

TÜRKİYE VE DÜNYADA MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Doç.Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

yaz
yayınları

Türkiye ve Dünyada Makine Mühendisliği

Editör

Doç.Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

yaz
yayınları

2025

**Türkiye ve Dünyada Makine
Mühendisliği**

Editör: Doç.Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

© 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 978-625-8678-45-1

Aralık 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

İÇİNDEKİLER

Biomechanical Performance and Sustainability of Cranial Implants: From Finite Element Analysis to Clinical Practice.....	1
<i>Sinan KÖSE</i>	
Türkiye’de Elektrikli Araç Ekosistemi	23
<i>Hüseyin GÜRBÜZ</i>	
An Introductory Assessment of Artificial Intelligence in Mechanical Engineering: Approaches, Applications, and Future Directions	38
<i>Paşa YAMAN</i>	
Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	59
<i>Fevzi KELEN</i>	
An Experimental Study on Pid Tuning for Quadcopter Flight Controllers	86
<i>Osman ÜNAL</i>	
Optimization of Biodiesel Production Through Transesterification: A Comprehensive Assessment	107
<i>Adem TÜYLÜ</i>	
Comparison of Biomass Energy Sources and Production Methods.....	124
<i>Halit ARAT, Oguzhan ERBAS</i>	
An Overview of the Current Techniques for the Control of Particulate Matter Emissions in Diesel Engine Systems	145
<i>Hasan Üstün BAŞARAN</i>	

Taşlama Tezgâhlarında Kesme Teorisi.....164
Gültekin BASMACI

Özel Taşlama Tezgâhları ve İşlemleri 180
Gültekin BASMACI

Dynamometer Systems Used in Lathe Machines: Design Approaches, Applications, and Future Perspectives.....195
Hasan Hüseyin DEĞER, İlhan ASİLTÜRK

Eklemeli İmalatta Lazer Ardıl İşlemler 249
Mahmut ÖZER

Robust Statistical Analysis of Parameters Affecting Annular Fin Efficiency Using Numerical Data.....273
Ramazan YILMAZ

Fotovoltaik Panel Temizleme Yöntemleri.....296
Veli Berke KAYIKCIOĞLU, Gürkan KARA, Hakan ÖZCAN

Effect of CRFP Ply Orientation On Stress Distribution in Aluminium–CRFP Adhesively Bonded Single-Lap Joints 314
Ahmet ÇALIK

Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Güncel Durumu 325
Gürkan KARA, Seyda ÖZBEKTAŞ

Investigation of Marangoni Convection Depending on Gravity Conditions at Different Viscosities 348
Ela KATI SUNAY

Kaynaklı Parçalarda Artık Gerilme ve Burulma Yükleme Etkileri Üzerine Derleme 369
Emre AYDINLI, Farshid KHOSRAVI

**Havuz Fotopolimerizasyonu ile Üretilen Parçaların
Mekanik Özellikleri: Saf Reçineler ve Dolgu Maddeli
Kompozitlerin İncelemesi.....380**

Ömer Doğan ÖZDEMİRLER, Farshid KHOSRAVI

**Application of Tuned Mass Damper in Helicopter
Ground Resonance Control.....414**

Hüseyin AGGÜMÜŞ

**Design and Application of A Plc-Based Vibratory
Stress Relief System 423**

Can GÖNENLİ, Okan DUYMAZLAR, Emre ERCAN, Çetin AKA

"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."

BIOMECHANICAL PERFORMANCE AND SUSTAINABILITY OF CRANIAL IMPLANTS: FROM FINITE ELEMENT ANALYSIS TO CLINICAL PRACTICE

Sinan KÖSE¹

1. INTRODUCTION

Cranioplasty – the surgical restoration of skull defects – is a critical procedure for protecting the brain and restoring cranial anatomy after trauma, surgery (e.g., decompressive craniectomy), or congenital defects (Shash, 2024). Each year, hundreds of thousands of patients require cranial bone repair worldwide (Vallittu, 2017). Traditionally, the missing skull section (bone flap) can be replaced with the patient's own bone (autograft) or an alloplastic implant made of metal, ceramic, or polymer (Shash, 2024). Among materials, titanium metal emerged as a gold-standard for cranial implants because of its high strength, biocompatibility, and corrosion resistance (Coyle et al., 2025). However, titanium is far from perfect – it is much stiffer than bone (potentially causing stress-shielding of the surrounding skull) and produces CT/MRI artifacts that hinder postoperative imaging. Moreover, metal implants can release wear particles and ions over time, which may trigger inflammation and local bone resorption. These limitations have catalysed the search for advanced biomaterials that more closely mimic bone's mechanical behaviour and biological performance (Msalllem et al., 2022). In parallel, engineers are leveraging mechanical

¹ Asst. Prof. Dr; Ordu University, Fatsa Faculty of Marine Sciences, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, ORCID: 0000-0002-6224-3388.

modelling tools like finite element analysis (FEA) to virtually design and optimize cranial implants for better stress distribution and safety margins before they are ever manufactured (Haque et al., 2023). The convergence of novel materials (e.g., bioactive and composite biomaterials) with computational modelling and experimental mechanics is reshaping cranial implant design in pursuit of stronger, safer, and more biologically integrated reconstructions. This chapter provides a comprehensive overview of cranial implant design from both a materials perspective and a mechanics perspective. We review the landscape of biomaterials used in cranial repair – from traditional titanium and polymethylmethacrylate (PMMA) to newer alternatives like bioactive glasses, fiber-reinforced polymers, and sustainable bio-based composites. We then discuss modern finite element modelling approaches for simulating skull-implant systems, including how FEA informs implant geometry and predicts stress distributions and failure modes. To bridge simulation with reality, we examine experimental validation techniques for cranial implants, highlighting studies that measured mechanical strength, impact resistance, and fatigue life of implant prototypes. We also devote sections to the tribological and fatigue behaviour of cranial implants – how friction, wear, and cyclic loading can affect long-term performance – and to sustainability perspectives, considering biodegradable or “green” material innovations that reduce environmental impact. A section on clinical relevance links engineering insights to surgical outcomes, discussing biocompatibility, infection, imaging, and regulatory considerations. Finally, we summarize key findings and future directions in the conclusion. Throughout the chapter, emphasis is placed on integrating experimental mechanics data with computational simulations to guide the design of cranial implants that are mechanically robust, fatigue-resistant, biologically active, and clinically effective.

2. MATERIALS USED IN CRANIAL IMPLANTS

2.1. Metals

The metallic materials used in cranial implants have historically held an important place due to their high mechanical strength and long-term biocompatibility profiles. In modern cranioplasty applications, titanium and Ti-6Al-4V alloy are the most commonly used metals. Titanium and Ti6Al4V alloy have been used for many years as standard materials in skull reconstruction due to their high strength-to-weight ratio, biocompatibility, and corrosion resistance. With an elastic modulus of approximately 110 GPa, which is much higher than that of human cortical bone (15–20 GPa), it is effective in carrying stresses but can cause resorption in the surrounding bone tissue. Finite element analyses indicate that local stress concentrations in titanium implants may lead to long-term loosening and micro-movement of screws (Jindal et al., 2023). Nevertheless, titanium is still preferred by surgeons due to its malleability during surgery and mechanical stability (Kayhan et al., 2024). Stainless steel (316L), while widely used in orthopaedic implants, currently lags behind titanium and its alloys in cranioplasty. The most important reasons for this include the steel's higher density, the risk of creating MR artefacts due to its magnetic properties, and potential hypersensitivity reactions due to its nickel content. Although stainless steel has good corrosion resistance, its long-term stability in biological environments is not as high as that of titanium. Therefore, while steel implants are used to a limited extent in modern cranioplasty protocols, examples of older series of cranial reconstructions made from 316L steel plates can be found in the literature (Mani et al., 2007). Cobalt-chromium-molybdenum (Co-Cr-Mo) alloys are a widely used material group in orthopaedic joint prostheses and dental implants due to their high hardness, wear resistance and excellent mechanical stability. However, when evaluated from a

cranioplasty perspective, the elasticity modulus of Co-Cr alloys (~220–230 GPa) is much higher than that of bone and even titanium. These high elasticity values can lead to a significant stress shielding risk, reducing the load-bearing capacity of the surrounding bone tissue. Furthermore, Co-Cr alloys create significant radiological artefacts, complicating postoperative imaging, and their high density increases implant weight. For these reasons, although Co-Cr alloys are not considered technically suitable for cranioplasty, they should be evaluated within the scope of cranial implant materials as they are an important part of the metal implant family from a materials science perspective (Vaicelyte, 2020). While metal implants offer high static strength, the mismatch in elasticity modulus between bone tissue and metal materials brings disadvantages such as artefact formation and weight. Current research has shifted towards polymer and composite-based implant materials. Nevertheless, considering titanium's clinical success rate and long-term stability, the metal category remains one of the cornerstones of cranioplasty materials science.

2.2. Polymers

Polymer-based implant materials—particularly polymethyl methacrylate (PMMA) and polyetheretherketone (PEEK)—have come to the fore in recent years due to their balance of mechanical and biological performance. Although PMMA offers low cost and surgical flexibility, it has a brittle structure. In addition to the risk of cracking under impact loads, the polymerisation processes that generate heat can cause necrosis in nearby tissues (Msallem et al., 2022). PEEK with an elastic modulus in the range of 3–4 GPa, is compatible with bone tissue and enables post-operative imaging with its radiolucent to its radiolucent property. However, its bioinert structure results in low osteointegration potential. Therefore, modification with

hydroxyapatite or titanium coating is recommended (Thien et al., 2015; Moncayo-Matute et al., 2023).

2.3. Bioceramics (HA, Zirconia, Alumina)

Bioceramics are widely discussed in the field of cranioplasty due to their osteoconductive properties and surface chemistry that supports cellular adhesion. Hydroxyapatite (HA) facilitates the osseointegration process thanks to its composition, which is close to that of the bone mineral phase. However, the brittle structure and low impact toughness of the material limit its use alone in large defects. Zirconia (Y-TZP (tetragonal zirconia polycrystal)) offers high flexural strength and wear resistance, but there are concerns regarding brittle fracture risk and long-term stability. Although alumina provides superior hardness and chemical inertness, it is highly susceptible to crack propagation under impact. For these reasons, bioceramics are often preferred as a coating (e.g., HA or BG-coated PEEK) or composite system (polymer-ceramic) component. Thus, osteoconductivity is preserved while structural toughness and impact resistance are supported by the polymer matrix (De Santis et al., 2021; Hench, 2006).

2.4. Bioactive Glasses (BG, 45S5 and Derivatives)

Bioactive glasses (BG) (e.g., 45S5) can form a chemical bond with bone through Ca-P ion release in body fluids and the formation of an apatite layer on the surface. These properties make bioactive glasses advantageous for cranial defect repair. The antibacterial effect associated with ion release and surface bioactivity reduce the risk of early-stage infection while offering users the potential to accelerate osseointegration processes. In recent years, it has become possible to produce BG at low temperature and low energy costs using 3D printing and gel-based 'green' printing techniques, thereby strengthening the perspective of sustainable manufacturing. The integration of the BG phase

into polymer matrices (PEEK, PLA, PCL) or fibre-reinforced composites has been shown to optimise both mechanical toughness and biological efficacy (Hench, 2006; Nogueira et al., 2024; Cannio et al., 2021; Dou et al., 2025).

2.5. Fibre-Reinforced Composites

Fibre-reinforced composites (FRCs) can increase impact toughness and fatigue life by limiting crack propagation in the polymer matrix through fibre bridging and energy absorption mechanisms. Carbon fibre-reinforced PEEK (CF-PEEK) offers a higher elastic modulus and fracture toughness compared to pure PEEK, while maintaining its radiolucent structure. Glass fibre reinforced composites (LFC-BG) functionalised with bioactive glasses (BG) impart osteoactivity and antibacterial effects, reporting rapid mineralisation at the bone-implant interface. Clinical case studies report that LFC-BG implants demonstrate stable integration and satisfactory mechanical performance. Furthermore, bionic/topology-optimised lattice-structured reinforcements increase impact resistance without adding mass and distribute stress homogeneously throughout the body (Posti et al., 2015; De Santis et al., 2021; Coyle et al., 2025).

2.6. Bio-based and Sustainable Materials (PLA/PCL Composites, Mg/Polymer Hybrids)

Biopolymer-based polymers (PLA, PCL) and composites of these polymers reinforced with inorganic phases such as HA/BG offer a temporary structural scaffold approach for regenerative cranioplasty. In these material groups, as the implant biodegrades over time, the transfer of load within the structure is transferred to the newly formed bone tissues throughout the degradation process. Mg/polymer hybrid systems initially possess high mechanical load-bearing capacity, while their controlled biodegradability offers the potential to reduce permanent implant loads and long-term material footprints. In terms of sustainability,

3D printing at the point of use reduces logistics and stock costs, while low-temperature ‘green’ processes decrease energy consumption. When evaluated using life cycle assessment (LCA) metrics, these materials and application methods can offer lower environmental impact profiles compared to traditional metal solutions (Jindal et al., 2023; Mani et al., 2007; Kayhan et al., 2024).

3. FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA) APPROACHES

Finite Element Analysis (FEA) is one of the most reliable and widely used engineering tools for evaluating the mechanical behaviour of cranial implants. This method numerically determines stress distribution, deformations and safety factors by analysing the interaction of the implant material's elastic modulus, Poisson's ratio, density and geometry with the applied loads, boundary conditions and contact properties. FEA has become a mechanical validation unit that directly influences clinical decisions, particularly in patient-specific implant designs. Although it currently provides the operator with patient-specific information through pre-application scenarios, error rates from numerical calculations are a concern in this method. The hardware used and operator influence are parameters that directly affect the magnitude/size of these errors (Mejía Rodríguez et al., 2024). The main reasons for the widespread use of FEA in cranioplasty are;

- i) The implant geometry can be modelled with anatomical accuracy by deriving it from CT or MRI data,
- ii) Material models can be precisely defined according to their linear-elastic, elastoplastic or composite structure,

- iii) The ability to simulate different loading scenarios (impact, compression, screw tightening, intracranial pressure changes) prior to surgery,
- iv) Enabling optimisation studies (screw placement, selected implant thickness, topology optimisation).

3.1. Geometry and Modelling Approaches

Patient-specific three-dimensional skull models are typically created through the segmentation of high-resolution CT data. Following segmentation, a surface mesh is derived, and the implant geometry is designed to fit the defect area. Due to the complex structure of the skull, both cortical and trabecular bone can be defined as separate regions in the model. Increasing the mesh density, particularly at the contact surfaces of the screws, directly affects the accuracy of the results. Although an increased number of meshes is important for accurate modelling, it can negatively affect the total error/deviation ratios resulting from rounding errors in mathematical equations due to longer processing times. The literature reports that tetrahedral elements are commonly preferred in models used for skull reconstruction, while hybrid mesh structures with shell elements yield more accurate results in thin-walled implants (Moncayo-Matute et al., 2023).

3.2. Material Modelling

The materials used in cranioplasty implants are generally modelled as linear elastic isotropic. However, while bone tissue exhibits orthotropic properties, CF-PEEK or glass fibre reinforced composites exhibit anisotropic material behaviour. While it is recommended that these properties be introduced into the software used in the analysis processes of the materials, the entire model can be represented using the linear elastic isotropic material group with acceptable assumptions in order to shorten the processing times and simplify the overall model. However,

the modelling of the brittle structures of bioactive glass and Mg-based structures necessitates their representation using a damage model. In FEA studies, defining material properties with values found in the literature is particularly important in stress behaviour, deformation, and fatigue analyses (Coyle et al., 2025; De Santis et al., 2021).

3.3. Boundary Conditions and Loading Conditions

For cranioplasty implants to be modelled correctly, the boundary conditions must represent physical reality. In most FEA studies performed on the skull;

- i) Rigid fixation performed in the basal regions,
- ii) Where frictional contact is defined at the screw and implant interface,
- iii) The intracranial pressure scenario is applied,
- iv) It stands out as a system in which analyses are performed and results are evaluated under impact loads.

Load scenarios are particularly important in interpreting traumatic events, determining the risk of implant fracture and deformation limits.

3.4. Output Parameters: Stress, Displacement, Deformation and Safety Factors

FEA outputs are generally evaluated in three main groups;

- i) Stress distribution (von Mises, maximum tensile-compressive stress)
- ii) Deformation and displacement
- v) Safety factor

In some advanced models, fatigue life estimation, failure criteria, screw pull-out resistance and micro-movement analyses can also be performed (Moncayo-Matute et al., 2023).

4. EXPERIMENTAL MECHANICS AND VALIDATION STUDIES

Finite element analysis is a powerful predictive tool for cranial implant design, but it must be validated with experimental data during the transition to clinical application. Experimental mechanical studies reveal the behaviour of the implant under real loading conditions, fracture modes, fatigue life, and stability at the implant–bone interface. This allows the reliability of FEA models to be tested and numerical design decisions to be validated in a laboratory setting (Msallem et al., 2022; Coyle et al., 2025). Static tests are used to determine the load-deformation behaviour, rigidity, and ultimate load-bearing capacity of cranial implants. In these tests, implants are typically mounted on synthetic skull models or cadaver bone, and a controlled compressive load is applied from a specific point or area. The resulting load-displacement curves provide the operator with information about the rigidity of both the implant and the implant-bone system. Cranial implants are expected to be safe not only under static loads but also under impact and traumatic loads. Therefore, drop tests, impact tests, or collision experiments at specific impact energy levels are used. The objective of these experiments is to characterise the implant's damage behaviour, microcrack initiation and propagation mechanisms, and its energy absorption capacity, which will not traumatise the skull and brain tissue a second time. Skull implants may be subjected to repeated low-amplitude loads over their long service life. Chewing, speaking, muscle contractions and minor traumas create a high-cycle fatigue effect on the implant and screws; therefore, fatigue

strength is a critical design criterion, not just a single-use ‘load-bearing capacity’. In fatigue tests, implant samples or implant-bone simulation systems are subjected to hundreds of thousands or even millions of loading cycles at a specific stress level. Studies have shown that PEEK and CF-PEEK composites have a much higher fatigue life compared to PMMA, with delayed microcrack initiation and a lower crack propagation rate (Jindal et al., 2023). While metal implants (titanium) are advantageous due to their high yield strength, they can harbour critical areas for fatigue cracks, particularly in bone tissue, due to stress concentration around screw holes. Mechanical tests demonstrate the structural safety of the implant, while animal models are used to evaluate the implant's biological integration, osteointegration rate, and tissue response. At this stage, not only the load-bearing capacity of the implant but also the following parameters are observed histologically and radiologically:

- i) New bone formation,
 - ii) Vascularisation,
 - iii) Inflammatory response,
 - vi) Interaction of bioactive phases with bone
- are observed histologically and radiologically.

In the literature, the study by Posti and colleagues (2015) evaluating a cranioplasty implant containing glass fibre reinforced composite – bioactive glass clinically and experimentally is cited as an example. This study demonstrated that bioactive glass-enriched fibre-reinforced composites support long-term success from both mechanical and biological perspectives. In the context of regenerative cranioplasty, He and co-workers’ (2024) study reviewed regenerative implant concepts utilising bio-based polymers and bioactive phases, demonstrating that resorbable scaffolds support new bone formation in animal

models (He, 2024). Such studies are important in demonstrating the potential for implants, whose mechanical design is optimised using FEA, to adapt to load transfer scenarios that reshape over time in living tissue. These studies reveal the limitations of numerical modelling in living tissues.

5. TRIBOLOGY AND FATIGUE

Although cranioplasty is not a classic ‘joint tribology’ problem, the concept of tribology becomes important due to micro-movements, wear and tribo-corrosion in metals occurring in the implant-bone, screw-bone and screw-implant regions. Titanium and Cr-Co alloys, in particular, can cause ion release and local pH changes under repeated loads, leading to an inflammatory response in the surrounding bone tissue and loosening in the long term (Runa & Mathew, 2021). The imbalance between screw tightening torque, rigidity, and bone quality in cranial implants creates conditions conducive to micromotion in the interstitial space. FEA studies have shown that stress concentrations and contact pressures around the screws are particularly pronounced in metals with high elasticity moduli (Jindal et al., 2023). These micro-movements can result in:

- i) Fretting wear and tribocorrosion in metal implants,
- ii) Surface wear and particle formation in polymers and composites.

Polymer-based materials such as PEEK and CF-PEEK are advantageous in this regard because they do not release metal ions and do not produce tribocorrosion. However, depending on surface roughness, local damage caused during screw insertion, and bone thickness, wear products may also form in polymers. Although the results of biological studies on these particles are limited in the literature, it is appropriate to evaluate them within

a framework similar to the polymer particle-related osteolysis mechanisms familiar from orthopaedic applications. Metal ions and particles released as a result of fretting and tribo-corrosion in metal implants can lead to undesirable biological processes in surrounding tissues, such as:

- i) Macrophage activation,
- ii) Local inflammation,
- iii) Osteolysis around the implant in the long term.

Cr-Co alloys are one of the most critical groups in this regard. For these reasons, they are not currently preferred in large-surface applications such as cranioplasty (Mathew & Pourzal, 2021). Although the wear products generated in polymer-based implants are chemically inert, cellular responses related to particle size and morphology are still an active area of research. Particles formed in composite implants, where phases such as bioactive glass (BG) and hydroxyapatite (HA) are integrated into the surface, can often be considered biocompatible when they are within the appropriate size range, as they are similar in structure to the bone mineral phase (Hench, 2006; Cannio et al., 2021). Fatigue is particularly critical in screw holes, sharp geometric transitions, and thinned areas for adaptation to the skull contour. Although titanium implants stand out for their high static/dynamic strength, they are susceptible to fatigue-induced microcracks under high cyclic loads due to stress concentration around screw holes. In contrast, PEEK and especially CF-PEEK composites exhibit behaviour that delays crack propagation due to their low elastic modulus and fibre effect (Coyle et al., 2025; De Santis et al., 2021). Fibre-reinforced composite structures can now compete with metallic solutions in terms of toughness and fatigue resistance, as the fibres absorb tensile and fracture energy at the crack tip.

6. DESIGN AND OPTIMISATION STRATEGIES

The ultimate goal in cranial implant design is not merely to produce a plate that covers the defect. It is also to create a structure that improves stress distribution, reduces micro-movement and stress concentrations, and optimises material and weight. At this point, FEA is integrated into parametric design and optimisation processes in conjunction with experimental data. The Taguchi design approach allows for the systematic investigation of numerous parameters (e.g., implant thickness, material type, number of screws, screw diameter, friction coefficient of the contact area) with a limited number of experiments or analyses. Taguchi and Response Surface Methods (RSM) are widely used, particularly in optimising performance criteria such as tribological behaviour and wear rate. Dzierwa et al. (2023) optimised the effect of parameters such as load, speed, and counter material on wear behaviour in polymer-based tribological systems using the Taguchi technique. Thus, they determined the combination with the lowest friction coefficient and wear rate. A similar statistical optimisation approach can also be adapted to select suitable thickness–material–screw placement combinations in cranial implants. The number of screws and their placement regions are critical parameters in terms of both mechanical stability and surgical application time. FEA studies typically test different combinations of 3–8 screws, examining the stress distribution at the screw–bone interface and the maximum displacement of the implant. Various simulation and experimental studies report that four screws placed in appropriate positions (symmetrically positioned around the defect) can provide stability similar to six or eight-screw systems (Jindal et al., 2023; Mejía Rodríguez et al., 2024). These studies aimed to optimise both cost and surgical time. Principles to consider in screw placement optimisation:

- i) Distance of screws from the defect edge,
- ii) Cortical bone thickness and bone quality,
- iii) Implant thickness and regional rigidity,
- iv) Friction conditions on the contact surface and screw tightening torque.

Recent advances in topology optimisation and 3D printing technologies, cranial implants are now designed as hollow, biogenic lattice or cage-like reinforced structures instead of solid plates of uniform thickness. Such structures:

- i) Reduce implant mass,
- ii) Increase rigidity in selected directions,
- iii) Reduce the risk of fracture by distributing impact energy.

7. CLINICAL APPLICATIONS AND PRACTICAL APPROACHES

The clinical success of cranial implants depends not only on the mechanical and biomechanical properties of the material but also on the implant's biocompatibility, infection risk, compatibility with imaging methods, and surgical feasibility. In clinical practice, when FEA, experimental mechanical data, and sustainability principles are combined, a multidimensional decision-making process emerges that affects both the patient's quality of life and the long-term stability of the implant (Thien et al., 2015; Kayhan et al., 2024). Biocompatibility at the implant–bone interface is one of the key determinants of cranioplasty success. Although titanium implants are considered biocompatible, the rate of osseointegration may vary due to factors such as surface roughness and chemical inertness. PEEK implants, on the other hand, are chemically inert and therefore not

osseointegrating. Surface modifications (HA coating, BG coating, plasma oxidation) are applied to this material to enhance osseointegration during use (Thien et al., 2015). While the infection rate in cranioplasty operations is reported in the literature to be between 5–20%, the surface properties of the material, porosity, and surgical duration directly affect the risk of infection. PMMA may increase the risk of infection due to its porosity and heat-releasing polymerisation. Although PEEK is advantageous in terms of bacterial adhesion due to its lower surface energy, completely smooth surfaces may be prone to biofilm formation. Bioactive glasses offer a significant advantage in infection control as they can exhibit antibacterial effects through ion release (Cannio et al., 2021). Hybrid composite implants containing bioactive glass (45S5) offer superior integration potential due to their ability to form chemical bonds with bone (Posti et al., 2015). The compatibility of implants with postoperative imaging methods plays a critical role in treatment planning. While titanium implants create significant artefacts in CT and MRI, PEEK and fibre-reinforced composites are radiolucent and do not create artefacts, making them particularly preferred in oncological patients (Thien et al., 2015). Composite and bio-based implants allow for the homogeneous passage of radiotherapy beams, facilitating treatment planning. Therefore, polymer and composite implants can be considered the most advantageous group in terms of imaging compatibility. When evaluating the surgical applicability of the implant, it involves multifaceted criteria such as surgical duration, implant mouldability, ease of fixation, post-operative care, cost, and accessibility. Titanium implants are surgically practical because they can be moulded in the operating theatre. However, high cost, long production times, and the risk of artefacts constitute disadvantages. PEEK implants may be costly, despite being superior in terms of aesthetics and biomechanics. Nevertheless, with the proliferation of in-hospital 3D printer infrastructure,

PEEK production is becoming more economical and rapid. Composite implants, particularly FRC-BG systems, offer an optimised middle ground in terms of both cost and biological performance (Posti et al., 2015).

8. RESULTS

In this chapter of the book, cranial implant materials have been evaluated in terms of mechanical performance, biocompatibility, sustainability, and clinical applicability. The combined presentation of Finite Element Analysis (FEA) and experimental mechanical studies demonstrates that implant design is not merely a theoretical engineering approach but also a scientific process that directly influences clinical decisions. Although titanium provides high static strength and long-term stability, its high elastic modulus results in stress shadowing and imaging artefacts, which are significant disadvantages (Thien et al., 2015). Although PMMA has the advantage of low cost, it is secondary in modern cranioplasty due to its brittle fracture behaviour and biocompatibility limitations (Msallem et al., 2022). PEEK is highly advantageous due to its elasticity modulus close to that of bone tissue and its radiolucent properties. However, the lack of osseointegration necessitates surface modifications (Thien et al., 2015; Coyle et al., 2025). Fibre-reinforced composites (CF-PEEK, FRC-BG) stand out as the most balanced and technologically advanced solutions in terms of impact resistance, fatigue life, and osteoactivity (Posti et al., 2015; De Santis et al., 2021). Bio-based and biodegradable implants offer significant potential in terms of sustainability; however, their mechanical stability must be supported by long-term clinical data (He et al., 2024; Wang et al., 2024). FEA is an effective tool for optimising implant–bone interface stresses, screw stability, implant thickness, and topology design.

Experimental static loading, impact tests, and fatigue studies have shown high agreement with FEA outputs and supported the clinical accuracy of numerical optimisation (Jindal et al., 2023; Coyle et al., 2025). Green manufacturing techniques (particularly colloidal BG 3B printing), bio-based polymers, and Mg-based hybrid structures reduce the environmental footprint of implant materials throughout their life cycle (Dou et al., 2025; Wang et al., 2024). This demonstrates that the environmental dimension is now as important as clinical success in medical device engineering. Implant selection is a multi-dimensional decision for clinicians. The modern trend is towards composite-based solutions that are biomechanically robust, provide radiolucency, reduce the risk of infection, and are aesthetically pleasing. Overall, fibre-reinforced composites and bioactive hybrid implants appear to strike the most successful balance between mechanical performance and biological sustainability.

REFERENCES

- Cannio, M., Bellucci, D., Roether, J. A., Boccaccini, D. N., & Cannillo, V. (2021). Bioactive Glass Applications: A Literature Review of Human Clinical Trials. *Materials* (Basel, Switzerland), 14(18), 5440. <https://doi.org/10.3390/ma14185440>
- Coyle, D., Zumbo, B., Moritz, N., Frantzén, J., Aitasalo, K., Turco, G., & Kulkova, J. (2025). Impact-resistance of bio-inspired functionalized polyether-ether-ketone implant for cranioplasty. *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, 53(9), 1647–1655. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2025.06.009>
- De Santis, R., Russo, T., Rau, J. V., Papallo, I., Martorelli, M., & Gloria, A. (2021). Design of 3D Additively Manufactured Hybrid Structures for Cranioplasty. *Materials*, 14(1), 181. <https://doi.org/10.3390/ma14010181>
- Dou, Z., Li, D., Chen, K., Li, X., Ying, Q., Zhang, Y., Zheng, H., Fan, D., Jian, G., An, C., Zhang, L., Zhang, Y., Liao, J., Ren, C., Zhao, Y., Xiao, J., Chen, T., & Wang, H. (2025). Rational Design of Purely Inorganic Self-Healing Colloidal Hydrogels To Enable “Green” 3D Printing of Bioglass-Based Bone Substitutes. *ACS Nano*, 19(36), 32192-32208. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c06377>
- Dzierwa, A., Stelmakh, N., & Tikanashvili, N. (2023). Application of Taguchi Technique to Study Tribological Properties of Roller-Burnished 36CrNiMo4 Steel. *Lubricants*, 11(5), 227. <https://doi.org/10.3390/lubricants11050227>
- Haque, F., Luscher, A. F., Mitchell, K.-A. S., & Sutradhar, A. (2023). Optimization of Fixations for Additively

- Manufactured Cranial Implants: Insights from Finite Element Analysis. *Biomimetics*, 8(6), 498. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8060498>
- He, L. (2024). Biomaterials for Regenerative Cranioplasty: Current State of Clinical Application and Future Challenges. *Journal of Functional Biomaterials*, 15, 84. <https://doi.org/10.3390/jfb15040084>
- Hench L. L. (2006). The story of Bioglass. *Journal of materials science. Materials in medicine*, 17(11), 967–978. <https://doi.org/10.1007/s10856-006-0432-z>
- Jindal, P., Bharti, J., Gupta, V., & Dhama, S. S. (2023). Mechanical behaviour of reconstructed defected skull with custom PEEK implant and Titanium fixture plates under dynamic loading conditions using FEM. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 146, 106063. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106063>
- Kayhan, S., Kırmızıgöz, Ş., Kırık, A., Tehli, Ö., & İzci, Y. (2024). Revision Cranioplasty with Three-dimensional Custom-made Titanium Implants in Patients with Failed Cranioplasty. *World neurosurgery*, 191, e465–e472. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2024.08.154>
- Mani, G., Feldman, M. D., Patel, D., & Agrawal, C. M. (2007). Coronary stents: A materials perspective. *Biomaterials*, 28(9), 1689-1710. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.11.042>
- Mejía Rodríguez, M., González-Estrada, O. A., & Villegas-Bermúdez, D. F. (2024). Finite Element Analysis of Patient-Specific Cranial Implants under Different Design Parameters for Material Selection. *Designs*, 8(2), 31. <https://doi.org/10.3390/designs8020031>

- Moncayo-Matute, F. P., Vázquez-Silva, E., Peña-Tapia, P. G., Torres-Jara, P. B., Moya-Loaiza, D. P., & Vilorio-Ávila, T. J. (2023). Finite Element Analysis of Patient-Specific 3D-Printed Cranial Implant Manufactured with PMMA and PEEK: A Mechanical Comparative Study. *Polymers*, 15(17), 3620. <https://doi.org/10.3390/polym15173620>
- Msallem, B., Maintz, M., Halbeisen, F. S., Meyer, S., Sigron, G. R., Sharma, N., Cao, S., & Thieringer, F. M. (2022). Biomechanical Evaluation of Patient-Specific Polymethylmethacrylate Cranial Implants for Virtual Surgical Planning: An In-Vitro Study. *Materials*, 15(5), 1970. <https://doi.org/10.3390/ma15051970>
- Nogueira, D. M. B., Rosso, M. P. O., Buchaim, D. V., Zangrando, M. S. R., & Buchaim, R. L. (2024). Update on the use of 45S5 bioactive glass in the treatment of bone defects in regenerative medicine. *World journal of orthopedics*, 15(3), 204–214. <https://doi.org/10.5312/wjo.v15.i3.204>
- Posti, J. P., Piitulainen, J. M., Hupa, L., Fagerlund, S., Frantzen, J., Aitasalo, K. M. J., Vuorinen, V., Serlo, W., Syrjänen, S., & Vallittu, P. K. (2015). A glass fiber-reinforced composite - bioactive glass cranioplasty implant: A case study of an early development stage implant removed due to a late infection. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 55, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.10.030>
- Runa, M., & Mathew, M. (2021). Tribocorrosion aspects of implant coatings: Hip. *Tribocorrosion: Fundamentals, Methods, and Materials*, 93.
- Shash Y. H. (2024). Assessment of cranial reconstruction utilizing various implant materials: finite element study. *Journal of materials science. Materials in medicine*, 35(1), 50. <https://doi.org/10.1007/s10856-024-06816-9>

- Thien, A., King, N. K., Ang, B. T., Wang, E., & Ng, I. (2015). Comparison of polyetheretherketone and titanium cranioplasty after decompressive craniectomy. *World neurosurgery*, 83(2), 176–180. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2014.06.003>
- Vaicelyte, A., Janssen, C., Le Borgne, M., & Grosogeat, B. (2020). Cobalt–Chromium Dental Alloys: Metal Exposures, Toxicological Risks, CMR Classification, and EU Regulatory Framework. *Crystals*, 10(12), 1151. <https://doi.org/10.3390/cryst10121151>
- Vallittu, P. (2017). Bioactive glass-containing cranial implants: an overview. *Journal of Materials Science*, 52. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-0888-x>
- Wang, X., Wang, C., Chu, C., Xue, F., Li, J., & Bai, J. (2024). Structure-function integrated biodegradable Mg/polymer composites: Design, manufacturing, properties, and biomedical applications. *Bioactive Materials*, 39, 74-105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2024.05.024>

TÜRKİYE’DE ELEKTRİKLİ ARAÇ EKOSİSTEMİ

Hüseyin GÜRBÜZ¹

1. GİRİŞ

Son yıllarda geleneksel motorlu araçlardan Elektrikli araçlarda (EA) geçiş dünya ölçeğinde pozitif yönde ivme kazandı. İklim değişikliği ile mücadele etmek için en önemli ayaklarından olan fosil yakıtlı araçların kullanımını azaltmak önemli bir seçenek karşımıza çıkmaktadır. Avrupa birliği ülkelerinin genelinde 2030 ve 2035 yılları sonrası içten yanmalı motorlu araçların üretimi ve kullanımı ciddi oranlarda kısıtlanması planlanmaktadır. Hükümetler de bu kısıtlamayı hızlandırmak ve kolaylaştırmak için teşvikler vermektedir. İçten yanmalı motorlu araç kaynaklı zararlı emisyonlar ile mücadele etmek için elektrikli araçlar verilen teşvikler çok önemli olsa da araç tasarımı, teknolojik yenilik sunması ve şarj alt yapısı çok daha önemli cazip gelmektedir. Avrupa’da kamu kurumlarının, Temiz Araçlar Direktifi (Clean Vehicles Directive) ile elektrikli araçların kullanımını yaygınlaşması için elektrikli araçların satın alması teşvik edilmektedir. Dolayısıyla araç üreticileri de çeşitli tasarımsal yenilikler sunarak elektrikli araç ekosistemini güçlendirmektedir.

Elektrikli araçlar sıvı ve gaz yakıtlı araçlardan ayıran en önemli yanı bu yakıtlara muhtaç olmaması ve elektrik motoru ve batarya teknolojisi olarak ifade edilebilir. Elektrikli araçların ana taşıt özellikleri içten yanmalı motorlu araçlar ile aynı olmasına

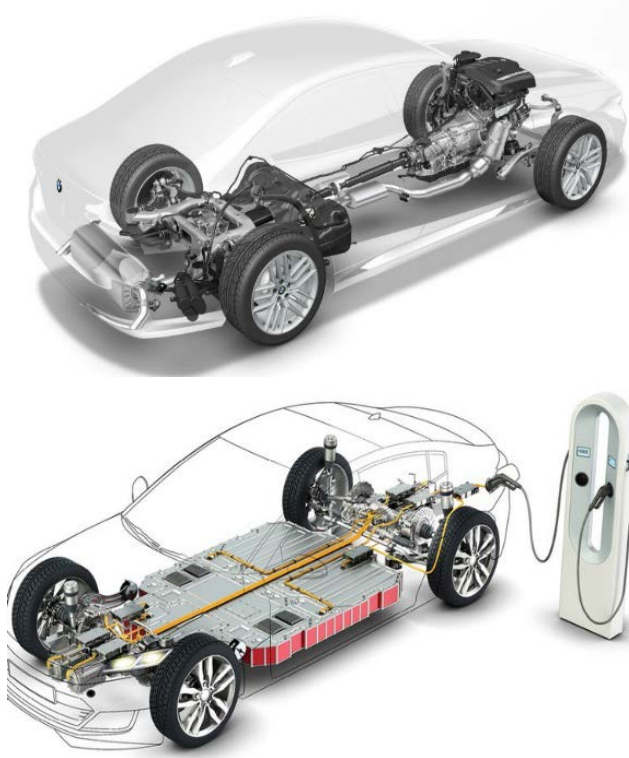
¹ Doç. Dr., Şırnak Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-3561-7786.

rağmen dijitalleşme ve elektronikleşme özellikleri açısından oldukça farklı olanaklar sunmaktadır. Ayrıca bu araçlar tam elektrikli (Şarj edilebilir) ve hibrid araçlar olarak seçenek sunmaktadır. Hibrit araçlar seri paralel ve yakıt hücresel araçlar olarak çeşitli seçenekleri bulunmaktadır (Renewable Energy, 2020).

Elektrikli araçlar %100 olarak elektrikli olması, elektrik motorun ihtiyacı olan elektriği sadece şarj edilebilir bataryadan sağlaması anlamına gelmektedir. Sıfır emisyonlu olan bu araçlar batarya teknolojisinin sunduğu imkanlar doğrultusunda menzile sunmaktadır. Hibrid araçlar ise içten yanmalı bir motor ile doğrudan aracı hareket ettirme veya bataryayı besleme maksatlı kullanılmaktadır. Aynı zamanda plug-in hibrid araçlarda mevcuttur. Bu araçlar içten yanmalı motorun bataryayı şarj etmesinin yanı sıra prize takılarak da bataryayı şarj edebilmektedir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN İÇTEN YANMALI MOTORLU ARAÇLARLA KIYASI

Dizel ve benzinli motorlu araçlar petrol türevli sıvı yakıt kullanırlar. Elektrikli motorlar ise elektrik motoru kullanırlar. Elektrik motorları besleyen yüksek kapasiteli bataryalar kullanır. En belirgin farkı Şekil 1 de görüldüğü üzere içten yanmalı motor ve sıvı yakıt deposu ile elektrikli motor ve batarya kullanımındır. İçten yanmalı motorlara sahip binek araçların yakıt tankını doldurmak için 3 ile 4 dakika yeterli iken, aynı güçteki tam elektrikli bir aracın bataryasını tamamen doldurmak için ev şebekesi (220 Volt) ile yaklaşık 10 saat ve 420 V şarj istasyonu ile yaklaşık 30 dakika da dolmaktadır. Bunun yanı sıra, deposu dolu bir konvansiyonel motorlu aracın menzili, bataryası tam dolu elektrikli araçların menziline çok daha uzundur.



Resim 1. Elektrikli araç ve içten yanmalı motorlu araç

Elektrikli Aracın (EA) performansı ve elektrik motorunun verimi İçten Yanmalı Motorlu araçlara göre daha yüksektir. Ayrıca, bakım maliyetlerinin minimuma inmesinin nedeni olan elektrikli araçların daha az hareketli parçası olması ile düşük bakım maliyetleri ve elektrikli araçların sağladığı sessiz sürüş konforu kullanıcılar için cazip hâle gelmektedir.

İklim değişikliği ve atmosfer kirliliği ile mücadele sera gazı emisyonlarının azaltılması çok önemlidir. Sera gazları arasında en önemlileri NO_x ve CO₂ gazıdır. Atmosferin kirlenmesinin azaltılması bu zararlı emisyonların azaltılması ile mümkündür. İçten yanmalı motorlu araçlar petrol türevi yakıtlar kullandığı için egzoz gazından HC, C, CO, CO₂, NO_x Partikül madde ve kükürt bileşenleri gibi zararlı emisyonları atmosfere salmaktadır.

Elektrikli araçlar temiz enerji kullandığı için bu zararlı emisyonları yaymazlar. Böylelikle karbon salınımının büyük bölümünün nedeni ulaşım kaynaklı olduğu için EA'lerin yaygınlaşması ile önemli oranda azalacaktır. Fakat elektrikli araçların ihtiyaç duyduğu elektriğin yenilebilir enerji kaynağı ile elde edilmesi çok önemlidir. Fakat Batarya üretiminden gelen toplam CO₂ miktarı EA'ların %100 temiz enerjili araç imajını olumsuz etkilemektedir. Yapılan araştırmalar, batarya üretiminde her 1 kilovat-saatlik (kWh) kapasite için yaklaşık 150 kilogram karbondioksit (CO₂) emisyonu meydana geldiğini göstermektedir. Ortalama bir elektrikli aracın, şarjlar arasında makul bir menzile (yaklaşık 500 km) ulaşabilmesi için en az 60 kWh'lık bir batarya kapasitesine ihtiyaç duyduğu göz önüne alındığında, bu yalnızca batarya üretimi sürecinde yaklaşık 9 ton ek CO₂ salımı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, bir elektrikli aracın toplam üretim sürecinde ortaya çıkan CO₂ emisyonu 16 ile 19 ton arasında değişmektedir. Fakat güneş paneli ve rüzgâr türbini ile üretilen elektrik kWh başına saldığı CO₂ (36 gr) miktarı çok düşük seviyelerde olduğu için insan ve çevre sağlığı için olumsuz etkisi oldukça azdır (EPA, n.d.).

3. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE ŞARJ İSTASYONU

Elektrikli araçların menzil batarya gücüne bağlı olarak değişmektedir. EA'larda hem motor hem de batarya seçenekleri oldukça çoktur. Böylelikle bir markanın bir modelinde çok sayıda seçenek sunulabilmektedir. Tablo 1'de batarya gücü ve yol verilerine göre ortalama menzili verilmiştir (Electric Vehicle Database, 2025). Tablo incelendiğinde batarya gücüne bağlı olarak menzil artmaktadır. Fakat bazı marka modellerde rejeneratif şarj sistemleri olduğu için batarya gücü küçük olsa da menzil daha uzun olabilmektedir.

Tablo 1. Bazı elektrikli araç markalarının batarya gücü ve gidebileceği menzil

Marka Model	Batarya Gücü, kWh	Menzil, km
Lucid Air Grand Touring	123	720
Mercedes-Benz EQS 450 4MATIC	118	655
BMW iX3 50 xDrive	109	610
TOGG T10F Long Range RWD	88	600
Audi A6 Sportback e-tron performance	95	600
Tesla Model S AWD	95	590
Volvo ES90 Twin Motor Performance	102	530
TOGG T10X Long Range RWD	88	520
Hyundai IONIQ 9 Long Range RWD	106	500

Elektrikli araçların yaygınlaşması ve işlevini gerekli ölçülerde yapabilmesi için şarj istasyonu alt yapısına ihtiyaç vardır. Bu altyapıyı sıvı yakıt istasyonları ağı kullanılarak yapılarak bir gelişim hızı sağlanabilmektedir.

Elektrikli araçlar ve gerekli şarj altyapısı birbirlerini tamamlayıcı bir ağ ekonomisini oluşturmaktadır. Fakat elektrikli araçların zararlı emisyonlar ve bu emisyonların zararları ile mücadele etkin rol oynayacağı düşünüldüğü için tüm dünyada şarj alt yapısının daha hızlı yayılması politikaları güdülmektedir. Bu yayılma ile ülkelerin karbon salınımını azaltma hedeflerine ulaşmasında etken faktör olmaktadır. Elektrikli araçlar ile şarj istasyonu paralel bir şekilde birbirini destekleyici şekilde gelişme göstermesi kullanıcı içinde teşvik edici durum olmaktadır. Şarj istasyonu sayının kritik eşiğe ulaşmadığı sürece elektrikli araç sayısı da istenilen düzeyde olmamaktadır (Zhou & Li, 2018). Elektrikli araç ekosisteminin gelişmesi şarj istasyonu pazarının gelişmesini sağlamaktadır.

Elektrikli araçların yayılması, elektrikli araç ekosisteminin oluşması ve kolay ulaşabilir olması ile hızlanacaktır. Kullanıcının, evde, ofiste ve iş yerlerinde bireysel ticari olmayan şarj alt yapısına sahip olması veya ortak kullanım imkanına ulaşması EA'ların kullanımını teşvik edecek önemli

motivasyon olmaktadır (Hardman et al., 2018). Kullanıcılar bireysel arazilerde Şekil 2 'de gösterildiği gibi kuracakları park alanı ve şarj istasyonu aynı anda kullanımı, kullanıcının farklı bir motivasyonu haline gelmiştir. Bireysel ve ortak kullanım şarj istasyonlarında Alternatif akım (AC) şarj yöntemi ile çalışmaktadır. Avrupa kıtasında 240 volt şebeke gücüne bağlı olarak kullanılmaktadır. Araçlar kendi inverteri (dönüştürücü) ile AC'yi doğru akıma (DC) dönüştürerek şarj olmaktadır.

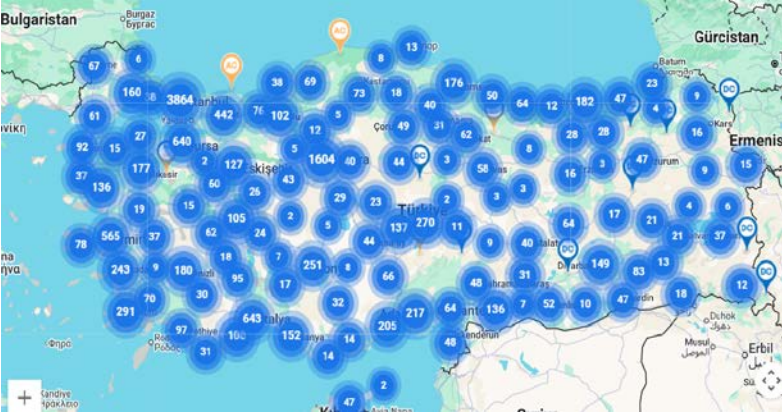


Şekil 2. Güneş paneli destekli park şarj istasyonu

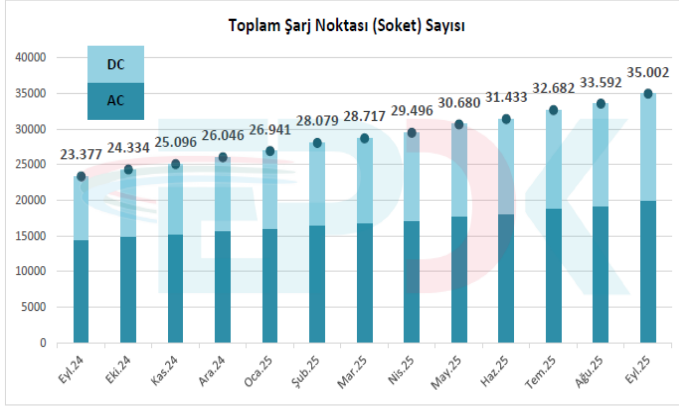
Ticari şarj istasyonlarında doğru akım (DC) yöntemi kullanılmaktadır. Şarj istasyonları şebekeden aldıkları AC akımı DC akıma dönüştür ve 50 kW, 150kW, 350 kW ve 420 kW güçte ve ara güçlerde hızlı şarj imkânı sunmaktadır. Hızlı şarj istasyonlarının büyük güçlerde olması ve birçok aracın aynı anda şarj olması şebekeye ayrıca belirli bir yük bindirmektedir. Bu neden dolayı ticari şarj istasyonlarının konumu şarj taleplerinin yoğun olduğu bölge ve saatleri gözетerek alt yapıya uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir. Ticari yüksek hızlı şarj istasyonlarının maliyetleri şarj istasyonlarının sayısını ve konumunu da etkilemektedir. Şarj istasyonlarını kullanıcı kendisi deneyimlese de bakım, onarım, sigorta giderleri internet bağlantıları ve ödeme sistemleri kurulum maliyetlerini etkilemektedir (Köksal, Ardiyok, & İkiler, 2024; Lee & Clark,

2018). Bu maliyetler ve bölgenin alt yapı şartları şarj istasyonlarının daha ulaşılabilir ve korunaklı alanlarda konumlandırmasını tercih ettirebilmektedir.

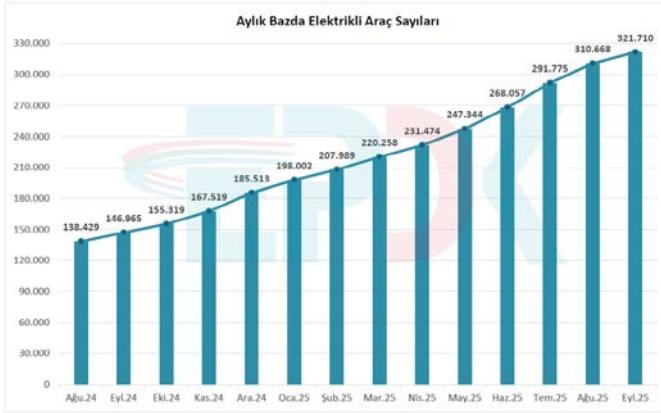
Şekil 3'te Türkiye'nin 2025 Ekim ayına ait TOGG-TRUGO, ZES, Voltur ve Tesla gibi en çok tercih edilen şarj istasyonu markaların da yer aldığı yaklaşık 185 farklı markanın Türkiye şarj istasyonları yoğunluk haritası gösterilmiştir (Charge IQ, 2025). Şekil 4'te görüldüğü üzere EPDK verine göre Türkiye geneli Eylül 2025 tarihi itibarı ile 35.000 adet şarj noktası (soket) seviyesine, Şekil 5'de gösterildiği üzere elektrikli araç sayısı da 321.710 adet seviyelerine ulaşılmıştır (EPDK, 2025). Bu şarj soketlerinin 19.992'si daha düşük hız sunan AC portlardan oluşuyor. 15.010 adet ise hızlı şarj imkânı sağlayan DC soketlerden oluşuyor. Mevcut araç elektrikli araç sayısı dikkate alındığında, yaklaşık her 9 araca 1 şarj soketi düşüyor. Bu durumda şarj noktası ve elektrikli araç sayıları 1/10 kritik seviyesinin aşmış olduğu görülmektedir (Çakmak & Turan, 2022).



Şekil 3. 2025 Ekim ayına ait şarj istasyonları yoğunluk haritası



Şekil 4. Aylık bazda son bir yılın şarj soket sayıları

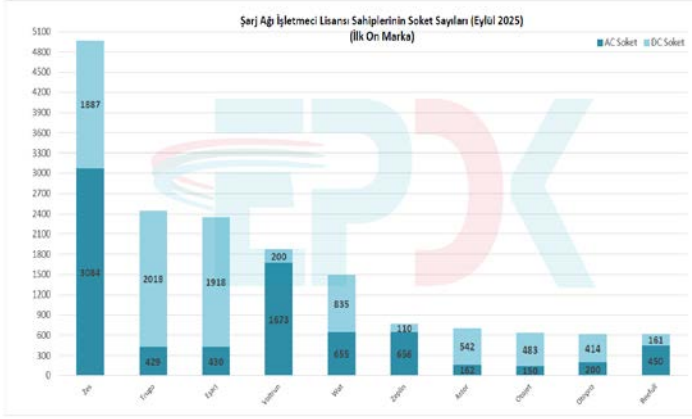


Şekil 5. Son bir yılın aylık bazda elektrikli araç sayıları

EA'lerin sayısı Şekil 5'de görüldüğü üzere son bir yıla içinde yaklaşık %133 oranında artış meydana gelmesi, Türkiye'de TOGG başta olmak üzere elektrikli araçların hızla ilgi odağı olduğunu göstermektedir. Bu yönelimin artmasında şarj istasyonlarının yaygınlaşmasının etkisi çok fazladır. Toplam şarj noktası ağının etkili seviyede olduğunu göstermektedir.

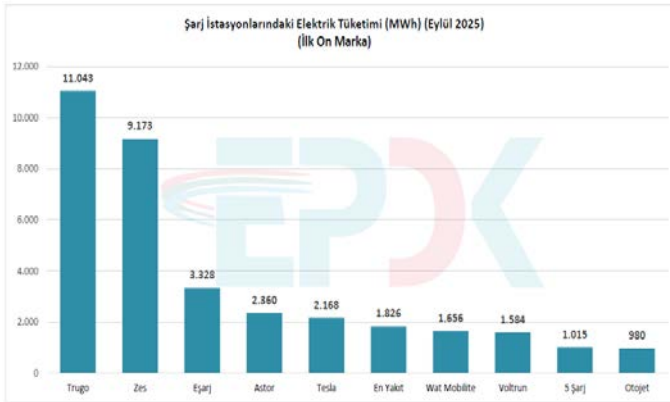
Türkiye'de en çok görülen şarj istasyonu markalarının AC ve DC soket sayıları Şekilde 6'da verilmiştir. Bu grafiğe göre toplamda 4971 soket sayısı ile ZES birinci, 2447 soket sayısı ile

TRUGO ikinci ve 2348 soket sayısı ile EŞARJ üçüncü sıradadır (EPDK, 2025).



Şekil 6. Türkiye’de ilk on markanın AC ve DC şarj soket sayısı

Şekil 7’de ilk ondaki şarj istasyonu markalarının elektrik tüketimi gösterilmiştir (EPDK, 2025). Grafiğe göre en fazla elektrik tüketen şarj istasyonu TOGG markasının ürünü olan TRUGO şarj istasyonları olarak göze çarpmaktadır. Elektrik tüketimi TRUGO %23.53 ile en fazla paya sahiptir. Bu tüketim, Türkiye’de en fazla elektrikli aracın TOGG olduğun ve TRUGO şarj istasyonlarının da güvenin fazla olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 7. Şarj istasyonların markalara elektrik tüketimi

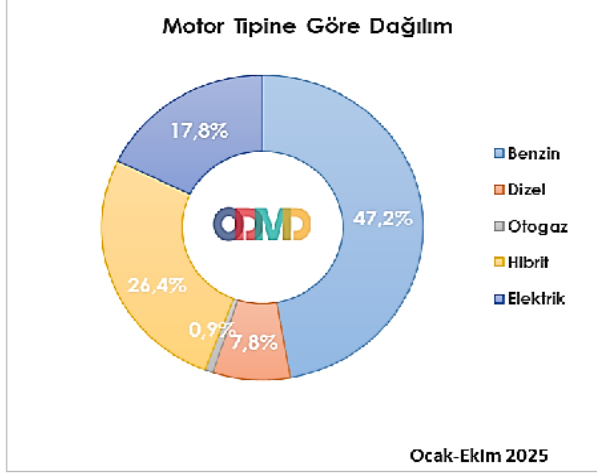
4. ELEKTRİKLİ ARAÇ EKOSİSTEMİNDE PAZAR PAYI VE YEDEK PARÇA

Geleneksel motorlu araçlarda yaklaşık 20 bin çeşit parça bulunmaktadır. Bu parçaların birçoğu içten yanmalı motorun verimli şekilde çalışmasını sağlayacak yakıt sistemi, soğutma sistemi, egzoz sistemi parçaları ve bunları destekleyici sensörler takımı oluşturmaktadır. Bu araçlar ile EA'ler arasında motor aksamı ve ilgili parçaları haricinde taşıt kısmı neredeyse aynı teknolojidir. Parça tedariki aynı aşamalardan evrilmektedir. Türkiye'de EA'lerin satışı ve trafikteki EA'ların sayısı belirgin hızla artmaktadır. Son verilere göre 2024 yılında toplam araç satışının %35'i hibrit elektrikli ve elektrikli araç satışı oluşturmaktadır. Bu oranın gelecek yıllarda kısa vade için çok daha artacağı öngörülmektedir.

Türkiye; stratejik konumu nedeniyle, bünyesinde bulundurduğu uluslararası markalara ait otomotiv fabrikaları ve bu fabrikaların ihtiyacı olan gelişmiş tedarik zinciri altyapısı, yedek parça kalitesinde standartlar kaliteye ulaşması ve rekabetçi maliyet avantajları gibi faktörlerin etkisiyle önemli bir üretim üssüdür. Türkiye hafif ticari araç, otomobil, ağır iş makineleri üretimi iç pazar talebinin yanı sıra ihracat taleplerini de karşılamaktadır. Uluslararası alanda Türk otomotiv endüstrisinin rekabet gücü, yüksek kalite ve üretim kabiliyetleri ile oldukça güçlenmektedir.

Türkiye otomotiv endüstrisi en fazla ihracat gerçekleştiren endüstrisidir. Otomotiv endüstrisi 2023 yılında 35 milyar \$'lık ihracat gerçekleştirilmiştir. Bu ihracatın içinde EA'ların payı yıllar içinde artmaktadır. Türkiye'de 2025 Ekim yılı otomobil pazarı %19.87 oranında artış sağlamıştır. Bu artışın motor tipine göre Şekil 8'de Pazar payı gösterilmiştir. Bu verilere göre doğrudan elektrikli araçların 2025 yılı Ocak-Ekim ayları arası pazar payı diğer tipli motorlara göre %17.80 oranında

gerçekleşmiştir (Erce, 2025). Motor tipine göre Ekim 2024 tarihi ile Ekim 2025 tarihlerinin satış durumları karşılaştırıldığında Tablo 2’de görüldüğü gibi doğrudan elektrikli araçlarda da hibrit elektrikli araçlarda önemli oranlarda artış meydana gelmiştir (Erce, 2025).



Şekil 8. Ocak- Ekim 2025 tarihleri arası araç satış oranları

Tablo 2. Ekim 2024 ile Ekim 2025 tarihlerinin araç satış içinde elektrikli araçların oranı

MOTOR TİPİ	Ekim 2024		Ekim 2025		Değişim
	Adet	Pay	Adet	Pay	
Benzin	44.637	59,0%	47.561	52,4%	6,6%
Dizel	5.787	7,6%	6.106	6,7%	5,5%
Otogaz	315	0,4%	950	1,0%	201,6%
Hibrit	16.017	21,2%	21.555	23,8%	34,6%
Hibrit	3.937	5,2%	6.783	7,5%	72,3%
Plug-In Hibrit	1.757	2,3%	1.309	1,4%	-25,5%
Mild Hibrit	10.323	13,6%	13.463	14,8%	30,4%
Elektrik	8.906	11,8%	14.523	16,0%	63,1%
Saf Elektrik	8.341	11,0%	14.427	15,9%	73,0%
Uzatılmış Menzil	565	0,7%	96	0,1%	-83,0%
Toplam	75.662	100%	90.695	100%	19,9%

5. SONUÇ

Elektrikli araç ekosistemi Türkiye için ilk yerli marka olan TOGG ile yerleşik hayata geçmesi hızlandı. T10X modeli ile elektrikli araç dünyası ile daha fazla hemhal olan Türkiye, milli duygular ile elektrikli araçları meyli beklenenden daha hızlı oldu. İçten yanmalı motorlu araçlar ile karşılatırıldığında geleneksel motorların ve bununla beraber yakıt sistemi, soğutma sistemi, egzoz sistemi ve diğer destekleyici sistemlerinin kaldırılması ile daha sorunsuz ve arızasız bir otomotiv ekosistemi ile elektrikli araçların daha fazla kabul sürecine girmiştir.

Elektrikli araçlar ile sıfır emisyon hedeflerine bir adım daha yaklaşmıştır. İçten yanmalı motorlu araçların yaydıkları zararlı emisyonları oldukça azaltsa da sıfırlanması anlamına gelmemektedir. EA'lar için gerekli olan elektriğin üretilme şekline göre emisyon değerleri de değişmektedir. Elektrik, yenilenebilir enerji kaynakları ile üretildiğinde sıfır emisyonlu araç olarak kabul edilebilir değerlerde emisyonlar üretir. Ancak fosil kaynaklı yakıtlar ile elektrik üretildiğinde emisyon değerleri istenilen düzeylere gelmemektedir. Bu sebeple elektrikli araçların asıl hedef için önemli bir eşik olmasından dolayı yaygınlaşması için önemli bir teşvik olarak görülmektedir.

Elektrikli araç ekosisteminin en önemli parçası bataryalar ve şarj istasyonlarıdır. Elektrikli araçların menzil sorunu batarya kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Son yıllarda batarya boyutu ve ağırlığı fazla değişmeden batarya kapasitesinin artması ile araç menzilleri bir 650 km seviyelerine ulaşmıştır. Fakat daha fazla menzil için şu an ki teknoloji ile batarya boyutu ve ağırlığı da paralelinde artmak durumundadır. Bu durum EA'ların kendine has bir ekosistem oluşturmaktadır. Şarj istasyonları bu ekosistemin yerleşik hale geçmesi ve elektrikli araçların yaygınlaşmasının önünde iki seviye sorun olarak durmaktadır. Türkiye olarak elektrikli araçların artış hızına bağlı olarak

elektrik şarj soketi artmaktadır. Büyük şehirlerde yoğunlaşmış olsa da Türkiye geneli birçok rotada istasyon bulunmaktadır. Türkiye’de Ekim 2025 tarihi itibari ile 321 bin EA varken, 35 bin de şarj soketi bulunmaktadır. Böylelikle 10 araca bir şarj soketi düşmesi kritik oranı geçilerek yaklaşık 8 araç için bir şarj soketi düşmektedir.

Bu ihracatın içinde EA’ların payı yıllar içinde artmaktadır. Türkiye’de 2025 Ekim yılı otomobil pazarı %19.87 oranında artış sağlamıştır. Bu verilere göre doğrudan elektrikli araçların 2025 yılı Ocak- Ekim ayları arası pazar payı diğer tipli motorlara göre %17.8 oranında gerçekleşmiştir. Bu veriler gösteriyor ki Elektrikli araçların ekosistemi Türkiye için kritik eşiği geçmek üzeredir. 2030 yılında dünya genelinde yaklaşık olarak 40 milyon adet elektrikli araç satışı olacağı düşünülmektedir. Sadece Türkiye’de bu tarihlerde 2 milyon elektrikli araç olacağı söylenebilmektedir.

KAYNAKÇA

- ChargeIQ. Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Haritası n.d.
<https://www.chargeiq.com.tr/tr/sarj-istasyonu-haritasi>
(accessed November 6, 2025).
- Çakmak R, Turan A. Türkiye’de İller Bazında Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Altyapısı: Ölçevler Aracılığıyla Analizi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi 2022;12:246–68.
<https://doi.org/10.31466/kfbd.1029677>.
- Electric Vehicle Database. Range of full electric vehicles cheatsheet 2025. <https://ev-database.org/cheatsheet/range-electric-car> (accessed November 6, 2025).
- EPA USEPA. Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle n.d.
<https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle> (accessed November 6, 2025).
- EPDK. Şarj hizmeti piyasası aylık istatistikleri Eylül 2025. Ankara: 2025.
- Erce H. ODMD Basın Bülteni Kasım 2025. 2025.
- Hardman S, Jenn A, Tal G, Axsen J, Beard G, Daina N, et al. A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. Transp Res D Transp Environ 2018;62:508–23.
<https://doi.org/10.1016/J.TRD.2018.04.002>.
- Lee H, Clark A. Charging the Future: Challenges and Opportunities for Electric Vehicle Adoption. SSRN Electronic Journal 2018.
<https://doi.org/10.2139/SSRN.3251551>.

Makalesi A, Köksal E, Ardiyok Ş, İkiler B. Türkiye’de Elektrikli Araçlar için Şarj Altyapısı Nasıl Yaygınlaşır? Ekonomi-Tek 2024;13:84–121.

Renewable Energy office of EE. Electric Vehicle Basics. 2020.

Zhou Y, Li S. Technology Adoption and Critical Mass: The Case of the U.S. Electric Vehicle Market. J Ind Econ 2018;66:423–80. <https://doi.org/10.1111/JOIE.12176>.

AN INTRODUCTORY ASSESSMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MECHANICAL ENGINEERING: APPROACHES, APPLICATIONS, AND FUTURE DIRECTIONS

Paşa YAMAN¹

1. INTRODUCTION

Mechanical engineering (ME) education is undergoing a fundamental change fueled by the rapid development of artificial intelligence (AI) and data-centric engineering techniques. In the past, ME curricula emphasized analytical modeling, physical testing, and deterministic reasoning grounded in mathematical formulas. Today, with the advent of Industry 4.0 and cyber-physical manufacturing systems, engineers regularly interact with intelligent machinery, sensor-rich environments, and autonomous systems. These innovations demand that mechanical engineers expand their skill set to include not only traditional engineering fundamentals but also computational intelligence, algorithmic reasoning, and data-informed decision-making (Akolekar et al., 2025; Kocsis et al., 2025; Rani et al., 2025).

Around the world, universities are incorporating AI concepts into design courses, robotics labs, and simulation-based learning environments. AI tools such as machine learning-driven design optimization, deep learning-based defect detection, and natural language coding assistants are now accessible even to undergraduates. Additionally, AI-powered platforms allow instructors to automate assessments, tailor learning materials, and

¹ Research Assistant, Kırklareli University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, ORCID: 0000-0003-2079-5800.

pinpoint student learning challenges in real time (Arslan et al., 2024; Zhang et al., 2025).

In this context, adding AI to ME education is now a necessity for graduates to remain competitive in contemporary engineering. This chapter covers fundamental technical concepts, pedagogical considerations, application domains, ethical concerns, and future outlooks of AI in ME education. Its purpose is to provide instructors, curriculum designers, and academic institutions with a structured guide for responsible and effective AI inclusion.

2. FUNDAMENTALS OF AI FOR ENGINEERING

Artificial intelligence encompasses a wide field of algorithms and computational models that allow machines to perceive, analyze, learn from, and interact intelligently with data. For students in mechanical engineering, mastering AI does not demand extensive computer science knowledge; rather, it requires understanding the fundamental principles that impact real-world engineering systems (Collins et al., 2021).

Machine learning (ML) involves teaching computers to identify patterns in data rather than relying solely on explicitly programmed rules. In mechanical engineering, ML is increasingly employed to forecast material behaviors, detect anomalies in rotating machinery, predict energy consumption, and facilitate predictive maintenance. Supervised learning techniques, such as decision trees, support vector machines, and random forests, are utilized when labeled datasets are available. Unsupervised methods, like k-means clustering, are used to uncover hidden structures within data, such as grouping similar manufacturing defects (Benhanifia et al., 2025; Chen et al., 2021; Mohammed & Ismail, 2021).

Deep learning (DL) employs layered artificial neural networks to identify complex, highly non-linear patterns. It proves particularly effective with image-related or high-dimensional engineering datasets, including SEM micrographs, infrared thermography, vibration spectrograms, and fluid flow visualizations. Convolutional neural networks (CNNs) automatically extract visual features, which aid in manufacturing defect detection and microstructural analysis. Recurrent neural networks (RNNs) and transformer models are suited for analyzing time-dependent phenomena like thermal cycling and system dynamics (Edmunds & Thomas, 2025; Palma-Ramírez et al., 2024; Qin et al., 2022).

Natural language processing (NLP) helps understand and produce human language. In engineering education, NLP is applied to assess student reports, translate technical texts, extract equations, and support code debugging. Large language models (LLMs) facilitate conversational exchanges and offer instant explanations of engineering ideas (Ayaan & Ng, 2025; Bernabei et al., 2023; Lee et al., 2024).

Reinforcement learning (RL) involves training agents to identify optimal actions through repeated interactions with their environment. In mechanical engineering, RL finds use in robot navigation, automated manufacturing, dynamic process adjustments, and smart climate control systems. Its educational value lies in offering hands-on, simulation-based experiences where learners can see how systems respond to different control approaches (Ravi, 2025; Vespoli et al., 2025).

Expert systems encode human knowledge in rule-based structures. Although older than machine learning and deep learning, they remain vital in engineering design automation, process planning, and troubleshooting. They assist students in understanding logical reasoning and structured decision-making.

Together, these AI foundations form the basis for integrating AI into mechanical engineering classroom activities, laboratory experiences, and project-based learning.

3. APPLICATIONS OF AI IN MECHANICAL ENGINEERING

AI applications in ME education go beyond simple computational tools; they transform how students understand engineering systems, analyze data, and develop solutions. The following sections demonstrate how AI improves vital areas of ME education.

AI-enabled generative design tools enable students to automatically explore thousands of design variations, taking into account constraints such as strength, weight, manufacturability, and material efficiency. This empowers students to move from traditional “design by intuition” to “design by optimization.” In CAD education, AI-powered assistants verify geometrical constraints, identify potential assembly problems, and offer real-time suggestions to enhance manufacturability. In CAM education, machine learning algorithms refine tool paths, surface finishing techniques, and feed/spindle speeds. As a result, students develop a deeper understanding of modern intelligent machining systems employed in advanced manufacturing (Münker & Schmitt, 2022; Rangasamy & Yang, 2025).

AI improves our grasp of the fundamental relationship between structure, properties, and process in materials engineering. It enables the classification of microstructures, prediction of hardness or tensile strength, estimation of porosity, and optimization of process parameters for casting, welding, and additive manufacturing. For instance, deep learning models can analyze micrographs to determine grain size, alleviating manual efforts for students and supporting larger experiments. In additive

manufacturing, AI forecasts how factors like layer thickness, exposure time, resin viscosity, or powder composition influence the quality of the final product. These insights deepen students' understanding of parametric sensitivity in fabrication (Durmaz et al., 2021; Johnson et al., 2020; Liu et al., 2024; Tan & Spear, 2024).

Finite element analysis (FEA) requires substantial computational effort, particularly when dealing with nonlinear or multiphysics scenarios. Artificial intelligence-driven surrogate models enhance the speed of simulations, enabling students to carry out real-time design modifications. These machine learning models can estimate stress patterns, displacement fields, or potential failure points with considerably less computational demand. Students have the opportunity to compare AI-generated predictions with traditional FEA results, thereby deepening their comprehension of both numerical techniques and the constraints inherent in surrogate AI models (Huang et al., 2025; Shao et al., 2023; Suttakul et al., 2024).

AI enhances simulation and experimentation in these domains through real-time prediction of heat flow or pressure distribution in complex geometries; intelligent sensor fusion for thermal or flow experiments; data-driven modeling of heat exchangers, combustion systems, or pumps; AI-driven CFD acceleration techniques (reduced-order modeling). These applications make traditionally abstract concepts more observable and interactive for learners (Cortvriendt et al., 2025; Etminan et al., 2025; Petrich et al., 2021; Wang et al., 2025).

Robotics education significantly benefits from artificial intelligence. Vision-based navigation, object detection, and path planning depend heavily on machine learning and deep learning techniques. Reinforcement learning offers an experimental platform for students to test control algorithms in virtual or

physical robots. Additionally, control systems education is enhanced through AI-driven PID tuning and predictive control strategies, which highlight the limitations of traditional linear control methods (Fombona et al., 2025).

4. ETHICAL CONSIDERATIONS

Integrating AI into ME education introduces ethical and operational challenges that require meticulous planning and policy formulation.

AI tools now have the ability to produce highly polished assignments, lab reports, design projects, and coding solutions that may appear technically sound at first glance but conceal a lack of genuine understanding from the student. These tools can automatically generate equations, create simulation plots, perform finite element analysis, and even produce experimental datasets that seem plausible enough to pass superficial inspection. Sometimes, students rely on AI not just to complete their tasks but also to craft elaborate explanations or justifications for results they haven't actually obtained or verified themselves. This presents a significant challenge in courses where deep conceptual thinking, hands-on experimentation, and iterative problem-solving are essential components of learning. AI may also be used to “rationalize” or explain outputs from simulations or experiments that the student neither understands nor can reproduce, leading to a disconnect between reported work and actual skills. As a result, traditional assessment methods, specially those reliant solely on written submissions or automated grading, are no longer sufficient to ensure academic integrity or the development of core engineering competencies. Educators must adapt their approach by incorporating assessment elements that make it more difficult to rely on AI-generated content without comprehension. These could include structured oral examinations

where students verbally explain their methodology, interpret key results, or derive fundamental equations; process documentation such as design logs, simulation records, and step-by-step reasoning notes that demonstrate the student's actual workflow; and verification checkpoints where students reproduce parts of their analysis under supervision. By integrating these methods into mechanical engineering courses, instructors can more accurately determine whether students truly grasp the fundamental principles and can apply them independently to new or complex problems. Ultimately, rethinking assessment strategies is vital to maintaining the rigor of engineering education while responsibly enabling the beneficial use of AI tools (Balalle & Pannilage, 2025; Fan et al., 2025).

Many AI systems, especially deep learning models, function as “black boxes,” producing outputs that do not reveal the intermediate reasoning, mathematical structure, or decision pathways leading to those results. While this opacity might be acceptable in some consumer applications, it poses a significant challenge in engineering education—which depends on clear logical derivation, transparent reasoning, and strong physical intuition as the foundation of meaningful learning. When students rely on AI-generated predictions without understanding the underlying principles, they risk developing only superficial familiarity with engineering problems instead of the analytical depth required for real-world practice. In fields like mechanics, thermodynamics, finite element analysis, or fluid dynamics, results must always be grounded in fundamental laws of physics, conservation principles, and domain-specific constraints. Black-box AI systems can sometimes produce outputs that appear plausible numerically but are physically impossible, such as stress fields that violate equilibrium or flow predictions that break continuity or energy conservation. Without proper training in critical evaluation, students might accept these outputs

uncritically, assuming correctness because they seem professional or computationally advanced. To address this, engineering students need explicit instruction on scrutinizing AI-generated results. This includes systematically verifying outputs against known boundary conditions, material laws, dimensional consistency, and expected qualitative behavior. Students should also be encouraged to validate AI predictions through analytical approximations, simplified calculations, or controlled experiments when feasible. Including comparison exercises, where students contrast AI solutions with classical methods, can help identify inconsistencies or limitations. By fostering a culture of skepticism, verification, and physics-informed reasoning, educators ensure AI functions as a tool that enhances, not replaces, engineering judgment. Cultivating these habits preserves the integrity of engineering education and prepares students to use AI responsibly in their careers, where unverified results could have serious consequences (Song & Zhang, 2025).

AI-driven learning analytics systems continually collect and analyze a wide range of student data including quiz scores, assignment submission patterns, attendance and participation rates, time spent on digital platforms, and detailed behavioral metrics such as clickstream logs or navigation paths through course materials. While these data streams can offer valuable insights into student learning processes by helping instructors identify misconceptions, customize instruction, or detect early signs of academic difficulties, they also raise important ethical and legal concerns around data privacy, ownership, and informed consent. Educational institutions have a duty to ensure that all collected data are stored, processed, and shared in strict accordance with national data protection laws and international privacy standards. Sensitive student information must be protected through secure data management practices, including encryption, restricted access, and clear data retention policies.

Furthermore, using AI for educational monitoring requires transparency: students must be fully informed about what data is being gathered, how it will be used, who will have access, and their rights to delete or correct their information. Without this transparency, learning analytics can erode trust and provoke concerns about surveillance or unfair profiling. By establishing robust data governance frameworks and maintaining open communication with students, educational institutions can leverage AI-enhanced analytics responsibly while preserving ethical standards and safeguarding individual privacy (Alfredo et al., 2024; Balogh, 2024).

AI should not replace the essential skills that define competent mechanical engineers, such as analytical problem-solving, performing hand calculations, designing and conducting experiments, interpreting data, and clearly communicating technical findings. These fundamental skills form the basis for engineering judgment, professional practice, and lifelong learning. Relying excessively on AI tools to automate these tasks can lead to dependence, where students produce seemingly correct results but lack the ability to evaluate, interpret, or troubleshoot independently. Such overdependence may cause long-term issues, making it difficult for engineers to perform basic estimations, derive key equations, or analyze physical phenomena accurately. This can hinder their ability to identify errors in AI outputs, understand unexpected system behaviors, or innovate in unfamiliar circumstances. Moreover, many engineering responsibilities such as safety evaluations, design verification, or failure analysis; require human reasoning grounded in physical laws, ethics, and contextual judgment that AI cannot fully replicate. Therefore, AI should be integrated thoughtfully into engineering education to enhance learning by providing quick feedback, supporting extensive design exploration, or automating repetitive calculations while students

continue developing core skills necessary for sound engineering judgment. A well-designed curriculum encourages viewing AI as a helpful tool rather than a substitute for intellectual effort. By maintaining this balance, educators can ensure AI complements learning and preserves deep understanding and problem-solving abilities vital to engineering excellence (Akolekar et al., 2025; Albert, 2025; Fan et al., 2025).

AI tools, despite their technical sophistication, can unintentionally introduce biases into student evaluation, project feedback, or performance prediction systems. These biases may originate from various sources, such as imbalances in training data, inappropriate feature selection, historical grading patterns that reflect human subjectivity, or algorithmic assumptions that do not fully account for the diversity of student backgrounds and learning styles. Consequently, AI-generated assessments might favor certain groups of students, misinterpret learning behaviors, or unfairly penalize students whose work deviates from the patterns seen in prior data. In high-stakes educational settings, even slight biases can accumulate over time, impacting course grades, academic progress, or perceptions of student ability. Therefore, it is essential for educators and institutions to continuously monitor, validate, and audit AI-driven systems used in mechanical engineering education. This includes regularly reviewing algorithmic outputs for signs of systematic errors, analyzing differences between human and AI evaluations, and applying fairness metrics to detect potential bias or unequal treatment. Educators should also ensure that AI models are trained on representative, high-quality datasets and that their decision-making aligns with course learning objectives rather than unintended statistical artifacts. By actively managing these systems and maintaining transparency with students, educational programs can promote equitable outcomes and prevent AI from

reinforcing or amplifying existing biases in the learning environment (Idowu et al., 2024; Win Myint et al., 2024).

5. FUTURE DIRECTIONS

The future of AI in ME education involves a strong integration of automation, personalized learning, and seamless technological blending across both physical and digital classroom environments. As AI capabilities advance, engineering programs will increasingly depend on intelligent systems not only to support instruction but also to fundamentally transform how students explore engineering concepts, conduct experiments, and develop professional skills.

Next-generation AI platforms are anticipated to independently evaluate complex student work such as CAD models, FEA simulations, thermodynamic cycle calculations, and laboratory reports. These systems will be capable of identifying modeling errors, unrealistic constraints, inconsistent material properties, or deviations from expected boundary conditions. They may offer line-by-line feedback, point out discrepancies between simulation results and physical principles, or recommend redesigns and optimizations. By guiding students through iterative improvement cycles, often in real time, AI platforms can help create a more dynamic and responsive learning environment without relying exclusively on instructor availability. This capability is especially beneficial in large engineering courses where providing personalized feedback can be difficult (Jaakma & Kiviluoma, 2019; Jianwu et al., 2024).

Digital twins, high-fidelity virtual replicas of physical engineering systems, are expected to become prevalent educational tools. Students may interact with digital twins of wind turbines, manufacturing cells, internal combustion engines, hydraulic systems, or heat exchangers. These environments allow

students to observe system behavior under various operating conditions, perform virtual experiments that might be too risky or expensive in reality, and analyze processes such as degradation, wear, or component failures over time. By engaging with these immersive digital platforms, students can develop a deeper understanding of system dynamics, maintenance strategies, and performance optimization, thereby enriching traditional laboratory learning (Kumar Karanam & Hartman, 2025).

AI-driven analytics will enable universities to deliver highly personalized learning pathways. Instead of a one-size-fits-all curriculum, students will receive adaptive problem sets, customized pacing, and difficulty levels tailored to their mastery of foundational concepts. The system may detect early signs of confusion in areas such as nonlinear dynamics, vibrations, or multiphysics simulations and respond by offering additional examples, targeted tutorials, or scaffolded derivations. Conversely, students who demonstrate advanced proficiency may be presented with more challenging design tasks or open-ended optimization problems. This level of personalization promotes deeper conceptual understanding and allows learners to advance at an optimal pace. Physical engineering laboratories will transform into hybrid intelligent environments featuring computer vision systems, automated measurement tools, and AI-assisted grading mechanisms. Cameras and sensors embedded in lab setups can monitor student actions, confirm correct experimental steps, detect measurement errors, and automatically record data. These systems may also assess safety compliance, ensuring that machine guarding and operational procedures are followed and flag unsafe practices instantly. Automated lab assessment tools can then compare collected data with expected theoretical values, pinpoint potential errors, and deliver structured feedback to enhance experimental techniques.

Instructors will increasingly collaborate with AI co-instructors to manage routine academic tasks such as grading assignments, developing instructional materials, generating example solutions, tracking student performance, and identifying students who may need additional support. These AI systems can analyze extensive data patterns to identify misconceptions, gaps in prior knowledge, or emerging challenges in understanding course content. By delegating time-consuming administrative duties to AI, educators can devote more attention to mentoring, discussion facilitation, supervising practical projects, and guiding advanced conceptual learning. This integrated human-AI teaching approach has the potential to significantly enhance instructional efficiency while preserving the essential elements of direct human engagement.

Overall, incorporating advanced AI technologies into ME education will create more interactive, adaptable, and efficient learning environments. When implemented thoughtfully, these innovations can boost student engagement, improve learning outcomes, and better prepare future mechanical engineers to address the complex, data-driven challenges of modern industry.

6. CONCLUSION

Artificial intelligence has the potential to significantly transform mechanical engineering education by improving design exploration, accelerating simulations, enriching laboratory experiences, and changing assessment methods. Its applications span fields such as CAD/CAM, manufacturing, materials science, robotics, thermodynamics, and fluid mechanics. AI-based learning platforms offer personalized guidance, simplify instruction, and provide deeper insights into student performance. However, successful integration requires careful attention to ethical issues such as academic honesty, transparency, fairness,

and data privacy. AI should support, not replace, the fundamental skills of mechanical engineering: mathematical reasoning, physical intuition, and hands-on experimentation. Educational institutions need to balance leveraging AI to enhance learning while preserving essential engineering competencies. As AI evolves, it will open new opportunities for immersive learning, intelligent assessments, personalized teaching, and cyber-physical labs. By adopting these advancements responsibly, mechanical engineering programs can prepare future engineers to succeed in a technologically advanced and rapidly changing world.

