir. Bu, polimer yüzeylerinin pürüzsüzleştirilmesi veya yeni yüzey özelliklerinin kazandırılması amacıyla yapılabilir.
- **Yüzey Markalama:** Lazerle işleme, polimerler üzerinde markalama ve yazı yazma için yaygın olarak kullanılır. Bu işlem, polimer yüzeyine kalıcı izler veya logolar bırakmak için idealdir. Lazer markalama işlemi, polimerin yüzeyine çok ince ve detaylı işaretler bırakabilir.
- **Sıcaklık ve Erime:** Polimerler, lazer ışını ile ısındığında kolayca erir veya buharlaşır. Bu özellik, polimerlerin lazerle kesilmesini veya işlenmesini kolaylaştırır. Ancak, aşırı ısınma ve yanlış lazer parametreleri polimerlerin deformasyonuna veya yanmasına neden olabilir.
- **Düşük Termal Direnç ve Yüksek Hassasiyet:** Polimerler, düşük termal direnç gösterdiğinden lazerle işlem sırasında sıcaklık hızla yükselir. Bu, polimerlerin lazerle işlenmesinde daha hassas ve kontrollü bir ısıtma süreci gerektirir.

Özetle lazer mikro işleme, metaller, seramikler ve polimerler gibi çok çeşitli malzemelerde farklı etkiler yaratır. Her malzemenin lazer ışınına tepki verme şekli, işlem parametrelerine (lazer gücü, hız, odaklanma) ve malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Metallerde genellikle yüksek ısı üretimi ve buharlaşma görülürken, seramiklerde termal çatlamalar ve kırılmalar riski daha yüksektir. Polimerlerde ise erime veya buharlaşma daha kolay gerçekleşir ve hassas kesimler elde edilebilir. Bu nedenle, her malzeme için

lazer mikro işleme parametrelerinin dikkatlice optimize edilmesi gereklidir.

Lazer mikro işleme, mikroelektronik, optik bileşenler, tıbbi cihazlar, otomotiv endüstrisi ve hatta biyoteknoloji gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Her geçen gün gelişen teknoloji ile daha verimli ve ekonomik hale gelmesi beklenen lazer mikro işleme, gelecekte çok daha geniş bir uygulama alanı bulacaktır.

Bir diğer yöntem ise, mikro elektro erozyon işleme (μ -EDM), mikro boyutlu ve hassas parçaların üretimi için son derece etkili bir yöntem sunar. Yüksek hassasiyet, sert malzemelerle çalışma yeteneği, karmaşık geometrilerin işlenmesi ve küçük boyutlu detayların oluşturulabilmesi gibi birçok avantaj sağlar. Ancak, işlem hızının düşük olması, yüzey pürüzlülüğü sorunları ve enerji tüketimi gibi sınırlamaları da vardır. Mikro EDM, küçük ve orta büyüklükteki üretim serileri için mükemmel bir seçenek olmasına rağmen, büyük hacimli üretimlerde verimlilik açısından bazı kısıtlamalara sahiptir. Bu kısıtlamalar, mikro EDM'nin düşük işlem hızı, yüksek enerji tüketimi, yüksek yatırım maliyetleri ve düşük otomasyon kapasitesinden kaynaklanır. Bu nedenle, mikro EDM'nin en verimli olduğu uygulamalar, genellikle küçük ölçekli, özel tasarım gerektiren veya yüksek hassasiyet isteyen üretim serileridir. Bununla birlikte, mikro EDM, mikroelektronik, tıbbi cihaz üretimi ve diğer hassas mühendislik uygulamaları gibi alanlarda kritik öneme sahip bir teknolojidir.

Ultrasonik mikro işleme, son yıllarda yüksek hassasiyet gerektiren mikro parçaların üretiminde oldukça popüler hale gelmiştir. Bu teknoloji, mekanik işleme yöntemlerinin zorluklarına karşı geliştirilmiş bir alternatif olarak, özellikle sert, kırılgan ve zor işlenebilir malzemelerin işlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ultrasonik mikro işleme, ses dalgaları

kullanarak malzeme çıkartırken, yüksek frekanslı ultrasonik titreşimler, kesici takımın iş parçasına uyguladığı baskıyı azaltarak, daha verimli ve hassas bir işleme süreci sunar. Ultrasonik mikro işleme, yüksek hassasiyet ve ince detay gerektiren mikro parçaların üretimi için son derece etkili bir teknoloji olduğundan özellikle sert ve kırılğan malzemelerin işlenmesinde büyük avantajlar sunar. Yüksek hassasiyet, düşük kuvvetle işleme ve karmaşık geometrilerin üretimi gibi özellikleri sayesinde, biyomedikal cihazlar, mikroelektronik ve diğer hassas mühendislik uygulamalarında önemli bir yer tutar. Ancak, işlem süresi, yüzey pürüzlülüğü sorunları, yüksek maliyet ve enerji tüketimi gibi sınırlamalar, büyük hacimli üretimlerde verimliliği azaltabilmektedir. Bu nedenle, ultrasonik mikro işleme, özellikle küçük ve orta büyüklükteki üretim serileri ve prototip üretimi için en uygun çözüm yöntemlerinden biri olabilir.

Mikro işleme teknolojisi, bugün birçok endüstride yüksek hassasiyetli üretim süreçlerinin temelini oluşturuyor. Küçük ölçekli üretimler ve prototipler için ideal bir çözüm sunan mikro işleme, karmaşık geometriler ve hassas yüzeylerin işlenmesinde önemli avantajlar sağlar. Ancak, büyük ölçekli üretimlerde yaşanan zorluklar ve bazı malzeme işleme sınırlamaları, mikro işleme teknolojisinin yaygın olarak uygulanmasını engellemektedir.

Gelecekte mikro işleme, otomasyon, yapay zeka entegrasyonu, biyomedikal uygulamalarda artan kullanım ve daha hassas işleme teknikleriyle önemli bir gelişim gösterecektir. Ayrıca, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği gibi konularda yapılan iyileştirmeler, mikro işleme teknolojisinin daha geniş bir yelpazeye yayılmasını sağlayacaktır. Yeni malzeme gelişmeleri ve hız artışıyla birlikte, mikro işleme, özellikle yüksek hacimli üretimlerde daha rekabetçi bir seçenek haline gelebilir. Bu nedenle gelişen teknolojilerle birlikte, mikro

işleme tekniklerinin daha geniş bir uygulama alanına ulaşması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Abgrall, Patrick, Lee-Ngo Low, and Nam-Trung Nguyen. "Fabrication of planar nanofluidic channels in a thermoplastic by hot-embossing and thermal bonding." *Lab on a Chip* 7.4 (2007): 520-522.
- Agari, S.R.; Lakshmikanthan, A.; Selvan, C.P.; Sekar, K.S.V. Improvement in the Machining Processes by Micro-Textured Tools during the Turning Process. *Eng. Proc.* 2024, 61, 2.
- Ahmed, N., Darwish, S., & Alahmari, A. M. (2016). Laser Ablation and Laser-Hybrid Ablation Processes: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(9), 1121–1142.
- Ali, M. Y., et al. "Micro-electro discharge machining (Micro-EDM) models for conductive and nonconductive materials: A review." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1173. No. 1. IOP Publishing, 2021.
- Arulvel, S., et al. "Laser processing techniques for surface property enhancement: Focus on material advancement." *Surfaces and Interfaces* 42 (2023): 103293.
- Balázs, B.Z., Geier, N., Takács, M. et al. A review on micro-milling: recent advances and future trends. *Int J Adv Manuf Technol* 112, 655–684 (2021).
- Barath, V. R., et al. "Adaptive process control for uniform laser hardening of complex geometries using iterative numerical simulation." *Materials Performance and Characterization* 8.6 (2019): 1178-1191.

- Béjar, S. Martín, et al. "Parametric Analysis of Macro-Geometrical Deviations in Dry Turning of UNS A97075 (Al-Zn) Alloy, Metals (basel) 9 (2019) 1141.
- Chavan, Vishwanath, and B. Rajiv. "A Performance Evaluation of Precise Micro Turning Process using TOPSIS-GRA-ANN." International Journal of Precision Engineering and Manufacturing (2024): 1-20.
- Chavan, Vishwanath, and B. Rajiv. "Micromachining techniques for manufacturing high aspect ratio microelectrodes: A review." Materials Today: Proceedings (2023).
- Chen, Ni, et al. "Advances in micro milling: From tool fabrication to process outcomes." International Journal of Machine Tools and Manufacture 160 (2021): 103670.
- Chen, Tai-Chang, and R. Bruce. "Fundamentals of Laser Ablation of the Materials Used in Microfluidics." Micromach. Tech. Fabr. Micro Nano Struct (2012).
- Chen, Zongjie, et al. "A short review on functionalized metallic surfaces by ultrafast laser micromachining." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 119.11 (2022): 6919-6948.
- Çiçek, Adem. "İmalat alanında yaygın olarak kullanılan mikro işleme teknikleri." Sakarya University Journal of Science 15.1 (2011): 46-59.
- D'urso, G., and Chiara Ravasio. "Material-Technology Index to evaluate micro-EDM drilling process." Journal of Manufacturing processes 26 (2017): 13-21.
- de Assis, Cleiton Lazaro Fazolo, Guilherme Rosati Mecelis, and Reginaldo Teixeira Coelho. "An investigation of stainless steel 316L parts produced by powder bed fusion

- submitted to micro-endmilling operations." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 109 (2020): 1867-1880.
- De Oliveira, Campos F., et al. "The influence of additive manufacturing on the micro-milling machinability of Ti6Al4V: a comparison of SLM and commercial workpieces. *J Manuf Process* 60: 299–307." 2020.
- De Zanet, Alessandro, Valentina Casalegno, and Milena Salvo. "Laser surface texturing of ceramics and ceramic composite materials—A review." *Ceramics International* 47.6 (2021): 7307-7320.
- Duan, Zhenjing, et al. "Cold plasma and different nano-lubricants multi-energy field coupling-assisted micro-milling of Al-Li alloy 2195-T8 and flow rate optimization." *Journal of Manufacturing Processes* 127 (2024): 218-237.
- Evdokimov, Anton, et al. "Simulation of surface heat treatment with inclined laser beam." *Journal of Manufacturing Processes* 81 (2022): 107-114.
- Fang, Yao, et al. "Bioinspired fabrication of bi/tridirectionally anisotropic sliding superhydrophobic PDMS surfaces by femtosecond laser." *Advanced Materials Interfaces* 5.6 (2018): 1701245.
- Gao, Shuaishuai, et al. "Investigation of the tool flank wear influence on cutter-workpiece engagement and cutting force in micro milling processes." *Mechanical Systems and Signal Processing* 209 (2024): 111104.
- Geier, Norbert, et al. "A critical review on mechanical micro-drilling of glass and carbon fibre reinforced polymer (GFRP and CFRP) composites." *Composites Part B: Engineering* 254 (2023): 110589.

- Gopal, P.M.; Kavimani, V.; Gupta, K.; Marinkovic, D. Laser-Based Manufacturing of Ceramics: A Review. *Micromachines* 2023, 14, 1564.
- Grigoriev, Sergey N., Marina A. Volosova, and Anna A. Okunkova. "Advances in Laser Materials Processing." *Metals* 12.6 (2022): 917.
- Grossin, David, et al. "A review of additive manufacturing of ceramics by powder bed selective laser processing (sintering/melting): Calcium phosphate, silicon carbide, zirconia, alumina, and their composites." *Open Ceramics* 5 (2021): 100073.
- Hasan, Mahadi, Jingwei Zhao, and Zhengyi Jiang. "A review of modern advancements in micro drilling techniques." *Journal of Manufacturing Processes* 29 (2017): 343-375.
- Hasçelik A, Aslantaş K. Mikro tornalama işleminde kesme kuvveti katsayılarının mekanistik ve nümerik modelleme ile tespiti. *GUMMFD*. 2021;37(1):235-46.
- Hasçelik, A., & Aslantaş, K. (2021). Mikro Tornalama İşleminde Kesici Takım Burun Yarıçapının Kesme Kuvvetlerine Etkisi. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 2(1), 13-25.
- He, Zhicong, et al. "Metal material processing using femtosecond lasers: Theories, principles, and applications." *Materials* 17.14 (2024): 3386.
- Hellstern, Julian, et al. "Optical tools for laser machining along six orders of magnitude." *High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems XIII*. Vol. 12878. SPIE, 2024.
- Horník, Jakub, et al. "Laser Surface Hardening of Graphite Cast Iron." *Solid State Phenomena* 334 (2022): 94-99.

- Huang, Guanyuan, et al. "Mechanism investigation of micro-drill fracture in PCB large aspect ratio micro-hole drilling." *Journal of Materials Processing Technology* 316 (2023): 117962.
- Hung, Wayne NP, and Mike Corliss. "Micromachining of advanced materials." *Micromachining*. IntechOpen, 2019.
- Jain VK, Balasubramaniam R, Mote RG, et al. *Micromachining: An overview (Part I)*. *Journal of Micromanufacturing*. 2020;3(2):142-158.
- Jiang, Keran, et al. "A review of ultra-short pulse laser micromachining of wide bandgap semiconductor materials: SiC and GaN." *Materials Science in Semiconductor Processing* 180 (2024): 108559.
- Kar, T., Goswami, A. *Mathematical Modeling Approaches and New Development in Laser Micro Machining Process: A Review*. *Lasers Manuf. Mater. Process*. 9, 532–568 (2022).
- Kataria, Ravinder, and Jatinder Kumar. "Ultrasonic machining: A review." *Advanced Materials Research* 1137 (2016): 61-78.
- Kechagias, John D., et al. "A robust methodology for optimizing the topology and the learning parameters of an ANN for accurate predictions of laser-cut edges surface roughness." *Simulation Modelling Practice and Theory* 114 (2022): 102414.
- Kodihalli Shivaprakash, Nischay, et al. "Advanced polymer processing technologies for micro-and nanostructured surfaces: A review." *Polymer Engineering & Science* 63.4 (2023): 1057-1081.

- Korgal, Akash, et al. "Advances in micro electro discharge machining of biomaterials: a review on processes, industrial applications, and current challenges." *Machining Science and Technology* 28.2 (2024): 215-265.
- Le Coz, Gael, et al. "Micro cutting of Ti-6Al-4V parts produced by SLM process." *Procedia Cirp* 58 (2017): 228-232.
- Lee, An Chen, et al. "Design of a new micro single flute drill." *Advanced Materials Research* 860 (2014): 2635-2639.
- Li, Biao, et al. "Rapid three-dimensional manufacturing of microfluidic structures using a scanning laser system." *Applied physics letters* 85.12 (2004): 2426-2428.
- Li, Guangliang, et al. "Laser repeat drilling of alumina ceramics in static water." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96 (2018): 2885-2891.
- Liu, Chang, et al. "Feasibility of micro-hole machining in fiber laser trepan drilling of 2.5 D Cf/SiC composite: experimental investigation and optimization." *Optik* 242 (2021): 167186.
- Liu, Fengyu, et al. "Ultrasonic assisted pecking drilling process for CFRP/Ti laminated materials." *Journal of Manufacturing Processes* 108 (2023): 834-851.
- Liu, Huilong, et al. "Laser processing of flexible in-plane micro-supercapacitors: progresses in advanced manufacturing of nanostructured electrodes." *ACS nano* 16.7 (2022): 10088-10129.
- Liu, Yu, et al. "A multi-objective optimization of laser cladding process of Ni-based coating on the preheated copper

- alloy." *Materials Today Communications* 35 (2023): 105614.
- Long, Gui, et al. "Femtosecond laser processing for multi-functional hierarchical micro/nano structures on curved surfaces." *Applied Surface Science* (2024): 161850.
- Lu, Jiajun, Sanjun Liu, and Yonghua Zhao. "Enabling Jet-Electrochemical Discharge Machining on Niobium-Like Passivating Metal and the Single Step Fabrication of Coated Microstructures." *Journal of The Electrochemical Society* 170.9 (2023): 093508.
- Ma, Zeyu, et al. "Carbon Micro/Nano Machining toward Miniaturized Device: Structural Engineering, Large-Scale Fabrication, and Performance Optimization." *Small* (2024): 2400179.
- Madeira, S., et al. "Micro-grooved surface laser texturing of zirconia: surface characterization and artificial soft tissue adhesion evaluation." *Ceramics International* 46.16 (2020): 26136-26146.
- Madhavi, M., and P. Srikanth. "A Micro EDM-based experimental study of surface texture on stainless steel 316 micro machined holes." *Materials Today: Proceedings* (2023).
- Madić, Miloš, Miroslav Radovanović, and B. Nedić. "Correlation between surface roughness characteristics in CO2 laser cutting of mild steel." *Tribology in Industry* 34.4 (2012): 232.
- Mao, Bo, et al. "Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review." *Journal of Manufacturing Processes* 53 (2020): 153-173.

- Martín Béjar, Sergio, et al. "Fatigue behavior parametric analysis of dry machined UNS A97075 aluminum alloy." *Metals* 10.5 (2020): 631.
- McDonald, J. Cooper, et al. "Fabrication of microfluidic systems in poly (dimethylsiloxane)." *ELECTROPHORESIS: An International Journal* 21.1 (2000): 27-40.
- Meena, V.K.; Azad, M.S.; Singh, S.; Singh, N. (2017) Micro-EDM multiple parameter optimization for Cp titanium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(1-4): 897–904.
- Modica, Francesco, Valeria Marrocco, and Irene Fassi. "Micro-electro-discharge machining (micro-EDM)." *Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications: A Theoretical and Practical Guide* (2017): 149-173.
- O'Toole, L., Kang, CW. & Fang, FZ. Precision micro-milling process: state of the art. *Adv. Manuf.* 9, 173–205 (2021).
- Pimenov, S. M., et al. "Femtosecond laser surface texturing of diamond-like nanocomposite films to improve tribological properties in lubricated sliding." *Diamond and Related Materials* 93 (2019): 42-49.
- Prakash, Shashi, and Subrata Kumar. "Fabrication of rectangular cross-sectional microchannels on PMMA with a CO2 laser and underwater fabricated copper mask." *Optics & Laser Technology* 94 (2017): 180-192.
- Prakash, V.; Kumar, P.; Singh, P.K.; Hussain, M.; Das, A.K.; Chattopadhyaya, S. (2019) Micro-electrical discharge machining of difficult-to-machine materials: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(2): 339–370.