REFERENCES

- Akolekar, H., Jhamnani, P., Kumar, V., Tailor, V., Pote, A., Meena, A., Kumar, K., Challa, J. S., & Kumar, D. (2025). The role of generative AI tools in shaping mechanical engineering education from an undergraduate perspective. *Scientific Reports*, 15(1), 9214. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93871-z>
- Albert, L. A. (2025). Artificial Intelligence in Systems: Integrating AI into the Engineering Curriculum. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5240570>
- Alfredo, R., Echeverria, V., Jin, Y., Yan, L., Swiecki, Z., Gašević, D., & Martinez-Maldonado, R. (2024). Human-centred learning analytics and AI in education: A systematic literature review. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 6, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100215>
- Arslan, B., Lehman, B., Tenison, C., Sparks, J. R., López, A. A., Gu, L., & Zapata-Rivera, D. (2024). Opportunities and challenges of using generative AI to personalize educational assessment. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1460651>
- Ayaan, A., & Ng, K.-W. (2025). Automated grading using natural language processing and semantic analysis. *MethodsX*, 14, 103395. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103395>
- Balalle, H., & Pannilage, S. (2025). Reassessing academic integrity in the age of AI: A systematic literature review on AI and academic integrity. *Social Sciences & Humanities Open*, 11, 101299. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101299>
- Balogh, A. (2024). Educational Innovation of Using Artificial Intelligence in University Education: A Comprehensive

- Student Survey. *International Journal on Lifelong Education and Leadership*, 10(2), 55–65.
<https://doi.org/10.25233/ijlel.1528746>
- Benhanifia, A., Cheikh, Z. Ben, Oliveira, P. M., Valente, A., & Lima, J. (2025). Systematic review of predictive maintenance practices in the manufacturing sector. *Intelligent Systems with Applications*, 26, 200501.
<https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200501>
- Bernabei, M., Colabianchi, S., Falegnami, A., & Costantino, F. (2023). Students' use of large language models in engineering education: A case study on technology acceptance, perceptions, efficacy, and detection chances. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 5, 100172. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100172>
- Chen, S., Yang, R., & Zhong, M. (2021). Graph-based semi-supervised random forest for rotating machinery gearbox fault diagnosis. *Control Engineering Practice*, 117, 104952.
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104952>
- Collins, C., Dennehy, D., Conboy, K., & Mikalef, P. (2021). Artificial intelligence in information systems research: A systematic literature review and research agenda. *International Journal of Information Management*, 60, 102383. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102383>
- Cortvriendt, L., Flórez-Orrego, D., Bongartz, D., & Maréchal, F. (2025). Data-driven systematic methodology for predicting optimal heat pump integration based on temperature levels and refrigerants. *Energy Conversion and Management*, 326, 119495.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119495>

- Durmaz, A. R., Müller, M., Lei, B., Thomas, A., Britz, D., Holm, E. A., Eberl, C., Mücklich, F., & Gumbsch, P. (2021). A deep learning approach for complex microstructure inference. *Nature Communications*, 12(1), 6272. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26565-5>
- Edmunds, E. L., & Thomas, M. (2025). Classification of microstructural defects in selective laser melted inconel 713C alloy using convolutional neural networks. *Materials Science and Technology*. <https://doi.org/10.1177/02670836241308470>
- Etminan, A., Pope, K., & Mashayekh, K. (2025). Artificial intelligence in fluid dynamics and thermal transport: A comprehensive review of methods, challenges, and emerging applications. *AI Thermal Fluids*, 4, 100022. <https://doi.org/10.1016/j.aitf.2025.100022>
- Fan, L., Deng, K., & Liu, F. (2025). Educational impacts of generative artificial intelligence on learning and performance of engineering students in China. *Scientific Reports*, 15(1), 26521. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06930-w>
- Fombona, J., Sáez, J.-M., & Sánchez, S. (2025). Artificial intelligence and robotics in education: Advances, challenges, and future perspectives. *Social Sciences & Humanities Open*, 11, 101533. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101533>
- Huang, L., Li, G., Guan, Y., Jiao, W., Gong, S., & Xu, S. (2025). Machine learning and finite element integration-driven surrogate model for fluid-structure interaction seismic response analysis of aqueduct structures. *Results in Engineering*, 27, 106176. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106176>

- Idowu, J. A., Koshiyama, A. S., & Treleaven, P. (2024). Investigating algorithmic bias in student progress monitoring. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100267>
- Jaakma, K., & Kiviluoma, P. (2019). Auto-assessment tools for mechanical computer aided design education. *Heliyon*, 5(10), e02622. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02622>
- Jianwu, L. W., Yew, L. S., On, L. K., Keong, T. C., Yuan Sheng, R. T., Sani, S. Bin, & Juan Agnes, T. H. (2024). Artificial intelligence-enabled evaluating for computer-aided drawings (AMCAD). *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 52(1), 3–31. <https://doi.org/10.1177/03064190231175231>
- Johnson, N. S., Vulimiri, P. S., To, A. C., Zhang, X., Brice, C. A., Kappes, B. B., & Stebner, A. P. (2020). Invited review: Machine learning for materials developments in metals additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 36, 101641. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101641>
- Kocsis, I., Burján-Mosoni, B., & Balajti, I. (2025). A Comprehensive Review of Key Cyber-Physical Systems, and Assessment of Their Education Challenges. *IEEE Access*, 13, 8898–8911. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3527714>
- Kumar Karanam, S. A., & Hartman, N. W. (2025). A systematic review of Digital Twin (DT) and virtual learning environments (VLE) for smart manufacturing education. *Manufacturing Letters*, 44, 1597–1608. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.179>

- Lee, J. S. Y., Liu, F., & Cai, T. (2024). Code Debugging with LLM-Generated Explanations of Programming Error Messages. 2024 IEEE 13th International Conference on Engineering Education (ICEED), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICEED62316.2024.10923833>
- Liu, Q., Chen, W., Yakubov, V., Kruzic, J. J., Wang, C. H., & Li, X. (2024). Interpretable machine learning approach for exploring process-structure-property relationships in metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 85, 104187. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104187>
- Mohammed, H. R. M., & Ismail, S. (2021). Random Forest versus Support Vector Machine Models' Applicability for Predicting Beam Shear Strength. *Complexity*, 2021(1). <https://doi.org/10.1155/2021/9978409>
- Münker, S., & Schmitt, R. H. (2022). CAD-based AND/OR Graph Generation Algorithms in (Dis)assembly Sequence Planning of Complex Products. *Procedia CIRP*, 106, 144–149. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.169>
- Palma-Ramírez, D., Ross-Veitía, B. D., Font-Arriosa, P., Espinel-Hernández, A., Sanchez-Roca, A., Carvajal-Fals, H., Nuñez-Alvarez, J. R., & Hernández-Herrera, H. (2024). Deep convolutional neural network for weld defect classification in radiographic images. *Heliyon*, 10(9), e30590. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30590>
- Petrich, J., Snow, Z., Corbin, D., & Reutzel, E. W. (2021). Multi-modal sensor fusion with machine learning for data-driven process monitoring for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 48, 102364. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102364>
- Qin, J., Hu, F., Liu, Y., Witherell, P., Wang, C. C. L., Rosen, D. W., Simpson, T. W., Lu, Y., & Tang, Q. (2022). Research

- and application of machine learning for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 52, 102691. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102691>
- Rangasamy, V., & Yang, J.-B. (2025). AI-driven generative design and optimization in prefabricated construction. *Automation in Construction*, 177, 106350. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106350>
- Rani, S., Kataria, A., Kumar, S., & Karar, V. (2025). A new generation cyber-physical system: A comprehensive review from security perspective. *Computers & Security*, 148, 104095. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.104095>
- Ravi, M. (2025). Digital Simulation-Based Learning for Reaction Engineering: Activity Design and Student Metacognition. *Computer Applications in Engineering Education*, 33(3). <https://doi.org/10.1002/cae.70038>
- Shao, M., Chen, J., Wang, T., Tao, F., Du, J., Zhang, D., Wang, X., & Tang, X. (2023). Accelerating Analysis for Structure Design via Deep Learning Surrogate Models. *Advanced Intelligent Systems*, 5(2). <https://doi.org/10.1002/aisy.202200099>
- Song, Y., & Zhang, A. (2025). From black box to physically interpretable: Trustworthy computing for AI-driven decision-making and control. *Journal of Automation and Intelligence*. <https://doi.org/10.1016/j.jai.2025.09.003>
- Suttakul, P., Vo, D., Fongsamootr, T., Wanison, R., Mona, Y., Katongtung, T., Tippayawong, N., & Thawon, I. (2024). The role of machine learning for insight into the material behavior of lattices: A surrogate model based on data from finite element simulation. *Results in Engineering*, 23, 102547. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102547>

- Tan, W., & Spear, A. (2024). Multiphysics Modeling Framework to Predict Process-Microstructure-Property Relationship in Fusion-Based Metal Additive Manufacturing. *Accounts of Materials Research*, 5(1), 10–21. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.3c00108>
- Vespoli, S., Mattera, G., Marchesano, M. G., Nele, L., & Guizzi, G. (2025). Adaptive manufacturing control with Deep Reinforcement Learning for dynamic WIP management in industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 202, 110966. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.110966>
- Wang, C., Li, J., Wu, Z., Sun, J., Ma, S., & Zhao, Y. (2025). A surrogate modeling method for large-scale flow field prediction based on locally optimal shape parameters. *Aerospace Traffic and Safety*, 2(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.aets.2025.03.001>
- Win Myint, P. Y., Lo, S. L., & Zhang, Y. (2024). Harnessing the power of AI-instructor collaborative grading approach: Topic-based effective grading for semi open-ended multipart questions. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100339. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100339>
- Zhang, Y., Chow, C. L., & Lau, D. (2025). Artificial intelligence-enhanced non-destructive defect detection for civil infrastructure. *Automation in Construction*, 171, 105996. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.105996>

METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Fevzi KELEN¹

1. GİRİŞ

Mükemmel elektrik ve ısı iletkenlik, nispeten yüksek mukavemet, yüksek rijitlik, kolay şekillendirilebilirlik ve yüksek darbe ile korozyon direnci gibi karakteristiklere sahip metaller endüstriyel uygulamalarda son derece yaygın kullanılmaktadır. Magnezyum, alüminyum, titanyum, nikel, çinko ve bakır gibi pek çok metal nadiren saf halde tüketilmektedir. Sağlık, uzay, havacılık, otomotiv, tarım, inşaat, gıda, elektrik, elektronik, enerji, kimya ve savunma sektörlerin modern malzeme gereksinimi monolitiklere göre daha üstün spesifik özellikler sergileyen farklı tür kombinasyonlar ile sağlanmaktadır. Metal esaslı yeni yapılar ya belirli bir nitelikte gelişme elde etmek ya da daha iyi fiziksel veya mekaniksel davranışlara ulaşmak amacı ile tasarlanmaktadır. Bu özel dizaynlar seramik ve polimerlere kıyasla daha fazla tercih edilmelerine neden olmaktadır. Ayrıca yapı ve yük taşıma kullanımlarına oldukça elverişli olmaları metalleri bunlara karşı daha da cazip kılmaktadır. Diğer taraftan metaller, seramik, polimer ve yarı iletkenlere nazaran daha yüksek elektrik iletkenliğine haizdir. Bu sebeple tüketim hacimleri çok daha yüksektir (Mott 1951, Kramer and Demer 1961, Paquin 1995, Kurzydłowski 1999, Ashby and Jones 2012, Bhaduri 2018). Alaşım kompozisyonlar genellikle mukavemet ve sertlik gibi karakteristikleri iyileştirmek için geliştirilmektedir.

¹ Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Van, Türkiye, ORCID: 0000-0003-3900-4503.

Bu malzemeler geniş kullanım alanına sahip olmasına karşın çağdaş malzeme taleplerini karşılayabilecek yeterlilikte değildir. Zira pahalı element içeriği ve sınırlı mekanik özellikler ciddi dezavantaj oluşturmaktadır. Düşük ağırlık, düşük termal genleşme, yüksek sertlik, mükemmel dayanım, yüksek kırılma direnci ve iyi ısı ve elektriksel iletkenlik gibi özellikler ile metal matrisli kompozit malzemeler pekçok sektörün arzu ettiği kompleks nitelikleri bir arada barındırmaktadır. Bu malzemeler gerek alaşım gerekse de diğer kompozit türlerine göre yüksek sıcaklıklarda yeterli dayanım ve nispeten iyi süneklilikleri ile önemli avantaj sunmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemelerde temel yapı metal veya alaşımlarından meydana gelir iken güçlendirici materyal olarak ise çoğunlukla metal, oksit, karbür, borür ve nitrürlü bileşiklerden oluşmaktadır. Böylece matris ve takviye elemanının üstün yönleri kombine edilerek yüksek elastik modül, mükemmel sertlik, yüksek tokluk, yüksek darbe dayanımı, yüksek spesifik mukavemet, iyi korozyon direnci, yüksek aşınma ve yorulma dayanımı ve iyi süneklilik gibi karakteristikler elde edilebilmektedir. Bu malzemeleri alaşımlara, seramik ve polimer matrisli kompozitlere karşı eşsiz kılan özellik üstün avantajları ile birlikte göreceli düşük yoğunluklarıdır. Zira hafiflik enerji verimliliğinde kritik rol oynadığından pek çok farklı alan için vazgeçilmez hayati bir parametredir. Metal matrisli kompozitler yüksek mukavemet ve düşük yoğunlukları ile sırası ile seramik ve polimer esaslının ayrı ayrı haiz olduğu hususiyetleri tek yapıda ihtiva edebilmektedir. Aşağıda metal matrisli kompozitlerin genel özellikleri hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

2. MATRİS MALZEMELERİ

Bu malzeme türünde matrisin sınırlı karakteristikleri daha iyi nitelikler sergileyen takviye materyali ile geliştirilmektedir.

Temel yapı her ne kadar mükemmel korozyon dayanımı, yüksek elastik modül, yüksek akma mukavemeti, iyi çekme dayanımı, yüksek aşınma ve sürünme direnci ve iyi süneklik gibi karakteristiklere sahip olsa da yenilikçi pratikler açısından yetersiz kalmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemelerde esas bileşen olarak genellikle magnezyum, alüminyum, titanyum, nikel, bakır, çinko veya alaşımları kullanılmaktadır. Bunlar spesifik yönleri ile endüstriyel dallar için kritik avantajlar sunmaktadır.

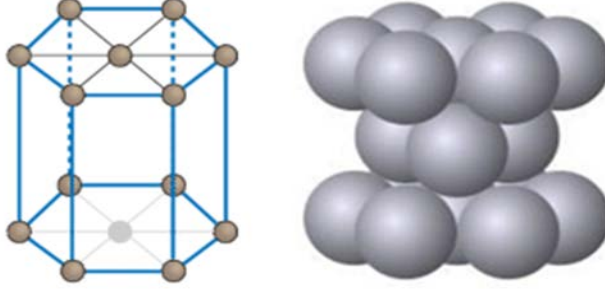
2.1. Magnezyum

Matris malzemeleri içerisinde magnezyum esaslılar düşük yoğunlukları ile dikkat çekmektedir. Şekil 1'de verilen hegzagonal sıkı paket kristal yapıları ciddi bir dezavantaj oluşturmaktadır. Altıgen kafes sistemi oda sıcaklığı kötü şekillendirilebilirliğe yol açarak tüketim miktarlarını son derece kısıtlamaktadır. Ayrıca düşük akma mukavemeti, zayıf elastik modül ve yüksek sıcaklıklarda yetersiz mukavemet diğer önemli sakıncalarıdır. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacı ile farklı tür malzeme grupları ile güçlendirilmektedir. Takviye elemanlar dayanım, sertlik, rijitlik, korozyon direnci gibi özelliklerde iyileşme sağlasa da süneklik genellikle pekçok sektörel kullanım için zayıf kalmıştır. Bu durum kötü matris takviye etkileşimi, yüksek gözenek miktarı ve güçlendirici fazın oldukça yüksek mekanik karakteristiklerine dayandırılmıştır (Mordike and Ebert 2001, Czerwinski 2011, Jayasathyakawin et al. 2020). Deneysel çalışmalar hibrit yönteme yoğunlaşmış hem mukavemet hem de sünekliğin aynı anda iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Diğer taraftan yeni ve modern metotlar denenerek arayüzey özelliklerine tesiri incelenmektedir.

2.2. Alüminyum

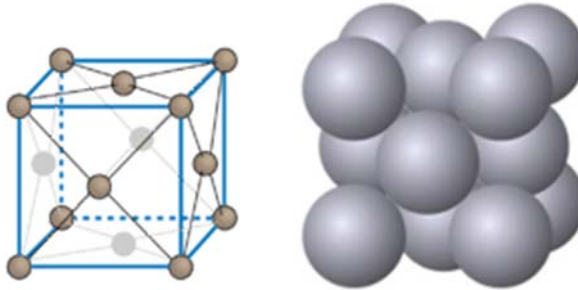
Temel yapı malzemesi olarak yaygın kullanıma sahip alüminyum ve alaşımları magnezyum esaslılara kıyasla daha iyi

şekillendirilebilirlik sergilemektedir. Yoğunlukları magnezyum kökenlilere karşı yaklaşık olarak üçte bir oranında daha fazladır.



Şekil 1. Hegzagonal kristal yapı (www.substech.com, www.imetllc.com).

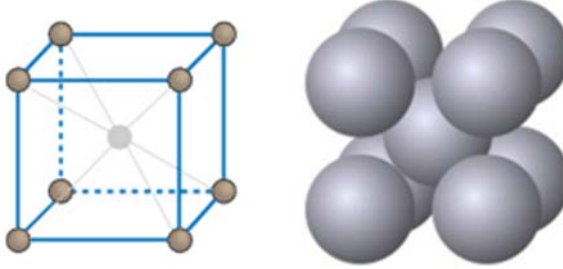
Kübik geometrili kristal yapı yüksek süneklik sağlayarak kolay şekillendirilebilmelerine olanak tanımaktadır. Şekil 2'de gösterilen yüzey merkezli kristal sistem nispeten yüksek tokluk karakterde olup birden fazla kayma düzlemine haizdir. Bu malzemeler her ne kadar magnezyuma kıyasla daha yüksek yoğunlukta olsa da matris materyaller arasında diğerlerine göre çok daha hafiftir (Richards 1890, Aluminum Association 1984, MacKenzie and Totten 2003, Kaufman and Rooy 2004, Mondolfo 2013, Lumley 2018).



Şekil 2. Yüzey merkezli kubik kristal kafes sistemi (www.substech.com, www.imetllc.com).

2.3. Titanyum

Dimorfik özellik sergileyen titanyum oda sıcaklığında magnezyum ile aynı kristal yapı olan hegzagonal sıkı paket formdadır. 1619 °F sıcaklıkta hacim merkezli kübik yapıya dönüşmektedir. Şekil 3'te yüksek sıcaklık yapısı (β) verilen allotrop metal çeliklerinkine yakın yüksek dayanımı ile dikkat çekmektedir. Titanyum, magnezyum ve alüminyum gibi düşük ağırlığa sahiptir. Fakat bunlara karşın daha fazla tercih edilmektedir. Özellikle reaktif karakter korozyona karşı platin ile mukayese edilebilecek düzeyde iyi koruma sağlamaktadır. Ayrıca yüksek sertlik, antimanyetik ve oldukça düşük ısı iletkenlik gibi özellikler göstermektedir. Diğer taraftan yüksek erime noktası kimyasal ve fiziksel yapının deforme olmadan işlevselliğini artırmaktadır. Bu spesifik nitelikler titanyum ve alaşımlarını matris olarak son derece cazip kılmaktadır. Bu karakteristik davranışlar monolitik veya alaşımların kafi gelmediği tıp, uzay, havacılık, otomotiv, savunma ve iletişim teknolojisi gibi alanlarda temel yapı malzemesi olarak kullanımına olanak tanımıştır (Welsch et al. 1993, Leyens and Peters 2006, Motyka 2021, Najafizadeh et al. 2024).



Şekil 3. Dimorfik matrisin yüksek sıcaklık (1619°F) kristal formu (β) (www.substech.com, www.imetllc.com).

2.4. Nikel

Magnezyum, alüminyum ve titanyuma kıyasla yüksek yoğunluğa sahip nikel yüzey merkezli kubik kristal formdadır. Endüstride genellikle alaşım materyali şeklinde sarf edilmesine karşın yüksek erime noktası matris malzemesi olarakta tercih edilmesini sağlamaktadır. Geçiş metali süper alaşım ve paslanmaz çelik eldesinde oldukça popülerdir. Atmosferik korozyona karşı gösterdiği mükemmel direnç günlük yaşamda kullanılan metalik paralardan özel gereksinim gerektiren havacılık uygulamaları gibi ulaşım dallarına kadar pekçok farklı alanda tüketimini mümkün kılmıştır. Bu malzemeler her ne kadar yüksek sıcaklık tatbikleri için vazgeçilmez olsa da enerji dopolama kapasiteleri ile yeni nesil akümülatörler için büyük umut vadetmektedir. Zira nikel esaslı piller çevrim ömrü yüksek potansiyel kapasiteleri ile fosil kökenli yakıtlara olan bağımlılığı asgari düzeye indirgemede son derece kritiktir. Yüksek güç kaynağı ihtiyacı olan iş kollarında bunlar seçilerek yenilikçi, sürdürülebilir ve rakabetçi teknoloji gelişimi desteklenmektedir. Özellikle sıfır emisyonlu yeşil inovasyon donanımlı araçlarda sarfiyatları yüksek enerji verimliliğine ve doğal rezervlerin etkin tüketime olanak tanımaktadır (Mankins and Lamb 1990, Deevi et al. 1997, Parkinson 1997, Everhart 2012, Kumar et al. 2016, Tabrez et al. 2023).

2.5. Bakır

Nikel ile hemen hemen aynı yoğunluğa sahip bakır yüzey merkezli kubik kristal yapıdadır. Bu metal yüksek termal ve elektriksel iletkenlik ile dikkat çekmektedir. Ayrıca mükemmel süneklilik son derece yumuşak bir yapı sergilemesini sağlayarak yoğunluk biçimde şekillendirilebilmesini mümkün kılmaktadır. Sayısız alaşım türü bulunan metalin pirinç ve çinkolu olanları oldukça popülerdir. Nikel ihtiva eden alaşımları düşük değerli madeni paraların oksidayson direncini geliştirmede tercih

edilmektedir. Yarım asırdan fazla tedavülde olan alaşım dörtte üç oranda saf bakır geriye kalan kısımda ise nikel içermektedir. Alüminyum katışıklı olanlar ise genellikle dekoratif işlemlerde sarf edilmektedir. Bunlarda katkı miktarı ortalama yüzde yedi civarındadır. Diğer taraftan çok düşük oranda altın barındıran türleride bulunmaktadır. Matris malzeme mükemmel ısı ve elektriksel iletkenlik, iyi korozyon direnci, yüksek yorulma mukavemeti, süper süneklik ve kolay üretim gibi üstün karakteristiklerinden dolayı sayısız sektörde kullanım gösterse de yüksek sıcaklık dayanımı pek çok uygulama için son derece yetersizdir. Kompozit yaklaşımı ile bakırın kalıtsal düşük mekaniksel özellikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır (Brownsdon 1939, Davis 2001, Kundig and Cowie 2006, Collini 2012, Li and Zinkle 2012, Sundarkrishnaa 2015).

2.6. Çinko

Nikel ve bakıra kıyasla daha hafif olan çinko hegzagonal sıkı paket kristal formdadır. Bu malzeme magnezyum ve titanyuma nazaran daha düşük biyoyumluluk sergilemesine karşın tıbbi uygulamalarda çok fazla sarf edilmektedir. Ayrıca korozyon direnci nispeten yüksektir. Rezerv kaynak bolluğu ile dikkat çeken matris genellikle çelikleri galvanizleme işleminde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra magnezyum ve alüminyum esaslılarda alaşım elementi olarakta tercih edilmektedir. Diğer taraftan ilaç endüstrisi, kimya sanayi, tarım sektörü ve gıda teknolojisi gibi alanlarda da pratikleri mevcuttur. Çinko sağlık dallarında oldukça popüler olan magnezyum ve demire önemli bir alternatife teşkil etmektedir. Magnezyum ve alüminyum gibi çinkonunda erime sıcaklığı düşüktür. Mekanik karakteristikler yüksek sıcaklık uygulamaları için oldukça yetersizdir. Yaşlandırma ısı işlemi vasıtası ile sertlik ve mukavemette gerçekleşen iyileşme istenilen düzeyde değildir. Kristal yapı, yüksek yoğunluk ve düşük mukavemet kullanımını ciddi oranda kısıtlamaktadır. Çinkonun birçok alaşım türü bulunsada spesifik

nitelikleri nedeni ile sarfıyatı düşüktür. (Ledbetter 1973, Pola et al. 2020, Kong et al. 2023, Singh et al. 2025).

2.7. Diğerleri

Metal matrisli kompozit eldesinde magnezyum, alüminyum, titanyum, nikel, bakır ve çinko gibi malzemelerin dışında demir, çelik, altın, gümüş, kobalt, platin vb. materyaller matris olarak kullanılmaktadır. Demir ve çelik esaslı olanlar çoğunlukla yapısal yük taşımaları ve yüksek dayanım ihtiyacı gereken alanlarda tercih edilmektedir. Fakat yüksek yoğunlukları ciddi bir dezavantaja yol açmaktadır. Altın bazlılar biyosensör, gümüş kökenliler ise elektronik gereç ve ekipman imalatında sarf edilmektedir. Kobalt matrisliler nükleer santraller ve yüksek sıcaklık tatbikleri için geliştirilirken platin esaslılar sağlık ve otomotiv uygulamalarında sırası ile protez ve egzoz parçaları yapımında tüketilmektedir.

3. TAKVİYE MATERYALLERİ

Metal matrisli kompozit imalatında her ne kadar matris malzemeleri üstün spesifik karakteristiklere haiz olsalar da günümüz malzeme gereksinimini karşılamada yetersiz kalabilmektedir. Özellikle sağlık, havacılık, otomotiv ve inşaat gibi sektörlerde tüketilen malzeme türlerinin karmaşık nitelikleri bünyesinde barındırması son derece zordur. Bu alanlarda sarf edilen materyal gruplarının modern ihtiyaçlara uygun olarak dizayn edilmesi ve seçilmesi oldukça önemlidir. Zira sürdürülebilir üretim, çevresel koşullar, enerji verimliliği, doğal kaynaklar ve maliyet gibi unsurlar monolitik veya alaşım serilerinin fiziksel veya mekaniksel özelliklerinin kafi gelmemesine neden olmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen metal matrisli kompozitlerde güçlendirici materyal olarak metal, seramik ve polimerler gibi malzemeler sıklıkla sarf edilmiştir. Elastik modül, çekme mukavemeti, yoğunluk, erime noktası,

termal kararlılık, ısı genleşme katsayısı, geometrik yapı ve boyut, matris ile etkileşim ve maliyet gibi faktörlerin göz önünde tutularak yapılan takviye elemanı kullanımında seramik esaslılar büyük çoğunlukla tercih edilmiştir. Diğer taraftan, bol rezerv kaynakları ve kolay ulaşılabilir olmaları kritik avantaj sağlamaktadır. Tablo 1'de karakteristik özellikleri verilen güçlendirici sınıfının ciddi bir bölümünü alümina, alüminyum nitrid, berilyum oksit, bor karbür, karbür, hafniyum karbür, magnezyum oksit, molibden disilid, molibden karbür, niyobyum karbür, silisyum, silisyum karbür, silisyum nitrid, silika, tantalum karbür, tantalum silid, toryum dioksit, titanyum oksit, titanyum diborid, tantalum karbür, uranyum dioksit, tungsten karbür, tungsten disilid, zirkonyum karbür ve zirkonyumdioksit oluşturmaktadır. Bu materyaller ile yapılan metal esaslı kompozit çalışmalarında dayanım artmış ancak şekillendirilebilirlik kötü etkilenmiştir. DeneySEL yaklaşımların bazılarında mukavemetin dahi düşük olduğu tespit edilmiştir. Takviye elemanlarının matris malzemeye kıyasla oldukça yüksek mekanik özellikleri ne yazık ki nihani yapı karakteristiğine negatif tesir etmiştir. Bu nedenle zayıf ıslatılabilirliğin iyileştirilmesi ve porozite içeriğinin azaltılması amacı ile seramik kökenlilere nazaran nispeten daha makul fiziksel ve mekaniksel nitelikler sergileyen malzeme gruplarına yönelinmiştir. Metal esaslılar göreceli yüksek dayanım ve diğer yakın karakteristikleri ile ön plana çıkmıştır. Böylece sadece mukavemet değil aynı zamanda süneklikte geliştirilmeye çalışılmıştır (İbrahim et al. 1991, Ramnath et al. 2014, Dey and Pandey 2015, Sharma et al. 2020, Bahl 2021, Velmurugan et al. 2022, Seikh et al. 2025, Pooja et al. 2025). Bu yeni yöntem vasıtası ile metalik matrisin sakıncalı kısımları daha iyi diğer bir metal türü ile elimine edilir iken sünekliğinde rejim değerler arasında kalması planlanmıştır. Dolayısıyla pek çok sektörel uygulama için yeterli akma mukavemeti, çekme dayanımı, elastik modül, sertlik, rijitlik ve

basma dayanımı gibi mekanik özelliklerin yanı sıra birim şekil değişim arzulanan değerlerde olacaktır.

Tablo 1. Seramik Güçlendirici Materyallerin Genel Karakteristikleri

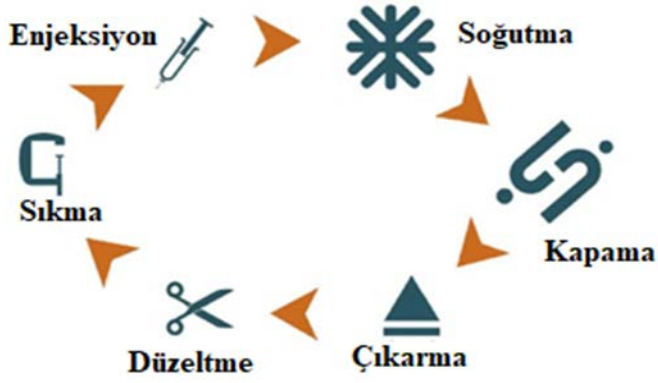
Takviye elemanı	Yoğunluk (10^{-3}kgm^{-3})	Genleşme ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Dayanım (MPa)	Elastik modül (GPa)
Al ₂ O ₃	3.98	7.92	221 (1090°C)	379 (1090°C)
AlN	3.26	4.84	2069 (24°C)	310 (1090°C)
BeO	3.01	7.38	24 (1090°C)	190 (1090°C)
B ₄ C	2.52	6.08	2759 (24°C)	448 (24°C)
C	2.18	-1.44	--	690
CeO ₂	7.13	12.42	589 (24°C)	185 (24°C)
HfC	12.20	6.66	--	317 (24°C)
MgO	3.58	11.61	41 (1090°C)	317 (1090°C)
MoSi ₂	6.31	8.91	276 (1090°C)	276 (1260°C)
Mo ₂ C	8.90	5.81	--	228 (24°C)
NbC	7.60	6.84	--	338 (24°C)
Si	2.33	3.06	--	112
SiC	3.21	5.40	--	324 (1090°C)
Si ₃ N ₄	3.18	1.44	--	207
SiO ₂	2.66	<1.08	--	73
TaC	13.90	6.46	--	366 (24°C)
TaSi ₂	--	10.80	--	338 (1260°C)
ThO ₂	9.86	9.54	193 (1090°C)	200 (1090°C)
TiB ₂	4.50	8.28	--	414 (1090°C)
TiC	4.93	7.60	55 (1090°C)	269 (24°C)
UO ₂	10.96	9.54	--	172 (1090°C)
VC	5.77	7.16	--	434 (24°C)
WC	15.63	5.09	--	669 (24°C)
WSi ₂	9.40	9.00	--	248 (1090°C)
ZrB ₂	6.09	8.28	--	503 (24°C)
ZrC	6.73	6.66	90 (1090°C)	359 (24°C)
ZrO ₂	5.89	12.01	83 (1090°C)	132 (1090°C)

Kaynak: Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., Lavernia, E. J. (1991).

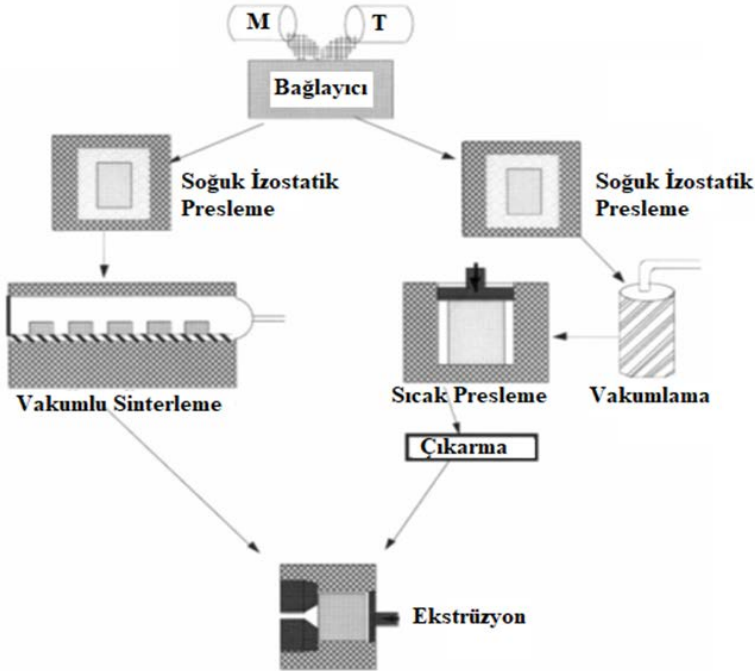
4. ÜRETİM METODOLOJİLERİ

Metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik karakteristikleri üzerinde kritik rol oynayan pek çok üretim metodolojisi bulunmaktadır. Geleneksel olarak addedilen döküm yöntemleri ekonomik olmaları ile dikkat çekmektedir. Bu metotlar düşük maliyetlerinin yanı sıra basit imalat süreci ve

karmaşık geometrik yapıların kolay eldesi gibi önemli avantajlara sahiptir. Fakat ana materyalin ergime sıcaklığı veya üzerindeki değerlerde meydana gelen matris takviye etkileşimi kötü arayüzey özelliklerine yol açmaktadır. Şekil 4'te metodun yaygın kullanım sergileyen türünün tipik akış şeması verilmiştir. Bu prosesler sırasında teşekkül eden kimyasal tepkimeler diğer ciddi bir sakıncadır. Reaksiyon vukuları istenmeyen sert ve kırılgan ikincil fazların hasıl olmasına neden olmaktadır. Ayrıca zayıf temel ilave malzeme bağı yüksek gözenek miktarı ile sonuçlanmaktadır. Diğer taraftan sıvı fazda gerçekleştirilen üretimlerde takviye materyalde oluşan kritik ölçekteki deformasyon oranı, matris yapı içerisinde yüksek topaklanma eğilimi ve heterojen dağılım nihai malzemede düşük fiziksel ve mekaniksel davranışlara sebebiyet vermektedir. Döküm tekniklerinde ikincil işlemlere olan yüksek gereksinim, sınırlı sayıdaki parça imalatında yüksek maliyet, kısıtlı uygulama yelpazesi, yüksek kalıp sarfiyatı, büyük parçalarda nispeten üretim zorluğu, kalıp tasarımı güçlükleri, yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin döküm zorlukları, yoğunluk farkından dolayı kaynaklanan yüksek segragasyon eğilimi, bazı türlerinde ilk yatırım maliyetlerinin son derece pahalı olması gibi farklı diğer dezavantajları da mevcuttur (Srinivasan 2012, Campbell 2015, Cantor and O'Reilly 2016, Mills and Däcker 2017, Abdallah and Aldoumani 2021, Chakrabarti 2022). Literatür çalışmaları basınçlı, sıkıştırırmalı, karıştırırmalı, hassas, sürekli ve vakumlu gibi döküm yöntemlerinin üstün yönlerinden dolayı proses değişkenlerini geliştirmeye odaklanmıştır.



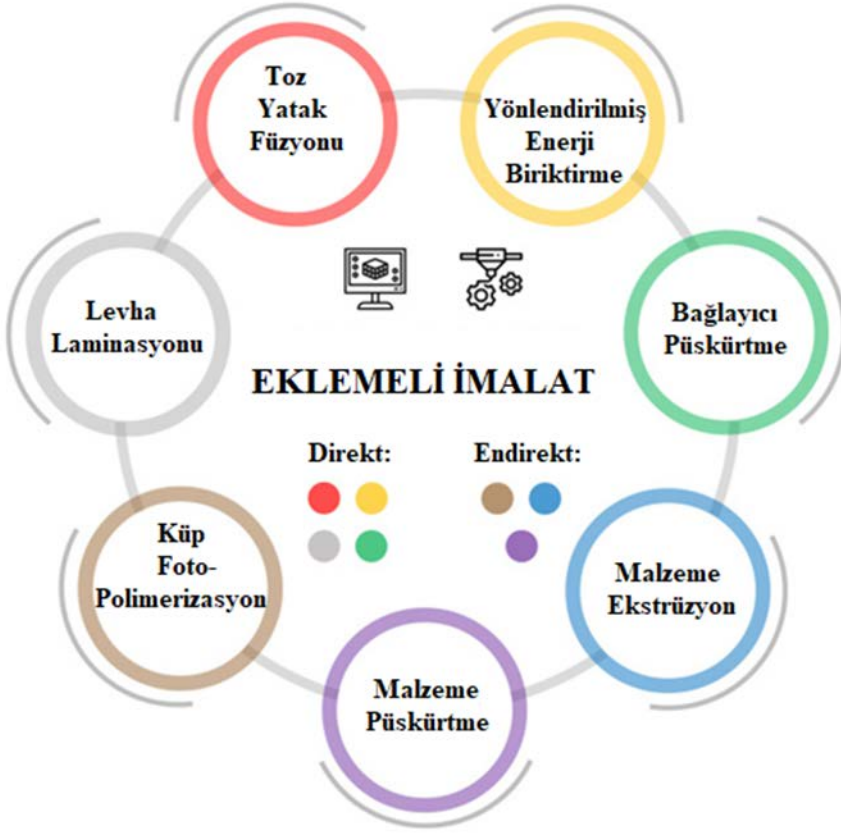
Şekil 4. Geleneksel döküm tekniği akış şeması (www.iqsdirectory.com).



Şekil 5. Toz metalurjisi imalat metodolojisi (Harrigan 1998).

Döküm prosesinde karşılaşılan güçlükler araştırmacıları değişik tekniklere yönlendirmiştir. Bunlar içerisinde ergime sıcaklığının altındaki değerlerde üretime olanak tanıyan toz metalurjisi teknikleri ön plana çıkmıştır. Bu yöntemlerde matris ve takviye fazları katı fazda sinterlenerek metal esaslı kompozitler imal edilmektedir. Şekil 5'te verilen proseste nispeten düşük sıcaklıklarda yapılan imalatlarda döküm yöntemlerine kıyasla daha temiz arayüzey elde edilmektedir. Ayrıca kimyasal tepkilemelerin oluşması için gerekli olan sıcaklık miktarı yetersiz olduğunda dolayı istenmeyen fazlarda teşekkül etmemektedir. Toz metalurjisi teknikleri metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde sağladığı önemli avantajlar ile yaygınlığı kritik mertebelere ulaşmıştır. Soğuk izostatik presleme, vakumlu sinterleme ve sıcak presleme gibi metotlar ile fiziksel ve mekaniksel karakteristiklerde pek çok uygulama için yeterli değerler elde edilmektedir (Upadhyaya 1997, Harrigan 1998, Kondoh 2012, Kuhn 2012, Angelo et al. 2022). Fakat toz metalurjisi tekniklerinin yüksek maliyeti ciddi bir dezavantaja neden olmaktadır. Ayrıca matris ve takviye malzemelerin toz parçacıkları halinde kullanımı için gerekli olan ileri teknoloji nispeten pahalıdır. Şekil 6'da görülebileceği üzere yedi farklı sınıfta kategorize edilen eklemeli imalat yöntemleri malzeme tasarrufu açısından büyük önem arz etmektedir. Bu imalatla doğrudan üretim bağlayıcı püskürtme, toz yatak füzyonu, lavha laminasyonu ve yönlendirilmiş enerji biriktirmeden oluşur iken endirekt ise küp fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme ve malzeme ekstrüzyondan meydana gelmektedir. Eklemeli teknik ile nihai malzeme şekline oldukça yakın geometrilerin elde edilmesi talaşlı imalata olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır. Böylece hammadde rezervlerinin verimli sarf edilmesi mümkün olmaktadır. Proses üç boyutlu tasarımlar vasıtası ile metal matrisli kompozit malzemelerin tabaka tabaka halinde nihai ürüne dönüştürülmesini kapsamaktadır. Eklemeli imalat motodu geniş tasarım yelpazesi ve parça yapımında çoklu malzeme sarfiyatı

gibi üstün yönlerle sahiptir (Molitch-Hou 2018, Wong and Hernandez 2012, Pragana et al. 2021). Metal matrisli kompozitlerin üretiminde nispeten yeni olan süreç büyük parça eldesi, montaj işleminin olmaması, düşük enerji gereksinimi ve atık miktarının son derece az olması gibi kritik spesifik karakteristikler ile dikkat çekmektedir.

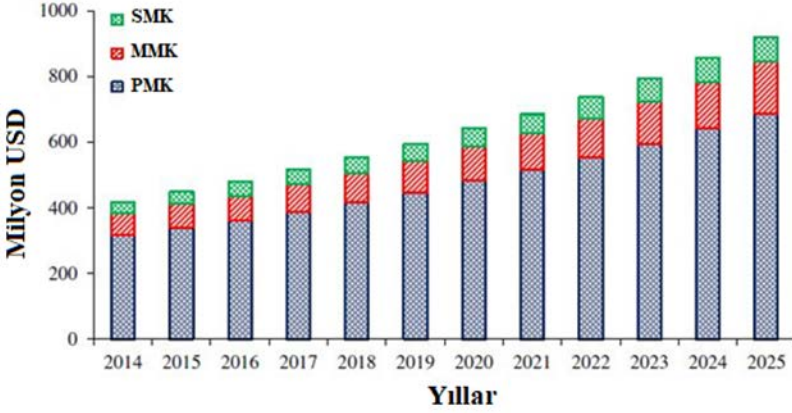


Şekil 6. Eklemeli Üretim Yöntemleri (Pragana et al. 2021).

5. SEKTÖREL UYGULAMALAR

Hava, kara ve deniz gibi ulaşım dalları için önemli potansiyel oluşturan metal matrisli kompozit malzemeler günlük

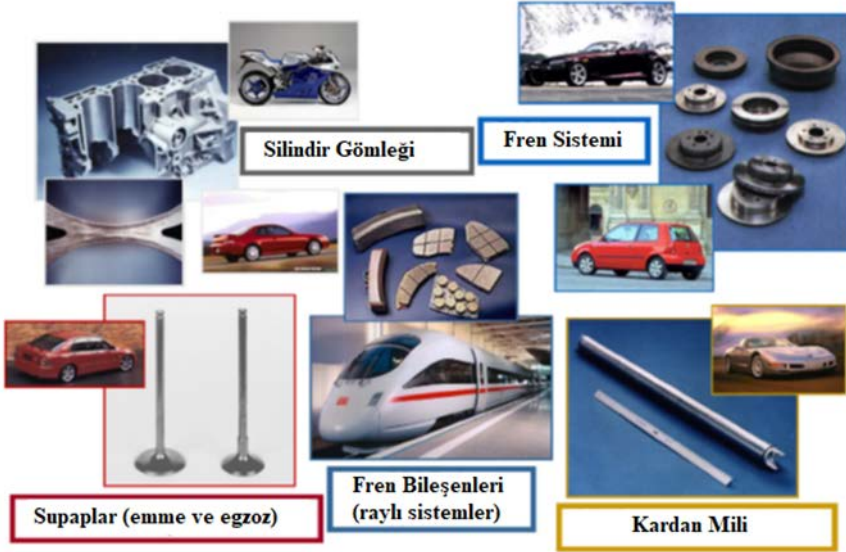
yaşam pratiklerinden diğer endüstriyel uygulamalara kadar pek çok farklı alanda sarf edilmektedir. Bu malzemeler yüksek darbe mukavemeti, mükemmel aşınma ve sürtünme direnci, yüksek tokluk, yüksek termal ve elektrik iletkenliği, düşük yoğunluk, kolay işlenebilirlik, yüksek aşınma dayanımı, yüksek sıcaklık değerlerinde iyi mukavemet, yüksek spesifik dayanım, yüksek sertlik, iyi rijitlik ve nispeten iyi süneklik gibi karakteristik özellikleri ile dikkat çekmektedir. Metal matrisli kompozit malzemeler ilk olarak havacılık sektörünün ihtiyaç duyduğu farklı üstün spesifik nitelikleri karşılamak için geliştirilmesine karşın sonrasında otomotiv sektöründe artan güvenlik, konfor, yakıt ekonomisi, uzun ömür, düşük emisyon üretimi ve yüksek verimlilik gibi talepler tüketimi karayolu taşıtlarına sevk etmesine yol açmıştır. Polimer matrisli kompozit malzemelerin akabinde en çok sarf edilen materyal türü olan metal esaslılar otomobillerin hemen hemen tüm aksamalarında tercih edilmektedir (Şekil 7). Bu malzemelerin polimer grubuna yakın düşük yoğunlukları ve yüksek dayanımları araç aksamaları için oldukça popüler kılmaktadır (Friedrich and Schumann 2001, Singh et al. 2020, Mussatto et al. 2021). Özellikle hibrit ve elektirkli taşıtların düşük menzil sorunu açısından kritik önem arz etmektedir. Metal matrisli kompozitlerin hafifliğinden faydalanılarak yüksek araç tonajı düşürölüp birim motor gücü için sarf edilen enerji miktarı minimize edilebilir. Bu malzemeler yüksek dayanımları ile diğer materyal türlerinin yetersiz kaldığı uygulamalarda da tüketilmektedir. Metal matrisli kompozit malzemeler her ne kadar polimer esaslılara kıyasla otomotivlerdeki tüketim hacimleri düşük olsa da üstün avantajları ve bilhassa düşük yoğunlukları ile ciddi bir alternatif teşkil etmektedir. Otomotiv uygulamalarında genel olarak yüksek dayanım gerektiğinden matris materyaller



Şekil 7. Otomotiv endüstrisinde MMK kullanımı (Mussatto et al. 2021).

nadiren saf halde kullanılmaktadır. Taşıt parça ve aksamlarının imalatında çoğunlukla alaşımlarının matris malzemesi olarak tercih edildiği metal matrisli kompozitler direksiyon sistemi, iç konsept, piston ve segmanlarda yüksek dayanım, mükemmel aşınma mukavemeti, iyi ısı iletkenlik ve düşük yoğunluluk gibi özellikleri nedeni ile sıkça sarf edilmektedir. Şekil 8'de verilen pratiklerde silindir bloğu gömleklerinde, fren rotorlarında, emme ve egzoz supaplarında ve kardan mili imalatında tüketilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının temel yapı olarak seçildiği bu gereçlerde matrisin zayıf fiziksel ve mekaniksel karakteristikleri daha güçlü süreksiz takviye materyalleri vasıtası ile geliştirilmektedir. Böylece servis şartları için yeterli olan özellikler sağlanmaktadır (Ajay et al. 2020, Reddy et al. 2020). Otomobil ön alanı araç ağırlığının önemli bir kısmını teşkil ettiğinden metal matrisli kompozit malzemeler burada kullanılarak ağırlık önemli miktarda azaltılabilir. Özellikle motor, üst kapak, karter, kam ve krank mili, volan, kavrama diski, vites ve direfansiyel kutusu, akslar, tekerlek diski ve diğer güç aktarma organları bileşenlerinde tüketimleri artırılmalıdır. Servis koşullarında yüksek gerilmelere maruz kalan aktarma organı

parçaları metal matrisli kompozitler için önemli bir uygulama bölgesi oluşturmaktadır. Ayrıca çalışma sırasında hasıl olan yüksek ısı parçaları sürekli deformasyona zorlamaktadır. Dolayısıyla metal matrisli kompozit malzemeler yüksek sıcaklıklarda sergiledikleri nispeten iyi mukavemet ile bu aksamaların imalatında sarf edilen ağır ve hantal malzemelerin yerine kullanılabilir. Bu malzeme türünün otomotivlerde tüketim yelpazesi devamlı genişletilmelidir.



Şekil 8. Ulaşım sektöründe metal matrisli kompozitler (Ajay et al. 2020).

Metal matrisli kompozit malzemeler üstün karakteristik özelliklerinden dolayı sadece otomotiv değil aynı zamanda sağlık, havacılık, inşaat, savunma, gıda, tarım, elektrik, elektronik, deniz, petrol, kimya ve mobilya gibi pek çok farklı alanda kullanılmaktadır (Şekil 9). Bu malzemeler polimer esaslı materyallere yakın düşük yoğunlukları, yüksek spesifik mukavemetleri ve mükemmel korozyon dirençleri nedeni ile gemilerde, yüksek sıcaklıklarda sergiledikleri iyi mukavemet ile



Şekil 9. Metal matrisli kompozitlerin endüstriyel uygulamaları

uçak aksamalarında, insan vücuduna olan nispeten iyi uyumlukları sebebi ile tıbbi gereç ve donanımlarda, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlikleri sayesinde elektrik ile elektronik cihazlarda, modern yapıların inşasında gerekli olan hafiflik, yüksek dayanım gibi kompleks karakteristikleri ile inşaat sektöründe, yüksek sertlik ve dayanımları ile savunma sanayinde tercih edilmektedir. Ayrıca spor araç ve ekipmanlarında, mutfak eşyalarında, süs ve takı gibi materyallerinin imalatında da kullanılmaktadır (Kaczmar et al. 2000, Friedrich and Schumann 2001, Ajay et al. 2020, Reddy et al. 2020, Singh et al. 2020, Mussatto et al. 2021). Metal matrisli kompozitler modern uygulamalar için önemli potansiyele sahiptir. Bu malzemelerin endüstriyel alanlarda sarfiyat miktarı sürekli artırılarak hem sektörel pratiklerin ihtiyacı karşılanmalı hem de sürdürülebilir üretim sağlanmalıdır.

6. SONUÇ

Metal matrisli kompozit malzemeler üstün karakteristikleri ile endüstriyel gereksinimleri karşılayabilecek niteliktedir. Bu materyaller yüksek sertlik, mükemmel korozyon direnci, yüksek mukavemet, iyi şekillendirilebilirlik, kolay üretim, düşük maliyet, hafiflik, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik gibi spesifik özellikleri ile modern talepler için önemli bir potansiyel vadetmektedir. Matris ve takviye etkileşiminin son derece kritik olduğu yapıda uygun temel ve ilave tercihi yapılarak arzulanan fiziksel ve mekanik özelliklere ulaşılabilmektedir. Bu malzeme grubunda bilhassa günümüz beklentilerine cevap verebilecek davranış ortaya koyan düşük yoğunluklu matris seçilerek enerji verimliliğinde kritik rol oynayan ağırlık düşürülebilir. Yapı tonajı azaltılarak hem hantal konstrüksiyonların hem de fazla hacim veya alan kaplamaların etkisi minimize edilebilir. Böylece yüksek etkinliğin yanı sıra daha az yer işgali sağlanır. Havacılık, otomotiv ve inşaat gibi sektörler için son derece hayati olan bu unsurlar metal matrisli kompozit malzemeler ile çözüme kavuşturulabilir. Ayrıca doğal hammadde kaynaklarının hızla tükenmesi insan ve canlı yaşamının sürdürülebilir olması için tedbir alınmasını zorunlu kılmıştır. Dolayısıyla metal matrisli kompozitlerin geri dönüştürülebilir olması kritik avantaj teşkil etmektedir. Bu malzemelerin günlük malzeme pratiklerinden iş dallarındaki uygulamalarına kadar kullanıldığı tüm alanlardaki hacimleri artırılmalıdır. Rezerv kaynakların ısrarı tüketimleri yaygınlaştırılarak önlenmelidir. Metal matrisli kompozitlerin sarfiyatları ne yazık ki polimer esaslılara kıyasla oldukça düşüktür. Bunlara göre yüksek dayanıma sahip olmasına karşın yoğunlukları göreceli olarak biraz daha yüksektir. Bu bağlamda, magnezyum ve alaşımları gibi düşük yoğunluklu matrisler seçilerek polimerlerinkine oldukça yakın değerler elde edilebilir. Metal matrisli kompozitlerin başta otomotiv endüstrisi olmak

üzere diğer sektörel alanlarda sarfiyatları sürekli artmasına rağmen maalesef istenilen düzeyde değildir. Bu nedenle sınırlılıkları bertaraf edilmelidir. Dezavantajların ciddi bir kısmının kaynaklandığı matris - takviye faz uyumsuzluğu izole edilmelidir. Yapıyı meydana getiren ana ve ilave bileşenlerin aynı kristal örgüye sahip olması arayüzey özellikleri açısından son derece kritiktir. Bu malzemeler arasında güçlü bağ oluşumu kafes konstrüksiyonlarının uyumu ile mümkündür. Matris ve takviye fazların birbirine yakın özelliklere haiz olacak şekildeki tercihi gerek mikroyapısal karakteristikler gerekse de mekanik davranışlar açısından daha iyi sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan nihai malzeme niteliklerini direkt etkileyen yapım tekniği hem düşük maliyet, hem morfoloji hem de akma dayanımı, çekme mukavemeti, süneklik, tokluk, sertlik, rijitlik ve elastik modül gibi metal matrisli kompozit özellikleri dikkate alınarak seçilmelidir. Sonuç olarak sanayi kollarının gereksinim duyduğu modern malzeme kriterleri metal matrisli kompozitlerin yetersiz davranışları minimal edilecek şekilde tasarlanarak tanzim edilmelidir.

KAYNAKÇA

- Abdallah, Z., & Aldoumani, N. (Eds.). (2021). Casting processes and modelling of metallic materials. BoD–Books on Demand.
- Ajay Kumar, P., Rohatgi, P., & Weiss, D. (2020). 50 years of foundry-produced metal matrix composites and future opportunities. *International Journal of Metalcasting*, 14(2), 291-317.
- Aluminum Association. (1984). Aluminum: properties and physical metallurgy (Vol. 1). ASM international.
- Angelo, P. C., Subramanian, R., & Ravisankar, B. (2022). Powder metallurgy: science, technology and applications. PHI Learning Pvt. Ltd..
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. (2012). Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design. Elsevier.
- Bahl, S. (2021). Fiber reinforced metal matrix composites-a review. *Materials Today: Proceedings*, 39, 317-323.
- Bhaduri, A. (2018). Mechanical properties and working of metals and alloys (Vol. 264, p. 119). Singapore: Springer.
- Brownsdon, H. W. (1939). Copper and Copper Alloys—Their Properties and Applications. *Transactions*, 51(1).
- Campbell, J. (2015). Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Butterworth-Heinemann.
- Cantor, B., & O'Reilly, K. (2016). Solidification and casting. CRC press.
- Chakrabarti, A. K. (2022). Casting technology and cast alloys. PHI Learning Pvt. Ltd..

- Collini, L. (Ed.). (2012). Copper Alloys: Early Applications and Current Performance-Enhancing Processes. BoD–Books on Demand.
- Czerwinski, F. (Ed.). (2011). Magnesium alloys: design, processing and properties. BoD–Books on Demand.
- Davis, J. R. (Ed.). (2001). Copper and copper alloys. ASM international. Deevi, S. C., Sikka, V. K., & Liu, C. T. (1997). Processing, properties, and applications of nickel and iron aluminides. *Progress in Materials Science*, 42(1-4), 177-192.
- Dey, A., & Pandey, K. M. (2015). Magnesium metal matrix composites-a review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 42(1), 58-67.
- Everhart, J. (Ed.). (2012). Engineering properties of nickel and nickel alloys. Springer Science & Business Media.
- Friedrich, H., & Schumann, S. (2001). Research for a “new age of magnesium” in the automotive industry. *Journal of Materials Processing Technology*, 117(3), 276-281.
- Harrigan Jr, W. C. (1998). Commercial processing of metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 244(1), 75-79.
- Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., & Lavernia, E. J. (1991). Particulate reinforced metal matrix composites—a review. *Journal of materials science*, 26(5), 1137-1156.
- Jayasathyakawin, S., Ravichandran, M., Baskar, N., Chairman, C. A., & Balasundaram, R. (2020). Mechanical properties and applications of Magnesium alloy–Review. *Materials Today: Proceedings*, 27, 909-913.
- Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., & Włosiński, W. (2000). The production and application of metal matrix composite

- materials. *Journal of materials processing technology*, 106(1-3), 58-67.
- Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004). Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications. *Asm International*.
- Kramer, I. R., & Demer, L. J. (1961). Effects of environment on mechanical properties of metals. *Progress in Materials Science*, 9(3), 133-199.
- Kong, L., Heydari, Z., Lami, G. H., Saberi, A., Baltatu, M. S., & Vizureanu, P. (2023). A comprehensive review of the current research status of biodegradable zinc alloys and composites for biomedical applications. *Materials*, 16(13), 4797.
- Kondoh, K. (Ed.). (2012). Powder metallurgy. *BoD—Books on Demand*.
- Kuhn, H. (Ed.). (2012). Powder metallurgy processing: the techniques and analyses. *Elsevier*.
- Kumar, B. A., Ananthaprasad, M. G., & GopalaKrishna, K. (2016). A review on mechanical and tribological behaviors of nickel matrix composites. *Indian Journal of Science and Technology*, 9, 2.
- Kundig, K. J., & Cowie, J. G. (2006). Copper and copper alloys. *Mechanical engineers' handbook*. Wiley Interscience, 117-220.
- Kurzydłowski, K. J. (1999). Structure and properties of metals. *Acta Physica Polonica A*, 96(1), 69-79.
- Ledbetter, H. M. (1973). Elastic properties of zinc: A compilation and. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2, 531.

- Leyens, C., & Peters, M. (Eds.). (2006). Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. Wiley-vch.
- Li, M., & Zinkle, S. J. (2012). Physical and mechanical properties of copper and copper alloys.
- Lumley, R. (Ed.). (2018). Fundamentals of aluminium metallurgy: recent advances.
- MacKenzie, D. S., & Totten, G. E. (Eds.). (2003). Handbook of aluminum.
- Mankins, W. L., & Lamb, S. (1990). Nickel and nickel alloys.
- Mills, K. C., & Däcker, C. Å. (2017). The casting powders book (pp. 109-46). Cham: Springer International Publishing.
- Molitch-Hou, M. (2018). Overview of additive manufacturing process. In Additive manufacturing. Butterworth-Heinemann.
- Mordike, B. L., Ebert, T. J. M. S. (2001). Magnesium: properties-applications-potential. Materials Science and Engineering: A, 302, 37-45.
- Mondolfo, L. F. (2013). Aluminum alloys: structure and properties. Elsevier.
- Mott, N. F. (1951). The mechanical properties of metals. Proceedings of the Physical Society. Section B, 64(9), 729.
- Motyka, M. (2021). Titanium alloys and titanium-based matrix composites. Metals, 11(9), 1463.
- Mussatto, A., Ahad, I. U., Mousavian, R. T., Delaure, Y., & Brabazon, D. (2021). Advanced production routes for metal matrix composites. Engineering reports, 3(5), e12330.

- Najafizadeh, M., Yazdi, S., Bozorg, M., Ghasempour-Mouziraji, M., Hosseinzadeh, M., Zarrabian, M., & Cavaliere, P. (2024). Classification and applications of titanium and its alloys: A review. *Journal of Alloys and Compounds Communications*, 3, 100019.
- Pragana, J. P. M., Sampaio, R. F., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., & Martins, P. A. F. (2021). Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2, 100032.
- Parkinson, R. (1997). Properties and applications of electroless nickel (Vol. 37). Toronto: Nickel Development Institute.
- Paquin, R. A. (1995). Properties of metals. *Handbook of optics*, 2, 35-49.
- Pola, A., Tocci, M., & Goodwin, F. E. (2020). Review of microstructures and properties of zinc alloys. *Metals*, 10(2), 253.
- Pooja, K., Tarannum, N., & Chaudhary, P. (2025). Metal matrix composites: revolutionary materials for shaping the future. *Discover Materials*, 5(1), 35.
- Ramnath, B. V., Elanchezhian, C., Annamalai, R. M., Aravind, S., Atreya, T. S. A., Vignesh, V., & Subramanian, C. (2014). Aluminium metal matrix composites—a review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 38(5), 55-60.
- Reddy, P. V., Kumar, G. S., Krishnudu, D. M., & Rao, H. R. (2020). Mechanical and wear performances of aluminium-based metal matrix composites: a review. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 6(3), 83.
- Richards, J. W. (1890). Aluminium: its history, occurrence, properties, metallurgy and applications, including its alloys. HC Baird & Company. Tabrez, S., Gaur, K. K., Kumar, V., Jha, P., Nautiyal, H., Salam, A., & Singh, S.

- (2023). Nickel metal matrix composites reinforced with solid lubricants: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*.
- Upadhyaya, G. S. (1997). *Powder metallurgy technology*. Cambridge Int Science Publishing.
- Singh, L., Singh, B., & Saxena, K. K. (2020). Manufacturing techniques for metal matrix composites: an overview. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 6(2), 441-457.
- Seikh, Z., Sekh, M., Mandal, G., Sengupta, B., & Sinha, A. (2025). Metal matrix composites processed through powder metallurgy: a brief overview. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 106(1), 771-778.
- Sharma, D. K., Mahant, D., & Upadhyay, G. (2020). Manufacturing of metal matrix composites: A state of review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 506-519.
- Singh, P., Mishra, R. K., Singh, B., & Gupta, V. (2025). Mechanical and tribological properties of zinc-aluminium(ZA-27)metal matrix composites :a review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 11, 73-91.
- Srinivasan, M. (Ed.). (2012). *Science and technology of casting processes*. BoD–Books on Demand.
- Sundarkrishnaa, K. L. (2015). *Friction material composites: copper-/metal-free material design perspective*, Springer.
- Velmurugan, G., Perumal, A., Sekar, S., & Uthayakumar, M. (2022). Physical and mechanical properties of various metal matrix composites: a review. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1022-1031.

Welsch, G., Boyer, R., & Collings, E. W. (Eds.). (1993).
Materials properties handbook: titanium alloys. ASM
international.

Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive
manufacturing. International scholarly research
notices, 2012(1), 208760.

www.substech.com. Erişim tarihi: 14.11.2025.

www.imetllc.com. Erişim tarihi: 21.11.2025

www.iqsdirectory.com. Erişim tarihi: 25.11.2025

AN EXPERIMENTAL STUDY ON PID TUNING FOR QUADCOPTER FLIGHT CONTROLLERS

Osman ÜNAL¹

1. INTRODUCTION

Unmanned aerial vehicles (UAVs), particularly quadcopters, have attracted significant attention in recent years (Zhang et al., 2025; Peksa & Mamchur, 2024) due to their mechanical simplicity (Tang & Mueller, 2025), vertical take-off and landing capability (Qi et al., 2025), and wide range of civilian and industrial applications such as surveillance, inspection, mapping, and autonomous navigation (Babu et al., 2025). Despite their structural simplicity, quadcopters exhibit highly nonlinear, underactuated, and strongly coupled dynamics, which make their control a challenging task (Izadi et al., 2025). Achieving stable flight and accurate attitude control therefore remains a fundamental research problem in the field of aerial robotics.

Among various control strategies proposed for quadcopters, including robust, adaptive, and intelligent control methods, the proportional–integral–derivative (PID) controller continues to be the most widely used approach in practical flight control systems (Zakipour Behambari & Khankalantary, 2025). This popularity stems from its simple structure, ease of implementation, low computational cost, and satisfactory performance in real-time embedded applications. However, the effectiveness of a PID controller is highly dependent on the

¹ Doktor Öğretim Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Denizcilik Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, ORCID: 0000-0003-1101-6561.

proper tuning of its gains, which is particularly critical for quadcopters due to their fast dynamics, sensitivity to disturbances, and model uncertainties.

In quadcopter flight control, a cascaded control architecture is commonly employed to improve stability and dynamic performance (Mien et al., 2024). In this structure, the outer control loop regulates the attitude angles such as roll and pitch, while the inner loop controls the corresponding angular rates. This separation enables faster disturbance rejection and improved transient response. Furthermore, accurate attitude estimation is essential for reliable control performance. Low-cost inertial measurement units (IMUs), which combine accelerometers and gyroscopes, are widely utilized for this purpose. However, IMU sensors are affected by noise, bias, and drift, requiring appropriate sensor fusion techniques. Among these, complementary filtering offers an efficient and computationally light solution for real-time attitude estimation in embedded systems (Zhang et al., 2024).

Although numerous studies have investigated advanced control methods for quadcopters, experimental validation on low-cost hardware platforms remains a crucial aspect for real-world applicability. In many practical implementations, theoretical tuning methods often fail to deliver satisfactory performance due to unmodeled dynamics, actuator nonlinearities, and environmental disturbances. Consequently, experimental PID tuning continues to be an effective and widely adopted approach for achieving stable and reliable flight performance (Abdelkader et al., 2022; Bhuvaneswary et al., 2025).

In this study, an experimental investigation on the tuning and real-time implementation of PID controllers for a quadcopter flight control system is presented. A custom-built flight controller based on an embedded microcontroller and a low-cost IMU is

developed. The control system employs a cascaded PID architecture, where roll and pitch angles are regulated by an outer loop while angular rates are controlled by an inner loop. Yaw stabilization is achieved through a rate-based PID controller. Sensor fusion is performed using a complementary filter to combine accelerometer and gyroscope measurements. All computations are executed in real time, and control errors are recorded on an SD card for offline analysis.

The main contributions of this study include the real-time implementation of a low-cost cascaded PID-based quadcopter flight controller, the systematic tuning of the PID gains, and the provision of comprehensive source codes and experimental datasets that establish a reproducible basis for future research in controller optimization, adaptive algorithm development, and advanced flight-control strategies.

2. FLIGHT CONTROL ARCHITECTURE AND EXPERIMENTAL PID TUNING

The quadcopter flight control system is designed based on a cascaded control architecture consisting of an outer attitude control loop and an inner angular rate control loop. This structure is widely preferred in aerial vehicles due to its fast dynamic response, improved stability, and effective disturbance rejection (Borbolla-Burillo et al., 2024). The overall control system utilizes inertial measurement unit (IMU) data for real-time attitude estimation and employs experimentally tuned proportional–integral–derivative (PID) controllers for stabilization.

2.1. Flight Control Architecture

Attitude estimation is performed using accelerometer and gyroscope measurements fused through a complementary filter. The filter output is obtained using Eq. (1), which blends the

integrated gyroscope rate with the accelerometer-based angle to achieve drift-reduced estimation:

$$\theta(k) = \alpha[\theta(k-1) + \omega(k)\Delta t] + (1 - \alpha)\theta_{acc}(k) \quad (1)$$

In Eq. (1), the complementary filter computes the estimated angle (k) at the current sample k by combining gyroscope and accelerometer measurements. The term $(k-1)$ represents the previously estimated angle, while (k) denotes the angular rate measured by the gyroscope at the same instant. This rate is integrated over the sampling interval Δt to obtain the short-term change in orientation. The accelerometer-based angle $\theta_a(k)$, calculated from instantaneous accelerometer readings, provides an independent but noisier estimate of the attitude. The filter coefficient α determines the relative contribution of the gyroscope and accelerometer components: the expression $[(k-1) + \omega(k)\Delta t]$ emphasizes the smooth but drift-prone gyroscope integration, whereas $(1-\alpha) \theta_{acc}(k)$ introduces long-term correction from the accelerometer. In this study, a value of $\alpha=0.991$ was selected to prioritize gyroscope stability while retaining sufficient accelerometer influence to compensate for drift, resulting in a reliable and smooth attitude estimation.

The roll and pitch attitude errors are defined by comparing the desired and measured angles, as given in Eqs. (2) and (3), where $e_\phi(t)$ and $e_\theta(t)$ represent the instantaneous roll and pitch errors, respectively. In these expressions, (t) and $\theta_d(t)$ denote the desired roll and pitch angles commanded by the pilot or higher-level controller, while $\phi(t)$ and $\theta(t)$ correspond to the actual roll and pitch angles estimated from sensor data. Thus, each error term reflects the deviation between the commanded and measured attitude, forming the primary input to the outer-loop attitude PID controller.

$$e_\phi(t) = \phi_d(t) - \phi(t) \quad (2)$$

$$e_{\theta}(t) = \theta_d(t) - \theta(t) \quad (3)$$

These errors form the input to the outer-loop PID controller, whose structure is described in Eq. (4), where (t) denotes the desired angular rate generated by the attitude controller and serves as the reference for the inner-loop rate control. In this expression, K_p^a , K_i^a , and K_d^a represent the proportional, integral, and derivative gains of the attitude loop, respectively. The term (t) corresponds to the instantaneous attitude error—such as the roll or pitch error defined in Eqs. (2) and (3)—while $\int e(t) dt$ accumulates this error over time to remove steady-state offsets. The derivative term $(t)/dt$ captures the rate of change of the error, providing anticipatory action that improves damping and transient performance.

$$\omega_d(t) = K_p^a e(t) + K_i^a \int_t^{t+1} e(t) dt + K_d^a \times \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

As indicated by Eq. (4), the output of the attitude PID generates the desired angular rate ω_d , which then becomes the reference for the inner loop.

$$e_{\omega}(t) = \omega_d(t) - \omega(t) \quad (5)$$

In Eq. (5), (t) represents the desired roll or pitch rate supplied by the outer-loop controller, while $\omega(t)$ denotes the corresponding measured rate from the onboard IMU. Their difference yields the instantaneous rate error (t) , which serves as the input to the inner-loop rate controller.

$$u(t) = K_p^r e_{\omega}(t) + K_i^r \int_t^{t+1} e_{\omega}(t) dt + K_d^r \times \frac{de_{\omega}(t)}{dt} \quad (6)$$

The inner-loop controller is formulated in Eq. (6), where the control torque or motor-mixing input (t) is computed using proportional, integral, and derivative actions based on the rate error. Specifically, K_p^r , K_i^r , and K_d^r denote the proportional, integral, and derivative gains of the rate loop, respectively. The term (t) reflects the instantaneous rate error, while $\int e_{\omega}(t) dt$

compensates for persistent deviations that may arise due to aerodynamic disturbances or modeling uncertainties. The derivative term $d(t)dt$ captures rapid variations in the rate error, thereby improving damping and reducing overshoot. Collectively, these components determine the control command (t) , ensuring that the inner-loop controller responds rapidly to track the demanded angular rates and provides stable motor-level actuation.

The final motor commands are obtained using the standard quadcopter motor mixing equations given in Eqs. (7) - (10). These equations distribute roll, pitch, and yaw control signals to the four motors. Yaw motion is controlled solely through the inner-loop structure due to drift sensitivity in yaw angle estimation.

$$M_1 = T - u_\phi - u_\theta + u_\psi \quad (7)$$

$$M_2 = T - u_\phi + u_\theta - u_\psi \quad (8)$$

$$M_3 = T + u_\phi + u_\theta + u_\psi \quad (9)$$

$$M_4 = T + u_\phi - u_\theta - u_\psi \quad (10)$$

As expressed in Eqs. (7) - (10), each motor command M_i results from the combined effect of throttle and attitude control signals, ensuring proper torque and thrust distribution. In these equations, M_i represents the final command sent to the i -th motor, while T denotes the collective throttle input that generates the total upward thrust required for flight. The terms u_ϕ , u_θ , and u_ψ correspond to the roll, pitch, and yaw control outputs produced by their respective PID controllers, each contributing differential thrust to regulate the quadcopter's rotational motion. Positive or negative additions of these control terms in Eqs. (7) - (10) determine how each motor individually increases or decreases speed to generate the necessary control torques, thereby achieving stable and coordinated quadcopter motion.

2.2.Experimental PID Tuning Procedure

The PID gains were determined experimentally to achieve stable and responsive behavior under real-flight conditions. Because the system is affected by sensor noise, actuator nonlinearities, and aerodynamic disturbances, analytical tuning methods were not sufficient on their own. Therefore, the controller parameters were refined through real-time iterative testing, during which the quadcopter's response to control inputs was continuously evaluated.

The tuning process began by adjusting the proportional gain to obtain a fast response without inducing oscillations. Once an acceptable rise time was achieved, the derivative gain was increased to provide additional damping and reduce overshoot, improving the overall smoothness of the response. After the proportional and derivative actions produced a well-behaved transient response, the integral gain was introduced gradually to remove steady-state errors caused by constant biases or small external disturbances. Care was taken to keep the integral term small enough to prevent windup while still improving long-term accuracy.

During this process, the sampling time of the control loop was monitored to ensure that numerical integration and differentiation were performed consistently, as variations in execution time can negatively influence controller performance. Each adjustment was validated through controlled test flights, where the quadcopter's stability, tracking accuracy, and disturbance rejection were visually inspected and verified through logged sensor data. Overall, the experimentally tuned PID parameters resulted in stable hovering, smooth transitions, and reliable behavior.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The optimal PID parameters for roll-axis control were investigated through 15 experimental trials, each employing a distinct combination of K_p , K_i , and K_d . For each experiment, the reliability of performance assessment was increased by excluding the first and last 10 seconds of the recorded data to eliminate transient initialization effects and possible final-phase disturbances. The remaining valid portion of each dataset was analyzed using a sliding-window integral approach. For every experiment, the error signal (t) was integrated over all consecutive 20-second windows using the formulation given in Eq. (11):

$$I(t) = \int_t^{t+30} e(\tau) d\tau \quad (11)$$

This metric quantifies the cumulative deviation of the quadcopter from the desired roll angle within any 30-second interval. For each dataset, the minimum value of (t) was extracted and recorded as the representative performance index of that experiment.

The PID parameters were tuned following a systematic procedure in which K_p was first increased until the system achieved a fast yet stable response. Afterwards, K_d was adjusted to suppress oscillations and reduce overshoot. Finally, K_i was incrementally increased to eliminate steady-state bias without introducing undesirable drift or instability. This iterative approach enabled a progressive refinement of the controller gains and ultimately yielded the optimal parameter set observed in Experiment 7, which used the parameter set $K_p=6.00$, $K_i=0.10$, and $K_d=0.2$. These values provided the best overall roll-axis stability among all tested configurations. The list of PID parameters used in each experiment, the corresponding minimum error integrals, and their improvements relative to the best-performing experiment are summarized in Table 1.

Table 1. Experimental PID parameters and corresponding error integrals.

Exp. No.	Kp	Ki	Kd	Error	Improvement (%)
1	3.60	6.44	0.50	53.89	48.04
2	5.70	0.02	0.20	47.15	29.53
3	5.70	0.02	0.30	43.96	20.77
4	6.00	0.00	0.00	84.24	131.39
5	6.00	0.00	0.10	75.41	107.14
6	6.00	0.02	0.25	43.64	19.88
7	6.00	0.10	0.20	36.40	-
8	6.00	0.20	0.10	55.54	52.57
9	6.00	0.20	0.20	36.90	1.37
10	6.00	0.20	0.25	36.52	0.32
11	6.00	0.30	0.20	40.83	12.17
12	6.30	0.02	0.15	45.54	25.09
13	6.30	0.02	0.25	43.30	18.93
14	7.00	0.00	0.00	50.76	39.42
15	8.00	0.00	0.00	91.55	151.50

The time-domain error behavior of the best-performing experiment is illustrated in Figure 1. The figure depicts the roll-axis error (in degrees) with respect to time (in seconds). As shown in Figure 1, the error remains confined within a narrow margin during the entire valid experiment duration, demonstrating that the quadcopter maintains stable roll dynamics even under disturbance effects. This confirms that the identified PID gains provide a sufficiently robust response to external perturbations and measurement noise.

All Arduino source codes used in the experiments—including the flight controller and remote controller programs—are provided in Appendix A and Appendix B, respectively. Additionally, the large-volume experimental datasets and the MATLAB scripts used to compute the sliding-window integral analysis are made accessible through the link provided in Appendix C.

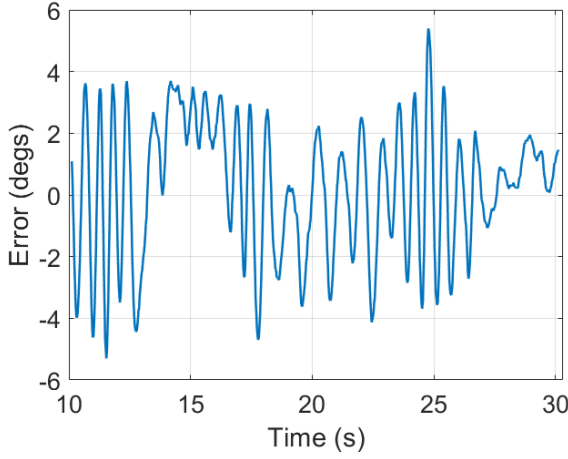


Figure 1. Time-error response of the best-performing experiment.

Overall, the results demonstrate that appropriate tuning of the K_p , K_i , and K_d parameters leads to a significant improvement in roll-axis stability. The minimum error integral criterion proved effective in identifying the most stable configuration, confirming the suitability of Experiment 7 as the optimal PID setting for the system.

4. CONCLUSION

This study presented an experimental investigation into the tuning and implementation of PID controllers for a low-cost quadcopter flight control system. A cascaded PID architecture was developed, consisting of an outer-loop attitude controller and an inner-loop angular-rate controller, with yaw stabilization achieved through a rate-based PID scheme. The proposed control strategy was implemented on an embedded flight controller platform and validated through real-time flight experiments. A systematic tuning procedure was employed to determine the optimal values of the proportional, integral, and derivative gains for roll-axis stabilization. By progressively adjusting K_p , K_i , and K_d , and evaluating controller performance using a sliding-

window integral metric, the study identified Experiment 7—defined by $K_p=6.00$, $K_i=0.10$, and $K_d=0.20$ —as the optimal configuration. This parameter set yielded the lowest error integral among all tested experiments, indicating superior roll-axis stability and disturbance rejection capability. The time-domain analysis of the best-performing experiment demonstrated that the roll-axis error remained within a narrow, stable range throughout the valid test duration, confirming the robustness of the tuned controller under real-world operating conditions. The results further emphasize that even with low-cost hardware and limited onboard computational resources, properly tuned PID controllers can deliver smooth attitude tracking, fast transient response, and consistent hovering performance.

On the whole, the experimental findings highlight the effectiveness and practicality of PID-based control for quadcopter stabilization. The adopted tuning methodology, along with the presented performance evaluation approach, can serve as a useful reference for researchers and practitioners developing cost-efficient aerial platforms. The complete source codes and datasets provided in the appendices offer a reproducible foundation for further studies on optimization, adaptive control, and advanced flight-control strategies.

REFERENCES

- Abdelkader, M., Mabrok, M., & Koubaa, A. (2022). OCTUNE: optimal control tuning using real-time data with algorithm and experimental results. *Sensors*, 22(23), 9240.
- Babu, T., Menon, A. C., Fazeen, M., KS, A. S., & Rajeev, A. (2025). Hybrid Quadcopter for Surveillance and Rescue Operations. *Journal of Applied Science, Engineering, Technology and Management*, 3(1), 15-22.
- Bhuvaneswary, N., Reddy, B. G., Reddy, K. P. K., Vardhan, M. V., Kumar, K. J., & Reddy, M. A. V. (2025, April). Quadcopter with Fuzzy Logic based Self-Tuning PID Controller. In 2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM) (pp. 559-563). IEEE.
- Borbolla-Burillo, P., Sotelo, D., Frye, M., Garza-Castañón, L. E., Juárez-Moreno, L., & Sotelo, C. (2024). Design and Real-Time Implementation of a Cascaded Model Predictive Control Architecture for Unmanned Aerial Vehicles. *Mathematics*, 12(5), 739.
- Izadi, M., Cobbenhagen, A. T. J. R., Sommer, R., Andriën, A. R. P., Lefeber, E., & Heemels, W. P. M. H. (2025). An Almost Globally Stable Tracking Controller for Quadcopters: A Model Predictive Control Approach. *IFAC-PapersOnLine*, 59(19), 322-327.
- Mien, T. L., Tu, T. N., & Van An, V. (2024). Cascade PID Control for Altitude and Angular Position Stabilization of 6-DOF UAV Quadcopter. *International Journal of Robotics & Control Systems*, 4(2).
- Peksa, J., & Mamchur, D. (2024). A review on the state of the art in copter drones and flight control systems. *Sensors*, 24(11), 3349.

- Qi, G. Y., Zhang, X. R., & Xu, L. (2025). Model compensation control of composite vertical take-off and landing UAV. *The Aeronautical Journal*, 129(1331), 224-239.
- Tang, J., & Mueller, M. W. (2025). PairTilt: Design and Control of an Active Tilt-Rotor Quadcopter for Improved Efficiency and Agility. *Advanced Intelligent Systems*, 2400494.
- Zakipour Behambari, S. M., & Khankalantary, S. (2025). Formation Control of Quadcopters with Variable Formation using Fuzzy-PID Controller. *Journal of AI and Data Mining*, 13(4), 407-425.
- Zhang, D., Loquercio, A., Tang, J., Wang, T. H., Malik, J., & Mueller, M. W. (2025). A learning-based quadcopter controller with extreme adaptation. *IEEE Transactions on Robotics*.
- Zhang, L., Haoyu, Z. H. O. U., Liang, J., Meng, X. I. E., & Guang, Y. A. N. G. (2024). Research on complementary filtered attitude solution method for quadcopter based on double filter preprocessing. *Mechanics*, 30(2), 159-167.

APPENDICES

Appendix A: Flight controller.

```
#include <Wire.h>
#include <Servo.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

int rc_p, rc_x, rc_y, thr;

float cmdPitch=0, cmdRoll=0, cmdYaw=0;

volatile float rateP, rateR, rateY;

float calRateP, calRateR, calRateY, calAccX, calAccY,
calAccZ;

float KpAngR=5.7, KpAngP=5.7, KiAngR=0.02, KiAngP=0.02,
KdAngR=0.20, KdAngP=0.20;

float KpRateR=5.7, KpRateP=5.7, KiRateR=0.02,
KiRateP=0.02, KdRateR=0.20, KdRateP=0.20;

float KpRateY=0, KiRateY=0, KdRateY=0;

uint32_t loopT;

float dt=0.025;

Servo s1,s2,s3,s4;

const int m1_pin=2, m2_pin=4, m3_pin=7, m4_pin=8;

volatile float pTermR,iTermR,dTermR,outR;
volatile float pTermP,iTermP,dTermP,outP;
volatile float pTermY,iTermY,dTermY,outY;

int thrIdle=1300, thrCutoff=1000;

volatile float desRateR, desRateP, desRateY;

volatile float errRateR, errRateP, errRateY;

volatile float inRoll, inThr, inPitch, inYaw;

volatile float prevErrRateR, prevErrRateP, prevErrRateY;
```

```
volatile float prevITermRateR, prevITermRateP,  
prevITermRateY;  
volatile float accX, accY, accZ;  
volatile float angR, angP;  
volatile float desAngR, desAngP;  
volatile float errAngR, errAngP;  
volatile float prevErrAngR, prevErrAngP;  
volatile float prevITermAngR, prevITermAngP;  
float compAngR=0.0, compAngP=0.0;  
volatile float mIn1, mIn2, mIn3, mIn4;  
void setup(void){  
    Serial.begin(9600);  
    Wire.begin();  
    Wire.setClock(400000);  
    delay(250);  
    Wire.beginTransaction(0x68); Wire.write(0x6B);  
Wire.write(0x00); Wire.endTransmission();  
    SD.begin(10);  
    if(SD.exists("datalog.txt")) SD.remove("datalog.txt");  
    delay(1000);  
    s1.attach(m1_pin,1000,2000); delay(1000);  
    s2.attach(m2_pin,1000,2000); delay(1000);  
    s3.attach(m3_pin,1000,2000); delay(1000);  
    s4.attach(m4_pin,1000,2000); delay(1000);  
    calRateR=-4.35; calRateP=3.31; calRateY=2.23;  
    calAccX=0.03; calAccY=-0.07; calAccZ=-0.02;  
    loopT=micros();  
}
```

```
void loop(void){  
    Wire.beginTransmission(0x68); Wire.write(0x1A);  
    Wire.write(0x05); Wire.endTransmission();  
  
    Wire.beginTransmission(0x68); Wire.write(0x1C);  
    Wire.write(0x10); Wire.endTransmission();  
  
    Wire.beginTransmission(0x68); Wire.write(0x3B);  
    Wire.endTransmission();  
  
    Wire.requestFrom(0x68,6);  
  
    int16_t AccXLSB=Wire.read()<<8|Wire.read();  
    int16_t AccYLSB=Wire.read()<<8|Wire.read();  
    int16_t AccZLSB=Wire.read()<<8|Wire.read();  
  
    Wire.beginTransmission(0x68); Wire.write(0x1B);  
    Wire.write(0x8); Wire.endTransmission();  
  
    Wire.beginTransmission(0x68); Wire.write(0x43);  
    Wire.endTransmission();  
  
    Wire.requestFrom(0x68,6);  
  
    int16_t GyroX=Wire.read()<<8|Wire.read();  
    int16_t GyroY=Wire.read()<<8|Wire.read();  
    int16_t GyroZ=Wire.read()<<8|Wire.read();  
  
  
    rateR=(float)GyroX/65.5; rateP=(float)GyroY/65.5;  
    rateY=(float)GyroZ/65.5;  
  
    accX=(float)AccXLSB/4096; accY=(float)AccYLSB/4096;  
    accZ=(float)AccZLSB/4096;  
  
    rateR-=calRateR; rateP-=calRateP; rateY-=calRateY;  
    accX-=calAccX; accY-=calAccY; accZ-=calAccZ;  
  
    angR=atan(accY/sqrt(accX*accX+accZ*accZ))*57.29;  
    angP=-atan(accX/sqrt(accY*accY+accZ*accZ))*57.29;  
  
    dt=(micros()-loopT)/1000000.0; loopT=micros();  
  
    KiAngR=0.02*0.025/dt; KiAngP=KiAngR;
```

```
KdAngR=0.20/0.025*dt; KdAngP=KdAngR;
KiRateR=0.02*0.025/dt; KiRateP=KiRateR;
KdRateR=0.20/0.025*dt; KdRateP=KdRateR;
KiRateY=0; KdRateY=0;
compAngR=0.991*(compAngR+rateR*dt)+0.009*angR;
compAngP=0.991*(compAngP+rateP*dt)+0.009*angP;
compAngR=(compAngR>20)?20:((compAngR<-20)?-
20:compAngR);
compAngP=(compAngP>20)?20:((compAngP<-20)?-
20:compAngP);
if(Serial.available()){
    String data=Serial.readStringUntil('\n');
    sscanf(data.c_str(), "%d,%d,%d",&rc_p,&rc_x,&rc_y);
}
thr=map(rc_p,0,1023,1000,1800);
cmdPitch=map(rc_y,0,1023,20,-20);
cmdYaw=map(rc_x,0,1023,-40,40);
if(abs(cmdPitch)<10) cmdPitch=0;
if(abs(cmdYaw)<20) cmdYaw=0;
inThr=thr; desAngR=cmdRoll; desAngP=cmdPitch;
desRateY=cmdYaw;
errAngR=desAngR-compAngR;
pTermR=KpAngR*errAngR;
iTermR=prevITermAngR+(KiAngR*(errAngR+prevErrAngR)*(dt
/2));
iTermR=(iTermR>400)?400:((iTermR<-400)?-400:iTermR);
dTermR=KdAngR*((errAngR-prevErrAngR)/dt);
outR=pTermR+iTermR+dTermR;
outR=(outR>400)?400:((outR<-400)?-400:outR);
```

```
desRateR=outR;
prevErrAngR=errAngR; prevITermAngR=iTermR;
errAngP=desAngP-compAngP;
pTermP=KpAngP*errAngP;
iTermP=prevITermAngP+(KiAngP*(errAngP+prevErrAngP)*(dt
/2));
iTermP=(iTermP>400)?400:((iTermP<-400)?-400:iTermP);
dTermP=KdAngP*((errAngP-prevErrAngP)/dt);
outP=pTermP+iTermP+dTermP;
outP=(outP>400)?400:((outP<-400)?-400:outP);
desRateP=outP;
prevErrAngP=errAngP; prevITermAngP=iTermP;
errRateR=desRateR-rateR;
errRateP=desRateP-rateP;
errRateY=desRateY-rateY;
pTermR=KpRateR*errRateR;
iTermR=prevITermRateR+(KiRateR*(errRateR+prevErrRateR)
*(dt/2));
iTermR=(iTermR>400)?400:((iTermR<-400)?-400:iTermR);
dTermR=KdRateR*((errRateR-prevErrRateR)/dt);
outR=pTermR+iTermR+dTermR;
outR=(outR>400)?400:((outR<-400)?-400:outR);
inRoll=outR;
prevErrRateR=errRateR; prevITermRateR=iTermR;
pTermP=KpRateP*errRateP;
iTermP=prevITermRateP+(KiRateP*(errRateP+prevErrRateP)
*(dt/2));
iTermP=(iTermP>400)?400:((iTermP<-400)?-400:iTermP);
```

```
dTermP=KdRateP*((errRateP-prevErrRateP)/dt);
outP=pTermP+iTermP+dTermP;
outP=(outP>400)?400:((outP<-400)?-400:outP);
inPitch=outP;
prevErrRateP=errRateP; prevITermRateP=iTermP;
pTermY=KpRateY*errRateY;
iTermY=prevITermRateY+(KiRateY*(errRateY+prevErrRateY)
*(dt/2));
iTermY=(iTermY>400)?400:((iTermY<-400)?-400:iTermY);
dTermY=KdRateY*((errRateY-prevErrRateY)/dt);
outY=pTermY+iTermY+dTermY;
outY=(outY>400)?400:((outY<-400)?-400:outY);
inYaw=outY;
prevErrRateY=errRateY; prevITermRateY=iTermY;
if(inThr>1800) inThr=1800;
mIn1=(inThr-inRoll-inPitch+inYaw);
mIn2=(inThr-inRoll+inPitch-inYaw);
mIn3=(inThr+inRoll+inPitch+inYaw);
mIn4=(inThr+inRoll-inPitch-inYaw);
if(mIn1>2000) mIn1=1999; if(mIn2>2000) mIn2=1999;
if(mIn3>2000) mIn3=1999; if(mIn4>2000) mIn4=1999;
if(mIn1<thrIdle) mIn1=thrIdle; if(mIn2<thrIdle)
mIn2=thrIdle;
if(mIn3<thrIdle) mIn3=thrIdle; if(mIn4<thrIdle)
mIn4=thrIdle;
if(thr<1030){
    mIn1=thrCutoff; mIn2=thrCutoff; mIn3=thrCutoff;
mIn4=thrCutoff;
    prevErrRateR=0; prevErrRateP=0; prevErrRateY=0;
```

```
    prevITermRateR=0; prevITermRateP=0;
prevITermRateY=0;

    prevErrAngR=0; prevErrAngP=0;

    prevITermAngR=0; prevITermAngP=0;
}

s1.writeMicroseconds((int)mIn1);
s2.writeMicroseconds((int)mIn2);
s3.writeMicroseconds((int)mIn3);
s4.writeMicroseconds((int)mIn4);

File dataFile=SD.open("datalog.txt",FILE_WRITE);
dataFile.print(micros()); dataFile.print(F(" "));
dataFile.println(errAngR,2);
dataFile.close();
}
```

Appendix B: Remote controller.

```
void setup() {
    Serial.begin(9600); // HC12 on hardware serial
}

void loop() {
    int p = analogRead(A0);//potentiometer
    int x = analogRead(A6);//joystick
    int y = analogRead(A7);//joystick
    Serial.print(p); Serial.print(",");
    Serial.print(x); Serial.print(",");
    Serial.println(y);
    delay(50);
}
```


Appendix C: Data link.

https://drive.google.com/drive/folders/1MLU_sWGopjnGyJr8Qk9MYs3M_hIcbpJl?usp=sharing

OPTIMIZATION OF BIODIESEL PRODUCTION THROUGH TRANSESTERIFICATION: A COMPREHENSIVE ASSESSMENT

Adem TÜYLÜ¹

1. INTRODUCTION

The continuous rise in global energy demand, which is closely linked to economic expansion, industrial development, and population growth, has made energy supply security a major international issue. Although fossil fuels such as petroleum, coal, and natural gas still dominate the global energy mix, the fact that these reserves are concentrated in limited geographical regions increases the vulnerability of energy markets to political and economic fluctuations. In addition, the gradual depletion of fossil resources and the growing cost of extraction heighten concerns regarding long-term energy dependence. From an environmental standpoint, the extensive use of fossil-based fuels plays a significant role in the increase of greenhouse gas emissions and the acceleration of global warming. The resulting environmental consequences, including the melting of polar ice, rising sea levels, prolonged droughts, and shifts in climate patterns, highlight the urgent need to adopt cleaner and more sustainable energy sources. Within this broader context, biodiesel has gained considerable attention as an alternative fuel option. This interest is largely due to its ability to be produced from various renewable feedstocks such as waste cooking oils, oily industrial residues, and animal fats, as well as its potential to lower emissions and reduce reliance

¹ Res. Asst.; Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering. ORCID: 0000-0001-9828-1573.

on conventional fossil fuels. As a result, biodiesel is viewed as one of the most promising renewable fuels for addressing both environmental challenges and the long-term limitations of fossil energy resources (Ergen, 2024; S. N. Gebremariam & Marchetti, 2018; Sahar et al., 2018; Tüylü et al., 2024).

Biodiesel can be produced through several established methods that aim to lower the high viscosity and low volatility inherent in crude vegetable and waste oils, properties that otherwise hinder their direct use in diesel engines. The primary techniques used to overcome these limitations include dilution, microemulsion formation, pyrolysis, and transesterification, each offering distinct chemical or thermal pathways to obtain fuel-compatible derivatives. In the dilution method, vegetable or waste oils are blended with diesel fuel or suitable solvents to decrease viscosity and improve combustion characteristics. The microemulsion method involves creating a thermodynamically stable colloidal dispersion, typically with alcohols such as methanol or ethanol acting as the organic phase to produce fine droplets that enhance fuel performance. Pyrolysis relies on thermal decomposition of high-molecular-weight triglycerides into smaller hydrocarbon molecules either by direct heating in closed systems or by distillation, yielding products that more closely resemble petroleum diesel. Among these techniques, transesterification is the most widely implemented process in biodiesel production, where oils react with short-chain alcohols in the presence of a catalyst to produce fatty acid alkyl esters, commonly referred to as biodiesel, along with glycerol as a by-product. This reaction, particularly when using methanol due to its low cost and reactivity, provides high conversion efficiency and generates a fuel that meets international biodiesel standards (Nayab et al., 2022; Tüylü et al., 2023).

2. BIODIESEL PRODUCTION VIA TRANSESTERIFICATION

2.1. Transesterification Reaction Mechanism

Transesterification is widely recognized as the most effective chemical pathway for converting oils and fats into biodiesel, primarily because it transforms triglycerides into alkyl esters whose physicochemical properties closely approximate those of conventional petroleum diesel. In this process, the naturally high viscosity of triglyceride-based feedstocks is significantly reduced, resulting in a fuel that can be utilized in standard diesel engines without requiring mechanical alterations. The reaction involves the interaction of triglycerides with a short-chain alcohol, typically methanol or ethanol, and although the conversion can proceed under elevated temperature or pressure, the use of a catalyst markedly enhances the reaction rate and overall efficiency. Transesterification is fundamentally reversible, but the presence of alkaline, acidic, or enzymatic catalysts promotes the forward reaction, facilitating the cleavage of triglyceride molecules and the formation of fatty acid alkyl esters alongside glycerol as a secondary product. This catalytic transformation is the core of most industrial biodiesel production systems, as it yields a high-purity ester-based fuel that satisfies international biodiesel specifications (Gebremariam & Marchetti, 2017). Figure 1 presents the mechanism of acid-catalyzed transesterification of vegetable oils.

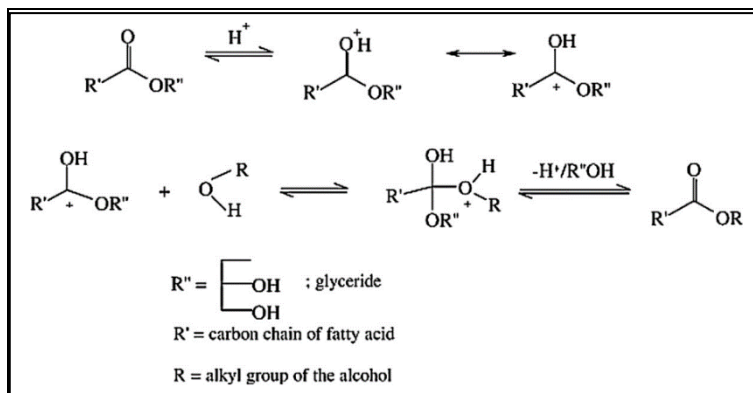


Figure 1. Mechanism of acid-catalysed transesterification of vegetable oils (Koh et al., 2011)

2.2. Alcohol Types and Their Effects

Alcohols constitute a key class of reactants in biodiesel synthesis, as they serve as acyl acceptors in the conversion of triglycerides to fatty acid esters. Although various monohydric aliphatic alcohols containing 1 to 8 carbon atoms have been investigated, methanol and, to a lesser extent, ethanol are the most employed due to their availability, reactivity, and cost-effectiveness. Methanol is particularly favoured because it reacts rapidly with triglycerides, dissolves readily in alkaline catalysts such as sodium hydroxide, and is generally easier to procure than ethanol. While other short-chain alcohols, including propanol, butanol, isopropanol, and branched alcohols, can also participate in the reaction, their higher cost limits their practical use. Overall, short-chain alcohols tend to provide higher conversion efficiencies within comparable reaction times, making them advantageous for industrial biodiesel production (Musa, 2016).

2.3. Catalyst Types

In biodiesel production, homogeneous and heterogeneous catalysts are widely used to accelerate the transesterification of triglycerides into fatty acid alkyl esters. Homogeneous and heterogeneous catalysts are classified within themselves (Figure

2). Homogeneous catalysts, especially alkaline types such as NaOH, KOH and sodium methoxide, are highly effective for oils with low free fatty acid content and enable fast reactions under relatively mild conditions. Their main disadvantages are soap formation, catalyst consumption and the difficulty of separating the catalyst when the free fatty acid content exceeds about 0.5 percent. Acidic homogeneous catalysts, including sulfuric acid, can process high free fatty acid feedstocks because they promote both esterification and transesterification, although they require longer reaction times, higher temperatures, and larger alcohol amounts. Heterogeneous catalysts provide an alternative with advantages such as reusability, simple separation and reduced wastewater formation. Solid acids, solid bases and bifunctional catalytic materials, including metal oxides, alkaline carbonates and sulfated oxides, are capable of catalyzing both esterification and transesterification steps. These catalysts are suitable for high free fatty acid oils, although they often need higher catalyst loading, increased alcohol to oil ratios and longer reaction times to achieve yields comparable to homogeneous systems (Athar & Zaidi, 2020).

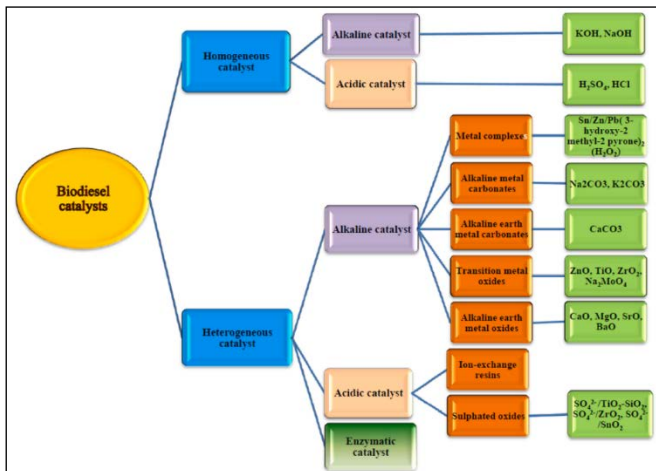


Figure 2. Classification of the catalysts used in biodiesel production (Athar & Zaidi, 2020)

2.4. Feedstock Properties and the FFA Challenge

Biodiesel production relies primarily on triglyceride-rich feedstocks such as vegetable oils, animal fats and recycled greases, each of which contains varying levels of FFA (free fatty acid) and impurities that influence both process efficiency and product quality. Vegetable oils, including soybean, canola, palm and rapeseed oils, typically exhibit low FFA content but may require degumming and refining to remove phospholipids and residual acids before transesterification. In contrast, animal-derived fats and recycled greases, such as tallow, lard, poultry fat and yellow grease, often contain substantially higher FFA levels, which can necessitate alternative processing strategies or pre-treatment steps to prevent soap formation and ensure high conversion efficiency. More challenging materials such as trap grease, brown grease and soapstock contain excessive FFA, water, solids and odor compounds, making them low-cost yet technically complex feedstocks with unresolved processing and contamination issues. Because biodiesel is formed through the reaction of triglycerides with a short-chain alcohol, typically methanol, the alcohol itself also serves as a major reactant, and catalysts are required to promote adequate mixing of the immiscible phases. Overall, the choice of feedstock strongly determines the required processing route, the achievable biodiesel yield and the quality of both the final fuel and the glycerin co-product (Ondruschat, 2020).

2.5. Key Process Parameters Influencing Transesterification Efficiency

The efficiency of the transesterification process and the quality of the resulting biodiesel are governed by several interrelated parameters, most notably the alcohol to oil molar ratio, reaction time, reaction temperature and catalyst type and concentration. The molar ratio strongly influences reaction

kinetics and biodiesel yield, since an excess of alcohol is required to shift the reversible reaction toward ester formation, although too much alcohol can complicate phase separation and increase energy demand for recovery. Reaction time also plays a critical role, as extending the duration generally increases conversion, but excessively long times may trigger side reactions such as saponification, particularly in feedstocks with high free fatty acid content. Reaction temperature affects both reaction rate and mass transfer; moderate temperatures improve miscibility and reduce viscosity, while temperatures above the alcohol's boiling point cause evaporation losses and safety concerns. Catalyst selection is equally important. Alkaline catalysts offer rapid conversion for low free fatty acid oils, whereas acidic catalysts are more suitable for high free fatty acid feedstocks but require longer reaction times and higher temperatures. Catalyst concentration must be optimized because insufficient catalyst reduces conversion and excessive amounts promote soap formation and increase viscosity. Together, these parameters determine not only biodiesel yield but also the energy efficiency, process stability and economic viability of the overall transesterification system (Suzihaque et al., 2022; Zheng & Cho, 2025). Figure 3 shows the production of biodiesel by the transesterification method.

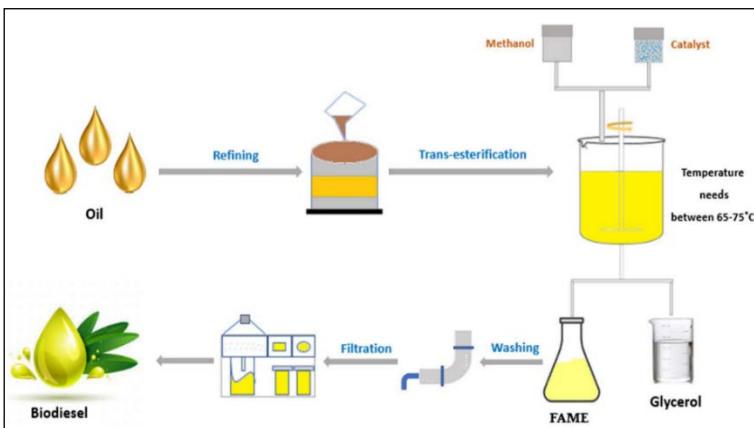


Figure 3. Process of biodiesel production (Bhan & Singh, 2020)

3. OPTIMIZATION OF TRANSESTERIFICATION PROCESSES

3.1. Importance of Optimization

Optimization plays a pivotal role in enhancing the efficiency, reliability, and economic feasibility of complex chemical and environmental processes. In biodiesel production, for instance, transesterification yield is highly sensitive to parameters such as alcohol molar ratio, catalyst concentration, reaction temperature, mixing speed, and reaction time. Conducting exhaustive experimental trials to explore all possible parameter combinations is impractical, costly, and time-consuming, particularly when nonlinear interactions are present. RSM (RSM) has emerged as a powerful statistical optimization tool that enables systematic evaluation of process variables, identification of significant interactions, and prediction of optimal operating conditions with minimal experimentation. By reducing experimental burden while improving process performance, RSM significantly contributes to the development of sustainable, scalable, and high-yield chemical processes (Kumar et al., 2024; Rana & Minceva, 2021).

3.2. Experimental Design and Optimization Methods

Biodiesel production studies rely on a combination of statistical and artificial intelligence-based tools to analyze complex parameter interactions and optimize process conditions. RSM uses structured designs such as Central Composite or Box–Behnken to model variable effects and generate predictive equations for process optimization. Alongside these statistical approaches, ANN are employed to capture nonlinear and multidimensional relationships between process inputs and biodiesel yield with higher accuracy. To further enhance optimization performance, global search algorithms including GA and PSO are applied to explore wide design spaces efficiently.

Hybrid platforms such as ANN–PSO combine data-driven learning with swarm-based search strategies, offering improved predictive capability and more reliable identification of optimal operating conditions. Together, RSM, ANN, PSO and hybrid ANN–PSO methodologies provide a comprehensive framework for modeling, analyzing and optimizing biodiesel production processes (Emeji & Patel, 2024; Soltani et al., 2022).

3.3. Selected Optimization Case Studies

In their studies (Gupta et al., 2019), a hybrid optimization framework integrating ANN with a genetic algorithm was employed to improve biodiesel production from waste cooking oil. In this work, the feedstock was pre-filtered and dehydrated before base-catalyzed transesterification, and key variables such as alcohol to oil molar ratio, catalyst concentration, and reaction temperature were used as ANN inputs. A feed-forward network trained with backpropagation achieved over 97 percent prediction accuracy. The genetic algorithm was subsequently applied to identify global optimal conditions, yielding an optimal molar ratio of 9:1, catalyst concentration of 1.25 wt percent NaOH, reaction temperature of 65 °C, and biodiesel yields of 97 to 98 percent. The findings demonstrated the strong predictive and optimization capability of the ANN–GA hybrid framework for biodiesel process design.

Rocha-Meneses et al. (Rocha-Meneses et al., 2023) conducted a study evaluating CaO and ZnO as heterogeneous catalysts for biodiesel production, employing a Box–Behnken RSM design to analyze the effects of reaction temperature, catalyst loading, and methanol to oil molar ratio. Their optimization results identified an optimal catalyst loading of around 3 wt percent, a molar ratio of 12:1, and a reaction temperature of approximately 65–70 °C, yielding 94–96 percent biodiesel. The findings showed that CaO maintained high

catalytic activity and stability over four reuse cycles, while ZnO exhibited lower reusability due to surface fouling. ANOVA results further indicated that catalyst loading and temperature were significant parameters influencing biodiesel yield ($p < 0.05$).

In this study (Taib, 2024), biodiesel production was optimized using a catalyst synthesized from magnetic porous nanosheets of graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4@\text{Fe}_3\text{O}_4$) combined with a protic ionic liquid. RSM with a Central Composite Design of 20 runs was applied to examine the effects of reaction time, catalyst dosage, and methanol to oil ratio, generating an RSM model with an R^2 of 0.9555. In addition, ANN and General Regression Neural Network (GRNN) models were developed using the Levenberg–Marquardt training algorithm and systematic parameter tuning. These AI-based models demonstrated markedly higher predictive performance, achieving R^2 values of 0.9998 for ANN and 0.9986 for GRNN. Overall, while RSM effectively captured the main interactions among variables, ANN and GRNN provided superior nonlinear prediction and more reliable optimization of biodiesel yield.

In this study (Garg & Jain, 2020), biodiesel production from algal oil was optimized using both RSM and ANN. A Box–Behnken experimental design was employed to examine the effects of reaction time, catalyst concentration, and methanol-to-oil ratio on biodiesel yield. The RSM model produced a statistically significant quadratic regression with an R^2 value of 0.9657, confirming its suitability for predictive analysis. In parallel, an ANN model developed using the Levenberg–Marquardt training algorithm and an optimized hidden layer achieved markedly higher predictive accuracy, with an overall R^2 of 0.99965. Comparison of predicted and experimental values showed lower error in the ANN model, demonstrating that AI-based modeling outperformed RSM in capturing nonlinear

relationships and providing more accurate optimization of biodiesel production conditions.

In this study (Emeji & Patel, 2024), biodiesel production from waste cooking soybean oil was optimized using a Box–Behnken RSM and an artificial neural network model. The effects of catalyst loading, methanol-to-oil molar ratio, and reaction temperature on the yield were systematically evaluated. The RSM model produced a highly significant quadratic regression with strong statistical validity, while the ANN model trained using the Levenberg–Marquardt algorithm offered accurate nonlinear prediction capability. Predicted yields were closely aligned with experimental values, reaching 94.04% for the RSM model, 93.99% for the ANN model, and 94.42% experimentally. Comparative evaluation based on error metrics and correlation coefficients indicated that both approaches were reliable; however, RSM demonstrated slightly superior predictive precision, whereas ANN exhibited strong adaptability for capturing nonlinear relationships. Overall, the combined use of RSM and ANN provided a robust framework for modeling and optimizing biodiesel production under varying process conditions. Table 1 provides a comparative overview of the success rates of the methods used in the studies presented above for biodiesel production optimization.

Table 1. Comparative analysis of transesterification optimization methods

Transesterification Process	Yield Optimization Method	Result	Reference
Biodiesel from waste cooking oil	ANN-GA hybrid optimization	ANN-GA achieved >97% accuracy and optimal yield (~97–98%).	Gupta, A., et al. (2019).
Biodiesel using CaO and ZnO heterogeneous catalysts	RSM (Box–Behnken design)	Optimal yield 94–96%; CaO showed higher activity and reusability.	Rocha-Meneses, L., et al. (2023).
Biodiesel using magnetic porous nanosheets of g-C ₃ N ₄ @Fe ₃ O ₄ + protic ionic liquid	RSM, ANN, and GRNN	ANN and GRNN outperformed RSM with higher R ² values.	Taib, M. (2024).
Biodiesel from algal oil	RSM and ANN	ANN provided higher accuracy than RSM.	Garg, A., & Jain, S. (2020).
Biodiesel from waste cooking soybean oil	RSM and ANN (Box–Behnken design)	Both models predicted yield well; RSM slightly more precise.	Emeji, U., & Patel, R. (2024).

4. CONCLUSION

Transesterification continues to serve as the principal pathway for biodiesel synthesis because of its operational simplicity, adaptability to diverse lipid feedstocks, and favorable reaction kinetics. However, the process is highly sensitive to catalyst formulation, feedstock FFA content, mass transfer limitations, and reaction thermodynamics. For this reason, precise optimization is essential to maximize conversion efficiency, reduce energy consumption, and maintain consistent biodiesel quality aligned with international standards.

Modern optimization methodologies, including RSM, ANN, GA, PSO, and hybrid models, provide strong analytical capabilities for addressing the nonlinear and multivariable nature of biodiesel systems. RSM enables statistically validated

modeling of parameter interactions, whereas ANN captures complex nonlinear relationships with high predictive accuracy. Hybrid approaches that integrate data-driven prediction with global search procedures further enhance optimization performance. The case studies presented in this chapter show that biodiesel yields above 95–99 percent can be achieved when reaction parameters are systematically optimized.

REFERENCES

- Athar, M., & Zaidi, S. (2020). A review of the feedstocks, catalysts, and intensification techniques for sustainable biodiesel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6).
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104523>
- Bhan, C., & Singh, J. (2020). Role of microbial lipases in transesterification process for biodiesel production. *Environmental Sustainability*, 3(3), 257–266.
<https://doi.org/10.1007/s42398-020-00119-9>
- Emeji, I. C., & Patel, B. (2024). Box-Behnken assisted RSM and ANN modelling for biodiesel production over titanium supported zinc-oxide catalyst. *Energy*, 308(August), 132765. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132765>
- Ergen, G. (2024). Comprehensive analysis of the effects of alternative fuels on diesel engine performance combustion and exhaust emissions: Role of biodiesel, diethyl ether, and EGR. *Thermal Science and Engineering Progress*, 47(September 2023), 102307.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102307>
- Garg, A., & Jain, S. (2020). Process parameter optimization of biodiesel production from algal oil by response surface methodology and artificial neural networks. *Fuel*, 277(June), 118254.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118254>
- Gebremariam, S. N., & Marchetti, J. M. (2018). Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, 168(May), 74–84.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.002>
- Gebremariam, Shemelis Nigatu, & Marchetti, J. M. (2017). Biodiesel production technologies: Review. In *AIMS*

Energy (Vol. 5, Issue 3).
<https://doi.org/10.3934/energy.2017.3.425>

Gupta, J., Agarwal, M., & Dalai, A. K. (2019). Intensified transesterification of mixture of edible and nonedible oils in reverse flow helical coil reactor for biodiesel production. *Renewable Energy*, 134, 509–525.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.057>

Koh, M. Y., Idaty, T., & Ghazi, M. (2011). *A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L . oil*. 15, 2240–2251.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.013>

Kumar, P., Kumar, D., Shankar, R., & Khare, P. (2024). Optimization of Biodiesel Yield and Cost Analysis from Waste Cooking Oil Using Box–Behnken Design with TiO₂–ZnO-Based Nano-catalyst. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 41(12), 3213–3226.
<https://doi.org/10.1007/s11814-024-00262-7>

Musa, I. A. (2016). The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 21–31.
<https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.007>

Nayab, R., Imran, M., Ramzan, M., Tariq, M., Taj, M. B., Akhtar, M. N., & Iqbal, H. M. N. (2022). Sustainable biodiesel production via catalytic and non-catalytic transesterification of feedstock materials – A review. *Fuel*, 328(July), 125254.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125254>

Ondruschat, B. (2020). Biodiesel Production Technology. *Catalysis from A to Z*, July.
<https://doi.org/10.1002/9783527809080.catatz01943>

- Rana, Adeem, G., & Minceva, M. (2021). Analysis of Photocatalytic Degradation of Phenol with Exfoliated Graphitic Carbon Nitride and Light-Emitting Diodes Using Response Surface Methodology. *Catalysts*.
- Rocha-Meneses, L., Hari, A., Inayat, A., Yousef, L. A., Alarab, S., Abdallah, M., Shanableh, A., Ghenai, C., Shanmugam, S., & Kikas, T. (2023). Recent advances on biodiesel production from waste cooking oil (WCO): A review of reactors, catalysts, and optimization techniques impacting the production. *Fuel*, 348(June 2022). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128514>
- Sahar, Sadaf, S., Iqbal, J., Ullah, I., Bhatti, H. N., Nouren, S., Habib-ur-Rehman, Nisar, J., & Iqbal, M. (2018). Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. *Sustainable Cities and Society*, 41(December 2017), 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.037>
- Soltani, H., Karimi, A., & Falahatpisheh, S. (2022). The optimization of biodiesel production from transesterification of sesame oil via applying ultrasound-assisted techniques: Comparison of RSM and ANN-PSO hybrid model. *Chemical Product and Process Modeling*, 17(1), 55–67. <https://doi.org/10.1515/cppm-2020-0076>
- Suzihaque, M. U. H., Alwi, H., Kalthum Ibrahim, U., Abdullah, S., & Haron, N. (2022). Biodiesel production from waste cooking oil: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 63, S490–S495. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.527>
- Taib, L. A. (2024). RSM and ANN methodologies in modeling the enhanced biodiesel production using novel protic ionic liquid anchored on g-C₃N₄@Fe₃O₄ nanohybrid.

Chemosphere, 360(February), 142399.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142399>

- Tüylü, A., Akin, Y., & Kesercioğlu, M. A. (2023). The Impact of Biodiesel Utilization as an Alternative Fuel in Diesel Engines on Engine Performance and Emissions. In *Measurement, Analysis and Manufacturing for Engineering Systems* (pp. 110–128). BIDGE Publications.
- Tüylü, A., Kolip, A., & Çelik, H. A. (2024). Etil Alkol Yakıtlı HCCI Motorun Performans, NO ve İş Emisyon Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(2), 1036–1049. <https://doi.org/10.29130/dubited.1184716>
- Zheng, F., & Cho, H. M. (2025). Study on Biodiesel Production: Feedstock Evolution, Catalyst Selection, and Influencing Factors Analysis. *Energies*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/en18102533>

COMPARISON OF BIOMASS ENERGY SOURCES AND PRODUCTION METHODS

Halit ARAT¹

Oguzhan ERBAS²

1. INTRODUCTION

Developing countries have also increased their use of renewable energy sources in recent years, given their growing importance, and have begun to diversify their energy sources. The use of biomass energy production systems that utilize waste, while minimizing carbon emissions and harming the environment, is expected to increase steadily. This study provides a detailed analysis of biomass production procedures, including their utilization practices. It also reviews research on targeted future utilization rates and presents biomass utilization scenarios.

As a result of the serious environmental problems created by conventional energy sources, the number of countries using renewable energy sources is increasing daily. To mitigate the impact of global warming, the use of carbon-based fuels and resources must be limited. Due to the growing population and limited supply of conventional fuels, one of the priority goals of countries is to use local energy resources efficiently (Akbulut et al., 2021). Furthermore, efficient use of energy plays a significant role in reducing environmental problems such as air pollution and

¹ Asst. Prof. Dr., Kutahya Dumlupinar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kutahya, Turkey, ORCID: 0000-0002-6634-2535.

² Assoc. Prof. Dr., Kutahya Dumlupinar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kutahya, Turkey, ORCID: 0000-0001-9424-4273.

global warming. Biomass, a renewable energy source, enables the use of various biodegradable wastes and contributes to countries' expansion of their energy diversity (Paul et al., 2019). Utilizing biomass, a domestic resource, is crucial for both increasing energy diversity and reducing external energy dependency.

While the total energy consumed in 2000 was 64415.40 PJ, this value decreased to 58461.10 PJ in 2022. However, the amount of imported energy remained almost at the same level in 2000 and 2022, being 36255.90 PJ and 36539.30 PJ, respectively. Therefore, while the external energy dependency rate of the European Union countries was 56.28% in 2000, this value increased to 62.50% in 2022. European Union countries use different resources to meet their total energy needs. The change in the amounts of these resources in the energy produced over the years is given in Figure 1 (Eurostat, 2022).

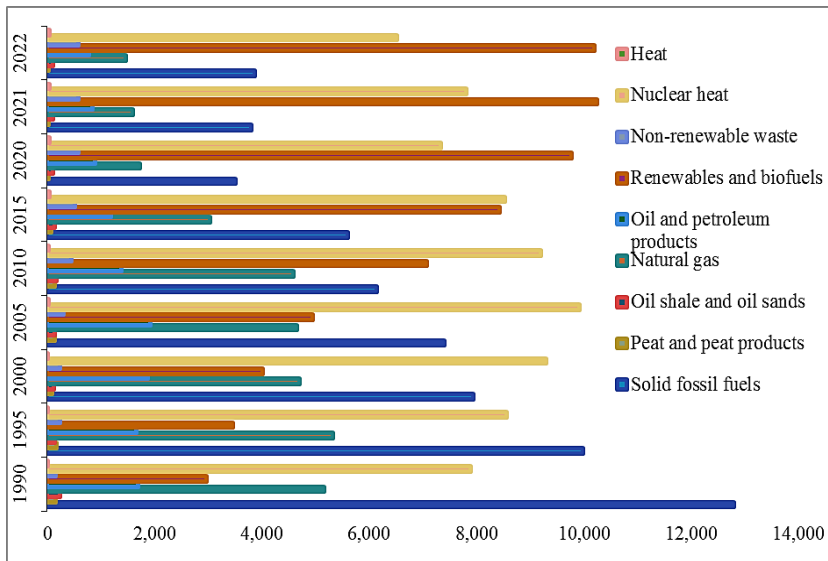


Figure 1. The change in the amount of energy produced by different sources over the years (Eurostat, 2022).

An examination of Figure 1 reveals that fossil-based solid fuels were at their peak in energy production between 1990 and

2000, but their use has decreased over the years, falling to third place by 2022. However, renewable and biofuels, which ranked fourth among energy sources in 1990, have increased their contribution to production each year, rising to first place since 2015 and consolidating their position, and remain in first place today. Due to the carbon emissions, the use of natural gas as an energy source has been limited, and its share of energy production has decreased since its peak in 1995. The share of petroleum and petroleum products in energy production has fluctuated over the years, but contributes to the energy produced, albeit at a lower rate.

To avoid energy supply problems, countries must increase the diversity of their energy sources. Furthermore, to minimize external dependency, they should develop policies to encourage the use of domestic energy resources and maximize their current use. Furthermore, identifying where their energy is being used is a top priority for efficient energy use.

2. BIOMASS ENERGY SOURCES

Biomass, obtained by leaving all kinds of organic, household, and agricultural waste to decompose, is an alternative energy source. Biomass energy, which can be used economically, offers significant environmental benefits by eliminating environmentally harmful waste. Furthermore, biomass resources are ubiquitous and available in a wide variety of forms, from household garbage and oil waste to factory waste, from forest and farm waste to greenhouse and livestock waste (Denizsel, 2021). Therefore, converting them into energy is quite easy with collection centers established in specific locations.

Biofuels have a significant advantage among renewable energy sources in that they do not contribute to the increase of carbon dioxide in the atmosphere (Working Group II Technical

Support Unit, 2022). The use of biofuels is an important energy source for utilizing waste and expanding national energy diversity. These materials are converted into solid, liquid, and gaseous fuels using biomass fuel processing methods (Demirtaş and Gün, 2007). The primary biomass sources are listed in Table 1 (European Commission, 2019).

Table 1. Primary Biomass Sources (European Commission, 2019).

Agricultural Resources	• Crop residues • Bagasse • Animal waste • Energy crops
Forest Industrial Resources	• Log residues • Wood processing byproducts • Black liquor from the pulp and paper industry • Firewood
Other Biological Resources	• Food waste • Food industry waste • Organic portion of municipal solid waste

Bioenergy (heat, electricity, and transport fuels) contributed 116,000 ktOE (kilotons of oil equivalent) to gross final energy consumption in 2016. This value accounts for 59% of the renewable energy sources that meet the amount of energy consumed by the European Union and 10% of all energy sources (European Commission, 2019). According to estimates, the EU consumed a total of 13,840 ktOE of biofuel in 2016. Biodiesel, with an energy potential of 11,083 ktOE, accounted for 80% of total bioenergy consumption, while bioethanol came in second with a 19% share in sustainable biofuel consumption (Antar et al., 2021). However, the total energy available from forest biomass alone is estimated to range between 119,000 and 186,000 ktOE in Europe in 2030 (PricewaterhouseCoopers EU et al., 2015).

In industry, biofuels such as wood chips, bark, or hazelnut shells are often used directly, as well as as enhanced solid biofuels such as pellets, charcoal, or heated biomass. One of the key factors in using enhanced biofuels is efficiency. Because raw biofuels are inefficient in some industries, such as iron and steel, they are subjected to a heat treatment process that increases their energy density. Another rationale for improving biofuels is that concentrated biofuels are cheaper and easier to transport and store. This makes it crucial to use biomass in locations other than where it was produced (Malico et al., 2019).

Biomass energy can be divided into two categories: traditional and industrial. The first is traditional energy, derived from plant and animal waste, as well as fuelwood from forests. The second type of energy, industrial biomass, includes waste from the forestry and forest-wood industries, urban waste, agricultural waste, and waste from energy forestry. Biomass can be used to generate energy in various ways. Different types of biofuels, or bioenergy, can be produced using biomass resources using the methods outlined in Figure 2.

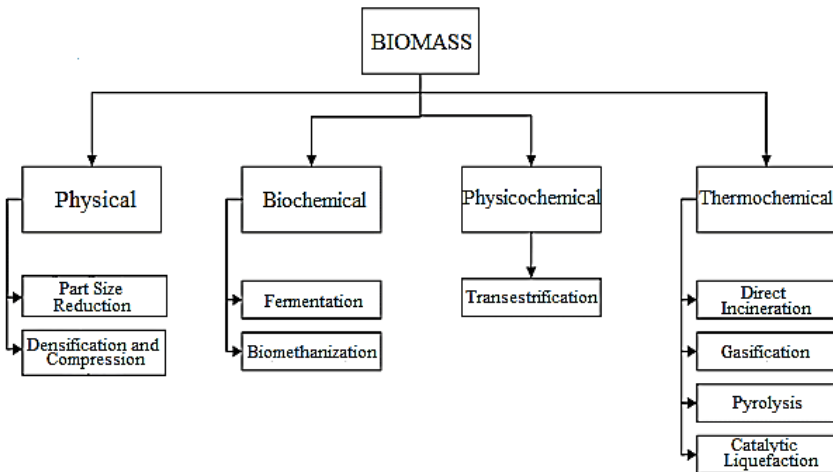


Figure 2. Energy production methods from biomass (TÜBA, 2022).

When Figure 2 is examined, biomass can be converted using four different methods: physical, biochemical, physicochemical and thermochemical.

2.1. Physical Methods

The physical process is carried out by particle size reduction, densification and compression.

2.1.1. Part Size Reduction

Existing high-sized biofuels are physically reduced in size through crushing, grinding, and cutting, allowing for more efficient use. Breaking thick wood, grinding plant waste, and grinding branches into sawdust are all examples of particle size reduction processes. Branches over 500 mm are called firewood, while 150-500 mm are classified as firewood, and 50-150 mm as wood chips. Furthermore, 15-50 mm is thick wood chips, 5-15 mm is thin wood chips, 1-5 mm is sawdust, and 0-1 mm is wood dust (Sözen et al., 2017).

2.1.2. Densification and Compression

Using agricultural and forest residues directly as biofuels is quite challenging because they occupy a large amount of space and, more importantly, lack a homogeneous structure. This problem can be solved by converting this type of biomass into briquettes or small, briquette-like pellets to increase their density in a compact and uniform manner. Pellets are a material with a diameter of 6–10 mm, created by compressing sawdust obtained from dried, ground, and processed wood residue under intense pressure. Briquettes are biofuels manufactured with a diameter of five to twenty centimeters (Üçgül and Akgül, 2010).

As part of the pelletizing process, biomass in its dispersed form is first dried, ground, and compressed under high pressure. Waste materials such as wood shavings, olive pulp, corn cobs, red pepper processing residues, cherry pits, and cottonseed meal can

be utilized in pellet production. It has a higher calorific value than uncompressed wood and, due to its lower moisture content, can be stored for longer periods. Pellets, which are cheaper and have lower carbon emissions than fossil fuels, have significant advantages such as being extremely durable and being safely transported to the consumer (Başbüyük et al., 2021).

Pellet or briquette biofuels, typically obtained by compression without the use of chemical binders, occupy less volume and achieve a higher calorific value than their predecessors. Furthermore, burning in incinerators is also suitable for use in an automated feed system, contributing positively to combustion efficiency.

2.2. Biochemical Methods

Biochemical methods can be evaluated under two headings: fermentation and biomethanization.

2.2.1. Fermentation

The fermentation process involves the secretion of enzymes derived from microbes that convert simple sugars found in raw biomass into low-molecular-weight compounds such as acids and alcohols. During fermentation, heat is used to convert starch in organic matter into sugars, which are then fermented to produce ethanol. Fermentation is a crucial process in biomass conversion, enabling the production of a variety of products in low-tech environments, and is completed in various processing stages and processes. The structure of the biomass feedstock determines the extent of fermentation in organic materials and is a factor that should be considered when selecting raw materials for this process. However, the best biomass sources are considered to be forest and agricultural wastes (Çolakoğlu et al., 2021).

Bioethanol is produced in three different ways from the different types of biomass used in the fermentation process. First-generation bioethanol is obtained by fermenting glucose found in corn, sugarcane, potatoes, wheat, and sugar beets. However, the main disadvantage of first-generation bioethanol is the potential threat to the global food supply, which could impact the global population because the biomass used also constitutes a staple food. This threat is likely to manifest as both a decrease in food supply and an increase in food prices due to the demand for bioethanol production. Furthermore, the inefficiencies in the production of first-generation bioethanol have paved the way for the emergence of highly efficient production methods through technological advancement. Second-generation bioethanol is produced by using lignocellulosic feedstocks and agricultural forest residues instead of food raw materials used in bioethanol production. Second-generation bioethanol production, which has the greatest advantage of not increasing food demand, is disadvantaged by the high cost associated with the advanced technology required on an industrial scale. However, forest destruction caused by indiscriminate and unregulated tree felling due to the need for woody raw materials is one of the obstacles to second-generation bioethanol production. Third-generation bioethanol, on the other hand, is produced through fermentation using marine microorganisms, and algae, which do not affect the demand for raw materials in the food and agricultural sectors, play a significant role in this process. However, the use of algae as a bioethanol feedstock is currently under investigation and is considered likely to be commercially available in the near future (Jambo et al., 2016).

2.2.2. Biomethanization

The physiological processes of microbial and energy metabolism are integrated into the anaerobic digestion cycle, along with the processing of raw materials under specific

conditions, and this cycle produces biogas from biomass. Biogas production through anaerobic digestion using organic waste worldwide is an environmentally friendly process. This technology can treat a wide variety of environmentally hazardous wastes, including industrial, domestic, and municipal wastewater, agricultural waste, and food industry waste. Biogas, the main product of anaerobic digestion, is a renewable energy source, and the byproduct of the process, the digester residue, with its high nutrient content, can be used as a high-quality fertilizer for plants. While countries' interest in this process is increasing every year, well-developed biogas industries within the European Union are found primarily in Germany, Denmark, Austria, and Sweden (Horváth et al., 2016).

The pH of the medium, the carbon/nitrogen ratio, the rate at which organic matter is loaded into the digester, and the average time required for organic matter decomposition are the main factors affecting the anaerobic digestion process for biogas production (Mao et al., 2015). Furthermore, temperature is one of the main factors affecting the microbial growth rate and activity of the anaerobic digester. Generally, during the winter season, heat generated by a solid-fuel boiler, a gas turbine powered by a portion of the produced biogas, or other renewable energy sources is used by biogas plants to generate and maintain the temperature required for stable biogas production in the anaerobic digester, especially during cold weather (Zhang et al., 2016). Furthermore, digested biological fertilizer, a byproduct of the biogas production process, saves significant amounts of irrigation water and fertilizer. (Arat and Erbaş, 2023; Szabó et al., 2014).

2.3. Physicochemical Methods

Transestrification, which can be defined as the reaction of fatty acids with alcohols with the help of a catalyst, is a physicochemical method.

2.3.1. Transestrification

It is a hydrolysis-like process in which alcohol is used instead of water to reduce the high viscosity of triglycerides, replacing the alcohol from one ester with another. Transesterification is a reversible reaction that occurs when the reactants are mixed, with a strong acid or base catalyst accelerating the process (Meher et al., 2006).

The resulting product from the transestrification process is biodiesel fuel, produced from waste lipids and boasting low emissions. The main factors affecting biodiesel yield in this process are the amount of alcohol, reaction time, reaction temperature, and catalyst concentration. In biodiesel production, a large amount of alcohol is used to ensure complete conversion of oils or fats into esters, and a higher alcohol-to-triglyceride ratio converts more esters in a shorter time. On the other hand, the conversion of fatty acid esters is proportional to the reaction time, with the highest yield reaching a maximum in under ninety minutes. However, as the reaction temperature (optimum 50°C-60°C) increases, the viscosity of the oils decreases, increasing the reaction rate and shortening the reaction time. Furthermore, due to the incomplete conversion of triglycerides to fatty acid esters due to the use of insufficient catalysts, triglyceride conversion and biodiesel yield increase with increasing catalyst concentration (Leung et al., 2010).

The products with a high fat content are considered potential sources for biodiesel production. These include edible vegetable oils (sunflower, soybean, peanut, etc.), inedible vegetable oils (sea mango, seaweed, algae, etc.), waste oils, and animal fats (tallow, chicken, and fish oil, etc.). The raw materials for biodiesel production must have high production capacity with as low production cost as possible, and the selection of the raw material depends on the soil conditions, climate, geographical

location, and agricultural practices of the countries. However, it has been revealed that the raw materials constitute 75% of the total biodiesel production cost (Atabani et al., 2012).

2.4. Thermochemical Methods

Thermochemical methods can be discussed under four subheadings: direct combustion, gasification, pyrolysis and catalytic liquefaction.

2.4.1. Direct Incineration

Biomass can be directly burned to generate heat to meet heating needs, or it can be converted into electricity through a specific process and used at the desired location. Direct burning is quite practical because it is used directly. However, due to its lower calorific value compared to fossil fuels, incineration is also used in conjunction with these fuels. On the other hand, although direct burning converts waste biomass into net heat and power energy, thus eliminating waste, the emissions generated during the combustion process pose a threat to the environment. Studies are being conducted on effective and highly efficient direct burning systems to mitigate this disadvantage (García et al., 2015; Hupa et al., 2017).

The combustion properties of biomass can be classified as macroscopic (moisture content, calorific value, bulk density, particle size, etc.) and microscopic (mineral content, chemical kinetics, thermal, etc.) (Obaidullah et al., 2012). Different types of biomass have different macroscopic and microscopic properties, and these properties should be taken into account for optimal combustion. However, ash formation due to mineral content can negatively affect the combustion system and the environment.

2.4.2. Gasification

Biomass gasification generally involves the conversion of solid/liquid organic compounds into gas/vapor phases. This is a crucial process that facilitates the expansion and widespread use of biomass for energy production (Molino et al., 2016). It is carried out in a reactor called a gasifier, in the presence of a gasification medium containing air, oxygen, water vapor, or carbon dioxide, and generally above 800°C (Yan et al., 2021). The calorific value of the product gas depends on the gasifier, and in biomass gasification, the carbon-to-hydrogen (C/H) mass ratio decreases, leading to an increase in the product calorific content due to the increased H₂ ratio. Many useful products are obtained from biomass gasification, such as syngas, heat, energy, biofuels, fertilizer, and biochar (Sikarwar et al., 2016).

Large industrial gasification plants with capacities exceeding 100 MWe of electricity equivalent exist worldwide. The market is dominated by coal- and oil-based gasifiers, with a variety of gasification technologies operating. Since 2001, new plants have been built primarily in China, while European gasifiers are primarily located in Germany (Kirkels and Verbong, 2011). Biomass gasification is one of the promising technologies that will replace fossil fuels and reduce CO₂ emissions (Kumar et al., 2009).

2.4.3. Pyrolysis

Pyrolysis, in its most basic form, is defined as the thermochemical decomposition of organic matter at high temperatures in the absence of oxygen. Besides, pyrolysis is an irreversible process that reverses the normal and complete combustion of organic matter in the presence of oxygen, producing carbon dioxide and water and leading to physical and chemical changes. Pyrolysis also produces a solid residue, also known as carbon-rich biochar, which also contains some

impurities such as aromatic compounds. Extensive pyrolysis, which primarily results in a solid carbon residue, is also called carbonization (Fahmy et al., 2020).

Pyrolysis is generally divided into three main types: conventional, flash, and rapid, depending on the time and temperature of the process. Although there are no sharp boundaries separating these industrial classifications, the relevant parameters are listed in Table 2 (Babu, 2008).

Table 2. Parameters of Different Pyrolysis Processes (Babu, 2008).

Parameters	Traditional Pyrolysis	Fast Pyrolysis	Flash Pyrolysis
Pyrolysis Temperature (K)	550-950	850-1250	1050-1300
Heating Rate (K/s)	0.1-1.0	10-200	<1000
Particle Size (mm)	5-50	<1	<0.2
Solid Retention Time (s)	450-550	0.5-10	<0.5

While conventional pyrolysis focuses on industrial biochar production, the biooil and biogas produced are also utilized as energy sources for pyrolysis. Additionally, conventional pyrolysis produces valuable chemicals such as acetone, methanol, and acetic acid. The primary component of fast pyrolysis products at lower temperatures is biooil, the liquid phase, although the type of biomass is also considered an important factor in determining the proportions of solid, liquid, and gaseous phases produced. The main components in fast pyrolysis products are biooil and biogas, which are in liquid and gaseous phases (Fahmy et al., 2020).

To fully implement pyrolysis technology, further research is needed to identify designs that remove gaseous oxygen from pyrolysis oil. The potential for application in a wide variety of situations and the wide variety of products produced through this process are key advantages of this process. However, creating a sustainable design for all possible applications is quite

challenging. Furthermore, balanced financial investments aimed at generating new knowledge, technologies, and markets to establish a unified vision for the use of pyrolysis technologies are crucial for the development and advancement of this process (Uddin et al., 2018).

2.4.4. Catalytic Liquefaction

Catalytic liquefaction is an efficient way to produce liquid biofuel from biomass from plant dry matter. Two types of catalysts are used in this process: homogeneous and heterogeneous. Homogeneous alkaline catalysts are the most commonly used and studied catalysts, but they cannot be reused because they cannot be recovered at the end of the process. The use of heterogeneous catalysts allows overcoming this problem by maintaining high activity and selectivity in biocrude production and enabling recovery and reuse. However, heterogeneous catalysts are generally less preferred than homogeneous catalysts due to the limitations associated with liquid-solid and gas-solid reactions (Scarsella et al., 2020).

The mechanism of catalytic liquefaction is quite complex and essentially occurs in three main steps: depolymerization, decomposition, and recombination. In this process, biomass decomposes and depolymerizes into small, highly reactive compounds. In the second step, dehydration (loss of water molecules), decarboxylation (loss of CO₂ molecules), and deamination (removal of amino acid content) occur. A third step then occurs, where the first process steps are reversed due to hydrogen deficiency. Under conditions where hydrogen is absent or its concentration is extremely high, the fragments recombine or repolymerize to form high molecular weight coal compounds (Gollakota et al., 2018).

The use of moderate temperatures and high pressures in catalytic liquefaction, an effective method for converting biomass

to biofuel, presents some challenges. Although acid catalysts improve bio-oil production, they are not widely used as alkali catalysts because of their tendency to polymerize, leading to undesirable charring, and their potential to clog reactor lines. Another negative aspect of catalytic liquefaction is the corrosion that results from excess acid production. These negative effects can be mitigated by constructing reactors using corrosion-resistant materials (Nagappan et al., 2021).

3. CONCLUSION

Due to the recent rise in the importance of renewable energy sources, developing countries have begun to diversify their energy sources and expand their use. It is anticipated that the use of systems for generating biomass energy from waste with low carbon emissions and low environmental impact will increase steadily. This study provides a comprehensive analysis of biomass energy sources and the methods used to generate them. Furthermore, current usage patterns are presented and research on projected future usage rates is evaluated.

To prevent energy supply problems, countries need to further diversify their energy sources. To reduce dependence on external resources, regulations should be established to encourage the use of regional energy resources and ensure they are used as efficiently as possible. Furthermore, the most important step in using energy efficiently is to monitor where the energy they consume is going and the capacity of existing resources.

Biomass can be converted into useful energy using four different methods: physical, biochemical, physicochemical, and thermochemical. In industry, biofuels such as woodchip, bark, or hazelnut shells are often used directly, as well as solid biofuels such as pellets, charcoal, or heated biomass. One of the key factors in using enhanced biofuels is efficiency. Because raw

biofuels are inefficient in some industries, such as iron and steel, they undergo heat treatment to increase their energy density. Another rationale for improving biofuels is that concentrated biofuels are cheaper and easier to transport and store. This makes it crucial to utilize biomass in locations other than where it was produced.

Biomass, expected to increase its share of countries' energy consumption in the future, is a significant and increasingly popular energy source thanks to its significant advantages, such as its environmental friendliness and the potential for waste recycling. The use of biogas is increasing each year in our country and globally, and the share of biomass in heat/power generation is expected to increase further in the future (Arat and Erbaş, 2023).

REFERENCES

- Akbulut, A., Arslan, O., Arat, H., Erbas, O. 2021. "Important aspects for the planning of biogas energy plants: Malatya case study". *Case Studies in Thermal Engineering*, 26.
- Antar, M., Lyu, D., Nazari, M., Shah, A., Zhou, X., Smith, D. L. 2021. "Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Arat, H., Erbaş, O. 2023. "Biyogaz Üretimi İle Entegre Enerji Santrali Tasarım Ve İşletme Parametrelerinin İrdelenmesi". *İçinde Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırma ve Değerlendirmeler* (ss. 111–124).
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., Mekhilef, S. 2012. "A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Babu, B. V. 2008. "Biomass pyrolysis: A state-of-the-art review". *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*.
- Başbüyük, Ü. F., Aybek, A., Üçok, S. 2021. "Pamuk Çiğidi Küspesi ve Kırmızı Biber İşleme Atıklarından Biyoyakıt Amaçlı Pelet Elde Edilmesi". *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(4).
- Çolakoğlu, M., Aslan, S., Kumdereli, E. 2021. "*Biyokütle ve Biyoenerji Sektörlerine Genel Bakış*". İstanbul.
- Demirtaş, M., Gün, V. 2007. "Avrupa ve Türkiye'deki Biyokütle Enerjisi". *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 3.1, 49–56.
- Denizsel, A. 2021. "Biyokütle". *Mühendis ve Makina Güncel*, 45–47. Tarihinde adresinden erişildi

<https://www.mmo.org.tr/aralik-2021-sayi-60/makale/makale-biyokutle>

- European Commission, J. R. C. 2019. "Brief on biomass for energy in the European Union". EC publication.
- Eurostat. 2022. "Energy statistics - an overview - 2022". Tarihinde 19 Mayıs 2024, adresinden erişildi https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview&oldid=627198#Imports_and_exports
- Fahmy, T. Y. A., Fahmy, Y., Mobarak, F., El-Sakhawy, M., Abou-Zeid, R. E. 2020. "Biomass pyrolysis: past, present, and future". Environment, Development and Sustainability.
- García, R., Pizarro, C., Álvarez, A., Lavín, A. G., Bueno, J. L. 2015. "Study of biomass combustion wastes". Fuel, 148.
- Gollakota, A. R. K., Kishore, N., Gu, S. 2018. "A review on hydrothermal liquefaction of biomass". Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Horváth, I. S., Tabatabaei, M., Karimi, K., Kumar, R. 2016. "Recent updates on biogas production - A review". Biofuel Research Journal.
- Hupa, M., Karlström, O., Vainio, E. 2017. "Biomass combustion technology development - It is all about chemical details". Proceedings of the Combustion Institute, 36(1).
- Jambo, S. A., Abdulla, R., Mohd Azhar, S. H., Marbawi, H., Gansau, J. A., Ravindra, P. 2016. "A review on third generation bioethanol feedstock". Renewable and Sustainable Energy Reviews.

- Kirkels, A. F., Verbong, G. P. J. 2011. "Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview". Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Kumar, A., Jones, D. D., Hanna, M. A. 2009. "Thermochemical biomass gasification: A review of the current status of the technology". Energies.
- Leung, D. Y. C., Wu, X., Leung, M. K. H. 2010. "A review on biodiesel production using catalyzed transesterification". Applied Energy.
- Malico, I., Nepomuceno Pereira, R., Gonçalves, A. C., Sousa, A. M. O. 2019. "Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry". Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., Ren, G. 2015. "Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion". Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Meher, L. C., Vidya Sagar, D., Naik, S. N. 2006. "Technical aspects of biodiesel production by transesterification - A review". Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Molino, A., Chianese, S., Musmarra, D. 2016. "Biomass gasification technology: The state of the art overview". Journal of Energy Chemistry, 25(1).
- Nagappan, S., Bhosale, R. R., Nguyen, D. D., Chi, N. T. L., Ponnusamy, V. K., Woong, C. S., Kumar, G. 2021. "Catalytic hydrothermal liquefaction of biomass into bio-oils and other value-added products – A review". Fuel, 285.
- Obaidullah, M., Bram, S., Verma, V. K., De Ruyck, J. 2012. "A review on particle emissions from small scale biomass combustion". International Journal of Renewable Energy Research, 2(1).

- Paul, S., Dutta, A., Thimmanagari, M., Defersha, F. 2019. "Techno-economic assessment of corn stover for hybrid bioenergy production: A sustainable approach". *Case Studies in Thermal Engineering*, 13.
- PricewaterhouseCoopers EU, Leyman, P., Vanhoucke, M., Martinot, E., Chaurey, A., Lew, D., ... Park, J. 2015. "Sustainable and optimal use of biomass for energy in the EU beyond 2020 - Annexes of the Final Report". *International Journal of Production Research*, 2(9).
- Scarsella, M., de Caprariis, B., Damizia, M., De Filippis, P. 2020. "Heterogeneous catalysts for hydrothermal liquefaction of lignocellulosic biomass: A review". *Biomass and Bioenergy*.
- Sikarwar, V. S., Zhao, M., Clough, P., Yao, J., Zhong, X., Memon, M. Z., ... Fennell, P. S. 2016. "An overview of advances in biomass gasification". *Energy and Environmental Science*.
- Sözen, E., Gündüz, G., Aydemir, D., Güngör, E. 2017. "Biyokütle Kullanımının Enerji, Çevre, Sağlık ve Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi". *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19(1).
- Szabó, G., Fazekas, I., Szabó, S., Szabó, G., Buday, T., Paládi, M., ... Kerényi, A. 2014. "The carbon footprint of a biogas power plant". *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(11).
- TÜBA. 2022. "*Biyokütle Enerjisi Raporu*". (M. H. ALMA, Ed.) (TÜBA Rapor). Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları. Tarihinde adresinden erişildi <https://tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-01-6.pdf>

- Üçgül, İ., Akgül, G. 2010. "Biyokütle Teknolojisi". Yekarum Dergi, 1(1).
- Uddin, M. N., Techato, K., Taweeekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., Ashrafur, S. M. 2018. "An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies". Energies.
- Working Group II Technical Support Unit. 2022. "*Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*". USA. Tarihinde adresinden erişildi https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- Yan, M., Afxentiou, N., Fokaides, P. 2021. "The State of the Art Overview of the Biomass Gasification Technology". Current Sustainable Renewable Energy Report, 8, 282–295.
- Zhang, G., Li, Y., Dai, Y. J., Wang, R. Z. 2016. "Design and analysis of a biogas production system utilizing residual energy for a hybrid CSP and biogas power plant". Applied Thermal Engineering, 109.

AN OVERVIEW OF THE CURRENT TECHNIQUES FOR THE CONTROL OF PARTICULATE MATTER EMISSIONS IN DIESEL ENGINE SYSTEMS

Hasan Üstün BAŞARAN¹

1. INTRODUCTION

Nowadays, diesel engines are the leading power provider for highway and maritime transport in the world. Their fuel saving, reliable and durable operation are highly advantageous to maintain sustainable transport. However, despite their improved fuel economy and cost benefit, high rates of nitrogen oxide (NO_x) and particulate matter (PM) released from these engines present a paramount threat for their common use in automotive vehicles in the coming years (Khanna et al., 2025). Both NO_x and PM are found to be harmful to human health. PM, in specific, is considered to contribute to cardiovascular diseases in humans (Anderson et al., 2012). Therefore, reduction of NO_x & PM in on-road vehicles is desired by environmental organizations in the world to protect the environment and the human health. Maintaining the sufficient engine power with these emission-dependent restrictions inevitably necessitates some serious adjustments for the diesel engine system, which is challenging for many engine producers. Thus, there is an ongoing search for the fuel-efficient and cost effective practical techniques to control emission rates in diesel engines (Rahman et al., 2021).

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

The stringent emission standards for highway vehicles equipped with diesel engines pose a significant difficulty for engine manufacturers. The evolution of PM limit in European Union (EU) for heavy-duty (HD) diesel engines is highlighted in Figure 1 below (Dieselnet, 2025). The PM limits are seen to be constantly decreased for HD diesel engines since 1992. While HD vehicles were allowed to release a PM rate of up to 0.612 g/kWh in Euro 1 norms, they were restricted to a rate of 0.02 g/kWh in 2005 in Euro IV norms. Euro VI norms, which are valid today for HD vehicles, further decrease the limit to as low as 0.01 g/kWh. It is seen that even this stringent limit is not found to be adequate by the EU, as the PM limit for HD vehicles will be reduced down to 0.008 g/kWh in the coming Euro VII norms, which is planned to be valid in 2028, as indicated in Figure 1. It is evident that future automotive vehicles will have to deal with noticeably strict PM norms. Thus, to meet the aforementioned highly tight regulations, some advanced strategies should be developed to ensure the sufficient reduction of PM rates in diesel vehicles in the coming decade (Luo et al., 2023a; Başaran & Duranay, 2025).

Stage	Date	Test	CO	HC	CH ₄	NO _x	NH ₃	N ₂ O	PM	PN	Smoke
			g/kWh							1/kWh	1/m
Euro I	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1		8.0			0.612		
	1992, > 85 kW		4.5	1.1		8.0			0.36		
Euro II	1996.10		4.0	1.1		7.0			0.25		
	1998.10		4.0	1.1		7.0			0.15		
Euro III	1999.10 EEV only	ESC & ELR	1.5	0.25		2.0			0.02		0.15
	2000.10		2.1	0.66		5.0			0.10 ^a		0.8
Euro IV	2005.10	WHSC	1.5	0.46		3.5			0.02		0.5
Euro V	2008.10		1.5	0.46		2.0			0.02		0.5
Euro VI	2013.01		1.5	0.13		0.40	10 ppm		0.01	8.0×10 ¹¹ b	
Euro VII	2028.05.29		1.5	0.080 ^d	0.5	0.200	0.060	0.20	0.008	6.0×10 ¹¹ c	

^a PM = 0.13 g/kWh for engines < 0.75 dm³ swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min⁻¹
^b PN₂₃
^c PN₁₀
^d NMOC

Fig. 1 EU emission norms (steady-state testing) for heavy-duty diesel engines (Dieselnet, 2025)

Figure 1 vividly demonstrates the demand from environmental agencies for low PM rates in diesel vehicles. Euro VII norms will be less tolerant compared to previous norms and will demand the release of almost zero PM from HD vehicles, which will be particularly challenging for the producers. Moreover, considering the rise in electric vehicles, which do not cause any PM into the environment, diesel vehicles are not only faced with strict norms but also competitiveness in the market. However, they still have the more matured technology, more advanced sub-industry and improved service stations compared to electric vehicles. They can still be widely used if some proper adaptation in the engine system is provided for minimized PM.

This study provides an overview of currently applicable methods to reduce PM rates in diesel engines. Modulated fuel injection timing and injection pressure, water emulsified fuel, diesel particulate filter (DPF), active and passive regeneration of DPF can be stated as the modern practical methods for the solution of high exhaust-out PM rates in compression-ignition engine systems. The following section explicitly examines the implementation of those techniques to improve PM rates in diesel engines.

2. CURRENT METHODS TO REDUCE PM RATES IN DIESEL ENGINES

As stated previously, modern vehicles should have a dependable strategy to maintain their performance without causing undesirable PM rates into the environment. Researchers examine both engine-dependent (mostly via combustion modulation) and engine-independent (generally through use of an after-treatment unit) techniques to curb PM rates in diesel engine systems. The combustion control techniques mostly depend on the variation of fuel injection parameters and fuel properties and

can be seen as an internal measure. However, equipping the system with a DPF device at the outlet of the exhaust unit is independent from the engine system and can be seen as an external measure (Dong et al., 2022). Thus, it appears that there are alternative PM-reducing solutions and proper usage of these internal and external measures for different engine operations can play a considerable role to achieve low PM rate in highway vehicles. As the first method, actuated fuel injection timing and injection pressure, an internal measure, is explained in the subsection below.

2.1. Modulating fuel injection timing and injection pressure

Internal measures can be used to control PM rates in diesel engine systems. One of those internal measures is the adjustment of the fuel injection timing in the engine system. It is generally seen that as the injection timing is advanced, the combustion characteristics are improved and the PM size and concentration are reduced (Dhahad et al., 2021). However, maintaining the injection timing at earlier angles (close to top dead center (TDC) during power stroke or far from TDC during compression stroke) increases the in-cylinder temperature and thus, rises the NO_x rate of the engine system (Aldarwish et al., 2024). There should be a trade-off between PM and NO_x rates as this technique is applied in the system. Thus, aggressive use of it should be avoided to keep NO_x rate at low levels.

Another engine-base technique to reduce PM rates is to vary the fuel injection pressure in the diesel engine system. The increased fuel injection pressure mostly enables improved atomization of the fuel, which enhances the fuel-air mixture in the system. The droplet size of the injected fuel can be decreased through this technique and thus, a more efficient in-cylinder combustion can be maintained. This more complete in-cylinder

burning process is less likely to produce particles before the exhaust valve opens. Therefore, lower PM rates are obtained at exhaust outlet (Agarwal et al., 2013). The impact of fuel injection pressure in PM rate of a diesel engine is demonstrated in Figure 2 below (Tamilarasan & Ramesh Kumar, 2021). It is explicit that the amount of PM (g/kWh) generated in the engine system is inversely related with the injection pressure of the fuel.

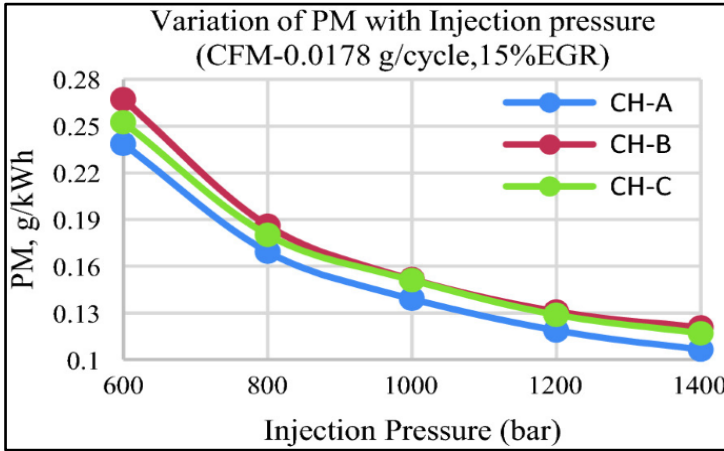


Fig. 2 Effect of fuel injection pressure in a diesel engine PM rate (g/kWh) (Tamilarasan & Ramesh Kumar, 2021)

As indicated vividly in Figure 2, the PM rate exceeds 0.6 g/kWh when injection pressure is maintained at 600 bar, relatively at a low level. However, as the pressure is increased up to 1000 bar, at a relatively high level, the PM rate is decreased below 0.5 g/kWh. It is derived that even if the injection pressure is not doubled in the system, the PM rate is moderately enhanced (close to % 20). As the injection pressure is further raised up to 1200 bar or above up to 1400 bar, the PM rate is diminished close to 0.4 g/kWh, which is a considerable improvement (% 33) compared to nominal injection pressure (600 bar) mode. In comparison to injection timing modulation, high injection pressure can be more helpful to minimize PM rates without causing any negative effect in NO_x rate.

2.2. Water emulsified fuel

The adjustment of fuel injection characteristics is one way to control PM rates in diesel engines. One other internal measures to decrease PM rates in diesel engines is to utilize water emulsified fuel. Instead of utilizing pure diesel fuel in the system and modulate its injection parameters, water emulsified fuel can be directly injected into the cylinders without changing the injection parameters of the fuel. This method can be applied to curb both NOx and PM rates in diesel vehicles (Obunaonye et al., 2025). Mainly, the emulsion of water reduces the in-cylinder temperature and thus, improves the NOx rate in diesel engines. It is also helpful to expand the premixed combustion process via micro-explosion and therefore, induces enhanced fuel-air mixture and prevents high PM generation during the combustion process (Park et al., 2016). Although it is possible to implement water emulsified fuel with different water percentages, the rate of water is mostly kept below % 20. The effect of different emulsions at different loads in PM rate is shown in Figure 3 below (Gopidesi & Selvi Rajaram, 2022).

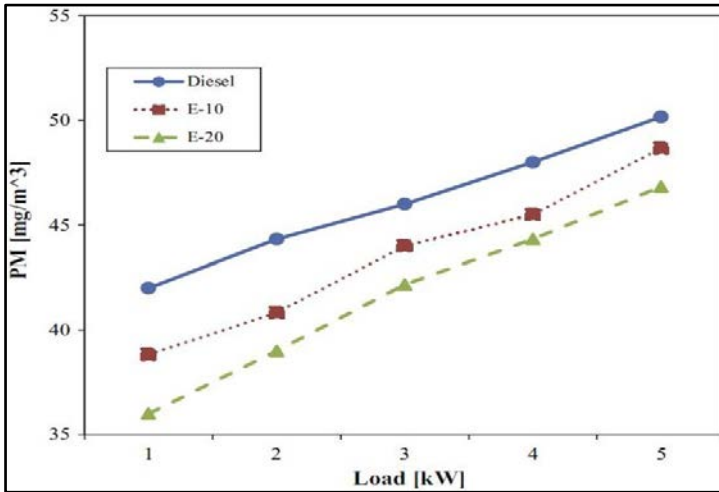


Fig. 3 The influence of different emulsions in PM rate at different engine loads (Gopidesi & Selvi Rajaram, 2022)

It is seen that compared to pure diesel fuel, % 10 water emulsified fuel (E-10) results in a moderate reduction in almost all loads examined in Figure 3. Moreover, as the emulsified fuel rate is increased to % 20 (as E-20), PM rate can be further diminished (almost % 15 lower PM at 1 kW engine load). The decrease in PM rate is found to be more significant via both E-10 and E-20 at relatively low engine loads. The dramatic reduction in PM rate at low loads can be attributed to the fact that at these loads (particularly, below 2 kW), where total fuel consumption is maintained at low rates, introducing water during the burning phase through emulsified fuel can improve the fuel-air mixing and the in-cylinder micro-explosion process. Therefore, unlike pure diesel fuel-injected mode, much longer premixed combustion can be achieved via water emulsified fuel injection (through E-10 and E-20) at relatively low loads, which evidently results in highly enhanced PM rates in Figure 3.

2.3. Diesel particulate filter (DPF)

Previous strategies for PM control depend on the alteration of engine parameters, which are directly related to engine operation. The PM formation is aimed to prevent before the exhaust unit via these techniques. However, unlike these pre-exhaust control techniques, a post-exhaust technique can be implemented in diesel engine systems to limit PM emissions. The most common post-exhaust method is to place an after-treatment unit, a DPF device, in the exhaust system.

DPF is a highly practical and effective technology to reduce PM rates in diesel vehicles. In a way, it is a particulate trapper device performing in the exhaust system. Since it is situated at the downstream of exhaust port, it can be seen as a post-treatment facility to cut down on PM rates in the engine system. The working mechanism of a typical DPF unit is illustrated in Figure 4 below (DPF Cleaning Centre, 2025).

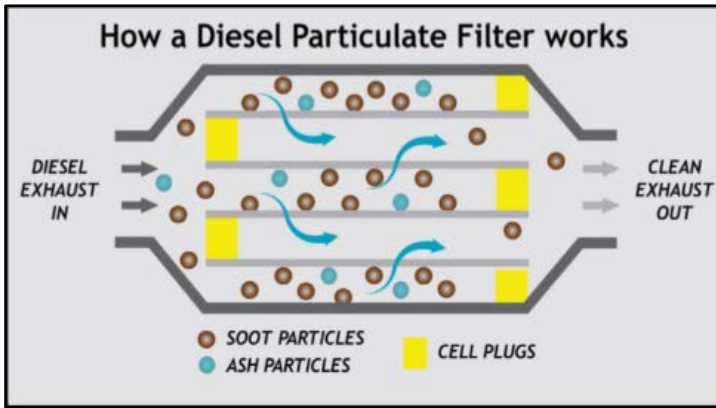


Fig. 4 Operation of a DPF system (DPF Cleaning Centre, 2025)

As seen, the primary objective of the DPF unit is to collect the soot and ash particles from the diesel exhaust gas leaving the engine system. The cell plugs in Figure 4 are properly placed at the inlet and outlet of the DPF device to modulate the motion of the engine-out flow. The exhaust flow with high rates of particles is forced to pass over porous layers due to impenetrable cell plugs before exiting the DPF unit. Most of the particles in the exhaust flow are trapped on the porous layers and only a very small amount is directed to the DPF outlet. Therefore, filtered much cleaner exhaust gas is allowed to flow out of the DPF system. As the filter material for the DPF system, ceramics, metal-based and composite materials can be utilized considering the variation of different system requirements such as particle capture efficiency or regeneration effectiveness or regeneration technique preference (Seo et al., 2012). It is seen that ceramic filters are commonly preferred for this after-treatment unit in modern highway vehicles due to their improved thermal resistance and stability (Yildiz et al., 2021).

DPF requires the exhaust system to be equipped with an additional component. That is costly compared to on-engine techniques, which mostly need relatively small modifications such as the delay of fuel injection timing. Moreover, particularly

if the DPF unit is not regularly cleaned, forcing the engine-out gas flow through an extra device in the exhaust system can result in high exhaust backpressure and a possible rise in fuel consumption due to increased pumping loss. Another drawback is the thermal management need of these systems to maintain the high PM-trapping performance of filters (Bai et al., 2017).

Constant exhaust flow results in storage of high rates of particles in the filters of DPF unit. Therefore, one significant challenge for the DPF system is to ensure the regular clean-up of its filter. After a certain storage level, the accumulated particles inside this system should be removed to maintain the effectiveness of particulate filter. Obviously, without a good level of periodic filter cleanup, only a small percentage of particles in the exhaust flow is trapped inside the DPF and thus, the engine system inevitably operates above the PM limit. Some regeneration techniques, active and passive regeneration, are developed to eliminate this undesirable situation in diesel engine systems (Luo et al., 2023b). In the following sections, those two filter-cleaning techniques are examined as a means of improving the performance of DPF.

2.4. Active regeneration of DPF

One of the methods to remove the collected high rates of PM inside the filter of a DPF unit is to implement active regeneration in the system. This process is called “active” since it mainly depends on rising the exhaust temperature via either engine design parameter modulation such as intake throttling, variable valve timing (VVT) (Basaran, 2023) or using some outer-engine energy source such as electrical heating as seen in Figure 5 (Sun et al., 2021). While the first category, which relies on inner-engine techniques, is named as internal methods, the second category is named as external methods since those

measures require an additional equipment such as a burner to improve temperature at DPF inlet.

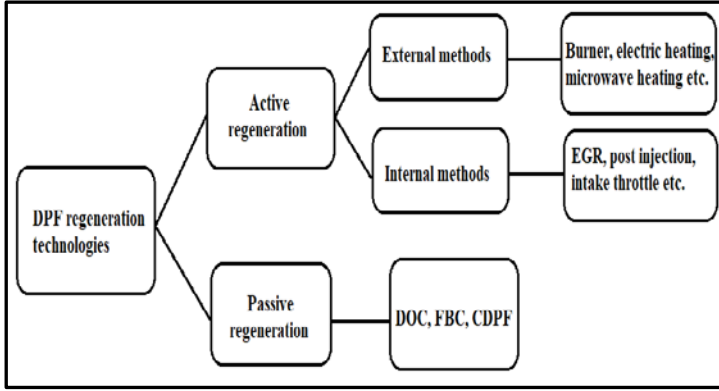


Fig. 5 General regeneration techniques for DPF (Sun et al., 2021)

Previous works demonstrate that exhaust temperature should be mostly maintained close to 550°C-600°C to initiate and complete active regeneration in DPF systems. Unfortunately, these high temperatures cannot be steadily obtained at exhaust-exit during regular engine working conditions (Stanton, 2013). Thus, some exhaust thermal management solutions should be provided to sustain a complete filter cleanup in the DPF unit (Wang et al., 2020).

One feasible method to enable active regeneration via elevated exhaust temperature is to actuate the opening of the waste-gate valve (Başaran, 2019). In this method, as some portion of the exhaust gas flows towards the DPF unit without going through the expansion process in the turbine, the temperature at DPF inlet can be increased above 550°C at medium to high loads. Thus, the temperature rise via waste-gate valve control can be sufficient to start active DPF regeneration without need of any external device. Another internal technique is to deactivate some of the cylinders in the engine system (Lu et al., 2015). Cylinder deactivation is helpful to start active regeneration through low AFR. However, it worsens the fuel consumption at high loads due

to increased heat loss and thus, can be problematic for CO and CO₂ emission rates. VVT, which is similar to cylinder deactivation and particularly beneficial for SCR effectiveness improvement at low loads (Basaran, 2017), can also be an option to enhance DPF active regeneration in diesel vehicles.

Engine-independent strategies can be implemented to improve DPF active regeneration as well. Utilizing a plasma burner close to engine system is one of the external device-added solutions for active regeneration (Lee et al., 2014). Moreover, microwave heating and electrical heating are recently studied as viable methods to thermally improve DPF systems (Zhong et al., 2019; Uenishi et al., 2024). Although these approaches increase the cost of the engine system at a certain rate, they do not directly influence the engine operation and thus, are seen as more flexible compared to internal measures. In addition, unlike inner-engine techniques, they do not result in rise in engine heat loss and thus, is more energy-efficient to control DPF active regeneration in a diesel engine system. Considering next-generation transport will be more electric-dependent, these external measures can be more widely and more practically preferred in future hybrid highway vehicles for a secure DPF system and thus, low PM rates.