- Rahman, M.A.; Rahman, M.; Mia, M.; Asad, A.B.M.A.; Fardin, A. Manufacturing of Al Alloy Microrods by Micro Cutting in a Micromachining Center. *Micromachines* 2019, 10, 831.
- Rajan, K., N. Prabhushankar, and N. Nagarajan. "A review of current micro drilling processes." *Int. J. Innov. Sci. Engg. Technol* 3 (2016): 60-64.
- Rawal, Sunil, Ajay M. Sidpara, and Jinu Paul. "A review on micro machining of polymer composites." *Journal of Manufacturing Processes* 77 (2022): 87-113.
- Sen, Mohan, and H. S. Shan. "A review of electrochemical macro-to micro-hole drilling processes." *International journal of machine tools and manufacture* 45.2 (2005): 137-152.
- Serje, David, Jovanny Pacheco, and Eduardo Diez. "Micromilling research: current trends and future prospects." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 111.7 (2020): 1889-1916.
- Shen, Hong, and Decai Feng. "Thermal and mechanical behavior in laser trepan drilling of yttria-stabilized zirconia." *Journal of Heat Transfer* 141.4 (2019): 042101.
- Sistaninia, Me, Ma Sistaninia, and H. Moeanodini. "Laser surface hardening considering coupled thermoelasticity." *Journal of Mechanics* 25.3 (2009): 241-249.
- Sohrabpoor, H., et al. "Improving precision in the prediction of laser texturing and surface interference of 316L assessed by neural network and adaptive neuro-fuzzy inference models." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104 (2019): 4571-4580.

- Sun, Y., et al. "Micro milling characteristics of LS-WEDM fabricated helical and corrugated micro end mill." *International Journal of Mechanical Sciences* 167 (2020): 105277.
- Sushil Kumar Choudhary, R.S.J. (2017) Review Study and Importance of Micro Electric Discharge Machining. *Chemical and Process Engineering Research*, 50: 14–21.
- Tarchoun, Baha, Abderrazak El Ouafi, and Ahmed Chebak. "Numerical Investigation of Laser Surface Hardening of AISI 4340 Using 3D FEM Model for Thermal Analysis of Different Laser Scanning Patterns." *Modeling and Numerical Simulation of Material Science* 10.3 (2020): 31-54.
- Venugopal, T. R., Rathnamala Rao, and K. Sushith. "Development of piezoactuator based rotary tool feeding system for micro-EDM." *Materials Today: Proceedings* 52 (2022): 1909-1918.
- Viswanath, Anupam, Tao Li, and Yogesh Gianchandani. "High resolution micro ultrasonic machining for trimming 3D microstructures." *Journal of Micromechanics and Microengineering* 24.6 (2014): 065017.
- Wang, Han, et al. "Experimental study on direct fabrication of micro channel on fused silica by picosecond laser." *Journal of Manufacturing Processes* 55 (2020): 87-95.
- Wang, Haotao, Haijun Zhang, and Ming Zhou. "Study on surface defect formation mechanism in ultrasonic vibration-assisted grinding of SiCp/Al composites." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 129.1 (2023): 375-397.

- Wang, Minghuan, et al. "Micro-milling microstructures in air-shielding ultrasonic assisted electrochemical machining." *Journal of Manufacturing Processes* 97 (2023): 171-184.
- Wang, Q.; Zhang, R.; Chen, Q.; Duan, R. A Review of Femtosecond Laser Processing of Silicon Carbide. *Micromachines* 2024, 15, 639.
- Wang, Yan, et al. "Study on the formation mechanism of functional surface microstructure by ultrasonic vibration assisted laser processing." *Optics Communications* 546 (2023): 129805.
- Wang, Zhi, et al. "High-throughput microchannel fabrication in fused silica by temporally shaped femtosecond laser Bessel-beam-assisted chemical etching." *Optics letters* 43.1 (2017): 98-101.
- Wu, Hanqiang, et al. "Effect of ultrasonic vibration on the machining performance and mechanism of hybrid ultrasonic vibration/plasma oxidation assisted grinding." *Journal of Manufacturing Processes* 94 (2023): 466-478.
- Xia, Younan, and George M. Whitesides. "Soft lithography." *Angewandte Chemie International Edition* 37.5 (1998): 550-575.
- Xinlei, P. A. N., et al. "Investigations on femtosecond laser-induced surface modification and periodic micropatterning with anti-friction properties on Ti6Al4V titanium alloy." *Chinese Journal of Aeronautics* 35.4 (2022): 521-537.
- Yamada, Kentaro, et al. "Paper-based inkjet-printed microfluidic analytical devices." *Angewandte Chemie International Edition* 54.18 (2015): 5294-5310.

- Yang, Shuzhen, and Devin K. Harris. "Laser-based finite element model reconstruction for structural mechanics." AIP Advances 12.10 (2022).
- Yen, Meng-Hua, et al. "Rapid cell-patterning and microfluidic chip fabrication by crack-free CO₂ laser ablation on glass." Journal of Micromechanics and Microengineering 16.7 (2006): 1143.
- Yu, Z. Y., K. P. Rajurkar, and A. Tandon. "Study of 3D micro-ultrasonic machining." J. Manuf. Sci. Eng. 126.4 (2004): 727-732.
- Zeng, Dexing, et al. "Microfluidic radiolabeling of biomolecules with PET radiometals." Nuclear medicine and biology 40.1 (2013): 42-51.
- Zhan, Yanlong, et al. "Preparations of versatile polytetrafluoroethylene superhydrophobic surfaces using the femtosecond laser technology." Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 629 (2021): 127441.
- Zhang, Huiyun, et al. "Review on abrasive machining technology of SiC ceramic composites." Micromachines 15.1 (2024): 106.
- Zhao, You, Yu-Long Zhao, and Lu-Kang Wang. "Application of femtosecond laser micromachining in silicon carbide deep etching for fabricating sensitive diaphragm of high temperature pressure sensor." Sensors and Actuators A: Physical 309 (2020): 112017.

TOPOLOGY OPTIMIZATION IN THE FLUTING AND GRINDING MACHINE BEARING PART THE EFFECT OF ITS APPLICATION ON MECHANICAL PROPERTIES

Muhammet BOZKURT¹

Yiğit Emre BAŞKAN²

Mehmet BAGCI³

1. INTRODUCTION

The most significant and often used production technique for metals is called machining or chip removal, and it involves using cutting tools to remove chip-shaped portions from the material's surface in order to get the desired final geometry. Sharp cutting tools are used in classical machining to expose new surfaces, remove chip-shaped material from the workpiece via sliding deformation, and create the desired component shape. Relative movement and contact between the cutting tool and the workpiece are necessary for this. When the cutting process is carried out with sliding deformation in the material, the cutting tool's cutting-edge plunges into the workpiece until it

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Yüksek Lisans, mub4287@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4481-7989.

² Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Yüksek Lisans, emrebasskany@gmail.com, ORCID: 0009-005-1033-1182.

³ Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Yüksek Lisans, mbagci@ktun.edu.tr.

is just below the workpiece surface, separating the material to be cut from the workpiece in the form of chips [1] **Altıntaş, Y. (2000).**

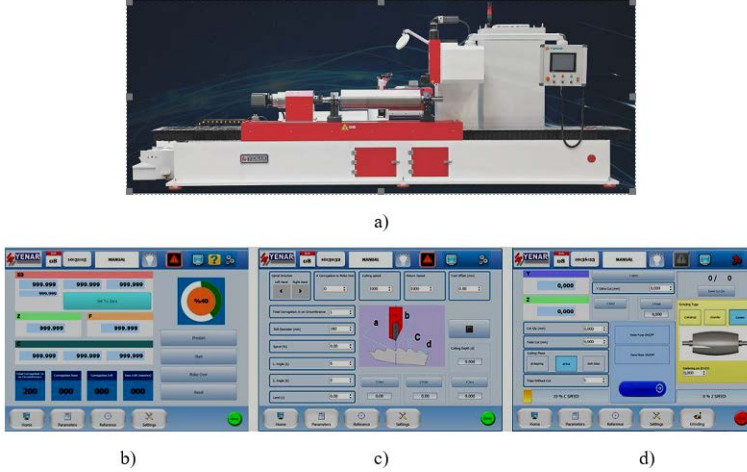


Figure 1. YFG3545 fluting and grinding machine; a) General view, b) Homepage, c) Fluting parameter sheet, d) Grinding parameter sheet.

In the company's operations, there are two varieties of YF (single groover) and YFG (combined groover and grinder) in three different sizes. Millers and corrugated cardboard workshops are the primary users of the YFG and YF models. The most crucial aspect of the grooving procedure is that the machine automatically determines the groove depth based on the flow chart you must input on its screen.in order to prevent errors when rolling the rolls. The YF 35150 type is primarily intended for corrugated manufacturing facilities that handle threading and grinding independently.

Typically, the YF/YFG 45210 types are made to break rolls in sizes like 400x2100 mm. Additionally, YENAR provides the largest YF/YFG 60210 threading and grinding

machine, which can thread and grind rolls balls up to 600 mm in diameter. Users can open “Figure 1” channels up to 2100 mm in length and 670 mm in diameter using this model.

General view of YFG3545 fluting and grinding machine (Figure 1) company's proprietary. Windows-based software is in use, and users can start the computer from any laptop or desktop computer at any moment if they experience any issues with the control panel. Therefore, it is not necessary to replace the control panel.

The process of topology optimization maximizes the material structure while taking into account radial and axial loads on the material as well as boundary conditions that are either user-defined or mandated by laws (3D design area). The major objective is to mathematically optimize geometric modelling for external forces, boundary conditions, and limitations in order to maximize system performance [2] Beker, S., (2020).

Topology optimization models and optimizes elements including external forces, load conditions, boundary conditions, limitations, and material qualities within the design envelope in order to optimum part performance [3] Brütting J., Senatore G., Fivet, C. (2018a).

YF 35150, YF/YFG 45210, YF/YFG 60210 fluting and grinding machines, which are located within the structure of our company and are under construction, open channels to the rollers used in the milling sector. These machines are manufactured according to the diameters of the roller and their total weight varies between 6000-8000 (kg). Roll diameter 154 - 380 mm, roll body length 1.500 mm, grooving characteristics max. number of grooves / circumference 0 - 2.000 max. spiral (Slope) 0%-100%, the spiral direction is left or right. Electrical

characteristics the total installed power is 8 kW, electrical values are 380V / 3PH / 50Hz, dimensional characteristics the total load on the table is 1,300 kg. The net weight is 6,000 kg. The gross weight is 6.100 kg. Machine dimensions (W*L*H) 146x580x194 cm. Speed characteristics Max. Cutting speed (Z Axis) 20,000 mm/min Max. The rotation speed (Z Axis) is 24.000 mm/min. The cylinder is moved to a linear location on the table using a movable bearing system.

This site has two parts: a stationary bed and a bed that can be moved. By enabling the ball to move forward in the horizontal position and return up and down in the vertical position, the movable bearing modifies the roller's location. In this floating bearing method, 185 kg of weight is formed on the table (Figure 2). With the aid of Finite Element Analysis components that contribute to excess weight in the part, topology optimization research was conducted to lighten the machine table by eliminating the regions where axial and radial forces are not applied. The material to be topology optimized in an exploded technical drawing image (Figure 2).

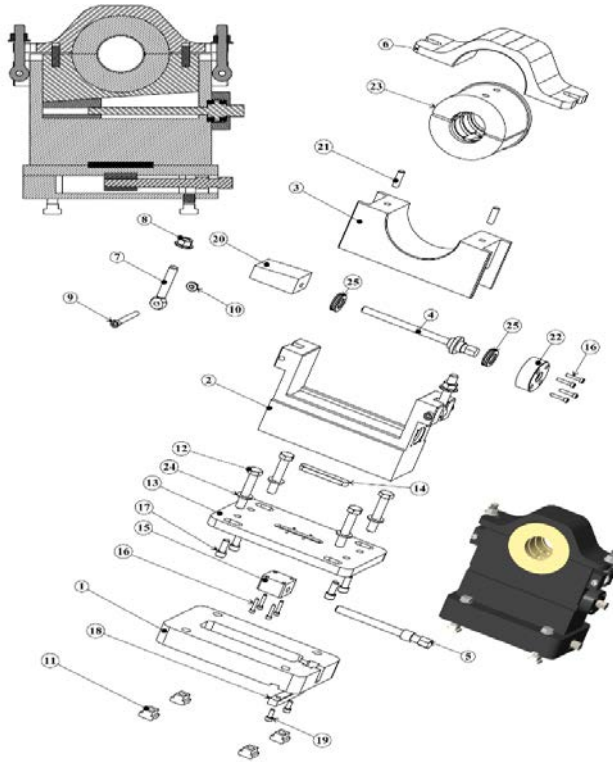


Figure 2. In a technical drawing view that has been exploded.

2. EXPERIMENTAL DESIGN

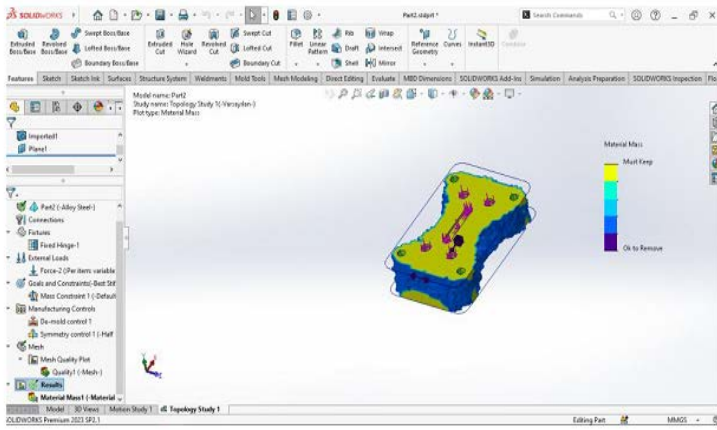
Production was conducted on the specified dimensions in compliance with the conventional manufacturing process after the technical drawing was created and platina were cut from St37 steel material. The produced floating bearing frameworks had been installed, and the design had been used. The proper material is used to make the floating bearing, and its design is crucial since it will improve the connection points' performance and longevity. It is best to use a CAD program when developing floating bearing components. The program offers strength

analysis and strength control in the design because of the Finite Element Analysis (FEA) analysis module.

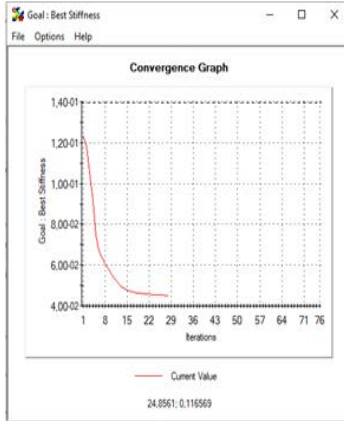
In the study, analyses of the material produced and assembled from St37 steel material, which has been successfully tested in previous bearing designs, were performed. These analyses were carried out in order to ensure the accuracy and comparisons of the subsequent studies.

In the next stage of the study, it was planned to create the most effective floating bearing design in three different stages by using the 3D CAD model topology optimization method of the floating bearing model, predicting a decoupling rate between 40%, 50%, 60% on each part. FEA analysis was applied with Solidworks 2023, and topology optimization was performed. Three-dimensional detailed views have been created based on the results of topology optimization. In order for the analyses to present more realistic and accurate results, the points where the fasteners are located are fixed in the model (Figure 3).