2.5. Passive regeneration of DPF

Active DPF regeneration is one way to improve the particulate filter effectiveness through increased exhaust temperature. Another method to clean the DPF unit from collected PM in diesel engine systems is to apply passive regeneration (Guan et al., 2015).

In this method, the system uses some catalysts to decrease the particle oxidation temperature to the rates that remain within the regular temperature range of exhaust flow. To achieve that particular process, one approach is to add the catalyst to diesel fuel, named as Fuel-Borne Catalyst (FBC), and thus lower the

combustion temperature of the soot entering the DPF system (Stepień et al., 2015). Iron-based, cerium-based or copper-dependent catalysts are currently widely utilized in compression-ignition engine systems. The fundamental drawback of using those catalysts is that they cannot be completely burned during the regeneration process and therefore, some ash is evidently produced at the inner parts of the DPF system due to the leftover catalysts. Increased ash inside the DPF device can not only affect the PM storage negatively, but also cause elevated backpressure and can induce fuel consumption rise in the system. Thus, the choice of the proper catalyst plays a significant role for passive regeneration. It is seen that The other approach is to cover the filter surface of the DPF unit with the catalyst, named as catalytic or catalyzed diesel particulate filter (CDPF), and oxidize the particles via that catalyst-coated filter (Lou et al., 2022).

An alternative for utilizing additive catalyst in the system, a diesel oxidation catalyst (DOC) device can be placed at the upstream of the DPF unit. DOC primarily performs to control CO and unburned HCs in diesel engine systems. The contribution of DOC for DPF comes from the fact that NO can be oxidized to NO₂ through catalysts inside the DOC and the NO₂, having high oxidation, is channeled to DPF unit placed just downstream the DOC system. The excessive oxidizability of NO₂ flowing into the DPF system helps oxidize the PM at relatively low temperatures (Jiao et al., 2017), which is a significant advantage compared to active regeneration requiring temperatures close to 600°C. However, it needs a certain control for the DOC unit and the rate of NO₂ in the exhaust mass flow and the temperature at DPF inlet still have effects in passive regeneration. Therefore, combination of active and passive regeneration is generally seen as a more reliable, permanent and effective solution for PM control in diesel vehicles (Zhong et al., 2022).

3. CONCLUSION

This study overviews the current practical techniques for the minimization of PM rates in modern diesel vehicles. At first some internal measures such as the actuation of fuel injection timing and increased injection pressure are introduced. Those strategies need a controller in the system. However, they are effective to reduce PM rates in diesel vehicles. Moreover, water emulsified fuel, another engine-dependent technique, can be applied without any need of engine parameter modulation to control engine-out particles. The higher the water emulsion, the lower the PM rate is generally achieved in the engine system.

Apart from the internal measures, some external measures can be feasible to curb engine-out soot and particles. A DPF device, situated at the downstream of the DOC unit in the after-treatment system can be highly beneficial to minimize PM rates. The majority of particles can be trapped in the filter of this unit and thus, the current stringent PM emission regulation can be met. However, some periodic regeneration, as active or passive regeneration, is required to clean the filter and sustain long-term, efficient and reliable use of DPF unit in automotive vehicles. Active regeneration needs some inner-engine or engine-independent methods to maintain effective operation temperatures, which mostly needs additional energy consumption. Passive regeneration can be effective at relatively low temperatures. However, it requires additional catalysts, which are costly and cannot be burned completely in the system. Also, the production of high NO₂ at the DOC exit can affect SCR-out NO_x rates negatively. Thus, the combination of active and passive regeneration can be a solution to achieve energy-efficient DPF filter renewal in diesel vehicles. In addition, co-operation of inner-engine techniques and DPF regeneration techniques can be a key strategy to further reduce PM rates in an energy-saving manner in future on-road automotive vehicles.

REFERENCES

- Agarwal, A. K. et al. (2013). Effect of fuel injection pressure on diesel particulate size and number distribution in a CRDI single cylinder research engine. *Fuel*, Vol. 107, pp. 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.077>
- Aldarwish, Z. et al. (2024). Investigation of the optimal timing and amount of fuel injection on the efficiency and emissions of a diesel engine through experimentation and numerical analysis. *Heliyon*, Vol. 10(19), p. e28790. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38790>
- Anderson, J. O., Thundiyil, J. G. and Stolbach, A. (2012). Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *Journal of Medical Toxicology*, Vol. 8(2), pp. 166-175. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>
- Bai, S. et al. (2017). Influence of active control strategies on exhaust thermal management for diesel particulate filter active regeneration. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 119, pp. 297-303. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.012>
- 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. <https://doi.org/10.3390/en16124542>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.098>

- Başaran, H. Ü. (2019). A simulation based study to improve active diesel particulate filter regeneration through waste-gate valve opening modulation. *International Journal of Automotive Science and Technology*, Vol. 3(2), pp. 32-41.
- Başaran, H. Ü. & Duranay, A. (2025). Advanced power systems to improve energy efficiency in modern marine vessels in operation: a review. *Research, Technology and Innovation in Shipbuilding and Maritime*, pp. 21-44. Duvar Publishing, November 2025. ISBN: 978-625-8734-35-5.
- Dhahad, H. A. et al. (2021). Influence of fuel injection timing strategies on performance, combustion, emissions and particulate matter characteristics fueled with rapeseed methyl ester in modern diesel engine. *Fuel*, Vol. 306, p. 121589. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121589>
- Dieselnet. <http://dieselnet.com/standards/eu/hd.php>. EU emission standards for heavy-duty diesel engines. (Retrieved November 18th, 2025).
- Dong, R. et al. (2022). Review of particle filters for internal combustion engines. *Processes*, Vol. 10(5), p. 993. <https://doi.org/10.3390/pr10050993>
- DPF Cleaning Centre. <http://dpfcentre.com/dpf-maintenance-guide/>. DPF Maintenance Guide. (Retrieved November 21st, 2025).
- Gopidesi, R. K. & 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. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1667435>

- Guan, B. et al. (2015). Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines. *Journal of Environment Management*, Vol. 154, pp. 225-258.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.027>
- Jiao, P. et al. (2017). Research of DPF regeneration with NOx-PM coupled chemical reaction. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 110, pp. 737-745.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.184>
- Khanna, S., Dewangan, A. K., Yadav, A. K. and Ahmad, A. (2025). A progressive review on strategies to reduce exhaust emissions from diesel engine: Current trends and future options. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 44(5), p. e70012.
<https://doi.org/10.1002/ep.70012>
- Lee, D. H. et al. (2014). Plasma burner for active regeneration of diesel particulate filter. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 34(1), pp. 159-173.
<https://doi.org/10.1007/s11090-013-9507-z>
- Lou, D. et al. (2022). Analysis of temperature and pressure characteristics in catalyzed diesel particulate filter operation for heavy-duty diesel engine. *Fuel*, Vol. 328, p. 125248. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125248>
- Lu, X. et al. (2015). Impact of cylinder deactivation on active diesel particulate filter regeneration at highway cruise conditions. *Frontiers in Mechanical Engineering*, Vol. 1, p. 9. <https://doi.org/10.3389/fmech.2015.00009>
- Luo, J. et al. (2023a). A review of regeneration mechanism and methods for reducing soot emissions from diesel particulate filter in diesel engine. *Environmental Science*

- and Pollution Research, Vol. 30(37), pp. 86556-86597.
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-28405-z>
- Luo, J. et al. (2023b). Effect of regeneration method and ash deposition on diesel particulate filter performance: a review. Environmental Science and Pollution Research, Vol. 30(16), pp. 45607-45642.
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-25880-2>
- Obunaonye, C. O. et al. (2025). A review on the effectiveness of water-in-diesel emulsions as an alternative fuel. Journal of Solution Chemistry, Vol. 54, pp. 1361-1402.
<https://doi.org/10.1007/s10953-025-01480-1>
- Park, S. et al. (2016). Effect of Diesel-Water Emulsified Fuel on the NOx and PM Emissions of a Diesel Engine. Energy & Fuels, Vol. 30(7), pp. 6070-6079.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00089>
- Rahman, S. A. et al. (2021). State-of-the-art of strategies to reduce exhaust emissions from diesel engine vehicles. Energies, Vol. 14(6), p. 1766.
<https://doi.org/10.3390/en14061766>
- Seo, J. et al. (2012). The best choice of gasoline/diesel particulate filter to meet future particulate matter regulation. SAE Technical Paper No. 2012-01-1255.
<https://doi.org/10.4271/2012-01-1255>
- Stanton, D. (2013). Systematic development of highly efficient and clean engines to meet future commercial vehicle greenhouse gas regulations. SAE International Journal of Engines, Vol. 6(3), pp. 1395-1480.
<https://doi.org/10.4271/2013-01-2421>

- Stepień, Z. et al. (2015). The evaluation of fuel borne catalyst (FBC) for DPF regeneration. *Fuel*, Vol. 161, pp. 278-286. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.08.071>
- Sun, K. et al. (2021). A review on PM removal key after-treatment technologies for vehicle diesel engines based on environmental requirements. *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 30(11A), pp. 12091-12099.
- Tamilarasan, V. D. & Ramesh Kumar, T. (2021). Fuel Injection Pressure and Combustion Chamber Geometry Effects on the Performance and Emission Characteristics of Diesel Fueled CI Engine with EGR. In: Gupta, A., Mongia, H., Chandra, P., Sachdeva, G. (eds) *Advances in IC Engines and Combustion Technology*. NCIEC 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5996-9_36
- Uenishi, T. et al. (2024). Research on Regeneration Technology for Gasoline Particulate Filters Using Microwave Heating. *Emission Control Science and Technology*, Vol. 10(1), pp. 38-51. <https://doi.org/10.1007/s40825-024-00239-2>
- Wang, J. et al. (2020). Experimental research on exhaust thermal management control strategy for diesel particulate filter active regeneration. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 21(5), pp. 1185-1194. <https://doi.org/10.1007/s12239-020-0112-x>
- Yildiz, I. et al. (2021). Effects of cordierite particulate filters on diesel engine exhaust emissions in terms of pollution prevention approaches for better environmental management. *Journal of Environmental Management*, Vol. 293, p. 112873. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112873>

- Zhong, C. et al. (2019). Low temperature, medium temperature and high temperature performance of the continuous regenerative diesel particulate filter assisted by electric regeneration. Chemical Engineering Science, Vol. 207, pp. 980-992. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.024>
- Zhong, C. et al. (2022). Effects analysis on soot oxidation performance in the diesel particulate filter based on synergetic passive-active composite regeneration methods. Chemical Engineering Science, Vol. 262, p. 118013. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118013>

TAŞLAMA TEZGÂHLARINDA KESME TEORİSİ

Gültekin BASMACI¹

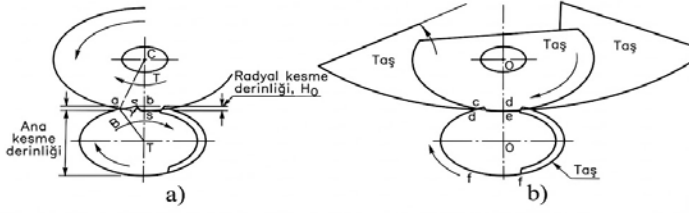
1.1. Taşlamada Kesme Teorisi

Günümüzde, aşındırıcı taneciklerden oluşan taşlama taşları ile hem metal hem de metal dışı malzemelerden talaş kaldırma işlemi yaygın ve başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Taşlama taşlarının kullanımı, teorik bir yaklaşım olmanın ötesine geçerek dünya endüstrisinde kabul görmüş standart bir imalat yöntemi halini almıştır. Bu kabulün temel nedeni, taş yapısındaki taneciklerin yüzeyi sadece sürtünme yoluyla aşındırması değil, bilakis kesme mekanizması ile talaş kaldırmasıdır. Nitekim ortaya çıkan talaşlar incelendiğinde; kesme açısındaki sürtünme etkileri ve talaş geometrisinin matematiksel analizi, bu taneciklerin belirli boyut ve formlarda düzenli talaş kaldırdığını kanıtlamaktadır.

1.2. Silindirik Taşlamada Kesme Teorisi

Silindirik taşlama işlemlerinde, aşındırıcı tanecik iş parçası yüzeyine ilk temas ettiğinde kesme derinliği teorik olarak sıfırdır. Taş ve iş parçasının dönme hareketleriyle birlikte bu derinlik süreç boyunca progresif (kademeli) bir artış gösterir. Taneciğin iş parçasından ayrıldığı noktada ise kesme derinliği maksimum seviyeye ulaşır. Literatürde, işlemin sonunda elde edilen bu en yüksek değer 'aşındırıcı tane kesme derinliği' olarak tanımlanmaktadır.

¹ Prof. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği, ORCID: 0000-0003-4818-3160.



Şekil 1. Tane Kesme Derinliği

- ab – Radyal kesme derinliği (m)
- ad – Temas yayı uzunluğu (m)
- ef – Tane kesme derinliği (m)

Şayet (d) daki bir aşındırıcı taneyle ele alırsak, taş üzerinde dönen bu tane (d) ye kadar devam edecek ve dönen iş parçası da üzerindeki (e) den (d) ye kadar çevresel hareket edecektir, işin devir sayısı taşın devir sayısından çok düşük olduğu için (de) uzunluğu (ad) den az olacaktır. Bu aşırı tane, (de) de meydana gelen talaşı kısa zamanda kaldıracaktır.

L = Temas yayı uzunluğu

V_s = Taşın çevre hızı m/s

V_w = İşin çevre hızı (m/dk)

t = Zaman birimi (sn)

T_d = Tane kesmederinliği (m)

R_d = Radyal kesme derinliği

$L = V_s \cdot t$

$t = \frac{L}{V_s}$

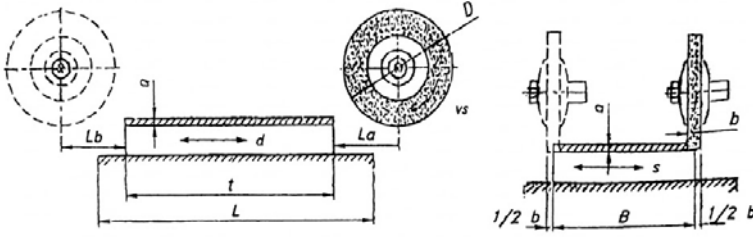
$de = 60V_w \cdot t$

$ef = de \cdot \sin(A + B)$

$$Rd = \frac{V_w}{60} \cdot V_s \cdot \sin(A + B)$$

1.3. Çevreden Kesme Yapan Bir Taşlama Tezgâhında Zaman Hesabı

Düzlem taşlama tezgâhında işler, teker teker veya gruplar halinde taşlanırlar. Değişik ölçülerdeki prizmatik parçalar teker teker, özdeş parçalar ise gruplar halinde taşlanır. Grup halindeki taşlamalarda tabla yüzeyine yerleştirilen parçalar arasındaki boşluklar hesaplama yaparken dikkate alınmaz.



Şekil 2. Çevreden Kesme Yapan Taşlama Tezgâhında Taşlama Konumu

$$Z = V_t \cdot \frac{1000}{L} \left(\frac{kurs}{dak} \text{ kurs sayısı} \right)$$

$$t = \frac{L \cdot B}{V_t \cdot 1000 \cdot s} \text{ (dak tabla hızı belli ise bir pasodaki taşlama zamanı)}$$

$$T = \frac{L \cdot B \cdot i}{V_t \cdot 1000 \cdot s} \text{ (dak } i \text{ pasodaki zaman)}$$

$$T = \frac{(Z \cdot L \cdot i)}{1000} \text{ (dak Kurs sayısı ise } i \text{ pasodaki taşlama zamanı)}$$

$$A = \text{Bir pasodaki talaş derinliği (mm)}$$

$$I = \text{Paso sayısı (mm)}$$

$$Z = \text{Kurs sayısı} \left(\frac{kurs}{dak} \right)$$

B = İş parçası genişliği

V_t = Tabla hızı $\left(\frac{m}{dak}\right)$

V_s = Taşın çevre hızı $\left(\frac{m}{dak}\right)$

S = İşin enine ilerlemesi

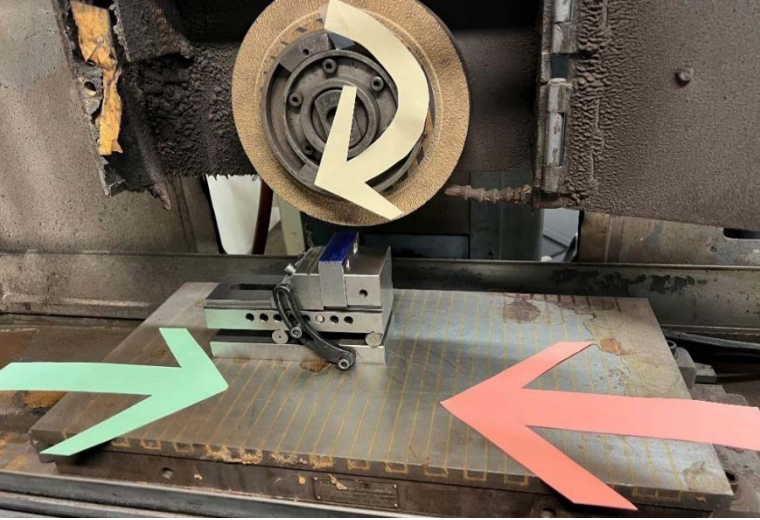
L_a = Taşın işe başlangıç uzaklığı (10-15)

L_u = Taşın işten uzaklaşması miktarı (10-15)

t = Bir pasodaki taşlama zamanı

T = Toplam kurs boyu

l = İşin boyu



Şekil 3. Taş Parçalarının Sıkılması

Döner tablalı taşlama tezgâhlarında enine ilerleme hareketi, tezgâhın tasarımına bağlı olarak tabladan veya taşlama başlığından sağlanır. Düşey milli konfigürasyonlar, yüksek talaş kaldırma kapasitesine sahip olsalar da taşın alın yüzeyiyle temas etmesi sürtünmeyi ve buna bağlı ısı üretimini artırır; bu da genellikle yüzey kalitesini düşürür. İş parçasında oluşabilecek

termal çarpılmaları (deformasyonu) engellemek adına taşlar içbükey (konik) bir formda bilenir. Ancak, nitelikli bir bileme işlemiyle sürtünme katsayısı düşürülüp optimum kesme hızları yakalandığında, bu yöntemle de hassas ve pürüzsüz yüzeyler elde etmek mümkündür.

1.4. Taşın Kesmesi

Taşlama taşı yüzeye temas ettiğinde, aktif kesme pozisyonundaki her bir aşındırıcı tane talaş kaldırma işlevini başlatır. Süreç esnasında körelen veya bağlayıcı içindeki tutunma mukavemetini yitiren tanecikler, oluşan kesme kuvvetlerinin (taş basıncı) etkisiyle yüzeyden atılır. Optimum taşlama parametreleri sağlandığında yüksek kalitede yüzeyler elde edilir. Özellikle düzlem taşlamada, tabla ilerleme hızı ile yüzey kalitesi ters orantılıdır; iş parçasının geçiş hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artar (kabalaşır), hız azaldıkça ise daha hassas yüzeyler elde edilir.

1.5. Taşın Çevresel Hızı (Kesme Hızı) ve İşin İlerleme Hızı

1.5.1. Taşlama Taşının Çevre Hızı

Taşlama taşının periferindeki (çevresindeki) herhangi bir noktanın birim zamanda (saniye) katettiği mesafe, 'Kesme Hızı' olarak tanımlanır ve genellikle m/s cinsinden ifade edilir. Bu parametre, taşın yapısal özelliklerine bağlı olarak üretici firmalarca standardize edilmiştir. Kesme hızı; taşın çapı ve devir sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Dairesel hareket prensibi gereği, yarıçapı (r) olan bir taşın üzerindeki bir nokta (veya bir aşındırıcı tane), her bir tam turda $2 \cdot \pi \cdot r$ kadar yol alır. Dolayısıyla, dakikada N devir yapan bir taş için bu nokta $2 \cdot \pi \cdot r \cdot N$ kadar mesafe kateder. Saniyedeki hızı bulmak için bu değer 60'a bölündüğünde temel kesme hızı formülü elde edilir:

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot N}{60} \text{ mm/s olur.}$$

Kesme hızı formülünden $(2 \cdot \pi \cdot r)$ yerine taşın çapını (D) yazdığımızda;

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000 \cdot 60} \text{ mm/s şeklinde yazılır.}$$

Kesme hızını çevirmek istediğimizde ise:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000 \cdot 60} \text{ (m/s)}$$

Bu formülde:

V = Taşın çevresel hızı (kesme hızı) m/s

D = Taşlama taşı çapı (mm)

N = Tezgâha verilecek devir sayısı (dev/dk)

Kullanım sürecine bağlı olarak taşlama taşlarının çapında küçülme meydana gelir. Kesme hızının sabit kalması prensibi gereği, azalan çapa karşılık taş mili devir sayısının artırılması zorunludur; bu durum, matkap tezgâhlarında küçük çaplı uçlar için daha yüksek devir kullanılması mantığıyla birebir örtüşür. Devir değişikliği, genellikle motor ile iş mili arasındaki kasnak-kayış tertibatının ayarlanmasıyla gerçekleştirilir. Eğer donanım kısıtları nedeniyle devir değiştirilemiyorsa, alternatif olarak tabla ilerleme hızı revize edilmelidir.

1.5.2. İşin İlerleme Hızı

Taşlama sürecinde, taş kendi eksenini etrafında kesme hızını oluşturacak şekilde dönerken, iş parçasının taşın altındaki doğrusal geçişine 'İlerleme Hızı' adı verilir. Bu hız parametresi, tezgâhın hidrolik ünitesinde bulunan akış kontrol valflerine müdahale edilerek, yağ debisinin ayarlanması suretiyle artırılıp azaltılabilir.

1.6. Taşın Kesme Hızı ile İşin İlerleme Hızının İş Kalitesine Etkisi

Optimum bir taşlama prosesi için kesme hızı genellikle 25-30 m/s aralığında tercih edilir, ancak bu değer işlenecek malzeme türüne göre (Tablo 1.) değişkenlik gösterir. Belirlenen kesme hızı, tezgâhın çalışması gereken devir sayısını doğrudan dikte eder. Konvansiyonel tezgâhlarda bu devir ayarı, kayış-kasnak mekanizmasının manuel olarak değiştirilmesiyle sağlanır. Ancak pratikte bu işlem zaman aldığı için genellikle ihmal edilmekte; taş çapı küçüldüğünde veya malzeme değiştiğinde bile aynı devirle çalışılmaya devam edilmektedir. Bu ihmal, yüzey kalitesinde bozulmaya ve taşın hızla körelmesine yol açar. CNC tezgâhlarda ise bu sorun, devrin taş çapı ve malzeme verilerine göre sistem tarafından otomatik kompanse edilmesiyle aşılmıştır. Sonuç olarak hem yüzey kalitesini artırmak hem de taş ömrünü uzatmak için tablolarda belirtilen ideal kesme ve ilerleme hızlarına sadık kalınmalıdır.

	Taşın çevre hızı (m/s)	İşin ilerleme hızı (m/s)	Talaş Derinliği (mm) Kaba	Talaş Derinliği (mm) İnce
Yumuşak çelikler	20 – 30	0.16 – 0.3	0.02-0.03	0,005
Sert çelikler	15 – 25	0.13 – 0.2	0.01	0,002
Gri döküm	10 – 15	0.16 – 0.25	0.1 – 0.3	0,01- 0,03
Hafif metaller	10 – 20	0.16 – 0.32	0.2 – 0.4	0,02- 0,05
Sert madenler	3 – 5	0.05 – 0.08	0.01-0.005	0,01

Tablo 1. İşlenecek Malzemenin Cinsine Göre Taşın Kesme Hızı ve İşin İlerleme Hızı Değerleri

Kusursuz bir taşlama yüzeyi için ilerleme hızı, malzeme cinsi ve taşın dönüş hızıyla senkronize edilmelidir. Buradaki temel amaç, hızlar arasındaki oranı ayarlayarak aşındırıcı tanelerin yüzeyden kopmasını sağlayacak kuvveti oluşturmaktır. Çoğunlukla iş parçası hızının (ilerleme) değiştirilmesiyle

sağlanan bu denge, taşın körelmesini önler ve kendi kendini bileme etkisini maksimum düzeye çıkarır (Tablo 2.).

Malzeme cinsi	Taşın çevre hızı / İşin çevre hızı = A	
	Düz taş	Çanak taş
Taş Şekli		
Sertleştirilmiş ve yumuşak çelikler	85- 100	55
Gri Döküm	58- 70	40
Bakır ve Alaşımları	60- 75	35
Hafif Metaller	42- 60	25

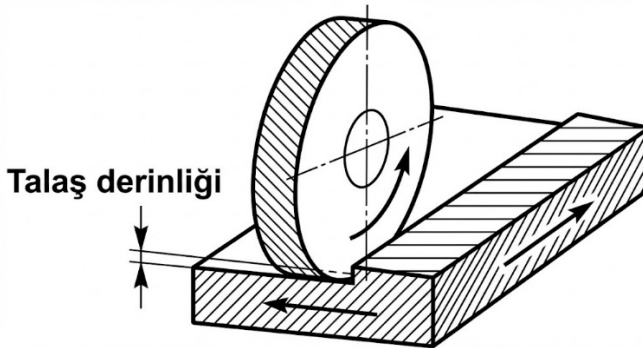
Tablo 2. Taşın Kesme Hızı ile İlerleme Hızı Değerleri Oranları

1.7. İlerleme Miktarı ve Talaş Derinliği

Taş mili devri ve tabla hızının artırılması, birim zamanda kaldırılan talaş hacmini (talaş debisini) doğrudan yükseltir. Ancak talaş yükünün artması, kesme bölgesinde aşırı ısı oluşumuna ve iş parçasında termal deformasyonlara (çarpılma) yol açabilir. Bu riski yönetmek için paso verme sıklığı (her strokta veya iki strokta bir), hedeflenen yüzey kalitesine göre optimize edilmelidir. Özellikle kaba taşlama operasyonlarında, paso verme işlemi taşın iş parçası üzerindeyken değil, parçanın iki ucundaki dönüş noktalarında (taş boşta iken) yapılmalıdır.

Çelik Malzeme		Döküm Malzeme	
Kaba taşlama	İnce taşlama	Kaba taşlama	İnce taşlama
0.01- 0.03	0.0025- 0.005	0.1- 0.3	0.01- 0.03

Tablo 3. Malzemeye Göre Verilecek Talaş Payları



Şekil 4. Talaş Derinliğinin Verilmesi

Son yüzey bitirme operasyonlarında, enine ilerleme hareketinin strokun her iki ucunda değil, yalnızca tek bir tarafında uygulanması gerekir. Bu aşamada belirlenecek talaş derinliği (paso), iş parçasının kesit kalınlığına ve rijitliğine doğrudan bağlıdır. Çevresel taşlama diskleri kullanıldığında referans alınması gereken standart parametreler Tablo 3' te sunulmuştur.

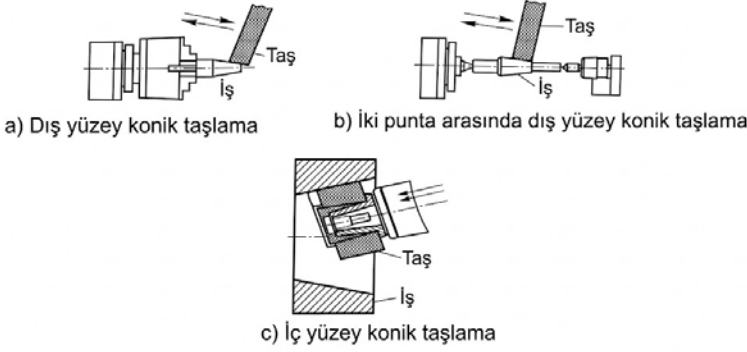
1.8. Dış ve İç Konik Yüzeylerin Taşlanması

Dış ve iç konik yüzeylerin taşlanabilmesi için ya doğrudan dış ve iç yüzey konik taşlama tezgâhları veya üniversal taşlama tezgâhları kullanılır.

1.8.1. Konik Yüzeylerin Taşlanması

a) Taş Başlığına Açı Verilerek Dış ve İç Yüzeylerin Taşlanması

Dış ve iç yüzeylerin konik olarak taşlanmasında genellikle ya taş başlığına açı verilerek dalma taşlama yapılır veya bazı tezgâhlarda taş başlığı konik yüzeye paralel doğrultuda hareket ettirilerek taşlama yapılır. Daimî taşlamanın yapılabilmesi için taşlanan konik boyu taş genişliğinden küçük olmalıdır. Diğer konumda ise, taş konik yüzey doğrultusunda hareket ettiği için konik boyu taş genişliğinden büyük olabilir. Her iki konumda tabla hareketli değildir. Taş başlığı kendi eksenini doğrultusunda otomatik olarak hareket edebilmektedir. Aynı zamanda taş başlığı derinlemesine (enine) hareket etmek suretiyle talaş derinliği verilebilmektedir. Daimî taşlamada taşın aşınması düzgün olmayacağı için konik yüzey de düzgün olarak taşlanmayacaktır. Taş başlığına açı verilerek yapılan konik taşlama işlemleri şekil 5'te gösterilmiştir:

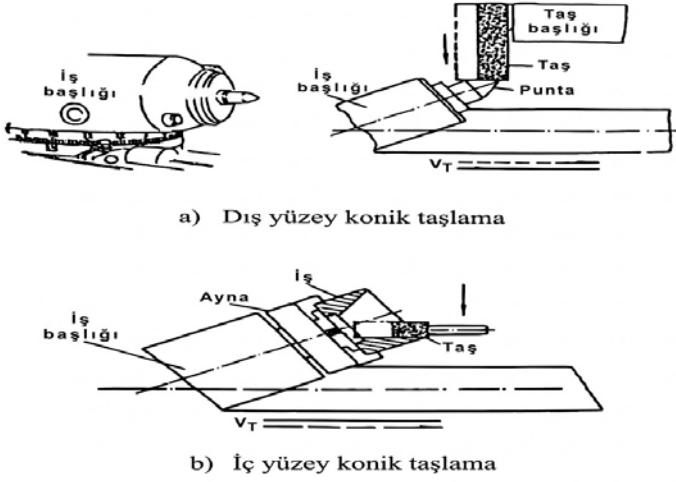


Şekil 5. Taş başlığına Açı Verilerek Konik Taşlama

- a) Dış yüzey konik taşlama
- b) İki punta arası dış yüzey konik taşlama
- c) İç yüzey konik taşlama

b) İş Başlığına Açı Verilerek Dış ve İç Yüzeylerin Taşlanması

İş başlığına 0° ile 90° arasında istenilen açı vermek suretiyle dış ve iç yüzeyler konik olarak taşlanabilmektedir. Şekil 6.a' da iş başlığına 30° 'lik açı vermek suretiyle punta ucunun taşlama işlemi gösterilmektedir. Tezgâh tablası, kendi eksenini doğrultusunda bir miktar boyuna hareket etmektedir. Şekil 6.b' de iş başlığına 30° 'lik açı verilmek suretiyle bir iç yüzey konik taşlama işlemi görülmektedir. Taş, deliğin her iki ucundan bir miktar çıkacak şekilde tabla hareketi ayarlanır.

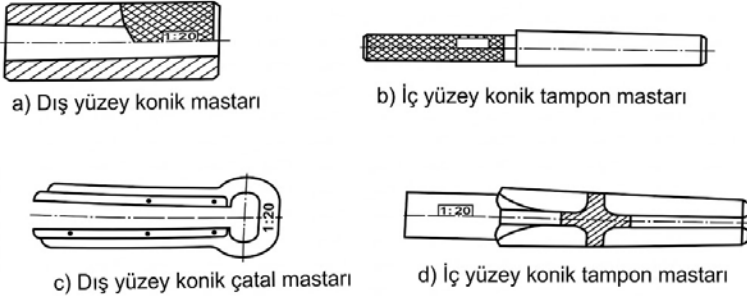


Şekil 6. İş Başlığına Açı Verilerek Konik Taşlama

- a) Dış yüzey konik taşlama
- b) İç yüzey konik taşlama

c) Döner Tablaya Açı Vererek Dış ve İç Yüzeylerin Taşlanması

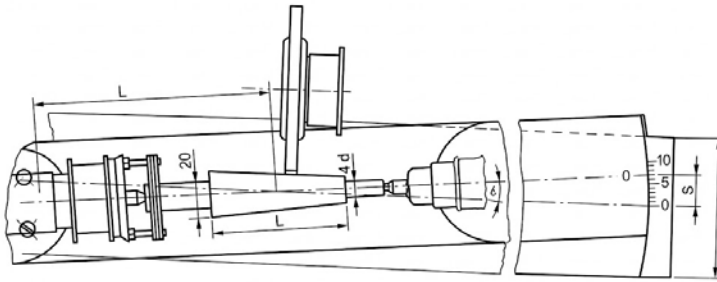
Küçük açılı dış ve iç yüzeylerin konik olarak taşlanabilmesi için tezgâhın döner tablası sağa veya sola kaydırılır. Döner tabla tezgâh üzerindeki açı bölüntüsünde koniklik miktarı kadar çevrilerek veya mm olarak kaydırılarak dış ve iç yüzeyler konik olarak taşlanabilir. Döner tablanın çevirme miktarı, verilen açı miktarına göre, kalıcı ayarlanabilir. Hassas ayarlama, 0.01 veya 0.001 mm hassasiyetli komparatörlerle, dış ve iç konik masterlarla taşlama süresince yapılır. Konik olarak taşlanması gereken dış ve iç yüzeylerin hassas bir şekilde taşlanabilmesi için taşlanan dış ve iç yüzeyler Şekil 7' de görülen konik masterlarla birkaç defa kontrol edilmelidir.



Şekil 7. Konik Yüzey Kontrol Masterları

- a) Dış yüzey konik mastarı
- b) İç yüzey konik tampon mastarı
- c) Dış yüzey konik çatal mastarı
- d) İç yüzey konik tampon mastarı

Tezgâh tablasındaki açı bölüntüsünden ayarlanamayan daha büyük konikler için tabla Kaydırılarak ayarlama yapılır. Kaydırma işleminin nasıl yapıldığı Şekil 8' de gösterilmiştir. Kaydırma miktarı verilen değerlere göre aşağıdaki formüllerden yararlanarak hesaplanır:



Şekil 8. Döner Tabla Kaydırma Miktarı

D = Taşlanan parçanın büyük çapı(mm)

d = Taşlanan parçanın küçük çapı (mm)

l = Konik boyu (mm)

L = Tabla merkezi ile döner tabla ucu arasındaki uzaklık (mm)

δ = Döner tabla çevirme açısı, derece veya koniklik

S = Tabla kaydırma miktarı (mm)

1-Parça boyutları verilmiş ise tabla kaydırma miktarı:

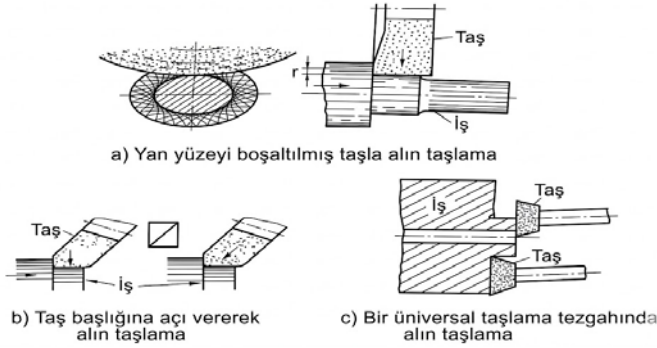
$$S = l \cdot \left(D - \frac{d}{2} \right)$$

2-Koniklik oranı (1: k) verilmiş ise tabla kaydırma miktarı:

$$S = \frac{L}{2 \cdot k}$$

3-Eğim açısı verilmiş ise tabla kaydırma miktarı:

$$S = L \cdot \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \text{ mm}$$



Şekil 9. Alın Yüzey Taşlama

- a) Yan yüzeyi boşaltılmış taşla alın taşlama
- b) Taş başlığına açı vererek alın taşlama
- c) Bir üniversal taşlama tezgâhında alın taşlama

Üniversal taşlama tezgâhında yapılan alın taşlama işleminde taşın, talaş kaldırma yüzeyi mümkün olduğu kadar azaltılmalıdır. Bu nedenle;

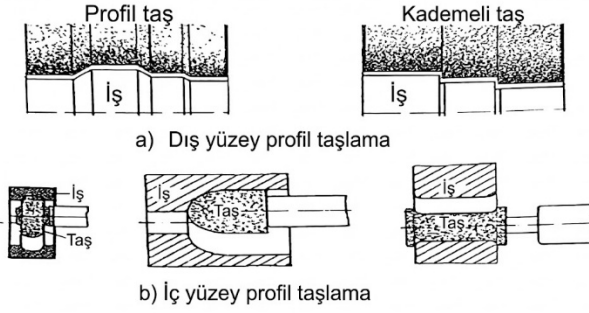
- İşle taş arasındaki baskı azalır, işin ısınması önlenmiş olur.
- Taşlama işlemi, konik çanak taşın alın yüzeyi ile yapıldığı için taşın, iş üzerindeki baskısından dolayı kırılma olasılığı daha azdır.
- Konik çaplı ve alın taşlamada, her iki çap ve alın yüzey ölçüleri aynı anda tamamlanır.
- Taşın düzeltilmesi veya bilenmesi otomatik olarak yapılıyorsa işlem kısa zamanda tamamlanır.



Şekil 10. Silindirik Dış Yüzey ve Alın Taşlama

1.9. Profil Taşlama

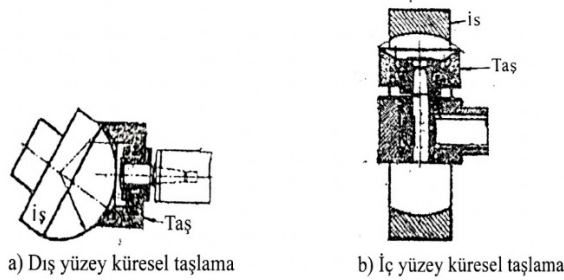
Üniversal taşlama tezgâhlarında dış ve iç yüzey profil taşlama işlemi yapılabilir. Profil taşlamada taşın, talaş kaldırma yüzeyi, taşlanması gereken yüzeyin profiline uygun şekilde otomatik olarak bilenir. Profil bileme aparatı taşla birlikte sürekli temas halinde olur ve taş profilini daima sabit tutar. Ancak iç yüzey profil taşlamada, taş profili sürekli kontrol edilemeyeceği için kaba taşlamadan sonra taş bilenir ve ince taşlama işlemine hazırlanır. Bazı dış ve iç yüzey profil taşlama işlemleri Şekil 11' de gösterilmiştir.



Şekil 11. Dış Yüzey ve İç Yüzey Profil Taşlama

- a) Dış yüzey profil taşlama
- b) İç yüzey profil taşlama

Bazı üniversal taşlama tezgâhlarına, dönme hareketi yapabilen taş başlığı takılmak suretiyle dış ve iç yüzey küresel taşlama işlemi yapılmaktadır. Şekil 12' de dış ve iç yüzey küresel işlemleri gösterilmektedir. Çeşitli biçimlerde dış ve iç yüzey profil taşlama işlemlerinde kullanılan taşların bilenmesi ya köprü tertibatlı hidrolik hareketli elmas uçlu bileme aparatıyla veya profilin uzun müddet koruyabilen sert metal veya seramik uçlu ezme makaralarıyla yapılmaktadır.



Şekil 12. Dış Yüzey ve İç Yüzey Küresel Taşlama

- a) Dış yüzey küresel taşlama
- b) İç yüzey küresel taşlama

KAYNAKÇA

1. Akkurt, M. (2005). *Talaşlı imalat yöntemleri ve tezgâhları*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
2. Çakır, M. C. (2000). *Modern talaşlı imalat yöntemleri*. Bursa: Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayınları.
3. Demirsoy, M. (1988). *Talaşlı imalat*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları.
4. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing engineering and technology* (7. Baskı). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
5. Malkin, S., & Guo, C. (2008). *Grinding technology: Theory and applications of machining with abrasives* (2. Baskı). New York, NY: Industrial Press.
6. Marinescu, I. D., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W. B., & Inasaki, I. (2006). *Handbook of machining with grinding wheels*. Boca Raton, FL: CRC Press.
7. Rowe, W. B. (2014). *Principles of Modern Grinding Technology*. Waltham, MA: William Andrew.
8. Klocke, F. (2009). *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. Berlin: Springer. Shaw, M. C. (1996). *Principles of Abrasive Processing*. Oxford: Oxford University Press.
9. Shaw, M. C. (1996). *Principles of Abrasive Processing*. Oxford: Oxford University Press.

ÖZEL TAŞLAMA TEZGÂHLARI VE İŞLEMLERİ

Gültekin BASMACI¹

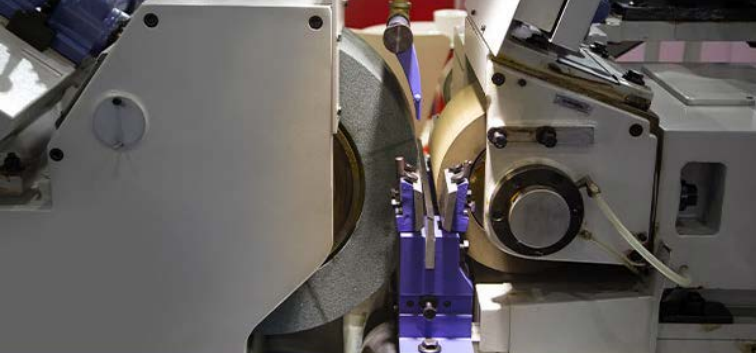
1.1. Puntasız Taşlama

Puntasız taşlama, makine mühendisliği ve imalat teknolojilerinde sıkça kullanılan, özellikle seri üretimde silindirik parçaların hassas işlenmesi için tercih edilen bir yöntemdir. Adından da anlaşılacağı gibi, bu yöntemde iş parçası bir ayna, punta veya firdöndü ile sabitlenmez. Bunun yerine parça, iki taş ve bir destek bıçağı arasında serbestçe döner.

1.1.1. Puntasız Taşlama Tezgâhı

Puntasız taşlama tezgâhı, çok sayıdaki punta yuvaları açılmamış düz ve kademeli silindirik, konik ve profilli parçalarla boydan boya vida açılmış parçaların taşlanması için kullanılan bir seri üretim tezgâhıdır. Bu tip üretim tezgâhlarında ilk ayarlama işlemleri zaman alıcıdır ancak birkaç deneme taşlama işleminden sonra tezgâhın tam ayarı sağlanır ve parçalar seri halde taşlanır. Şekil 1’de bir puntasız taşlama tezgâhı gösterilmektedir.

¹ Prof. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği, ORCID: 0000-0003-4818-3160.



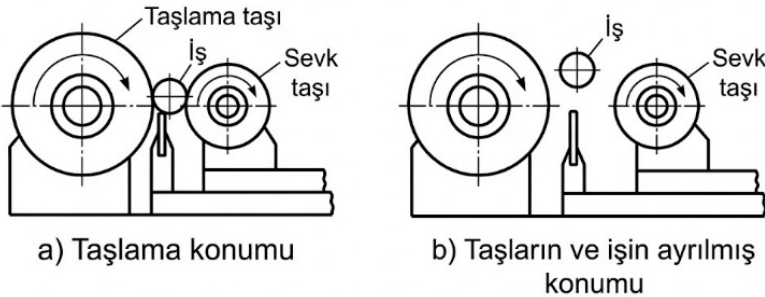
Şekil 1. Puntasız Taşlama Tezgâhı

Puntasız taşlama tezgâhları yarı otomatik veya tam otomatik olarak çalışır ve hareketini hidrolik sistemden alır. Taşlama çapını çeviren ana motor ve üzerinde hidrolik pompası bulunan yağ tenekesi tezgâh gövdesi dışına yerleştirilmiştir. İş parçaları taşlama tezgâhına ya yarı otomatik veya tam otomatik iç verme başlıkları tarafından verilir. Bugün en çok kullanıma ihtiyacı duyulan puntasız taşlama tezgâhlarının normal silindirik taşlama tezgâhlarına oranla üstünlüklerini şöyle sıralayabiliriz:

- 1- Puntasız taşlama tezgâhları ile silindirik taşlama işlemi yapılırken aynı zamanda diğer işler de sırasıyla taşlamaya hazır haldedir.
- 2- Taşlama süresince taşlanan parça desteklenmiş olduğundan parçada herhangi bir esneme söz konusu değildir.
- 3- İki punta arasında taşlamadığı için, parça eksenini doğrultusunda herhangi bir baskı kuvveti yoktur.
- 4- Taşlanmakta olan parça eksenini doğrultusunda hareket ettiği için, fazla taşlama payına ihtiyaç yoktur. Bu da malzemeden, taşlama zamanından ve taşın fazla aşınmayışı yönünden daha faydalıdır.
- 5- Hatalardan meydana gelen taş aşınması daha azdır.
- 6- Puntasız taşlamada aşınan birkaç yüzey vardır ve bu aşınmalar oldukça azdır.

1.1.2. Puntasız Taşlamada Temel Kurallar

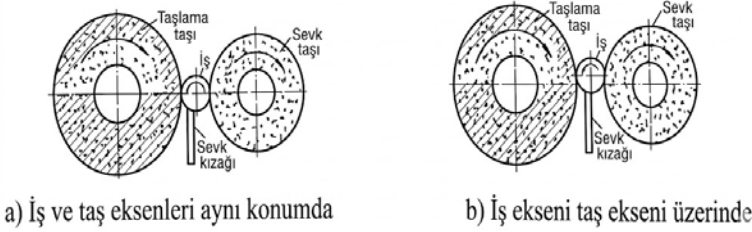
Puntasız taşlamada iş parçası iki taş arasında eksenini doğrultusunda yerleştirilir. Taşlardan birisi taşlama görevi yapar, diğeri de iş parçasını kendi eksenini doğrultusunda ilerletir. İş parçasına yön veren bu taş sevk taşı denir ve normal taşlama taşına göre çapı daha küçüktür. Sevk taşının tane büyüklüğü yaklaşık 80°'dir ve kauçuk birleştirme araçlıdır. Puntasız taşlamada, iki taş arasındaki iş parçası iki dişli arasındaki küçük ara dişli görünümünü vermektedir, ancak bu iki taş arasında çok büyük çevre hızı farkı vardır. Taşlama taşı, kendi çevre hızına yakın bir çevre hızında iş parçasını sürekli temas ederek döndürmektedir. Fakat sevk taşı tarafından iş parçasının çevre hızı bir miktar azaltılarak taşlama taşının iş üzerinden talaş kaldırması sağlanmaktadır. Sevk taşının çevre hızı yaklaşık 0.2 ile 4,5 m/s arasındadır. Taşlama taşının çevre hızı ise 30–35 m/s arasındadır. İki taş arasında, iş parçasının aşağı düşmesini önleyen boyu doğrultusunda yüksekliği ayarlanabilen sevk kızağı bulunmaktadır. Sevk kızağı, enine hareket edebilen bir kayıt ve kızak üzerine oturtulmuştur. Ayrıca sevk kızağı tablası üzerinde de enine hareket edebildikleri gibi bunlar tek başına ayrı ayrıda hareket edebilmektedir.



Şekil 2. Puntasız Taşlama Konumu

a) Taşlama konumu b) Taşların ve işin ayrılmış konumu

Sevk kızıağı, iş çapı ve taşlama konumuna göre alçaltılıp yükseltilebilir konumdadır. Taşlama taşı, iş parçası ve sevk taşı eksenleri yatay paralel konumda ve üst üste geldiği zaman taşlama işlemi üç noktada temas gerek yaptığı için puntasız taşlama amacına ulaşmış olacaktır. Bu nedenle taşlama taşı, sevk ve işin çevreden temas noktalarının birleşimini bir üçgen oluşturacak şekilde ayarlanmalıdır. Sevk kızıağı aşağı yukarı ayarlanabilir konumda olduğu için iş eksenini, taşların eksenini üzerine çıkacak şekilde yerleştirilir. Her iki yerleştirme konumu Şekil 3’ te gösterilmektedir.



Şekil 3. İş Eksenlerinin Konumu

- a) İş ve taş eksenleri aynı konumda
- b) İş eksenini taş eksenini üzerinde

Sevk kızıağı ağzının malzemesi, genellikle dökme demir, sert çelik veya sert çelik alaşımları, metal olmayan alaşımlar ve sementit karbitler yapırlar. Sevk kızıağı ağzının malzemesi seçildikten sonra taşlama taşının genişliğine göre sevk kızıağı ağzına aç verilir. Taş genişliğine göre, taşın iş üzerindeki baskısı artacağından sevk kızıağı ağzı eğim açısı da artırılır. Örneğin; 100 mm genişliğindeki taşlarla puntasız taşlama yapılırken sevk kızıağı eğim açısı 30° civarında ayarlandığı zaman taşlama işleminde herhangi bir sorun çıkmamaktadır. Fakat taş genişliği ile sevk kızıağı boyu 200 mm ye ulaştığı zaman, sevk kızıağının yan baskısını azaltmak için sevk kızıağı eğim açısı $20-25^\circ$ ye düşürülür. Diğer taraftan taşlanacak parçanın çapı çok büyükse,

sevk kızağı açısı mutlaka düşürülmelidir. Taşlanacak parçanın çapı çok küçükse veya sevk kızağı genişliği iş parçası çapından büyükse, iş eksenini taş eksenlerinin altında olacak şekilde ayarlanmalıdır. Aksi takdirde genişliği çok az olan sevk kızağı çarpılmaya uğrayacak ve iş parçasının düzgün taşlanmasına engel olacaktır.

1.1.3. Sevk Kızağının Ayarlanması

Genel olarak küçük çaplı parçaların taşlanmasında sevk kızağı, taşlanacak olan parça eksenini ile taş eksenini arasındaki mesafe iş çapının yarısı olacak şekilde yükseltilir. Büyük çaplı parçaların taşlanmasında iş eksenini ile taş eksenini arasında (h) yüksekliği maksimum 13 mm olacak şekilde sevk kızağı yükseltilmelidir. Ancak, parça eksenini ile taş eksenini arasında mesafe arttıkça işin sevk kızağına olan baskısı azalacak ve iş parçası iki taş arasında sıkışarak normal bir taşlama işlemi yapılamamış olacaktır. İki taş arasında sıkışan işin yüzey kalitesi bozuk olacak ve taşlanan parçanın içi boş ise parça elips olarak taşlanacaktır. Boydan boya kaba olarak taşlanması gereken uzun boylu parçalarla çok küçük çaplı parçalar taş ekseninin altında taşlanırsa iyi sonuçlar alınmaktadır.

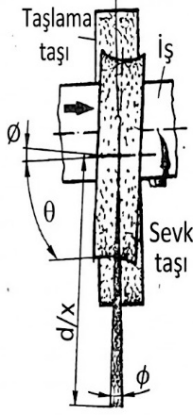
1.1.4. Puntasız Taşlama Tezgâhlarında Taşlama Çeşitleri

Puntasız taşlama tezgâhlarında değişik taşlama işlemleri yapılabilir. Bu taşlama çeşitlerini üç Ana grupta toplamak mümkündür.

1.1.4.1. Boydan Boya Silindirik Dış Yüzeye Taşlama

Normal silindirik taşlama tezgâhlarına oranla, puntasız taşlama tezgâhlarındaki taşlama işlemleri farklıdır ve iş parçası iki taş arasından sevk kızağına sürünerek geçer (Şekil 4.). İşin ilerleme hızı, iş çapı, sevk taşı eğim açısı ve sevk taşı çevre hızına bağlı olarak değişmektedir. Yaklaşık olarak işin ilerleme hızı

V_i = Sevk taşı çapı x π x Sevk taşının dakikadaki devir sayısı x sevk taşı eğim açısının sinüsüne eşittir



D = Sevk taşı çapı (mm)

n = Sevk taşı devir sayısı (dev/dak)

θ = Sevk taşı eğim açısı

V_i = İşin ilerleme hızı (mm/dak)

$V_i = D \times \pi \times n \times \sin \theta$ (mm/dak)

- D = Sevk taşı çapı (mm)
- n = Sevk taşı devir sayısı (dev/dak)
- θ = Sevk taşı eğim açısı
- V_i = İşin ilerleme hızı (mm/dak)
- $V_i = D \times \pi \times n \times \sin \theta$ (mm/dak)

Şekil 4. Boydan Boya Silindirik Dış Yüzey Taşlama

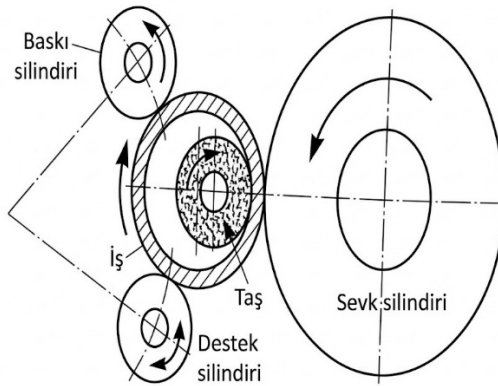
Taşlanacak parçanın ilerleme hızı fazla ve yüzey kalitesinin kaba olması gerekiyorsa sevk taşının çevre hızı düşürülerek eğim açısı arttırılır. İnce bitirme taşlama işlemlerinde sevk taşı eğim açısı düşürülerek çevre hızı arttırılır. Bu suretle, taşlanan parçanın iki taş arasındaki geçme zamanı uzar ve taşlanan yüzeyin parlaklığı artar. Ancak ince bitirme veya hassas taşlama işleminde bazı kurallara uyarak taşlanan parçanın yüzey kalitesine ve ölçü tamlığına etki eden faktörleri en aza indirmek gerekir.

Bu nedenle aşağıdaki belirtilen hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

- Taşlanacak parça üzerindeki taşlama payı oldukça az olmalıdır.
- Taşın her pasodaki talaş kaldırma miktarı düşük tutulmalıdır.
- Sevk taşının eğim açısı küçük seçilmelidir.
- Sevk taşı çevre hızı yüksek tutulmalıdır.
- Küçük çaplı parçaların taşlanmasında, iş eksenini ile taş eksenini arasındaki yükseklik yaklaşık iş çapının yarısı kadar olmalıdır. Çok büyük çaplar için bu yükseklik maksimum 13 mm'ye kadar yükseltilmelidir.
- Sevk ve taşlama taşı, elmas uçlu bileme aparatıyla otomatik olarak bilenebilmelidir.
- Taşlama süresince özelliğini koruyabilen uygun bir soğutma sıvısı kullanılmalıdır.
- 6mm ve daha küçük çaptaki iş parçalarının taşlanmasında iş eksenini, işin yarıçapı kadar taş ekseninin altında tutulmalıdır.
- Sevk kızığının ağızları, taşın iş üzerindeki baskısını yenebilecek dayanıklılıkta olmalıdır.
- Sevk kızığı ağzına taşlanacak parçanın çapına uygun eğim açısı verilmelidir.
- İş parçasına giriş ve çıkışta kılavuzluk görevi yapan ön ve arka kayıtlar, iş eksenine paralel olarak ayarlanmalıdır. Aksi halde iş silindirik olarak taşlanamaz.
- Ön kayıtlar ile arka kayıtlar arasındaki mesafeler iş çapı, talaş derinliği ve verilecek Tolerans miktarına göre ayrı ayrı hesap edilmelidir.

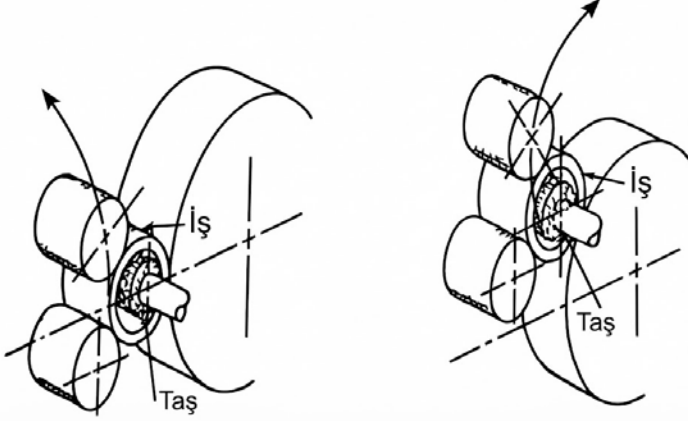
1.1.4.2. Boydan Boya Silindirik İç Yüzey Taşlama

Puntasız delik taşlamada, diğer normal delik taşlama tezgâhlarında olduğu gibi iş parçası herhangi bir iş başlığına bağlanmaksızın dış yüzeyine tabi olarak kendi eksenini etrafında dönerek taşlanmaktadır. Bu nedenle iç yüzeyi taşlanması gereken parçanın dış yüzeyi önceden düzgün olarak taşlanmış olmalıdır. İç yüzeyi taşlanması gereken parçayla doğrudan temas eden üç silindir bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla sevk, destek ve baskı silindirleridir. (Şekil 5.) Sevk silindiri, parçanın kendi eksenini etrafında dönmesini ve aynı zamanda ilerlemesini sağlar. Destek silindiri, iş parçasının altına yerleştirilmiş ve taşlama süresince parçaya desteklik yapmaktadır. Baskı silindiri, ise taşlanmakta olan parçaya normal baskı yaparak parça dış yüzeyinin sürekli üç noktadan temas etmesini sağlamaktadır. Sevk ve destek silindir destekleri taşlanacak parçanın dış çapına ayarlanarak bir V – Yatağı görünümünde tespit edilir. İş parçası, bu iki silindir arasında baskı silindirinin normal baskıyla dönerek taşlanır. Puntasız delik taşlamada iş ve taş eksenini, sevk silindiri ekseninin üzerinde olacak şekilde veya İş, taş ve delik silindiri eksenleri aynı düzlemde olacak şekilde ayarlanarak taşlama işlemleri yapılır (Şekil 6.).



Şekil 5. Puntasız Delik Taşlama

En büyük desteğin sağlanabilmesi ve et kalınlığı çok az olan parçaların hassas olarak taşlanabilmesi için taş, iş ve sevk silindirleri yataya paralel ve aynı doğrultu üzerinde ayarlanır.



Şekil 6. İki Farklı Konumlu Puntasız Delik Taşlama

Puntasız delik taşlama tezgâhlarında, çok sayıdaki özdeş bilezikler, piston gömlekleri, her çeşit rulmanlı yatak bilezikleri, çanak ve koni biçimindeki kovalar ve düz silindirik dişliler seri halinde ve ekonomik bir şekilde taşlanmaktadır. Aynı puntasız delik taşlama tezgâhları ile parçalar tutulmak suretiyle konik deliklerle simetrik olmayan diğer iç delikler taşlanabilmektedir. Çok küçük parçaların taşlanmasında için işler otomatik olarak tezgâha verilebilmektedir. Büyük çaplı parçaların taşlanabilmesi için baskı silindiri manivela kolu yardımıyla veya otomatik olarak açılır ve iş parçası tezgâha yüklendikten sonra baskı silindiri tekrar kapatılır.

1.1.4.3. Dalma ve Profil Taşlama

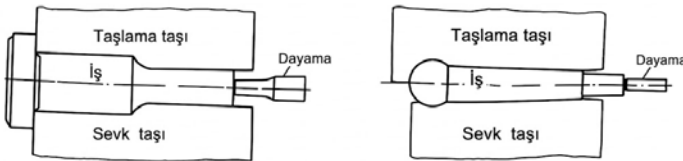
Dalma ve profil taşlamada, taşlanacak parçanın boyutlarına göre tezgâh ayarlanır. Taşlama Boyuna göre iş parçası en sonda dayama tarafından desteklenir. Bu dayama, parçanın ilerlemesini önler. Her iki dalma ve profil taşlamada, iş parçası yukarıdan elle veya otomatik olarak verilir. Taşlama

işlemi biten parça, taşlar açıldıktan sonra dayama tarafından dışarı itilir. Dalma ve profil taşlamada sevk taşına $\frac{1}{4}$ ile $\frac{1}{2}$ derecelik eğim açısı verilir. Bu eğim açısı yardımıyla sevk taşı, taşlama işlemi biten parçayı hafifçe dayamaya bastırır. Dayamanın hareketiyle bağımlı olarak çalışan taşlama taşı, dayamanın hafifçe geri itilmesi halinde otomatik olarak açılır, aynı zamanda dayama yine hidrolik olarak taşlanan parçayı iki taş arasından itip çıkarır. Şekil 7 ve 8’de değişik boyutlu parçaların dalma ve profil taşlama işlemleri görülmektedir.



Şekil 7. İki Konumlu Puntasız Dalma Taşlama

Dalma ve profil taşlamada, taşlama taşı uygun profilde kopya tertibatlı hidrolik hareketli Elmas ucu bileme aparatıyla bilenir. Aynı zamanda sevk taşı da aynı sistemle uygun profilde bilenir.



Şekil 8. Puntasız Profil Taşlama ve Bileme Konumları

1.1.5. Puntasız Taşlamada Doğabilecek Hatalar ve Hataların Giderilmesi

- **Doğabilecek Hatalar 1:** Boydan boya taşlamada meydana gelen düzensiz çizikler Alınacak Önlemler:

- Taşlama taşı dengesiz veya mili üzerine iyice sıkıştırılmamışsa yeniden kontrol edilir.
- Sevk kızağı eğim açısı yeniden kontrol edilir.
- Sevk kızağı ağzı çok ince ise sevk kızağı ağzı değiştirilir.
- Sevk kızağı ağzının sıklığı yeniden kontrol edilir.
- Taşlama taşının tane büyüklüğü, malzemenin cinsine göre uygun olup olmadığı kontrol edilir.
- İş ekseni ile taş ekseni arasındaki mesafe yeniden kontrol edilir.
- Talaş derinliği azaltılır.
- Tezgâha iletilen titreşim azaltılır.
- **Doğabilecek Hatalar 2:** İlerleme çizgileri Alınacak Önlemler:
 - Bu çizgiler, iş taşlar arasından çıkarken veya uygun olmayan sevk kızağının seçilmesinden meydana gelmektedir. Sevk taşı eğim açısı yeniden gözden geçirilir ve sevk taşı bileme aparatı buna göre yerleştirilir.
 - Taşlama taşı yeniden bilenir.
 - Sevk kızağının ayarı tam olarak yapılır.
 - Sevk kızağı ağzında çizikler varsa değiştirilir.
- **Doğabilecek Hatalar 3:** İş üzerindeki çentikler Alınacak Önlemler:
 - Bu çentikler aşındırıcı taneler tarafından, kirli soğutma sıvısından ve sevk kızağı ağzından meydana gelebilir. Sevk kızağı ağzının malzemesini yumuşak metalden seçip soğutma sıvısının temiz olmasına özen gösterilir.

• **Doğabilecek Hatalar 4:** Taşlanan parça tam yuvarlak değil

Alınacak Önlemler:

- Sevk kızıağı yüksekliği uygun konumda olmayabilir. Taşlanan parçaya göre sevk kızıağı yüksekliği yeniden ayarlanır, ayarlı ise bir miktar daha yükseltilir.
- **Doğabilecek Hatalar 5:** Taşlanan parçanın giriş ucu konik

o **Alınacak Önlemler:**

- Girişte iş parçasına kılavuzluk yapan ön kayıtlar arasındaki mesafe yeniden kontrol edilir ve ön kayıt toleransı $\frac{d1-d2}{2}$ kadar ayarlanır.
- **Doğabilecek Hatalar 6:** Taşlanan parçanın arka ucu konik

o **Alınacak Önlemler:**

- Arka kayıtlar arasındaki mesafe ve arka kayıt toleransı yeniden ayarlanır.
- **Doğabilecek Hatalar 7:** İş parçasının iki ucu konik ve ortası şişkin

o **Alınacak Önlemler:**

- Ön ve arka kayıtlar arasındaki mesafeler yeniden kontrol edilir.
- Ön ve arka kayıt toleransı tam olarak uygulanır.
- **Doğabilecek Hatalar 7:** İş parçası iç bükey veya ortası oyuk

o Alınacak Önlemler:

- Ön ve arka kayıtlar tam olarak ayarlanmamışsa yeniden ayarlanır.
- Sevk taşı uygun şekilde bilenir.
- Bileme aparatı hatalı yerleştirilmemişse hatası giderilir.

KAYNAKÇA

1. Akkurt, M. (2005). *Talaşlı imalat yöntemleri ve tezgâhları*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
2. Çakır, M. C. (2000). *Modern talaşlı imalat yöntemleri*. Bursa: Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayınları.
3. Hahn, R. S. (1962). On the Nature of the Grinding Process. *Proceedings of the 3rd M.T.D.R. Conference*, 129–154. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing engineering and technology* (7. Baskı). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
4. Malkin, S., & Guo, C. (2008). *Grinding technology: Theory and applications of machining with abrasives* (2. Baskı). New York, NY: Industrial Press.
5. Marinescu, I. D., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W. B., & Inasaki, I. (2006). *Handbook of machining with grinding wheels*. Boca Raton, FL: CRC Press.
6. Tawakoli, T., & Westkämper, E. (1999). Grinding of Hardened Steel using Superabrasives. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 1187-1199. Klocke, F. (2009). *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. Berlin: Springer. Shaw, M. C. (1996). *Principles of Abrasive Processing*. Oxford: Oxford University Press.
7. Shaw, M. C. (1996). *Principles of Abrasive Processing*. Oxford: Oxford University Press.
8. Oliveira, J. F. G., et al. (2009). High Performance Grinding—A Review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 31(3), 260-266.
9. Jaeger, J. C. (1942). Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts. *Journal and*

Proceedings of the Royal Society of New South Wales, 76, 203–224.

10. Rowe, W. B. (2013). *Principles of Modern Grinding Technology (2nd Edition)*. William Andrew.
11. Rowe, W. B., Miyashita, M., & Koenig, W. (1989). "Centerless grinding research and its application in advanced manufacturing technology." *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 38(2), 617-625.

DYNAMOMETER SYSTEMS USED IN LATHE MACHINES: DESIGN APPROACHES, APPLICATIONS, AND FUTURE PERSPECTIVES

Hasan Hüseyin DEĞER¹

İlhan ASİLTÜRK²

1. INTRODUCTION

Machining is one of the areas in metal forming methods where precision and production quality are most important. Therefore, accurately determining cutting forces is essential for optimizing process settings and increasing tool life. Cutting forces directly affect numerous processes, such as material machinability, tool-lathe interaction, and the resulting surface quality. Especially since the cutting process on lathe machines occurs with a continuous and circular motion, the dynamic characteristics of the forces achieved in this process are of much greater importance(Lad & Patel, t.y.; Öztürk & Yıldızlı, 2018).

Accurate measurement of cutting forces also determines the accuracy of numerical analyses (e.g., finite element analyses). Dynamometer systems developed in response to this measurement need consist of sensor-equipped structures integrated into the tool-machine interface. These systems enable the analysis and control of the process by separately and instantaneously measuring the force components (F_x , F_y , F_z) that

¹ Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering, ORCID: 0000-0001-9890-6406.

² Prof. Dr, Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering, ORCID: 0000-0002-8302-657.

arise during cutting(Korkmaz, 2019; Totis & Sortino, 2011; Umurani & Siregar, 2019).

In the literature, dynamometer systems developed for lathe machines exhibit significant diversity in terms of design approaches, sensor technologies used (strain gauge, piezoelectric, load cell, MEMS, etc.), mounting methods, and signal processing techniques. Strain gauge-based systems offer high accuracy, while piezoelectric sensors stand out with their wide frequency range and high dynamic response capability(Khammongkhon, Niropas, Pomusa, & Suksawat, 2025; Panzera, Souza, Rubio, Abrão, & Mansur, 2012a). In recent years, with the development of wireless data transmission, IoT integration, and micro-electromechanical systems (MEMS), portable and much more compact dynamometer systems have emerged(Zhang vd., 2019; Vásquez Céspedes, 2011).

For example, in a study conducted on EN8 steel, shear forces were measured using a three-axis piezoelectric triaxial dynamometer and analyzed using LABVIEW software. In the article, the Taguchi method was applied to determine the most suitable processing parameters, and ANOVA analysis was used to evaluate the results(Kumar & Yadav, 2023).

Similarly, in another study, a strain gauge-based system with a capacity of 15 kN was tested under severe conditions, such as the refurbishment of railway vehicle wheels, and data was obtained with high accuracy and an average error of 5%(Kasprzak & Pyzalski, 2021).

In more precise systems where cutting forces are measured simultaneously in three axes, piezoelectric sensors are preferred. For example, piezoelectric-based dynamometers capable of operating with a sensitivity of 0.1 N have been developed for precision machining processes(Horváth, Pálinskás, Mátyási, & Drégelyi-Kiss, t.y.).

The integration of digital technologies into production lines, wireless data transfer, and IoT-supported monitoring systems are playing an increasingly critical role. In a study developed by Korkmaz (2019), octagonal strain-ring dynamometers designed with an Arduino-based structure were configured as a system that transmits cutting force data to the cloud via RF modules(Korkmaz,2019).

The purpose of this review article is to evaluate the general design principles of dynamometer systems used in lathe machines, the types of sensors used, their application areas, and their advantages and disadvantages within a technical framework, classify them according to structural and sensor technology, compare them in terms of performance and accuracy, explain them with examples for industrial and academic applications, address them by predicting future development directions, and systematically summarize trends in the literature. It also aims to compare the systems in terms of measurement accuracy, ease of application, cost-effectiveness, analysis capability, and integration levels.

2. CLASSIFICATION OF DYNAMOMETER SYSTEMS

Dynamometer systems are divided into various subcategories based on the sensor technologies and structural designs used. The fundamental differences between these systems are based on parameters such as accuracy, cross-sensitivity, cost, ease of integration, and industrial suitability. This section classifies the most commonly used types of dynamometers and provides examples from related studies.

2.1 Strain Gauge-Based Dynamometer Systems

Strain gauge-based dynamometers are among the most commonly used sensor systems for measuring cutting forces generated on lathe machines. These sensors detect the mechanical stress applied to a surface and convert this stress into electrical signals. Strain gauges, which are typically integrated into a Wheatstone bridge circuit, provide a linear voltage output depending on the applied force(Horváth vd., t.y.).

The fundamental principle in these systems is that the force applied to the cutting tool during the cutting process is transferred to an elastic structure where strain gauges are placed. The deformation in this structure is detected by the strain gauges, and the data obtained is converted into force components and interpreted. In such dynamometers, the rigidity of the structure, the position of the strain gauges, and the calibration methods are the main factors determining the overall accuracy of the system(Lad & Patel, t.y.; M. Rizal, Ghani, ., & ., 2018).

2.1.1. Advantages Of Strain Gauge Systems:

- **Good sensitivity-stiffness balance:** Sensitivity can be increased by drilling a hole in the structure, yet the overall stiffness of the sensor remains virtually unchanged.
- **Simple signal conditioning:** The output signal is easily obtained thanks to the Wheatstone bridge configuration, and the electronic interface is quite simple.
- **Cross-sensitivity is low:** In the appropriate configuration (full bridge), force components do not affect each other; P and Q forces can be measured independently.
- **Temperature effect can be balanced:** When all strain gauges are exposed to the same temperature, temperature changes in the bridge circuit cancel each other out and do not interfere with the measurement.

- **No changes to the cutting tool are required:** In applications with integrated sensors, the tool rigidity remains unchanged, and no additional modifications to the tool are necessary(Vásquez Céspedes, 2011).
- **Easy to integrate into the tool:** Strain gauges can be applied to the tool or tool shank with minimal geometric changes; installation is easy.

2.1.2. Disadvantages Of Strain Gauge Systems:

- **Limited dynamic response:** Some strain gauge dynamometers do not respond quickly enough; piezoelectrics are more suitable for high-frequency/dynamic force measurements.
- **Additional gauges are required for separate force components:** If axial force (R) is to be measured, additional strain gauges must be added to the bridge circuit; the circuit becomes more complex.
- **Requires design optimization:** Structures such as strain rings require careful geometric design to maintain both rigidity and sensitivity.
- **Protection is required:** Sensors must be protected from swarf, cutting fluid, and temperature changes; otherwise, measurement stability may be affected(Horváth vd., t.y.; Khammongkhon vd., 2025; M. Rizal vd., 2018; Vásquez Céspedes, 2011).

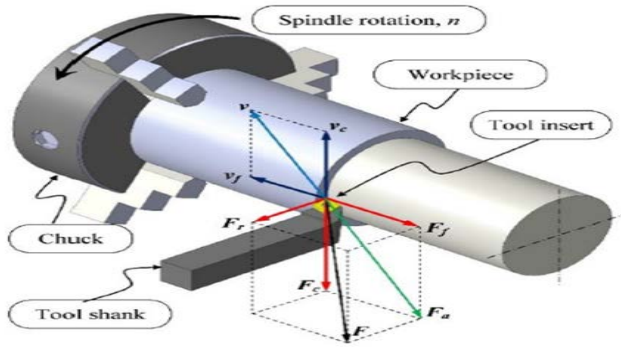


Figure 1. Directions of cutting force components in a turning operation (M. Rizal vd., 2018).

In a study, a three-axis strain gauge-based dynamometer was designed for turning operations, and as a result of calibration tests, the R^2 values of the linear regression models for the F_c , F_f , and F_p force components were determined to be 0.9985, 0.9784, and 0.9989, respectively. The study reported that the dynamometer was sized for maximum shear forces of 1,500 N, depending on the design of the elastic element used, and that it was able to successfully perform measurements within this force range during turning (Panzera vd., 2012a).

In a study conducted by Kasprzak and Pyzalski (2021), a strain gauge-based sensor system integrated into the machine structure was developed for the active measurement and limitation of axial loads in heavy turning operations. The system contains a total of 7 CL20-8 ring-type sensors (3 on the X-axis and 4 on the Z-axis) and has been tested at loads between -30 kN and $+30$ kN. In this structure, which can be integrated with CNC systems, the average relative errors of the sensors during axial force transmission varied between 1.45% and 4.95% depending on the axis groups. No significant drift was observed in the measurements during the tests, and noise was eliminated by filtering (Kasprzak & Pyzalski, 2021).

In another study, cutting forces obtained at different speed, depth of cut, and feed rate combinations were analyzed using a strain gauge-based dynamometer specially developed for CNC lathes, along with surface roughness(Melayim , 2019).

The three-axis strain gauge dynamometer with an octagonal ring structure developed by Rizal and colleagues has been found suitable for industrial turning applications with a measurement capacity of approximately 2900 N and a safe dynamic response at 766 Hz. In calibration tests, cross-sensitivity was measured below 0.87%, linearity error ranged between 0.49% and 1.91%, and natural frequency deviation was below 3.6%. The study also emphasized that it offers a lower-cost, flexible, and highly accurate solution compared to commercial piezoelectric dynamometers(M. Rizal vd., 2018).

In a study conducted by Lad and colleagues, a strain gauge dynamometer capable of measuring forces up to 200 kg was developed, which is low-cost and can also be used for educational purposes(Lad & Patel, t.y.).

In a study conducted by Hanif and colleagues, a three-component force dynamometer based on strain gauges was developed for tool shank applications designed for high-speed turning; it was demonstrated that the system offers a reliable and low-cost alternative for measuring cutting forces under dry turning conditions, and that the Taguchi method can be used as an effective approach that can be applied in simple steps for the optimization of cutting parameters. It was reported that the developed dynamometer operates with an accuracy of approximately $\pm 1\%$, that this was verified by repeating calibration tests, and that cross-sensitivity was negligible(Hanif, Aamir, Muhammad, Ahmed, & Maqsood, 2016).

2.1.3. Applications of Strain Gauge-Based Systems

- Cutting force-induced error compensation, Tool wear prediction, Tool breakage prevention, Axis load balancing(Kasprzak & Pyzalski, 2021).
- Tool Condition Monitoring (TCM) can be used in machinability analysis and parameter optimization applications(M. Rizal vd., 2018).
- The system is suitable for applications such as tool condition monitoring, chip morphology, force analysis, and process optimization(Panzer vd., 2012a).

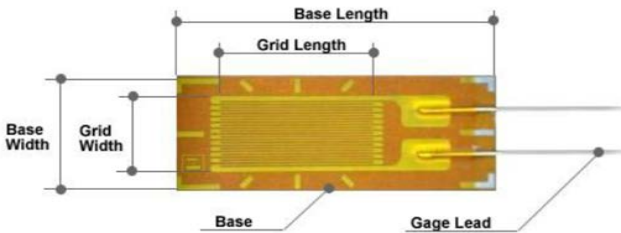


Figure 2. Foil-type strain gauge

2.2. Piezoelectric-Based Dynamometer Systems

Piezoelectric force sensors have a sandwich structure consisting of quartz discs placed between upper and lower plates and operate by converting applied mechanical stress into electrical charge. The resulting charge is converted into a voltage signal via a charge amplifier, and this structure enables the precise monitoring of high-frequency, dynamic force changes(Vásquez Céspedes, 2011).

The high rigidity of piezoelectric materials enables the sensor to produce a stable and linear output even with very small deformations; however, due to load leakage occurring over time in piezoelectric elements, there are limitations in long-term static

force measurements. For reliable measurement, cables and connectors must have a high level of insulation(Vásquez Céspedes, 2011).

The three-axis piezoelectric dynamometer developed by Horváth et al. (n.d.) is designed to measure forces in the 0–100 N range that occur during fine turning with an accuracy of approximately 0.1 N. The sensor operates on the principle of SiO₂ crystals generating an electrical charge under mechanical load. Due to its high internal impedance, it requires a low input current, and the signal lines between the cell and the amplifier must be highly insulated and shielded. During the calibration phase, the sensor sensitivity was determined in pC/N units, and this value was defined on the signal conditioner to convert the output to V/N format. This design is presented as a reference measurement system that enables the high-precision measurement of small forces in fine turning operations(Horváth vd., t.y.).

The vast majority of piezoelectric dynamometers are triaxial in design, capable of simultaneously measuring the F_x, F_y, and F_z (or F_c, F_f, F_p) force components. This multi-axis measurement capability provides a significant advantage for cutting force analysis, tool-workpiece interaction, and dynamic characterization of chip formation in turning operations(Totis & Sortino, 2011).

This general structure is implemented with various architectures in different commercial or research-oriented dynamometer designs.

The Kistler 9251A ring-type sensor, examined by Totis & Sortino (2011), offers suitable performance for processes involving rapid force changes, such as fine turning, thanks to its high structural rigidity and natural frequency value of approximately 1 kHz. The compact design of the ring sensor largely eliminates the natural frequency drop associated with the

increase in mass seen in plate-type piezoelectric dynamometers. However, the requirement for a charge amplifier and the critical role played by cable-connector connections in measurement accuracy are noted as significant design limitations(Totis & Sortino, 2011).

In the study conducted by Kumar & Yadav (2023) on the turning of EN8 steel, the F_c , F_f , and F_p force components were measured in real time at a sampling rate of approximately 1000 Hz using a three-axis piezoelectric dynamometer. The cutting tool was placed on the dynamometer, and the electrical charge generated in the crystals was converted into a voltage signal by the DAQ unit and monitored in the LABVIEW environment. The results obtained demonstrate that the system offers high accuracy and repeatability for dynamic force analysis(Kumar & Yadav, 2023).

Desktop piezoelectric dynamometers, frequently used in research, can accurately detect even very small force fluctuations and produce highly accurate data thanks to their voltage-based linear outputs. 3 While piezoelectric sensors offer advantages in terms of high resonance frequency and rigidity, they have the disadvantages of lower repeatability and higher cost compared to strain-gage-based sensors. Additionally, their limited resistance to high temperatures can affect their areas of application(Panzera vd., 2012a).

2.2.1. Advantages of Piezoelectric Sensors

- **High rigidity:** It has a very rigid structure, resulting in only minimal deformation when force is applied.
- **High natural frequency:** Its structural properties enable operation across a wide frequency band and allow for the monitoring of rapid force changes.

- **Low crosstalk:** Interaction between axial force components is very low, which increases accuracy in multi-axis measurements.
- **Linear and hysteresis-free output:** The force-voltage relationship is linear, and the sensor responds instantly to reverse loads.
- **Wide measurement range:** Thanks to its quartz structure, a wide force range from low to high can be measured.
- **Temperature resistance:** Sensitivity remains stable even at high temperatures (e.g., up to 500 °C).
- **Long service life:** Piezoelectric materials do not wear out over time, so they have a very long service life(Vásquez Céspedes, 2011).
- They can detect even small force fluctuations with high precision(Öztürk & Yıldızlı, 2018).
- High rigidity and low deformation, Wide bandwidth / high resonance frequency, Low crosstalk (low interaction between axes), Linearity and repeatability, Compact integration into the tool holder(Totis & Sortino, 2011).
- Ability to accurately measure small cutting forces, Three-component force measurement (F_c , F_f , F_p), High rigidity and low deformation, Compact design and easy integration, Ready-to-use modules and repeatability, Low measurement error after calibration(Horváth vd., t.y.).

2.2.2. Disadvantages of Piezoelectric Sensors

- **Limited in actual static force measurement:** Since piezoelectric material loses the charge it accumulates over time, static forces can only be monitored stably for a certain period.

- **Requires high insulation:** Cables and connectors must be very well insulated; otherwise, leakage current will interfere with the measurement.
- **Requires specialized electronics:** Piezoelectric sensors must generally be used with charge-type amplifiers to ensure the generated charge signal is processed correctly(Vásquez Céspedes, 2011).
- Sensitivity to cable and connector effects, Charge amplifier requirement, Sensitivity to machine structure, Low natural frequency in standard plate-type piezo dynamometers(Totis & Sortino, 2011).
- Due to high internal resistance, special electronic requirements exist. Shielded cables and connectors are mandatory. Voltage-sensitive amplifiers cannot be used; charge amplifiers are mandatory. Load drift may occur over time. Due to time constant uncertainty, instability may occur in long-term measurements. Cable leaks may cause signal errors(Horváth vd., t.y.).

2.2.3. Applications of Piezoelectric Sensors

Piezoelectric force sensors are used in a wide variety of manufacturing applications requiring high dynamic accuracy:

- Measurement of cutting forces in three axes.
- Optimization of cutting parameters.
- Monitoring of tool wear.
- Comparison of different tools and cutting fluids.
- Analysis of chip formation, vibration, and chatter(Vásquez Céspedes, 2011).
- Micro machining and fine turning.

- Process status monitoring and modeling studies(Kumar & Yadav, 2023).

2.3. Film Sensor-Based Dynamometer Systems

Film sensor-based dynamometer structures are compact force measurement systems that utilize multi-layer strain sensors placed in slots opened on the tool body or on an elastic sleeve/pad attached to the body. When the cutting force creates micro-strain in the tool body, the resistance grid in the film layer converts this deformation into a resistance change, and the force $\rightarrow$ strain $\rightarrow$ electrical signal conversion is performed via a Wheatstone bridge circuit consisting of four resistors. Thus, thin film sensors embedded in the tool bar enable the measurement of cutting forces from the deformation on the tool without the need for an external dynamometer(Cheng, Wu, Liu, He, & Song, 2022).