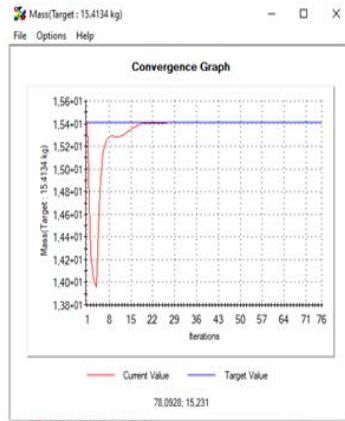
The topology optimization has been applied figure(1,2,3) at 40%, 50%, and 60% in the following photos. These conforming materials are made up of the main body, upper holder, and lower fixed log, respectively. . The item was made with the best weight and hardness. The purple arrows load (loading) and the green arrows fix (fixes) have been applied, as the section illustrates. The topology-optimized billet part's iteration and best thickness graph is shown.



a)

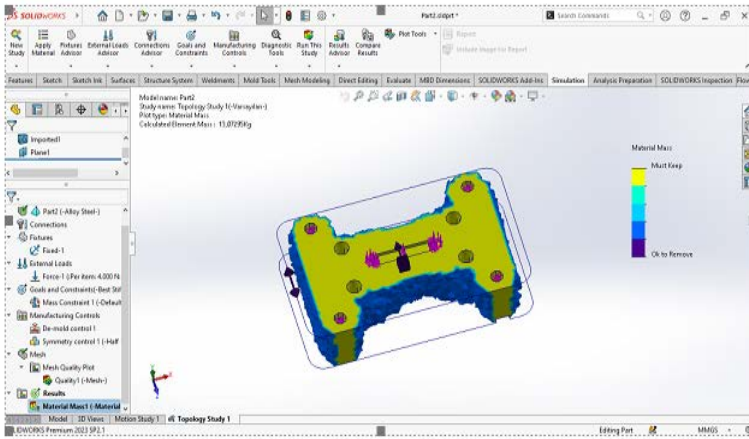


b)

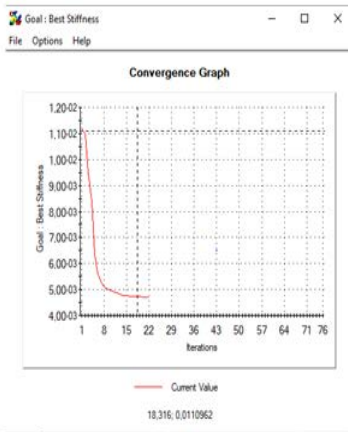


c)

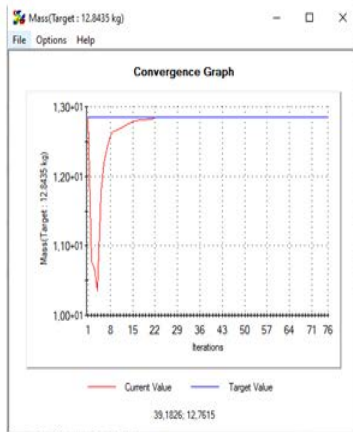
Figure 3. Lower fixed (40%); a) Sub log with topology optimization, b) The optimal thickness graph and iteration, c) Mass graph and iteration.



a)

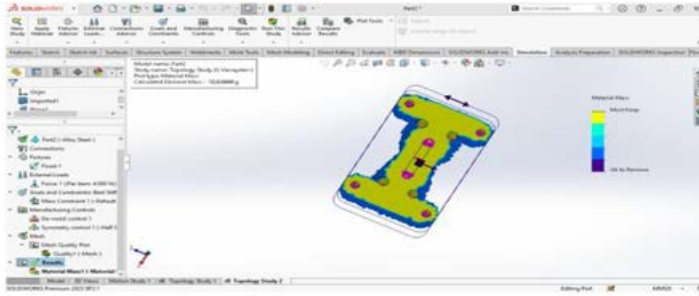


b)

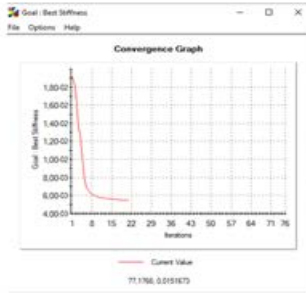


c)

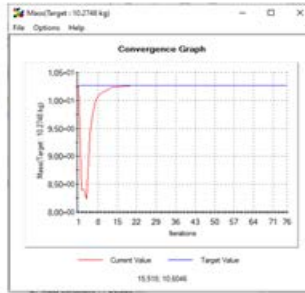
Figure 4. Lower fixed (50%); a) Sub log with topology optimization, b) The optimal thickness graph and iteration, c) Mass graph and iteration.



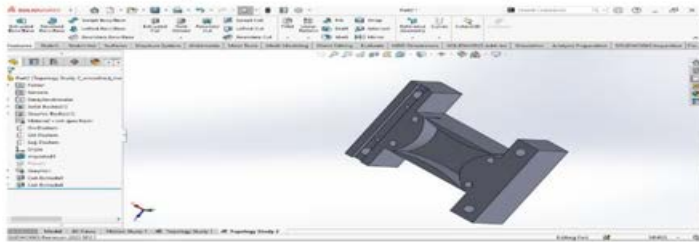
a)



b)



c)



d)

Figure 5. Lower fixed 60%); a) Sub log with topology optimization, b) The optimal thickness graph and iteration, c) Mass graph and iteration, d) The appearance of the material whose topology was optimized.

Regardless of excess load and outside variables, topological optimizations were performed on 40%, 50%, and 60% of the upper holders shown below (figure '6,7,8'). It was discovered that the ideal thickness graph and iteration (figure 7) was applied by 19%, (figure 8) by 64%, (figure 8) by 79%, and

(figure 7) by reduction. The best option based on the data in the optimization research was shown in the result section. In the mass graph and iteration, (figure 7) was 20% according to (figure 6), (figure 8) was 30% according to (figure 6), and (figure 8) was 21% according to (figure 7).

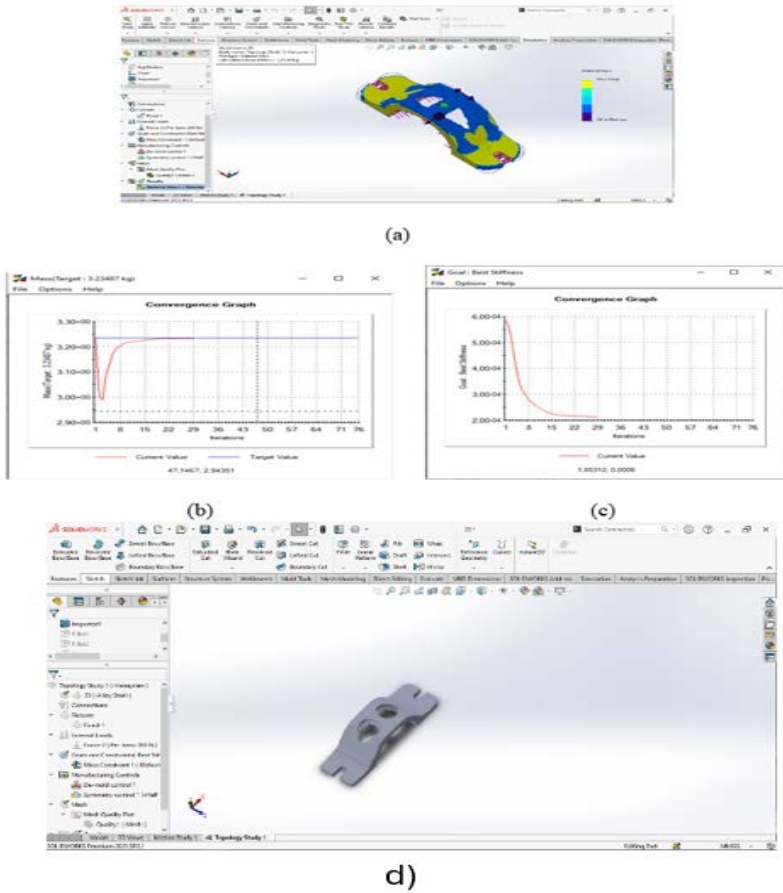


Figure 6. Upper holder (40%); a) Topology optimized upper holder, b) The optimal thickness graph and iteration, c) Mass graph and iteration, d) The appearance of the material whose topology was optimized.

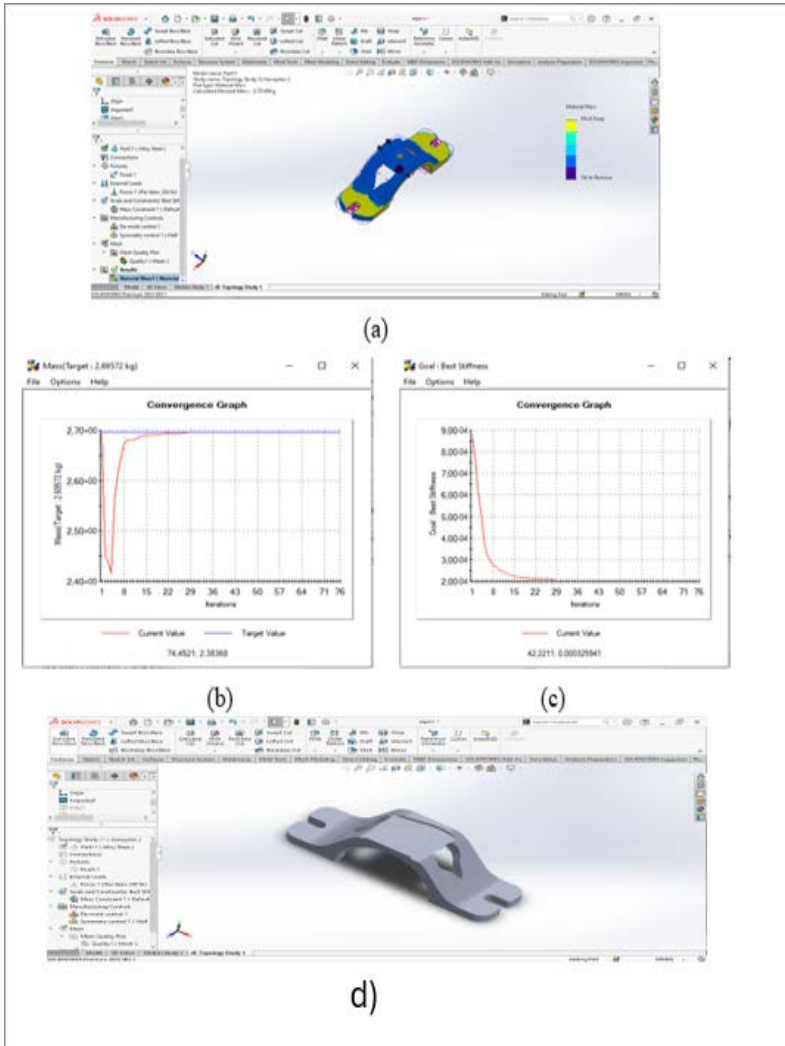


Figure 7. Upper holder (50%); a) Topology optimized upper holder, b) The optimal thickness graph and iteration, c) Mass graph and iteration, d) The appearance of the material whose topology was optimized.

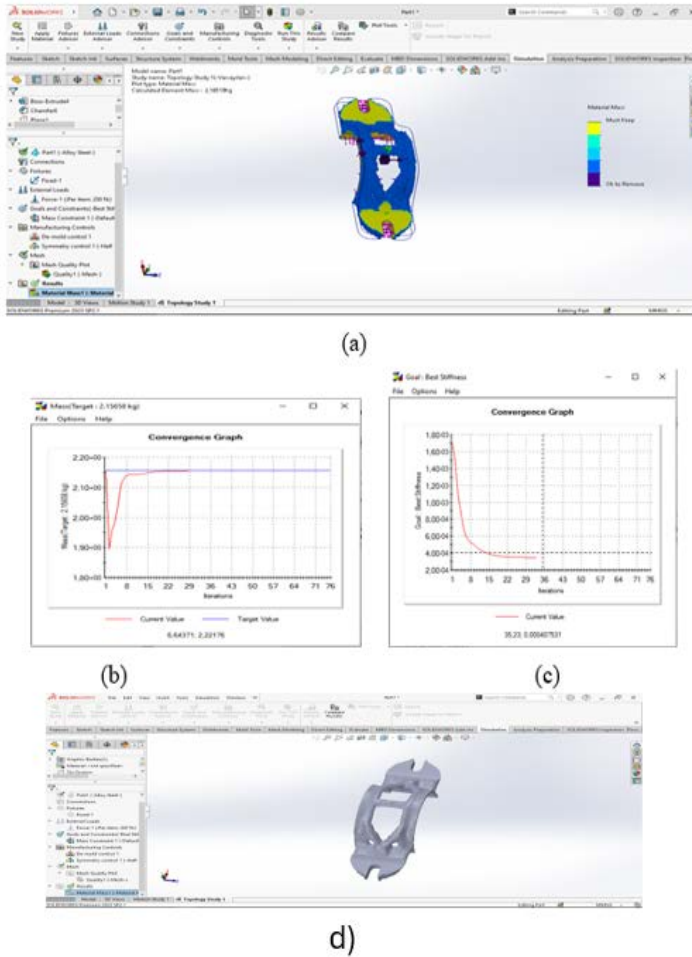


Figure 8. Upper holder (60%); a) Topology optimized upper holder, b) The optimal thickness graph and iteration, c) Mass graph and iteration, d) The appearance of the material whose topology was optimized.

Since a significant portion of the loads would occur here, it is anticipated that the best option is to perform topology optimization with a little amount of weight loss. For the main bodies shown below, 40%, 50%, and 60% topology optimization have been completed, respectively (figure "9," "10," and "11").

Figures 9 and 10 show a 16% reduction in the optimal thickness graph and iteration, Figure 11 shows a 48% reduction, and Figure 11 shows a 65% reduction. The best option based on the data in the optimization research is shown in the outcome section. The mass graph and iteration were also (figure 9) 16%, (figure 10) 28%, and (figure 11) 24%.

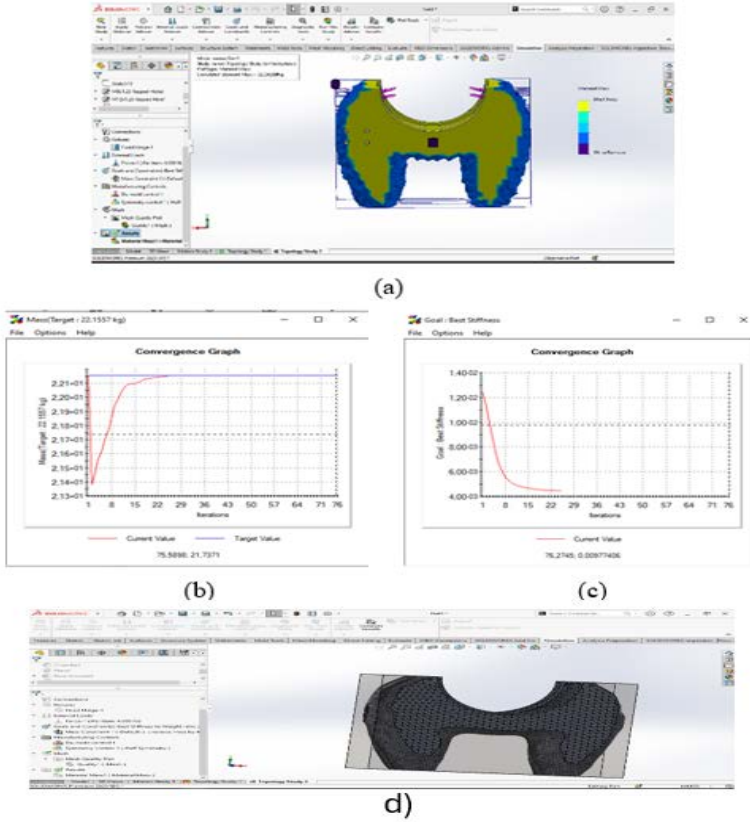
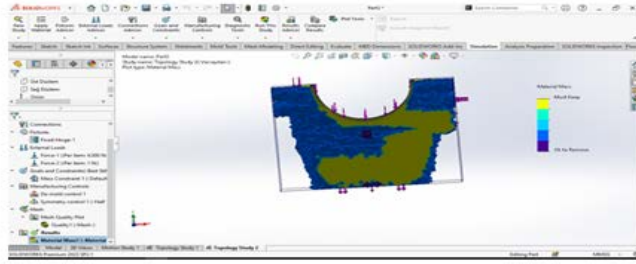
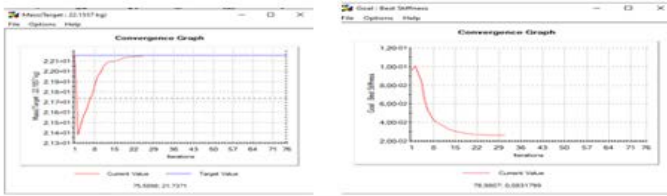


Figure 9. Main body (40%); a) Body optimized for topology, b) The optimal thickness graph and iteration, c) Mass graph and iteration, d) The appearance of the material whose topology was optimized.

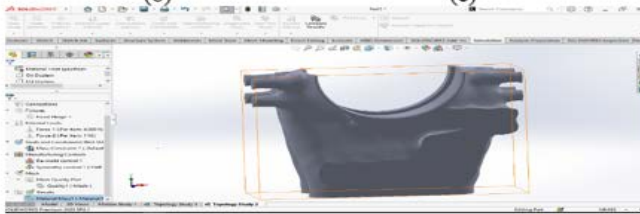


a)



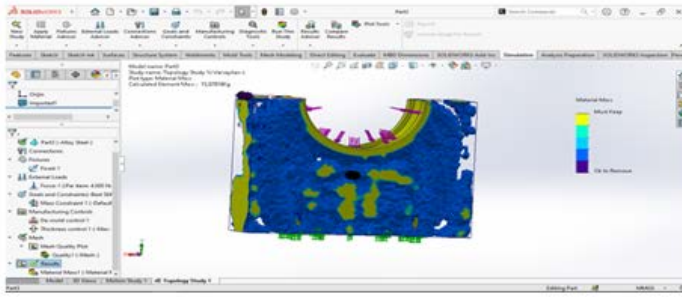
(b)

(c)



d)

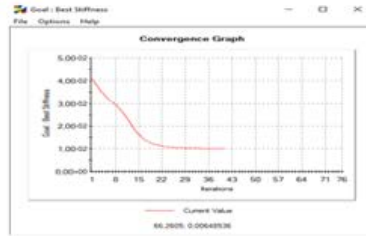
Figure 10. Main body (50%); a) Body optimized for topology, b) The optimal thickness graph and iteration, c) Mass graph and iteration, d) The appearance of the material whose topology was optimized.



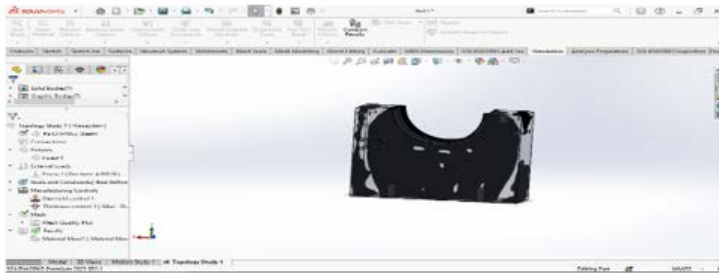
(a)



(b)



(c)



d)

Figure 11. Main body (60%); a) Body optimized for topology, b) The optimal thickness graph and iteration, c) Mass graph and iteration, d) The appearance of the material whose topology was optimized.

3. RESULT

- ❖ Each part's topology optimization solutions were subjected to a 40%, 50%, and 60% mass reduction method.
- ❖ A 60% reduction in the upper holder, a 60% reduction in the lower log section, and a 40% lightening of the middle body were judged appropriate based on the data from the iteration, the best thickness chart, and the mass chart.
- ❖ Consistent with these findings, it was discovered to be more cost-effective and energy-efficient, achieving a 60% better outcome than conventional manufactured materials.
- ❖ Although there was an 80-pound pain in the floating bearing, in this optimization study, 51.2 kg was reduced by optimization, resulting in an overall 36% reduction.
- ❖ It emphasizes objectives including waste reduction, energy efficiency, sustainability, and the preservation of natural resources. In order to minimize operating costs and environmental effects, sustainability is crucial in the industrial sector. Thus, implementing sustainable methods in machining operations will eventually benefit businesses and the environment greatly.
- ❖ Quantified in units of carbon dioxide, the carbon footprint is a measure of the harm that human activity has caused to the environment.

- ❖ The environmental impact of machining is lessened by the selection and usage of recyclable and eco-friendly materials. Additionally, material waste can be reduced by using optimization techniques.
- ❖ Efficiency in energy use, both energy usage and the carbon footprint are decreased by increasing the energy efficiency of CNC machines and other machining equipment. In this context, energy-efficient motors and optimization software are crucial.
- ❖ Management of waste, The environmental effects of sawdust and other debris can be lessened with proper management. In order to achieve sustainability goals, recycling and trash reduction measures are essential.

GRATITUDE

YENAR Döküm, who did not spare their support in the process of conducting this study.

REFERENCES

1. A. Bacciaglia, A. Ceruti, and A. Liverani, "Additive Manufacturing Challenges and Future Developments in the Next Ten Years," in *Design Tools and Methods in Industrial Engineering*, pp. 891–902, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-31154-4_76.
2. B. Blakey-Milner et al., "Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A Review," *Materials and Design*, vol. 209, 110008, 2021. doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
3. T. Pan, S. Karnati, and F. Liou, "General Rules for Pre-Process Planning in Powder Bed Fusion System—A Review," in *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—an Additive Manufacturing Conference*, SFF 2018, pp. 1161–1173, 2020b.
4. J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, and W. Zhang, "A Review of Topology Optimization for Additive Manufacturing: Status and Challenges," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, no. 1, pp. 91–110, 2021b. doi: 10.1016/j.cja.2020.09.020. M. Süß et al., "Aerospace Case Study on Topology Optimization for Additive Manufacturing," *DDMC 2016 Proceedings*, March 2016: 6.
5. Brütting J., Senatore G., Fivet, C. (2018a). *Advanced Computing Strategies for Engineering: Optimization formulations for the design of low embodied energy structures made from reused elements.*, Eds: Smith, I., Domer, B., Cham, Switzerland: Springer.

6. Brütting, J., De Wolf, C. & Fivet, C. (2019a). The reuse of load-bearing components. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 225, 012025. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012025>
7. Beker, S., (2020). Topoloji Optimizasyonu Yaklaşımıyla Ürün Geliştirme, 01.11.2020 tarihinde <https://www.poligonmuhendislik.com/blog/urun-gelistirme/topoloji-optimizasyonu-yaklasimi-ile-urun-gelistirme> adresinden edinilmiştir.
8. Altıntaş, Y. (2000). Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibration and CNC Design, USA: Cambridge University Press.
9. Bonamente E., Pelliccia L., Merico C.M., The Multifunctional Environmental Energy Tower: Carbon Footprint and Land Use Analysis of an Integrated Renewable Energy Plant, Sustainability, 2015 (7): 13564-13584

ZIRH ÇELİKLERİNİN BALİSTİK ALANINDAKİ UYGULAMALARINA BAKIŞ

Mehmet ÖZER¹

Fatih BALIKOĞLU²

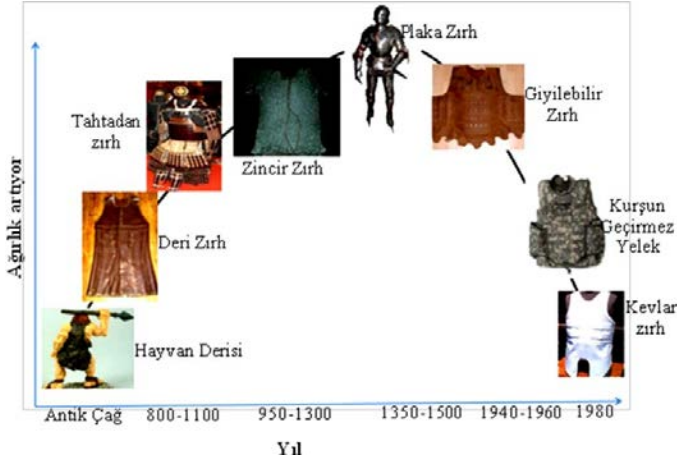
1. GİRİŞ

İnsanlığın yer yüzündeki var oluşundan itibaren tehdit ve saldırı unsurlarına karşı korunma ihtiyacı da ortaya çıkmış ve günümüze kadar ulaşmıştır. Öte yandan haysiyetini, vatanının veya dinini gerekçe gösteren insan oğlu savaşlar başlatmak için mutlaka bahaneler bulmuştur. Bununla birlikte modernlik seviyesindeki artışla birlikte bulunduğu zamanın şartlarına uygun teknolojik silahlar geliştirmiştir. Dolayısıyla gelişen teknolojik silahlar karşısında ordusundaki personeli korumaya yönelik zırh teknolojilerini de geliştirmesi gerekmiştir (Z Gama Haque B, 2012).

Zırh malzemelerinin en eski örneklerine bakıldığında ölü hayvanların derileri ve çeşitli kemik parçaları bunların yanında sert ağaç kabuklarının insanoğlunun korunma amacıyla kullandığı görülmektedir. Ateşli ve patlayıcı silahların teknolojinin gelişimiyle birlikte ortaya çıkmasına karşılık olacak şekilde metal tabanlı zırhlar da geliştirilmiştir (Gupta N, 2013).

¹ Öğr. Gör., Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir MYO, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojileri Programı, ozer@balikesir.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6212-1217.

² Doç. Dr. Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fak., Makine Mühendisliği Bölümü, fatih.balikoglu@balikesir.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3836-55690000-0002-7559-8794.



Şekil 1. Tarihsel gelişim açısından zırh kıyafetleri (Gupta N, 2013).

Savaş ve terör tehdidi oluşturan unsurlar karşısında koruma ve kolluk güçlerinin görevlerini yerine getirdikleri sırada bu olumsuz unsurlara karşı koruyucu zırh ekipmanlarını kullanmaları kaçınılmaz bir durumdur (Agrawal B J, 2011). Mermi, şarapnel vb. gibi saldırı unsurlarının tehdidine karşı bireylerin veya faydalı ekipmanların korunmasına yönelik geliştirilmiş zırh yapılarından biri de balistik koruma sağlayan kıyafet türüdür (Bajaj P S, 1997; Carr D, 2014). 1879’ da Avustralya’ da toplam ağırlığı başlığıyla birlikte 44kg olan gövde, bacak ve üst kol bölümlerini koruması amacıyla vücut zırhı üretilmiştir. Vücut zırhı olarak kullanılan başka bir örnek ise, ABD’ nin I. Dünya savaşı sırasında kullanmış olduğu 820 m/s hızındaki mermilere karşı balistik direnç gösterebilen krom nikel çeliğinden göğüs plakası ve başlık olarak ürettiği toplam ağırlığı 18 kg olan vücut zırhlarıdır (Agrawal B J, 2011). Zırh çeliklerinin balistik koruma amacıyla askeri ve sivil alanlarda kullanımına yönelik çok fazla uygulama mevcuttur. Askeri alanlarda kara, deniz ve hava araçları bunun yanında uzay araçları gibi diğer taşıtlar görülürken sivil alanda ise taşıt zırhlandırması gibi uygulamalar mevcuttur (Atapek, 2011).

Dikkat edilmesi gereken önemli husus ise, üretilecek olan zırh hangi koruma seviyesine uygun olacağı en baştan belirlenmesi gerekliliğidir. “Zırh delici mermi tehdidi mi?”, “Mayın patlamasına karşı koruma mı?” ya da “Fragman etkisine karşı mı?” vb. gibi unsurlar değerlendirilmelidir. Bilindiği üzere günümüzde üretilen modern silahlardan çıkan mermiler yüksek hızlara ulaşmakta dolayısıyla büyük kinetik enerji değerine sahip olmaktadır. Bu durum ise mermilerin farklı mekanik, geometrik ve bileşen özelliklerine sahip olmaları şeklinde izah edilebilir. Dolayısıyla ateşli silahların bu muazzam tahrip gücüne karşı zırh yapısının dağılmadan gelen tehdidi güvenli bir şekilde savuşturması büyük önem arz etmektedir. Balistik başarıyı en iyi şekilde gösterebilmesi için zırh plakasının tüm kesiti boyunca aynı homojen malzeme özelliğine haiz olması gerekir (Atapek, 2011).

Barış dönemi dışındaki tehdit içeren tüm olağan üstü durumlarda askeri araçların içerisinde bulunan personeli ve ekipmanı koruyabilmesi balistik zırhlar aracılığıyla olur. Dolayısıyla uygun balistik koruma sınıfı belirlenirken aracın cinsi, görev türü ayrıca personel, mühimmat ve ekipman sayısı gibi bilgilerin doğru şekilde cevaplanması önem arz etmektedir. Balistik korumayı mümkün kılan ve bu tür araçlarda da uygulanma imkânı bulmuş çok çeşitli zırh malzemelerinin olduğu bilinmektedir. Başta çelikler olmak üzere metalik malzemeler, fiber esaslı kompozitler ve seramik malzemelerin dahil olduğu monolitik, çiftli ve veya çoklu hibrit zırh yapılar üretilerek koruma sağlanabilmektedir. Bu zırh yapıları belirlenirken aracın toplam ağırlığı gözetilmelidir zira aracın manevra, hareket kabiliyeti ve taşıyabileceği faydalı yük miktarı düşürülmeden optimum zırh bileşenleri tercih edilmelidir. Öte yandan, mayın vb. gibi patlama tehdidine karşı balistik koruma sağlamada zırh çeliklerinin önde gelen stratejik malzeme oldukları da iyi bilinmektedir (Hazell, 2022; Lenihan, Ronan, O’Donoghue, &

Leen, 2019; Popławski, Kędzierski, & Morka, 2020). Zırh tasarımlarını iyileştirme konusu günümüzdeki bu alandaki araştırmacıların ilgisini çekmeye ve meraklarını canlı tutmaya imkân sağlamaktadır. Bu çalışmaların bazıları ise; helikopter zemin ve gövde zırhları (Gooch W A, 2002), mayın tulumu (Mikulic D, 2013), araç zırhı (Ash R A, 2016), güvenlik kabinleri (Maho B, 2019) vb. gibi uygulama alanları örnek olarak verilebilir.

2. GENEL ÖZELLİKLERİ İTİBARIYLA ZIRH ÇELİKLERİ

Talaşlı ya da talaşsız imalat işlerine yatkınlık, balistik dayanım sayesinde perforasyona uğramaması ve yüksek yorulma ömrü gibi bazı üstün özellikler zırh çeliklerinin zırh yapısı içerisinde tercih edilebilirliği bakımından öne çıkan özellikleridir (Sangoy, 1988).

Yüksek tokluk değerine sahip olan zırh çelikleri mermi isabeti aldıktan sonra merminin zırh yapısı içerisindeki ilerlemesini durdurabilir, hatta zırh yapısının tamamen perfore olmasını sağlayabilir. Bu nedenledir ki zırh çelikleri yüksek sertlik ve mekanik mukavemet değerlerine sahiptirler. Öte yandan genel anlamda çeliklerin sertlik değerinin artması ile tokluk özellikleri arasında ters orantı bulunmaktadır. Dolayısıyla zırh çeliği üretimi için özel kimyasal alaşımla işlemleri ve son derece hassas ısıtma işlem uygulamalarının doğru tercih edilmesi gerekmektedir. Yüksek mukavemetli çeliklere imal edilebilirlik açısından bakıldığında bu hassas dengenin sağlanabilmesi için özellikle plastik şekil verme, kaynak ve termal kesim vb. gibi işlemlerdeki zorluklar en aza indirgenebilir.

2.1. Sınıflandırılması

Zırh çeliği üretiminde tercih edilen standartlar dünya genelinde MIL-A-46100 ve MIL-A-12560 standartlarına uygun olacak şekilde tercih edilmektedir (Cimpoeru, 2016). Amerika Birleşik Devletleri'nin askeri standartları kapsamında MIL-A-12560, homojen haddelenmiş zırh çeliklerini (rolled homogeneous armour steel, RHA), MIL-A-46100 ise sertlikleri yüksek değere sahip olan zırh çeliklerini tanımlayan standart olarak bilinmektedir. Öte yandan tatbik edilmiş işlem ısı işlem sıcaklık tercihinin göre zırh çelikleri sınıf 1 ve 2 olarak isimlendirilmektedir. Sınıf 1 kategorisine ait olan zırh çeliklerinin temperleme şartları su veya yağda sertleştirme olurken, sınıf 2 kategorisindeki çelikler ise temperleme işlemi hava ile sertleştirme şeklindedir. Bununla beraber sınıf 1 çeliklerinin karbon eşdeğeri max. C_{eq} 0,80 iken sınıf 2 ye ait olanların ise C_{eq} değerinde herhangi bir kısıt söz konusu değildir (MIL-DTL-46100E, 2019). Gerek parçalanma etkisi gerekse de mekanik şoklara dayanım açısından sınıf 2' ye ait olan çelikler çok daha yüksek sıcaklık değerlerinde ısı işlemleri gerçekleştirilir. Kimyasal kompozisyonları açısından ise her iki sınıf çelikleri benzerdir. Sınıf 1 kategorisindeki çeliklerin zırhlı araç üretiminde tercih edildikleri de bilinmektedir (Şahintürk, 2005) (Ş., A. H. Karagöz, 2007). Sınıf 1 ve 2 ye dahil olan zırh çeliklerine ait mekanik özellikleri Tablo 1' de okuyucularla paylaşılmıştır (Soykan, 2005). Ayrıca Sınıf 1 tipi zırh çelikleri mermi nüfuziyetine dayanım prensibi gözetilirken, sınıf 2 tipi olanları ise patlama etkisen dayanım gösterecek şekilde tasarlanırlar (Akça, 2008).

Tablo 1. Sınıf 1 ve 2' ye ait zırh çeliklerinin mekanik özellikleri (Soykan, 2005).

Zırh Çeliği		Kalınlık (mm)	Sertlik (HB)	Min. Darbe Enerjisi (J)*	Akma Dayanımı (N/mm ²) (min.)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%) (min.)
Kalite	Sınıf						
MIL-A-12560	1	3<20	380-430	18	950	1100-1400	9
		40-80	300-350	30	850	900-1200	11
	2	3-150	280-330	40	800	850-1150	12
MIL-A-46100	1	3-150	480-540	16	1200	1400-1800	8
	2	3-50	420-480	27	1100	1200-1600	9
*Darbe testleri -40 °C gerçekleştirilmiştir.							

Zırh uygulamalarında kullanılacak olan çeliğin sertlik değerinin 600HB' den yüksek olması istenmez. Zira darbe karşısında çeliğin kırılma eğilimini artıracığından dolayı balistik direnç anlamında istenmeyen bir durumdur. Dolayısıyla çelik malzemenin sertlik değeri açısından sınıflandırılması üç sınıfta değerlendirilir. RHA çeliği 210-470 HB sertlik değeri arası, HHA (High Hardness Armor) çeliği 477-534 HB sertlik değeri arası ve UHH (Ultra High Hardness Armor) çeliği 570 HB ve daha üst sertlik değerine sahip çelikler. Zırh çeliği üreten ülkeler açısından MIL-46100 standardı kapsamında bakıldığında ise 500HB sertlik değeri için; Armox 500 (İsveç), Ramor 500 (Finlandiya), Quardion 500 (Belçika), Armstal 500 (Polonya) ve Mars 270 (Fransa) gibi ülkelerde üretilen farklı niteliklerindeki çelikler görülebilir. Manisa ilinde kurulan zırh çeliği üretim tesisinde ise Miilux-Oy ortaklığı ile yerli zırh çeliği üretimimiz başlamış bulunmaktadır (Çelik, 2023).

2.2. Üretim Yöntemleri

Zırh çeliklerinin üretimindeki birtakım özellikleri tanımlayan MIL-A-46100 standardına göre her çelik türünde olduğu gibi zırh çeliği üretiminde de ilk adım ergitme süreciyle başlar. Ardından, hurda ve ferro alyajların ergimiş haldeki metale eklenmesiyle süreç devam eder. Cr, Mo ve Ni elementleri eklenen alyaj sayesinde alaşımlamak istenen yapı sağlanabilir böylece ergiyik haldeki metal ikincil metalurji süreci için vakumlanmış döküm potalarına aktarılır (Tenggren, 2014).

Kükürt ve Fosfor ve kontrolünün sağlanabildiği ikincil metalurji süreci aynı zamanda ideal çelik yapının elde edilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Bununla birlikte gereksinim duyulmasına bağlı olarak vakum yoluyla yapı içerisinden Hidrojen ve Azot çıkartılabilmektedir. Gerekli kontrollerin sağlanmasının ardından sürekli döküm yöntemiyle sıvı metalin ilk dökümü gerçekleştirilir ve böylece şeklini alması sağlanmış olur. Dökümün ardından ilk formunu almış olan slablar sıcak haddeleme işlemine tabi tutulup nihai formunu alırlar bu süreçle birlikte metale gerçek özelliğini kazandıracak olan su verme işlemi de eşlik eder.