The thin, multi-layered structures of film sensors, which can be directly integrated into the tool body, enable the detection of cutting forces while maintaining tool rigidity. The sensor's ability to operate embedded in the tool bar without significantly altering the tool geometry provides a significant compactness advantage over traditional, bulky dynamometers, particularly in applications with space constraints. However, the sensor placement, elastic substrate geometry, material properties of the film system, and environmental effects such as temperature can limit measurement performance. Nevertheless, thin-film sensor-based cutting force measurement systems are considered a promising and practical solution for real-time force monitoring and intelligent tool design in turning/single-point machining operations(Cheng vd., 2022).

In Zhang and colleagues' design example, the film sensor has a multi-layered structure: a Ni–Cr resistance film layer and Si₃N₄ insulation layers are placed on a stainless steel substrate. The vacuum soldering method ensures that the sensor is directly

and firmly bonded to the elastic plate, increasing strain transmission and reducing coupling effects. Film resistance grids for force measurement in three axes are combined in full bridge circuits, achieving high sensitivity. This structure offers a more stable, reliable, and highly sensitive alternative to traditional adhesive-type strain-gage solutions, presenting an effective approach for real-time force analysis in turning operations(Zhang vd., 2019).

2.3.1. Film Sensor Advantages

- **Thin structure that does not alter tool geometry:** The film sensor is extremely thin, so it does not change the tool's structure or cutting geometry(Cheng vd., 2022).
- **Embedded design → preservation of high natural frequency:** Since the sensor assembly is integrated into the body, it does not create additional mass; thus, the system's natural frequency does not decrease and is suitable for dynamic measurement(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **High strain transmission:** The embedded film structure increases measurement accuracy by directly transmitting strain to the sensor(Zhang vd., 2019).
- **Reduction in coupling (axial interaction) error:** Axial interference caused by multi-axis forces is significantly reduced in the embedded film sensor structure(Zhang vd., 2019).
- **No adhesive-related errors:** The vacuum soldering technique eliminates instability and loss of accuracy caused by the adhesive layer(Zhang vd., 2019).
- **High sensitivity:** Film sensor-based systems have been reported to offer higher sensitivity compared to adhesive-type strain-gage systems(Zhang vd., 2019).

- **Low cost and easy manufacturability:** Film sensor technology is relatively inexpensive and suitable for mass production(Cheng vd., 2022).
- **Easy maintenance and replacement (plug-and-play design):** Film sensor modules can be replaced when necessary; the maintenance process is simple(Cheng vd., 2022).
- **Advantage of no added mass:** The problem of “increased mass → decreased stiffness” seen in conventional dynamometers does not occur in this structure(Cheng vd., 2022).

2.3.2. Film Sensor Disadvantages

- **High sensitivity to sensor placement:** Incorrect positioning or poor surface preparation quickly compromises measurement accuracy(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **Mechanical strength limits of thin film structures:** The film layer is mechanically more fragile compared to piezoelectric or traditional strain-gage systems(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **Sensitivity to temperature and surface tension:** The thin-layer structure may experience sensitivity loss due to temperature changes and surface tension(Cheng vd., 2022).
- **Production and layer coating processes are difficult:** The multi-layer film structure and vacuum soldering require expertise; the production process is complex(Zhang vd., 2019).

- **Risk of damage from impact and vibration:** The sensor is thin and may be damaged under high impact loads.(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **Dependence on assembly quality:** Micro-errors at the film-substrate interface directly affect strain transmission(Zhang vd., 2019).

2.3.3. Film Sensor Applications

- **Direct measurement of F_x , F_y , and F_z forces on the tool body during turning:** Body measurement provides a more realistic force perception compared to a dynamometer(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **Smart tool designs:** The embedded structure of film sensors in the body enables the development of smart tool concepts(Zhang vd., 2019).
- **Tool wear and tool condition monitoring:** Small force changes due to wear can be detected with high precision(Zhang vd., 2019).
- **Chip formation and vibration analysis:** Thanks to the high natural frequency, chatter onset, chip breakage behavior, and dynamic force changes can be examined(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **Compact force measurement in confined spaces:** Thin-film sensors can be used in narrow areas where traditional dynamometers cannot fit(Zhang vd., 2019).
- **Multi-axis force characterization:** Can be used for simultaneous measurement of F_x – F_y – F_z components(Zhang vd., 2019).

2.4. Load Cell Dynamometer Systems

Load cells are transducers that operate on the principle of converting very small deformations on an elastic element into an electrical signal via a strain gauge. The applied force creates a microscopic elongation on the elastic beam; this elongation is detected by the strain gauge as a change in resistance and converted into a voltage signal via a Wheatstone bridge. This amplified signal is then converted into a force value, enabling reliable measurement of the shear forces generated during processing(Özdemir, H. , 2006; Projoth vd., 2021).

Due to their low-cost, durable, and high-accuracy designs, load cells are widely preferred in numerous machining applications such as turning, linear machining, tool wear monitoring, and cutting parameter evaluation. However, temperature changes and mounting accuracy can affect measurement accuracy, requiring appropriate mechanical protection and bridge circuit designs(Özdemir, H. (2006)).

In this study, a low-cost dynamometer was developed using a straight-bar load cell attached to the tool holder to monitor cutting force during turning. Although the system measures only the tangential force component (F_t), experimental tests demonstrated that the dynamometer's performance is sufficient, particularly in terms of simplicity and low cost. Its simple design and direct integrability into the machine tool make this method suitable for basic force analysis(Umurani & Siregar, 2019).

Günay and colleagues developed a lathe dynamometer using two beam-type load cells to investigate the effect of the chip angle on cutting forces. The 200 kg capacity cells enabled the measurement of the F_c and F_f force components; thanks to the low total error rate (0.02% FS), good agreement was achieved between experimental and theoretical values. The limitation of

the system is that the radial force (F_p) component cannot be measured (Gunay, Seker, & Sur, 2006).

In the study by Projoth and colleagues, a load cell assembly containing four strain gauges was rigidly attached to a post, and the cutting forces generated during the machining of EN8 steel were measured directly. The Wheatstone bridge formed by the load cell converts microdeformations in the elastic body into electrical signals, ensuring that the system forms a complete measurement chain. The fact that the experimental force values obtained in the study were very close to the estimated forces in all tests shows that the load cell dynamometer enables reliable measurement of cutting forces during turning. This structure also allows for detailed examination of the effects of process parameters (cutting speed, feed rate, chip depth) on cutting force. Furthermore, it is noted that load cell dynamometers are widely used in many machining applications in the literature, such as tool wear monitoring, cutting behavior modeling, and parameter change tracking (Projoth vd., 2021).

The dynamometer developed by Şeker and colleagues utilizes bending-beam load cells with a capacity of approximately 2000 N. These cells are positioned to measure three-axis forces during linear chip removal processes similar to turning operations. Low hysteresis, high accuracy, and a wide operating temperature range enhance the system's reliability. The experimental force values are consistent with theoretical calculations, demonstrating the design's success in terms of repeatability and accuracy. Furthermore, this structure offers advantages in specific applications, such as investigating the effects of rolling direction on chip removal behavior (Şeker, Kurt, & Çiftçi, 2002).

2.4.1. Load Cell Dynamometer Advantages:

- **Simple and low-cost design:** Beam-type or single-axis strain-gage structures are low in production cost and simple in design(Özdemir, H. , 2006; Projoth vd., 2021; Umurani & Siregar, 2019).
- **Easy integration:** Sensors can be easily mounted to the tool holder or CNC machine(Gunay vd., 2006; Projoth vd., 2021; Umurani & Siregar, 2019).
- **High accuracy and low error rate:** The total error in TEDEA/similar load cells is at the 0.02–0.03 FS level(Gunay vd., 2006; Şeker vd., 2002).
- **Low hysteresis and high repeatability:** Provides stable force measurement with hysteresis and repeatability at the 0.03% level(Şeker vd., 2002).
- **Wide working capacity:** Load cell capacities ranging from 200 to 2000 N are sufficient for many chip removal conditions(Gunay vd., 2006; Şeker vd., 2002).
- **Agreement with theoretical models:** The agreement of experimental F_c values with theoretical models such as Kienzle confirms the reliability of the sensor(Gunay vd., 2006).
- **CNC compatibility:** Compact dynamometer designs that can be integrated into CNC lathe magazines are possible(Gunay vd., 2006).
- **Durable and heavy-duty construction:** Beam-type cells are resistant to harsh operating conditions(Özdemir, H. , 2006).
- **Compatibility with data acquisition systems:** Provides easy connection with DAQ cards; analog output processing is straightforward(Özdemir, H. , 2006).

2.4.2. Load Cell Dynamometer Disadvantages

- **Axis limitation:** Simple designs can typically measure a single axis (F_t) or two axes (F_c – F_f); multi-axis force measurement is limited (Gunay vd., 2006; Projoth vd., 2021; Umurani & Siregar, 2019).
- **Load cell capacity design limits:** The selected chip depth, feed rate, and material hardness are constrained by the sensor capacity (within the range of 200–2000 N) (Gunay vd., 2006; Şeker vd., 2002).
- **Sensitivity to vibration and stiffness effects:** Beam-type designs may experience loss of accuracy at high frequencies (Özdemir, H. , 2006; Projoth vd., 2021; Şeker vd., 2002).
- **Mounting and surface preparation accuracy:** Strain-gage mounting requires precise surface preparation; incorrect bonding reduces accuracy (Özdemir, H. , 2006).
- **Temperature sensitivity:** Strain-gage systems are affected by temperature changes; compensation may be required (Özdemir, H. , 2006).
- **Off-axis load effect:** Load cells only work well on the specified axis; cross loads compromise accuracy (Şeker vd., 2002).

2.4.3. Load Cell Dynamometer Applications

- **Turning and Shaping Operations:**
 - Single-axis F_t or multi-axis F_c – F_f – F_p force measurement (Özdemir, H. , 2006; Gunay vd., 2006; Projoth vd., 2021; Şeker vd., 2002; Umurani & Siregar, 2019).

- Investigation of the effects of cutting speed, feed rate, and chip depth on force(Projoth vd., 2021; Umurani & Siregar, 2019).
- Experimental determination of the effects of parameters such as chip angle, tool geometry, and tool material on force behavior(Özdemir, H. , 2006; Gunay vd., 2006).
- **Model Validation and Parameter Studies:**
 - Validation of theoretical cutting force models (Kienzle et al.)(Gunay vd., 2006).
 - Parametric analyses, process optimization studies(Projoth vd., 2021).
- **Tool Condition and Wear Monitoring:** Determining the effect of tool wear on force increase(Özdemir, H. , 2006; Projoth vd., 2021).
- **Vibration and Machining Stability Analysis:** Evaluation of vibration and chatter tendencies (indirectly from force variations)(Özdemir, H. , 2006; Projoth vd., 2021).
- **Academic and Educational Use:** Its simple and low-cost structure makes it suitable for educational and laboratory work(Umurani & Siregar, 2019).
- **Material behavior studies such as rolling direction:** Determining the effect of production directions such as rolling direction on chip removal(Şeker vd., 2002).

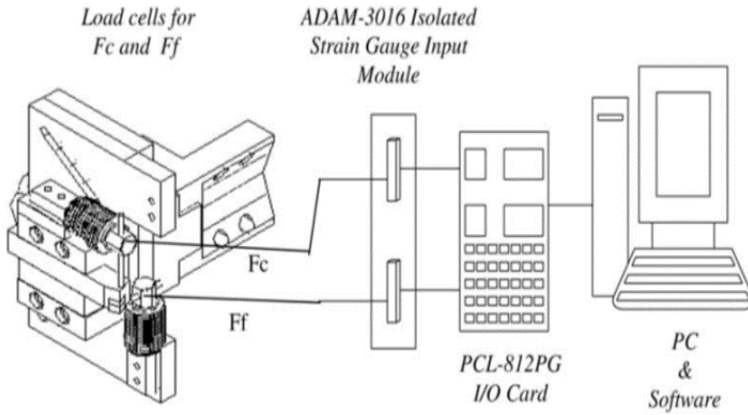


Figure 3. Shear force measurement setup prepared using a load cell (Gunay vd., 2006).

2.5. Wireless/IoT-Based Dynamometer Systems

Classic tool holder sensors used to measure cutting forces have been converted from a wired structure to smart systems capable of wireless data transmission. In this approach, low-level signals from strain gauges are first extracted from the bridge circuit, then amplified and digitized via an ADC before being transmitted to the computer via a Bluetooth module. This eliminates cable clutter on the tool holder, providing more flexible, organized, and real-time data monitoring capabilities(Uquillas & Hsiao, 2016).

The wireless structure also enables real-time monitoring of vibration (chatter) data containing high frequencies(Uquillas & Hsiao, 2016).

The literature indicates that wireless communication methods such as RF, GPRS, Bluetooth, and Zigbee are mostly preferred for short-range and simple applications due to their low data transmission speeds, limited coverage area, and certain security weaknesses. It is also noted that they can experience performance loss due to environmental factors such as rain, fog,

and electromagnetic noise. In contrast, it is emphasized that GPRS-based systems are less affected by environmental factors thanks to their more up-to-date infrastructure. However, in the system developed within the scope of this thesis, an RF-based wireless communication structure was preferred due to the very short distance between devices, the negligible amount of external electromagnetic noise in the environment, and the economic nature of the selected module, and the system was successfully operated using this method(Korkmaz, M. , 2019).

In the thesis study, the NRF24L01 module was integrated into an octagonal ring strain gauge-based dynamometer to enable remote monitoring of cutting forces. Analog force signals were converted into digital form by the transmitter Arduino and transmitted wirelessly to the receiver module; they were then reprocessed by the receiver Arduino, and real-time voltage-force trends were successfully displayed on a computer monitor(Korkmaz, M. , 2019).

The literature indicates that modern force sensors are shifting toward wireless measurement systems; examples exist where data transmission is performed using infrared telemetry in strain-gage-based structures. These studies demonstrate that dynamometer signals can be transmitted without being connected to a cable and that wireless data transmission can be achieved by integrating the sensor into the tool body(Vásquez Céspedes, 2011).

In the example application presented by Vásquez (2011), the strain signal obtained from the Wheatstone bridge was first amplified and then transmitted to the receiver via an infrared (IR) transmitter diode. This approach has advantages such as eliminating cable clutter, enabling quick setup, and easily adapting to workshop conditions; however, it also has limitations such as requiring transmitter-receiver axis alignment and

necessitating additional calibration due to drift caused by temperature changes(Vásquez Céspedes, 2011).

2.5.1. Wireless/IoT-Based Dynamometer Advantages

- **Environment Setup and Wireless Use :**

- Since it eliminates the use of cables, it does not restrict the working area of the moving parts on the lathe(Uquillas & Hsiao, 2016).
- Eliminates the need for cabling, increases the portability of the system(Korkmaz, M. , 2019).
- Eliminating cables improves order and safety around the tool holder(Vásquez Céspedes, 2011).
- Reduces problems such as cable breakage, disconnections, or noise interference on the production line(Korkmaz, M. , 2019).

- **Easy Installation:**

- Installation is faster and more practical, with no need to lay cables indoors(Uquillas & Hsiao, 2016).
- Offers workshop environment compatibility, quick assembly, and ease of use advantages(Vásquez Céspedes, 2011).

- **Energy Efficiency / Low Power:**

- Bluetooth's low power consumption provides energy efficiency to the system(Uquillas & Hsiao, 2016).
- The NRF24L01 module provides low power consumption and sufficient data rates (250 kbps–2 Mbps)(Korkmaz, M. , 2019).

- **Industry 4.0 and IoT Compatibility:**

- The sensor is compatible with Industry 4.0 trends; it can be integrated into IoT-based monitoring applications(Uquillas & Hsiao, 2016).
- Industry 4.0 and IoT-focused smart production systems(Korkmaz, M. , 2019).

- **Real-Time Monitoring:**

- The wireless structure provides real-time monitoring for early detection of chatter (vibration) onset(Uquillas & Hsiao, 2016).
- Real-time tracking of cutting force(Uquillas & Hsiao, 2016).
- Remote cutting force monitoring on lathes and milling machines(Korkmaz, M. , 2019).

- **Economical / Flexible System:**

- Thanks to its Arduino-based architecture, it offers a cost-effective and easily customizable wireless measurement platform(Korkmaz, M. , 2019).
- The strain gauge + wireless transmission combination provides an economical solution(Korkmaz, M. , 2019).

2.5.2. Wireless/IoT-Based Dynamometer Disadvantages

- **Sampling and Data Rate Limitations:**

- Due to baud rate limitations in wireless systems, the sampling rate is lower than in wired systems (approximately 230,400 bps)(Uquillas & Hsiao, 2016).

- Aliasing may occur in the signal due to sampling that is not fully compliant with Nyquist's theorem(Uquillas & Hsiao, 2016).
- Some high-frequency components may not be directly detectable; undersampling techniques may be required(Uquillas & Hsiao, 2016).
- The system architecture has a lower frequency response compared to commercial piezoelectric dynamometers such as wired Kistler units(Korkmaz, M. , 2019).
- **Wireless Communication Problems:**
 - RF-based modules have a limited communication range (approximately 20 m).Wireless communication may be affected by noise, obstacles, metal surfaces, and signal attenuation(Korkmaz, M. , 2019).
- **Limitations of IR Communication**
 - Line of sight between receiver and transmitter is required.
 - The infrared system must be on the same axis to receive the signal correctly.
 - Additional compensation is required for thermal drift(Vásquez Céspedes, 2011).

2.5.3. Wireless/IoT-Based Dynamometer Applications

- Early detection of chatter (vibration) onset during turning.
- Real-time monitoring of cutting force.
- Online process monitoring via tool holder.
- In-machine applications where wired dynamometer use is not feasible(Uquillas & Hsiao, 2016).
- Remote cutting force monitoring on lathes and milling machines.

- Real-time monitoring for tool wear, tool breakage, and process control.
- Industry 4.0 and IoT-focused smart production systems.
- Mobile/compact production cells requiring wireless data collection(Korkmaz, M. , 2019).

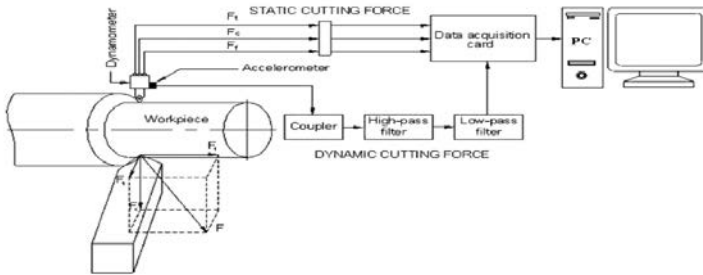


Figure 4. Schematic representation of a wireless-based experimental setup (Yaldız & Ünsaçar, 2006a).

2.6. MEMS-Based Dynamometer Systems

MEMS-based force sensors are micro-scale structures that indirectly detect force by measuring the natural vibration frequencies of polycrystalline silicon resonators, which change when force is applied. Their compact size allows them to be directly integrated into tool bodies, while this resonator-based structure provides high sensitivity and a wide bandwidth response. The fact that the technology is still in the experimental stage indicates that the full integration of these sensors into commercial dynamometer systems may take time(Vásquez Céspedes, 2011).

MEMS-based piezoresistive strain gauges are micro-scale sensor elements based on the principle that silicon-based piezoresistors change resistance in response to mechanical strain. The MEMS strain gauge used in the study consists of a sandwich structure with a piezoresistive semiconductor element, gold interconnect wires, a metal pad, and a metal pin in the middle layer, with the top and bottom layers coated with polyimide

insulation. This structure is suitable for integration into smart cutting tools due to its small size, high sensitivity, large resistance value, and MEMS production techniques suitable for mass production. The electrical resistance of the commercial MEMS strain gauge used is reported to be $1000\ \Omega$, with a sensitivity coefficient of $150 \pm 5\%$ and dimensions of $3 \times 0.20 \times 0.04\ \text{mm}^3$. Based on these characteristics, the MEMS sensor was selected to measure cutting forces in the X and Y directions in the developed smart cutting tool (Y Zhao vd., 2018; You Zhao, Zhao, & Ge, 2018).

The MEMS-based semiconductor strain gauges developed in this study offer significantly higher sensitivity compared to traditional metal foil sensors due to their high gauge factor values. The sensor's natural frequency, measured at approximately 771 Hz, demonstrated that it can respond quickly and stably to cutting force changes in dynamic tests. This performance demonstrates that MEMS-based structures are a powerful alternative for reliably monitoring dynamic cutting forces in high-speed machining applications (You Zhao vd., 2016).

In the relevant study, a compact dynamometer equipped with MEMS-based piezoresistive strain gauges was developed to measure the two-axis cutting force during turning. The sensors were integrated into a dual octagonal ring (TMPOR) structure positioned perpendicular to each other; they were placed in the maximum strain regions determined by finite element analysis to enable direct detection of deformation. The sensitivity value obtained with this design was reported as 0.31 mV/N, and the natural frequency as 771 Hz; it was also noted that approximately 16 times higher sensitivity was achieved compared to traditional foil-type strain gauges (Mohanraj, Uddin, & Thangarasu, 2023).

2.6.1. Advantages of MEMS-Based Force Sensors

- **Micro size and ease of integration:** MEMS sensors are very small in size; they can be integrated into the cutting tool body or tool holder, positioned very close to the cutting zone, and do not restrict the movement area on the machine(Mohanraj vd., 2023; Vásquez Céspedes, 2011; Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018).
- **High sensitivity / high gauge factor:** Semiconductor-based MEMS piezoresistors offer sensitivity levels that are tens of times higher (approximately 16 times and $\sim 150 \pm 5\%$ gauge factor levels) compared to metal foil strain gauges; this enables even very small force changes in three axes to be reliably detected(Mohanraj vd., 2023; Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018, 2016).
- **High rigidity + sensitivity combination:** MEMS elements enable measurements without compromising sensitivity while significantly preserving the rigidity of the sensor structure(Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018, 2016)
- **Low mass and high natural frequency:** The small size and low mass of the sensors increase the system's natural frequency (approximately 700–770 Hz and surrounding frequencies) and enable the monitoring of dynamic forces even under high-speed machining conditions(Mohanraj vd., 2023; Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018, 2016).
- **Reduced cross-talk:** When combined with optimized carrier structures such as octagonal rings, the cross-talk ratio between axes can be reduced to a range of 0.14–4.4%; in some designs, cross-talk between the X–Y directions has been reported to be only around 2–3%(Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018, 2016).

- **Compact structure, mass production, and relatively low cost:** MEMS production technologies enable the creation of precise, repeatable, and relatively low-cost sensors through microfabrication processes suitable for mass production. Small size allows for compact sensor designs integrated with cable channels and Wheatstone bridge circuits(Mohanraj vd., 2023; Vásquez Céspedes, 2011; Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018, 2016).
- MEMS-based force sensors are suitable for the development of “smart tool” structures embedded in cutting tools, real-time force monitoring, and integration into Industry 4.0/IoT-based condition monitoring and predictive maintenance systems(Mohanraj vd., 2023; Vásquez Céspedes, 2011; You Zhao vd., 2018, 2016).

2.6.2. Disadvantages/Limitations of MEMS-Based Force Sensors

- **Temperature sensitivity:** Semiconductor piezoresistors are more affected by temperature changes than metal strain gauges; their temperature coefficients are high and temperature compensation is required(You Zhao vd., 2018; Y Zhao vd., 2018; Mohanraj vd., 2023; You Zhao vd., 2016).
- **Connection and mounting precision:** The performance of MEMS sensors is highly sensitive to bonding quality, adhesive thickness, sensor position, and surface preparation. Minor errors in connection can negatively impact linearity, repeatability, and overall accuracy, particularly on certain axes (e.g., Fp)(Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018, 2016).
- **Limited deformation/tolerance range:** MEMS sensors are typically designed for small deformation ranges; they

can be damaged under high loads and extreme deformation conditions, thus requiring special packaging and protective layers(Mohanraj vd., 2023).

- **Sensitivity to environmental effects:** Due to micro-connections and thin film structures, they are more sensitive to environmental factors; this requires additional design measures in terms of long-term stability and durability(Mohanraj vd., 2023).
- **Natural frequency deviations due to system assembly:** The rigidity of the bench-tool assembly may cause the natural frequency values obtained in the laboratory environment to decrease slightly under actual operating conditions; this indicates that dynamic performance depends on assembly conditions(You Zhao vd., 2016).

2.6.3. Main Applications of MEMS-Based Force Sensors

- **Measurement of three-axis cutting forces in turning and other chip removal processes:** Simultaneous measurement of F_c , F_f , and F_p components; analysis of load distribution and cutting mechanism in the chip removal zone(Mohanraj vd., 2023; Vásquez Céspedes, 2011; Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018, 2016).
- **Tool wear and tool condition/tool life monitoring:** Since it can detect small changes in cutting force components, it can be used for early detection of tool wear and deterioration in cutting conditions; it contributes to the optimization of cutting parameters (V_c , f , a_p)(Mohanraj vd., 2023; Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018, 2016).

- **Chatter analysis, dynamic force behavior:** Thanks to high natural frequency and sensitivity, vibration, chatter onset, sudden loads during start-stop, and dynamic force fluctuations can be examined in detail(Mohanraj vd., 2023; Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018, 2016).
- **Smart cutting tools and micro-machining applications:** “Smart tool” designs with force sensors embedded directly into the tool body on CNC lathes and milling machines; micro-force measurement in micro-manufacturing processes such as micro-milling and micro-turning(Mohanraj vd., 2023; Vásquez Céspedes, 2011; Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018).
- **General sensor applications:** Can be used to measure a wide variety of physical quantities such as vibration, acceleration, pressure, and micro-motion detection(Mohanraj vd., 2023).

3. COMPARISON OF DYNAMOMETER PERFORMANCE

Dynamometer systems based on different sensor technologies show significant differences in measurement performance. These systems are generally evaluated according to the following criteria:

- Accuracy (sensitivity)
- Cross-talk
- Dynamic response frequency
- System cost
- Calibration difficulty
- Modularity and ease of integration

3.1. Sensitivity and Responsiveness

Piezoelectric systems are among the technologies that provide the highest sensitivity. For example:

In the article studied, the piezo-based system operates with 0.1 N sensitivity and has an error rate below 1.5%(Horváth vd., t.y.).

Totis and Sortino (2011) reported that the usable frequency bandwidth in the piezo-ring modular dynamometer they developed could be extended to approximately 1 kHz in all axes with appropriate filtering; in contrast, the system frequency response in the commercial plate-type piezoelectric dynamometer examined for comparison remained below 500 Hz(Totis & Sortino, 2011).

The MEMS-based sensor developed by Mohanraj et al. consists of piezoresistive strain gauges placed on two octagonal rings (TMPOR) positioned perpendicular to each other for two-axis force measurement. The sensitivity achieved per axis in the developed sensor is 0.31 mV/N, and its natural frequency is reported to be 771 Hz(Mohanraj vd., 2023).

In the MEMS-based smart cutting tool developed by Zhao et al. (2018), the sensitivity for cutting forces in the X and Y directions was obtained as 0.1 mV/N on both bridges. As a result of static calibration, the cross-interference error was reported as 1.97% in the X direction and 3.03% in the Y direction(Y Zhao vd., 2018).

Although strain gauge-based systems generally provide lower sensitivity, many studies have demonstrated that they can perform force measurements with sufficient accuracy.

Rizal et al. (2018) reported that the sensitivity of their developed three-axis strain-gauge-based dynamometer was in the range of approximately $31.3 \times 10^{-3} - 172.4 \times 10^{-3}$ mV/N and that

the cross-sensitivity error remained below 0.87% for the radial force component in particular(M. Rizal vd., 2018).

The compilation highlights that different ring geometries significantly affect measurement sensitivity; in particular, elliptical octagonal rings increase sensor sensitivity by producing higher deformation(Mohanraj vd., 2023).

The smart cutting tool developed based on the static calibration results of the article has a sensitivity of 0.1 mV/N in both the X and Y directions, and this value provides sufficient sensitivity to detect changes in small cutting forces(Y Zhao vd., 2018).

The study indicates that the straight rod-type load cell used in the study exhibits sufficient sensitivity to small tangential force changes, particularly in POM and PTFE materials with low elastic moduli, and that the static calibration provides a linear response in the range of 0.05–0.5 N(Umurani & Siregar, 2019).

The four strain gauge load cells used in the study were able to directly and linearly detect the shear forces generated during the processing of EN8 steel; the near-perfect agreement between the experimental values and the predicted values demonstrated that the sensor arrangement had sufficient sensitivity(Projoth vd., 2021).

In the study, it was observed that the geometric optimization of the elastic region in the team body enabled the thin film strain sensor to detect local deformation more effectively, thereby significantly increasing the sensor's static sensitivity(Cheng vd., 2022).

The study demonstrated that three full-bridge circuits formed with thin-film resistive grids provided a highly linear response and that the film sensor's Ni–Cr alloy significantly

increased the dynamometer's measurement sensitivity due to its high strain coefficient(Zhang vd., 2019).

Static calibration results show that the newly designed triaxial piezoelectric dynamometer operates with less than 6% static error and less than 3% cross-talk in all three axes, providing sufficient measurement accuracy under semi-finish and finish machining conditions(Totis & Sortino, 2011).

The developed strain gauge dynamometer can measure cutting and feed forces up to 200 kg. The experimental results show that the force values increase linearly with increasing chip depth, demonstrating that the sensor has sufficient sensitivity(Lad & Patel, t.y.).

3.2. Dynamic Response and Frequency Performance

Measurement success under dynamic loads is particularly important in intermittent cutting operations:

Totis and Sortino (2011) reported usable frequency bandwidths in the X, Z, and Y directions as 656 Hz, 544 Hz, and 984 Hz, respectively, in a piezo-ring modular dynamometer; while noting that in the reference commercial plate-type piezo dynamometer configuration, the system frequency response remained below 500 Hz, and therefore force data could be collected over a wider frequency band with the new system(Totis & Sortino, 2011).

The study states that the natural frequency of a dynamometer must be at least four times that of its shear vibrations, and therefore increasing ring stiffness and reducing mass improves the dynamic response(Mohanraj vd., 2023).

The study indicates that, thanks to the high sensitivity and linearity achieved by the sensor, the smart cutting tool possesses the dynamic stability required for use in high-speed and precision machining conditions(Y Zhao vd., 2018).

The experimental results obtained show that the tangential force response changes stably without causing sudden fluctuations at different spindle speeds, thus demonstrating that the system has sufficient dynamic stability under low-speed machining conditions(Umurani & Siregar, 2019).

The fact that the experimental and estimated force values closely match at each test point of the rotating system proves that the load cell provides a stable dynamic response under varying speed, feed rate, and cutting depth conditions during CNC turning(Projoth vd., 2021).

In static loading tests, the strain and output voltage curves, which respond instantly to the applied force and reach a stable level in a short time, demonstrate that the system has sufficient response speed under dynamic measurement conditions(Cheng vd., 2022).

Finite element analysis has confirmed that the dynamometer has a fast and reliable measurement response under high rigidity by revealing that maximum stress is concentrated at the sensor center and creates a stable deformation distribution within the structure(Zhang vd., 2019).

The frequency bandwidth of the dynamometer has been determined as 656 Hz in the X direction, 544 Hz in the Z direction, and 984 Hz in the Y direction; it has been confirmed that the usable bandwidth can be extended up to 1 kHz in all axes with appropriate filtering(Totis & Sortino, 2011).

In impact-response tests, the device's natural frequencies were determined to be 737 Hz in the horizontal direction and 1067 Hz in the vertical direction, demonstrating that the design possesses a high level of dynamic performance capable of suppressing vibration effects(M. Rizal vd., 2018).

The load cell developed in this study was confirmed to operate safely within its designed force range of up to 200 kg. The experimental results showed that even the maximum force of 65.92 kg remained well below the design limit, thus confirming the system's safety under the given load conditions(Lad & Patel, t.y.).

3.3. Cross-Talk and Separation Success

Signal interference between axes is a significant problem when measuring force on multiple axes.

In the octagonal ring-based dynamometer developed by Rizal et al. (2018), cross-interaction between axes was reduced to 0.87% thanks to the geometrically optimized ring structure, thereby significantly improving the independent measurement of force components(M. Rizal vd., 2018).

It has been stated that cross-sensitivity can be reduced by accurately determining the strain regions in octagonal and derivative ring structures; and that appropriately positioned strain gauges can reduce cross-talk values to below 1%(Mohanraj vd., 2023).

According to the static calibration findings, the cross-talk values in the X and Y directions of the system were measured as 1.97% and 3.03%, respectively; this low level of cross-talk indicates that each axis can accurately detect its own force component independently of the other(Y Zhao vd., 2018).

Since the straight rod-type load cell used in the study has a single-axis structure that can only measure the tangential force (F_t), the sensor directly detects the F_t component, eliminating the need for force separation required in multi-axis systems(Umurani & Siregar, 2019).

The load cell dynamometer used in the study was employed to measure a single component of the cutting force

during the turning process; no application involving the separation of force components or the analysis of interactions between axes has been reported(Projoth vd., 2021).

Placing the thin film resistance grid in the area of the tool body where stress is highest allows the sensor to directly detect the local deformation caused by the applied external force, thereby increasing measurement sensitivity(Cheng vd., 2022).

The film grids symmetrically placed on the dynamometer's octagonal connection plate and three full-bridge circuits effectively reduce the interaction caused by multidirectional forces in the system by separating the F_x and F_z components via circuit 3(Zhang vd., 2019).

In static tests, the fact that the cross-talk values between axes fell below 2.94% between F_x – F_y and below 1.81% between F_z – F_x / F_y demonstrates that the sensor can significantly separate the three force components from each other(Totis & Sortino, 2011).

In the cross-sensitivity analysis, it was determined that the error rate in the F_r direction was only 0.87%, while errors in other components mostly remained below 5%; only the F_f component's effect on the F_c measurement reached 9.58%(M. Rizal vd., 2018).

3.4. Cost and Ease of Implementation

Strain gauge systems stand out in terms of cost:

The cost of the strain gauge system developed in Lad and colleagues' study was calculated to be only ₹7,190(Lad & Patel, t.y.).

The single-axis flat bar load cell-based dynamometer developed by Umurani and Siregar (2019) can be produced at a cost of only 120 USD, making it a suitable alternative for low-budget applications requiring simple force measurement(Umurani & Siregar, 2019).

Vásquez Céspedes (2011) emphasizes that although piezoelectric-based force measurement systems offer high performance, their installation and maintenance costs are quite high due to high insulation requirements, the need for special quartz sensors, amplifiers, and signal conditioning circuits(Vásquez Céspedes, 2011).

Although piezoelectric dynamometers offer high sensitivity and wide bandwidth, their costs are high for small and medium-sized enterprises; in contrast, strain-gauge-based systems offer low-cost and more easily implementable solutions(Mohanraj vd., 2023).

Commercial MEMS strain gauges, with their small size, high resistance, and high sensitivity, have enabled the development of a compact, lightweight, and low-cost solution that can be integrated into CNC machines without requiring any additional modifications(Y Zhao vd., 2018).

Developed in line with the fundamental design objectives of simplicity and low cost, the dynamometer was produced at a total cost of 120 USD. Thanks to its compatibility with Arduino-based data acquisition systems and its easy assembly structure, it offers an economical and practical solution(Umurani & Siregar, 2019).

The load cell can be directly attached to the tool holder, the sensor-bridge structure is made up of ready-made units, and measurements can be read instantly via the panel, demonstrating that the system is easy to implement without requiring additional hardware and is suitable for workshop use(Projoth vd., 2021).

The developed thin-film sensor tool design allows the sensor to be directly integrated into the tool body, eliminating the need for an additional dynamometer, thereby simplifying the system structurally and facilitating application(Cheng vd., 2022).

The vacuum soldering of the film sensor directly to the elastomer eliminates errors caused by adhesive processes, simplifying assembly while providing a more stable sensor integration for long-term use(Zhang vd., 2019).

The modular structure, in which the piezo-ring sensor is integrated into a commercial tool shank, allows the cutting edge to be replaced without disturbing the sensor's preload, providing significant ease of application in industrial use(Totis & Sortino, 2011).

The placement of octagonal rings between two plates in the standard tool holder has increased ease of application by enabling the system to be installed without requiring additional structural modifications to the lathe(M. Rizal vd., 2018).

3.5. Modularity, Integration, and Usability

Systems suitable for tool integration are more advantageous for production environments:

Cheng et al. (2022) developed three different integration architectures that enable fast sensor mounting, easy replaceability, and real-time force measurement across multiple ranges in lathe tool structures with integrated thin-film sensors(Cheng vd., 2022).

Totis & Sortino (2011) emphasized that the sensor's preload remains unaffected during cutting edge replacement thanks to the piezo ring sensor's modular cartridge design, and that this is one of the system's most important design advantages(Totis & Sortino, 2011).

The modular load cell-based dynamometer developed by Khammongkhon et al. (2025) is capable of measuring the main cutting force up to 300 kgf. Thanks to its compact and modular design, it offers an extremely suitable solution for industrial applications in terms of maintenance, integration, and portability(Khammongkhon vd., 2025).

The ability to place MEMS strain gauges in special slots opened in the body of the designed smart cutting tool and to organize Wheatstone bridges directly on the tool demonstrates that the system provides high compatibility and easy integration on CNC machines(Y Zhao vd., 2018).

The ability to directly connect the straight rod load cell to the tool holder and display measurement data instantly via the Arduino–LCD system demonstrates that the dynamometer has a practical and user-friendly design that can be integrated into conventional lathe machines without requiring additional modifications(Umurani & Siregar, 2019).

The load cell and sensor assembly are integrated into a single body, allowing the dynamometer to be directly attached to the tool post of the lathe; this enables the system to be used in a CNC environment without requiring any additional adapters(Projoth vd., 2021).

The three different integration architectures presented in the study, featuring an elastic sleeve, quick-attach/detach design, and a locking mounting mechanism, have increased the system's flexibility by enabling the thin-film sensor to be mounted onto the assembly in a fast, reliable, and replaceable manner(Cheng vd., 2022).

The flange-connected structure compatible with interchangeable tip geometries and the vacuum-secured mounting of the sensor to octagonal plates enable the dynamometer to be easily used by recalibrating it for different tool configurations(Zhang vd., 2019).

The modular cartridge design allows different positive and negative tip geometries to be easily attached to the same body, enabling the dynamometer to be integrated with high compatibility into multi-axis turning operations(Totis & Sortino, 2011).

The geometric design of the dynamometer allows the sensor arrangement to remain unchanged despite the replacement of the tool shank, making the system a modular and easily adaptable measurement tool for different turning operations(M. Rizal vd., 2018).

The ability to connect the Arduino-based data acquisition card directly to the strain gauge circuit and integrate it into a standard lathe tool post without requiring any additional structural modifications has demonstrated that the system is highly suitable for practical and educational use(Lad & Patel, t.y.).

3.6. Comparative Analyses

Comparing dynamometer systems used on lathe machines in terms of performance, ease of application, cost, and analysis capability plays a critical role in selecting the most suitable solution for application needs. The following table compares common dynamometer types based on fundamental criteria:

Table 1. Comparison of dynamometer types based on fundamental criteria

Feature / System Type	Strain Gauge	Piezoelectric	Film Sensor	Load Cell	Wireless/IoT	MEMS
Sensitivity	Medium–High	Very High	Low	High	Sensor-dependent	Very High
Dynamic Response	Medium	Very High	Low	Medium	Medium	High
Cost	Low	High	Very Low	Medium	Medium–High	High
Ease of Application	Medium	Difficult	Easy	Easy	Easy	Difficult
Mounting Difficulty	Medium	Difficult	Easy	Easy	Medium	Difficult
Data Processing Requirement	Medium	High	Low	Low	High	High
Environmental Susceptibility	Medium	Low	High	Low	Medium	Medium

As seen in this analysis, piezoelectric systems are the strongest candidates in terms of measurement accuracy and dynamic response. However, they have limitations in widespread industrial use due to cost and complexity. Strain gauge systems

provide a reliable solution by offering sufficient accuracy at an affordable cost. In contrast, film sensor systems are generally preferred for low-budget experimental work. Wireless systems offer ease of use and mobility, while MEMS systems are seen as the technology of the future for high-precision applications at the micro scale.

4. CHALLENGES AND FUTURE RESEARCH AREAS

Dynamometer systems have made significant advances with the development of sensor technologies, increased data processing capacity, and the widespread adoption of digital manufacturing approaches. However, there are still some technical challenges to be overcome for high-precision force measurement, and research areas that require focus in the future.

4.1. Challenges

- **High temperature:** Can negatively affect sensor performance and stability.
- **Mechanical noise and vibration:** Another important factor that can limit measurement accuracy.
- **Energy management in wireless systems:** Battery life and power consumption are significant limitations.
- **Calibration complexity:** Separate calibration of each axis is challenging in multi-axis systems.
- **System integration:** Requires mechanical and software compatibility with CNC machines.
- **Data processing load:** High sampling frequencies generate large data volumes, increasing the real-time analysis load.

4.2. Future Trends

- **Sensor fusion:** Combining MEMS, piezoelectric, and thin-film sensors can achieve a wider measurement range and higher accuracy.
- **AI-assisted monitoring:** The use of machine learning algorithms for real-time interpretation of cutting forces is increasing.
- **Micro sensors integrated into tools:** In the future, continuous force monitoring will be possible by embedding MEMS-based sensors directly into cutting tools.
- **Real-time cloud data analysis:** With 5G and IoT infrastructures, remote instant processing of cutting force data is becoming possible.
- **Energy-harvesting sensor systems:** New technologies are being developed that aim to reduce the need for batteries in wireless measurement units.
- **Hybrid sensor structures:** New-generation force sensors that use multiple sensor technologies together within the same body are on the agenda.

The assessment presented in this section is a synthesis of the general trends reported in the current literature.

5. CONCLUSION

In this compilation study, dynamometer systems used in lathe machines have been examined in terms of their technical specifications, performance criteria, application areas, and limitations. Strain gauge, piezoelectric, film sensor, load cell, IoT

systems, and MEMS-based approaches offer various advantages and disadvantages in the literature.

- Strain gauge systems stand out in terms of low cost and widespread use,
- Piezoelectric systems are the most powerful solution for high-frequency monitoring.
- Film sensors provide flexible solutions in micro-production areas,
- Load cells are preferred in terms of robustness and accuracy.
- IoT systems offer modern solutions in terms of data transmission,
- MEMS systems are integrated into future-oriented smart tool technologies.

In future studies, making sensors smarter, smaller, and more energy efficient will enable these systems to be used more effectively in turning processes.

Dynamometer systems used in turning machines play a vital role in monitoring, evaluating, and improving contemporary production processes. Strain gauge, piezoelectric, film sensor, load cell, wireless/IoT, and MEMS-based systems each have different advantages and limitations. The selection of these systems varies depending on the application requirements, budget, desired accuracy, and depth of data analysis.

This study presents a comparative analysis of the structural principles, advantages/disadvantages, and application areas of different technologies, while also shedding light on future development areas. Developments in sensor technology, in particular, are paving the way for more compact, accurate, and intelligent dynamometer systems. Piezoelectric and MEMS-

based systems have been found to be prominent for high-precision and multi-axis measurements, while strain gauge systems stand out for their cost/performance balance. With the impact of Industry 4.0, the use of wireless and cloud-based systems will increase in the future.

In this review study, dynamometer systems used in lathe machines were systematically examined in terms of design principles, performance criteria, and application areas. Solutions based on different technologies, such as strain gauges, piezoelectric, thin film, load cell, MEMS, and wireless systems, were evaluated with data obtained from 40 articles.

Strain gauge-based systems stand out due to their low cost, ease of manufacture, and suitability for educational applications. These systems have provided satisfactory accuracy results across a wide range of machining parameters. However, certain technical limitations, such as temperature and cross-sensitivity, should be considered (Hanif vd., 2016; Kasprzak & Pyzalski, 2021; Kazmi, t.y.; Khammongkhon vd., 2025; Lad & Patel, t.y.; Öztürk & Yıldızlı, 2018; Panzera vd., 2012a; Panzera, Souza, Rubio, Abrão, & Mansur, 2012b; Reyes Uquillas & Syh-Shiuh Yeh, 2015; M. Rizal vd., 2018; Saruulbold S. & Oyunbat G., 2022; Sharma, Singh, & Jindal, t.y.; Thangarasu, Shankar, Tony Thomas, & Sridhar, 2018; Uquillas & Hsiao, 2016; Vadgeri, Patil, & T.Chavan, 2018; Yaldız & Ünsaçar, 2006a, 2006b; You Zhao, Zhao, Liang, & Zhou, 2015).

Piezoelectric systems are preferred systems, especially for precision processing applications, and have a measurement capacity down to 0.1 N. Thanks to their wide-band frequency response, they deliver high performance in dynamic applications. However, these systems are generally more expensive and more complex to integrate (Bharilya, Malgaya, Patidar, Gurjar, & Jha,

2015; Horváth vd., t.y.; Kumar & Yadav, 2023; Muhammad Rizal, Ghani, & Mubarak, 2022; Totis & Sortino, 2011).

Film sensor and MEMS-based systems stand out in compact and integrated designs. These technologies enable built-in measurement in modern CNC machines. Cross-sensitivity in MEMS systems has been reduced to very low levels and bandwidth has been increased (Cheng vd., 2022; Mohanraj vd., 2023; Othman, Ramli, Mamat, & Abd Aziz, 2022; Zhang vd., 2019; Y Zhao vd., 2018; You Zhao vd., 2018, 2016).

Wireless communication and microcontroller-based systems such as Arduino are gaining popularity in low-cost, portable, and Industry 4.0-compatible applications. These systems are particularly well-suited for applications such as remote monitoring, data logging, and cloud-based analysis (Korkmaz, M. (2019); Uquillas & Hsiao, 2016; Vásquez Céspedes, 2011).

Load cell systems are widely used in industrial turning and heavy machining applications due to their high durability, linear response, and reliable performance across a wide range of forces. These structures provide a practical and stable solution in both production environments and workshop-type measurement setups thanks to their robust body designs and easy calibration features (Özdemir, H. (2006); Gunay vd., 2006; Projoth vd., 2021; Umurani & Siregar, 2019).

Tablo 2. Overall Assessment

System Type	Sensitivity	Cost	Integration	Dynamic Response	Application Area
Strain Gauge	Medium	Low	High	Low / Medium	Education, R&D, basic force measurement
Piezoelectric	Very High	High	Medium	Very High	Precision machining, process monitoring
Film Sensor–Based	High	Medium	Very High	Medium / High	Tool-integrated systems, micro-manufacturing
MEMS–Based	High	Medium / High	Medium	High	Micro-manufacturing, robotics, smart tooling
Wireless (IoT)	Medium	Low	High	Medium	Remote monitoring, automation
Load Cell–Based	Medium / High	Medium	Medium	Medium	Industrial turning, heavy machining, high-force measurement

REFERENCES

- Bharilya, R. K., Malgaya, R., Patidar, L., Gurjar, R. K., & Jha, A. K. (2015). Study of Optimised Process Parameters in Turning Operation Through Force Dynamometer on CNC Machine. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 2300-2305. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.268>
- Cheng, Y., Wu, W., Liu, L., He, Z., & Song, D. (2022). Structural design and optimization of a turning tool embedded with thin-film strain sensors for in-process cutting force measurement. *AIP Advances*, 12(1), 015126. <https://doi.org/10.1063/5.0079837>
- Gunay, M., Seker, U., & Sur, G. (2006). Design and construction of a dynamometer to evaluate the influence of cutting tool rake angle on cutting forces. *Materials & Design*, 27(10), 1097-1101. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.003>
- Hanif, M. I., Aamir, M., Muhammad, R., Ahmed, N., & Maqsood, S. (2016). *Design and Development of Low Cost Compact Force Dynamometer for Cutting Forces Measurements and Process Parameters Optimization in Turning Applications*. 3(9).
- Horváth, R., Pálincás, T., Mátyási, G., & Drégelyi-Kiss, Á. (t.y.). *The design, calibration and adaption of a dynamometer for fine turning*.
- Kasprzak, M., & Pyzalski, M. (2021). Testing of Force Sensors for the Active Measurement and Limitation of Axial Loads in Heavy Turning. *Journal of Machine Engineering*, 21(4), 106-117. <https://doi.org/10.36897/jme/144597>
- Kazmi, S. W. H. (t.y.). *To Design, Develop and Test Strain Gauge Based Dynamometer for Measuring Cutting Forces in Turning*.

- Khammongkhon, N., Niropas, P., Pomusa, C., & Suksawat, B. (2025). Development and Implementation of Modular Turning Dynamometer with Miniature Load Cell. *The 8th Mechanical Engineering, Science and Technology International Conference*, 43. MDPI. <https://doi.org/10.3390/engproc2025084043>
- Korkmaz, M. (2019). *The development of a wireless multi-axial dynamometer to use in the metal cutting operations* (Unpublished master's thesis, Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences).
- Kumar, P., & Yadav, S. K. S. (2023). Measurement and analysis of cutting forces using dynamometer in turning of EN-8 steel. *Materials Today: Proceedings*, S2214785323036155. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.222>
- Lad, Y. A., & Patel, A. A. (t.y.). *Development of Strain Gauge Dynamometer for Lathe*. 5(8).
- Melayim, H. (2019) . *Design and manufacturing of a dynamometer for measuring cutting forces on lathe machines* (Unpublished master's thesis, Sakarya University, Institute of Science)
- Mohanraj, T., Uddin, M., & Thangarasu, S. K. (2023). Review on sensor design for cutting force measurement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237(2), 455-466. <https://doi.org/10.1177/09544089221106264>
- Othman, W. Z., Ramli, A. F., Mamat, N. H., & Abd Aziz, M. R. (2022). Cutting Force Measurement using Strain Gauge and Arduino for Monitoring of Turning Tool Post. *Journal of Physics: Conference Series*, 2319(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2319/1/012018>

- Özdemir, H. (2006). *Design and production of a dynamometer to be used in cutting force measurement in turning operation* (Unpublished master's thesis, Sakarya University, Institute of Science).
- Öztürk, E., & Yıldızlı, K. (2018). Measured Cutting Forces in the Turning of Prismatic Parts at Different Spindle Speeds and Side Cutting Edge Angles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(9), 4635-4647. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-3002-4>
- Panzer, T. H., Souza, P. R., Rubio, J. C. C., Abrão, A. M., & Mansur, T. R. (2012a). Development of a three-component dynamometer to measure turning force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), 913-922. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3866-5>
- Panzer, T. H., Souza, P. R., Rubio, J. C. C., Abrão, A. M., & Mansur, T. R. (2012b). Development of a three-component dynamometer to measure turning force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), 913-922. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3866-5>
- Projoth, T. N., Victor, D. P. M., & Nanthakumar, P. (2021). Analysis and prediction of cutting force through lathe tool dynamometer in CNC turning process. *Materials Today: Proceedings*, 46, 4174-4179. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.681>
- Reyes Uquillas, D. A. & Syh-Shiuh Yeh. (2015). Tool holder sensor design for measuring the cutting force in CNC turning machines. *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 1218-1223. Busan: IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIM.2015.7222705>

- Rizal, M., Ghani, J. A., . H., & . H. (2018). Design and construction of a strain gauge-based dynamometer for a 3-axis cutting force measurement in turning process. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 12(4), 4072-4087.
<https://doi.org/10.15282/jmes.12.4.2018.07.0353>
- Rizal, Muhammad, Ghani, J. A., & Mubarak, A. Z. (2022). Design and Development of a Tri-Axial Turning Dynamometer Utilizing Cross-Beam Type Force Transducer for Fine-Turning Cutting Force Measurement. *Sensors*, 22(22), 8751. <https://doi.org/10.3390/s22228751>
- Saruulbold S. & Oyunbat G. (2022). RESEARCH WORK OF RESOURCE FOR USING STRAIN GAGE TO DO CUTTING FORCE MEASURING TOOL. *World Science*, (6(78)).
https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30122022/7901
- Sharma, S., Singh, R., & Jindal, S. (t.y.). ANALYSIS OF CUTTING FORCES OF THE LATHE TOOL DYNAMOMETER. 2(11).
- Şeker, U., Kurt, A., & Çiftçi, İ. (2002). Design and construction of a dynamometer for measurement of cutting forces during machining with linear motion. *Materials & Design*, 23(4), 355-360. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(02)00013-4)
- Thangarasu, S. K., Shankar, S., Tony Thomas, A., & Sridhar, G. (2018). Prediction of Cutting Force in Turning Process-an Experimental Approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 310, 012119. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012119>
- Totis, G., & Sortino, M. (2011). Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in

- turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(1), 34-42.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.10.001>
- Umurani, K., & Siregar, R. A. (2019). Development of Dynamometer for Cutting Force Measurement in Turning Operation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 705(1), 012051.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/705/1/012051>
- Uquillas, D. A. R., & Hsiao, T. (2016). Wireless tool holder sensor design for cutting force measurement applied to chatter detection. *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, 1845-1848. Singapore: IEEE.
<https://doi.org/10.1109/TENCON.2016.7848340>
- Vadgeri, S. S., Patil, S. R., & T.Chavan, S. (2018). Static and Fatigue Analysis of Lathe spindle for Maximum Cutting Force. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4438-4444.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.012>
- Vásquez Céspedes, H. (2011). MEASURING CUTTING FORCES IN MACHINING PROCESSES. *Revista Ingeniería*, 11(1-2). <https://doi.org/10.15517/ring.v11i1-2.613>
- Yaldız, S., & Ünsaçar, F. (2006a). A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning. *Measurement*, 39(1), 80-89.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2005.07.008>
- Yaldız, S., & Ünsaçar, F. (2006b). Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement. *Materials & Design*, 27(10), 839-846.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.001>
- Zhang, Y., Wu, W., Han, Y., Wen, H., Cheng, Y., & Liu, L. (2019). Design and Analysis of a Turning Dynamometer

Embedded in Thin-Film Sensor. *Micromachines*, 10(3), 210. <https://doi.org/10.3390/mi10030210>

Zhao, Y, Zhao, Y. L., Shao, Y., Hu, T. J., Zhang, Q., & Ge, X. H. (2018). Research of a smart cutting tool based on MEMS strain gauge. *Journal of Physics: Conference Series*, 986, 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/986/1/012016>

Zhao, You, Zhao, Y., & Ge, X. (2018). The Development of a Triaxial Cutting Force Sensor Based on a MEMS Strain Gauge. *Micromachines*, 9(1), 30. <https://doi.org/10.3390/mi9010030>

Zhao, You, Zhao, Y., Liang, S., & Zhou, G. (2015). A High Performance Sensor for Triaxial Cutting Force Measurement in Turning. *Sensors*, 15(4), 7969-7984. <https://doi.org/10.3390/s150407969>

Zhao, You, Zhao, Y., Wang, C., Liang, S., Cheng, R., Qin, Y., ... Hu, T. (2016). Design and development of a cutting force sensor based on semi-conductive strain gauge. *Sensors and Actuators A: Physical*, 237, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.017>

EKLEMELİ İMALATTA LAZER ARDIL İŞLEMLER

Mahmut ÖZER¹

1. EKLEMELİ İMALAT

Eklemeli imalat (Eİ), toz, tel veya fotokürlenebilir reçinelerin katman katman biriktirilmesiyle karmaşık geometriye sahip parçaların doğrudan sayısal modelden üretilmesini sağlayan bir imalat yaklaşımıdır (Herzog, Seyda, Wycisk, & Emmelmann, 2016; Islam vd., 2024). Günümüzde polimer, seramik ve metal esaslı çok geniş bir malzeme yelpazesi Eİ ile işlenebilmekte; havacılık, otomotiv, enerji ve biyomedikal gibi alanlarda prototip üretiminin ötesine geçerek son kullanım parçalarının üretimi mümkün hâle gelmektedir (Dadkhah, Tulliani, Saboori, & Iuliano, 2023). Bu tablo içinde özellikle metalik alaşımların lazer tabanlı toz yataklı ergitme (PBF-L/SLM), elektron ışınılı ergitme (PBF-EB) ve yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) gibi süreçlerle, dövme veya döküm muadilleriyle kıyaslanabilir yoğunluk ve mekanik özelliklere sahip olacak şekilde üretilmesi büyük ilgi toplamaktadır (DebRoy vd., 2018; Herzog vd., 2016).

Bununla birlikte, katmanlı yapı ve lokal ergitme/katılma döngüleri, yüzey bütünlüğü açısından önemli sınırlamalar doğurmaktadır. Lazer veya elektron ışını ile ergitilen toz tabakaları, merdiven basamağı etkisi, kısmen ergimiş tozların yapışması, bilyelenme ve sıçrama gibi olgular nedeniyle yüksek yüzey pürüzlülüğü ve dalgalı topografiye sahip as-baskı yüzeyler oluşturur (Dadkhah vd., 2023; DebRoy vd., 2018). DebRoy ve

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-2273-4449.

ark. metal Eİ parçalarında ortalama yüzey pürüzlülüğünün katman kalınlığı ve yapı açısına kuvvetle bağlı olduğunu, ince katmanların pürüzlülüğü azaltmasına karşın çevrim süresini ciddi biçimde artırdığını vurgulamaktadır. Benzer şekilde seramik Eİ çalışmalarında da, katmanlı yapı ve kısmi sinterleme nedeniyle kaba yüzeyler, boyutsal hassasiyet kaybı ve yüksek artık porozite yaygın olarak rapor edilmektedir. Bu nedenle metal ve seramik bileşenler için frezeleme, taşlama, parlatma, kumlama, kimyasal parlatma veya sıcak izostatik presleme (siğ) gibi ilave ardıl işlem adımları çoğu zaman kaçınılmazdır.

Yüzey kaynaklı bu kusurlar yalnızca geometrik bir problem değil, aynı zamanda kritik mekanik ve işlevsel zayıflıkların da temel kaynağıdır. Yüksek yüzey pürüzlülüğü, keskin çentikler ve çıkıntılar oluşturarak yorulma çatlaklarının başlatılması için ideal gerilme yığılma bölgeleri yaratır. Metal Eİ parçalarının yorulma davranışı üzerine yapılan çalışmalar, as-baskı kaba yüzeylerin yorulma ömrünü belirgin şekilde kısalttığını; tornalama ve parlatma sonrası yorulma sınırının hem Eİ numunelerde hem de bazı alaşımlarda dövme malzemenin üzerine çıkabildiğini göstermiştir (DebRoy vd., 2018; Herzog vd., 2016). Ayrıca yüzeye çok yakın konumlanmış makro-gözenekler ve lack-of-fusion boşlukları, çatlak uçlarında yerel gerilme seviyesini birkaç kat artırarak yorulma ve sürünme hasarını hızlandırmakta; artık gerilmeler ve anizotropik tane yapısı ile birlikte parçanın hizmet ömründe yüksek saçılmaya neden olmaktadır .

Dolayısıyla metalik eklemeli imalat bileşenlerinin güvenilir şekilde kullanılabilmesi için yüzey bütünlüğünün kontrollü ardıl işlemler ile iyileştirilmesi kritik önemdedir. Bu kitap bölümünde, konvansiyonel mekanik yüzey işlemleriyle birlikte özellikle lazer tabanlı ardıl işlemlerin (lazer yeniden ergitme, lazer parlatma, lazer tekstürleme vb.) metal Eİ parçaların

yüzey kalitesi ve buna bağlı mekanik/işlevsel performans üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

2. LAZER ARDIL İŞLEMLER

Eklemeli imalatla üretilen parçaların yüzey kalitesini artırmak, geometrik hataları gidermek ve mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla sıklıkla lazer tabanlı ardıl işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemler, yüksek enerjili bir lazer ışınının malzeme yüzeyine odaklanarak belirli bir tarama stratejisiyle yüzey üzerinde hareket ettirilmesine dayanır. Uygulama sırasında lazer, malzemenin yüzeyinde yeniden ergitme, ablasyon veya şok dalgası oluşturma gibi etkiler yaratarak yüzeyin mikro ve makro özelliklerini değiştirir (Bruzzo, Catalano, Demir, & Previtali, 2021).

En yaygın yöntemlerden biri lazer parlatma (laser polishing) veya lazerle yeniden ergitme işlemidir. Bu yöntemde lazer ışını, yüzeyde çok ince bir tabakayı ergitecek şekilde odaklanır. Ergimiş tabaka, yüzey gerilimi ve yerçekimi etkisiyle akarak mikro çukurları doldurur ve çıkıntıları düzleştirir. Tarama, genellikle “hatching” denilen satır-satır desenlerle gerçekleştirilir. Bu yöntem, hem düz hem de karmaşık geometrilere sahip parçalar için uygundur ve robotik sistemlerde parça veya lazer kafasının çok eksenli hareketiyle uygulanabilir (Yung, Xiao, Choy, Wang, & Cai, 2018).

Bir diğer grup ultra kısa atımlı (femtosaniye) lazerlerle mikro işleme ve lazer mikro-tekstürleme işlemleridir. Femtosaniye darbeli lazerler, 10^{-15} saniye mertebesinde süreye sahip atımlarla çalışır. Bu kadar kısa darbeler, malzemeyi çok sınırlı bir ısı etki alanında buharlaştırarak mikro ölçekli yapıların hassas şekilde işlenmesini sağlar. Lazer, yüzeyde raster veya ızgara tarzı desenlerde taranır; bu sayede mikro oluklar, çukurlar veya mikro-dokular oluşturulur (Worts, Jones, & Squier, 2019).

Benzer prensip, Multi jet füzyon (MJF) ile üretilmiş polimerlerde lazer mikro-tekstürleme yöntemiyle uygulanarak yüzeyde düzenli mikro yapılar oluşturmak için kullanılır (Wojdat, 2025).

Lazerle yüzey şoklama (literatürde Laser Shock Peening olarak bilinir), yüzeye yüksek enerjili kısa lazer darbeleri gönderilerek yüzey altında şok dalgaları oluşturulması prensibine dayanır. Parça yüzeyi genellikle su gibi saydam bir sıkıştırma ortamı ve ince bir soğurucu tabaka ile kaplanır. Lazer darbesiyle plazma oluşturulur ve bu plazmanın ani genişmesiyle ortaya çıkan şok dalgası, yüzey altı bölgede plastik deformasyon yaratır. Bu yöntem, özellikle metal parçaların yorulma ömrünü ve dayanıklılığını artırmak için tercih edilir (Dilshad Alam Digonta & Fatemi, 2024).

Ayrıca lazer ışınli ısıl işlem ve lazer temizleme gibi ardıl işlemler de uygulanmaktadır. Lazer ısıl işlemlerde, büyük ölçekli üretimlerde katman arayüzü kontrollü şekilde ısıtılarak iç gerilmeler azaltılır. Lazer temizleme işleminde ise darbeli lazer, yüzeydeki oksit, kir veya toz kalıntılarını kaldırarak bir sonraki biriktirme katmanı için yüzeyi hazırlar (Meng vd., 2024).

Genel olarak lazer ardıl işlemler, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması, mikro yapının rafine edilmesi, adezyon ve ıslanabilirliğin artırılması gibi çok yönlü amaçlarla uygulanır. Bu yöntemler, eklemeli imalatla üretilen parçaların hem geometrik doğruluğunu hem de mekanik performansını hedeflenen seviyeye taşımak için etkili çözümler sunar (Layher, Eckhardt, Linke, Hopf, & Bliedtner, 2023).

2.1. Lazer Parlatma

Lazer parlatma, eklemeli imalatla üretilen metal yüzeylerin çok ince bir tabakasını yeniden ergiterek tepecik-çukur yapısını yüzey gerilimi etkisiyle düzelten bir ardıl işlemdir. Süreçte sürekli dalga veya darbeli lazer, belirli hat aralığı ve tarama hızıyla yüzey üzerinde satır satır gezdirilir; böylece

merdiven basamağı etkisi, yapışmış tozlar ve mikro çentikler azaltılır, çoğu durumda yorulma, korozyon ve tribolojik performans iyileşir.

Seçici lazer ergitme ile üretilmiş CoCr bileşenlerde, karmaşık serbest formlu yüzeylerde odak uzaklığının yerel eğriliğe göre ayarlandığı katmanlı parlatma stratejisi geliştirilmiş ve bu sayede farklı eğriliklere sahip bölgelerde belirgin pürüzlülük düşüşü sağlanmıştır (Yung vd., 2018). Elektron ışını ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımında yapılan çalışmada, lazer parlatmanın pürüzlülüğü talaşlı işlenmiş seviyelere yaklaştırdığı; buna karşılık yeniden ergimiş tabakada tanelerin incelendiği, faz dönüşümü ve kalıntı gerilme dağılımında değişim olduğu gösterilmiştir (Tian vd., 2018).

Takım çeliği bileşenlerde darbeli ve sürekli dalga lazerlerin karşılaştırıldığı çalışmada, uygun parametre penceresinde başlangıçtaki yüksek pürüzlülüğün önemli ölçüde azaltılabildiği, yüzey enerjisi ve sertlikte artış sağlandığı rapor edilmiştir (Yung, Zhang, Duan, Choy, & Cai, 2019). EBM Ti-6Al-4V için yapılan yüzey karakterizasyonu çalışmasında, pürüzlülük önemli ölçüde azaltılırken, bazı parametre aralıklarında tarama yönüne bağlı çatlaklar ve yükselmiş kenar yapıları da gözlenmiş, dolayısıyla yüzey bütünlüğü açısından parametre seçiminin kritik olduğu vurgulanmıştır (Nesli & Yilmaz, 2021).

Otomotiv sektörüne yönelik robotize hücrede geliştirilen çalışmada ise, Cr-Cu çelik parçalarda salınımlı ışın hareketine dayanan otomatik bir lazer parlatma süreci uygulanmış; yüzey görüntülerinin makine öğrenmesi ile analiz edilmesiyle optimum parametrelerin otomatik belirlenebildiği gösterilmiştir. Lazer toz yatağı ile üretilmiş AlSi10Mg numunelerde yerinde lazer parlatma stratejileriyle üst yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertliğin kontrol edilebildiği, hat aralığı ve geçiş sayısının yüzey cevabını

güçlü şekilde etkilediği görülmüştür (Zhou, Han, Li, Liu, Shen, vd., 2021).

Lazer toz yatağı ile üretilmiş Ti-6Al-4V yorulma numunelerinde, lazer parlatmanın pürüzlülüğü ve çekme kalıntı gerilmelerini azaltarak yüksek çevrimli yorulma ömrünü iyileştirdiği; ek bir gerilim giderme tava ile bu etkinin daha da güçlendirilebildiği gösterilmiştir (Lee, Ahmadi, Pegues, Mahjour-Samani, & Shamsaei, 2021). Çizgi odaklı ışın kullanılan en güncel çalışmada ise, paslanmaz çelik parçaların geniş alanlarının tek geçişte işlenebildiği, yanıt yüzey yöntemi ile pürüzlülük ve dalgalılığın birlikte optimize edildiği bildirilmiştir (Kumar, Ramadas, Kumar, & Nath, 2025).

2.2. Lazer Yüzey Şoklama

Lazerle yüzey şoklama, eklemeli imalatla üretilmiş metal parçalarda yüzeye yüksek enerjili kısa lazer darbeleri göndererek su ve soğurucu tabaka altında plazma kaynaklı şok dalgaları oluşturan bir işlemdir. Bu şok dalgaları yüzeye yakın bölgede plastik deformasyon yaratarak milimetre mertebesine ulaşabilen basma kalıntı gerilme alanları ve tane incelmeleri oluşturur; böylece yorulma ve korozyon performansının iyileştirilmesi hedeflenir (Dilshad Alam Digonta & Fatemi, 2024; Guo vd., 2018)

Lazer eklemeli Ti6Al4V alaşımında yapılan çalışmada, lazerle yüzey şoklama sonrası α ve β fazlarında örgü aralıklarının azaldığı, tanelerin incelendiği, yoğun ikizlenme oluştuğu ve çekme yönündeki kalıntı gerilmelerin yüzeyden itibaren yüzlerce mikrometre derinliğe kadar basma gerilmesine dönüştüğü gösterilmiştir (Guo vd., 2018). Lazer eklemeli Inconel 718 üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, tepe lazer gücü ve darbe sayısı değiştirilerek yüzeyde birkaç yüz MPa düzeyinde basma kalıntı gerilme alanları, artan mikrosertlik ve iyileşmiş aşınma davranışı elde edilmiştir (Jinoop, Subbu, Paul, & Palani, 2019)

Lazer eklemeli 316L çeliğinde, ilk termal kalıntı gerilme alanı ile lazerle yüzey şoklama sonrası indüklenen basma gerilme alanının etkileşimi incelenmiş; hem boyuna hem enine yönlerde çekme gerilmelerin basmaya döndüğü, yüzey ve yaklaşık 1 mm derinlikte sertliğin ve akma dayanımının arttığı rapor edilmiştir (Lu vd., 2020). Seçici lazer ergitme ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımında lazerle yüzey şoklamanın korozyon direnci üzerindeki etkisini inceleyen çalışmada, uygun darbe enerjisi ve bindirme oranlarında yüzey gözenekliliğinin azaldığı, yüksek büyüklükte basma kalıntı gerilmeleri ve sertlik artışı ile korozyon hızının belirgin şekilde düştüğü gösterilmiştir (Maleki, Unal, Shao, & Shamsaei, 2023).

Seçici lazer ergitme ile üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçalarda üç boyutlu lazerle yüzey şoklama yaklaşımının incelendiği çalışmada, standart üretim döngüsüne periyodik lazerle yüzey şoklama adımlarının eklendiği hibrit bir süreç tanımlanmış; ardışık katmanlar arasında uygulanan bu işlemle bileşenin hacmi boyunca kalıntı gerilme durumunun ve sertlik dağılımının değiştirildiği, gözenek dağılımının yeniden düzenlendiği ve sonuçta yorulma özelliklerinde belirgin iyileşme sağlandığı ortaya konmuştur (Kalentics, de Seijas, Griffiths, Leinenbach, & Logé, 2020).

2.3. Lazer Yüzey Tekstürleme

Lazerle yüzey tekstürleme, eklemeli imalatla üretilmiş metal ve polimer parçalarda yüzey topografisini mikro ve nano ölçekte kontrollü olarak değiştirmek için kullanılan bir ardıl yüzey mühendisliği yöntemidir. Yöntemde odaklanmış lazer demeti, belirli tarama desenleri (çizgiler, ızgaralar, çukurcuklar, biyomimetik şekiller vb.) ile yüzey üzerinde gezdirilerek malzeme yüzeyinden sınırlı miktarda ablasyon yapılır veya tekrar ergitme ile mikro kabartılar/dolgular oluşturulur. Böylece yüzey pürüzlülüğü, dalga boyu ve yönlenmesi kontrol edilerek

ıslanabilirlik, sürtünme, tutunma, biyolojik cevap veya yapıştırma performansı “programlanabilir” hâle gelir (Mandal, Sharma, Singh, & Ramkumar, 2022; Villapún vd., 2023).

Toz yatağı füzyonu ile üretilmiş Inconel 718 bileşenlerde, sayısal modelleme ve deneylerin birlikte yürütüldüğü çalışmada konveksiyon, Marangoni akışı ve buhar geri tepmesiyle şekillenen ergiyik havuzu davranışı analiz edilmiş; ardından toz yatak yüzeyinde hat, daire, tarama ve dışbükey çukurcuk desenleri oluşturulmuştur. Temas açısı ölçümleri, özellikle dışbükey çukurcuk geometrisinin yüksek hidrofobiklik ve belirgin ikinci seviye dalgalı pürüzlülük ürettiğini göstermiştir (Mandal vd., 2022). Lazer toz yatağı ile üretilmiş Ti-6Al-4V implant kuponlarında, femtosaniye lazerle kanal, ızgara, üçgen ve köpekbalığı derisi benzeri mikro dokular ile nano ölçekli periyodik yüzey yapıları üretilmiş; bu yüzeylerde ıslanabilirlik, kritik yüzey gerilimi ve kimyasal yapı ile birlikte MG63 hücrelerinin tutunma, proliferasyon ve mineralizasyon davranışı incelenmiştir. Farklı desenlerin hücre cevabını farklı biçimlerde yönlendirdiği, özellikle bazı mikro dokuların erken hücre örtünmesi ve mineralizasyonu belirgin şekilde artırdığı ortaya konmuştur(Villapún vd., 2023).

Polimer esaslı eklemeli imalat parçalarında yapılan çalışmada, MJF ile üretilmiş PA12 numunelerin yüzeyine galvo taramalı fiber lazerle nokta, çizgi ve ızgara tipi mikro dokular işlenmiş; işlem öncesi ve sonrası pürüzlülük, ıslanabilirlik ve yüzey serbest enerjisi ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Belirli bir ızgara geometrisi ile yüzey serbest enerjisinde yaklaşık yüzde elli artış ve referans as-baskı duruma göre iki kattan fazla artmış kayma dayanımına sahip yapıştırma bağlantıları elde edilmiş; MJF süreci ile lazer tekstürlemenin birlikte, yapıştırma uygulamalarında yüksek performanslı bir yüzey hazırlama yöntemi sunduğu gösterilmiştir (Wojdat, 2025).

2.4. Lazer Yeniden Ergitme

Lazer yeniden ergitme, eklemeli imalatla üretilen metal parçaların yüzeyinde veya belirli katmanlarında mevcut katılmış tabakanın tekrar lazerle ergitilmesine dayanan bir lazer ardıl işlem türüdür. İşlemden, üretim sırasında oluşan üst yüzey tabakası veya her bir katman, ikinci bir lazer geçişi ile yeniden ergitilir; ergiyik havuzundaki yüzey gerilimi ve Marangoni akışı sayesinde tepelik-çukur yapısı yeniden düzenlenir, gözenekler yüzeye doğru taşınarak kapanır, yüzey dalgalılığı ve pürüzlülük azaltılır. Böylece aynı ekipman üzerinde hem eklemeli imalat hem de ardıl yüzey iyileştirme yapılabilen hibrit süreçler tasarlanabilmekte; yüzey kalitesi, yoğunluk, mikro yapı ve mekanik özellikler birlikte kontrol edilebilmektedir.

Lazer yeniden ergitme sırasında oluşan kalıntı gerilme alanının kökeninin incelendiği çalışmada, yeniden ergitilen bölgenin soğuma sırasında büzülmesine bağlı olarak tarama yönünde yüksek çekme kalıntı gerilmeleri geliştiği; bu gerilmelerin, eriyen bölgenin mutlak boyutundan çok geometrisine ve sıcaklık aralığına duyarlı olduğu gösterilmiştir (Gusarov, Pavlov, & Smurov, 2011). Lazer metal biriktirme ile üretilen 316L çelik yapılarda lazer yeniden ergitmenin yüzey bitirme yöntemi olarak kullanıldığı çalışmada ise, robotize sistemde aynı lazer kaynağı hem biriktirme hem de yeniden ergitme için kullanılmış; uygun güç ve bindirme oranlarıyla karmaşık serbest yüzeylerde pürüzlülük ve dalgalılığın anlamlı ölçüde azaltılabildiği, ancak bazı parametre aralıklarında karakteristik bir yüzey tekstürü de oluşabildiği rapor edilmiştir (Bruzzone vd., 2021).

Yönlendirilmiş enerji biriktirme sonrasında lazer yeniden ergitmenin etkisinin araştırıldığı bir diğer çalışmada, demir ve Inconel 625 tozlarıyla üretilen yüzeyler üç farklı ısı girdisi ile yeniden ergitilmiş; iki ve üç boyutlu ölçümlerle pürüzlülük,

dalgallılık ve gerilme yığılma katsayısı değerlendirilmiştir. Yeniden ergitme ile ortalama pürüzlülüğün ve mikro çentik etkisinin belirgin şekilde azaldığı, ancak etkinliğin malzemenin termofiziksel özelliklerine (ısı yayılımı, iletkenlik vb.) duyarlı olduğu ortaya konmuştur (dos Santos Paes vd., 2021). Seçici lazer ergitme ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımında katman bazlı lazer yeniden ergitme stratejisinin incelendiği çalışmada, her üretim izinin hemen ardından aynı bölgenin yeniden ergitildiği bir yaklaşım kullanılmış; bu sayede gözenekliliğin azaltılarak yoğunluğun yaklaşık %99,4 seviyesine çıktığı, üst ve yan yüzey pürüzlülüğünün düştüğü ve soğuma hızındaki artışla tane boyutunun küçülerek mikrosertliğin arttığı gösterilmiştir (Zhou, Han, Li, Liu, & Yi, 2021) .

AlSi10Mg alaşımında farklı tarama stratejileri ve çoklu yeniden ergitme geçişlerinin etkilerinin karşılaştırıldığı çalışmada, son tabakanın birden fazla yeniden ergitilmesiyle yüzey pürüzlülüğünün birkaç mikrometre seviyelerine indirilebildiği, porozitenin %0,1 mertebesine düşürülebildiği ve tane incelmeleriyle sertlikte artış sağlandığı rapor edilmiştir (Kuai, Li, Liu, Liu, & Yang, 2022). Lazer toz yatağı ergitme ile üretilmiş yukarı bakan eğimli yüzeylere sahip parçalarda ise, çift lazerli bir düzende önce eğimli yüzeylerdeki gevşek tozların lazer kaynaklı şok dalgalarıyla uzaklaştırıldığı, ardından üretim esnasında yerinde lazer yeniden ergitme uygulanarak pürüzlülük, çentik derinliği ve gerilme yığılma katsayısının azaltıldığı; maraging çeliği ve Ti-6Al-4V numunelerde yorulma ömrünün belirgin biçimde iyileştirilebildiği gösterilmiştir (Ordnung, Metelkova, Cutolo, & Van Hooreweder, 2022). N625 alaşımında yapılan bir başka çalışmada, farklı tarama açıları ve enerji yoğunluklarıyla üretilen kübik numunelerin üst yüzey deformasyonları incelenmiş; son katmanlara uygulanan lazer yeniden ergitmenin kenar ve köşe kabarmalarını önemli ölçüde etkilediği, uygun hatve açısı ve yeniden ergitme parametreleriyle üst yüzeydeki

kenar/köşe çıkıntılarının azaltılarak boyutsal doğruluğun iyileştirilebildiği ortaya konmuştu (Paraschiv, Matache, Constantin, & Vladut, 2022).

Bu çalışmalar bir arada değerlendirildiğinde lazer yeniden ergitmenin, hem toz yatağı hem de yönlendirilmiş enerji biriktirme tabanlı eklemeli imalat süreçlerinde, yüzey kalitesini, yoğunluğu ve yorulma performansını iyileştirebilen, proses içine entegre edilebilir bir ardıl işlem aracı olduğu görülmektedir.

2.5. Lazer Mikro İşleme

Lazer Lazer mikro işleme, eklemeli imalatla üretilmiş parçalarda özellikle femtosaniye ve pikosaniye darbeleri lazerler kullanılarak malzemenin doğrudan ablasyonla kaldırılmasına dayanan bir ardıl işlemdir. Çok kısa darbe süreleri sayesinde ısı etkilenmiş bölge ve yeniden katılaşma tabakası minimumda tutulur; böylece yüksek pürüzlülüğe sahip 3B basılmış işlemsiz yüzeylerin iyileştirilmesi, destek bölgesi ve dar kanallarda talaşsız bitirme, mikro oluk ve kenar açma gibi işlemler, alt malzemeye sınırlı ısı hasar vererek gerçekleştirilebilir (Buser, Hofele, Menold, Riegel, & Michalowski, 2024; Zheng vd., 2023).

Femtosaniye lazer darbeleri kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada, metal yüzeyde hem çıkarımsal (ablasyon) hem de yerel eklemeli yapılandırmanın mümkün olduğu gösterilmiş; faz patlaması ile yüzeyden kopan damlacıkların yeniden çökmesiyle alt malzeme ile bütünleşmiş, mikrometre mertebesinde kabartılar elde edildiği rapor edilmiştir (Sedao vd., 2018). Eklemeli imalatla üretilmiş Ti-6Al-4V yüzeylerinde yapılan başka bir çalışmada ise, tek geçişli femtosaniye lazer taraması ile pürüzlülüğün birkaç kat azaltıldığı, ayrıca nanoyapılı çizgiler ve mikro koni yapılarıyla yüzeyin ıslanabilirliğinin ve optik görünümünün kontrollü biçimde değiştirilebildiği gösterilmiştir (Worts vd., 2019).

Pikosaniye lazerin hibrit “eklemeli + çıkarımsal” süreç içindeki rolünün incelendiği çalışmalarda, lazer toz yatağı füzyonu sonrası aynı tezgâhta yapılan mikro işleme ile özellikle kenar ve destek bölgelerinde yan duvar pürüzlülüğünün 10–12 μm seviyesinden 1–2 μm düzeyine indirilebildiği; destek alma, iç kanal açma ve hassas yüzey bitirme işlemlerinin tamamen lazer tabanlı bir işlem zinciriyle gerçekleştirilebildiği ortaya konmuştur (Buser vd., 2024; Zheng vd., 2023).

2.6. Lazer Isıl İşlemi

Lazer ısıtma işlemi, eklemeli imalatla üretilmiş parçalarda malzemeyi yeniden ergitmeden, yalnızca hızlı ısıtma–soğutma döngüleriyle mikro yapı ve mekanik özellikleri yerel olarak ayarlamaya yönelik bir yaklaşımdır. Hafif defokuslanmış lazer demeti belirli hızlarda yüzey üzerinde taranır; bu sırada gerilim giderme, faz dönüşümü, çökelme sertleşmesi veya yeniden kristalleşme gibi katı-hal dönüşümleri tetiklenir. Böylece tüm parçaya fırın tava uygulamadan, sadece kritik bölgelerde süneklik artırma, sertlik düşürme veya tane boyutu rafinasyonu sağlanabilir (Esmailzadeh vd., 2023; Layher vd., 2023) .

Büyük ölçekli granül/filament esaslı sistemlerde yapılan bir çalışmada, CO₂ lazerin ekstrüzyon kafasının hemen arkasına yerleştirildiği ve yeni biriktirilen polimer şeritlerinin ara yüzünün üretim sırasında tekrar ısıtıldığı bir strateji önerilmiş; termografi ile kontrol edilen bu lazer ısıtma işlemi sayesinde katmanlar arası bağ alanının genişlediği, iç boşluk oranının azaldığı ve eğme yükleri altında daha izotrop mekanik davranış elde edildiği gösterilmiştir (Layher vd., 2023). Lazer toz yatağı ergitme ile üretilmiş Ti-6Al-4V üzerinde geliştirilen yerinde seçici lazer ısıtma işlemi yaklaşımında ise, düşük enerjili yeniden taramalarla iğnemsiz α' martenzit yapısının lamelli $\alpha+\beta$ yapısına dönüştürülebildiği; bu dönüşümün operando X-ışını kırınımı ve

EBSD ile ayrıntılı biçimde izlendiği rapor edilmiştir (Esmaeilzadeh vd., 2023).

Soğuk şekillendirilmiş 316L çelikte lazerle hızlı yeniden kristalleşmenin senkrotron X-ışını kırınımı ile izlendiği başka bir çalışmada, kısa süreli lazer ısıtılmasının hücresel alt yapı, yeni çekirdek oluşumu ve tane büyümesi gibi aşamaları çok kısa zaman ölçeklerinde tetikleyebildiği ve yerel tane boyutu–doku tasarımında kullanılabileceği gösterilmiştir (Navarre vd., 2024). Seçici lazer ergitme ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımında yapılan parametrik analizlerde ise, uygun lazer gücü–hız kombinasyonlarıyla yalnızca yorulma açısından kritik bölgelerde sertliğin yaklaşık %30–35 oranında azaltılabildiği, buna karşılık gözenek büyümesinin kontrol altında tutulabildiği ve böylece yerel süneklik kazanımı ile genel dayanım arasında dengeli bir tasarımın mümkün olduğu ortaya konmuştur (Kramer, Jarwitz, Schulze, & Zanger, 2024).

2.7. Lazer Temizleme

Lazer temizleme, eklemeli imalat süreçlerinde katmanlar arası veya nihai yüzeyde oluşan oksit, cüruf, yağ, boya ve gevşek toz parçacıklarını temassız biçimde uzaklaştırmak için kullanılan bir ardıl işlemdir. Nanosaniye darbeli lazer ışını ile yüzeyde çok kısa süreli ısıtılma ve mekanik etkiler oluşturularak kaplama/partikül–alt malzeme ara yüzeyinde yüksek gerilmeler ve ivmeler yaratılır; böylece istenmeyen tabaka veya parçacıklar, kimyasal banyo veya kumlama gibi temaslı yöntemlere ihtiyaç duymadan, kuru ve seçici bir şekilde kaldırılabilir (Rozin, Sultan, & Cetinkaya, 2024).

Tel-ark ergitmeli eklemeli imalat (WAAM) alüminyum alaşımı ince cidarlı duvarlara katmanlar arasında lazer temizleme uygulanan bir çalışmada, senkron tel-toz beslemeli WAAM sürecinde her katmandan önce oksit ve cüruf tabakasının nanosaniye darbeli lazer ile kaldırıldığı bir düzenek geliştirilmiş;

uygun güç ve frekans aralıklarında yan duvar düzlüğünün iyileştiği ve kesit gözenekliliğinin lazer temizleme uygulanmayan duruma kıyasla yaklaşık yarıya düştüğü gösterilmiştir (Meng vd., 2024). Kuru ve hedefli parçacık uzaklaştırma yaklaşımlarında ise, düz referans yüzeylere yerleştirilen metal tozların nano-saniye darbeli lazer ile belirli bir alanda seçici olarak kaldırılabilirdiği, partikül boyutu ve lazer noktasına uzaklığa bağlı bir “minimum uzaklaştırılabilir çap” tanımlanabilirdiği ve yöntemin toz yatağı parçalarındaki iç kanal ve boşluklarda artık toz temizliği için önemli bir potansiyel taşıdığı ortaya konmuştur (Rozin vd., 2024).

Yönlendirilmiş enerji biriktirme süreçlerinde, lazer temizlemenin değişken polariteli ark temizleme ile birlikte kullanıldığı daha yeni bir çalışmada, önce darbeli lazerle katman yüzeyindeki oksit filmi ve sıçramaların büyük kısmı kaldırılmış, ardından plazma ark ile özellikle girinti ve gölgede kalan bölgelerdeki ince oksit kalıntıları uzaklaştırılmıştır. Bu bileşik yaklaşım sonucunda alüminyum alaşımı numunelerde ara tabaka porozitesinin %0,05 gibi çok düşük değerlere indirilebildiği ve iç kalite ile mekanik performansın belirgin şekilde iyileştirilebildiği rapor edilmiştir (Liu vd., 2025).

3. SONUÇ

Eklemeli Lazer tabanlı ardıl işlemler, eklemeli imalatla üretilen metal parçaların gelişiminde, en az prosesin kendisi kadar dönüştürücü bir rol üstlenmiştir. İşlemsiz 3B basılmış durumda iken yüksek pürüzlülük, gözeneklilik, çekme kalıntı gerilmeleri ve karmaşık yüzey kusurlarıyla sınırlanan bu parçalar; lazer parlatma, lazerle yüzey şoklama, lazer yüzey tekstürleme, lazer yeniden ergitme, lazer mikro işleme, lazer ısıl işlem ve lazer temizleme gibi ardıl teknikler sayesinde daha güvenli,

öngörülebilir ve çok işlevli mühendislik bileşenlerine dönüşmektedir.

Malzeme bilimi, lazer teknolojisi ve sayısal modellemenin entegrasyonu, bu ardıl işlemleri yalnızca “yüzey düzeltme adımı” olmaktan çıkarıp; yorulma, korozyon, triboloji ve biyolojik yanıtın aktif olarak tasarlandığı çok ölçekli yüzey mühendisliği araçlarına dönüştürmüştür. Lazer parlatma ve yeniden ergitme ile merdiven basamağı etkisi ve çentik oluşturan yüzey kusurları giderilirken; lazerle yüzey şoklama derin basma kalıntı gerilme alanları üreterek yorulma dayanımını belirgin biçimde artırmakta, lazer yüzey tekstürleme ise mikro/nano topografya üzerinden hücre tutunması, sürtünme katsayısı veya adezyon gibi işlevsel çıktıları programlayabilmektedir (Dilshad Alam Digonta & Fatemi, 2024; Villapún vd., 2023)

Son yıllarda, lazer ardıl işlemler giderek daha fazla yerinde (in-situ) veya entegre süreçler hâlinde ele alınmaktadır. Lazer toz yatağı ergitmede üretimle eş zamanlı yeniden ergitme veya seçici ısıl işlem stratejileriyle, katmanlar arası mikro yapı ve kalıntı gerilme durumu daha baskı aşamasında kontrol edilebilmekte; büyük ölçekli sistemlerde ise ekstrüzyon kafasının hemen ardına yerleştirilen lazer kaynakları ile katman arayüzleri her geçişte yeniden ısıtılarak bağ dayanımı ve anizotropi yönetilebilmektedir (Schimbäck vd., 2024; Zhou vd., 2025).

Bu eğilim, lazer temizleme ve lazer mikro işlemenin de üretim döngüsü içine alınmasıyla, destek alma, toz temizliği ve yüzey bitirme adımlarının tek bir platformda bütünlük hâle gelmesine olanak tanımaktadır.

Bununla birlikte, lazer ardıl işlemlerin olgunlaşması önünde önemli zorluklar da bulunmaktadır. Her bir proses için dar enerji yoğunluğu pencereleri, çok parametrelili tarama stratejileri ve karmaşık termo-mekanik geri besleme mekanizmaları söz konusudur; bu durum, farklı alaşımlar ve

geometri türleri için doğrudan ölçeklenebilir, genellenmiş işlem tariflerinin oluşturulmasını zorlaştırmaktadır.

Ayrıca, lazer ardıl işlemler yüzey kusurlarını ve gözenekliliği azaltırken, yanlış seçilmiş parametreler yeni çatlaklar, yeniden katılaşma yapıları veya istenmeyen doku değişimleri de üretebilmektedir. Bu nedenle, çok ölçekli deney-simülasyon verilerinin birleştirildiği tahmin edici modeller, süreç pencerelerinin standartlaştırılması ve farklı ardıl işlemlerin birbirleriyle etkileşimini dikkate alan tasarım kurallarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Geleceğe bakıldığında, lazer ardıl işlemlerinin; yapay zekâ destekli optimizasyon, dijital ikiz tabanlı süreç simülasyonu ve gelişmiş çevrim içi gözlem teknikleriyle birlikte, eklemeli imalatın ayrılmaz bir tasarım parametresi hâline gelmesi beklenmektedir. Yorulma davranışı zayıf olan eklemeli imalat metaller için, lazerle yüzey şoklama ve lazer parlatmanın birlikte kullanıldığı hibrit stratejiler; iç kusur duyarlılığını azaltan, yüksek çevrimli yorulma dayanımını iyileştiren çözümler sunmaktadır.

Benzer şekilde, lazer yüzey tekstürleme ile biyolojik yanıtı programlanan implantlar ve eş zamanlı uygulanan lazer ısıtma işlemle gerilme durumunun kontrol edildiği bileşenler, sadece geometrisi değil, fonksiyonel yüzey özellikleri de tasarımla birlikte düşünülen yeni bir eklemeli imalat paradigmasını işaret etmektedir.

Sonuç olarak lazer ardıl işlemler, eklemeli imalatı sadece “net şekle yakın üretim” teknolojisi olmaktan çıkararak, yorulma, korozyon, triboloji ve biyofonksiyonellik gibi kritik performans ölçütlerinin yüzey ve yakın yüzey mühendisliğiyle birlikte ele alındığı kapsamlı bir üretim ekosistemine dönüştürmektedir. Bu vizyonun tam anlamıyla hayata geçebilmesi için malzeme bilimciler, süreç mühendisleri, tasarımcılar, hesaplamalı modelleme uzmanları ve endüstriyel uygulayıcılar arasında güçlü

bir disiplinler arası işbirliği gereklidir. Mevcut süreç pencerelerinin netleştirilmesi, sorumlu ve güvenli uygulama standartlarının geliştirilmesi ve maliyet-etkin hibrit sistemlerin yaygınlaşmasıyla lazer tabanlı ardıl işlemler; eklemeli imalatın hem endüstriyel ölçekte güvenilirliğini artıracak, hem de tasarım özgürlüğünü gerçek anlamda fonksiyonel özgürlüğe dönüştürecektir.

KAYNAKÇA

- Bruzzo, F., Catalano, G., Demir, A. G., & Previtali, B. (2021). Surface finishing by laser re-melting applied to robotized laser metal deposition. *Optics and Lasers in Engineering*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106391>
- Buser, M., Hofele, M., Menold, T., Riegel, H., & Michalowski, A. (2024). Enhanced Scaling of Material Removal Rate with High Surface Quality Through Combined Laser Processes. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 11(2), 218-232. <https://doi.org/10.1007/s40516-023-00234-5>
- Dadkhah, M., Tulliani, J. M., Saboori, A., & Iuliano, L. (2023, Aralık 1). Additive manufacturing of ceramics: Advances, challenges, and outlook. *Journal of the European Ceramic Society*, C. 43, ss. 6635-6664. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.07.033>
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., ... Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- Dilshad Alam Digonta, H. M., & Fatemi, A. (2024). Laser shock peening and its effects and modeling on fatigue performance of additive manufactured metallic materials. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104281>
- dos Santos Paes, L. E., Pereira, M., Xavier, F. A., Weingaertner, W. L., D'Oliveira, A. S. C. M., Costa, E. C., ... Scotti, A. (2021). Understanding the behavior of laser surface

- remelting after directed energy deposition additive manufacturing through comparing the use of iron and Inconel powders. *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 494-507.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.061>
- Esmailzadeh, R., Hamidi-Nasab, M., de Formanoir, C., Schlenger, L., Van Petegem, S., Navarre, C., ... Logé, R. E. (2023). In-situ selective laser heat treatment for microstructural control of additively manufactured Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 78.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103882>
- Guo, W., Sun, R., Song, B., Zhu, Y., Li, F., Che, Z., ... Peng, P. (2018). Laser shock peening of laser additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 349(June), 503-510.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.020>
- Gusarov, A. V., Pavlov, M., & Smurov, I. (2011). Residual stresses at laser surface remelting and additive manufacturing. *Physics Procedia*, 12(PART 1), 248-254. Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.032>
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- Islam, M. A., Mobarak, M. H., Rimón, M. I. H., Al Mahmud, M. Z., Ghosh, J., Ahmed, M. M. S., & Hossain, N. (2024). Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications. *Polymer Testing*, 132(November 2023), 108364.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108364>

- Jinoop, A. N., Subbu, S. K., Paul, C. P., & Palani, I. A. (2019). Post-processing of Laser Additive Manufactured Inconel 718 Using Laser Shock Peening. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(9), 1621-1628. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00147-4>
- Kalentic, N., de Seijas, M. O. V., Griffiths, S., Leinenbach, C., & Logé, R. E. (2020). 3D laser shock peening – A new method for improving fatigue properties of selective laser melted parts. *Additive Manufacturing*, 33(February), 101112. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101112>
- Kramer, S., Jarwitz, M., Schulze, V., & Zanger, F. (2024). Local laser heat treatment of AlSi10Mg as-built parts produced by Laser Powder Bed Fusion. *Procedia CIRP*, 124, 74-77. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.074>
- Kuai, Z., Li, Z., Liu, B., Liu, W., & Yang, S. (2022). Effects of remelting on the surface morphology, microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *Materials Chemistry and Physics*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125901>
- Kumar, A., Ramadas, H., Kumar, C. S., & Nath, A. K. (2025). Laser polishing of additive manufactured stainless-steel parts by line focused beam: A response surface method for improving surface finish. *Journal of Manufacturing Processes*, 133, 1310-1328. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.12.028>
- Layher, M., Eckhardt, L., Linke, D., Hopf, A., & Bliedtner, J. (2023). Laser beam heat treatment in large-scale additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(6), 1489-1499. <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00415-w>

- Lee, S., Ahmadi, Z., Pegues, J. W., Mahjouri-Samani, M., & Shamsaei, N. (2021). Laser polishing for improving fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V parts. *Optics and Laser Technology*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106639>
- Liu, H., Jiang, F., Li, C., Zhu, R., Liu, W., Yang, D., ... Bai, B. (2025). A novel interlayer cleaning methods for improving internal quality in wire-arc directed energy deposition: processing, characterisation and performance demonstration. *Virtual and Physical Prototyping*, 20(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2445714>
- Lu, Y., Sun, G. F., Wang, Z. D., Su, B. Y., Zhang, Y. K., & Ni, Z. H. (2020). The effects of laser peening on laser additive manufactured 316L steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(5-6), 2239-2249. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05167-3>
- Maleki, E., Unal, O., Shao, S., & Shamsaei, N. (2023). Effects of Laser Shock Peening on Corrosion Resistance of Additive Manufactured AlSi10Mg. *Coatings*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/coatings13050874>
- Mandal, V., Sharma, S., Singh, S. S., & Ramkumar, J. (2022). Laser Surface Texturing in Powder Bed Fusion: Numerical Simulation and Experimental Characterization. *Metals and Materials International*, 28(1), 181-196. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01072-w>
- Meng, Y., Li, Z., Gao, M., Chen, H., Wu, X., & Yu, Q. (2024). Laser cleaning assisted wire arc additive manufacturing of aluminum alloy thin-wall through synchronous wire-powder deposition. *Thin-Walled Structures*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111622>

- Navarre, C., Van Petegem, S., Schlenger, L., Cayron, C., Hamidi-Nasab, M., Esmailzadeh, R., ... Logé, R. E. (2024). Monitoring of laser-induced fast recrystallization in SS-316L through synchrotron X-ray diffraction. *Materials and Design*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112628>
- Nesli, S., & Yilmaz, O. (2021). Surface characteristics of laser polished Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting additive manufacturing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(1-2), 271-289. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06861-6>
- Ordnung, D., Metelkova, J., Cutolo, A., & Van Hooreweder, B. (2022). Improving fatigue performance of metal parts with up-facing inclined surfaces produced by laser powder bed fusion and in-situ laser remelting. *Additive Manufacturing Letters*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100049>
- Paraschiv, A., Matache, G., Constantin, N., & Vladut, M. (2022). Investigation of Scanning Strategies and Laser Remelting Effects on Top Surface Deformation of Additively Manufactured IN 625. *Materials*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/ma15093198>
- Rozin, E. H., Sultan, T., & Cetinkaya, C. (2024). Non-contact targeted removal of remnant powder particles from additive manufacturing builds with nano-second laser pulsing. *Journal of Manufacturing Processes*, 124, 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.06.014>
- Schimbäck, D., Kaserer, L., Mair, P., Mohebbi, M. S., Staron, P., Maier-Kiener, V., ... Pogatscher, S. (2024). Advancements in metal additive manufacturing: In-situ heat treatment of aluminium alloys during the laser

- powder bed fusion process. *Materials Science and Engineering: A*, 905. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146102>
- Sedao, X., Lenci, M., Rudenko, A., Pascale-Hamri, A., Colombier, J. P., & Maclair, C. (2018). Additive and subtractive surface structuring by femtosecond laser induced material ejection and redistribution. *Materials*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/ma11122456>
- Tian, Y., Gora, W. S., Cabo, A. P., Parimi, L. L., Hand, D. P., Tammam-Williams, S., & Prangnell, P. B. (2018). Material interactions in laser polishing powder bed additive manufactured Ti6Al4V components. *Additive Manufacturing*, 20, 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.010>
- Villapún, V. M., Man, K., Carter, L., Penchev, P., Dimov, S., & Cox, S. (2023). Laser texturing of additively manufactured implants: A tool to programme biological response. *Biomaterials Advances*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213574>
- Wojdat, T. (2025). Effect of laser micro-texturing MJF 3D printed polymers on surface properties and mechanical strength of adhesive joints. *Precision Engineering*, 94, 236-250. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2025.03.006>
- Worts, N., Jones, J., & Squier, J. (2019). Surface structure modification of additively manufactured titanium components via femtosecond laser micromachining. *Optics Communications*, 430, 352-357. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.08.055>
- Yung, K. C., Xiao, T. Y., Choy, H. S., Wang, W. J., & Cai, Z. X. (2018). Laser polishing of additive manufactured CoCr

- alloy components with complex surface geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.06.019>
- Yung, K. C., Zhang, S. S., Duan, L., Choy, H. S., & Cai, Z. X. (2019). Laser polishing of additive manufactured tool steel components using pulsed or continuous-wave lasers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(1-4), 425-440. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04205-z>
- Zheng, B., Trofimov, V., Yang, Y., Liu, L., Feng, Y., Zheng, Z., ... Wang, D. (2023). Study on additive and subtractive manufacturing of high-quality surface parts enabled by picosecond laser. *Journal of Materials Processing Technology*, 318. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118013>
- Zhou, J., Han, X., Li, H., Liu, S., Shen, S., Zhou, X., & Zhang, D. (2021). In-situ laser polishing additive manufactured alsi10mg: Effect of laser polishing strategy on surface morphology, roughness and microhardness. *Materials*, 14(2), 1-19. <https://doi.org/10.3390/ma14020393>
- Zhou, J., Han, X., Li, H., Liu, S., & Yi, J. (2021). Investigation of layer-by-layer laser remelting to improve surface quality, microstructure, and mechanical properties of laser powder bed fused AlSi10Mg alloy. *Materials and Design*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110092>
- Zhou, J., Li, M., Yang, X., Shen, W., Wu, G., Ming, X., & Wu, S. (2025). In-situ laser surface remelting of laser powder bed fused AlSi10Mg alloy at argon and nitrogen protective gases: Multiscale analysis. *Optics and Laser Technology*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111631>

ROBUST STATISTICAL ANALYSIS OF PARAMETERS AFFECTING ANNULAR FIN EFFICIENCY USING NUMERICAL DATA

Ramazan YILMAZ¹

1. INTRODUCTION

In industrial applications, heat exchangers are fundamental components that enable energy transfer between two fluids through a temperature difference. Fins, which enhance the thermal performance of these systems, increase convective heat transfer by enlarging the surface area (Shah & Sekulić, 2003; Incropera & DeWitt, 2007). Fin geometry, material properties, and flow conditions play decisive roles in heat transfer. In particular, annular fins are frequently preferred due to their durability, low manufacturing cost, and ability to maintain a more uniform temperature distribution (Kraus et al., 2001; Yıldız & Yüncü, 2004).

Heat transfer in annular fins occurs through the interaction between conduction along the fin material, convection with the surrounding fluid, and radiation to the environment. Therefore, variations in fin geometry can lead to significant differences in thermal efficiency (Bahadori & Vuthaluru, 2010; Kırtepe et al., 2017). The effects of geometric parameters such as fin height, spacing, and thickness on heat transfer and pressure drop have been examined both numerically and experimentally in previous studies (Bilirgen et al., 2013; Chen & Hsu, 2008; Kumar et al., 2017). These studies provide a

¹ Öğr. Gör. Dr., Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, ORCID: 0000-0001-6275-7197.

comprehensive assessment of how fin geometry and surface conditions influence the overall performance of heat exchanger systems.

In recent years, Computational Fluid Dynamics (CFD) methods have become powerful tools for analyzing fin geometries. CFD-based models enable three-dimensional investigation of thermal behavior under various material and geometric configurations (Petracci et al., 2016; Yılmaz et al., 2018). Through these numerical approaches, variables such as temperature distribution, heat flux, and fin efficiency can be examined in detail, thereby reducing the cost and time constraints associated with experimental studies (Çengel & Boles, 2008). Annular fins with rectangular profiles are particularly common in CFD research because of their ease of fabrication and geometric simplicity (Yılmaz & Özbalta, 2021).

Although deterministic numerical methods have traditionally been widely used in engineering sciences, the presence of physical, geometric, and numerical uncertainties has increased the importance of statistical analyses. Statistical approaches strengthen classical engineering interpretations by revealing the relative contributions of multiple parameters to thermal efficiency (Field, 2018; Faul et al., 2007; Lakens, 2022). In this context, heteroskedasticity-consistent methods have been developed to correct variance estimation in regression models (White, 1980), and robust regression techniques enable more reliable parameter estimation in the presence of non-constant variance or outliers (Huber, 1973).

The availability of open-source software tools has further supported the use of these methods. The jamovi software (The jamovi project, 2024) and the R programming language (R Core Team, 2024) allow researchers to conduct both classical and robust analyses through the GAMLj module (Gallucci, 2019,

2020). Additionally, tools developed by Lüdecke, Ben-Shachar, Patil, and Makowski (2020) contribute to transparent and reproducible estimation of model parameters.

This study simultaneously evaluates the geometric and physical parameters affecting the thermal efficiency of rectangular-profiled annular fins using a combination of CFD and statistical methods. The aim is to quantitatively analyze the thermal behavior of the annular fin under varying conditions and to identify statistically significant parameter interactions. The model considers a single fin and neglects radiation effects and hydrodynamic losses. Nevertheless, the combined numerical–statistical framework provides a comprehensive and reliable basis for assessing the thermal performance of annular fins.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Data Collection

The numerical dataset used in this study was generated based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) model proposed by Yılmaz and Özbalt (2021). In their work, Yılmaz and Özbalt (2021) validated the CFD model by comparing the results with both analytical solutions and the experimental findings reported by Chen and Hsu (2008). To avoid unnecessary repetition, the detailed validation steps from the original work are not restated here.

In the present study, the model was reconstructed in COMSOL Multiphysics® (COMSOL AB, 2017) under steady-state and three-dimensional conditions. The boundary conditions included a constant-temperature base surface, convective heat transfer on external surfaces, and the neglect of radiation effects. The Heat Transfer in Solids interface was employed for solving the energy equation. Mesh independence was ensured by

evaluating multiple mesh densities and confirming that variations in fin efficiency remained within acceptable limits.

Using the validated model structure, the thermal performance of the rectangular-profiled annular fin was resolved by varying only the geometric and physical parameters: air inlet velocity (u), fin thickness (th), thermal conductivity coefficient (k), radius ratio (rr), and temperature difference (ΔT). The original validation process was not repeated, but the numerical solution procedure remained fully consistent with the referenced study. As a result, a reliable dataset suitable for statistical analysis was obtained.

To introduce controlled variance into the dataset and evaluate numerical sensitivity, four mesh levels were used: extremely coarse, extra coarse, coarser, and fine. The dependent variable was defined as fin efficiency (η), while the independent variables were u , th , k , ΔT , and rr .

2.2. G*Power Analysis: Determination of Sample Size

A multiple linear regression model was designed to examine the effects of five independent variables on fin efficiency. To ensure adequate statistical power, an a priori power analysis was conducted using G*Power 3.1.9.7.

The analysis parameters were defined as follows:

- **Test family:** F tests
- **Statistical test:** Linear multiple regression (fixed model, R^2 deviation from zero)
- **Type of analysis:** A priori — compute required sample size
- **Effect size (f^2):** 0.15 (medium effect; Cohen, 1988)
- **α error probability:** 0.05

- **Power ($1 - \beta$):** 0.95
- **Number of predictors:** 5

The required minimum sample size was calculated as **N = 138**, corresponding to a statistical power of 95%.

In this study, four levels were selected for each parameter, as summarized in Table 1. The thermal conductivity levels correspond to AISI 304, AISI 4340, aluminum, and copper, respectively. The radius ratio was defined as the ratio of the outer fin radius to the inner radius. The inner radius was fixed at 0.0135 m, and only the outer radius was varied.

Table 1. Parameter values

Parameter	Values				Unit
u	3	5	7	9	m/s
th	0.5	1	1.5	2	mm
k	14.9	44.5	238	400	W/m K
ΔT	10	20	30	40	K
rr	2	3	4	5	-

A full factorial design consisting of 4^5 combinations was implemented, and each combination was solved under four mesh structures, resulting in 4096 observations, which is well above the minimum required sample size.

2.3. Statistical Analysis

The Kolmogorov–Smirnov test was used to assess the distribution characteristics of the variables. Depending on normality, either parametric or nonparametric correlation analysis was performed to determine relationships between the dependent and independent variables.

Initially, a standard linear regression model was considered; however, the model assumptions were not satisfied. Therefore, the analyses were performed using the GAMLj3 module in jamovi, employing the General Linear Model (GLM) framework. Due to heteroskedasticity and non-normal residuals,

heteroskedasticity-consistent robust standard errors (HC3) were applied. This method reduces the influence of non-constant variance and outliers while preserving unbiased coefficient estimates (Huber, 1973; White, 1980).

Statistical significance was evaluated at $p < .05$.

Model specifications and parameter estimates are presented in Table 2. Two-way, three-way, and four-way interaction terms were included. The model assumed Gaussian error distribution and employed Wald confidence intervals.

Table 2. General linear model

Info	Description
Model Type	Linear Model (OLS for continuous y)
Model	$\text{lm}(\eta \sim 1 + u + \text{th} + k + \text{rr} + u*\text{th} + u*k + \text{th}*k + u*\text{rr} + \text{th}*\text{rr} + k*\text{rr} + u*\text{th}*k + u*\text{th}*\text{rr} + u*k*\text{rr} + \text{th}*k*\text{rr} + u*\text{th}*k*\text{rr})$
Distribution	Gaussian (Normal distribution of residuals)
Sample size	4096
Converged	Yes
Y transform	None
Confidence interval method	Wald
SE method	Robust
Note	All covariates are mean-centered

The dataset consisted of 4096 observations, and the GLM successfully converged. All variables were mean-centered, and no transformations were applied. This approach enabled evaluation of both main effects and interactions, providing a statistically robust interpretation of the numerical results.

3. RESULTS

3.1. Data Structure and Descriptive Statistics

The descriptive statistics of the dataset are presented in Table 3. For all variables, 4096 observations are available, and

no missing data exist. This indicates that data integrity was preserved throughout the analysis and that the statistical power of the model is high.

The skewness values being close to zero show that the distributions of the variables are largely symmetric. Negative skewness indicates concentration of data to the right of the mean, whereas positive skewness indicates concentration to the left (Tabachnick & Fidell, 2019). In this study, most variables exhibited low skewness levels.

The kurtosis values are mostly negative, indicating platykurtic distributions—meaning that extreme values are rare and the distribution is flatter than a normal distribution (West, Finch, & Curran, 1995). This suggests that there are no substantial outliers and that the model is relatively insensitive to such observations.

Overall, the skewness values ranging between -0.445 and 0.363 and the kurtosis values between -1.50 and -1.14 demonstrate that the distributions are not highly asymmetric and generally exhibit a platykurtic structure. Therefore, the data structure can be considered suitable for multiple linear models.

Table 3. Descriptives

Descriptives						Skewness		Kurtosis	
	N	Missing	Mean	SE	SD	Skewness	SE	Kurtosis	SE
η	4096	0	0.62041	0.00450	0.288	-0.445	0.0383	-1.14	0.0765
u	4096	0	6.00000	0.03494	2.236	0.000	0.0383	-1.36	0.0765
th	4096	0	0.00125	8.74e-6	5.59e-4	0.000	0.0383	-1.36	0.0765
k	4096	0	174.35000	2.43668	155.947	0.363	0.0383	-1.50	0.0765
ΔT	4096	0	25.00000	0.17471	11.182	0.000	0.0383	-1.36	0.0765
rr	4096	0	3.50000	0.01747	1.118	0.000	0.0383	-1.36	0.0765

3.2. Distribution Characteristics of the Data

The distribution statistics are presented in Table 3, and the results of the normality tests are shown in Tables 4–8. The skewness and kurtosis values for all variables fall within ± 1.5 ,

indicating that the distributions are generally symmetric or slightly platykurtic.

However, the Kolmogorov–Smirnov test results (Tables 4–8) were significant for all variables ($p < .001$), indicating that the dataset does not fully meet the normality assumption. Deviations from normality are particularly evident for air inlet velocity (u), thermal conductivity coefficient (k), and radius ratio (rr). Despite this, because the deviations suggest a symmetric but not strictly normal structure, linear models with Robust SE estimation were considered appropriate (Tabachnick & Fidell, 2019).

Thus, although the dataset shows a generally balanced distribution, it does not fully satisfy the classical normality assumption. Therefore, robust or nonparametric approaches were preferred in subsequent analyses, including correlation and modeling.

Table 4. Tests of normality (u)

u		Kolmogorov-Smirnov ^a		Sig.
		Statistic	df	
η	3	.146	1024	.000
	5	.118	1024	.000
	7	.102	1024	.000
	9	.093	1024	.000

Table 5. Tests of normality (th)

th		Kolmogorov-Smirnov ^a		Sig.
		Statistic	df	
η	.0005	.099	1024	.000
	.0010	.101	1024	.000
	.0015	.143	1024	.000
	.0020	.163	1024	.000

Table 6. Tests of normality (k)

	k	Kolmogorov-Smirnov ^a		Sig.
		Statistic	df	
η	14.9	.172	1024	.000
	44.5	.106	1024	.000
	238.0	.112	1024	.000
	400.0	.128	1024	.000

Table 7. Tests of normality (ΔT)

	ΔT	Kolmogorov-Smirnov ^a		Sig.
		Statistic	df	
η	10	.106	1024	.000
	20	.106	1024	.000
	30	.106	1024	.000
	40	.106	1024	.000

Table 8. Tests of normality (rr)

	rr	Kolmogorov-Smirnov ^a		Sig.
		Statistic	df	
η	2	.224	1024	.000
	3	.180	1024	.000
	4	.143	1024	.000
	5	.135	1024	.000

3.3. Correlation Analysis

According to the Kolmogorov–Smirnov test ($p < .05$), the data do not follow a normal distribution. Therefore, nonparametric correlation analysis was conducted to examine the relationships among variables (Table 9).

The results show statistically significant correlations between fin efficiency (η) and the independent variables ($p < .01$). Only temperature difference (ΔT) was not significantly correlated with efficiency ($\rho = 0.004$, $p = .784$); thus, ΔT was excluded from the modeling stage.

The thermal conductivity coefficient (k) exhibited the strongest positive correlation with fin efficiency ($\rho = 0.656$), indicating that higher thermal conductivity significantly

increases heat transfer effectiveness. Fin thickness (th) also showed a positive significant correlation ($\rho = 0.253$), meaning that increased thickness enhances conduction and efficiency.

Conversely, air inlet velocity (u) ($\rho = -0.116$) and radius ratio (rr) ($\rho = -0.610$) were negatively correlated with fin efficiency. This demonstrates that higher air velocities and larger radius ratios reduce thermal efficiency. The rr variable particularly highlights the determining effect of geometric ratio on efficiency.

Overall, the correlation results indicate that fin efficiency increases most strongly with k and decreases most strongly with rr, supporting the direction of the multivariate model.

Table 9. Correlation values between parameters and fin thermal efficiency

Correlations			u	th	k	ΔT	rr
Spearman's rho	η	Correlation	-	.253**	.656**	.004	-
		Coefficient	.116**				.610**
		Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.784	.000
		N	4096	4096	4096	4096	4096

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

3.4. Model Fit Results

The General Linear Model (GLM) results are presented in Table 10. The model is highly significant overall ($F(15, 4080) = 1104, p < .001$). The coefficient of determination ($R^2 = 0.802$) and adjusted R^2 (0.802) indicate that approximately 80% of the total variance in fin efficiency is explained by the independent variables.

This demonstrates that the model successfully represents the factors affecting fin efficiency. The inclusion of interaction terms shows that not only main effects but also variable interactions contribute significantly to efficiency. Thus, the high R^2 value confirms the reliability of the model and indicates that

k, rr, th, and u collectively play important roles in explaining thermal efficiency.

Table 10. Model results

Model Fit					
R²	Adj. R²	df	df (res)	F	p
0.802	0.802	15	4080	1104	<.001

3.5 Statistical Significance of the Model

The ANOVA results within the GLM framework are presented in Table 11. The overall model effect is highly significant ($F(15, 4080) = 1103.68$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.802$). The model explains 80% of the variance in fin efficiency, indicating strong collective explanatory power.

Table 11. The ANOVA results

ANOVA Omnibus tests					
	SS	df	F	p	η^2_p
Model	272.554	15	1103.680	<.001	0.802
u	3.932	1	238.904	<.001	0.055
th	19.639	1	1212.010	<.001	0.226
k	130.633	1	9673.095	<.001	0.660
rr	110.941	1	8126.349	<.001	0.623
u*th	0.012	1	0.747	0.388	0.000
u*k	0.031	1	2.353	0.125	0.000
th*k	0.052	1	3.649	0.056	0.001
u*rr	0.140	1	10.135	0.001	0.002
th*rr	0.744	1	55.968	<.001	0.011
k*rr	4.171	1	383.535	<.001	0.058
u*th*k	0.058	1	4.174	0.041	0.001
u*th*rr	0.013	1	0.983	0.321	0.000
u*k*rr	0.332	1	30.710	<.001	0.005
th*k*rr	1.838	1	159.772	<.001	0.027
u*th*k*rr	0.017	1	1.518	0.218	0.000
Residuals	67.171	4080			
Total	339.725	4095			

Note. Inferential tests and p-values of the effects are adjusted for heteroskedasticity.

All main effects were statistically significant ($p < .001$). The largest effect size belonged to k ($F = 9673.10$, $\eta^2_p = 0.660$), demonstrating its decisive role. This was followed by rr ($F = 8126.35$, $\eta^2_p = 0.623$) and th ($F = 1212.01$, $\eta^2_p = 0.226$). Although air inlet velocity (u) had a significant effect, its contribution was smaller ($F = 238.90$, $\eta^2_p = 0.055$).

Among two-way interactions, $th*rr$ ($p < .001$) and $k*rr$ ($p < .001$) were significant, indicating that the effects of thickness and conductivity depend on the radius ratio. The three-way interactions $u*th*k$ ($p = .041$) and $th*k*rr$ ($p < .001$) were also significant. The four-way interaction ($u*th*k*rr$) was not significant ($p = .218$).

Overall, the ANOVA results show that the model is highly significant and that k and rr are the dominant variables influencing fin efficiency. These findings indicate that thermal performance is shaped by the combined effects of material properties and geometric ratios.

3.6. Interpretation of Model Coefficients

The parameter estimates are presented in Table 12, including estimates (Estimate), standard errors (SE), confidence intervals, and standardized coefficients (β).

Table 12. The parameter estimates

Parameter Estimates (Coefficients)			95% Confidence Intervals		β	df	t	p
Names	Estimate	SE	Lower	Upper				
(Intercept)	0.620	0.002	0.616	0.624	0.000	4080	309.059	<.001
u	-0.014	0.001	-0.016	-0.012	-0.108	4080	-15.457	<.001
th	123.867	3.558	116.836	130.898	0.240	4080	34.814	<.001
k	0.001	0.000	0.001	0.001	0.620	4080	98.352	<.001
rr	-0.147	0.002	-0.151	-0.144	-0.571	4080	-90.146	<.001
$u*th$	1.370	1.585	-1.774	4.515	0.006	4080	0.864	0.388
$u*k$	0.000	0.000	-0.000	0.000	0.010	4080	1.534	0.125
$th*k$	-0.041	0.021	-0.086	0.004	-0.012	4080	-1.910	0.056
$u*rr$	-0.002	0.001	-0.004	-0.001	-0.020	4080	-3.184	0.001
$th*rr$	21.568	2.883	15.280	27.857	0.047	4080	7.481	<.001
$k*rr$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111	4080	19.584	<.001
$u*th*k$	0.019	0.009	-0.001	0.039	0.013	4080	2.043	0.041
$u*th*rr$	-1.282	1.293	-4.094	1.531	-0.006	4080	-0.992	0.321
$u*k*rr$	-0.000	0.000	-0.000	-0.000	-0.031	4080	-5.542	<.001
$th*k*rr$	0.217	0.017	0.177	0.258	0.074	4080	12.640	<.001
$u*th*k*rr$	0.009	0.008	-0.009	0.027	0.007	4080	1.232	0.218

Note. Inferential tests and p-values of the effects are adjusted for heteroskedasticity.

The t and p values are based on heteroskedasticity-consistent standard errors. The intercept is positive (Intercept = 0.620, $p < .001$), representing the baseline efficiency when all variables are at their mean values. All main effects are statistically significant ($p < .001$). Air inlet velocity (u)

negatively affects efficiency ($\beta = -0.108$). Fin thickness (th) ($\beta = 0.240$) and thermal conductivity coefficient (k) ($\beta = 0.620$) have positive effects. Radius ratio (rr) has a strong negative effect ($\beta = -0.571$); as the outer radius increases, efficiency decreases. Regarding interaction terms, th*rr ($p < .001$) and k*rr ($p < .001$) were significant, showing that the effects of thickness and conductivity depend on radius ratio. The interactions u*th*k ($p = .041$) and th*k*rr ($p < .001$) were also significant. The four-way interaction was not significant ($p = .218$).

According to the contribution analysis (Figure 1), k accounts for 47.98% of the variance, and rr accounts for 40.69%. Together, they explain nearly 89% of the total variance. Fin thickness contributes 7.19%, while u contributes 1.46%. Only the k*rr interaction contributes meaningfully (1.54%).

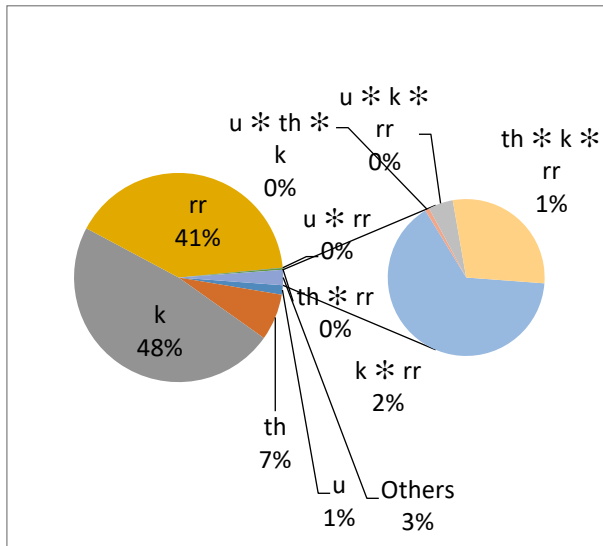


Figure 1. Percentage distribution of parameters

Thus, k, rr, and th are the most influential variables, and interaction terms make only limited contributions to model performance.

4. DISCUSSION

4.1. Evaluation of Model Assumptions

The fundamental model assumptions were evaluated by examining the distribution characteristics of the residuals and the relationships among variables (Table 13 and 14).

Table 13. Test for homogeneity of residual variance

Test for Homogeneity of Residual Variance			
Test	Statistics	df1	p
Breusch-Pagan Test	450	15	<.001

Table 14. Test for normality of residuals

Test for Normality of residuals		
Test	Statistics	p
Kolmogorov-Smirnov	0.112	<.001
Shapiro-Wilk	0.898	<.001

Homogeneity and Normality of Residual Variance: According to the Breusch–Pagan test ($\chi^2(15) = 450$, $p < .001$), the residual variances were not homogeneous. Similarly, the Kolmogorov–Smirnov ($D = 0.112$, $p < .001$) and Shapiro–Wilk ($W = 0.898$, $p < .001$) tests indicated that the residuals did not follow a normal distribution (Table 14). These results show that the assumptions of classical linear regression (Ordinary Least Squares, OLS) were violated. Therefore, the Robust SE (robust standard errors) method was applied to reduce sensitivity to heteroskedasticity (non-constant variance). This approach preserves the reliability of parameter estimates and the validity of significance levels, even when homogeneity of variance and normality assumptions are not satisfied. Visual inspections also support these findings.

In the Q–Q plot (Figure 2), the observations do not systematically deviate from the theoretical normal line, with only minor deviations at the extremes.

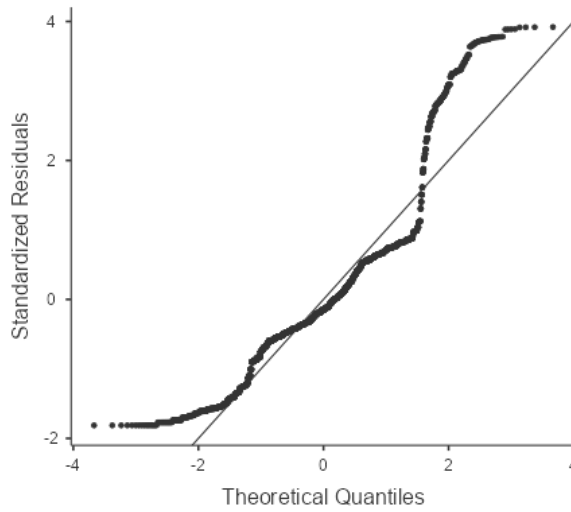


Figure 2. Q–Q Plot

The residual histogram (Figure 3) shows a distribution that is not perfectly symmetric but not highly skewed. In the residual–predicted scatterplot (Figure 4), the residuals appear randomly distributed without any discernible pattern.

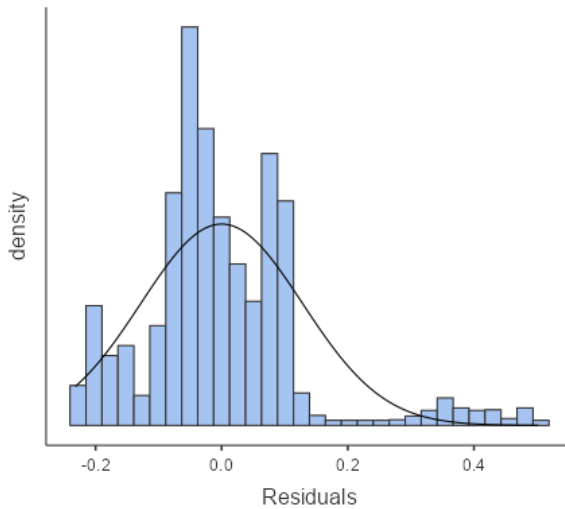


Figure 3. Residual histogram

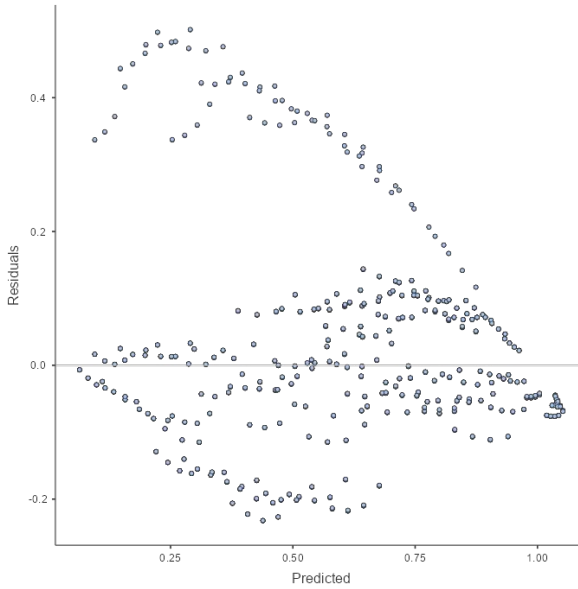


Figure 4. Residual–predicted scatterplot

These observations indicate that although the residual variance varies among observations, the model does not exhibit systematic bias. In other words, despite the presence of heteroskedasticity, the prediction errors do not show directional deviation.

4.2. Multicollinearity Analysis

For all independent variables, $VIF = 1.00$ and Tolerance = 1.00 were obtained (Table 15). These results clearly indicate that no multicollinearity exists in the model. Therefore, the variables are independent of each other, the regression coefficients were estimated stably, and no artificial correlation effects were introduced into the parameter estimates.

Table 15. Collinearity statistics

Collinearity statistics		
Term	VIF	Tolerance
u	1.00	1.00
th	1.00	1.00
k	1.00	1.00
rr	1.00	1.00
u*th	1.00	1.00
u*k	1.00	1.00
th*k	1.00	1.00
u*rr	1.00	1.00
th*rr	1.00	1.00
k*rr	1.00	1.00
u*th*k	1.00	1.00
u*th*rr	1.00	1.00
u*k*rr	1.00	1.00
th*k*rr	1.00	1.00
u*th*k*rr	1.00	1.00

4.3. General Evaluation

The assumption test results indicate that classical OLS assumptions were partially violated. However, the use of the Robust SE method made the model resistant to these violations, ensuring that significance levels could be interpreted reliably.

Furthermore, the low VIF values show that the model parameters are independent, and the interaction terms did not introduce excessive correlation. This confirms that the high R^2 value (0.802) reflects genuinely meaningful variable effects rather than artificial explanatory power.

In conclusion, the assumption-related limitations were successfully addressed through the Robust SE approach. As a result, the physical and geometric variables affecting fin efficiency were identified statistically and reliably. The applied method improved the statistical validity of the numerical model outputs and strengthened the physical interpretability of the results.

4.4. Rationale for Parameter Levels and Mesh Selection

Five independent variables (air inlet velocity, fin thickness, thermal conductivity coefficient, radius ratio, and temperature difference) were initially evaluated. However, the correlation analysis showed no significant relationship between temperature difference (ΔT) and fin efficiency ($p = 0.784$). Therefore, ΔT was excluded from the final model, and analyses were conducted using four independent variables.

Four levels were selected for each independent variable. This four-level design allows modeling not only linear but also nonlinear (quadratic or interaction) effects. While three-level designs provide limited ability to capture second-order trends, a four-level factorial structure can better represent potential curvilinear relationships (Cohen, 1988; Field, 2018).

The four-level design also enhances statistical power. Based on the a priori G*Power analysis, the minimum required sample size was $N = 138$. However, the four-level factorial design with four replications yielded 4096 observations, ensuring a statistical power of 95% and enabling reliable evaluation of interaction terms (Faul et al., 2007; Lakens, 2022).

In the numerical modeling stage, four mesh structures (extremely coarse, extra coarse, coarser, and fine) were used to generate artificial variation and test mesh independence. Testing multiple mesh densities is essential in CFD analyses for determining how solution accuracy depends on mesh size and for minimizing systematic errors (Ferziger & Perić, 2002; Versteeg & Malalasekera, 2007).

This combined approach introduced both geometric and numerical variation into the model, enabling a more reliable assessment of the effects of physical parameters on fin efficiency. Therefore, the use of a four-level factorial design

together with four mesh structures improved both the statistical and numerical accuracy of the model, making the results robust and generalizable.

5. CONCLUSION

In this study, the fundamental parameters affecting the thermal efficiency of annular fin geometry were statistically examined based on numerical modeling results. Since the data structure did not fully satisfy the assumptions of classical linear regression, the General Linear Model (GLM) was constructed using the Jamovi software, and the Robust Standard Errors (HC3) method was applied. This approach yielded results resistant to heteroskedasticity and deviations from normality.

The findings indicate that fin efficiency is most strongly determined by the thermal conductivity coefficient (k) and the radius ratio (rr). Together, these two variables account for approximately 89% of the explanatory power of the model, clearly demonstrating the dominant influence of material selection and geometric ratios on thermal performance. Fin thickness (th) exhibited a positive and significant effect on efficiency, while air inlet velocity (u) showed a negative but comparatively weaker influence. These results suggest that materials with high conductivity should be preferred, the radius ratio should be kept balanced, and excessively high air velocities should be avoided to achieve optimal thermal efficiency.

Most interaction terms in the model contributed minimally. However, the significant interactions $th*rr$, $k*rr$, and $th*k*rr$ indicate that material properties and geometric factors must be evaluated together. In particular, the $th*k*rr$ interaction showed that as thickness and conductivity increase, the influence of the radius ratio becomes stronger.

According to the assumption tests, the residuals did not satisfy homogeneity of variance (Breusch–Pagan, $p < .001$) and deviated from normality (Kolmogorov–Smirnov and Shapiro–Wilk, $p < .001$). Nevertheless, the Robust SE approach maintained the reliability of the model and preserved the validity of the significance levels of the estimated parameters. Additionally, the VIF value of 1.00 for all variables confirmed the absence of multicollinearity.

In conclusion, the model exhibited high explanatory power ($R^2 = 0.802$), demonstrating that the thermal efficiency of annular fins can be statistically and consistently explained through physical and geometric parameters. This approach provided statistical validation of CFD-based numerical modeling outputs and established a reliable foundation for parametric optimization in engineering applications.

For future studies, it is recommended that multiple fin configurations, different flow directions, and variable boundary conditions be incorporated into the model to provide a comprehensive evaluation of thermo-hydrodynamic performance. Such an expanded statistical model could be applicable not only at the single-fin level but also in the overall design of heat exchanger systems.

REFERENCES

- Bahadori, A., & Vuthaluru, H. B. (2010). Predictive tool for estimation of convection heat transfer coefficients and efficiencies for finned tubular sections. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(8), 1477–1483.
- Bilirgen, H., Dunbar, S., & Levy, E. K. (2013). Numerical modeling of finned heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 61, 278–288.
- Chen, H. T., & Hsu, W. L. (2008). Estimation of heat-transfer characteristics on a vertical annular circular fin of finned-tube heat exchangers in forced convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(7–8), 1920–1932.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- COMSOL AB. (2017). *COMSOL Multiphysics®* (Version 5.3a) [Computer software]. COMSOL AB. <https://www.comsol.com>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. B. (2008). *Termodinamik: Mühendislik yaklaşımıyla* (5. baskı). Güven Kitabevi.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191.
- Ferziger, J. H., & Perić, M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics*. Springer.
- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (5th ed.). SAGE Publications.
- Gallucci, M. (2019). *GAMLj: General analyses for linear models* [jamovi module]. <https://gamlj.github.io/>

- Gallucci, M. (2020). *Model goodness of fit in GAMLj*. <https://gamlj.github.io/>
- Huber, P. J. (1973). Robust regression: Asymptotics, conjectures and Monte Carlo. *The Annals of Statistics*, 1(5), 799–821.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). *Isı ve kütle geçişinin temelleri* (T. Derbentli et al., Çev.). Literatür Yayınları.
- Kırtepe, E., Yılmaz, R., & Özbalta, N. (2017). Dikdörtgen profilli dairesel kanatların optimizasyonu ve performans analizi. In *Proceedings of the International Engineering Research Symposium (UMAS 2017)* (pp. 289–297).
- Kraus, A. D., Aziz, A., & Welty, J. (2001). *Extended surface heat transfer*. John Wiley & Sons.
- Kumar, A., Joshi, J. B., & Nayak, A. K. (2017). A comparison of thermal-hydraulic performance of various fin patterns using 3D CFD simulations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 336–356.
- Lakens, D. (2022). Sample size justification. *Collabra: Psychology*, 8(1), 33267.
- Lüdecke, D., Ben-Shachar, M. S., Patil, I., & Makowski, D. (2020). Extracting, computing and exploring the parameters of statistical models using R. *Journal of Open Source Software*, 5(53), 2445.
- Petracci, I., Manni, L., & Gori, F. (2016). Numerical simulation of the optimal spacing for a radial finned tube cooled by a rectangular jet. *International Journal of Thermal Sciences*, 104, 54–67.
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.4) [Computer software]. <https://cran.r-project.org>

- Shah, R. K., & Sekulić, D. P. (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2019). *Using multivariate statistics* (7th ed.). Pearson.
- The jamovi project. (2024). *jamovi* (Version 2.6) [Computer software]. <https://www.jamovi.org>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Pearson.
- West, S. G., Finch, J. F., & Curran, P. J. (1995). Structural equation models with nonnormal variables: Problems and remedies. In R. H. Hoyle (Ed.), *Structural equation modeling: Concepts, issues, and applications* (pp. 56–75). Sage.
- White, H. (1980). A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*, 48(4), 817–838.
- Yıldız, Ş., & Yüncü, H. (2004). An experimental investigation on performance of annular fins on a horizontal cylinder in free convection heat transfer. *Heat and Mass Transfer*, 40(3), 239–251.
- Yılmaz, R., & Özbalta, N. (2021). Dikdörtgen profilli dairesel kanadın sayısal analizi. In *ULIBTK'21: Uluslararası Katılımlı 23. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi* (Vol. 1, pp. 812–823).
- Yılmaz, R., Kırtepe, E., & Özbalta, N. (2018). Dikdörtgen profilli dairesel kanatlı borulu ısı değiştiricilerinde kanat boyutlarının ve malzemesinin ısı performansına etkisi. In *4. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu* (Vol. 1, pp. 551–560).

FOTOVOLTAİK PANEL TEMİZLEME YÖNTEMLERİ

Veli Berke KAYIKCIOĞLU¹

Gürkan KARA²

Hakan ÖZCAN³

1. GİRİŞ

Fotovoltaik (FV) paneller, güneş enerjisini direk elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. FV panelin koruyucu camı, bulundukları iklim ve coğrafi şartlara göre yıl içinde üzerlerinde kum, toz, çamur, kuş dışkısı, yaprak vb. atıklar birikerek kirlenebilmektedir ve bu kirlenmesi panellerin verimini olumsuz etkilemektedir. Özellikle güneş panellerinin yerleştirildiği bölgenin coğrafi konumu, panel yüzeylerinin farklı şekillerde kirlenmesine ve bunun sonucu olarakta enerji verimliliklerinde %32'ye varan yüksek oranlarda düşüşlere neden olabileceği tespit edilmiştir (Dorobantu et al., 2011; Kaldellis & Kokala, 2010; Zaihidee et al., 2016). Yağışların ücretsiz bir temizleme etkisi olmakla birlikte mevsimsel olarak değişkenlik gösterirler. Bazı durumlarda, özellikle kirlenmenin yoğun olduğu, yağış miktarının veya yoğunluğunun göreceli olarak yeterli olmadığı durumlarda yağışın temizleme kapasitesi yetersiz kalmaktadır. Hatta, hafif bir yağıştan sonra bazı durumlarda FV panel performanslarında keskin düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0009-0004-8419-5550.

² Arş. Gör., Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-0365-3827.

³ Prof. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-7848-3650.

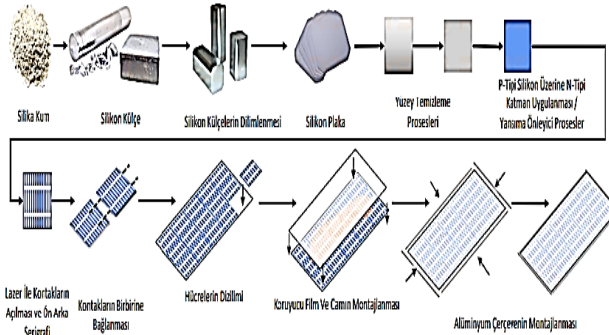
Diğer yandan, rüzgârın fiziksel etkisinin ayrıca kirlenmenin belirli bir dereceye kadar azaltılmasına veya ortadan kaldırılmasına yardımcı olabileceği görülüş olsa da, her durumda optimum enerji üretimi için yüzeyi temizleyecek suya ihtiyaç duyulduğu gösterilmiştir. Özellikle yüksek tozlu bölgelerde, panellerin yüzeyinde bulunan cam kısmın tozlanması sonucunda hücreler daha az güneş ışığına maruz kalırlar ve bu sebepten dolayı da verimliliklerinde azalma meydana gelir. Tozlanmanın yüksek olduğu çöl ortamında yapılan bir çalışmada, güneş ışıının yoğun olduğu haziran ayında 23 gün boyunca 2 adet FV panelin biri temizlenip diğeri temizlenmemiştir. Deney sonuçları, elektriksel güç değerinde %10 değerinde bir düşüş meydana geldiğini göstermiştir (Bonkaney et al., 2017).

Son yıllarda küresel çapta yaşanan tüketim artışından kaynaklı gün geçtikçe artan endüstriyel üretim yatırımları ile enerjiye duyulan ihtiyaç her gün artarak devam etmektedir. Ülkemizin fosil enerji kaynaklarının sınırlı olması, enerjinin ithal edilmesi gerekliliğini doğurmakta ve bu durum yıllık bütçelerde cari açık oluşmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte fosil yakıt kökenli geleneksel enerji kaynakları ile yapılan enerji üretimi, yüksek düzeyde kirletici emisyon salınımı nedeniyle çevresel tahribata neden olmakta ve küresel ısınmaya sebebiyet vermektedir. Ülkemiz, bilinen yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça yüksek kabul edilebilecek bir potansiyele sahiptir. Fakat her yenilenebilir enerji kaynağının, kendine özgü istekleri vardır. Bu istekler, söz konusu yenilenebilir enerji kaynağından enerji üretim verimliliğini birinci dereceden etkilediğinden her bir istek göz önünde bulundurulmalı, isteklerin sağlanamadığı koşullarda bu isteklerin sebep olduğu verim düşüşünden kaçınmanın yolları aranmalıdır. Örneğin güneş enerjisi sistemleri için kullanılan fotovoltaik panellerin; yüzeylerinde oluşan kirliliklerden %15, güneş ışınlarının panel yüzeyinden yansımalarının yeterince engellenememesi ve tam

olarak soğurulamamasından %5 verim kaybı olduğu bilinmektedir (Bahtiyar, 2006). Bu sebeple FV santralinin konumlandırıldığı bölgeye bağlı olarak; toz birikmesi, canlıların sebep olduğu kirlilik, nem, yağmur, çığ ve kar gibi panel yüzeyinden ışın geçişini engelleyerek verim düşüşüne sebep olabilecek riskler, yatırımcılar tarafından detaylı şekilde incelenmekte ve henüz kurulum aşamasında gerekli önlemler alınmaktadır. Bahsedilen kirlilik risklerinin önlenmesi veya temizlik önlemlerinin alınması, FV panel üzerine gelen güneş ışınlarının panel içerisinde bulunan hücrelere daha yüksek oranda ulaşmasını sağlamakta ve olası verim kayıplarının önüne geçmektedir. Bu bölümde, FV panellerin üzerinde oluşan kirliliklerin temizlenmesinde mevcut durumda kullanılan yöntemler incelenmiştir.

2. FOTOVOLTAİK PANEL

Günümüzde FV sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır ve önümüzdeki dönemde daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Hali hazırda silikon FV panel üretiminde en yaygın olarak kullanılan elementlerden biridir. Bu yapılarda, yarı iletken bir malzeme olan silikon plakalar bir dizi işlemle geçerek FV hücreleri oluşturur. Şekil 1’de FV panel üretim süreci kısaca özetlenmiştir.



Şekil 1. FV panel üretimi (EÜD & Robsys, 2024)

FV enerji santralleri, çok sayıda FV paneli içerirler ve elde edilebilecek en yüksek gücü üretecek şekilde tasarlanırlar. Ancak FV enerji tesislerinde gölgeleme, tozlanma, kablolama, uyumsuzluk ve evirici performansı, nem, sıcaklık gibi çeşitli nedenlerden dolayı kayıplar yaşanmaktadır ve bu da verimi büyük derecede etkilemektedir (Díez-Mediavilla et al., 2012; Maghami et al., 2016). Verim düşüşüne neden olan bu durumlar arasında toz birikmesi, doğrudan ışık geçişini olumsuz etkilemesi nedeniyle verim kaybı açısından en etkililerinden biridir. Panellerin kirlenmesi maksimum güç çıkışını azaltarak panel verimini düşürmektedir. Bu verim düşüşünü neden olan kirlenme faktörleri toz ve kum, kuş pisliği, polen, yağmur lekeleri gibi farklı kaynaklardan gelebilmektedir.

3. TEMİZLİK YÖNTEMLERİ

FV panellerin yapı malzemeleri çeşitlilik gösterse de, tüm paneller ön yüzeyden arka aydınlatma yüzeyine kadar birkaç katmandan oluşacak şekilde tasarlanır. Güneş ışığı, önce koruyucu bir katman (genellikle cam) üzerinden geçer ve daha sonra şeffaf bir temas katmanı aracılığıyla güneş hücresinin içine kadar girmektedir. Dolayısıyla, FV panellerin en dış katmanı olan ve bahsedildiği gibi genellikle de camdan üretilen yüzeyleri, sanayi ve çevresel faaliyetlerden dolayı toz ve kül benzeri opak partiküllerin atmosferde sürekli artış göstermesinden ciddi şekilde kirlenmektedir. Bu kirlenmenin boyutuna bağlı olarak da, FV panellerin verimlerinde ciddi düşüşler gözlemlenmekte hatta aşırı kirlenme durumlarında panellerin tamamen devre dışı kaldığı gözlemlenmektedir. FV panellerin kirlilik nedeniyle sayılarındaki azalışı engellemek için sistematik bir şekilde temizlenmesi gerekmektedir.

FV panellerin düzenli olarak temizlenmesi, sistemin enerji üretim veriminin düşmemesi ve süreklilik açısından çok

önemlidir. Güneş enerjisi; ekonomik, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olmasının yanında toz birikimi, sıcaklık dalgalanmaları, doğal yaşam kaynaklı kirlilikler (kuş pislikleri vb.) ve polen gibi potansiyel kirleticilerden yüksek düzeyde etkilenmeleri sebebiyle enerji üretiminde azalma gibi bir takım dezavantajlara sahiptir. Özellikle çöller ve sanayi bölgeleri gibi yüksek toz ve kül oranına sahip bölgelerde kurulu olan güneş enerjisi tesislerinin, panel yüzeylerinde oluşan bu kirlilikler hasebiyle enerji üretim verimlerinin %30'lara varan oranlarda azalabildiği literatürde yer alan pek çok çalışma ile kanıtlanmıştır (Nezamisavojbolaghi et al., 2023).

FV panel eğimi, panelin kurulduğu doğrultu, yüzey düzgünlüğü, yüzey kaplamadaki malzemelerin bileşimi ve oranları, ortam sıcaklığı ve rüzgar hızı gibi çeşitli unsurlar, fotovoltaiik panellerin yüzeyinde toz ve kir birikimini etkilemektedir. Ayrıca tozun ve kir tabakasının kimyasal, biyolojik ve elektrostatik özellikleri verimi etkileyeceğinden toz ve kir tabakasının FV panel yüzeylerindeki birikimi üzerinde etken bir rol oynamaktadır. Toz birikimi, daha öncede vurgulandığı gibi güneş panellerine ışığın ulaşmasını engellemekte aynı zamanda da güneşten gelen ışığın bir kısmının FV panel yüzeyinden doğrudan yansımaya, bir kısmının kırılmasına ve bir kısmının da dağılmasına neden olmakta, bu da fotonların soğurulmasını yani emilimini azaltmakta ve panel çıkış gücünü düşürerek verim kaybına yol açmaktadır. Dolayısıyla, panellerin temizliği çok önemlidir ve belirli aralıklar ile temizlenmesi gerekmektedir. Uygulamada FV panellerin yüzey temizleme işlemleri, temaslı ve temassız yüzey temizleme olarak ikiye ayrılmaktadır.

Günümüzde, FV panellerin manuel olarak veya otomasyon sistemleri kullanılarak temizlenmesi, FV panellerin üzerlerinde biriken kirlilikleri uzaklaştırmak ve verimliliğini arttırmak için kullanılan iki temel stratejidir (Nezamisavojbolaghi et al., 2023).

Ancak söz konusu bu temizlik metotlarının uzun temizleme süreleri, su gereksinimlerinin yüksek olması ve panel yüzeylerinin zarar görmesine neden olabilmeleri gibi bir dizi dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca, bu metotlar bazı durumlarda panel temizliğinde yetersiz kalabilmektedir. Bu durum, FV panellerin enerji üretim verimlerinde yaşanabilecek söz konusu kirlilikler kaynaklı düşüşlerin önüne geçmek adına yeni temizleme yöntemlerine olan ilgiyi gün geçtikçe artırmaktadır. Otomasyon sistemleri ile panel temizleme, manuel temizleme yöntemlerine kıyasla elektrostatik veya mekanik teknikleri kullanarak daha etkili çözümler sunmaktadır ancak bu yöntemler ek enerji tüketimi ve daha yüksek maliyetler yaratmaktadır (Yılmaz, 2024).

Manuel temizlik yönteminde çalışan tarafından kullanılan fırça vb. malzeme ile FV panelin cam yüzeyi şekil 2a)'da gösterildiği üzere temizlenmekte ve yüzey kirden arındırılmaktadır. Bu sayede FV panelden elde edilecek olan verimin artması sağlanmaktadır. Ancak daha önce de anlatıldığı üzere bu yöntem temaslı olduğu için zamanla FV panel yüzeyine zararlar meydana getirmektedir.

Şekil 2b)'de gösterildiği üzere otomatik temizleme robotu, fotovoltaik panelin cam yüzeyini temizlemek amacıyla yatay doğrultuda hareket eden dikey bir fırçayla donatılmıştır. Bu sistemler elektrikle çalışmaktadır ve otomatik olarak devreye girebilecek şekilde tasarlanabilmektedir. Temizlik işlemi sırasında panellerin ıslatılması için robota bir su hortumu entegre edilmiştir. Fakat bu temizlik yöntemi de temaslı olduğu için zamanla FV panel yüzeyine zararlar meydana getirmektedir.

Şekil 2c)'de gösterilen su püskürtme nozul sistemi, FV panel cam yüzeyini birincil temizlik hammaddesi olarak suyu kullanmaktadır. Bu sayede güneş panellerinin cam yüzeylerinden toz, pislik, kalıntı vb. atıkları temizleyerek fotovoltaik

panellerden elde edilecek olan verimi arttırmaktadır (Najmi & Rachid, 2023).



Şekil 2. (a) Manuel Temizlik, (b) Robotik Sistem ile Temizlik, (c) Su püskürtme ile Temizlik (Najmi & Rachid, 2023)

Temassız temizlik yöntemlerinde en çok kullanılan yöntemler elektrostatik temizleme, ultrasonik akustik temizleme ve kaplama yöntemidir.

Elektrostatik temizlemede paralel elektrotlar tarafından üretilen elektrodinamik kuvvet kullanılarak FV panel yüzeyindeki kalıntılar yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Başka bir ifadeyle, bir elektrot çok yüksek negatif voltajla yüklenmekte ve

diğer elektrotlar pozitif yüklenmektedir. Bu da toz parçacıklarının panellerden dışarı atılmasına neden olmaktadır. Ancak yüksek elektrik tüketimi ve uygulanabilirliği yağışı çok alan bölgelerle sınırlı olduğundan fazla tercih edilmemektedir.

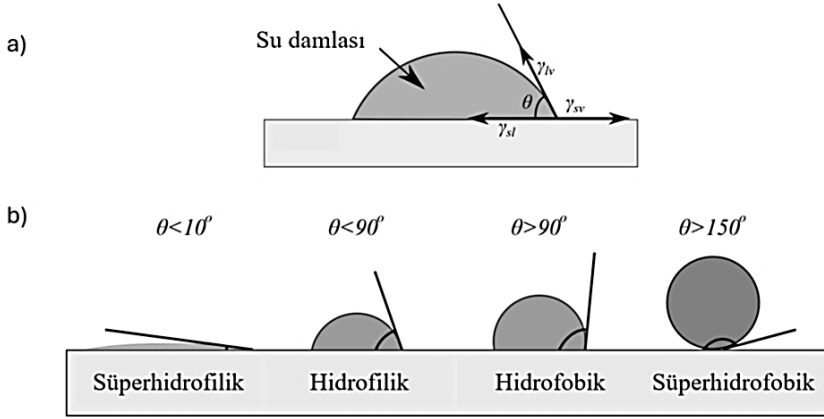
Ultrasonik akustik temizleme yöntemi hassas yüzey temizliği ve partikül yönlendirme uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ultrasonik ses dalgaları, eğimli panel yüzeylerine etki eder ve gaz halindeki mikro hava akımları oluşturmaktadır. Bu da akustik alanlarla ilişkili yüzeylerin titreşmesine neden olmaktadır. Titreşim etkisi, normalde diğer temizlik yöntemleriyle erişilemeyen yüzeylerin ve alanların temizlenmesine katkıda bulunmaktadır. Ancak ultrasonik akustik temizleme tekniği, sürekli olarak kendini temizleyen panel uygulamaları için değerlendirildiğinde enerji tüketiminde bir avantaj olarak kabul edilse de, 90 dB'lik bir ses yoğunluğu zamanla FV panellere zarar verdiğinden dolayı sürekli çalışan sistemler için istenen bir özellik değildir (Altıntaş & Arslan, 2021).

Diğer bir kirlilik önleyici yöntem olan yüzey kaplama, FV panellerin cam yüzeylerinin üzerlerinin ışık geçirgenliğine zarar vermeyecek şekilde hidrofobikleştirme özelliğine sahip malzemeler ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır. Kaplama ile hidrofobikleştirilmiş olan yüzeyin, üzerine damlatılmış olan su damlası ile temas açısının 90°'den fazla olmaktadır. Bu sayede panel yüzeyine yağmur ile veya püskürtme ile gelen su damlacıkları, panel yüzeyinde küresele yakın bir formda kalmakta ve eğimli panel yüzeyinden akışı esnasında toz vb. kirleticileri toplayarak panel yüzeyinden uzaklaştırabilmektedir.

Su damlalarının panel yüzeyi ile yaptığı temas açısının 150°'den fazla olması durumunda yüzeyin süperhidrofobik karakterde olması anlamına gelmektedir. Süperhidrofobik yüzeylerde panel yüzeyine gelen su, damlacıklara parçalanması

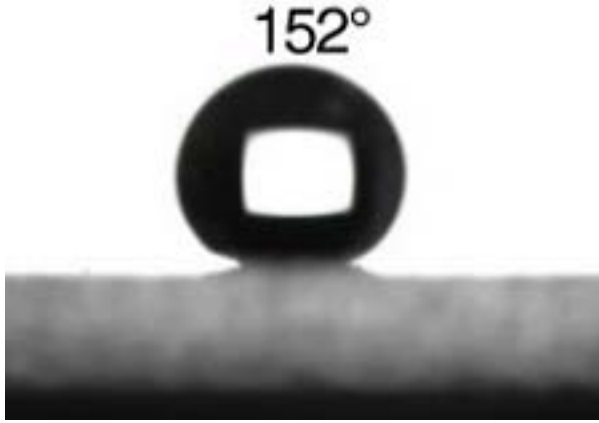
için gerekli olan gerilim üzerine etki etmediğinden neredeyse hiç parçalanmadan büyük damlalar halinde eğimli panel yüzeyinden akmaktadır. Damlaların panel yüzeyi ile temas ettiği açının 90° 'nin altında olması durumunda yüzey hidrofilik yüzey olarak, 10° 'nin altında olması ise süperhidrofilik yüzey olarak tanımlanır. Bu yüzey özelliklerinin şematik görüntüleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Hidrofilik karakterli yüzeylerde panel yüzeyine gelen su, hidrofobik yüzeylerin aksine yüzey temizliğini akış sırasında süpürerek değil, panel yüzeyine yayıldığı bölgelerdeki kirleticilere yapışarak yapmaktadır. Bu senaryoda su damlaları yuvarlanma hareketinden ziyade yüzeye yapışarak hareket ettiğinden kirleticilerin büyük bir kısmını toplayamamakla birlikte mevcut kirlerin yüzey üzerine daha kuvvetli yapışmalarına sebebiyet verebilmektedir (Nosonovsky & Bhushan, 2009). Bu sebeple hidrofobik ve süperhidrofobik kaplamalar, hem toz ve kirlerin yüzeye tutunmalarını zorlaştırarak kirleticilerin yüzeyde birikmelerini önlemekte hem de sürekli bakım gerektirmemekle beraber panelin ortalama enerji üretim verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, panel temizliği sadece su kullanılarak yapılabildiğinden panel yüzeylerinde mekanik temas kaynaklı çizilme veya temizlik kimyasalları kaynaklı deformasyonlar oluşma riski de ortadan kalkmaktadır.

Temassız yüzey temizlemede kullanılan başlıca yöntem olan yüzey kaplama, temizlik için ayrıca enerji harcanmasının önüne geçerek bakım ve işletme maliyetlerinin artmasını engellemektedir (Nezamisavojbolaghi et al., 2023).



Şekil 3. a) Su temas açısı (θ), (b) Ölçülen su temas açısına göre ıslatma alanları (Yılmaz,2024)

Örneğin Xu, J. ve arkadaşları, yüksek geçirgenliğe ve mükemmel süperhidrofobik özelliklere sahip Sol Jel yöntemiyle bir kaplama hazırlamıştır. Elde edilen kaplamaların temas açısı ölçüm sonuçlarına göre şekil 4'te de görüldüğü üzere su temas açısı ise 152° 'ye kadar çıkmıştır (Xu et al., 2017).



Şekil 4. Temas açısı ölçüm sonucu (Xu et al., 2017)

Ayrıca temizlik yöntemlerinin değerlendirilmesi için çeşitli metotlardan yararlanılmaktadır. Bunlardan biri de MCDM (Multi-Criteria Decision Making) yaklaşımıdır. MCDM, Türkçe

manasıyla Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri, birden fazla kriterin eş zamanlı göz önünde bulundurulması gereken durumlarda optimum kriter korelasyonu tespit etmek için kullanılan karar verme yöntemlerinin genel adıdır. PSI yöntemi ise (Preference Selection Index), oldukça basit, hızlı ve ağırlık hesaplama gerektirmeyen bir sıralama tekniği olması sebebiyle yaygın olarak tercih edilen bir Çok Kriterli Karar Verme yöntemidir.

Güneş enerjisi alanında Ürdünlü uzmanlarla yapılan anketler sonucu gerekli veriler toplanmıştır. PSI tekniğiyle temizlik yöntemleri değerlendirildiğinde otomatik temizlik sisteminin tercih indeksi 0.31853, elektrostatik temizlik yönteminin 0.27412, manuel temizlik yönteminin 0.40807 ve kaplama yönteminin ise 0.32674 olarak hesaplanmıştır. Ancak günümüz koşullarında artış gösteren masrafların ve ayrıca su tasarrufuna verilen önemin artması ile kaplama yöntemine olan talep giderek artmaktadır (Obeidat vd., 2020).

Son zamanlarda, FV panellerin verimini arttırmak amacıyla yüzey temizliklerini sağlayabilmek için artan maliyetler ve en önemlisi su kaynaklarının azalmasından dolayı TiO_2 , SiO_2 türevleri gibi fotokatalitik ve hidrofobik-hidrofilik özelliklere sahip nano materyaller araştırmacılar tarafından ilgiyle incelenmektedir. Bunun nedeni, nanotozların kendiliğinden temizlenebilen antibakteriyel ve hidrofobik malzeme olarak potansiyel bir kullanım alanına sahip olmasıdır (Chermahini et al., 2018). Güneş panellerinde kullanılan yansıma ve kirlenme önleyici kaplamaların olumsuz koşullara karşı dayanıklılıkları ve ışık geçirgenlikleri, FV panellerde yaşanabilecek olası verim düşüşlerinin önüne geçmek adına oldukça önemli parametrelerdir. Bu sebeple panel yüzeylerini kaplarken kullanılan kaplama malzemelerinin içerikleri belirlenirken dikkatli olunmalıdır. FV panel yüzey kaplamalarında yaygın olarak kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin kaplama

karakteristiklerine etki edebilecek bazı özellikleri aşağıda verilmiştir (Yılmaz, 2024).

Tablo 3.1. FV Panel Yüzey Kaplamalarında Kullanılan Bazı Malzemelerin Özellikleri (Yılmaz, 2024)

Malzeme	Kırılma İndisi	Işık Geçirgenliği	Mekanik Dayanım
SiO ₂	Düşük	Yüksek	Orta
MgF ₂	Düşük	Yüksek	Orta
TiO ₂	Yüksek	Orta	Yüksek
Si ₃ N ₄	Orta	Yüksek	Yüksek
ZrO ₂	Yüksek	Orta	Yüksek
Al ₂ O ₃	Yüksek	Orta	Yüksek

Literatürde kaplama yöntemi olarak kullanılan başlıca 5 yöntem bulunmaktadır. Bunlar Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), Termal Buharlaştırma Yardımlı Kaplama, Glancing Angle Deposition (GLAD), Elektroçürme Yöntemi ve Sol Jel Yöntemidir. Literatürde kullanılan kaplama yöntemleri arasında Sol Jel yöntemi, en ekonomik ve en kullanışlı kaplama yöntemi olarak değerlendirilebilir. Sol Jel yöntemi ile üretilen kaplamalar, yüksek ışık geçirgenlikleri ve süperhidrofobikleştirmeye yatkınlıkları sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Süper ince kaplamaların üretiminde Sol Jel yönteminin yaygın olarak tercih edilmesinin sebebi, bu alanda kullanılan diğer yöntemlere göre daha basit ve daha düşük maliyetli bir yöntem olmasıdır. FV panellerde bu yöntem panellere; yüzeyden yansımayı önleme, kendi kendini temizleme, antibakteriyellik ve zararlı ultraviyole ışınlarından koruma gibi özellikler kazandırmak için kullanılmaktadır (Shanmugam vd., 2020).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

FV panellerin verimliliğini artırmak için, cam yüzeylerde kullanılabilecek temizlik yöntemleri temaslı ve temassız temizlik yöntemleri olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Temaslı ve temassız temizlik yöntemleri incelendiğinde zaman, masraflar

ve panel yüzeyine zarar parametreleri göz önüne alınarak temassız temizlik yöntemlerinden kaplama yöntemleri en avantajlı temizlik yöntemi olduğu değerlendirilmiştir. Manuel temizleme teknikleri, yaklaşık 9.25 \$/kW'a mal olan temizleme araçları (fırçalar dahil) gerektirmektedir. İşletme maliyeti ise her temizleme döngüsü için 0.19 \$/kW'a ulaşmaktadır. Elektrostatik temizleme tekniğinin sermaye maliyetinin 26 \$/kW olduğu bildirilmiştir. İşletme maliyeti kapsamında, sistemin performansının sürdürülmesi için bir temizleme döngüsü başına gereken enerji tüketiminin 0.2 Wh/m² olduğu hesaplanmıştır. Dolayısıyla, 10 m² bir alan için hesap yapıldığında FV sistem alanı ve 0.175 \$/kWh elektrik tarife değeri dikkate alındığında işletme maliyetinin 0.00035 \$/kW olduğu öngörülmektedir. Kaplama yöntemlerinde (hidrofobik ve hidrofilik) kendi kendini temizleme teknikleri, sırasıyla 9 \$/kW ve 7 \$/kW tutarında ilk yatırım gerektirmektedir. Bu hesaplamalar göz önüne alındığında en düşük sermaye maliyetine sahip temizlik yöntemi kaplama yöntemidir. Literatür incelendiğinde, enerji verimliliği açısından geliştirilecek kaplamalar, FV panellerin verimliliğini artırarak, enerji üretiminde önemli bir artış sağlandığı görülmüştür. Kirlenme ve dış etkenler (toz, kir, su lekeleri vb.) nedeniyle kaybolan enerjinin azaltılması, potansiyel bakım ve onarım maliyetlerinin az olması hem ekonomik hem de çevresel fayda sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca fotokatalitik ve süperhidrofobik-süperhidrofobik özellikler kullanılarak su damlacıklarının yüzeyde kayarak kirleri temizlemesi incelenerek günümüz koşullarında hayati öneme sahip olan su tasarrufuna yardımcı olduğu da görülmüştür.

Son olarak, FV panellerin temizliği üzerine yürütülen çalışmaların geliştirilmesine yönelik ileriye dönük araştırma gereksinimleri ve öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Farklı iklim ve coğrafi koşulları kapsayan kapsamlı saha çalışmalarına ihtiyaç vardır. Tozlanma dinamiklerinin

bölgesel farklılıklar göstermesi nedeniyle, temizlik yöntemlerinin etkinliği ve ekonomik sonuçları ancak çeşitli iklim bölgelerinde uzun dönemli karşılaştırmalı çalışmalarla değerlendirilmelidir.

- Su tüketimini minimize eden veya su kullanımını tamamen ortadan kaldıran temizlik teknolojilerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde, mevcut su bazlı temizlik yöntemleri sürdürülebilir değildir.
- Toz birikiminin izlenmesi ve temizlik zamanlamasının optimize edilmesi için yapay zekâ tabanlı modellerin geliştirilmesi gerekmektedir. Makine öğrenimi ve veri analizine dayalı modeller, tozlanma oranının tahmini, verim kayıplarının hesaplanması ve en uygun temizlik stratejisinin belirlenmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu tür modeller, işletme ve bakım faaliyetlerinin daha verimli yönetilmesine katkı sağlayacaktır.
- Temizlik yöntemlerinin FV modülleri üzerindeki uzun dönem etkilerinin incelenmesi gereklidir. Mekanik fırçalama, robotik temizlik sistemleri veya kimyasal temizlik malzemelerinin panel yüzeyinde oluşturabileceği aşınma, mikro yapısal zarar, optik geçirgenlik kaybı gibi etkiler yeterince araştırılmamıştır. Bu nedenle, uzun vadeli dayanıklılık ve performans analizleri yapılmalıdır.
- Kendini temizleyen yüzey kaplamalarının performansının artırılması ve ticarileştirilmesine yönelik çalışmalar desteklenmelidir. Süperhidrofobik, fotokatalitik veya antistatik özelliklere sahip kaplamaların laboratuvar ortamında başarılı sonuçlar verdiği bilinmekle birlikte, dış ortam koşullarındaki kararlılık, UV dayanımı, mekanik

aşınmaya karşı direnç ve maliyet etkinliği bakımından daha fazla geliştirilmesi gerekmektedir.