2.3. Kimyasal Kompozisyonları

Zırh çeliğinin üretim adımları sırasıyla ergitme, alaşımlama, sürekli döküm, haddeleme ve ısıtım işlem aşamaları şeklindedir (Soykan, 2005). Yüksek mukavemet ve istenilen derecede tokluk değerlerine zırh çelikleri için, uygun ısıtım işlem parametreleri ve kimyasal kompozisyonun belirlenmesi ile ulaşılır. Bu kriterler sayesinde zırh çeliğinin mikro yapısı, çeliğin mekanik özelliklerinin iyileşmesi yönünde etkilenir (Naveen Kumar, Balasubramanian, Malarvizhi, Hafeezur Rahman, & Balaguru, 2021).

Askeri amaçları için standartlaştırılmış ve Amerika Birleşik Devletleri'ne ait zırh çeliği üretimindeki kimyasal

kompozisyonu Tablo 2’ de verilmiştir. Zırh çeliklerinin oldukça düşük miktarda karbon içerdikleri görülmektedir bu durum ise kaynak edilebilirlikleri açısından önem arz eden bir durumdur (Soykan, 2005). Düşük karbon içeriğinin neden olduğu mekanik ve metalurjik dezavantajları gidermek amacıyla çeşitli alaşım elementleri kullanılmaktadır. Martenzit oluşum oranını, darbe tokluğunu ve korozyon direncini artırma potansiyeline sahip olan mangan, önemli bir elementtir. Ancak, yüksek etkinliğe sahip olması nedeniyle, kaynaklanabilirliği olumsuz etkilememesi için belirli sınırlar içerisinde kalması önem arz etmektedir. Molibden, tane büyümesini sınırlandırdığı gibi aynı zamanda tane sınırlarında karbür oluşumunu engeller ve sertleşme eğiliminin artışına katkı sağlar. Krom ise sertleşme eğilimini artırdığı gibi martenzit taneleri arasındaki bağların güçlenmesinde de etki gösterir (Arık, 2018). Bunların yanında ayrıca zırh çeliklerine Nb, V ve Ti gibi mikro alaşım elementlerinin de eklendiğine rastlanılmaktadır (Ş., Karagöz, 2005).

Tablo 2. ABD zırh çeliği standartlarına ait kimyasal kompozisyon değerleri (Soykan, 2005).

	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	P	S
MIL-A-12560	0,18-0,28	1,10-1,60	1,20-1,60	2,00-3,40	0,40-0,55	0,20-0,40	Max.-0,015	Max.-0,015
MIL-A-46100	0,22-0,32	0,70-1,00	0,40-0,70	0,80-1,30	0,50-0,65	0,35-0,50	Max.-0,010	Max.-0,010

2.4. Zırh Çeliklerinin Mekanik Özellikleri

Çeliğin mukavemeti hakkındaki ilk akla gelen kavram hem kolay ölçülebilmesi hem de diğer mekanik özellikleri hakkında fikir vermesi açısından, sertlik değeridir. Zırh çeliklerine ait sertlik değeri MIL DTL 46100 standardına bakıldığında 470 HB değerinden başladığı görülmektedir. Bu sertlik değerini daha üst değerlere taşınması ise malzeme ve ısıt

işlem teknolojilerinin geliştirilmesi sayesinde olmuştur (Specification, 2008).

Yüksek sertlik değeri ise beraberinde bazı olumsuzluklar getirmektedir. Örneğin 550 HB ve daha üzeri sertlik değerine sahip çelikler darbeye maruz kaldıklarında, sünek davranış özelliğinden uzaklaşarak gevrek kırılma davranışı gösterdikleri bilinmektedir. Bu istenmeyen durumu en aza indirebilmek için ısıl işlem parametreleri ve kimyasal kompozisyonun azami derecede dikkatle hazırlanması büyük önem taşımaktadır. Zırh çeliklerinden yüksek enerjiye sahip darbe etkisi karşısında sönümleme özelliği sayesinde delinme ve veya parçalanma hasarına karşı sağlam bir duruş sergilemesi beklenir. Bu bağlamda sertlik değeri nispeten daha düşük olan zırh çelikleri patlayıcı mühimmat tesirine karşı kullanılırken, sertlik değeri daha yüksek olan sınıfta yüksek kinetik enerjili mermi tesirine karşı kullanılmaktadırlar (Atapek, 2011).

Zırh çeliklerinin balistik direnç gösterebilmesi için sahip oldukları mekanik özellikler Tablo 3’ de verilmiştir. Öte yandan hem plastik şekil verilebilme özelliğinin azalması hem de farklı geometriye sahip parçaların sadece döküm yöntemi ile üretilmesi gibi olumsuzluklar zırh çeliklerinin yüksek mekanik özelliklere sahip olmasının bir sonucudur (Arık, 2018).

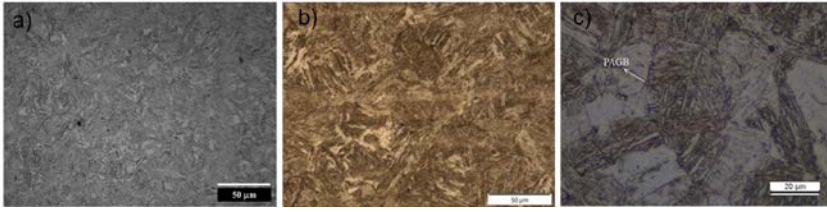
Tablo 3. Zırh çeliklerinin sahip olduğu genel mekanik özellikler (Arık, 2018).

Sertlik (HB)	Charpy-V -40 °C 10×10 mm(J)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama (%)
480-540	Min. 25	Min. 1250	1450-1750	7

2.5. Metalürjik Özellikleri

Zırh çelikleri de mekanik ve fiziksel özelliklerini, tüm metal esaslı mühendislik malzemelerinde görüldüğü üzere metalürjik yapılarına borçludurlar. Dolayısıyla zırh çeliklerinin

mikro yapıları için çok düşük kalıntı içerdiğinden dolayı oldukça temiz ve üst seviyede homojenlik gösterdiği söylenebilir. Üretilirken temperleme ve sertleşme aşamalarından geçen zırh çelikleri üretimleri sırasında mikroyapıları martenzitik forma kavuşur (Kavuncu, 2019). Haliyle martenzitik form zırh çeliklerinin yüksek tokluk ve mukavemete ulaşması anlamına gelmektedir (Vimal Kumar, Uthayakumar, Thirumalai Kumaran, & Velayudham, 2022). Şekil 2’ de farklı firmaların üretimi olan 500 kalite sınıfına ait Armox, Ramor ve Protection isimli zırh çeliklerine ait mikroyapı görselleri paylaşılmıştır. Bu zırh çeliklerine ait olan mikroyapı incelemesinde temperlenmiş martenzit ve özellikle Protection 500’ ün birincil östenit tane sınırlarında (prior austenite grain boundary, PAGB) az miktarda yer alan kalıntı östenit yapısı da görülebilmektedir.



Şekil 2. Zırh çeliklerine ait mikroyapılar a) Armox 500T (Janicki, 2014), b) Ramor 500 (Skowrońska, Szulc, Bober, Baranowski, & Chmielewski, 2022), c) Protection 500 (Gürol et al., 2022).

Zırh çeliklerinde meydana gelen martenzitik dönüşümler denge çerçevesinde olmadıklarından dolayı demir karbon diyagramı üzerinden oluşumları izah edilemez. Dolayısıyla ilgili yapı için dönüşüm diyagramının değerlendirilmesi gerekmektedir. Nedeni ise özellikle kaynak yapılması gereken durumlar için uygulanması gereken ısı enerjisi zamana bağlı olarak çelik yap içerisinde yayılıp ve azalarak tezahür etmesidir. Bu durumu anlaşılır hale getirebilmek için sürekli dönüşüm diyagramlarına bakılma ihtiyacı hasıl olur. 2013 yılında Barenzy ve ark. çalışmasında TTSteel yazılımını kullanarak, deneysel çalışmada elde ettiği Armox 500T zırh çeliğinin sürekli soğuma

diyagramını simülasyonunu oluşturmuştur. Böylece deneysel çalışmanın yazılımla doğrulamasını gerçekleştirmiştir. Dolayısıyla diyagramdan da gördüğü üzere martenzit oluşumunun atmosfer etkisindeki soğuma hızlarında bile oluşabildiğini vurgulamıştır (I., H. O. ve L. P., Barenyi, 2013). Farklı bir çalışmada ise, zırh çeliklerinin lazer, plazma ve su jeti ile kesim sırasında oluşan mekanik kayıplarını araştırmış. Elde ettiği bulguyu ise 8 mm kalınlığındaki Armox 500T çeliğinde akma noktası sınırı için lazer kesimde %14, plazma kesimde ise %27' lik malzeme kaybına uğradığını raporlamıştır (I., Barenyi, 2014).

3. ZIRH ÇELİKLERİNİN YER ALDIĞI ÇALIŞMALAR

3.1. Monolitik Çelik Zırh Yapılar

Armox 500T ve yumuşak çelik hedeflerinin darbe direncini ABAQUS/Explicit sonlu elemanlar programını kullanarak normal eğiklikte düz burunlu, konik burunlu, 12.7 ve 7.62 zırh delici yanıcı ogival burunlu mermiye karşı incelemiştir. Eşdeğer kalınlığı 9.4 mm (4.7+4.7 mm) olan katmanlı temaslı hedefler de yüksek süneklikli ve yüksek mukavemetli hedef sistemlerinin davranışını araştırmıştır. Araç motoruna karşı koruyucu yapılar, endüstride özel uygulama ve patlama dalgalarının çeşitli sıcaklık seviyelerine neden olması gibi çeşitli senaryolar ışığında 500°K, 900°K ve 1300°K gibi farklı sıcaklık değerlerini kullanmıştır. Armox 500T ve yumuşak çelik hedeflerinin malzeme davranışını tahmin etmek için JC yapısal modeli kullanmıştır (Kasilingam, Iqbal, & Senthil, 2019).

Geleneksel olarak, zırhlı araçların yapısı RHA çelik plakalardan yapılır. Ancak, zırh platformlarının ağırlığının azaltılmasıyla sonuçlanacak daha iyi malzemeler geliştirmeye ihtiyaç vardır. RHA çeliğinin yerini alabilecek potansiyel aday malzemelerden biri, iyi mukavemet ve süneklik

kombinasyonuna, mükemmel korozyon direncine ve tokluğa sahip yüksek nitrojenli çeliklerdir. Yüksek nitrojenli çeliklerin (HNS), farklı mermilere karşı söndürme ve temperleme işlemine tabi tutulmuş martenzittik çeliklere kıyasla karşılaştırılabilir veya geliştirilmiş balistik direnç gösterdiği bildirilmektedir. Lach ve ark. tarafından yapılan bir çalışma sertleştirilmiş HNS ve zırh çeliği üzerinde her iki çeliğin de tungsten alaşımlı uzun çubuk mermilere karşı eşit balistik performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, HNS ve RHA çeliklerinin balistik performansının 5,56 mm AP mermilere karşı benzer olduğu bulunmuştur. (Bhav Singh, Sukumar, Sivakumar, Madhu, & Arockia Kumar, 2019).

Armox 500T ve Al7075-T6 malzemelerinin çeşitli kombinasyonlarından oluşan 10 farklı hibrit model tanımlamıştır. Armox 500T ve Alüminyum 7075-T6 plakalarının düşme ağırlığı ve balistik darbe yüklerine maruz kalan hasar dirençleri araştırılmıştır. Plakaların düşük veya yüksek hızlı darbe yükleri altındaki davranışları araştırmacılar için önem arz eder. İlk önce, Armox 500T ve Al7075-T6 plakalarının düşme ağırlığı ve balistik darbe direnci, monolitik yapı formunda incelenmiştir. Balistik darbe analizleri, 800 m/s başlangıç hızına sahip 7.62 API mermileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düşme ağırlığı analizleri sırasında, 800 mm mesafeden 5,5 kg ağırlığın düşmesi modellenmiştir. Farklı kalınlıktaki hedef plakaların mermi tarafından tamamen delinebildiği veya delinemediği durumlar, tamamen delinmiş plakalardaki son (kalıntı) hızlar ve hedef plakalar tarafından emilen enerji miktarı araştırılmıştır. Balistik darbenin her zaman aralığında hedeflerin enerji Emilimi ve mermilerin kalıntı hızı belirlenmiştir. (YETER, 2019).

Balistik darbe performansının değerlendirilmesi genellikle deneysel testler yoluyla yapılır. Benzer şekilde FEA (Sonlu Elemanlar Analizi) zırh tasarımlarının optimizasyonu ve doğrulanması ve olası arıza mekanizmasının araştırılması için bir

öngörü aracı olarak kullanılabilir. Kalıntı geriliminin (RS) birçok malzeme arıza sürecinde (örneğin yorulma, kırılma ve gerilim korozyonu çatlaması) önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Balistik darbe durumunda olduğu gibi dinamik arızanın yüksek gerinim oranı deformasyonu ile karakterize edilmez. Sıcak haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliklerin literatür incelemesine göre, RS' nin dinamik arızaları üzerindeki rolü henüz tam olarak açıklığa kavuşturulmamıştır. Önceki bir çalışmada, çok katmanlı zırh sistemlerinin tasarımının, tek başına homojen haddelenmiş zırhla karşılaştırıldığında hava yoğunluğunu orantılı bir performans artışıyla azaltmada yararlı olduğu bulunmuştur. Tüm zırh malzemeleri (plakalar) üretim yolları sonucunda değişen büyüklükte RS' ye sahip olduğundan, RS' nin rolüne ilişkin bir çalışma arzu edilir. Çalışması, zırh çeliklerinin balistik davranışını ve performansını daha iyi açıklamak için 8,3 mm kalınlığındaki ARMOX 500T plakasındaki RS' yi ölçmeyi, Split Hopkinson Basınç Çubuğu (SHPB) testi yoluyla yüksek gerinim oranlı malzeme davranışını ölçmeyi ve bunları çeşitli rejimlerde balistik performansı değerlendirmek için sayısal FEA modellemesine birleştirmeyi amaçlar (Saleh, 2016).

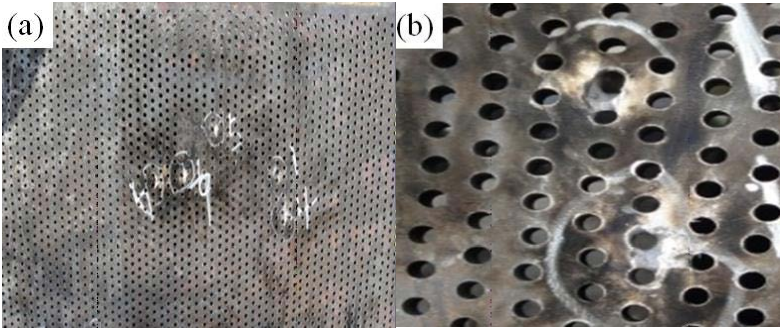
Al 7017 Alüminyum Alaşımı ve iki farklı sıcaklıkta temperlenmiş Zırh Çeliği plakalara 830 m/s hızında 7,62 mm zırh delici mermilerin balistik etkisini sonlu elemanlar analizi, ANSYS' deki Explicit Dynamics Modülü kullanılarak gerçekleştirmiştir. Malzemelerin sayısal modellerini geliştirmek için Johnson-Cook malzeme modeli kullanarak balistik performanslarını karşılaştırıldı. 200 °C temperlenmiş Zırh Çeliğinin, 650 °C temperlenmiş Zırh Çeliği ve Al 7017 ile karşılaştırıldığında mermiyi durdurmada üstün balistik performansına sahip olduğunu raporladı. Ayrıca, hedef plakaların arka yüzünün deformasyonunu merkezden kenara radyal deformasyon ve buna karşılık gelen darbe hızı, performans

parametreleri için dikkate alındığı ifade edilmiştir (Bagwe, Thale, Sawant, & Pawar, 2020).

Armox 500T çeliğinin ve zırh delici yanıcı mermi malzemesinin değişen gerilim durumu, gerinim hızı ve sıcaklık altındaki yapısal davranışını incelemek için detaylı bir araştırma yürütülmüştür. Armox 500T çeliğinin karakterizasyonu, gerilim üç eksenliliğinin yanı sıra gerinim hızındaki artışla birlikte mukavemetinde artış olduğunu göstermiştir. Öte yandan, sıcaklıktaki artış, mukavemetini azaltırken malzeme sünekliğinde önemli bir artışa neden olmuştur. API mermi malzemesi gerilim üç eksenliliğine ve gerinim hızına duyarız kalmıştır; ancak termal etkilere karşı oldukça hassastır. Armox 500T çeliğinin, zırh delici (API) mermisinin balistik etkisine karşı değişen stres durumu, gerilme hızı ve sıcaklık altındaki davranışını incelemek için ayrıntılı bir araştırma amaçlamıştır. Balistik deneyleri 8 ve 10 mm kalınlığındaki Armox 500T zırh çeliği hedef plakalara, ortalama 830 m/s hıza sahip 7.62 ve 12.7 API mermilerle atışlar yaparak gerçekleştirmiştir. Ayrıca hedef paneller için kalibre edilmiş JC modeli kullanarak sonlu elmanlar analizlerini gerçekleştirmiştir (Iqbal, Senthil, Sharma, & Gupta, 2016).

Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliği plakalarının 7.62 mm mermilere karşı balistik performansları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Monolitik, eğimli ve çift katmanlı plakalar olmak üzere üç farklı plaka tipi kullanılmıştır. Monolitik bir yapı olarak Ramor 500 6.7 mm, Ramor 550 ise 6.2 mm kalınlıkta test edilmiştir. Çift katmanlı zırhlar için iki farklı dizilim yapısı oluşturulmuştur. Yüz plakası olarak Ramor 550 ve arka plakası Ramor 500 olan yapı daha iyi balistik direnç göstermiştir, ancak bu yapıda ana hasar modları olarak tıkanma ve şişkinlik görülmüştür. Mermilerin 4.5 mm kalınlığındaki eğimli Ramor 500 plakasına 0°, 30° ve 60°' lik açılarla ateşlendiği deneyde, balistik direncin çarpma açısının artmasıyla orantılı olarak arttığı bulunmuştur (Bekci, Canpolat, Usta, Güler, & Cora, 2021).

Deney tabi olan zırh çeliği örnekleri çok delikli ve deliksiz yapıda olup kalınlık değerleri ise 4mm, 5mm ve 6mm' dir. 7.62mm zırh delici merminin kullanıldığı balistik testler, dış mekân atış poligonunda 100m atış mesafesi, 76°açılı vuruş koşulları altında yapılmıştır. Çok delikli plakaların ağırlığı, deliksiz plakaların ağırlığına göre %26,24 oranında azaltılabilir olduğunu belirtmişlerdir. 6mm ve 5mm kalınlığında çok delikli plakaların 15 mm kalınlığındaki deliksiz plakalar ile oluşturulan çift katmanlı yapılar ve 100 m atış koşulları altında, balistik başarı sağladığını raporlamışlardır. Çok delikli plakaların ağırlığının, deliksiz plakaların ağırlığına göre açılı atış şartlarında %26,24, 0° lik açısız isabetlerde ise %40,85 oranında azaltılabilir olduğu sonucuna varmışlardır. DeneySEL teste tabi tutulan 6 mm kalınlıktaki plakanın mermiye bakan düzlemi ile 5 mm kalınlıktaki plakanın sınırlayıcı düzleminin birlikte değerlendirildiği, iki katmanlı çok delikli zırh çelik plakalarının makromorfolojisi Şekil 3' te verilmiştir (Li, Liu, Guo, & Yuan, 2018).



Şekil 3. İki Katmanlı Çok Delikli Zırh Çelik Plakalarının Balistik Test Sonucu (A) 6 Mm Kalınlıktaki Plakanın Mermiye Bakan Düzlemi, (B) 5 Mm Kalınlıktaki Plakanın Sınırlayıcı Düzlemi (Li et al., 2018)

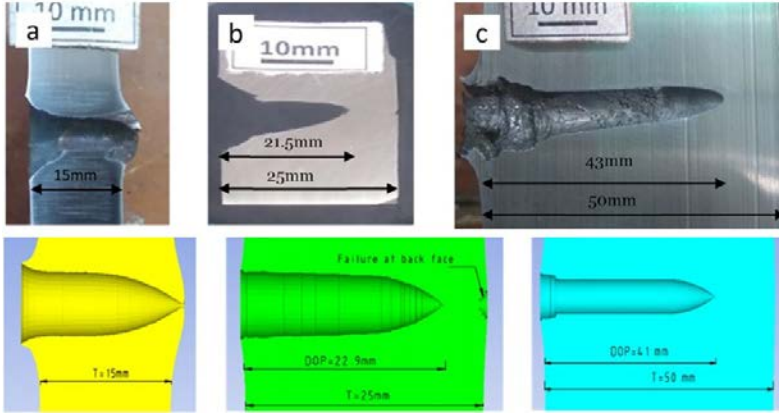
3.2. Hibrit Çelik Zırh Yapılar

Kompozit zırh, 6.5 mm kalınlığındaki armox-500T çeliğiyle tasarlanmış ve birleştirilmiş olan alümina seramik,

poliüretan kauçuk ve kevlar49 fiberden oluşmaktadır. 7.62x54 mm'lik merminin 850 m/s hızla çarpmasıyla oluşan kompozit zırhın balistik performansı hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Zamana bağlı kinetik enerji dağılımı açık sonlu elemanlar programı kullanılarak sayısal olarak açıklanmıştır. Merminin kompozit zırha çarptığında başlangıç hızının azaldığı belirtilmiştir. %10 ağırlıkça zirkonyumla sertleştirilmiş alüminanın kinetik enerji emilimi, %97 ağırlıkça alümina seramiğinden yaklaşık %40 daha verimli olduğu bu durum gerekçesi ise %10 ağırlıkça zirkonyumla sertleştirilmiş alümina tabakasına sahip destek plakası daha az stres ve daha az darbe enerjisinden etkilendiği şeklinde açıklanmıştır. Ayrıca, X-ışını radyografi tekniğiyle analiz edilen seramik tabakasının sonuçları sonlu eleman sonuçlarıyla iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir (Gositanon, 2018).

Bir zırh modülünün optimizasyonunun temel amacı, balistik performansını, esas olarak ağırlık, kalınlık ve maliyet üzerindeki kısıtlamalarla en üst düzeye çıkarmaktır. Çarpma sorunları doğası gereği oldukça doğrusal değildir ve sayısal çözücülerde tasarım değişkenleri açısından hedef fonksiyonunu doğrudan formüle etmek zordur. Bu nedenle, zırh modülünün optimizasyonu için sayısal modelde başlangıçta tasarım değişkenleri ve balistik tepki üzerindeki çeşitli kısıtlamalar zorlanmaz. Bunun yerine, daha basit iki adımlı kademeli yaklaşımlar tercih edilir. üç farklı malzemedan (Armox-500T, Ti-6Al-4V ve Al-2024) oluşan üç katmanlı bir zırh modülünü, minimum ağırlıkla 7.62 AP mermiyi yenmek için optimize etmek için iki adımlı kademeli bir yaklaşım kullanmıştır. İlk adımda, balistik tepki, deney tasarımı kapsamındaki tasarım değişkenlerinin farklı kombinasyonları için sayısal model kullanılarak hesaplanır. Sayısal modelleme AUTODYN kodu kullanılarak gerçekleştirilir. İkinci adımda, balistik tepki, regresyon analizi kullanılarak tasarım değişkenleri açısından

kapalı formda ifade edilir. Balistik tepki, RV ve DOP gibi geleneksel olarak kullanılan balistik tepki parametreleri yerine yeni bir parametre balistik performans parametresi (BPP) açısından ölçülür. Son olarak, çeşitli kısıtlamalar için zırh modülleri tasarlamak amacıyla geleneksel optimizasyon yöntemleri kullanılır. 15mm kalınlığa sahip Armox-500T, 25mm kalınlığa sahip Ti-6Al-4V ve 50mm kalınlığa sahip Al-2024 monolitik zırh plakalarının mermi vurması sonucunda meydana gelen hasar modları deneysel ve sayısal olarak mukayeseli olarak Şekil 4’ da verilmiştir (Paman, Sukumar, Ramakrishna, & Madhu, 2020).



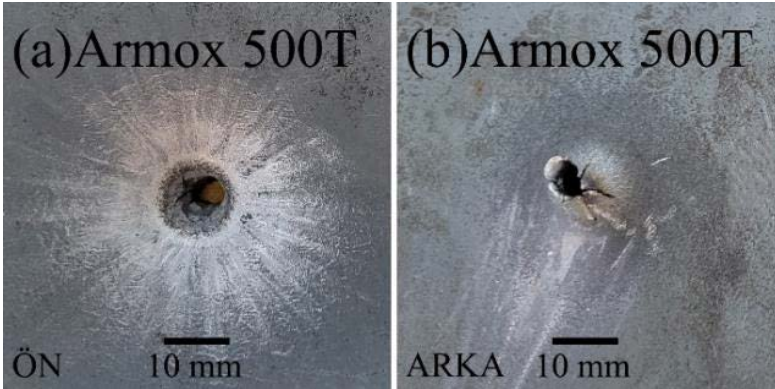
Şekil 4. Monolitik plakalar için deneysel ve sayısal sonuçlar: (a) 15 mm Armox-500T plaka, (b) 25 mm Ti-6Al-4V plaka ve (c) 50 mm Al-2024 plaka, mermi çarpmasından sonra (Paman et al., 2020).

Weldox 700E çeliği ve Kevlar 129-epoksi kompozitinin yer aldığı 30 farklı zırh yapısının dahil olduğu deneysel ve parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Monolitik çelik, çok katmanlı çelik ve çelik-kompozit plakalar üzerinde NATO seviye 1 / EN 1063 BR5 standartları kapsamında balistik testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar balistik dayanım sınırının katman dizilimi açısından oldukça önemli olduğu, aynı kalınlık değerine sahip tekli çelik plakaların katmanlı çelik plakalara göre daha iyi balistik dayanım gösterdiği tespit

edilmiştir. Ayrıca, monolitik plakalara nazaran çelik ve kompozit plakalar oluşan zırh numunelerinin %26' lık ağırlık avantajı sunduğu ve hibrit plakaların monolitik plakaların yerini alabileceği raporlanmıştır. (Palta, Gutowski, & Fang, 2018).

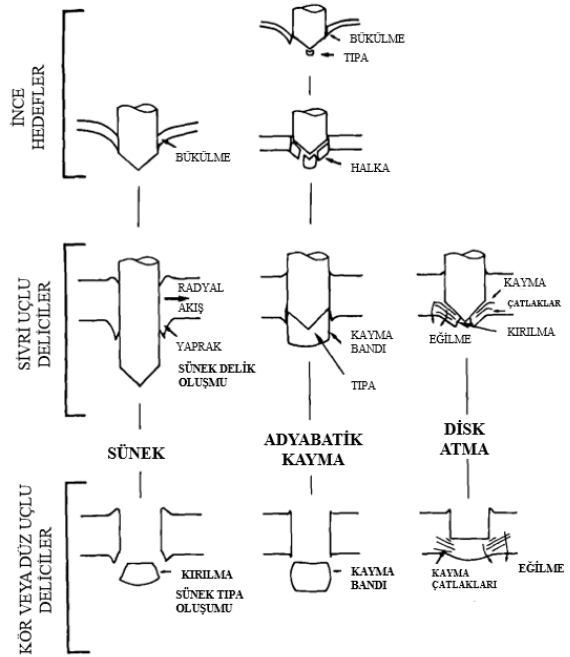
3.3. Çelik Zırh Yapı Arıza Modları

Zırh çeliklerinin maruz kaldığı balistik darbe etkisine karşı, tek katmanlı zırh yapılarında çeliğin sertlik ve mekanik özelliklerine göre değişen çeşitli perforasyon durumları meydana gelmektedir. Arıza modu olarak adlandırılan bu fenomen de delicinin, burun geometrisi ve hızı etkili olurken hedef plakada ise sertlik, tokluk ve kimyasal kompozisyonu gibi faktörler etkili olur. Örneğin Mehmet ve ark., çalışmasında sertlik değeri 480-540HBW arasında olan 4mm kalınlığa sahip Armox 500T zırh çeliğinin balistik dayanımını NIJ 0108.01 Seviye III-A standardı kapsamında 7.62×51 mm FMJ mermisine karşı gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışma 4 mm kalınlığındaki çelik plakada mikro çatlakların eşlik ettiği taç yapraklanma hasar modunun olduğu tam perforasyon durumunu raporlamışlardır (Özer, 2024). Şekil 5' te 4mm Armox 500T zırh çeliğinde oluşan tam perforasyon hasar durumu verilmiştir.



Şekil 5. 4mm Armox 500T zırh çeliğinde oluşan tam perforasyon hasar durumu (Özer, 2024)

Zukas' ın çalışmasında kör veya düz uçlu, sivri uçlu deliciler ve ince hedefler olarak kategorize ettiği zırh çeliklerine ait hasar modlarının şematik olarak belirtildiği çalışması Şekil 6' da gösterilmiştir (Zukas, 1990).



Şekil 6. Zırh yapısına ait hasar modları (Zukas, 1990).

KAYNAKÇA

- Agrawal B J. (2011). High performance textiles for ballistic protection. In *In 2011 Defense Science Research Conference and Expo (DSR)* (pp. 1–4). Singapore.
- Akça, C. ve K. A. (2008). Weldability of class 2 armor steel using gas tungsten arc welding. *Archives of Materials Science and Engineering*, 34, 110–112.
- Arık, M. ., (2018). *MARS 240 (MIL-A-46100) Zırh Çeliğinin Korumalı Metal Ark Kaynağı ile Birleştirilerek Kaynak Performansının İncelenmesi.*. Mersin: Mersin Üniversitesi.
- Ash R A. (2016). Vehicle armor, Bhatnagar A (Ed.), *Lightweight Ballistic Composites*. In *Woodhead Publishing* (pp. 285–309).
- Atapek, Ş. H. ., (2011). *Bor Katkılı Bir Zırh Çeliğinin Fiziksel Metalürjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi ve Balistik Performansının Değerlendirilmesi*. Kocaeli: Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bagwe, S., Thale, S., Sawant, P., & Pawar, M. J. (2020). Finite element analysis of armor steel and aluminium alloy under the impact of 7.62mm projectile. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 44, pp. 4086–4091). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.447>
- Bajaj P S. (1997). Ballistic Protective Clothing: An Overview. *Indian Journal of Fiber and Textile Research*, 22,274-291.
- Barenyi, I. ., (2014). *Changes in mechanical properties of selected uhss steels after their cutting by laser and plasma.*.

- Barenyi, I. , H. O. ve L. P. ,. (2013). Changes in mechanical properties of armoured UHSLA steel ARMOX 500 after over tempering,. *Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*, 4, 7–13.
- Bekci, M. L., Canpolat, B. H., Usta, E., Güler, M. S., & Cora, Ö. N. (2021). Ballistic performances of Ramor 500 and Ramor 550 armor steels at mono and bilayered plate configurations. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(4), 990–995. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.001>
- Bhav Singh, B., Sukumar, G., Sivakumar, K., Madhu, V., & Arockia Kumar, R. (2019). A comparative study on the ballistic performance of high nitrogen steel and rolled homogeneous armour steel against 7.62mm ball and 12.7mm armour piercing projectiles. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 41, pp. 1188–1194). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.345>
- Carr D, L. E. A. (2014). Ballistic-Protective Clothing and Body Armour. In *Woodhead Publishing* (pp. 146–170). Cambridge.
- Çelik, C. , G. M. , Ç. O. , B. H. , G. U. , & K. M. (2023). Çelik, C., Göçmen, M., Çoban, O., Baykal, H., Gürol, U., & Koçak, M. . *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 1009–1028.
- Cimpoeru, S. J. (2016). The mechanical metallurgy of armour steels. *Land Division Defence Science and Technology Group, Australia*.
- Gooch W A. (2002). An Overview of Ceramic Armor Applications. *Ceramic Transactions*, 134,3–21.

- Gositanon, A. , C. M. , & P. S. (2018). Ballistic simulation and verification of ceramic/rubber composite armour. (pp. 18–22).
- Gupta N. (2013). *Development of TiB₂-Ti Based Homogeneous/Bilayered Functionally Graded Armor Materials and ZrB₂-SiC-TiSi₂ Composites Using Spark Plasma Sintering*. Indian Institute of Technology Kanpur.
- Gürol, U., Karahan, T., Erdöl, S., Çoban, O., Baykal, H., & Koçak, M. (2022). Characterization of Armour Steel Welds Using Austenitic and Ferritic Filler Metals. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75(3), 757–770. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02464-7>
- Hazell, P. J. (2022). Armour. In *materials, theory, and design*.
- Iqbal, M. A., Senthil, K., Sharma, P., & Gupta, N. K. (2016). An investigation of the constitutive behavior of Armox 500T steel and armor piercing incendiary projectile material. *International Journal of Impact Engineering*, 96, 146–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.05.017>
- Janicki, D. (2014). Disk Laser Welding of Armor Steel/ Spawanie Laserem Dyskowym Stali Panczernej. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(4), 1641–1646. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0279>
- Karagöz, Ş. ,. (2005). Zırh Çelikleri. In *Zırh Teknolojileri Semineri, Milli Savunma Bakanlığı Ar-Ge & Teknoloji Daire Başkanlığı, Ankara*.
- Karagöz, Ş. , A. H. (2007). Bor Katkılı Zırh Çeliklerinin Kırılma Davranışı. In *Uluslar Arası Kırılma Konferansı* (pp. 186–196).
- Kasilingam, S., Iqbal, M. A., & Senthil, R. (2019). Influence of impactor nature, mass, size and shape on ballistic resistance of mild steel and Armox 500 T steel.