- Otomatik temizlik sistemleri için standart test protokollerinin oluşturulması gerekmektedir. Farklı firmalar tarafından geliştirilen robotik veya otomatik temizlik sistemlerinin performansının karşılaştırılabilmesi için uluslararası düzeyde standardize edilmiş değerlendirme yöntemleri ve ölçütler belirlenmelidir.
- Ekonomik analizlerin kapsamı genişletilmelidir. Temizlik yöntemlerine ilişkin yatırım maliyetinin, geri ödeme süresinin, fayda–maliyet oranının ve sistem verimindeki artışın bütüncül bir yaklaşımla analiz edilmesi, özellikle büyük ölçekli FV santrallerinde karar vericilere önemli katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Altıntaş, M., & Arslan, S. (2021). The study of dust removal using electrostatic cleaning system for solar panels. *Sustainability* (Switzerland), 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13169454>
- Bahtiyar, B. (2006). Fotovoltaik sistemler için gerçek zamanlı bir izleme merkezi tasarım ve uygulaması (Yüksek Lisans Tezi). Muğla Üniversitesi, Muğla, Türkiye.
- Bonkaney, A., Madougou, S., & Adamou, R. (2017). Impacts of Cloud Cover and Dust on the Performance of Photovoltaic Module in Niamey. *Journal of Renewable Energy*, 2017, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2017/9107502>
- Chermahini, S. H., Ostad-Ali-Askari, K., Eslamian, S., & Singh, V. P. (2018). Recent Progress in Self-Cleaning Materials with Different Suitable Applications. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(2), 560-573. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2018.560.573>
- Díez-Mediavilla, M., Alonso-Tristán, C., Rodríguez-Amigo, M. C., García-Calderón, T., & Dieste-Velasco, M. I. (2012). Performance analysis of PV plants: Optimization for improving profitability. *Energy Conversion and Management*, 54(1), 17-23. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2011.09.013>
- Dorobantu, L., Popescu, M. O., Popescu, C., & Craciunescu, A. (2011). The effect of surface impurities on photovoltaic panels. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(9), 622-626. <https://doi.org/10.24084/repqj09.405>
- Elektrik Üreticileri Derneği & Robsys Robotic Systems. (2024, 14 Mart). Sürdürülebilir güneş enerjisi için fotovoltaik panel temizliği: Teknikler ve trendler [Sunum dosyası]. Elektrik Üreticileri Derneği. <https://www.eud.org.tr/>
- Kaldellis, J. K., & Kokala, A. (2010). Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air

- pollution disposal. *Energy*, 35(12), 4862-4869.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2010.09.002>
- Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., & Hajighorbani, S. (2016). Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1307-1316. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.01.044>
- Najmi, N., & Rachid, A. (2023). A Review on Solar Panel Cleaning Systems and Techniques. *İçinde Energies* (C. 16, Sayı 24). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en16247960>
- Nezamisavojbolaghi, M., Davodian, E., Bouich, A., Tlemçani, M., Mesbahi, O., & Janeiro, F. M. (2023). The Impact of Dust Deposition on PV Panels' Efficiency and Mitigation Solutions: Review Article. *İçinde Energies* (C. 16, Sayı 24). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en16248022>
- Nosonovsky, M., & Bhushan, B. (2009). Superhydrophobic surfaces and emerging applications: Non-adhesion, energy, green engineering. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 14(4), 270-280. <https://doi.org/10.1016/J.COCIS.2009.05.004>
- Obeidat, M. S., Al Abed Alhalim, E. A. M., & Melhim, B. R. (2020). Systematic Approach for Selecting a Cleaning Method to Solar Panels Based on the Preference Selection Index Approach. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 14(3).
- Shanmugam, N., Pugazhendhi, R., Elavarasan, R. M., Kasiviswanathan, P., & Das, N. (2020). Anti-reflective coating materials: A holistic review from PV perspective. *Energies*, 13(10), 2631. <https://doi.org/10.3390/en13102631>
- Xu, J., Liu, Y., Du, W., Lei, W., Si, X., Zhou, T., Lin, J., & Peng, L. (2017). Superhydrophobic silica antireflective coatings with high

transmittance via one-step sol-gel process. Thin Solid Films, 631, 193-199. <https://doi.org/10.1016/J.TSF.2017.03.005>

Yılmaz, M. (2024). Elektroëğirme yöntemiyle fotovoltaiik panellerde verim artırıcı kaplamalar (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Zaihidee, F. M., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., & Horan, B. (2016). Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65, 1267-1278. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.06.068>

EFFECT OF CFRP PLY ORIENTATION ON STRESS DISTRIBUTION IN ALUMINIUM– CFRP ADHESIVELY BONDED SINGLE-LAP JOINTS

Ahmet ÇALIK¹

1. INTRODUCTION

Adhesively bonded joints offer key advantages over mechanical fastening for lightweight structures: continuous load transfer, reduced stress concentrations caused by holes, improved fatigue performance, and the ability to join dissimilar materials.(Feih & Shercliff, 2004; Mattos et al., 2011; Pinto et al., 2013) In aerospace, automotive, and rail applications, hybrid joints combining CFRP and aluminium alloys are particularly attractive because they enable high specific stiffness and strength while preserving manufacturability and cost-effectiveness.(Huang et al., 2013; Wang et al., 2021) However, these hybrid joints introduce complexities, such as residual thermal stresses that arise from the differential thermal expansion coefficients between carbon fiber reinforced polymers and aluminum during the curing process (Carbas et al., 2021).

Despite these benefits, adhesively bonded single-lap joints (SLJs) are known to exhibit non-uniform stress distributions along the overlap due to combined shear and peel stresses induced by eccentric loading.(Kim et al., 2007) These effects become more complex in CFRP–metal joints because CFRP is anisotropic: its stiffness and coupling behaviour depend

¹ Prof. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-7425-4546.

strongly on fibre orientation. Therefore, changing CFRP ply angle can influence the joint's deformation pattern, the load path, and ultimately the magnitude of critical stresses in the adhesive and at the interface.(Fink et al., 2009; PLAKA et al., 2022; Vigón et al., 2024)

This chapter focuses on a numerically efficient way to explore this sensitivity: a parametric FE study in which CFRP orientation is varied and stress values along the adhesive length are compared using consistent post-processing. The work is based on an aluminium adherend bonded to a CFRP adherend using an adhesive layer, modelled in ANSYS Workbench, with stress values read along the adhesive bond line.

2. PROBLEM DESCRIPTION AND MODELLING STRATEGY

2.1. Joint configuration

The investigated structure is an adhesively bonded single-lap joint composed of two adherends: CFRP at the lower adherend and an aluminium alloy at the upper adherend, connected through an adhesive layer. The CFRP material orientation is rotated to form different angles with the global x -direction, and FE analyses are performed for each orientation angle (Figure 1).

Boundary conditions and loading follow a standard tensile-type SLJ configuration: one end of the joint is fixed while a force is applied at the opposite end. Stress values are evaluated along the adhesive overlap length ("bond length") to obtain comparative distributions (Table 1).

Table 1. Geometry and loading conditions of the SLJ

Parameter	Symbol	Value	Unit
Adhesive thickness	t_a	0.15	mm
Aluminium adherend length	L_{Al}	100	mm
Composite (CFRP) adherend length	L_{CFRP}	100	mm
Adherend width (both adherends)	b	25	mm
Overlap (bond) length	L_b	25	mm
Overlap (bond) width	b_b	25	mm
Equivalent applied force	F_{eq}	1.7	kN

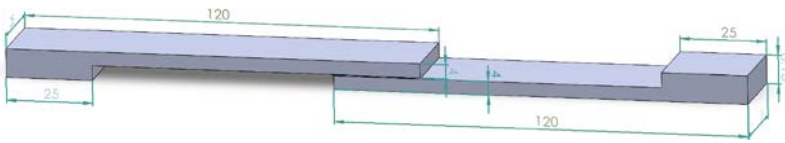


Figure 1. Geometric dimensions of the SLJ.

2.2. Material models

ANSYS Engineering Data is used to assign material properties to aluminium, CFRP, and the adhesive (Table 2). The chapter uses the same modelling approach as in the provided results: aluminium is treated with an isotropic elastic (and optionally bilinear hardening) definition, the adhesive is modelled as isotropic linear elastic, and CFRP is defined as an orthotropic elastic material (carbon fibre lamina). The relevant property panels are shown in the study documentation.

2.3. Finite element mesh

A 3D finite element discretization is used. The mesh statistics reported for the representative model are approximately **149,226 nodes** and **30,875 elements** (as indicated in the mesh statistics panel). The mesh model is shown in Figure 2.



Figure 2. Mesh model

Table 2. Material properties

Material (Constitutive model)	Property	Symbol	Value	Unit
Aluminum Alloy NL (Isotropic linear elastic)	Density	ρ	2770	kg/m ³
	Young's modulus	E	71.0	GPa
	Poisson's ratio	(ν)	0.33	–
	Bulk modulus	(K)	69.608	GPa
	Shear modulus	(G)	26.692	GPa
	Yield strength	σ_y	280	MPa
	Tangent modulus	(E_{-t})	0.5	GPa
Carbon Fiber (Orthotropic linear elastic)	Density	(ρ)	1800	kg/m ³
	Young's modulus (X-direction)	E_1	230	GPa
	Young's modulus (Y-direction)	E_2	23	GPa
	Young's modulus (Z-direction)	E_3	23	GPa
	Poisson's ratio	ν_{12}	0.20	–
	Poisson's ratio	ν_{23}	0.40	–
	Poisson's ratio	ν_{13}	0.20	–
	Shear modulus	G_{12}	9.0	GPa
	Shear modulus	G_{23}	8.2143	GPa
	Shear modulus	G_{13}	9.0	GPa
Adhesive (DP460) (Isotropic linear elastic))	Young's modulus	E	1.984	GPa
	Poisson's ratio	ν	0.37	–

2.4. Output quantities and post-processing

For each CFRP orientation case, two primary results are extracted along the adhesive bond length:

Equivalent (von Mises) stress distribution (reported in MPa in the graphs)

Maximum shear stress distribution (reported in MPa in the graphs)

These are sampled along the overlap coordinate (bond length) so that peak locations and peak magnitudes can be compared consistently across fibre angles.

3. RESULTS

3.1. Von Mises stress distribution along the bond length

The computed von Mises stress distributions show a pronounced non-uniform pattern along the overlap. For all considered CFRP orientation angles, stresses are relatively high near the overlap ends, decrease toward the mid-overlap region, and then rise again approaching the opposite overlap end—forming a characteristic U-shaped distribution along the bond length.

A comparison across orientation angles indicates that the magnitude of the peak von Mises stress is strongly orientation-dependent. In the presented curves (multiple angles including 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°), certain orientations generate noticeably higher peaks at the overlap end(s), while others reduce end-peaks and flatten the stress gradient.

This behaviour is consistent with the mechanics of SLJs, where eccentric loading produces bending, causing combined shear/peel effects. When the CFRP principal stiffness direction is rotated, the joint's axial and bending stiffness distribution changes, altering how load is transferred into the adhesive and how strongly the overlap ends are stressed.

Based on the stress profiles extracted along the overlap length, the peak values show a strong dependence on the CFRP orientation angle. The maximum (peak) von Mises stress reaches 11.651 MPa at 45°, whereas it decreases to 6.379 MPa at 75°, corresponding to an approximate 45.25% reduction relative to the 45° case. A similar trend is observed for the peak maximum shear stress: the peak value is 11.651 MPa at 45°, but drops to 3.586 MPa at 90°, yielding an approximate 69.22% reduction. For reference, changing the angle from 30° to 0° reduces the peak von Mises stress from 9.866 to 6.610 MPa ($\approx 33.00\%$), while the peak

maximum shear stress decreases from 9.866 to 3.717 MPa ($\approx 62.32\%$). These results highlight that fibre orientation can be effectively used as a design lever to mitigate critical peak stresses in aluminium–CFRP hybrid single-lap joints. The von Mises stress distributions for different CFRP orientation angles are presented in Figure 3.

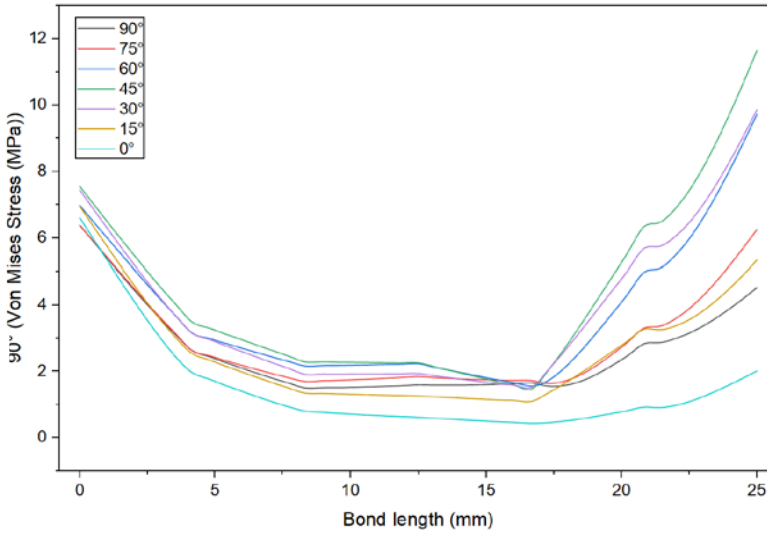


Figure 3. Von Mises stress (MPa) along the adhesive bond length for different CFRP orientation angles.

3.2. Maximum shear stress distribution along the bond length

The maximum shear stress distributions follow a similar trend: relatively large values near the overlap ends and reduced values toward the mid-overlap. Across the studied orientation angles, the peak shear stress near the overlap end is the dominant feature, and the sensitivity to CFRP orientation is again evident.

In practical terms, adhesive shear stress is a primary driver for failure initiation in many bonded-joint scenarios (especially if peel is not explicitly assessed). Therefore, orientations that reduce end-peaks are beneficial for increasing damage tolerance and

improving fatigue resistance. The maximum shear stress distributions are shown in Figure 4.

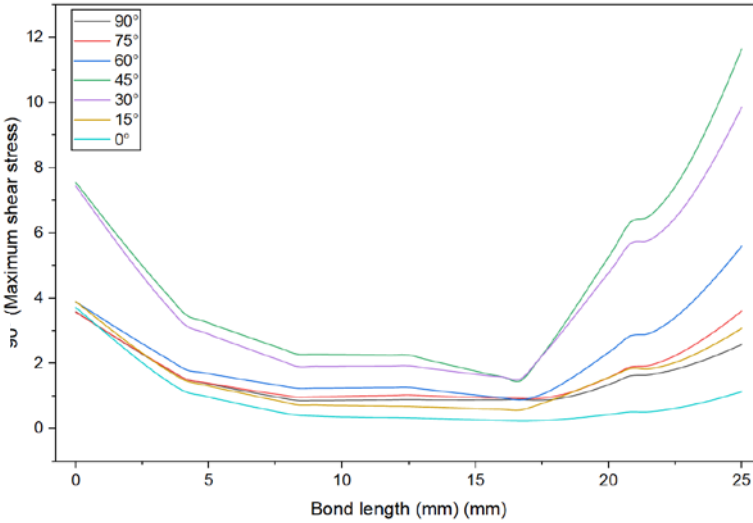


Figure 4. Maximum shear stress (MPa) along the adhesive bond length for different CFRP orientation angles.

4. DISCUSSION

4.1. Why do overlap ends govern peak stresses?

In single-lap joints, the line of action of the applied load does not pass through the adhesive mid-plane due to the lap geometry, producing a bending moment. This leads to:

Concentrated load transfer near overlap ends (shear-lag effect)

Additional peel-like effects caused by rotation of adherends

Strong stress gradients near geometric and stiffness discontinuities

In hybrid joints, these effects are amplified by the stiffness mismatch between aluminium and CFRP. Even when the adhesive is modelled elastically, the localised end-peaks remain pronounced.

4.2. Role of CFRP orientation

CFRP orientation influences the joint response through directional stiffness control:

At some angles, the CFRP adherend becomes more compliant in the load direction, increasing deformation and potentially raising adhesive shear demand near the ends.

At other angles, CFRP is stiffer in the load direction, which can shift load transfer and reduce or redistribute peak stresses.

Orientation also affects coupling (in general), which can modify bending/rotation tendencies and thereby alter stress distributions along the overlap.

The plotted results clearly indicate that ply angle is an effective parameter for stress tailoring in CFRP–aluminium SLJs, even without changing geometry or adhesive type.

4.3. Design implications

From a design standpoint, the most valuable outcomes of this parametric study are:

Peak stress ranking: Identify fibre angles producing the lowest overlap-end peaks (for both von Mises and maximum shear stress).

Gradient control: Flatter stress curves generally imply reduced localisation and improved durability.

Hybrid-joint optimisation: CFRP orientation can be combined with geometric tuning (e.g., tapering, spew fillets, chamfers) and adhesive selection to further reduce end-peaks.

5. CONCLUSIONS

This chapter presented a finite element investigation of an adhesively bonded aluminium–CFRP single-lap joint in which CFRP orientation was varied and stress distributions were extracted along the adhesive bond length using ANSYS Workbench.

The main conclusions are:

Both von Mises stress and maximum shear stress are strongly non-uniform along the overlap, with pronounced peaks near overlap ends and a minimum near the mid-overlap.

CFRP orientation substantially affects stress magnitudes and gradients, demonstrating that layup/orientation tailoring is an effective strategy to mitigate critical adhesive stresses in hybrid SLJs.

Overlap-end stress peaks remain the dominant design concern; therefore, fibre-angle optimisation should be considered alongside classical joint-improvement measures (fillets, adherend tapering, adhesive thickness control, etc.).

REFERENCES

- Carbas, R. J. C., Marques, E. A. S., & Silva, L. F. M. da. (2021). The influence of epoxy adhesive toughness on the strength of hybrid laminate adhesive joints. *Applied Adhesion Science*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40563-020-00132-5>
- Feih, S., & Shercliff, H. (2004). Composite failure prediction of single-L joint structures under bending. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, 36(3), 381. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.06.021>
- Fink, A., Camanho, P. P., Andres, J., Pfeiffer, E. K., & Obst, A. (2009). Hybrid CFRP/titanium bolted joints: Performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor. *Composites Science and Technology*, 70(2), 305. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.11.002>
- Huang, Z., Sugiyama, S., & Yanagimoto, J. (2013). Hybrid joining process for carbon fiber reinforced thermosetting plastic and metallic thin sheets by chemical bonding and plastic deformation. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(11), 1864. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.015>
- Kim, K.-S., Yi, Y.-M., Cho, G.-R., & Kim, C. (2007). Failure prediction and strength improvement of uni-directional composite single lap bonded joints. *Composite Structures*, 82(4), 513. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.02.005>
- Mattos, H. S. da C., Sampaio, E. M., & Monteiro, A. H. (2011). Static failure analysis of adhesive single lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(6), 446. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.02.007>

- Pinto, A. G., Campilho, R. D. S. G., Mendes, I. R., & Baptista, A. P. M. (2013). Numerical and Experimental Analysis of Balanced and Unbalanced Adhesive Single-Lap Joints between Aluminium Adherends. *The Journal of Adhesion*, 90(1), 89. <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.773258>
- Plaka, E., Bednarczyk, B., & Maiarù, M. (2022, September 19). Design Of Adhesively Bonded Composite Joints Using A Rapid Design Tool. *American Society for Composites* 2022. <https://doi.org/10.12783/asc37/36492>
- Vigón, P., Argüelles, A., Lozano, M., & Viña, J. (2024). Fracture analysis under modes I and II of adhesive joints on CFRP in saline environment. *Npj Materials Degradation*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41529-024-00535-w>
- Wang, H., Huang, B., Li, J., Li, N., & Liu, L. (2021). Welding and Riveting Hybrid Bonding of 6061 Al and Carbon Fiber Reinforced Composites. *Polymers*, 14(1), 99. <https://doi.org/10.3390/polym14010099>

DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ GÜNCEL DURUMU

Gürkan KARA¹

Seyda ÖZBEKTAŞ²

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji; fosil yakıtların kullanımının sebep olduğu çevresel, ekonomik, jeopolitik ve teknolojik sorunlar ile ilgili gün geçtikçe artan endişelere paralel olarak akademik çevrelerin ve küresel enerji politikalarının önemli bir hedef noktası haline gelmiştir(Gielen et al., 2019). 21. yüzyılın ilk çeyreği itibarı ile küresel enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların payı; iklim değişikliği ile mücadele, enerji güvenliği, enerji bağımsızlığı ve ülkelerin sürdürülebilir ekonomik kalkınma planlarının gerçekleştirilebilmesi adına büyük bir öneme haiz olmuştur(Okunevičiūtė Neverauskienė et al., 2025; Osman et al., 2023). Gelişen teknoloji ve tüketim alışkanlıkları hasebiyle küresel çapta enerji tüketiminde yaşanan dramatik artış, fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminin başta sera gazı emisyonlarının artışı ve bunun sonucunda ortaya çıkan küresel ısınma gibi çevresel etkileri olmak üzere pek çok dezavantajından dolayı fosil yakıt enerjisi karşısındaki en büyük rakip olan yenilenebilir enerji kaynaklarına halihazırda yönelmiş olan ilgiyi daha da artırmış ve geline nokta da pek çok farklı açıdan zorunluluk haline getirmiştir(Bashir et al., 2024).

¹ Arş. Gör., Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-0365-3827.

² Arş. Gör., Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-7399-733X.

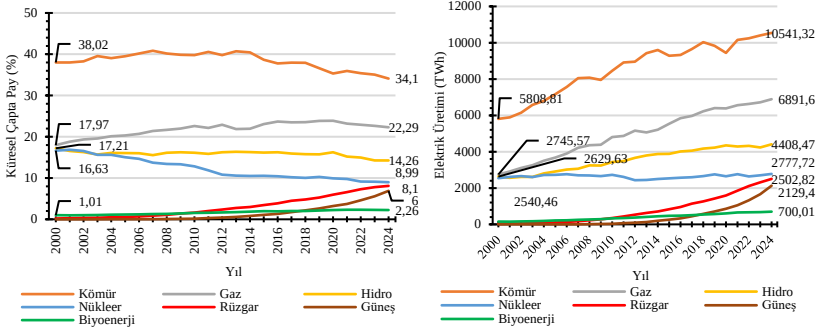
Yenilenebilir enerjinin; güneş, rüzgar, hidrolik, biyoenerji ve jeotermal enerji gibi doğal kaynaklardan elde edilmesi sebebiyle çevre üzerindeki olumsuz etkileri fosil yakıtlara nazaran çok daha düşüktür(Candra et al., 2023). Dünya genelinde bu kaynaklardan enerji elde edilebilmesi için kurulan tesislerin sayılarının artmasıyla birlikte elde edilen enerji miktarı da her geçen yıl artmakta, buna paralel olarak enerji üretim teknolojilerinde elde edilen ilerlemelerle birlikte enerji üretim verimliliği de yükselmektedir(Neuhoff et al., 2022). Buna mukabil her bir yenilenebilir enerji kaynağının kendine özgü kurulum maliyetleri ve verimli enerji üretimini sağlayabilmek adına özel kurulum alanı/bölgesi gibi gereksinimleri vardır. Özellikle son yıllarda yaşanan Rusya-Ukrayna gerginliği ve takip eden süreçte yapılan yaptırımlar sonucunda yaşanan enerji krizi gibi durumların enerji bağımsızlığının öneminin bir kere daha anlaşılmış olmasını sağlaması, üretim teknolojilerindeki gelişmeler ile kurulum maliyetlerinin zamanla düşmesi ve yenilenebilir enerji yatırımlarının finansal açıdan daha cazip hale gelmesiyle yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla yatırım yapılmasının önü açılmıştır(Hille, 2023; Sart et al., 2025). Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları arasında faydalanma oranı en yüksek kaynaklar olan; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerji ve biyoenerji kaynaklarının dünyada ve Türkiye’deki mevcut durumu güncel veriler kullanılarak incelenmiştir.

2. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE GENEL ENERJİ DURUMU

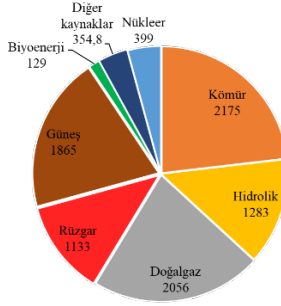
2.1. Dünyada Genel Enerji Durumu

Bu bölümde küresel çapta mevcut durumdaki enerji üretimlerinin kaynaklara göre dağılımı güncel verilerle incelenmiş ve yıllara göre değişim trendleri karşılaştırılmıştır.

Küresel çapta elektrik üretimi için kullanılan kaynaklardan üretilen elektrik miktarlarının yıllara göre değişimi, bu kaynakların sektör içerisindeki payı ve güncel durumdaki kurulu güç miktarlarını karşılaştırmalı olarak gösteren grafikler; Şekil 2.1. ve Şekil 2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Dünya Geneline Kaynaklara göre Elektrik Üretim Miktarlarının ve Elektrik Üretiminde Kullanılan Kaynakların Paylarının Yıllara Göre Değişimleri (Ritchie et al., 2025; Ember, 2025; IRENA, 2025; Özbektaş et al., 2023)



Şekil 2.2. 2024 Yılı İtibarıyla Dünyada Elektrik Üretimi İçin Toplam Kurulu Güç Dağılımı (GW) (Ritchie et al., 2025; Ember, 2025; IRENA, 2025)

Şekil 2.1'de verilmiş olan grafikler, 2000-2024 yılları arasında dünya genelindeki elektrik üretiminin farklı enerji kaynaklarına göre nasıl değiştiğini ve bu enerji kaynaklarının

küresel çaptaki elektrik üretimi içindeki paylarının yıllar içindeki değişimlerini göstermektedir. Yapılan araştırmalar, özellikle kömürün elektrik üretiminde büyük bir üretim payına sahip olduğunu ve bu payın yıllar içerisinde önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Buna karşın rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel elektrik üretimindeki payının, özellikle son yıllarda belirgin bir şekilde arttığı grafikte görülmektedir. 2024 yılı itibariyle, güneş enerjisinin üretimdeki payının önemli bir artış gösterdiği ancak yine de kömür ve gazın toplam üretimdeki payına yaklaşamamıştır. Bu durum kömürün günümüzde hâlâ küresel elektrik üretiminde baskın bir kaynak olmaya devam ettiğini ancak yenilenebilir enerjiye yönelik ilginin kararlı bir şekilde artış gösterdiğini göz önüne koymaktadır.

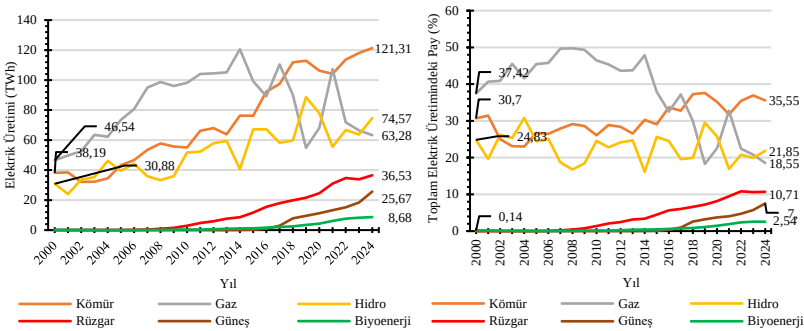
2000-2024 yılları arasında kömürün elektrik üretimindeki payının büyük ölçüde azalmasına rağmen hâlâ en büyük paya sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte rüzgar ve güneş enerjilerinin elektrik üretimindeki payları aynı süreçte artış göstermiştir. Rüzgar enerjisinin üretimdeki payı, özellikle son yıllarda hızlı bir artış göstermiştir. Güneş enerjisi ise erken 2000’lerde sektör içerisinde çok düşük bir paya sahipken özellikle 2020 yılı itibariyle önemli bir kırılımla yükselişe geçmiştir. Biyoenerji gibi diğer kaynakların payı ise bu kaynakların yanında daha düşük kalmıştır. Grafikte gözlemlenen bu trend, konvansiyonel kaynaklardan yenilenebilir enerji kaynaklarına olan geçişin hızlandığını ancak bu geçişin henüz kömür ve gazın elektrik üretimindeki mutlak hakimiyetini geçebilecek seviyede olmadığını göstermektedir.

Şekil 2.2.’de 2024 yılı itibariyle dünyada elektrik üretiminde kullanılan kaynakların işlenmesinde kullanılan tesislerin mevcut kurulu güç dağılımını gösteren grafik verilmiştir. Güneş enerjisinin 1865 GW’lık kurulu gücüyle kömür ve doğalgazdan sonraki en büyük paya sahip olduğu görülmektedir. Rüzgar enerjisi, 1133 GW ile önemli bir paya

sahip olurken, rüzgar enerjisini sırasıyla hidroelektrik enerjisi, nükleer enerji ve biyoenerji takip etmiştir. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu gücünün geleneksel enerji kaynaklarına göre daha hızlı bir şekilde arttığını ve 2024 yılı itibariyle bu eğilimin küresel elektrik üretiminde daha belirgin hale geldiğini vurgulamaktadır.

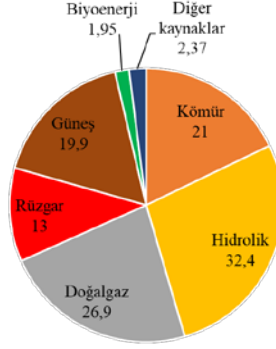
Genel perspektife bakıldığı zaman; yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel bazlı elektrik üretiminde ve kurulu güç dağılımında gün geçtikçe artan bir paya sahip olduğu görülmektedir. Özellikle güneş ve rüzgar enerjisinin payında son yıllarda gözlenen artış, yenilenebilir enerjinin gelecekteki küresel enerji üretimindeki kritik rolünü göz önüne koymaktadır. Bununla birlikte, kömür ve doğalgaz gibi geleneksel enerji kaynakları hala önemli bir üretim payına sahip olmaya devam etmektedir. Bu durum, yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinin uzun zaman alabileceğini ve mevcuttaki konvansiyonel enerji üretim altyapılarının hala büyük ölçüde fosil yakıtlar üzerine kurulu olduğunu ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan payına rağmen, fosil yakıtlara olan bağımlılığın devam etmesi, küresel enerji geçişinin tamamlanmasının uzun vadeli bir süreç gerektireceğini göstermektedir.

2.2. Türkiye’de Genel Enerji Durumu



Şekil 2.3. Türkiye’de Kaynaklara göre Elektrik Üretim Miktarlarının ve Elektrik Üretiminde Kullanılan Kaynakların Paylarının Yıllara Göre Değişimleri (Ritchie et al., 2025; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025)

Türkiye özelinde elektrik üretimi için kullanılan kaynaklardan üretilen elektrik miktarlarının yıllara göre değişimi, bu kaynakların sektör içerisindeki payı ve güncel durumdaki kurulu güç miktarlarını karşılaştırmalı olarak gösteren grafikler; Şekil 2.3. ve Şekil 2.4.'de verilmiştir.



Şekil 2.4. 2024 Yılı İtibarıyla Türkiye’de Elektrik Üretimi İçin Toplam Kurulu Güç Dağılımı (GW) (Ritchie et al., 2025; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025)

Şekil 2.3’de verilmiş olan grafik, Türkiye’deki elektrik üretimi miktarının, 2000-2024 yılları arasında farklı enerji kaynaklarına göre değişimini ve Türkiye’deki toplam elektrik üretiminin, enerji kaynakları bazında paylarının aynı periyottaki değişimlerini göstermektedir. Grafiklerden de görülebileceği üzere, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların ülkemizin elektrik üretimindeki payı, toplam elektrik üretiminin büyük bir bölümünü oluşturmakta olup son yıllarda rüzgar ve güneş enerjilerinin toplam üretimdeki payları belirgin bir şekilde artmıştır. Hidroelektrik kaynaklardan elektrik üretiminin toplam üretimdeki payı dağınık bir görünüm sergilese de ortalama olarak bakıldığında 2000-2010 yılları arasında neredeyse sabit kalırken, 2014 yılından itibaren ortalamada hafif bir aşağı yönlü kırılım yaşanmıştır. Biyoenerji ise her ne kadar son yıllarda artış göstermeye başlasa da diğer enerji kaynaklarına göre elektrik üretiminde oldukça düşük seviyelerde kalmış ve kayda değer bir seviyeye gelememiştir. Bu veriler, Türkiye’nin enerji üretiminde

fosil yakıtlara olan bağımlılığının hala önemli düzeyde olduğunu, bunun yanında yenilenebilir enerjiye yönelik artan yatırımların, gelecekteki üretim profilini değiştirebileceğini göstermektedir.

Kömür kaynaklı elektrik üretimi, toplam üretim içindeki dominant payını korumakla beraber, özellikle 2014 yılında keskin şekilde düşüşe geçen doğalgazın oluşturduğu kaynak açığı sebebiyle 2024 yılı itibarıyla %35,55'e yükselmiştir. Rüzgar ve güneş enerjilerinin toplam üretimdeki payı, 2000'lerin başına kıyasla önemli ölçüde artmış ve 2024 yılı itibarıyla rüzgar enerjisinin payı %10,71, güneş enerjisinin ise %7,52 seviyelerine ulaşmıştır. Hidroelektrik enerjisinin payı ise genel süreçte iniş-çıkışlar yaşasa da ortalama seviyesini korumuş ve yaklaşık %21,85 seviyesinde kalmıştır. Biyoenerji üretimi, toplam miktarının düşük olduğu gibi oransal olarak da yine sınırlı bir paya sahip olmuştur.

Şekil 2.4.'de verilmiş olan grafik 2024 yılı itibarı ile Türkiye'deki elektrik üretimindeki toplam kurulu gücün kaynaklara göre dağılımını göstermektedir. Hidroelektrik enerjisi, doğalgaz enerjisi ve kömür enerjisi, önceki yıllarda olduğu gibi 2024 yılında da kurulu gücün oldukça büyük bir kısmını oluşturmakta olup sırasıyla 32,4, 26,9 ve 21 GW'lık paylara sahip olmuşlardır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında, güneş enerjisi 19,9 GW ile büyük bir paya sahipken, rüzgar enerjisinin kurulu gücü 13 GW olmuştur. Biyoenerji ise düşük bir payla 1,95 GW'lık kurulu güç kapasitesine sahiptir. Bu veriler, Türkiye'de 2024 yılında enerji üretiminde geleneksel kaynakların hâlâ önemli bir rol oynadığını, ancak yenilenebilir enerji yatırımlarının giderek arttığını göstermektedir.

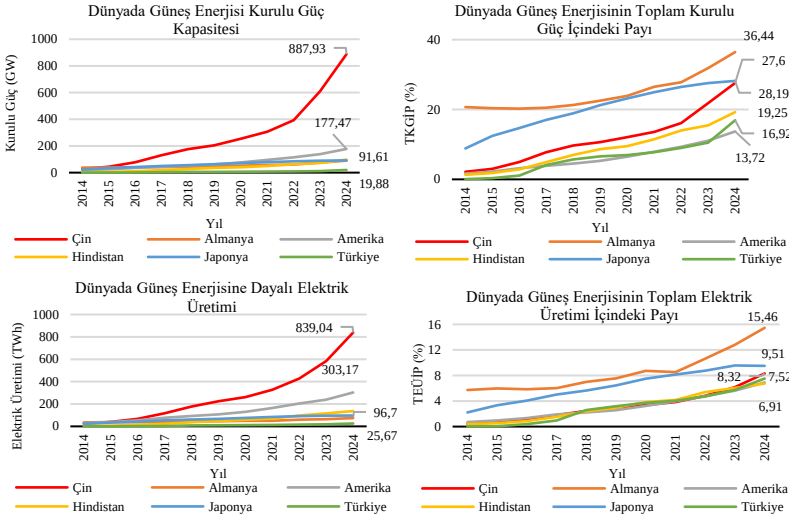
Genel görünümde Türkiye'deki enerji üretiminde kömür ve doğal gazın hâlâ baskın bir yer tuttuğu, ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla arttığı gözlemlenmektedir. Özellikle rüzgar ve güneş enerjisinin üretimdeki payı artarken,

hidroelektrik enerjisi de önemli bir üretim kaynağı olmaya devam etmektedir. Türkiye'nin 2024 yılı itibarıyla kurulu gücünde de yenilenebilir enerji kaynaklarının artan bir şekilde yer aldığı, ancak geleneksel fosil yakıt kaynaklarının hâlâ en büyük paya sahip olduğu söylenebilir. Bu durum, Türkiye'nin enerji geçişinde önemli bir yol kat ettiğini, ancak fosil yakıtlara olan bağımlılığın hala büyük ölçüde devam ettiğini göstermektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kapasitesinin artışı, enerji güvenliği ve bağımsızlığı, çevre dostu üretim ve sürdürülebilir ekonomik kalkınma hedefleri açısından olumlu bir gelişmedir.

3. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE YENİLENEBİLİR ENERJİ DURUMU

Bu bölümde dünyada ve Türkiye'de güncel konjonktürde yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payları, kaynak türlerine göre ayrı ayrı incelenmiştir.

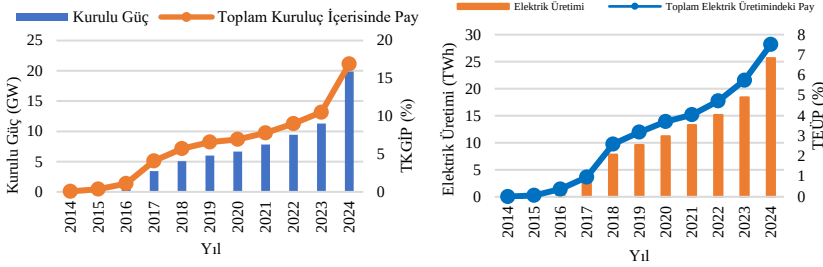
3.1. Güneş Enerjisi



Şekil 3.1. Güneş Enerjisinin Dünyadaki Durumu (Ritchie et al., 2025; Ember, 2025; IRENA, 2025; Özbektaş et al., 2023)

Şekil 3.1.'de verilmiş olan grafiklerin her biri, dünya genelinde güneş enerjisi kullanımındaki farklı parametreleri göstermektedir. 2014-2024 yılları arasındaki küresel güneş enerjisi kurulu güç kapasitesi verileri incelendiğinde, Çin'in güneş enerjisi kurulu güç kapasitesinin süreç içerisinde dramatik bir şekilde arttığı görülmektedir. Çin, söz konusu dönemde güneş enerjisi kurulu güç kapasitesini neredeyse 5 kat artırarak 2024 yılında 887 GW kurulu güç ile dünyadaki en büyük kurulu güneş enerjisi kapasitesine sahip ülke konumuna gelmiştir. Çini 177,47 GW ile Amerika ve yaklaşık 92 GW ile Almanya ve Japonya takip ederken Türkiye'nin güneş enerjisi kapasitesindeki artış oldukça sınırlı seviyede kalmıştır. Dünyada ülkelere göre güneş enerjisinin toplam kurulu güçleri içindeki paylarını gösteren grafik incelendiğinde, Almanya'nın bu alandaki en büyük paya sahip ülke olduğu görülmekte olup, 2024 yılı itibarıyla ülkedeki toplam kurulu güneş enerjisi kapasitesinin %36,44'ü güneş enerjisinden elde edilmektedir. Almanya'yı sırasıyla %28,19 ile Japonya ve %27,6 ile Çin takip ederken Türkiye özelinde güneş enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki payının %16,92 seviyelerinde kaldığı görülmektedir. Dünyada güneş enerjisine dayalı elektrik üretimi verileri incelendiğinde küresel bazda güneş enerjisinden elde edilen elektrik miktarının yıllar içinde artış gösterdiği görülebilmektedir. Çin, yıllar içinde artan kurulu güç kapasitesi sebebiyle burada da 2024 yılı için 839,04 TWh ile en büyük paya sahip ülke olarak öne çıkmaktadır. Çin'i 303,17 TWh ile Amerika takip ederken diğer ülkeler 100 TWh seviyelerinde kalmıştır. Türkiye'nin ise yine diğer ülkelerden düşük seviyelerde kaldığı görülebilmektedir. Dünyada güneş enerjisinin ülkelerin toplam elektrik üretimi içindeki paylarını gösteren grafik incelendiğinde; Almanya, güneş enerjisinin elektrik üretimindeki payını artıran başlıca ülke olarak dikkat çekmektedir. 2024 yılı itibarıyla Almanya'da güneş enerjisinin toplam elektrik üretimi içerisindeki payı %15,46 olarak gerçekleşmiştir. Almanya'yı sırasıyla %9,51 ile Japonya ve

%8,32 ile Çin takip ederken Türkiye %7,52 ile Çin'in hemen arkasında yer almaktadır. Genel olarak, dünya genelinde güneş enerjisi kullanımında Çin'in liderliği belirgindir ve diğer ülkelerle arasındaki fark giderek artmaktadır. Türkiye'nin güneş enerjisi kapasitesi ve üretimi ise nispeten düşük kalmaktadır, bu da ülkenin bu alandaki yatırımlarını artırması gerektiğine işaret etmektedir.

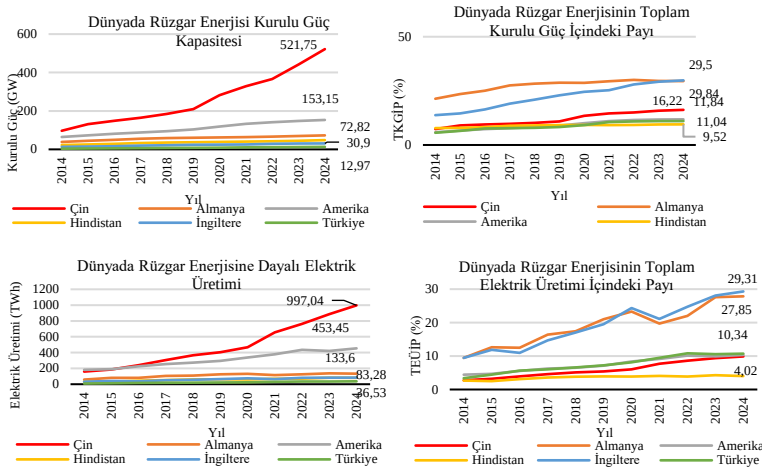


Şekil 3.2. Güneş Enerjisinin Türkiye'deki Durumu (Ritchie et al., 2025; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025; IRENA, 2025)

Şekil 3.2.'de verilen Türkiye'deki kurulu güç grafiği incelendiğinde 2014-2024 yılları arasında Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu gücünün belirgin bir artış gösterdiği görülmektedir. 2014 yılı itibarıyla 1-2 GW seviyelerinde olan kurulu güç, 2024 yılı itibarıyla yaklaşık 20 GW değerlerine ulaşmıştır. Bu artış, Türkiye'nin güneş enerjisi altyapısına yönelik artan yatırımlarını ve bu alanda sağlanan kapasite büyümesinin bir tezahürüdür. Türkiye'nin toplam kurulu enerji kapasitesindeki güneş enerjisinin payı da kurulu güçteki artışa paralel şekilde artmıştır. 2014 yılında güneş enerjisinin kurulu gücün içindeki payı %3 civarlarında iken, 2024 yılında bu oran %16'ya kadar yükselmiştir. Bu artış, Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikalarına verdiği önemin ve güneş enerjisine yönelik yapılan yatırımların somut bir göstergesidir. Dolayısıyla, güneş enerjisinin toplam kurulu kapasitedeki payının artması, ülkenin enerji stratejisinde yenilenebilir kaynakların daha fazla yer edinmeye başladığını ortaya koymaktadır. Türkiye'de güneş

enerjisinden üretilen elektrik miktarı da 2014 ile 2024 yılları arasında önemli bir artış sergilemiştir. 2014 yılında güneş enerjisinden elde edilen elektrik üretimi yaklaşık 1 TWh iken, 2024 yılı itibarıyla bu miktar 7-8 TWh seviyelerine ulaşmıştır. Bu, güneş enerjisi santrallerinin kapasitesindeki artışa ve bu alandaki verimliliğin yükselmesine paralel bir gelişme göstermektedir. Türkiye'nin güneş enerjisinden sağladığı elektrik üretimi, toplam elektrik üretimi içerisinde giderek daha önemli bir paya sahip olmaktadır. Güneş enerjisinin Türkiye'nin toplam elektrik üretimindeki payı da gözle görülür bir artış göstermiştir. 2014 yılında bu oran yaklaşık %1 seviyelerinde iken, 2024 yılı itibarıyla %7 seviyelerine çıkmıştır. Bu artış; güneş enerjisinin toplam üretimdeki payı her ne kadar hala beklenenin altında olsa da Türkiye'nin enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların giderek daha fazla rol oynamaya başladığını ve güneş enerjisinin toplam elektrik üretimindeki etkinliğinin arttığını göstermektedir. Ayrıca bu durum, Türkiye'nin enerji güvenliği ve sürdürülebilir enerji hedefleri açısından önemli bir gelişme olarak değerlendirilebilir.

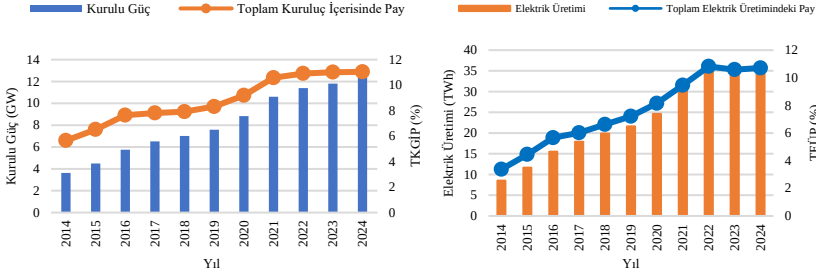
3.2. Rüzgar Enerjisi



Şekil 3.3. Rüzgar Enerjisinin Dünyadaki Durumu (Ritchie et al., 2025; Ember, 2025; IRENA, 2025; Özbektaş et al., 2023)

Dünya genelinde rüzgar enerjisinin mevcut durumunu gösteren grafikler Şekil 3.3’de verilmiştir. Toplam kurulu gücü gösteren grafik incelendiğinde; Çinin, güneş enerjisinde olduğu gibi rüzgar enerjisinde de dünya genelindeki kurulu güç kapasitesinde uzak ara lider olduğu gözlemlenmektedir. Çin’in kapasitesi 2024 yılı itibarı ile yaklaşık olarak 521,75 GW olarak gerçekleşmiştir. Almanya, Amerika, Hindistan, İngiltere ve Türkiye gibi ülkeler Çin’i takip etmekle birlikte bu kapasitenin oldukça altında kalmıştır. Özellikle Amerika’nın ve Almanya’nın kurulu rüzgar enerjisi güç kapasitesinde istikrarlı bir artış gözlenirse de bu ülkeler toplam kurulu güç olarak hala Çin’in çok gerisindedir. Rüzgar enerjisinin ülkelere göre toplam kurulu güç içerisindeki paylarını gösteren grafik, İngiltere’nin ve Almanya’nın yaklaşık %30’luk pay ile bu alanda öne çıktığını göstermektedir. Çin’in en yüksek kurulu güce sahip olmasına rağmen kurulu gücün toplam güce oranında Almanya’nın ve İngiltere’nin bu denli geride kalması, Çin’in sahip olduğu yüksek enerji ihtiyacına binaen sahip olduğu yenilenemez enerji santrallerinin fazlalığından ileri gelmektedir. Rüzgar enerjisinden toplam elektrik üretimini gösteren grafiğe bakıldığında, Çin’in bu alanda da başı çektiği görülmektedir. 2024 yılı itibarıyla Çin, rüzgar enerjisinden 997,04 TWh’lik üretim gerçekleştirdiği, diğer ülkelerin ise kurulu güçler arasındaki fark ile paralel olarak bu üretimin çok daha düşük seviyelerinde kaldığı ancak Almanya ve Amerika’nın rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde belirgin bir artış görüldüğü gözlenmektedir. Rüzgar enerjisinden elde edilen elektriğin toplam elektrik üretimi içerisindeki payı gösteren grafik de kurulu güç payı grafiğinde olduğu gibi Almanya’nın ve İngiltere’nin bu alandaki kararlılığını göstermektedir. 2024 yılı itibarı ile toplam elektrik üretiminde rüzgar enerjisinin payının her iki ülke için de yaklaşık olarak %30 seviyelerinde gerçekleştiği ve bu payın her geçen yıl daha da arttığı fark edilmektedir. Türkiye’de ise bu payın sürekli artış göstermesine rağmen oldukça düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Şekil

3.4.'de Türkiye'nin rüzgar enerjisindeki durumunun yıllara göre değişimini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden görülebileceği üzere, Türkiye'de rüzgar enerjisinin kurulu gücü 2014'den 2024'e kadar sürekli bir artış göstermiştir. 2024 yılı itibarıyla Türkiye'nin kurulu rüzgar enerjisi gücünün 14 GW civarında olduğu görülmektedir.



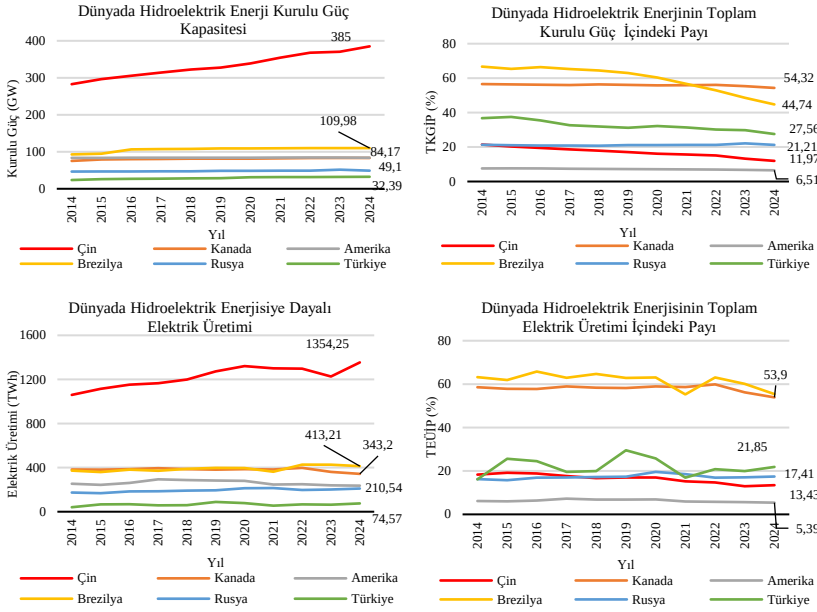
Şekil 3.4. Rüzgar Enerjisinin Türkiye'deki Durumu (Ritchie et al., 2025; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025; IRENA, 2025)

Ayrıca, aynı dönem içerisinde rüzgar enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki payı da artış göstermekle birlikte 2024 yılı itibarıyla toplam kurulu güç içindeki pay yaklaşık olarak %12'ye ulaşmıştır. Türkiye'nin rüzgar enerjisinden elde ettiği elektrik üretimi de kurulu güce paralel olarak artış göstermektedir. 2024 yılı itibarıyla yıllık rüzgar enerjisiyle üretilen elektrik miktarı yaklaşık 25 TWh'ye ulaşmıştır. Bu değer, toplam elektrik üretiminin yaklaşık olarak %10'una tekabül etmektedir. Genel olarak, Türkiye'nin rüzgar enerjisi kapasitesinin ve üretiminin arttığı ve bu sektöre yönelik yatırımların devam etmesiyle birlikte Türkiye'nin gelecek yıllarda rüzgar enerjisi alanındaki payını artırmaya devam edeceği değerlendirilmektedir.

3.3. Hidroelektrik Enerji

Dünya genelinde hidroelektrik enerjinin yakın tarihlerdeki durumunu gösteren grafikler Şekil 3.5.'de verilmiştir. Dünyada genelindeki hidroelektrik enerji kurulu güç kapasitesinin alanda önde gelen ülkelere göre tarihsel durumunu

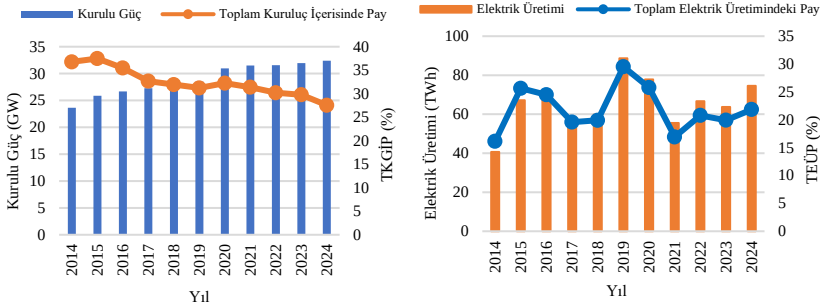
gösteren grafik incelendiğinde Çin, 2024 yılı itibarıyla yaklaşık 385 GW ile dünya genelinde en yüksek kurulu güç kapasitesine sahip ülke olarak öne çıkmaktadır. Çin'i takip eden Kanada (109,98 GW) ve Amerika (84,17 GW) gibi ülkeler ile kıyaslandığında Çin'in kurulu güç kapasitesi ile aralarındaki fark oldukça belirgindir. Türkiye ise kurulu güç bakımından diğer ülkelerin gerisinde kalmış ve 2024 yılı itibarı ile yaklaşık olarak 32 GW kurulu güce sahip olmuştur.



Şekil 3.5. Hidroelektrik Enerjinin Dünyadaki Durumu (Ritchie et al., 2025; Ember, 2025; IRENA, 2025; Özbektaş et al., 2023)

Dünyada ülkelere göre hidroelektrik enerjisine dayalı elektrik üretimini gösteren grafik, Çin'in 2024 yılı itibarıyla 1354,25 TWh elektrik üretimiyle yine lider konumunda olduğunu göstermektedir. Kanada ise 413,21 TWh elektrik üretimi ile ikinci sırada yer almaktadır. Türkiye ise 2024 yılı için 74,57 TWh elektrik üretimi ile kıyas edilen ülkeler arasında son sırada yer almaktadır. Hidroelektrik enerjisinin ülkelerin toplam kurulu güçleri içerisindeki paylarına bakıldığında 2020 senesine kadar

lider konumda olan Brezilya'nın 2020 sonrasında liderliği Kanada'ya bıraktığı görülmektedir. Kanada'da hidroelektrik enerji kurulu gücünün toplam kurulu güç içerisindeki payı 2024 yılı için %54,32 olurken, Kanada'yı sırasıyla %44,74 ile Brezilya ve %27,56 ile Türkiye takip etmektedir. Aynı şekilde hidroelektrik enerjisinin ülkelerin toplam elektrik üretimleri içerisindeki paylarını gösteren grafik incelendiğinde de 2024 senesi için Kanada ve Brezilya'nın yaklaşık %55 ile önde geldiği, Türkiye'nin ise bu iki ülkenin ardından %21,85 ile üçüncü sırada geldiği görülmektedir.

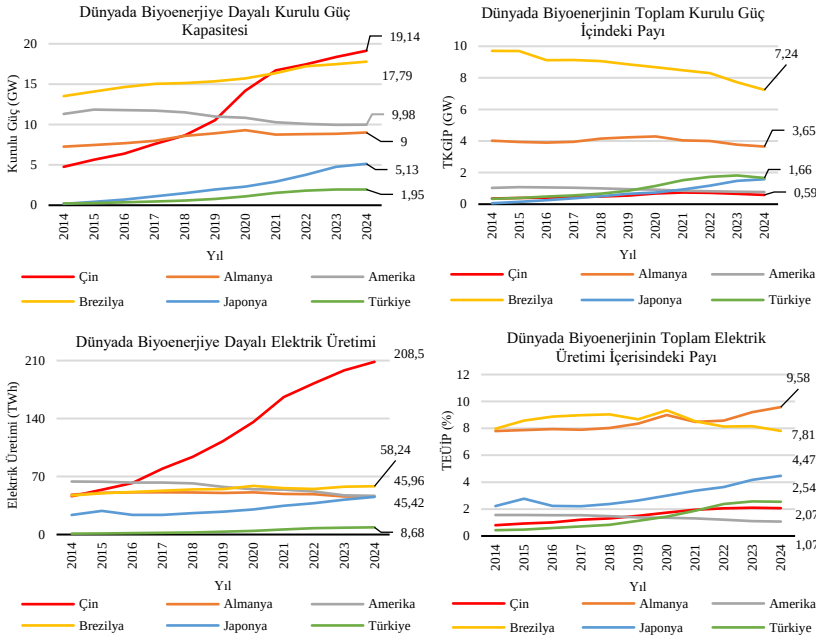


Şekil 3.6. Hidroelektrik Enerjinin Türkiye'deki Durumu (Ritchie et al., 2025; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025; IRENA, 2025)

Şekil 3.6.'da verilmiş olan grafik incelendiğinde, Türkiye'nin hidroelektrik kurulu gücünün 2014 yılından itibaren istikrarlı bir artış gösterdiği ve 2024 yılı itibarıyla 30 GW seviyesinin üzerine çıktığı görülmektedir. Ancak toplam kurulu güç içerisindeki payın özellikle 2015 yılından sonra düşüş eğilimine girdiği ve 2024 yılında %25 bandına yaklaştığı gözlemlenmektedir. Bu veriler, hidroelektrik yatırımları devam etse de, ulusal enerji portföyüne eklenen diğer enerji kaynaklarının büyüme hızının hidroelektrikten daha yüksek olduğunu ve hidroelektriğin payının oransal olarak azaldığını göstermektedir. Toplam elektrik üretimi verileri, kurulu güçteki bahsedilen kararlı artışın aksine değişken bir görünüm

sergilemiştir. Elektrik üretimi ile toplam üretimdeki pay arasında tam bir korelasyon mevcuttur. Örneğin, 2019 yılında üretim zirve yaparak toplam payı %30 seviyelerine taşırken, 2021 yılında belirgin bir düşüş yaşanmıştır. Bu durumun sebebi hidroelektrik santrallerin üretim performansının, kurulu kapasiteden ziyade hidrolojik koşullara doğrudan bağlılığından kaynaklanmasıdır. Teoride üretim kapasitesi artsa dahi, kurak geçen yıllarda verimlilik ve toplam üretimdeki pay düşebilmektedir.

3.4. Biyoenerji

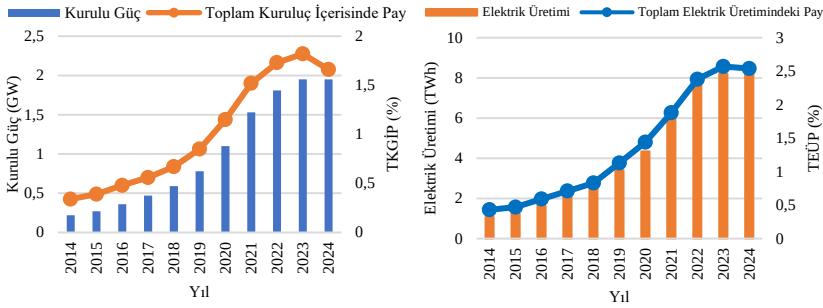


Şekil 3.7. Biyoenerjinin Dünyadaki Durumu (Ritchie et al., 2025; Ember, 2025; IRENA, 2025; Özbektaş et al., 2023)

Sekil 3.7’de verilmiş olan grafikler, dünya genelinde ülkelere göre elektrik üretiminde biyoenerji kullanımının yakın tarihteki durumlarını göstermektedir. Biyoenerjiye dayalı toplam kurulu güç kapasitelerini gösteren grafik incelendiğinde Çin’in, özellikle 2019 yılından sonra bu alanda yükselişe geçtiği ve 2024 yılı itibarı ile 19,14 GW ile diğer ülkeleri geride bıraktığı

görülmektedir. Çin'i, 17,79 GW kurulu güç ile önemli biyoenerji politikalarıyla tanınan Brezilya takip ederken Türkiye'nin kurulu gücü ise 2024'te 1,95 GW olarak görülmektedir. Biyoenerjinin ülkelerin toplam kurulu güçleri içindeki paylarını gösteren grafik, Brezilya'nın, 2024 yılı için %7,24 ile en yüksek orana sahip ülke olduğunu göstermektedir. Brezilya'yı takip eden Almanya ise %3,65 pay ile 2. sırada yer almakta olup, Türkiye'nin payı ise %1,66 ile oldukça düşük seviyede kalmıştır. Bu durum, biyoenerjinin Türkiye özelinde daha sınırlı bir yer tuttuğunu göstermektedir. Biyoenerjiye dayalı toplam elektrik üretimi grafiğinde yer alan veriler, Çin'in yüksek kurulu gücü hasebiyle toplam elektrik üretiminde de lider konumda olduğunu ortaya koymaktadır. 2024 yılı itibarıyla Çin, biyoenerjiye dayalı elektrik üretiminde 208,5 TWh ile 2. sırada yer alan ve 2024 yılı için 58,24 TWh üretime ulaşmış olan Brezilya'nın uzak ara önündedir. Türkiye'nin biyoenerjiden elektrik üretimi ise 2024'te 8,68 TWh olarak gerçekleşmiş ve kıyas edilen ülkelere göre oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Biyoenerjinin ülkelerin toplam elektrik üretimleri içerisindeki payını gösteren grafik incelendiğinde; toplam kurulu güç olarak Çin ve Brezilya gibi ülkelere göre daha mütevazı seviyelerde olan Almanya'nın, 2024 yılı için %9,58 pay ile en önemli paya sahip ülke olduğu görülmektedir. Almanya'yı %7,81 pay ile Brezilya takip ederken, biyoenerji özelinde en yüksek kurulu güce ve en yüksek elektrik üretimine sahip olan Çin, oldukça yüksek enerji ihtiyacı ve bu ihtiyaca binaen yöneldiği farklı enerji kaynakları sebebiyle biyoenerjinin toplam elektrik üretimi içerisindeki payında 2024 yılı için %2,07 ile kıyas edilen ülkeler arasında son sıralarda yer almıştır. Genel olarak dünya genelinde Çin kapasite büyüklüğü, Almanya ise sisteme entegrasyon başarısı ile öne çıkarken Türkiye biyoenerji alanında da global trendi geriden takip etmektedir.

Şekil 3.8.'de Biyoenerjinin Türkiye'deki durumunu gösteren grafikler verilmiştir. Türkiye'de biyoenerjiye dayalı kurulu güç 2014-2024 yılları arasında önemli bir artış göstermiş ve 2024'te toplam kurulu güç 2,5 GW seviyelerine ulaşmıştır. Aynı dönemde biyoenerjiye dayalı gücün, Türkiye'nin toplam kurulu gücün içindeki payının da paralel olarak arttığı fakat 2024 yılında toplam kurulu güçte farklı kaynakların payının artmasıyla bir önceki yıla göre toplam güçteki payda bir miktar düşüş yaşandığı görülmektedir.



Şekil 3.8. Biyoenerjinin Türkiye'deki Durumu (Ritchie et al., 2025; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025; IRENA, 2025)

Biyoenerji kurulu gücünün toplan güç içerisindeki payında istikrarlı şekilde yaşanan bu artış, biyoenerji kaynaklarının Türkiye'deki enerji portföyünde giderek daha önemli bir yer edindiğini göstermektedir. Türkiye'nin biyoenerjiye dayalı elektrik üretimi de, 2014-2024 döneminde belirgin bir şekilde artış göstermiştir. Elektrik üretimi 2024'te 10 TWh seviyelerine ulaşmış olup, biyoenerjinin Türkiye'nin toplam elektrik üretimi içindeki payı %2,5 civarına gelmiştir. Bu, biyoenerjinin Türkiye'de enerji üretiminde daha fazla katkı sağlamaya başladığını ve gelecekteki potansiyelinin arttığını göstermektedir.

Genel olarak, bu veriler biyoenerjinin dünya çapında hızla gelişen ve büyük kapasitelere ulaşma potansiyeli olan bir sektör

olduğunu ancak Türkiye'nin bu alanda henüz diğer ülkelerle yarışabilecek bir konumda olmadığını göstermektedir. Bu durum, biyoenerjiden faydalanma oranlarının artırılmasına yönelik daha fazla yatırım ve politika desteği gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada; 21. yüzyılda küresel politikalardaki doğrudan veya dolaylı yoldan en önemli gündem belirleyici hususlardan biri olan enerji dönüşümü, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik, enerji bağımsızlığı ve ekonomik kalkınma perspektifleriyle ve güncel üretim verileriyle ele alınmıştır. Fosil yakıtların çıkartım, işlenme ve tüketim aşamalarının her birinin neden olduğu çevresel kirlilik ve jeopolitik riskler, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi bir tercih olmaktan çıkarıp küresel bir zorunluluk haline getirmiştir(Adma & Hanita, 2025; Zakeri et al., 2022). Çalışma kapsamında incelenen 21. Yüzyılın ilk çeyreğine ait veriler, enerji üretiminde konvansiyonel paradigmanın değiştiğini ve bu değişimin dinamiklerini somut göstergelerle ortaya koymaktadır.

Küresel ölçekte yapılan analizler, kömür ve doğal gazın elektrik üretimindeki hakimiyetini korumalarıyla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretim içerisindeki payının, özellikle son on yılda ivmelenen bir artış trendine girdiğini göstermektedir. Çin'in güneş, rüzgar ve hidroelektrik alanındaki agresif kapasite artışı ile hacimsel liderliği elinde tuttuğu, Almanya gibi gelişmiş ekonomilerin ve Brezilya gibi ekonomik ve politik açıdan konvansiyonel kaynaklara erişim konusunda tehditler altındaki ülkelerin ise toplam üretim içindeki yüksek payları ile sisteme entegrasyon ve verimlilik noktasında öncü oldukları görülmüştür. Bu durum, enerji geçişinin sadece bir kapasite kurulumu değil, aynı zamanda stratejik bir altyapı dönüşümü olduğunu kanıtlamaktadır.

Türkiye özelinde gerçekleştirilen incelemeler ise, ülkenin yenilenebilir enerji kurulu gücünde istikrarlı bir büyüme trendi yakaladığını, ancak fosil yakıtlara olan bağımlılığın halen devam ettiğini ortaya koymaktadır. Hidroelektrik santraller, Türkiye'nin yenilenebilir enerji portföyünün omurgasını oluşturmaya devam etse de, üretim verilerindeki dalgalanmalar bu kaynağın iklimsel koşullara ve hidrolojik risklere karşı hassasiyetini teyit etmektedir. Buna karşılık, rüzgar ve güneş enerjisi yatırımlarının artışı, enerji arz güvenliğinin çeşitlendirilmesi adına umut verici olsa da, küresel rakiplerle kıyaslandığında Türkiye'nin potansiyelinin henüz tam anlamıyla değerlendirilemediği anlaşılmaktadır. Biyoenerji ise gelişime açık bir alan olarak, henüz marjinal bir paya sahiptir.

Nihai olarak; teknolojik gelişmelerin maliyetleri düşürmesi ve uluslararası konjonktürün dayattığı enerji bağımsızlığı ihtiyacı, yenilenebilir enerji yatırımlarını finansal açıdan daha cazip hale getirmiştir. Türkiye'nin enerji projeksiyonlarında, kurulduğu bölgenin doğal florasını etkileyebilen ve enerji üretim miktarı açısından stokastik yapıdaki hidroelektrik santraller ile enerji üretimi yerine, daha öngörülebilir ve tamamlayıcı nitelikteki güneş, rüzgar ve biyoenerji yatırımlarına ağırlık vermesi elzemdir. Sürdürülebilir bir ekonomik kalkınma, enerji bağımsızlığı ve temiz enerji hedeflerine ulaşılabilmesi, mevcut potansiyelin öngörülen politikalarla hayata geçirilmesine ve yerli teknoloji üretiminin desteklenmesine bağlıdır.

KAYNAKÇA

- Adma, A., & Hanita, M. (2025). Geopolitics Tension, Wars and Its Impact on Energy/Oil Crisis: Russia – Ukraine War Case Study. *Interdisciplinary Journal and Hummanity (INJURITY)*, 4(5), 187–205. <https://doi.org/10.58631/INJURITY.V4I5.1434>
- Bashir, M. F., Shahbaz, M., Ma, B., & Alam, K. (2024). Evaluating the roles of energy innovation, fossil fuel costs and environmental compliance towards energy transition in advanced industrial economies. *Journal of Environmental Management*, 351, 119709. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.119709>
- Candra, O., Chammam, A., Alvarez, J. R. N., Muda, I., & Aybar, H. (2023). The Impact of Renewable Energy Sources on the Sustainable Development of the Economy and Greenhouse Gas Emissions. *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 2104*, 15(3), 2104. <https://doi.org/10.3390/SU15032104>
- Ember. (2025). Electricity Data Explorer: Global electricity generation by source. Retrieved September 15, 2025, from <https://ember-energy.org/data/electricity-data-explorer/>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025). Enerji – Bilgi Merkezi. Retrieved September 15, 2025, from <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji>
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38–50. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2019.01.006>
- Hille, E. (2023). Europe’s energy crisis: Are geopolitical risks in source countries of fossil fuels accelerating the transition to renewable energy? *Energy Economics*, 127, 107061. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2023.107061>
- IRENA (2025). Renewable Energy Statistics. Retrieved September 15, 2025, from <https://www.irena.org/>

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_D
AT_RE_Statistics_2025.pdf#page=39.04

- Neuhoff, K., May, N., & Richstein, J. C. (2022). Financing renewables in the age of falling technology costs. *Resource and Energy Economics*, 70, 101330. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2022.101330>
- Okunevičiūtė Neverauskienė, L., Dirma, V., Tvaronavičienė, M., & Danilevičienė, I. (2025). Assessing the Role of Renewable Energy in the Sustainable Economic Growth of the European Union. *Energies* 2025, Vol. 18, Page 760, 18(4), 760. <https://doi.org/10.3390/EN18040760>
- Osman, A. I., Chen, L., Yang, M., Msigwa, G., Farghali, M., Fawzy, S., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2023). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 741–764. <https://doi.org/10.1007/S10311-022-01532-8/METRICS>
- Özbektaş, S., Şenel, M. C., & Sungur, B. (2023). Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri. *Mühendis ve Makina*, 64(711), 317-351. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1221817>
- Ritchie, H., Roser, M., ve Rosado, P. (2025). Energy. Our World in Data. Retrieved September 15, 2025, from <https://ourworldindata.org/energy>
- Sart, G., Bayar, Y., & Danilina, M. (2025). The Effect of Economic Freedom, Indicators of Financial Sector Development, Income and Education on Renewable Energy Use: An Empirical Analysis of Post-Transition EU Member States. *Energies* 2025, Vol. 18, Page 1179, 18(5), 1179. <https://doi.org/10.3390/EN18051179>

Zakeri, B., Paulavets, K., Barreto-Gomez, L., Echeverri, L. G., Pachauri, S., Boza-Kiss, B., Zimm, C., Rogelj, J., Creutzig, F., Ürges-Vorsatz, D., Victor, D. G., Bazilian, M. D., Fritz, S., Gielen, D., McCollum, D. L., Srivastava, L., Hunt, J. D., & Pouya, S. (2022). Pandemic, War, and Global Energy Transitions. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 6114, 15(17), 6114. <https://doi.org/10.3390/EN15176114>

INVESTIGATION OF MARANGONI CONVECTION DEPENDING ON GRAVITY CONDITIONS AT DIFFERENT VISCOSITIES

Ela KATI SUNAY¹

1. INTRODUCTION

Marangoni convection movements, occurring due to the effect of surface tension, are one of the fundamental mechanisms determining heat and mass transfer, particularly in micro-scale systems and environments where gravity is minimal. They play a significant role in many critical applications such as semiconductor crystal production, microfluidic technologies, biomedical devices, and aerospace engineering.

Marangoni convection initiates with a surface movement from a hot region to a cold region resulting from the change in viscosity depending on the temperature difference on the free surface of the fluid. This surface movement leads to the development of circulation within the fluid volume, distinctly shaping the flow structure. However, this flow structure is influenced by many parameters such as the viscosity of the fluid, temperature gradient, ambient conditions, and boundary conditions. In this context, numerical and experimental studies have generally focused on fluids with constant viscosity. However, the viscosity values of fluids used in industrial applications vary. This situation is important in terms of system design and performance. Therefore, the comparative

¹ Asst. Prof. Dr.Ela KATI SUNAY, Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, ORCID: 0000-0002-4135-5241.

investigation of the behaviors of fluids with different viscosities under Marangoni convection is of great importance for both theoretical knowledge accumulation and the performance of industrial applications.

Under normal gravity conditions, Marangoni convection always occurs in conjunction with natural convection. Natural convection, caused by density changes dependent on temperature differences, can in most cases suppress Marangoni convection flows, alter their direction, or reduce the stability of the flow. For this reason, numerical and experimental studies conducted under microgravity conditions, where the effect of natural convection is largely reduced or completely eliminated, are of great importance. They allow for the examination of Marangoni convection flows in a more distinct, stable, and pure state, thereby providing a better understanding of the fundamental physical behaviors of Marangoni convection.

Literature studies examining convection mechanisms emerging under the effect of surface tension and the effects of these processes on semiconductor crystal growth offer a significant foundation for understanding the theoretical bases of the subject. Ostrach (1977; 1979; 1982) is one of the pioneering researchers examining steady surface-tension-driven flow movements. In his studies, he addressed flow fields originating from surface tension under different physical conditions using analytical methods. Focusing on cases where temperature and viscosity gradients are effective together, Ostrach developed important dimensionless parameters that can be used to define such flow fields. He expressed the importance of space studies by examining surface-tension-driven flow movements in environments with low gravity. Furthermore, by emphasizing that these parameters should be taken into account in related studies, he presented a methodological basis for subsequent research.

Preisser et al. (1983) examined the conditions under which oscillatory surface tension movements occur using different parameters and defined the point where the fluid moving under the effect of surface tension transitions from steady flow to periodic oscillatory flow as the "critical Marangoni number." However, Kamotani et al. (1992; 1995), in their experimental studies, showed that the critical Marangoni number alone was not sufficient to explain the flow. They revealed that there is an additional factor determining the flow, which could be the shape deformations occurring on the free surface of the fluid during flow.

In a numerical study conducted by Zeng et al. (1999), it was revealed that the aspect ratio in a half-floating zone configuration using silicone oil as the fluid affected the radial frequency of the oscillation. Lai (2004) examined the oscillatory surface-tension-driven convection movements of a fluid with a high Prandtl number using an open boat configuration and showed that the dimensionless parameters in the continuity, Navier–Stokes, and energy equations in fluid mechanics each affect the flow separately.

Selver et al. (2013) examined the steady surface tension movements and natural convection movements of silicone oil with a viscosity of 5 cSt under normal and low gravity conditions in an open boat configuration. As a result of the study, the flow characteristics of the fluid under normal and low gravity were numerically demonstrated, and it was determined that these differences emphasized the importance of the buoyancy effect.

Karabıyık (2015) comparatively examined the movements originating from surface tension and natural convection of water and silicone oil fluids in an open boat configuration under the normal gravity vector using numerical methods. Within this scope, streamlines, isotherms, and velocity

vectors were evaluated for different aspect ratios. As a result of the research, it was determined that single-cell circulation occurred for both fluids at large aspect ratios; whereas, in cases where the aspect ratio was small, water developed a multi-cellular circulation structure.

Mielniczuk et al. (2018) examined capillary interactions in the floating zone configuration using an analytical model. In the study, it was determined that the effect of gravity caused a loss of symmetry in the configuration, leading to negative results. To prevent this deformation, additional tests were carried out under micro-gravity conditions, and better results were obtained compared to experiments under normal gravity.

Mendis et al. (2021) examined the surface tension convection movements of Si-Ge fluid in three dimensions under different aspect ratios and zero gravity conditions in a half-floating zone configuration where the cold surface was at the top and the hot surface was at the bottom. The study showed that the aspect ratio significantly affected flow behaviors.

Sequeira et al. (2022) analyzed the flow field using various modern image-based velocity measurement techniques using video data from NASA's STDC-1 experiments. The obtained experimental findings were compared with numerical simulation results. With this study, high-resolution and reliable information regarding temperature-induced Marangoni flows under low gravity conditions was obtained.

Wang et al. (2025) numerically examined surface-tension-driven flows occurring under micro-gravity conditions within a semi-elliptical container. In this study, investigating the effect of surface geometry (especially the ellipticity ratio) on thermocapillary forces, the effect of surface shape on symmetry and its capacity to direct liquid motion were analyzed.

In the study we have conducted, the open boat configuration, a method used in the investigation of Marangoni convection movements, was modeled in two dimensions, and numerical analyses were performed via the ANSYS Fluent program. To reveal the effects of viscosity on the speed, stability, and structural arrangement of the flow, silicone oil at three different viscosities was used as the fluid. Numerical analyses were carried out under both normal and micro-gravity conditions to evaluate the natural convection effects within Marangoni convection movements.

2. MATERIALS AND METHODS

The open boat configuration we modeled consists of a square prism-shaped container where one of the opposing long vertical walls is heated, the other is cooled, and the short vertical walls and the base are insulated (Figure 1).

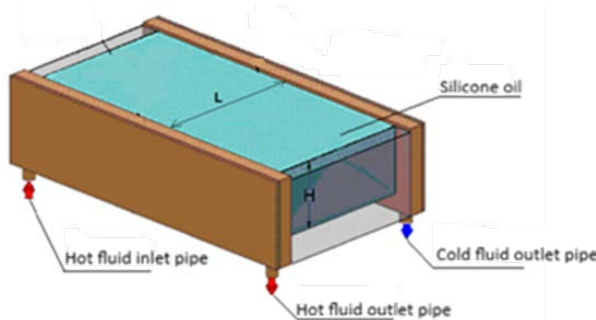


Figure 1. Schematic representation of the open boat configuration (Selver et al., 2019)

When Figure 1 is examined, it is seen that one of the two long vertical walls on the sides serves as a cooler and the other as a heater. Thus, the silicone oil is heated by one of the side long vertical surfaces and cooled by the other. The viscosity of the fluid in the cooled region increases compared to the viscosity of

the fluid in the heated region. This situation causes a viscosity difference to form on the liquid free surface, thus giving rise to Marangoni convection (surface-tension-driven convection) movement. To examine this situation numerically, first; the 2-dimensional geometric model of the open boat configuration seen in Figure 1 and the silicone oil within it was created using the ANSYS Fluent program. The geometric model used in our numerical analyses and the mesh structure belonging to this model are given in Figure 2.

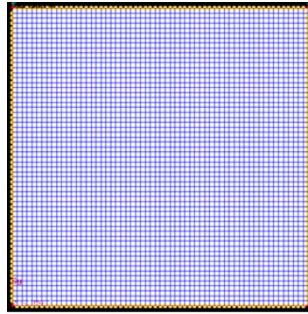


Figure 2. Geometric model and mesh structure of the open boat configuration

In the square-shaped geometric model seen in Figure 2; the left vertical line constitutes the heater wall, the right vertical line the cooler wall, the top horizontal line the silicone oil free surface, and the bottom horizontal line the container base. In our geometric model, the aspect ratio is $Ar = 1$ ($Ar = H/L$, where H =Silicone oil height, L =distance from the heater wall to the cooler wall).

In order to examine the effects of viscosity on the speed, stability, and structural arrangement of the flow in the open boat configuration we modeled, numerical analyses were performed using the physical properties (Masud J., 1997) of silicone oils having viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt.

In the numerical analyses, to ensure the fluid remains in steady Marangoni convection movement, the heater wall temperature was kept constant at $T_H = 298 \text{ K}$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) and the cooler wall temperature at $T_C = 288 \text{ K}$ ($15 \text{ }^\circ\text{C}$). For the aspect ratio to be $Ar = H/L = 1$, the dimensions of the geometric model were determined as $H = 0.01 \text{ m}$ and $L = 0.01 \text{ m}$. Since the force creating Marangoni convection is effective along the free surface of the liquid from the heater surface to the cooler surface, this region constitutes a highly sensitive area in numerical analysis. Therefore, care was taken regarding the mesh structure and quality created for analysis in the geometric model. The flow type of the fluid was accepted as laminar, and analyses were carried out using the SIMPLER algorithm. In the analysis process, it was assumed that the fluid free surface in the geometric model is completely flat and horizontal; there is no heat transfer between the free surface and the external environment (adiabatic condition), and there is no heat exchange via radiation between the walls of the two-dimensional geometric model and the environment. Keeping all these specified criteria constant, a total of 6 numerical analyses were performed for three different silicone oils with viscosities of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt under normal gravity (9.81 m/s^2) and micro-gravity ($1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$) conditions.

3. RESULTS

In this study we conducted, three different silicone oils with viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt were used as the numerical analysis fluid, and Marangoni convection movements were ensured to remain in a steady state by keeping the heater wall temperature at $T_H = 298 \text{ K}$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) and the cooler wall temperature at $T_C = 288 \text{ K}$ ($15 \text{ }^\circ\text{C}$) in the geometric model. Numerical analyses were performed for each of the three different

silicone oil fluids at both normal gravity vector values and micro-gravity vector values.

In Marangoni convection, temperature change occurs in two ways: surface flow and gravity-driven flow. In almost all fluids, surface tension decreases as temperature increases. The temperature difference formed on the liquid free surface causes a flow to occur from the hot surface towards the cold surface. Figure 3 shows the streamlines of silicone oils at viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt performing Marangoni convection movement within the open boat configuration under normal gravity conditions. In our geometric model, the left vertical edge is modeled as the heater wall and the right vertical edge as the cooler wall. In our configuration, fluid particles proceed from the hot region towards the cold region under the effect of surface tension movement.

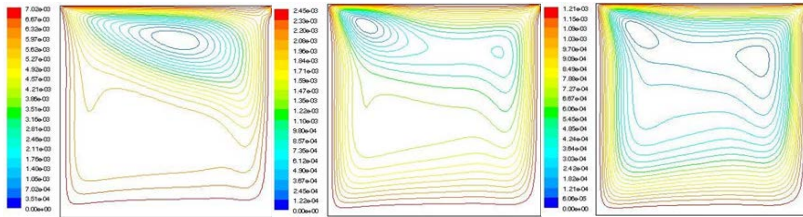


Figure 3. Image of streamlines of silicone oils at 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt viscosity values performing Marangoni convection movement under normal gravity conditions

When Figure 3 is examined, it is seen that there are distinct differences in the streamlines of silicone oils with different viscosity values under the effect of Marangoni convection and natural convection. While a flow cycle with a single vortex cell is seen within the configuration in the numerical analysis where silicone oil with 1 cSt viscosity is used, it is seen that the main vortex cell center approaches the heater wall and additionally a small vortex cell center forms on the side close to the cooler wall in the numerical analysis where silicone oil with 2 cSt viscosity

is used. In the numerical analysis where silicone oil with 5 cSt viscosity is used, a flow cycle formed around 2 vortex cell centers developed on both the cold wall side and the hot wall side is seen.

Under terrestrial conditions (normal gravity conditions), Marangoni convection and natural convection occur together. Experiments using micro-gravity conditions are important to eliminate the effects of natural convection movements on Marangoni convection movements and to observe Marangoni convection more easily. Therefore, the analyses in our study were performed under both normal gravity vector conditions and low gravity vector conditions. Figure 4 shows the streamlines of silicone oils at viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt performing Marangoni convection movement within the open boat configuration under a low gravity vector.