International Journal of Protective Structures, 10(2), 174–197. <https://doi.org/10.1177/2041419618807493>

- Kavuncu, N. E. (2019). Zırh çeliklerinde robot ve manuel kaynak uygulamalarının malzeme üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması,. In *Kaynak Kongresi 11.Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, (pp. 171–177).
- Lenihan, D., Ronan, W., O'Donoghue, P. E., & Leen, S. B. (2019). A review of the integrity of metallic vehicle armour to projectile attack. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(1), 73–94. <https://doi.org/10.1177/1464420718759704>
- Li, C., Liu, K., Guo, X. J., & Yuan, L. X. (2018). Experimental Study on Ballistic Performance for Multi-hole Armor Steel Plates Against the 7.62mm Armor Piercing Projectile. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 382). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/382/2/022060>
- Maho B, S. P. J. S. Y. E. F. K. B. N. (2019). Effect of Rubber Insertion on Impact Behavior of Multilayer Steel Fiber Reinforced Concrete Bulletproof Panel. *Construction and Building Materials*, 216,476-484.
- Mikulic D. (2013). Personal protective equipment, Mikulic D (Ed.) Design of Demining Machines . *Springer*, 169–178.
- MIL-DTL-46100E, M.-D.-46100E,. (2019). *Detail specification: armor plate, steel, wrought, high-hardness*.
- Naveen Kumar, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Hafeezur Rahman, A., & Balaguru, V. (2021). Influence of Microstructural Characteristics on Ballistic Performance and Its Mode of Failure in Shielded Metal

- Arc Welded Ultra-High Hard Armor Steel Joints. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(4), 909–921. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02197-7>
- Özer, M. , F. K. , Y. İ. K. , D. T. K. , B. F. , & Ç. C. (2024). Armox 500T Zırh Çeliği İçeren Hibrit Zırh Plakalarının 7.62 mm Tam Metal Kaplama Mermi Karşısındaki Balistik Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması. . *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14, 1176–1197.
- Palta, E., Gutowski, M., & Fang, H. (2018). A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic impacts. *International Journal of Solids and Structures*, 136–137, 279–294. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.12.021>
- Paman, A., Sukumar, G., Ramakrishna, B., & Madhu, V. (2020). An optimization scheme for a multilayer armour module against 7.62 mm armour piercing projectile. *International Journal of Protective Structures*, 11(2), 185–208. <https://doi.org/10.1177/2041419619860533>
- Popławski, A., Kędzierski, P., & Morka, A. (2020). Identification of Armox 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems. *Materials and Design*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108536>
- Şahintürk, C. , T. İ. , U. Ş. , & P. U. (2005). Erdemir levha haddehanesi ve zırh çeliği üretim çalışmaları. *Makina Mühendisleri Odası*.
- Saleh, M. , L. V. , K. M. M. , & R. D. (2016). Analysis of the residual stress in ARMOX 500T armour steel and numerical study of the resultant ballistic performance. . *Residual Stresses* , 437.
- Sangoy, L. , M. Y. ve P. G. ,. (1988). Steels for ballistic protection. *Israel Journal of Technology*, 24, 319–326.

- Skowrońska, B., Szulc, J., Bober, M., Baranowski, M., & Chmielewski, T. (2022). Selected properties of RAMOR 500 steel welded joints by hybrid PTA-MAG. *Journal of Advanced Joining Processes*, 5, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2022.100111>
- Soykan, H. Ş. , A. Z. , K. Y. (2005). Zırh çeliklerinin metalurjisi. *Makina Mühendisleri Odası*, 427, 838–869.
- Specification, U. M. ., (2008). *MIL-DTL-46100E (MR)*, “Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness”.US Army Research Laboratory, APG, MD. 9. .
- Tenggren, R. ., (2014). *How bending affects the ballistic properties of Armox*.
- Vimal Kumar, N., Uthayakumar, M., Thirumalai Kumaran, S., & Velayudham, A. (2022). The effect of weld-groove surface modification on the joint performance of military grade armour steel: A sustainability approach. *Materials Chemistry and Physics*, 281, 125902. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125902>
- Yeter, E. (2019). Damage resistance investigation of Armox 500T and Aluminum 7075-T6 plates subjected to drop-weight and ballistic impact loads. *Sakarya University Journal of Science*, 23(6), 1080–1095. <https://doi.org/10.16984/aufenbilder.517128>
- Z Gama Haque B, M. K. M. W. G. J. (2012). Advances in Protective Personnel and Vehicle Armors,. In *Recent Patents on Materials Science* (pp. 105–136).
- Zukas, J. A. , J. W. ve Sons. (1990). Inc High Velocity Impact Dynamics. *New York*.

HAFİF ATEŞLİ SİLAHLAR İÇİN MERMİ TUZAK SİSTEMLERİ

Osman SALTİK¹

1. GİRİŞ

Barutun icadıyla beraber ateşli silah kavramı da ortaya çıkmıştır. Ateşli silahlar, kullanılan mühimmat tipi, namlu çapı gibi bilgiler referans alınarak sınıflandırılmaktadır. Hafif ateşli silahlar genellikle tek kişi tarafından rahatlıkla kullanılabilen silahlar olarak tanımlanmaktadır (Karslı, Sert, ve Küçükömeroğlu, 2020). Hafif ateşli silahlar; güvenlik, avcılık ve atıcılık sporu amacıyla kullanılabilir. Hafif ateşli silahlar tüfek ve tabanca olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. İki grup arasındaki en büyük fark namlu boyutlarıdır. Namlu uzunluğu fişek yatağı hariç otuz santimetreyi ve tüm uzunluğu elli santimetreyi geçmeyen hafif ateşli silahlar tabanca olarak nitelendirilmektedir (“Ateşli Silahlar”, 2025). Askeri anlamda kullanılan hafif ateşli silahlar uzun namluya ve uzun menzile sahip iken iç güvenlik unsurlarınca kullanılan hafif ateşli silahlar kısa namlu ve kısa menzile sahip silahlardır. Avcılık amacıyla kullanılan hafif ateşli silahlar ise uzun namluya sahip, yiv setli ve yiv setsiz olarak ikiye ayrılmaktadır.

Ateşli silah alma prosedürleri ülkeden ülkeye değişiklik gösterebilmektedir. Ülkemizde yarı otomatik tabanca grupları ile avcılıkta kullanılan tüfekler, mevzuatta belirtilen şartlar sağlandığı takdirde satın alınabilmektedir. Ruhsata bağlanan

¹ Doktor Öğretim Görevlisi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta OSB Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri, osmansaltik@isparta.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3967-3061.

silahlar yine mevzuatta belirtilen şart ve koşullarda taşınabilmekte ve kullanılabilmektedir. Ruhsatlı silaha sahip olan bireyler atıcılık yeteneklerinin devamı veya gelişmesi için silahları ile atış yapma eğilimdedirler. Diğer taraftan ateşli silah sahibi olmayanlarda yine farklı sebeplerden dolayı atış yapmak istemektedir. Atış yapma isteğinin doğal bir sonucu olarak güvenli ve kontrollü bir atış ortamının bu kişilere sağlanmış olması gerekmektedir. Diğer taraftan, güvenlik güçlerinin atıcılık eğitimleri, spor ve eğitim amaçlı atışlar vb. birçok atış durumunun güvenli ve kontrollü bir şekilde yapılabilmesi gerekmektedir. Ateşli silahlar ile atış eyleminin güvenli ve kontrollü bir mecrada yapılabilmesi için atış poligonları kullanılmaktadır.

Atış poligonları; açık, yarı açık ve kapalı olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Atış poligonlarının yapısal formları değişiklik göstermekle beraber kullanım amaçları aynıdır. Poligonlarda belirli bir mesafede olan hedefe atışlar yapılmaktadır. Atış gerçekleştikten sonra silahtan çıkan mermi hedefi geçtikten sonra güvenli bir yapı içerisinde toplanmaktadır. Bu yapıya mermi tuzağı denilmektedir.

Bu çalışmada farklı tip mermi tuzakları hakkında bilgiler (tasarım esasları, malzeme türleri vb.) verilmiş ve sonuç kısmında bir değerlendirme yapılmıştır.

2. MERMİ TUZAKLARI

2.1. Balistik Bilimi ve Mermi Tuzağı İlişkisi

Mermi tuzakları, ateşli silahların neden olabileceği yaralanma etkilerini yok etmek ve mermilerin hedef dışı alanlara ulaşmasını engellemek amacıyla tasarlanan sistemlerdir. Mermi tuzaklarının etkinliği; tasarım, tasarımında kullanılan malzemeler, mekanizmalar ve çevresel faktörler gibi birçok değişkene bağlıdır. Mermi tuzaklarının tasarımında dikkate

alınması gereken en önemli faktör, mermilerin balistik özellikleridir.

Balistik, merminin silahın içindeki ve dışındaki hareketleri ile hedef üzerindeki etkilerini inceleyen bir bilim dalıdır. Balistik genel olarak üç bölüme ayrılır; iç balistik, dış balistik ve terminal balistik. İç balistik bilimi merminin namludan çıkana kadarki sürede olan olaylarını, dış balistik namludan çıkan merminin hedefe varıncaya kadarki hareketlerini, terminal balistiği ise merminin hedef üzerinde oluşturduğu etkiyi incelemektedir (Küçük, 2024).

Poligonlarda hedef olarak genelde kâğıt ve türevlerinden yapılmış cisimler kullanılmaktadır. Atış esnasında hedefi delip geçen mermi büyük bir hızla yoluna devam etmektedir. Mermiyi güvenli bir şekilde durdurabilecek yapının, merminin kinetik enerjisini absorbe edebilecek yeterlilikte olması gerekmektedir.

Mermi tuzakları enerji absorbe etme malzemelerine göre üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar; toprak/kum mermi tuzakları, kauçuk/sentetik mermi tuzakları ve çelik malzemeli mermi tuzaklarıdır.

2.2. Toprak/Kum Mermi Tuzak Sistemleri

Toprak/kum mermi tuzakları, hedef hattı tarafı açıkta bulunan, diğer tarafları beton, ahşap vb. malzemeler ile çevrili bir alan içinde toprak/kum malzemenin belirli bir açıda stoklanması sonucunda oluşur. Doğal olarak bulunan toprak/kum tepeliklerinin hedef hattı tarafı açılarak mermi tuzağı haline getirilebilmektedir. Yapı içerisindeki toprak/kum, atış hattından gelen merminin enerjisini emerek durdurur ve geri kazanımı veya bertarafı için bir olanak sağlar (FITASC, 2025).

Mermi tuzağı oluşturulurken toprak ve kum tek başına veya birlikte kullanılabilir. Sadece kum malzeme kullanılmak istenildiğinde kumun;

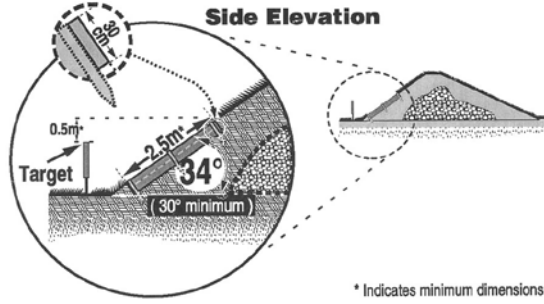
- Sekme riskine neden olmayacak kadar ince,
- Gereken profili koruyacak kadar iri,
- Sertleşme veya yüzey kabuğu oluşturmayacak nitelikte,
- Elde ovuşturulduğunda ince toza dönüşmeyecek nitelikte olması gerekmektedir (NRA, 2022).

Toprak/kum mermi tuzakları 30°'lik bir eğim ile inşa edilir. Bu açı, merminin sekmeden toprak/kum stoğu içinde kalmasını sağlamaktadır. Daha büyük açılar kullanılabilir ancak yağış, nem vb. dış etmenlerden dolayı yüksek açı stabilitesi korunmakta zorlanır. Başka bir deyişle, toprak/kum ile oluşturulan mermi tuzaklarında 30°'lik eğim pratikte uygulanabilecek sınırlar içindedir (Rieber, 2021).

Toprak/kum mermi tuzaklarının boyutları, atıcı sayısı, atış yapılan silahın balistik özellikleri, atış mesafesi gibi parametreler kullanılarak belirlenmektedir. Mermi tuzağının tasarımında boyut bakımından üç faktör diğerlerine göre daha kritik rol oynamaktadır. Bunlardan ilki mermi tuzağının hedef arkasındaki açısız uzunluğu, ikincisi tuzak içinde bulunan yapı stoğunun (toprak/kum) minimum yüksekliği, üçüncüsü ise tuzağın sırt kısmını oluşturan arka set yüksekliğidir.

Hedef arkasında yer alan mermi tuzağının açısız uzunluğu; eğimin 34° olduğu durumda en az 2,5 m veya hedef yüksekliğini en az 0,5 m aşacak (Şekil 1) şekilde olmalıdır. Bu iki şarttan hangisi daha büyükse o ölçü kullanılmalıdır (NFA, 2024).

Şekil 1. Toprak/Kum Mermi Tuzağı Tasarım Boyutları



Kaynak: (NFA, 2024)

Toprak/kum mermi tuzaklarında stok derinliği ateşli silah türüne bağlıdır. Atış hattı yönünde; düşük hızlı ateşli silahlar için stok derinliği en az 0,5 m olmalıdır. Yüksek hızlı ateşli silahlar için ise en az 1 m olmalıdır (NRA, 2022).

Toprak/kum mermi tuzaklarında arka set yüksekliği, atıcının hedef alma hatasından kaynaklanan sapmaları da göz önünde bulundurarak belirlenen maksimum atış mesafesi içindeki tüm atışları kapsayacak şekilde yeterli olmalıdır (NFA, 2024). Tablo 1’de atış mesafesine göre arka set yükseklik değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Atış Mesafesine Göre Mermi Tuzağı Arka Set Yükseklik Değerleri

Atış mesafesi (metre)	Minimum arka set yüksekliği (metre)
25	3
50	4
75	5
100	6

Kaynak: (NFA, 2024)

Toprak/kum mermi tuzakları toz, kir, bakım ve temizlik gibi nedenlerden dolayı daha çok açık poligonlarda kullanılmaktadır (SAPS, 2003).

Tek bir atış yolu dikkate alındığında, ortalama 20.000 atıştan sonra toprak/kum tipi mermi tuzaklarında bakım işlemi yapılmalı ve stok içerisinde biriken mermiler uygun yöntemler (eleme, manyetik ayırma vb.) kullanılarak stok dışına çıkarılmalıdır. Toprak/kum tipi mermi tuzaklarının bakım işleminde, stok malzemenin istenilen özellikleri koruyup koruyamadığı uygun metotlar (boyut tayini vb.) ile incelenmelidir (NRA, 2022).

Toprak/kum mermi tuzakları ilk defa oluşturulurken zemin ile stok malzemenin birbiri ile temasını önleyecek çeşitli malzemeler kullanılmalıdır. Bunun sebebi tuzak tarafından durdurulan kurşun içerikli mermilerin doğaya zarar vermesini ve çevresel kirliliği önlemek içindir. Ayrıca yağmur suyunun tuzak içerisine nüfuziyetini önlemek için tuzak üstüne suyu geçirmeyen ve merminin sekmesine de müsaade etmeyen bir malzeme yerleştirilebilir (ITRC, 2005).

2.3. Kauçuk/Sentetik Mermi Tuzak Sistemleri

Kauçuk veya sentetik malzemeden yapılan mermi tuzakları farklı şekillerde olabilir, ancak hepsi merminin enerjisini emerek durmasını sağlayan benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Bu kısımda en sık kullanılan tasarım tipleri ele alınmaktadır. Bunlardan ilki; hedef tarafı açılı olan bir stok alanı içinde granül şeklinde kauçuk/sentetik malzemenin bulunduğu tuzak sistemi, ikincisi; hedef arkasında düz perde şeklinde bulunan tuzak sistemi, üçüncüsü ise birbirine geçme özelliği bulunan ve tuğlaya benzer kauçuk blok yapıların kullanıldığı duvar tipi tuzak sistemidir.

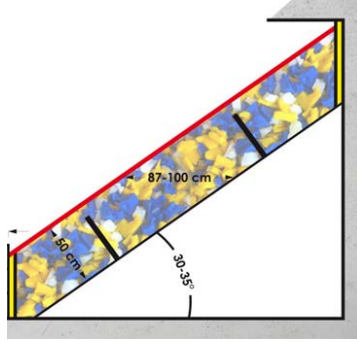
Açılı tip kauçuk/sentetik mermi tuzakları oluşturulurken toprak/kum mermi tuzaklarında olduğu gibi 30° eğim şartı bulunmaktadır. Yine arka set yüksekliği toprak/kum mermi tuzaklarındaki ölçüler ile aynıdır.

Granül kauçuk mermi tuzaklarında, gelen mermileri durdurmak için granül kauçuk malzemeler kullanır. Mermi yumuşak ortama çarpar ve çoğunlukla bozulmadan yakalanır. Granül kauçuk malzeme, merminin geri sıçramasını ve sekmesini önler, havadaki kurşun tozunu ve merminin darbe gürültüsünü en aza indirir. Bu özellikleri sayesinde atış poligonları için daha temiz ve daha güvenli bir ortam sağlar ve mermilerin geri kazanımı ile geri dönüşümünü en üst düzeye çıkarır. Granül kauçuk mermi tuzağı, yangın çıkartıcı veya izli mermiler hariç, bilinen tüm hafif ateşli silahlardan ateşlenen mermileri durdurabilecek yapıdadır (Karki, 2016).

Granül kauçuk mermi tuzaklarında kullanılacak granüllerde; sıkı kenetlenme, 10-25 mm boyut aralığı, düzenli ve köşeli şekle sahip olma özellikleri aranmalıdır (Rieber, 2021). Mermi tuzaklarında kullanılacak olan kauçuk malzemenin yangına dayanıklı malzeme olması esastır. Diğer taraftan atışlar sonrasında tuzak içinde oluşacak parçacıkların yangına sebebiyet vermemesi için tuzak belirli aralıklarla (örneğin: 20.000 atım) temizlenmesi gerekmektedir. Belirli kullanımdan sonra istenilen özellikleri sağlamayan kauçuk malzeme, içindeki mermiler çıkartılarak birçok kez geri dönüştürülerek yine tuzak sistemlerinde kullanılabilir (DLRSC, 2025).

Granül kauçuk mermi tuzaklarında düşük ve yüksek hızlı mermilerin durdurabilmesi için hedef arkasındaki stok yüksekliğinin en az 0,5 m, stoğun arka tepe kısmında yatay derinliğin en az 0,9 m olması (Şekil 2) gerekmektedir (NFA, 2024).

Şekil 2. Granül Tip Mermi Tuzak Sistemi Tasarım Boyutları



Kaynak: (Rutec, 2025)

Hedef arkasında, perde şeklinde kauçuk/sentetik malzemeler kullanılarak farklı bir mermi tuzağı oluşturulabilmektedir. Perdeler konveyör bantların belirli boyutlarda kesilmesiyle elde edilir. Poligonda kullanılan en yüksek darbe enerjisine sahip merminin türüne göre perde sayısı ayarlanmalıdır. Perdeler arka arkaya bir askı sistemine asılarak tuzak oluşturulur. Tuzak içerisinde en arka kısma gerekiyor ise çelik bir plaka konulması, merminin istenilmeyen bir yere ulaşmasını engelleyecektir. Atış sonrasında mermi, her bir perdeden geçerken enerjisi azalacaktır ve bir müddet sonra tuzak içindeki zemin bölgeye düşecektir. Bu tip mermi tuzağının en büyük sıkıntısı, aynı yere çok sayıda merminin isabet etmesi nedeniyle çabuk bir aşınmanın meydana gelmesidir (Rieber, 2021). Şekil 2’de perde tipi kauçuk/sentetik mermi tuzak sistemi görülmektedir.

Şekil 3. Perde Tipi Kauçuk/Sentetik Mermi Tuzak Sistemi



Kaynak: (Rieber, 2021)

Kauçuk/sentetik mermi tuzaklarında blok şeklinde tuzak yapısı kullanılabilir. Balistik kauçuk bloklar, yanma ve alev alma riskini azaltan kimyasal katkılarla zenginleştirilerek, yüksek sıcaklık ve basınç altında vulkanizasyon yöntemiyle üretilmektedir (İkmalci, 2025). Kauçuk bloklar mermi sekme riskini minimize etmektedir. Aynı zamanda da kurşun tozu oluşumunu büyük oranda engellemektedir (Range, 2025) Bu tip blokların bakım işlemi mermiye doymuş olan blok malzemenin değiştirilmesi ile yapılmaktadır (ITRC, 2005). Kauçuk bloklarda ortalama 5.000 isabetli mermiden sonra blokların değiştirilmesi veya daha az isabet alan hedef bölgeye konulması gerekmektedir (Giss, 2025).

Şekil 4'te mermi tuzaklarında kullanılan kauçuk blok yapısı verilmiştir.

Şekil 4. Kauçuk Blok Yapısı



Kaynak: (Sunflex, 2025)

Kauçuk bloklar 7.62 mm kalibredeki mermileri durdurabilecek kapasiteye sahiptir. Tablo 2’de, 500 mm yükseklik, 300 mm genişlik, 300 mm yükseklik ve 37 kg ağırlığa sahip iki adet kauçuk bloğun arka arkaya konulması suretiyle, farklı kalibredeki mermiler ile yapılan atış sonuçları görülmektedir. Tablo 2 incelendiğinde tüm kalibre tipleri için kauçuk bloklarda penetrasyon (delip geçme) meydana gelmedi görülmektedir (Sunflex, 2025).

Tablo 2. Farklı Tip Kalibredeki Mühimmatların Kauçuk Blok Üzerindeki Atış Deney Sonuçları

Number of Test Done	Ammunition Tested	Number of Shots Fired	Number of Blocks Stack	Result
Test 1	.22 LR HV 40 gr Lead	5	2	No Penetration
Test 2	.38 Special 158 gr RNL	5	2	No Penetration
Test 3	9mm Parabellum 124 gr FMJ	5	2	No Penetration
Test 4	.357 Magum 158 gr JSP	5	2	No Penetration
Test 5	.44 Magnum 240 gr SWC	5	2	No Penetration
Test 6	.30 cal 7.62 NATO 147 gr M80	5	2	No Penetration
Test 7	.30 cal 30-06 166 gr M2 AP	5	2	No Penetration
Test 8	5.56 x 45 NATO 62 gr M855	5	2	No Penetration
Test 9	.50 cal 709.5 gr FMJ	5	2	No Penetration
Test 10	7.62 NATO M80	5	2	No Penetration

Kaynak: (Sunflex, 2025)

2.4. Çelik malzemeli mermi tuzak sistemleri

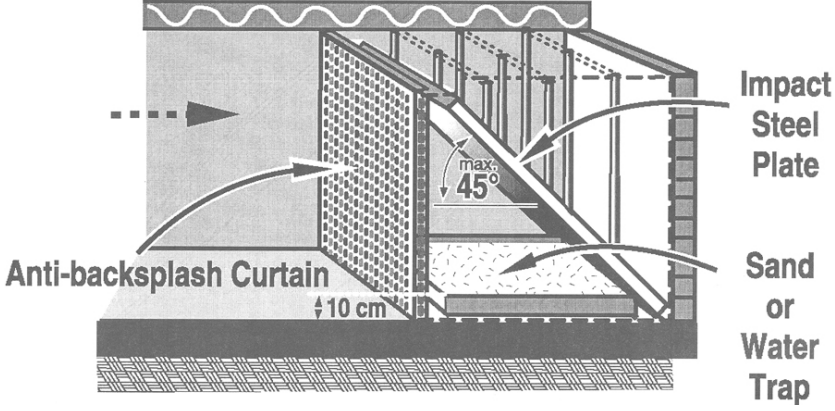
Çelik malzemeli mermi tuzakları en çok kapalı poligonlarda tercih edilen bir tuzak sistemidir. Genel tasarım kriterlerine uyulduğu müddetçe birçok farklı konfigürasyon oluşturmak mümkündür. Çelik malzemeli mermi tuzak sistemleri genel olarak üç kategoriye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki; düz çelik plakanın yere dik bir biçimde konumlandırıldığı sistem, ikincisi; düz çelik plakanın yere belirli bir açıda konumlandırıldığı sistem ve üçüncüsü ise; birden fazla çelik plakanın yere belirli bir açıda konumlandırılarak üst üste arada boşluk bırakılarak (ters merdiven) dizildiği sistemdir.

Çelik tuzaklar, ceketli mermilerin yüksek penetrasyon kabiliyeti ve sekme riski taşınması sebebiyle merkezden ateşlemeli ve yüksek hızlı tüfekler için tercih edilmez (AFEMS, 2002).

Düz plakalı mermi tuzak sisteminde kullanılacak olan çelik plaka en az 10 mm kalınlığında ve 500 brinell sertliğinde olmalıdır. Ayrıca çelik plaka, merminin uçuş hattına dikey yönde en az 7°'lik eğim ile montajı yapılmalıdır. Eğim arttıkça çelik plaka üzerine etki eden mermi enerjisi azalacaktır. Böylelikle çelik plakanın ömür süresi artacaktır (DOE, 2012).

Yapımı en basit olan mermi tuzağı tasarımlarından biri, açılı çelik levha tasarımıdır. Bu tasarımda (Şekil 5) atış yönüne 45° veya daha az açı ile yerleştirilmiş bir plaka kullanılır. Çelik levhaya çarpan mermiler kasıtlı olarak aşağıya, zemin seviyesinde bulunan ve içi kum veya su dolu olan en az 10 cm yüksekliğindeki bir yapıya yönlendirilir. Çelik plakadan seken mermilerin toplandığı yapı, çelik plakanın düşey iz düşümünü kaplayacak şekilde yapılmalıdır. Bu mermi tuzağı tasarımı sadece merkezden ateşlemeli ve düşük hızlı mermilerin durdurulması için kullanılabilir (NFA, 2024).

Şekil 5. Açılı Çelik Plaka Mermi Tuzak Sistemi



Kaynak: (NFA, 2024)

Çelik plaka açısının en fazla 45° olduğu durumda farklı kalibredeki mermiler için gerekli olan çelik plaka kalınlıkları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Açılı Çelik Plaka Mermi Tuzak Sistemleri İçin Gerekli Olan En Az Plaka Kalınlık Değerleri

Calibre	Bullet Nature	Min. Steel Thickness	Steel Specifications ¹⁰	Mild Steel Min. Steel Thickness ¹¹	1T100 Armour Steel Min. Thickness
.22 Long Rifle	Lead	7 mm	AR-450	6 mm	4 mm
9 mm Para.	FMJ	10 mm	AR-500	12 mm	8 mm
.357 Magnum	JSP	10 mm	AR-500	12 mm	8 mm
.44 Magnum	JSP	10 mm	AR-500	12 mm	8 mm
.45 ACP	FMJ	10 mm	AR-500	12 mm	8 mm
.50 AE	FMJ	10 mm	AR-500	12 mm	8 mm

Kaynak: (NFA, 2024)

Poligonlarda en sık kullanılan çelik malzemeli mermi tuzak tipi, şekil 6'da görülen ters merdiven tipi tuzak sistemidir.

Şekil 6. Ters Merdiven Tipi Çelik Malzemeli Mermi Tuzak Sistemi



Kaynak (Çelik hedef, 2025)

Bu tip mermi tuzak sisteminde kullanılacak çelik levha tipi, poligonda kullanılacak en fazla enerjiye sahip silah ve mühimmata göre seçilmesi gerekmektedir. Bu tuzak sistemlerinin kullanıldığı poligonlarda zırh delici mühimmatlar kullanılmamalıdır. Mermi tuzağının panjurları, herhangi bir açıyla gelen merminin sekmesini engelleyecek şekilde yatayla en fazla 45° açı yapacak şekilde monte edilmelidir. Tuzağa çarpıp enerjisi sönmüş çekirdeklerin ise tuzağın altına yapılacak haznede toplanmasını sağlayacak şekilde tasarımı yapılmalıdır (TSE, 2023).

Mermi tuzağındaki plakalar, aynı seviyede olacak şekilde alın kaynağı ile birleştirilmeli veya havşa açılmış levhalar hizalanarak arka plakaya cıvatalarla bağlanmalıdır. Plakaların montajı sırasında, kaynaklı ve cıvatalı birleşim yerleri hedefin arkasında kalmayacak şekilde ayarlanmalıdır (TSE, 2023).

Mermi çekirdeklerini toplayan hazne, TS EN 10025-2 standardına uygun S355J2 kalitesinde çelikten veya eşdeğer bir

malzemeden yapılmalı ve en az 6 mm kalınlığında olmalıdır. Atış yönüne bakan kısmının kalınlığı ise minimum 10 mm olmalı ve aynı kalite çelik ya da muadili bir malzeme kullanılmalıdır. Hazne, sabit veya hareketli olarak tasarlanabilir (TSE, 2023).

Çelik mermi tuzaklarının temizlik ve bakım işlemleri diğer tip mermi tuzaklarına göre nispeten daha kolaydır. Bu tip tuzak sistemlerinde temizlik işlemi için tuzağın alt tarafında bulunan mermi toplama haznesinin boşaltılması yeterlidir. Bakım için ise tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak sistemin bakım ihtiyacı belirlenebilir. Yüksek aşınmaya uğrayan parçalar var ise değiştirilmesi gerekmektedir (ITRC, 2005).

Merminin tuzağa çarpması ile doğal olarak bir ses meydana gelmektedir. Bu ses düzeyi kullanılan ateşli silahın balistik özelliklerine bağlı olmakla beraber, toprak/kum ve kauçuk/sentetik tipi mermi tuzaklarında düşük, çelik mermi tuzaklarında ise daha yüksek seviyededir (ITRC, 2005).

3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Mermi tuzak sistemleri, ateşli silahlarla yapılan atışların güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiş kritik yapı unsurlarıdır. Atış poligonlarında kullanılan mermi tuzaklarının tasarımı, kullanılan silah türüne, mermi özelliklerine ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, mermi tuzaklarının etkinliği doğrudan balistik bilimindeki prensiplere dayanarak belirlenmektedir. Özellikle poligon ortamında güvenliğin sağlanması için uygun mermi tuzağı seçimi, atış poligonlarının güvenli işleyişi açısından büyük önem taşımaktadır.

Çalışmada ele alınan bilgiler ışığında şu temel çıkarımlara ulaşılabilir:

- ✓ Mermi tuzaklarının en önemli fonksiyonu, merminin hedefi delip geçtikten sonra kontrolsüz bir şekilde ilerlemesini engelleyerek güvenliğini sağlamaktır,
- ✓ Özellikle kapalı poligonlarda, sekme riski nedeniyle uygun malzeme seçimi büyük önem arz etmektedir,
- ✓ Mermi tuzaklarının etkin tasarlanabilmesi için balistik bilimi temel alınmalıdır,
- ✓ Mermi tuzağı tasarımında özellikle terminal balistik analizleri kritik bir rol oynamaktadır,
- ✓ Mermi tuzaklarında kullanılan malzemeler enerji absorbe etme kapasitelerine göre değişiklik göstermektedir,
- ✓ Toprak/kum tuzakları, mermiyi yavaşlatmada etkili olup, genellikle açık poligonlarda tercih edilmektedir,
- ✓ Kauçuk/sentetik mermi tuzakları, düşük sekme riski nedeniyle hem açık hem de kapalı poligonlarda yaygın olarak kullanılmaktadır,
- ✓ Çelik levha kullanılan tuzaklar, dayanıklılık açısından avantajlı olmasına rağmen, sekme riskini artırabileceğinden özel tasarımlar gerektirmektedir,
- ✓ Atış poligonlarında kullanılan mermi tuzaklarının yapısı hem kullanıcı güvenliği hem de çevresel güvenlik açısından kritik bir rol oynamaktadır,
- ✓ Mermi tuzaklarının düzenli olarak bakım ve kontrolünün yapılması, zamanla oluşabilecek güvenlik açığının önüne geçmek için gereklidir.

Bu çalışmada, farklı tipteki mermi tuzaklarının tasarım esasları, malzeme türleri ve balistik ile olan ilişkisi ele alınarak, güvenlik ve etkinlik açısından değerlendirilmiştir. Gelecekte, yeni nesil poligon sistemlerinde yenilikçi enerji absorbe edici

malzemeler ve akıllı mermi izleme sistemleri gibi teknolojilerin entegrasyonu, güvenliği daha üst seviyeye taşıyabilecektir.

KAYNAKÇA

- AFEMS. (2002). Handbook for European range managers. Erişim adresi:https://www.fitasc.com/upload/images/echa_july_2020/49_2002_afems_handbook_european_range_managers_eng.pdf
- Ateşli Silahlar ve Bıçaklar ile Diğer Aletler Hakkında Yönetmelik. (2025). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=911779&MevzuatTur=21&MevzuatTertip=5>
- Çelik Hedef. (2025). Açık ve kapalı poligonlar için mermi kapan sistemleri: Portatif taşınabilir modeller. Erişim adresi: <https://celikhedef.com/urun/acik-ve-kapali-poligonlar-icin-mermi-kapan-sistemleri-portatif-tasinabilir-modeller-fiyaat-icin-basvurunuz>
- DLRSC. (2025). JSP 403: Defence ranges safety, volume 2, chapter 2: Range design criteria and specifications. Erişim adresi: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7a4fa3ed915d1fb3cd6f76/JSP403_Vol2_Chap02_DLRSC.pdf
- DOE. (2012). Use of bullet traps and steel targets. Erişim adresi: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/05/f1/June_2012_Bullet_Trap_and_Steel_Target.pdf
- FITASC. (2025). AFEMS handbook for European range managers. Erişim adresi: https://www.fitasc.com/upload/images/echa_july_2020/49_2002_afems_handbook_european_range_managers_eng.pdf
- GISS. (2025). Ballistic rubber blocks. Erişim adresi: <https://www.giss.pl/images/design/katalog/strzelnice/giss-ballistic-rubber-blocks-eng.pdf>

- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). (2005). Environmental Management at Operating Outdoor Small Arms Firing Ranges. (SMART-2). Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Small Arms Firing Range Team. Available on the Internet at <http://www.itrcweb.org>.
- İkmalci. (2025). Balistik kauçuk. Erişim adresi: <https://www.ikmalci.com/urun/balistik-kaucuk/>
- Karşlı, M., Sert, Y., & Küçükömeroğlu, T. (2020). Tabanca gövdeleri için polimer kompozit malzeme geliştirilmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, (38), 131-157.
- Karki, O. (2016). Bullet recovery in shooting ranges: Marine container concept (Bachelor's thesis). Metropolia University of Applied Sciences. Erişim adresi: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/119590/Karki_Olli.pdf
- Küçük, B. (2024). Nanopartikül takviyeli aramid esaslı balistik kumaşların balistik performansının incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- NFA. (2024). Range design and construction guideline. Erişim adresi: <https://nfa.ca/wp-content/uploads/2024/05/RANGE-DESIGN-AND-CONSTRUCTION-GUIDLINE-2024.pdf>
- NRA. (2022). Range design and safety handbook. Erişim adresi: <https://nra.org.uk/wp-content/uploads/NRA-RANGE-DESIGN-AND-SAFETY-HANDBOOK-DEC-2022-22-12-22-1.pdf>
- Range. (2025). Ballistic rubber for bullet containment. Erişim adresi: <https://www.range-systems.com/product-category/bullet-containment/ballistic-rubber/>

- Rieber, D. (2021). Environment-Friendly Bullet Traps: The Acquisition of Knowledge. Norwegian Civilian Marksmanship Association. Erişim adresi: <https://www.rpr.no/wp-content/uploads/220421-Report-Environment-Friendly-Bullet-Traps-ENG.pdf>
- Rutec. (2025). Bullet trap granules R5000. Erişim adresi: <https://www.rutec-gummi.com/en/products/bullet-trap-granules-r5000>
- SAPS. (2003). Compulsory specification for small arms shooting ranges (VC 9088). Erişim adresi: <https://www.saps.gov.za/services/flash/firearms/downloads/sabsstd.pdf>
- Sunflex. (2025). Common product catalogue. Erişim adresi: <https://www.ballisticrubberrange.com/pdf/common-product-catalogue.pdf>

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ KONULARI

yaz
yayınları

YAZ Yayınları

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar / AFYONKARAHİSAR

Tel : (0 531) 880 92 99

yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com