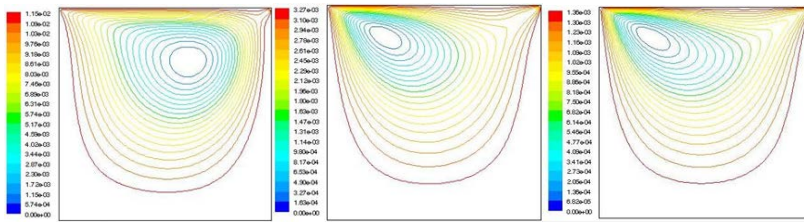


Figure 4. Image of streamlines of silicone oils at 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt viscosity values performing Marangoni convection movement under micro-gravity conditions

When Figure 4 is examined, it is seen that a single vortex cell center forms in all three silicone oils at viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt under the micro-gravity vector. While it is seen that the vortex cell center is lower than the liquid free surface and closer to the cooler wall in the numerical analysis where silicone oil with a 1 cSt viscosity value is used, it is seen that the vortex cell center approaches both the liquid free surface and the heater wall in configurations where silicone oils with 2 cSt and 5 cSt viscosity values are used. If we explain and compare the streamlines in Figure 3 and Figure 4 in detail; Marangoni

convection formed within the open boat under terrestrial conditions (normal gravity) (Figure 3) is also under the effect of natural convection forces. The hot wall temperature (T_H) in the configuration is always higher than the fluid temperature (T_{fluid}) ($T_H > T_{\text{fluid}}$). Therefore, a boundary layer formation occurs within the free surface convection currents limited by the vertical wall. The formed boundary layer is in contact with the hot wall; it develops starting from the base of the hot wall upwards and extends to the point where the wall intersects with the free surface. The fluid density outside the boundary layer is higher than the fluid density in the boundary layer. Therefore, the general movement of the fluid separates from the flow movement in the boundary layer. The fluid located in the boundary layer rises vertically along the hot wall under the effect of buoyancy forces. During this vertical rise, the stagnant fluid within the configuration is volumetrically dragged towards the boundary layer. Thus, the fluid transported to the boundary layer proceeds towards the upper part of the wall by being heated by the hot wall. This movement continues on the free surface extending between the top point of the hot wall and the top point of the cold wall, combining with surface tension effects resulting from viscosity difference. Heat and mass transfer occurring due to surface-tension-driven convection starting on the free surface causes the formation of a vortex cell in the flow field. As long as the temperature difference between the hot and cold walls persists, convection flow continues. Briefly, under terrestrial conditions, a temperature gradient forms from the base of the configuration upwards with the effect of natural convection. Therefore, in all three configurations in Figure 3, the circulation of the convection movement fills the rectangular container. In analyses performed under low gravity conditions (Figure 4), since buoyancy forces lose their effect, the flow is determined solely by surface-tension-driven convection forces. When the results obtained under these conditions are examined, it is seen that the temperatures in the

region where the vortex cells are located are higher than the stagnant region temperatures located below them. Consequently, the fluid density in the stagnant region is greater than the density in the vortex region. This situation reduces the penetration distance of the vortex cells into the fluid.

The temperature distributions within the configuration of silicone oils at viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt performing Marangoni convection movement are given in Figure 5 and Figure 6.

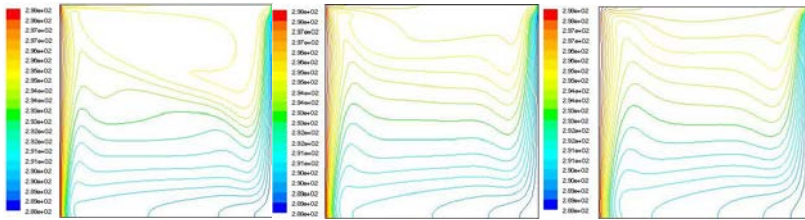


Figure 5. Image of isotherms of silicone oils at 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt viscosity values performing Marangoni convection movement under normal gravity conditions

In Figure 5, the isotherms (equal temperature curves) of silicone oil fluids at viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt performing Marangoni convection movement within the open boat configuration under the normal gravity vector are seen. When the isotherms belonging to silicone oils at different viscosities are examined, it is seen that more irregular isotherm structures form in the fluid with 1 cSt viscosity. In the fluid with 2 cSt viscosity, the temperature distribution has taken a more balanced and regular state. In the fluid with 5 cSt viscosity, it is seen that the isotherms are more horizontal and more regular. To speak generally; under terrestrial conditions, the isotherms within the configuration show a more regular stratified distribution towards the depths of the configuration due to the effect of natural convection. When the configurations are examined, the effect of

natural convection occurring in this region is seen in the isotherms in the heater wall region.

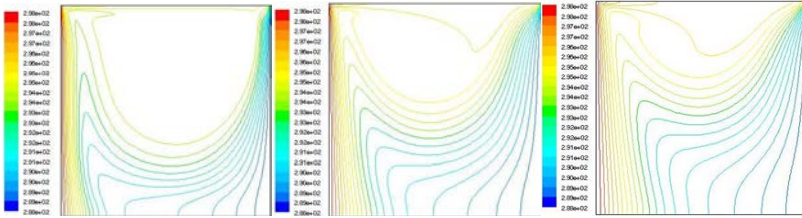


Figure 6. Image of isotherms of silicone oils at 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt viscosity values performing Marangoni convection movement under micro-gravity conditions

In Figure 6, the isotherms of silicone oils at viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt performing Marangoni convection movement within the open boat configuration under micro-gravity conditions are seen. When the surface tension-driven Marangoni convection movements of silicone oils at different viscosities under micro-gravity conditions are examined, distinct changes were observed in the distribution character of the temperature field depending on the increase in viscosity. In the fluid with 1 cSt viscosity, since sensitivity to temperature gradients formed on the surface is high, the curves are placed at more frequent intervals from the surface towards the lower regions. In the fluid with 2 cSt viscosity, it is seen that the distances between the curves increase. In the fluid with 5 cSt viscosity, it was determined that the temperature field showed a spread over a smoother and wider area.

Under low gravity conditions; as a result of the elimination of the buoyancy effect originating from natural convection, it is seen that the isotherms in Figure 6 are distinctly different from the isotherms in Figure 5. The difference seen here, as we mentioned above, also explains the difference between the streamlines in Figure 3 and the streamlines in Figure 4.

The velocity vectors of the fluid particles determine the circulation shape and circulation speed of the fluid within the configuration. In order to see the magnitudes of these velocity vectors in detail, horizontal and vertical lines were placed inside the geometric model, and velocity vectors were examined by separating them into their components in x and y directions. In Figure 7 and Figure 8, horizontal lines were placed at equal intervals within the configuration, and velocity vectors in the y-direction along these lines were examined.

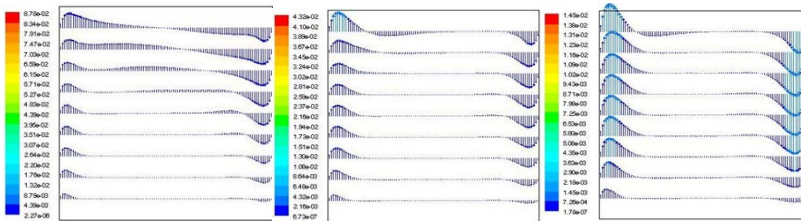


Figure 7. Regional image of velocity vectors in the y-direction of silicone oils at 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt viscosity values performing Marangoni convection movement under normal gravity conditions

In Figure 7, the regional image of velocity vectors in the y-direction of silicone oils at viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt performing Marangoni convection movement under terrestrial conditions is seen. In these analyses under the effect of normal gravity, both natural convection and Marangoni convection exist together. When the components in the y-direction (V_y) of the velocity vectors within the configurations are compared; in the configuration where silicone oil with a 1 cSt viscosity value is used, it is seen that the velocity vectors in the inner parts of the geometric model are larger than those in the configurations with 2 cSt and 5 cSt viscosity values. In configurations with 2 cSt and 5 cSt viscosity values, it is seen that velocity vectors in the inner parts of the geometric model are

small, while velocity vectors in regions close to the heater and cooler walls are large.

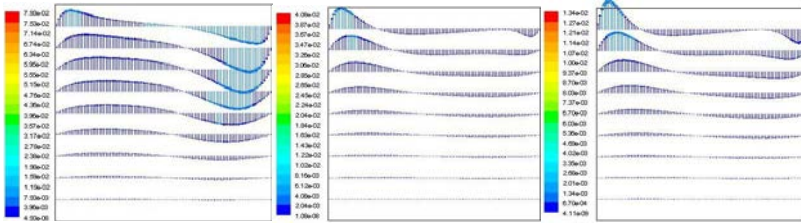


Figure 8. Regional image of velocity vectors in the y-direction of silicone oils at 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt viscosity values performing Marangoni convection movement under micro-gravity conditions

In Figure 8, the regional image of velocity vectors in the y-direction of silicone oils at viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt performing Marangoni convection movement under micro-gravity conditions is seen. In these analyses under the effect of micro-gravity, only the Marangoni convection effect exists. When the components in the y-direction (V_y) of the velocity vectors within the configurations are compared; here too, it is seen that in the configuration where silicone oil with 1 cSt kinematic viscosity is used, the velocity vectors in the inner parts of the geometric model are larger than those in configurations with 2 cSt and 5 cSt kinematic viscosity. In configurations possessing 2 cSt and 5 cSt kinematic viscosity, it is seen that velocity vectors in the inner parts are small, while velocity vectors in the parts of the heater wall close to the liquid free surface are larger.

In Figure 9 and Figure 10, to see the velocity vector magnitudes of the circulation within the configuration in the x-direction in detail, vertical lines were placed at equal intervals within the configuration, and velocity vectors in the x-direction along these lines were examined.

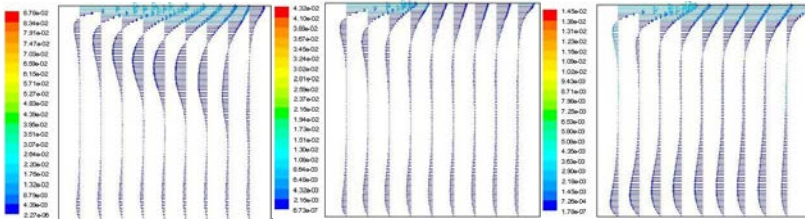


Figure 9. Regional image of velocity vectors in the x-direction of silicone oils at 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt viscosity values performing Marangoni convection movement under normal gravity conditions

In Figure 9, the regional image of velocity vectors in the x-direction of silicone oils at viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt performing Marangoni convection movement under normal gravity conditions is seen. In these analyses under terrestrial conditions, both natural convection and Marangoni convection exist together. When the components in the x-direction (V_x) of the velocity vectors within the configurations are compared; it is seen that in the configuration where silicone oil with 1 cSt kinematic viscosity is used, the velocity vectors in the inner parts of the geometric model are larger than those in configurations with 2 cSt and 5 cSt kinematic viscosity. Conversely, when the components in the x-direction (V_x) of the velocity vectors at the base part of the geometric model are compared, it is seen that V_x is smallest in the configuration where silicone oil with 1 cSt kinematic viscosity is used, V_x is larger in the configuration where silicone oil with 2 cSt kinematic viscosity is used, and V_x is largest in the configuration where silicone oil with 5 cSt kinematic viscosity is used.

In Figure 10, the regional image of velocity vectors in the x-direction of silicone oils at viscosity values of 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt performing Marangoni convection movement under micro-gravity conditions is seen. In these analyses under the effect of micro-gravity, only the Marangoni convection effect exists. When the components in the x-direction (V_x) of the velocity vectors within the configurations are compared; it is seen that in

the configuration where silicone oil with 1 cSt kinematic viscosity is used, the velocity vectors in the inner parts of the geometric model are larger than those in other configurations.

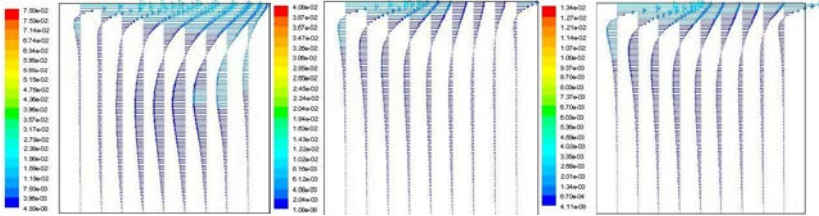


Figure 10. Regional image of velocity vectors in the x-direction of silicone oils at 1 cSt, 2 cSt, and 5 cSt viscosity values performing Marangoni convection movement under micro-gravity conditions

The velocity vectors of fluid particles determine the circulation shape and circulation speed of the fluid within the configuration. Therefore, the relationships of Figure 7, Figure 8, Figure 9, and Figure 10, which show the images of velocity vectors in our configurations, with each other and with other figures were examined. In the configurations in Figure 7 and Figure 9, it is seen that the velocity vectors, and consequently the circulation of the convection movement, descend to the base of the rectangular container. This situation was also explained in the streamlines in Figure 3. In analyses performed under low gravity conditions, due to the elimination of natural convection (buoyancy effect), only surface-tension-driven convection forces are effective within the configuration. When results obtained under these conditions are examined, it is seen that the temperature of the region where vortex cells are located is higher than the stagnant region temperature located below these cells. Due to this temperature difference, the fluid density in the stagnant region becomes greater than the density in the vortex region. Consequently, the depth of penetration of the vortex cells into the fluid decreases. We had explained this situation while examining the streamlines in Figure 4. The situation described

here is also clearly seen when the velocity vectors in Figure 8 and Figure 10 are examined. It is seen that the velocity vectors in regions close to the bases of the configurations in Figure 8 and Figure 10 are quite small.

4. CONCLUSION

Marangoni convection is a type of flow that initiates with surface tension changes dependent on temperature difference and creates circulation within the fluid volume. Many physical parameters, especially viscosity, play a determining role in this process. Furthermore, under terrestrial conditions, i.e., normal gravity conditions, Marangoni convection will always appear together with natural convection. Natural convection movements can, in most cases, weaken Marangoni flows or disrupt their stability. Therefore, studies conducted in micro-gravity environments where natural convection is minimal or completely eliminated are important for examining Marangoni convection more clearly and stably.

The viscosity and gravity parameters we mentioned above formed the basis of our study. In our study, the open boat configuration, one of the configurations used in the investigation of surface tension convection, was modeled in two dimensions, and numerical analyses were performed with the ANSYS Fluent program. Steady-state Marangoni convection movements formed by three silicone oil fluids at different viscosities were numerically evaluated under both normal and micro-gravity conditions.

In numerical analyses, it was seen that circulation velocity values in the configuration where silicone oil with a 1 cSt viscosity value was used were larger than the velocity values in configurations where silicone oil fluids with 2 cSt and 5 cSt viscosity were used. Furthermore, when all results were

compared with each other, it was seen that the results in the configuration where silicone oil with a 1 cSt viscosity value was used were distinctly separated from the results obtained from configurations where silicone oil fluids with 2 cSt and 5 cSt viscosity were used.

Under normal gravity conditions, convection flow spread to the entire rectangular container at all viscosity values. Conversely, under low gravity conditions, since buoyancy forces originating from natural convection were eliminated, flow occurred only with Marangoni forces originating from surface tension. In these conditions, because the temperature of the regions where vortex cells were located was higher than the temperature of the stagnant regions at the bottom, the fluid density in the stagnant region was higher. This situation significantly reduced the penetration of vortex cells to the lower regions of the container.

In our study, it was observed that the viscosity changes of the fluid affected the speed of the Marangoni convection flow, temperature distribution, streamlines, the formed vortex cell structure, and the number of formed vortex cells. It was seen that the change in the gravity vector affected the structure of the Marangoni convection flow, vortex cell centers, and the spread of vortex cells within the convection.

The results we obtained reveal that Marangoni convection shows high sensitivity to viscosity and gravity conditions. These findings show that fluid viscosity is a critical design parameter for processes such as heat transfer, thin film production, crystal growth, and microfluidic applications, especially those carried out in micro-gravity environments. Furthermore, the study contributes to a more accurate understanding of the interaction of Marangoni convection with natural convection and creates a

reference for the behavior of surface-tension-driven flows in environments where the gravity effect is reduced.

Three-dimensional models, time-dependent surface tension effects, variable physical properties, or different geometry configurations can be used to expand the scope of this study. Thus, the role of Marangoni convection in more complex engineering applications can be revealed in more detail.

REFERENCES

- Kamotani, Y., Lee, J. H., Ostrach, S., & Pline, A. (1992). An experimental study of oscillatory thermocapillary convection in cylindrical containers. *Physics of Fluids A*, 4, 955-962.
- Kamotani, Y., Ostrach, S., & Lin, J. (1995). An experimental study of free surface deformation in oscillatory thermocapillary flow. *Acta Astronautica*, 289, 23-30.
- Karabıyık, E. (2015). *Dikdörtgen kap içerisinde yüzey gerilim hareketi yapan farklı iki akışkan için boyutsal oran etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Lai, C. L. (2004). Multiple-scale analysis of oscillatory thermocapillary convection of high Prandtl number fluids in a rectangular cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 1069–1078.
- Masud, J. (1997). *The influence of gravity on thermocapillary flows in high Prandtl number fluids* (PhD thesis). Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, OH.
- Mendis, R. L. A., Sekimoto, A., Okano, Y., Minakuchi, H., & Dost, S. (2021). The relative contribution of solutal Marangoni convection to thermal Marangoni flow instabilities in a liquid bridge of smaller aspect ratios under zero gravity. *Crystals*, 11, 116–128.
- Mielniczuk, O., Millet, O., Gagneux, G., & El Youssofi, M. S. (2018). Characterisation of pendular capillary bridges derived from experimental data using inverse problem method. *Granular Matter*, 20, 14-23
- Ostrach, S. (1977). Motion induced by capillarity. *Physico-Chemical Hydrodynamics*, 2, 571–589.
- Ostrach, S. (1979). Convection due to surface tension gradients. *COSPAR Space Research*, 19, 563–570.

- Ostrach, S. (1982). Low-gravity fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 14, 313-345.
- Preisser, F., Schwabe, D., & Scharmann, A. (1983). Steady and oscillatory thermocapillary convection in liquid columns with free cylindrical surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 126, 545-567.
- Selver, R., Katı Sunay, E., & Özçelik Alan, M. (2013). Akışkanın yüzey gerilim hareketlerinin farklı yerçekimi vektörleri altında incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10(4), 57-71.
- Sequeira, Y., Maitra, A., Pandey, A., & Jung, S. (2022). Revisiting the NASA surface tension driven convection experiments. *npj Microgravity*. 8(5)
- Wang, J., Zhang, J., & Tan, H. (2025). Thermocapillary convection in a semi-elliptic enclosure under microgravity conditions. *Microgravity Science and Technology*, 37(2), 165-179.
- Zeng, Z., Mizuseki, H., Higashino, K., & Kawazoe, Y. (1999). Direct numerical simulation of oscillatory Marangoni convection in cylindrical liquid bridges. *Journal of Crystal Growth*, 204, 395-404.

KAYNAKLI PARÇALARDA ARTIK GERİLME VE BURULMA YÜKLEMESİNİN ETKİLERİ ÜZERİNE DERLEME

Emre AYDINLI¹

Farshıd KHOSRAVI²

1. GİRİŞ

Kaynaklı yapılar (köprüler, gemiler, basınçlı kaplar, boru hatları ve araç şasileri) çoğunlukla çekme, eğilme ve burulmanın birlikte etkidiği çok eksenli yükleme koşulları altında çalışmaktadır. Kaynaklı birleşimlerin yapısal bütünlüğünü sınırlayan iki temel unsur bulunmaktadır: (i) kaynak işlemi sırasında oluşan ve genellikle akma mukavemetine yakın büyüklüklere ulaşabilen artık gerilmeler (KAG) ve (ii) kaynak geometrisinden kaynaklanan gerilme yığılmaları (Gurney, 1979; Maddox, 1991).

Özellikle çekme yönündeki artık gerilmeler, servis yükleri altındaki efektif gerilme aralığını artırarak yorulma çatlaklarının hem başlama hem de ilerleme safhasını hızlandırmaktadır (Barsom & Rolfe, 1999; Suresh, 2004). Kaynaklı yapılarda burulma yüklemesi ise esas olarak kayma gerilmeleri üretmesine rağmen, geometrik süreksizlikler ve artık gerilmeler nedeniyle karmaşık bir gerilme durumu ortaya çıkarmaktadır (Haibach, 1989; Radaj vd., 2006).

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, ORCID: 0009-0006-4283-331X.

² Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-8866-114X.

Bu derlemenin amacı kaynaklı parçalarda artık gerilmelerin oluşumu ve yorulma üzerindeki etkilerini, burulma altındaki gerilme yoğunlaşmalarını ve çok eksenli yorulma yaklaşımlarını literatürdeki temel çalışmalar ışığında bütüncül bir bakış açısıyla sunmaktır.

2. KAYNAK ARTIK GERİLMELERİNİN OLUŞUMU VE ETKİLERİ

2.1. Oluşum Mekanizmaları ve Dağılım

Kaynak artık gerilmeleri, kaynak sırasında meydana gelen lokal ısınma-soğuma döngüleri ve buna bağlı genleşme-büzülmenin çevre malzeme tarafından kısıtlanması sonucu ortaya çıkar (Masubuchi, 1980). Özellikle çeliklerde katı hâl faz dönüşümleri (ör. östenit-martenzit) artık gerilme dağılımını önemli ölçüde etkilemektedir (Withers & Bhadeshia, 2001). Alın ve köşe kaynaklarında, kaynak dikişi boyunca boylamsal çekme artık gerilmeleri genellikle malzemenin akma mukavemetine yakın seviyelere ulaşırken, ana malzemede bunları dengeleyen basma gerilmeleri oluşur (Smith et al., 2000; Dong & Brust, 2000). En yüksek artık gerilme bileşeni çoğu durumda boylamsal doğrultudadır.

2.2. Yorulma Ömrüne Etkileri

Kaynak artık gerilmelerinin yorulma davranışı üzerindeki etkileri, farklı malzemeler ve kaynak detayları için çok sayıda deneysel ve analitik çalışmada incelenmiştir. Bu çalışmaların temel bulguları Tablo 1’de özetlenmiştir.

Çekme artık gerilmeleri, yorulma ömrü üzerinde son derece olumsuz bir etkiye sahiptir. Özellikle yüksek çevrimli yorulma (HCF) bölgesinde, efektif ortalama gerilmenin artmasına neden olarak çatlak başlama ömrünü önemli ölçüde kısaltır (Suresh, 2004; Hobbacher, 2016).

Artık gerilmelerin çatlak ilerlemesi üzerindeki etkisi, gerilme şiddet faktörü (K) yaklaşımıyla değerlendirilmektedir. Pozitif (çekme) artık gerilmeler, etkin ΔK değerini artırarak çatlak ilerleme hızını yükseltmektedir (Barsom & Rolfe, 1999; García vd., 2016).

Tablo 1. Kaynak Artık Gerilmelerinin Yorulma Üzerindeki Etkilerine Dair Literatür Özeti

Yazar(lar)	Kaynak Detayı / Malzeme	İncelenen Parametre	Temel Bulgular
Suresh (2004)	Genel malzemeler (özellikle çelikler)	Ortalama gerilme etkisi	Çekme artık gerilmeleri efektif ortalama gerilmeyi artırarak yorulma çatlak başlama ömrünü kısaltmaktadır.
Barsom & Rolfe(1999)	Kaynaklı çelik yapılar	Gerilme şiddet faktörü (K, ΔK)	Çekme artık gerilmeleri çatlak ilerleme hızını arttırmaktadır ve kırılma mekanizması analizlerinde dikkate alınmaktadır.
Withers & Bhadeshia (2001)	Çeşitli kaynaklı birleşimler	KAG oluşum mekanizması	Termal büzülme ve faz dönüşümleri artık gerilmelerin ana nedenleridir; büyüklükleri akma gerilmesine yakındır.
Hobbacher (2016)	Yapısal çelik kaynakları	Yorulma tasarımı	Kaynaklı birleşimlerin yorulma dayanımı, artık gerilmeler nedeniyle ana malzemeye göre düşüktür.

2.3. Artık Gerilme Giderme Yöntemleri

Artık gerilmelerin etkisini azaltmak amacıyla en yaygın kullanılan yöntemlerden biri kaynak sonrası ısıtılma işlemidir (PWHT). Bu yöntem, malzemenin yüksek sıcaklıklarda plastik akma yoluyla gerilmeleri rahatlatmasını sağlamaktadır (Withers & Bhadeshia, 2001).

Mekanik yöntemler (örneğin çekiçleme ve yüzey haddeleme) kaynak dikişi yüzeyinde basma artık gerilmeleri

oluşturarak yorulma ömrünü artırabilmektedir (Radaj vd., 2006; Juvinall & Marshek, 2012). Titreşimle gerilme giderme (VSR) yönteminin etkinliği ise literatürde halen tartışılmaktadır (Munsi vd., 2001).

3. KAYNAKLI BAĞLANTILARIN BURULMA ALTINDAKİ DAVRANIŞI

3.1. Gerilme Yığılması

Burulma yüklemesi altındaki kaynaklı birleşimlerde oluşan gerilme yığılmaları ve bunlara ait gerilme yığılma faktörleri (GYF), literatürde hem deneysel hem de nümerik yöntemlerle ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Bu kapsamda öne çıkan çalışmalar ve temel sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

Burulma yüklemesi altında, teorik olarak saf kayma gerilmesi söz konusu olsa da, kaynaklı birleşimlerde geometrik süreksizlikler nedeniyle yüksek gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Özellikle boru-plaka, T-birleşim ve köşe kaynaklarında, maksimum kayma gerilmeleri çoğunlukla kaynak kökü veya dikiş ucu civarında ortaya çıkar (Peterson, 1974; Lotsberg, 2006).

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile yapılan çalışmalar, burulma altındaki gerilme yığılma faktörlerinin (GYF) kaynak geometrisine ve kalınlık oranlarına güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir (Radaj vd., 2006).

Tablo 2. Burulma Altındaki Kaynaklı Birleşimlerde Gerilme Yığılma Faktörü (GYF) Çalışmaları

Yazar(lar)	Birleşim Tipi	Yükleme Türü	Temel Bulgular
Peterson (1974)	Genel çentik geometrileri	Burulma	Çentiklerin burulma altındaki kayma gerilmesini ne ölçüde artırdığına dair temel GYF değerleri verilmiştir.
Lotsberg (2006)	Plakalı ve kaynaklı yapılar	Burulma	Sonlu elemanlar yöntemi ile burulma altındaki yerel gerilme ve GYF hesaplarının önemi vurgulanmıştır.
Radaj, Sonsino & Fricke (2006)	Alın ve köşe kaynakları	Birleşik yükleme (burulma dâhil)	En yüksek gerilmelerin genellikle kaynak kökünde olduğu ve yorulma açısından kritik olduğu gösterilmiştir.

3.2. Burulma Yorulması ve Çok Eksenli Modeller

Kaynaklı parçalarda burulma ve birleşik yüklemeler altında yorulma ömrünün tahmini için geliştirilen çok eksenli yorulma kriterleri, farklı varsayımlar ve hasar tanımları içermektedir. Bu çalışmada ele alınan başlıca modeller ve uygulama alanları Tablo 3’te özetlenmiştir.

Burulma yorulması altında çatlaklar, maksimum kayma gerilmesi düzleminde veya eksene yaklaşık 45° eğimli maksimum normal gerilme düzlemlerinde başlayabilmektedir (Fatemi & Socie, 1988; Shamsaei & Fatemi, 2014). Von Mises eşdeğer gerilme yaklaşımı burulma etkisini çoğu zaman yetersiz temsil ederken, kritik düzlem tabanlı modeller (Fatemi–Socie, SWT) kaynaklı birleşimlerde daha başarılı sonuçlar vermektedir (Smith vd., 1970; Glinka vd., 1995).

Tablo 3. Çok Eksenli Yorulma Modelleri ve Temel Kaynakları

Model / Kriter	Temel Varsayım	Uygulama Alanı
Fatemi–Socie(1988)	Hasar, maksimum kayma gerilmesi genliği ve eşzamanlı normal gerilmenin etkidığı kritik düzlemde oluşmaktadır.	Kaynaklı birleşimler, burulma ve birleşik yükleme altında yorulma
Smith–Watson–Topper (SWT)(1970)	Maksimum normal gerilme ile gerinme genliğinin çarpımı yorulma hasarını belirlemektedir.	Çekme ağırlıklı yükleme (burulma için modifikasyon gerekebilir)
Strain Energy Density (SED)(1995)	Kritik düzlemde biriken gerinme enerjisi yorulma hasarını kontrol etmektedir.	Çentikli bölgeler, çok eksenli yorulma

4. NÜMERİK MODELLEME VE DENEYSEL DOĞRULAMA

SEY, kaynaklı yapılarda hem artık gerilmelerin hem de burulma altındaki gerilme dağılımlarının belirlenmesinde temel bir araçtır (Goldak & Akhlaghi, 2005). Termo-mekanik kaynak simülasyonları, artık gerilme alanlarının daha gerçekçi tahmin edilmesini sağlamaktadır (Perić vd., 2022).

DeneySEL çalışmalar ise özellikle boru ve kalın kesitli kaynaklarda nümerik sonuçların doğrulanması açısından kritik öneme sahiptir (Smith vd., 2000).

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu derleme çalışmasında, kaynaklı parçalarda artık gerilmeler ile burulma yüklemesinin yorulma davranışı üzerindeki birleşik etkileri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Literatür, kaynak işlemi sırasında oluşan ve çoğu zaman malzemenin akma mukavemetine yakın seviyelere ulaşan çekme artık gerilmelerinin, burulma altında oluşan kayma gerilmeleri ile

etkileşime girerek yorulma çatlağı başlama ve ilerleme süreçlerini önemli ölçüde hızlandırdığını açıkça göstermektedir.

Burulma yüklemesi teorik olarak saf kayma gerilmesi üretse de, kaynak dikişinin geometrisi ve çentik etkisi nedeniyle birleşim bölgelerinde yüksek gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Bu durum, özellikle kaynak kökü ve dikiş ucu bölgelerini yorulma açısından kritik hâle getirmektedir. Mevcut çalışmalar, burulma altındaki çatlakların sıklıkla maksimum normal gerilmenin olduğu yaklaşık 45° eğimli düzlemlerde veya maksimum kayma gerilmesi düzlemlerinde başladığını ortaya koymaktadır.

Yapısal tasarım açısından değerlendirildiğinde, yalnızca harici burulma gerilmesinin değil, aynı zamanda kaynak prosesinden kaynaklanan artık gerilme dağılımının da dikkate alınması gerekmektedir. IIW ve benzeri tasarım kılavuzları, artık gerilmelerin etkisini dolaylı olarak yorulma sınıfları (FAT) aracılığıyla içerse de, kritik ve emniyetle ilişkili bileşenler için yerel gerilme yaklaşımlarına ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) temelli ayrıntılı analizlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonuç olarak, kaynaklı parçalarda burulma yüklemesi altında güvenilir bir yorulma tasarımı yapılabilmesi için artık gerilmeler, gerilme yığılmaları ve çok eksenli yorulma kriterleri birlikte değerlendirilmelidir. Gelecekteki çalışmaların, gelişmiş kaynak yöntemlerinin artık gerilme seviyeleri üzerindeki etkilerini ve bu gerilmelerin burulma altındaki mikro yapısal değişimlerle etkileşimini daha gelişmiş nümerik ve deneysel yaklaşımlarla ortaya koyması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Barsom, J. M., & Rolfe, S. T. (1999). *Fracture and fatigue control in structures* (3rd ed.). ASTM International.
- Barsoum, Z., & Samuelsson, J. (2005). *Torsion fatigue and residual stresses in multi-pass welded tubular joints* (IIW Document No. XIII-2073-05).
- Dong, P., & Brust, F. W. (2000). Welding residual stresses and effects on fracture in pressure vessel and piping components: A millennium review and beyond. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 122(3), XXX–XXX. <https://doi.org/10.1115/1.556189>
- Fatemi, A., & Socie, D. F. (1988). A critical plane approach to multiaxial fatigue damage. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 11(3), 149–165. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1988.tb01169.x>
- Frendo, F., & Bertini, L. (2015). Fatigue resistance of pipe-to-plate welded joint under in-phase and out-of-phase combined bending and torsion. *International Journal of Fatigue*, 79, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.04.020>
- García, C., Lotz, T., Martínez, M. J., Artemev, A., & Requena, G. (2016). Fatigue crack growth in residual stress fields. *International Journal of Fatigue*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.020>
- Glinka, G., Shen, G., & Plumtree, A. (1995). A multiaxial fatigue strain energy density parameter related to the critical fracture plane. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 18(1), 37–46. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1995.tb00140.x>

- Goldak, J., & Akhlaghi, M. (2005). *Computational welding mechanics*. Springer.
- Gurney, T. R. (1979). *Fatigue of welded structures*. Cambridge University Press.
- Haibach, E. (1989). *Betriebsfestigkeit*. VDI-Verlag.
- Hobbacher, A. (2016). *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Springer.
- Jain, M., MacEwen, S. R., & Wu, L. (1994). Finite element modelling of residual stresses and strength differential. *Journal of Materials Processing Technology*.
[https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)90895-8](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90895-8)
- Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2012). *Fundamentals of machine component design* (5th ed.). Wiley.
- Lebastard, M., Couchaux, M., Bureau, A., & Hjiiaj, M. (2023). Impact of the fabrication process on the lateral–torsional buckling of welded I-section beams. *Thin-Walled Structures*, 188, 110761.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110761>
- Lee, C.-H., & Chang, K.-H. (2008). Numerical investigation of the residual stresses in strength-mismatched dissimilar steel butt welds. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 43(1), 55–66.
<https://doi.org/10.1243/03093247JSA313>
- Lotsberg, I. (2006). Fatigue design of plated structures using finite element analysis. *Ships and Offshore Structures*, 1(1), 45–54. <https://doi.org/10.1533/saos.2005.0006>
- Maddox, S. J. (1991). *Fatigue strength of welded structures*. Woodhead.
- Masubuchi, K. (1980). *Analysis of welded structures*. Pergamon.

- Munsi, A. S. M. Y., Waddell, A. J., & Walker, C. A. (2001). Vibratory stress relief—An investigation of the torsional stress effect in welded shafts. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 36(5), 453–464. <https://doi.org/10.1243/0309324011514610>
- Perić, M., Garašić, I., Gubeljak, N., Tonković, Z., Nižetić, S., & Osman, K. (2022). Numerical simulation and experimental measurement of residual stresses in a thick-walled buried-arc welded pipe structure. *Metals*, 12, 1102. <https://doi.org/10.3390/met12071102>
- Peterson, R. E. (1974). *Stress concentration factors*. Wiley.
- Radaj, D., Sonsino, C. M., & Fricke, W. (2006). *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. Woodhead Publishing.
- Shamsaei, N., & Fatemi, A. (2014). Small fatigue crack growth under multiaxial stresses. *International Journal of Fatigue*, 58, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.02.002>
- Smith, D. J., Bouchard, P. J., & George, D. B. F. (2000). Measurement and prediction of residual stresses in thick-section steel welds. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. <https://doi.org/10.1243/0309324001514422>
- Smith, K. N., Watson, P., & Topper, T. H. (1970). Stress-strain analysis of fatigue. *Journal of Materials*, 5(4), 767–778.
- Suresh, S. (2004). *Fatigue of materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Teh, L. S., & Brennan, F. P. (2007). Evaluation of mode I stress intensity factors for edge cracks from 2-D V-notches using composition of constituent SIF weight functions.

International Journal of Fatigue, 29(7), 1253–1268.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.10.012>

Withers, P. J., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2001). Residual stress.
Materials Science and Technology, 17(4), 355–365.
<https://doi.org/10.1179/026708301101509980>

HAVUZ FOTOPOLİMERİZASYONU İLE ÜRETİLEN PARÇALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ: SAF REÇİNELER VE DOLGU MADDELİ KOMPOZİTLERİN İNCELEMESİ

Ömer Doğan ÖZDEMİRLER¹

Farshid KHOSRAVI²

1. GİRİŞ

1.1. Eklemeli İmalat Teknolojilerine Genel Bakış

Eklemeli imalat dijital bir 3B modelden yola çıkarak malzemeyi ardışık katmanlar hâlinde birleştiren üretim teknolojilerinin genel adıdır. Bu yaklaşım geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak, karmaşık geometrilerin üretimini doğrudan 3B modelden oluşturmayı mümkün kılar. Eklemeli imalat süreçleri, ürün geliştirme süresini kısaltma, malzeme israfını azaltma ve kişiselleştirilmiş üretim kabiliyeti sağlama yönleriyle imalat sanayinde köklü bir dönüşüm yaratmaktadır (Gao et al., 2015; Ngo, Kashani, Imbalzano, Nguyen, & Hui, 2018; Tofail et al., 2018).

Eklemeli imalat yönteminde üretim, “aşağıdan yukarıya” yapı inşası prensibini benimser. Eklemeli İmalat yöntemleri ISO/ASTM 52900 standardına göre yedi ana kategoride tanımlanmıştır:

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, ORCID: 0009-0002-4685-1110.

² Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-8866-114X.

1. Bağlayıcı püskürtme (Binder Jetting, BJ)
2. Yönlendirilmiş enerji yığma (Directed Energy Deposition, DED)
3. Malzeme ekstrüzyonu (Material Extrusion, ME/FFF)
4. Malzeme püskürtme (Material Jetting, MJ)
5. Toz yatağı füzyon (Powder Bed Fusion, PBF)
6. Sac laminasyon (Sheet Lamination, SL/LOM)
7. Havuz fotopolimerizasyonu (Vat Photopolymerization, VPP) (Gao et al., 2015; Ngo et al., 2018; Tofail et al., 2018).

Bu sınıflandırma; eklemeli imalat süreçlerini enerji türü, malzeme formu ve birleştirme mekanizmasına göre gruplar. Polimerlerde çoğunlukla eriyik biriktirme veya ışıkla kürlleme, metallere yönelik sistemlerde ergitme ya da sinterleme, seramiklerde ise bağlayıcıyla birleştirme kullanılır. Bu seçimler, yüzey kalitesi, boyutsal doğruluk ve katmanlar arası bağ dayanımını doğrudan belirler. (Gao et al., 2015; Ngo et al., 2018).

Eklemeli imalat sürecinin genel iş akışı dört temel aşamadan oluşur :

1. Eklemeli imalata uygun tasarım
2. Modelin dilimlenmesi
3. Katmanlı üretim işlemi
4. Destekleri temizleme ve son işlemler (örneğin yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi, ısıl işlem veya kürlleme).

Bu aşamalarda yapı yönelimi, katman kalınlığı ve baskı parametreleri, parça geometrisi, ölçüsel doğruluk ve yüzey

kalitesi üzerinde belirleyici rol oynar (Ngo et al., 2018; Tofail et al., 2018).

Eklemeli imalatın önemli avantajlarından biri, geometrik karmaşıklığın maliyete etkisini azaltmasıdır. Kalıp ve fişkür ihtiyacının ortadan kalkması, özellikle düşük-orta hacimli üretimde maliyet etkinliği sağlar. Ayrıca çok parçalı montajların tek parça olarak üretilebilmesi, parça sayısını ve montaj kaynaklı hataları düşürerek “montajsız tasarım” yaklaşımını destekler. (Gao et al., 2015; Ngo et al., 2018).

Eklemeli imalatın bir diğer avantajı malzeme verimliliğidir; üretim sırasında oluşan hurda miktarı oldukça düşüktür. Bu özellik, özellikle havacılık, otomotiv ve biyomedikal uygulamalarda önemli bir ekonomik katkı sağlar. Ayrıca kişiselleştirme, düşük envanter gereksinimi ve tedarik zinciri esnekliği, eklemeli imalatın stratejik önemini güçlendirir. (Gao et al., 2015; Ngo et al., 2018; Tofail et al., 2018).

Buna karşın, eklemeli imalatın sanayide yaygınlaşması için aşılması gereken temel sorunlar vardır. Başlıca zorluk, üretim sırasında oluşan mikroyapı ve buna bağlı mekanik özelliklerin güvenilir biçimde öngörülebilmesidir. Ayrıca aynı parçanın farklı makinelerde veya aynı makinede farklı zamanlarda üretildiğinde aynı sonucu vermemesi (tekrarlanabilirlik), kalite güvencesini güçleştirir. (Ngo et al., 2018; Tofail et al., 2018).

2. HAVUZ FOTOPOLİMERİZASYON (VPP) SÜREÇLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

2.1. Temel VPP Teknolojileri

Küvet fotopolimerizasyonu (Vat Photopolymerization, VPP) teknolojileri, fotoduyarlı sıvı reçinelerin seçici olarak katılaştırılması prensibine dayanan eklemeli imalat yöntemleri arasında en yüksek çözünürlük ve yüzey kalitesine sahip süreçleri

kapsar (Whyte, Doeven, Sutti, Kouzani, & Adams, 2024). Bu teknolojiler, kullanılan ışık kaynağı, projeksiyon yöntemi ve kürleme mekanizmasına göre alt sınıflara ayrılır. Günümüzde temel VPP sistemleri Tablo 2-1'deki gibi sınıflandırılmaktadır.

Tablo 2.1. Temel VPP Teknolojileri

Yöntem	Işık Kaynağı / Mekanizma	Çözünürlük (μm)	Avantajlar	Sınırlamalar	Kaynaklar
SLA (Stereolitografi)	UV lazer / noktasal tarama	25–50	Yüksek doğruluk, iyi yüzey kalitesi	Düşük hız, karmaşık sistem	(Zhang et al., 2021; Afridi et al., 2024)
DLP (Dijital Işık İşleme)	Projeksiyon (DMD/LCD)	10–50	Hızlı üretim, homojen enerji dağılımı	Piksel boyutuna bağlı çözünürlük sınırı	(Zhang et al., 2021; Han et al., 2019; Lee et al., 2022)
CLIP (Sürekli Sıvı Arayüz Üretimi)	UV ışık / oksijen inhibisyonu	30–100	Katmansız üretim, yüksek hız	Oksijen pencere ömrü, reçine viskozitesi	(Al Rashid et al., 2021; Lee et al., 2022; Graça et al., 2024)
HARP (Yüksek Alanlı Hızlı Baskı)	UV projeksiyon + sıvı soğutma	50–100	Büyük ölçekli üretim, ısı kontrol	Soğutma sistemi karmaşıklığı	(Afridi et al., 2024; Graça et al., 2024)
μSL (Mikro-stereolitografi)	Projeksiyon (mikro-DMD)	1–5	Yüksek çözünürlük, mikro yapılar	Sınırlı baskı alanı, düşük hız	(Whyte et al., 2024; Han et al., 2019)
2PP (İki-Foton Polimerizasyonu)	Femtosaniye lazer / doğrusal olmayan soğurma	<0.5	Alt mikron çözünürlük, 3D mikro/nano yapı	Yavaş üretim, yüksek maliyet	(Al Rashid et al., 2021; Whyte et al., 2024)
VAM (Katmansız Küvet Fotopolimerizasyonu)	Çok açılı ışık projeksiyonu	50–300	Hacimsel üretim, izotropik özellikler	Optik hizalama ve yoğunluk kontrolü gerektirir	(Whyte et al., 2024)

2.1.1. Stereolitografi (SLA)

Bu yöntemde UV lazer, fotoduyarlı reçine yüzeyinde seçici olarak taranır ve izlediği hat boyunca fotopolimerizasyon gerçekleşir. SLA; yüksek boyutsal doğruluk ($\pm 25 \mu\text{m}$) ve çok iyi yüzey kalitesi ile öne çıkar. Ancak lazerin noktasal tarama prensibi üretim hızını sınırlar; katman geçişlerinde enerji yayılımı

ve reçinenin yeniden akış süresi baskıyı uzatabilir. Bu nedenle SLA, ince detay ve pürüzsüz yüzey isteyen işlerde güçlü olsa da, tarama süresi ve sistem karmaşıklığı büyük hacimli üretimde maliyet etkinliğini azaltır(Al Rashid et al., 2021; Zhang et al., 2021).

2.1.2. Dijital Işık İşleme (DLP)

Bu sistemlerde, dijital mikro ayna cihazı (Digital Micromirror Device, DMD) veya sıvı kristal ekran (LCD) kullanılarak bir katmanın tamamı tek bir pozlama süresinde reçineye yansıtılır (Al Rashid et al., 2021; Han, Yang, Fang, & Lee, 2019). DLP, SLA'ya göre daha yüksek üretim hızı ve homojen enerji dağılımı sağlar. Ancak çözünürlük, kullanılan projeksiyon sisteminin piksel boyutuyla sınırlıdır (genellikle 10–50 μm) (Han et al., 2019; Lee et al., 2022).

Modern DLP sistemleri, pozlama süresi ve ışık yoğunluğunu dinamik olarak optimize ederek kürleme derinliğini ve katman bağlanma kalitesini iyileştirmektedir (Lee et al., 2022).

2.1.3. Sürekli Sıvı Arayüz Üretimi (CLIP)

Continuous Liquid Interface Production (CLIP), DLP'nin üretim hızını artırmak için geliştirilmiş sürekli üretim yaklaşımıdır. CLIP'te oksijen geçirgen bir pencere kullanılarak reçine ile yapı arasındaki bölgede bir 'ölü bölge' oluşturulur. Bu bölge, oksijenin fotopolimerizasyonu kısmen engellemesi sayesinde katmanlar arasında süreksizliğin ortadan kalkmasına imkân tanır (Al Rashid et al., 2021; Lee et al., 2022). Sonuç olarak yapı, katman bazlı değil, sürekli olarak reçine yüzeyinden yukarı çekilerek üretilir.

2.1.4. Yüksek Alanlı Hızlı Baskı (HARP)

High Area Rapid Printing (HARP), CLIP prensibine dayanan ve büyük ölçekli üretimlerde karşılaşılan ısı yönetim problemlerini çözmeyi hedefleyen bir teknolojidir. HARP

sistemlerinde, oksijen geçirgen pencerenin altına entegre edilen bir sıvı soğutma katmanı, reçine sıcaklığını kontrol altında tutarak deformasyonu önler (Afridi et al., 2024; Graça et al., 2024). Bu yöntem sayesinde yüzey kalitesinden ödün vermeden daha geniş baskı alanlarında üretim yapılabilir.

2.1.5. Mikro-Stereolitografi (μ SL)

Mikro-stereolitografi (μ SL) veya projeksiyon mikro-stereolitografi (P μ SL), DLP prensibinin mikro ölçekte uygulanmasıdır. Yüksek çözünürlüklü optik sistemler ve hassas projeksiyon çipleriyle 1–5 μ m seviyesinde detaylar üretilebilir (Whyte et al., 2024; Han et al., 2019). μ SL sistemleri, mikroakışkan cihazlar, mikrooptik bileşenler ve biyomedikal iskeleler gibi yüksek hassasiyet gerektiren alanlarda kullanılmaktadır.

2.1.6. İki-Foton Polimerizasyonu (2PP)

İki-Foton Polimerizasyonu (Two-Photon Polymerization, 2PP), doğrusal olmayan optik soğurma prensibiyle çalışan ileri bir VPP yöntemidir. Bu mekanizma, alt mikron (yaklaşık 100 nm) seviyesinde çözünürlük sağlar (Al Rashid et al., 2021; Whyte et al., 2024).

2.1.7. Katmansız Havuz Fotopolimerizasyonu (VAM)

Katmansız Havuz Fotopolimerizasyonu (Volumetric Additive Manufacturing, VAM), VPP teknolojilerinde paradigmatik bir değişimdir. Bu yöntemde, reçine havuzu içerisine farklı açılardan yönlendirilen ışık projeksiyonlarının kesiştiği bölgelerde fotopolimerizasyon başlatılır (Whyte et al., 2024). Böylece nesneler, katman katman değil, doğrudan hacimsel olarak saniyeler içinde üretilebilir.

2.2. Üretim Süreci

2.2.1. DfAM ve CAD Verisinin Hazırlanması

DfAM aşamasında büzülme ve aşırı-kürlenme kaynaklı ofsetler kritik ölçüler için baştan modellenir. Eğrisel yüzeylerin ağ yapısının oluşturulması sırasında seçilen kenar uzunluğu ve sapma toleransları, yüzey pürüzlülüğü ile ölçü sapmasını doğrudan etkiler. Mikrokanallar, ince cidarlar ve kapalı boşluklar için güvenlik payı bırakmak daha sonra yapılacak maskeleme ve optimizasyon yükünü azaltır (Piedra-Cascón, Krishnamurthy, Att, & Revilla-León, 2021).

2.2.2. Ön-İşleme: Dilimleme, Destek ve Maske/Doz Kompanzasyonu

Dilimleme yönelimi, katman kalınlığı ve destek yerleşimi soyma kuvvetini, yeniden yayılma süresini ve anizotropiyi belirler. Gereksiz destekler yüzey izlerine ve ek işçiliğe yol açabileceğinden, kritik yüzeylerden uzak ve yük yolunu kısaltacak biçimde tasarlanmalıdır. Katman kalınlığı seçimi ise çözünürlük ve süreyi yönetir aynı Z-yönü pürüzlülüğünü de kontrol eder (Piedra-Cascón et al., 2021).

2.2.3. Yazım İcrası: Pozlama–Soyma–Yeniden Yayılma

Poz enerjisi , katman kalınlığı ve hareket profilleri birlikte ayarlanır. Yetersiz enerji eksik kürlenmeye, aşırı enerji ise taşmaya ve ölçü hatalarına yol açar. Bottom-up konfigürasyonda şeffaf ve düşük yapışmalı pencere, soyma kuvvetini düşürür. Isı yönetimi ise viskoziteyi kontrol ederek yeniden yayılmayı hızlandırır. Bu parametrelerin koordineli optimizasyonu çevrim süresini ve yüzey kalitesini iyileştirir (Wang et al., 2024; Piedra-Cascón et al., 2021).

2.2.4. Ardıl İşlemler: Yıkama, Post-Kür ve Yüzey

Yıkama ile serbest monomer veya oligomerler parça yüzeyinden temizlenir. Yetersiz yıkama yüzey yapışkanlığı ve biyouyumluluk sorunları doğurabilir. (Dai et al., 2024).

Yüzey taşlama, cilalama ve plazma gibi işlemler, çatlak başlatıcı mikro kusurları ve pürüzlülüğü düşürerek boyutsal sadakati ve yorulma davranışını iyileştirir. Post işlemleri sıralaması (yıkama → kurutma → post-kür → yüzey) ve süre, enerji dozları tutarlı bir standart işletim prosedürü altında yürütülmelidir (Dai et al., 2024; Piedra-Cascón et al., 2021).

2.2.5. Metroloji ve Kalite Güvencesi (QA)

Yüksek hassasiyette, pre-processing iş akışı ile nihai ölçüsel doğruluk arasında güçlü bir ilişki rapor edilmiştir. Bu nedenle izlenebilirlik, dosya sürümü, dilimleme ayarları, maske ve doz haritaları ile makine günlüklerinin birlikte arşivlenmesini gerektirir (Chen, Elkaseer, Scholz, & Hagenmeyer, 2024).

Mikro yapılı parçalarda grayscale optimizasyonu ve SPI yaklaşımı X-Y ve Z doğrularında doz kontrolünü güçlendirir. Bu da kenar keskinliği ve derinlik doğruluğunu artırır. Optik ve mekanik kalibrasyon periyodik olarak doğrulanmalı ve kabul kriterleri GD&T çerçevesinde raporlanmalıdır (Wang et al., 2024; Guven et al., 2022; Wang et al., 2024; Chen et al., 2024).

3. SAF REÇİNELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE GELİŞİMİ

3.1. Mekanik Testler ve Standartlar

Saf fotopolimer reçinelerin mekanik davranışı, çekme, eğilme, basma, darbe, kırılma tokluğu ve yorulma testleri gibi klasik mekanik karakterizasyon yöntemleriyle belirlenir. ASTM D638 ve ISO 527 gibi çekme standartları, doğrultu ve post-kür

koşullarının sonuçlar üzerinde güçlü etkisi olduğunu belirtir. İnce katmanlı ve optimum kurlenmiş örnekler genellikle daha yüksek mukavemet sunar (Brighenti & Cosma, 2021). Eğilme (ISO 178), darbe (ISO 179), yapısal elemanların yorulma ömrü (ISO 13003) ve dinamik mekanik analiz (DMA) kullanılarak sıcaklığa ve frekansa bağlı modüller ölçülür. Isı sapma sıcaklığı (HDT) ve cam geçiş sıcaklığı (Tg) için ISO 75 ve DSC ölçümleri kullanılır (Brighenti & Cosma, 2021).

3.2. Ağ Mimarisi ve Dönüşüm Oranı

Mekanik özelliklerin temel belirleyicisi, kullanılan monomerlerin işlevsellik derecesi ve ağ içinde oluşan çapraz bağ yoğunluğudur. Düşük işlevli akrilatların baskın olduğu ticari fotopolimerlerde tipik çekme dayanımı 40–60 MPa ve elastik modül 1.5–3 GPa aralığındadır (Brighenti & Cosma, 2021). Polymers dergisinde raporlanan ticari bir fotopolimer reçinesi 2.1 GPa elastik modül, 52.4 MPa çekme dayanımı ve %2.2 kopma uzaması göstermiştir (Tessanan et al., 2023). Bu reçineye fonksiyonelize edilmemiş doğal kauçuk eklenmesi modülü düşürmüş ve mukavemeti %27 azaltmıştır. Ancak çift fonksiyonel akrilik gruplarla modifiye edilen kauçuk, kopma uzamasını artırırken mukavemeti orijinal seviyesine geri getirmiştir (Tessanan et al., 2023). Monomer işlevselliğinin aşırı düşük olduğu durumlarda ağ yeterince çaprazlanmadığı için mekanik özellikler zayıflar. Örneğin üç işlevli monomerlerin düşük oranlarda kullanıldığı bir AIN reçine sisteminde çekme dayanımı 1 MPa'ın altına düşerken, yüksek işlevli monomer yükleri 30 MPa çekme dayanımı ve 64 MPa eğilme dayanımı sağlamıştır (Kuang, Liu, Zhao, & Wu, 2025).

Ağ mimarisi sadece modülü değil, süneklik ve tokluğu da etkiler. Siloksanlar veya poliüretan zincirleri ile modifiye edilen çift ağ sistemleri elastomerik davranış sergiler. Örneğin polidimetilsiloksan (P1) ve poliüretan türevi P2'nin ardışık

katmanlarda polimerleştirildiği ikili bir elastomer reçinesi, P1 ile tek başına sertleştiğinde modül ~1 MPa ve çekme dayanımı 1.7 MPa iken, %15 P2 eklenmesi modülü 2.5 MPa'a ve dayanımı 6.2 MPa'a yükseltmiş, %30 P2 ile modül 24 MPa'a ve dayanım 7 MPa'a çıkmıştır. Bu artış sünekliğin azalması pahasına elde edilmiştir (Acosta Ortiz et al., 2025). Lipoik asit türevi çaprazlayıcılar ile hazırlanan bir reçinede, çaprazlayıcı oranı %30 iken çekme dayanımı 0.9 MPa ve modül 0.014 GPa iken, oran %90'a çıkarıldığında dayanım 15.6 MPa ve modül 3.3 GPa'ya ulaşmış, hidrojen bağlarıyla güçlendirilmiş versiyon ise 50 MPa dayanım ve 0.34 GPa modül sunmuştur (Machado et al., 2024).

3.3. Tabakalar Arası Bağ, Yönlenme ve Anizotropi

Post-kür uygulaması genellikle katmanlar arasındaki dönüştürülmemiş monomerleri tüketerek bağ kuvvetini artırır ve anizotropiyi azaltır. Bir çalışmada, yüksek viskoziteli özel bir reçine kullanılarak lazer taramasız sistemle üretilen parçaların eğilme dayanımı ~75 MPa ve modülü 2.17 GPa olarak ölçülmüş, örneklerin X, Y ve Z yönlerinde benzer özellikler göstermesi sayesinde izotropik davranış elde edilmiştir (Weng et al., 2023). Buna karşılık dijital ışık işleme (DLP) ile üretilen parçalar, mikro aynaların arasında tam kürlenmemiş alanlar nedeniyle sütun benzeri bir yapı gösterir. DLP ile dikey yönde üretilen örnekler yatay yöndekilere kıyasla daha yüksek E modülü gösterirken post-kür işlemi Visijet FTX reçinesinde anizotropiyi %5'in altına indirmiş, Castable Blend reçinesinde ise pigmentler nedeniyle anizotropi %16 seviyesinde kalmıştır (Monzón, Z. Ortega, Hernández, Paz, & F. Ortega, 2017). Bu bulgular, baskı yönünün ve post-kür süresinin tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiğini vurgular.

3.4. Büzülme ve Artık Gerilmeler

Fotopolimerizasyondaki hacim büzülmesi ve buna bağlı artık gerilmeler, saf reçine parçalarda çatlak ve boyutsal sapmaya

neden olabilir. Radikal polimerizasyonda ağ oluşumu sırasında büzülme %3–7'ye çıkabilirken, halkalı açılma epoksilerinde büzülme daha düşüktür ve oksijen inhibisyonu daha homojen kürlenmeyi destekler. Bu etkileri azaltmak için yüksek boşluk oranlı tasarım, kalın bölgelerin kademeli kürlenmesi ve fotoinitatorlerle ışık soğurmasının yönetimi önerilir (Al Rashid et al., 2021). Ayrıca thio-urethane gibi oligomer katkıları, zincir transferiyle büzülme gerilmelerini düşürürken tokluk ve modülü artırabilir (Caldas et al., 2018).

3.5. Çevresel Etkiler

Saf reçinelerin mekanik davranışı; nem, çözücü teması ve sıcaklık ile değişir. Hidrofilik monomer içeren ağlarda su emilimi hidrolitik yumuşamaya ve modül düşüşüne yol açarken, kationik epoksi ağlar daha dirençlidir. Alkollü temizlik/yıkama, kürlenmemiş monomer sızıntısı ve yüzey çatlaklarını tetikleyebilir (Cazin et al., 2022). Yüksek sıcaklıkta ısıl yaşlandırma zincir hareketliliğini artırarak sürünmeyi yükseltir; ancak lipoat bazlı dinamik ağlarda topolojik yeniden düzenleme ile termal iyileşme mümkün olabilir (Machado et al., 2024).

3.6. Tipik Mekanik Aralıklar ve Tasarım Rehberi

Çeşitli ticari ve akademik saf reçineler için mekanik özellikler Tablo 4-1'de özetlenmiştir. Tipik akrilat bazlı reçineler post-kür sonrası 40–80 MPa çekme dayanımı ve 1.5–3 GPa elastik modül sunar (Brighenti & Cosma, 2021), çok fonksiyonlu monomer sistemleri ve optimize ağ tasarımları 80–100 MPa aralığında çekme dayanımı sağlayabilir. Tasarımcılar, parça gereksinimlerine göre monomer işlevselliğini, çapraz bağ türünü, katman kalınlığını ve post-kür sürelerini optimize ederek istenen aralığı hedeflemelidir. Yüksek mukavemet gereken uygulamalarda düşük katman kalınlığı ($\leq 25 \mu\text{m}$) ve uzun post-kür süreleri tercih edilmelidir. Elastomerik uygulamalarda ise düşük işlevli monomerler ve çift ağlar ile %100'ün üzerinde kopma

uzaması elde edilebilir (Acosta Ortiz et al., 2025). Çizelge ayrıca geri dönüştürülebilir dinamik ağların, modül ve dayanımın düşmesi pahasına kimyasal olarak onarılabilme özelliği sunduğunu göstermektedir (Machado et al., 2024).

Tablo 4.1. VPP’de kullanılan bazı saf reçinelerin mekanik özellikleri

Malzeme / reçine	Kimyasal yapı / tip	Çekme dayanım ı (MPa)	Elastik modül (GPa)	Kopma uzama sı (%)	Eğilme dayanım ı (MPa)	Eğilme modülü (GPa)	Notlar ve kaynaklar
Formlabs Grey Pro	Dayanıklı akrilat	61 (post-kür)	2.6	13	86	2.2	Yeşil durumda 35 MPa, 1.4 GPa; HDT 77.5 °C (Formlabs , 2024)
Ticari fotopolimer (Polymers 2023)	Akrilat bazlı	52.4	2.1	2.2	—	—	Doğal kauçuk katkısı modülü düşürür; akrilik modifikasyonla mukavemet geri kazanılır (Tessanan et al., 2023)
Akrilat + doğal kauçuk (modifiye)	Çift ağ (kauçuk modifiye)	50.9	~2	>5	—	—	Fonksiyonelize kauçuk eklenmesi süneklik sağlar (Tessanan et al., 2023)
İkili elastomer (P1/P2) Yüksek viskozite eli reçine (LSVP) Yüksek işlevli monomer grubu	Siloksan/ür ethan ikili ağ CN8883N S + ACMO	1.7 (P1) — 7.0 (30 wt% P2)	0.001– 0.024	70– 380	— 75	— 2.17	%15 P2 ile 6.2 MPa ve %200 uzama (Acosta Ortiz et al., 2025) X/Y/Z yönlerinde izotropik eğilme değerleri (Weng et al., 2023)
	Epoksi/akr ilat (AlN çalışması)	30.17	—	—	64.69	—	Düşük işlevli gruplar <1 MPa; yüksek işlevli monomerler dayanımı arttırır (Kuang et al., 2025)
Dinamik lipoat bazlı	Dinamik kovalent ağ	0.9–15.6	0.014– 3.3	—	—	—	Çaprazlayıcı oranı arttıkça modül ve dayanım artar; hidrojen bağları ile 50 MPa’ya ulaşır (Machado et al., 2024).

3.7. Yorulma ve Zaman Bağımlı Davranış

Saf fotopolimer reçineler genelde kırılğan davrandığından, metal ve fiber takviyeli kompozitlere kıyasla

yorulma ve sürünme performansı sınırlıdır. Post-kür öncesi parçalar, tamamlanmamış polimerizasyon nedeniyle daha düşük yorulma ömrü gösterir. VPP ile üretilen akrilatlar da yorulma ömrü yük seviyesi, katman kalınlığı ve baskı yönüne bağlıdır; DLP çalışmalarında dikey basılan ve tam kürlenmiş numunelerin daha uzun ömürlü olduğu ve post-kür süresinin yorulma dayanımını artırdığı raporlanmıştır (Monzón et al., 2017). Sürünmede ise yüksek viskozite ve yüksek çapraz bağ yoğunluğu daha iyi direnç sağlarken, dinamik kovalent ağlar bağ gevşemesi nedeniyle daha yüksek sürünme eğilimi gösterebilir (Machado et al., 2024). Creep testleri, saf reçinelerde sürünmenin kısa sürede plato yapabildiğini; ancak sıcaklık ve nem arttıkça belirgin biçimde büyüdüğünü göstermektedir (Cazin et al., 2022).

4. DOLGU MADDELİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

4.1. Ölçme Standartları ve Test Yöntemleri

Kompozit reçinelerin mekanik davranışları ASTM D638/D ISO 527 çekme testi, ASTM D790 eğme testi, ASTM D256 darbeye dayanım, ASTM D695 basınç testi, nano-sertlik ve depolama modülü ölçümleri için nanoindentasyon ve dinamik mekanik analiz (DMA) gibi yöntemlerle değerlendirilir (Korcušková, Lepcio, & Jančář, 2025). Seramik içeren VPP parçalarının sıkıştırma dayanımı, sinterlenmiş örnekler üzerinde ölçülür. Metal oksit nanopartikülleriyle zenginleştirilmiş akrilat ve epoksi kompozitlerde nano-sertlik (Hnano) ve depolama modülü (E') gibi parametreler kullanılmaktadır (Korcušková et al., 2025). Çekme ve eğme testlerinde numune oriyantasyonunun ve foto-kür sonrası ısı işlemlerin etkisi dikkate alınmalıdır. Bazı kompozitler katman yönünden bağımsız performans hedeflediğinden numunelerin farklı baskı yönlerinde test edilmesi önerilir.

4.2. Dolgu Tasarımı, Hacim Fraksiyonu ve Ağ Mimarisi

Dolgu maddeleri, mikron-boyutlu seramik/metal oksit parçacıkları, karbon temelli nanoyapılar (grafen, grafen oksit (GO), karbon nanotüp (CNT), grafitik karbon nitrür (GCN)), serbest lifler (cam veya karbon elyafı) ve doğal biyopolimerler (lignin, kitosan/chitin nanowhiskerleri) gibi geniş bir yelpazeye sahiptir. Dolgu seçimi ve yüzey modifikasyonu, dolgu yükleme oranı (genellikle ağırlıkça %0.1–5 veya hacimce %40–60), reçine bileşimi ve kür koşulları mekanik performansı belirler.

Metal oksit nanopartikülleri: TiO_2 , Ag-TiO_2 ve ZnO nanopartikülleri içeren akrilat/epoksi kompozitler; %1 TiO_2 takviyesi urethan-akrilat reçinesinin çekme dayanımını 23.4 MPa'dan 47.4 MPa'ya, nano-sertliğini 0.126 GPa'dan 0.226 GPa'ya ve depolama modülünü 1.51 GPa'dan 1.83 GPa'ya yükseltmiştir (Korcušková et al., 2025). Ag-TiO_2 nanopartikülleri %1 yüklemede akrilat reçinesinde eğilme dayanımını 42 MPa'dan 70.7 MPa'ya çıkarmıştır (Korcušková et al., 2025). TiO_2 nano parçacıkları içeren epoksi-akrilat sistemlerinde %0.25 yüklemede çekme dayanımı 25.3 MPa'dan 47.8 MPa'ya ve eğilme dayanımı 68.8 MPa'dan 73.1 MPa'ya yükselmiştir (Korcušková et al., 2025). ZnO takviyesi %0.1 yüklemede akrilat reçinenin çekme dayanımını 48.4 MPa'dan 54.1 MPa'ya çıkarırken yüksek yüklemelerde (2.5 wt %) dayanımı 11.7 MPa'a düşürmüştür (Korcušková et al., 2025).

Karbon temelli nano-dolgu maddeleri: PLA-PUA karışımına %0.5 grafen eklenmesi çekme dayanımını %62 artışla 68 MPa'a, eğilme dayanımını 115 MPa'a ve eğilme modülünü 5.8 GPa'a yükseltmiştir (Shah et al., 2023). UDMA matrise 1–3 wt % gümüş-halloysit nanotüp (Ag-HNT) eklenmesi eğilme dayanımını %25 artışla 105 MPa'a ve eğilme modülünü 2.3 GPa'a çıkarmıştır (Shah et al., 2023). GO ilavesi metakrilat ve

poliüretan reçinelerde çekme dayanımını 60 MPa'a, basınç dayanımını 76 MPa'a ve Young modülünü 1.4 GPa'a yükseltmiş, kırılma tokluğunu %186 oranında iyileştirmiştir (Shah et al., 2023). Ticari gri reçineye %0.1 GO eklendiğinde post-kür sonrası çekme dayanımı 88 MPa'a ve modül 2.18 GPa'a çıkmıştır; ancak solvent içeren karışımlar bu kazancı azaltmaktadır (Shah et al., 2023). Karbon nanotüp katkılı Spot-HT ABS fotopolimerinde %0.25 CNT yüklemesi çekme dayanımını 48 MPa'a (yaklaşık %70 artış) ve uzamayı %20'ye yükseltmiştir; modül 0.885 GPa olarak ölçülmüştür[52]. Grafitik karbon nitrür dolgulı epoksi akrilat reçinesi %0.02 dolgu oranında çekme dayanımını 75.56 MPa'a ve modülü 3.396 GPa'a (yaklaşık %22 ve %34 artış) yükseltmiş, daha yüksek yüklemeler ise aglomerasyon nedeniyle performansı düşürmüştür (Ko, 2024).

Doğal biyopolimer dolgu maddeleri: Lignin, reçineye düşük oranda eklendiğinde hem sürdürülebilirlik sağlar hem de mekanik performansı artırır. Methakrilat bazlı reçineye %0.2–0.4 yumuşak odun lignini eklenmesi çekme dayanımını 30.7 MPa'dan 46.1–49.6 MPa'a ve Young modülünü 1.74 GPa'dan 2.20–2.25 GPa'a yükseltmiştir (Zhang, Li, Hao, & Ragauskas, 2019). Kitosan/chitin nanowhisikerleri (CNWs) ile takviye edilmiş methakrilat reçinesi, %1 CNW yüklemesinde çekme dayanımını 32 MPa'dan 46 MPa'a ve Young modülünü 0.8 GPa'dan 1.4 GPa'a yükseltmiştir (Maalihan, Pajarito, & Advincula, 2020). Daha yüksek yüklemeler (>1.5 wt %) aglomerasyon nedeniyle dayanımı azaltmaktadır (Maalihan et al., 2020).

Seramik ve diğer dolgu maddeleri: Fotopolimer içine hidroksiapatit veya titanat gibi seramiklerin yüksek hacimlerde doldurulması mekanik dayanımı belirgin şekilde artırırken, reçinenin akışkanlığını düşürür. Potasyum titanat lifleriyle takviyeli akrilik reçinelerde optimum dolgu oranı %1 olup eğilme dayanımı 36.6 MPa ve çekme dayanımı 18.2 MPa olarak

ölçülmüştür; 1.5 wt % dolgu ve poli(etilen glikol) dispersan içeren karışımlar eğilme dayanımını 38.9 MPa'a yükseltmiştir (Choi et al., 2024). Seramik tozlarının 40–50 vol %'a kadar doldurulduğu hidroksiapatit kompozitleri sinterlenmiş halde 36.5 MPa eğilme ve 161.9 MPa sıkıştırma dayanımı göstermiştir (Shah et al., 2023). Bu yüksek katı oranları hacim büzülmesini azaltır ancak sinterleme sonrası gözeneklilik ve çatlak kontrolü gerektirir.

Ticari kompozit reçineler: Seramik partiküller ve cam elyafı içeren ticari mühendislik reçinesi Liqcreate Composite-X, UV kürlenmiş durumda 50–75 MPa çekme dayanımı, 7.5–8.5 GPa modül ve 140–150 MPa eğilme dayanımı sergiler; termal kür sonrası bu değerler 70–85 MPa, 8.5–9.5 GPa ve 150–170 MPa'a yükselir (Liqcreate, n.d.). Fortify High-Temperature & Strength (HTS) kompozit reçinesi 90 MPa çekme dayanımı, 7.4 GPa Young modülü, %1.8 uzama ve 104 MPa eğilme dayanımı ile 300 °C'nin üzerinde ısı sapma sıcaklığı sunar (Fortify, 2022).

4.3. Tabakalar Arası Bağ ve Anizotropi

Dolgu maddeleri ışık nüfuzunu düşürerek kısmi kürlenmeye neden olabilir; bu da katman bağıni zayıflatır ve anizotropiyi artırır. Yüksek modüllü parçacıklar katmanlar boyunca gerilme yığılması oluşturup çatlak başlatabilir. Özellikle CNT ve grafen gibi yüksek soğurmalı dolgular penetrasyonu güçlü biçimde sınırladığından, optimum yükleme çoğu kez %0.1–0.5 aralığında kalır (Shah et al., 2023). Buna karşılık iyi dağılmış nano-dolgular (GO, GCN, CNW) daha izotropik güçlendirme sağlayarak yönlenmeye bağlı mukavemet farklarını azaltabilir; kitosan nanowhiskeyer takviyesi de baskı kararlılığı ve boyutsal doğruluğu koruyabilmiştir (Maalihan et al., 2020).

Seramik ve metal oksit dolgular ise yüksek kırılma indisleriyle kür derinliğini azaltır; bu nedenle daha ince katman

ve daha yüksek enerji yoğunluğu gerekir. Fiber takviyeli reçinelerde lifler baskı yönünde dayanımı artırırken, diğer yönlerde zayıflık sürebilir; bu yüzden karbon/cam elyafı VPP’de homojen dağılım ve reçine–lif ara yüzeyi optimizasyonu kritik görülmektedir.

4.4. Büzülme ve Artık Gerilim

Dolgu maddeleri, polimer ağı içine büzülmeyen katı faz eklenmesi nedeniyle fotopolimerizasyon sonrası hacim büzülmesini azaltır. Bu da artık gerilmeleri ve baskı sonrası deformasyonları azaltır. Seramik kompozitlerinde büzülme neredeyse tamamen dolgu fazı tarafından belirlenir ve çekme gerilmeleri sinterleme sırasında dağıtılır (Shah et al., 2023). Grafen ve nanotüp takviyeleri, polimer ağının esnekliğini arttırarak çoklu kırılma ve mikro çatlak oluşumunu engeller. Bu olay gerçekleştiğinde artık gerilim azalır. Bununla birlikte, yüksek yüzey alanlı dolgu maddeleri polimerizasyon ısını absorbe ederek bölgesel sıcaklık gradyenleri oluşturabilir ve termal şoklara neden olabilir. Fotoinisitör ve foto-bleachable sistemlerin seçimi ile büzülme kontrolü sağlanmalıdır.

4.5. Çevresel Etkiler

Kompozit reçinelerin çevresel dayanımı, hem matris hem de dolgu türüne bağlıdır. Lignin ve chitin gibi hidrofilik biyopolimer dolgu maddeleri nem emilimini artırarak uzun süreli su maruziyetinde mekanik özelliklerin azalmasına yol açabilir; ancak lignin takviyeli parçalar UV ışına dayanımı ve çizilme direncini artırır (Zhang et al., 2019). TiO_2 , ZnO ve Al_2O_3 gibi metal oksit nanopartikülleri termal iletkenliği yükseltir ve cam geçiş sıcaklığını $71.7\text{ }^\circ\text{C}$ ’den $79.6\text{ }^\circ\text{C}$ ’ye (TiO_2) veya $86.5\text{ }^\circ\text{C}$ ’ye (Ag-TiO_2) yükselterek ısı kararlılığı arttırır (Korcušková, Lepcio, & Jančar, 2025). Liqcreate Composite-X ve Fortify HTS gibi ticari seramik ve cam elyafı takviyeli reçineler $77\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$ arasında ısı sapma sıcaklığına sahip olup yüksek sıcaklık

uygulamaları için kullanılabilir (Liqcreate, n.d.; Fortify, 2022). Chitin nanowhisiker ve lignin takviyeleri termal bozunma sıcaklıklarını birkaç derece yükselterek yapısal stabilite sağlar(Maalihan et al., 2020).

4.6. Tipik Mekanik Aralıklar ve Tasarım Rehberi

Dolgu maddeli kompozitler, saf fotopolimerlere kıyasla çok daha geniş bir dayanım yelpazesi sunar. Çekme dayanımları 50–100 MPa, Young modülleri 2–9.5 GPa ve eğilme dayanımları 70–170 MPa aralığındadır. Bazı yüksek modüllü ticari reçineler 9 GPa'nın üzerinde modül ve 150 MPa'nın üzerinde eğilme dayanımı sunar (Liqcreate, n.d.). Şekil değiştirme kapasitesi genellikle %1–8 arasındadır; doğal lif veya nanoparçacık takviyesi esneklik sağlayabilir. Yüksek katı yüklemeli seramik slurrlilerinde (40–60 vol %) sinterlenmiş parçaların basma dayanımı 160 MPa'a ulaşır (Shah et al., 2023).

Optimum dolgu oranı: Nano-dolgu maddeleri için %0.1–1 ağırlık % aralığı çoğu zaman maksimum mekanik iyileştirme sağlar; daha yüksek oranlar aglomerasyon nedeniyle dayanımı azaltır(Maalihan et al., 2020; Korcušková et al., 2025). Seramik partiküller için %40–60 hacim oranı arzu edilen modül artışını sağlar ancak viskoziteyi yükseltir, bu nedenle reoloji modifikatorleri ve karıştırma teknikleri kullanılmalıdır (Shah et al., 2023).

Yüzey modifikasyonu ve dispersiyon: Grafen, GCN, titanat ve lignin gibi dolgu maddeleri yüzey fonksiyonelleştirme (silanizasyon, polimer graftlama) veya dispersan (PEG, PVP) kullanımı ile homojen dağılmalıdır; bu sayede matris ile güçlü bağlar oluşur ve mekanik kazanç en üst düzeye çıkar (Choi et al., 2024).

Kür stratejileri: Dolgu maddeleri ışığı soğurduğundan kür derinliği azalır; bu nedenle daha kısa katman kalınlıkları (≤ 50 μm), yüksek güçte ışık kaynakları, foto-bleachable başlatıcılar ve

gri tonlama/dark-time teknikleri kullanılarak tam kür sağlanmalıdır (Choi et al., 2024).

Geometrik tasarım: Katmanlar arası bağlanmayı artırmak için yükleme yönü mümkün olduğunca katman düzlemi ile hizalanmalı, fillet ve yarıçap kullanılarak gerilme yoğunlaşmaları azaltılmalıdır (Choi et al., 2024).

Çevresel stabilite: Uygulama ortamına göre uygun dolgu seçimi yapılmalıdır; hidrofobik metal oksitler ısı ve kimyasal dayanım sağlar; lignin ve chitin gibi hidrofilik dolgu maddeleri biyomedikal uygulamalarda tercih edilir ancak nem emilimi kontrol edilmelidir (Choi et al., 2024).

4.7. Yorgunluk, Sürünme ve Zamanla Değişen Davranış

Dolgu maddeli kompozitlerin yorulma ve sürünme davranışları hakkında literatürde sınırlı veri bulunmaktadır. Nano-lif ve nanoyapı dolgular, zincir hareketini kısıtlayarak uzun süreli sürünme deformasyonunu azaltır ve yorulma ömrünü uzatır. Örneğin chitin nanowhiskeyer takviyeli methakrilat kompozitler daha yüksek çekme tokluğu ve iyileştirilmiş modül sayesinde yorulma çatlaklarının ilerlemesine karşı direnç gösterir (Maalihan et al., 2020). Çoğu ticari kompozit reçine için yorulma verileri bulunmasa da yüksek modül ve düşük uzama, ömür boyu yükleme altında gerilme yığılmalarını artırabilir. Bu nedenle uygulamaya göre test edilmesi önerilir.

Tablo 5.1. Vat fotopolimerizasyonunda kullanılan bazı dolgu maddeli kompozit reçinelerin mekanik özellikleri

Matris/dolgu sistemi	Dolgu oranı	Çekme dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme modülü (GPa)	Diğer özellikler	Kaynak
Urethan-akrilat + TiO ₂ NPs	1 wt %	47.4 (23.4)	—	—	—	Nano-sertlik 0.226 GPa; Tg 79.6 °C	(Korcuşková et al., 2025)
Akrilat + Ag-TiO ₂ NPs	1 wt %	44.7 (27.8)	—	70.7 (42.0)	—	Depolama modülü 1.95 GPa; Tg 86.5 °C	(Korcuşková et al., 2025)
Epoksi-akrilat + TiO ₂ NPs	0.25 wt %	47.8 (25.3)	—	73.1 (68.8)	—	—	(Korcuşková et al., 2025)
PLA-PUA + grafen	0.5 wt %	68	5.8	115	—	Tensil dayanımında %62 artış	(Shah et al., 2023)
UDMA + Ag-HNT	1–3 wt %	—	2.3	105	2.3	+25 % eğilme artışı	(Shah et al., 2023)
Metakrilat + GO	0.5 wt %	60	1.4	—	—	Basınç dayanımı 76 MPa; tokluk +186 %	(Shah et al., 2023)
Ticari gri reçine + GO	0.1 wt %	88	2.18	—	—	Post-kür sonrası; solventli karışımında düşer	(Shah et al., 2023)
Polyüretan + grafen levha	0.5 wt %	69.3	—	—	—	PANI ile karşılaştırıldığında yüksek dayanım	(Shah et al., 2023)
Spot-HT ABS + CNT	0.25 wt %	48	0.885	—	—	Uzama %20; modül artışı	(Shah et al., 2023)
GCN/epoksi-akrilat	0.02 wt %	75.6	3.396	—	—	%22 dayanım, %34 modül artışı	(Ko, 2024)
Lignin/metakrilat	0.2–0.4 wt %	46.1–49.6 (30.7)	2.20–2.25 (1.74)	—	—	Post-kürlü; sürdürülebilir dolgu	(Zhang et al., 2019)
Methakrilat + CNW (chitin)	1 wt %	46 (32)	1.4 (0.8)	—	—	Uzama %8.4; daha yüksek yüklemde düşer	(Maalihan et al., 2020)
Potasyum titanat + akrilik	1 wt %	18.2	—	36.6	—	1.5 wt % + PEG: 38.9 MPa eğilme, 15 MPa çekme	(Choi et al., 2024)

Matris/dolgu sistemi	Dolgu oranı	Çekme dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme modülü (GPa)	Diğer özellikler	Kaynak
HDDA + hidroksiapatit (sinterli)	40–50 vol %	–	–	36.5	–	Sıkıştırma dayanımı 161.9 MPa; sinterleme gerekir	(Shah et al., 2023)
Liqcreate Composite-X	Seramik ve cam fiber	50–85	7.5–9.5	140–170	7.5–9.5	Elongasyon %1; HDT 77–86 °C	(Liqcreate, n.d.)
Fortify HTS/dijital tooling	Cam ve seramik; yüksek sıcaklık	90	7.4	104	5.2–7.4	%1.8 uzama; HDT >300 °C	(Fortify, 2022)

Not: Parantez içindeki değerler saf reçinenin özelliğini göstermektedir.

5. KARŞILAŞTIRMA, TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. Saf Reçineler ile Dolgu Maddeli Kompozitlerin Mekanik Performansının Karşılaştırılması

Saf akrilat veya epoksi tabanlı reçineler yüksek çözünürlük ve pürüzsüz yüzey kalitesi sağlayan temel malzemelerdir. Tipik olarak 50–100 µm katman kalınlığında yazdırıldıklarında çekme dayanımları 30–60 MPa ve elastisite modülleri 1–3 GPa civarındadır (Al Rashid et al., 2021; Brighenti & Cosma, 2021). Hibrit (tiyol-en veya thio-urethane modifiyeli) ağlar kullanıldığında büzülme gerilmeleri azalır ve tokluk ile yorulma direnci artar. Bununla birlikte modül ve dayanım artışı sınırlıdır (Al Rashid et al., 2021; Brighenti & Cosma, 2021; Li et al., 2009; Fu et al., 2019; Caldas et al., 2018; Bacchi et al., 2018).

Kompozit reçinelerde ise seramik, metal oksit ve karbon temelli dolgu maddelerinin eklenmesi elastik modül, cam geçiş sıcaklığı (T_g) ve ısıl sapma sıcaklığı (HDT) gibi değerleri kayda değer biçimde yükseltir. Tipik mekanik aralıklar çekme dayanımı

50–100 MPa, Young modülü 2–9.5 GPa ve eğilme dayanımı 70–170 MPa olarak rapor edilmiştir (Liqcreate, n.d.). Yüksek modüllü ticari kompozitlerde modül 9 GPa’ın üzerine ve eğilme dayanımı 150 MPa’ın üzerine çıkmaktadır (Liqcreate, n.d.). Bu iyileştirmeler özellikle TiO₂, Ag-TiO₂, ZnO gibi metal oksit nanopartiküllerinin, grafen veya grafen oksit gibi karbon bazlı nanoyapıların düşük yüklemelerde (0.1–0.5 ağırlık-%) kullanılmasıyla sağlanmaktadır (Shah et al., 2023; Ko, 2024; Korcušková et al., 2025).

ZnO eklenen akrilat sistemlerinde %2.5 yüklemde çekme dayanımı 11.7 MPa’a gerilemiş, optimum yüklemenin %0.1 civarında olduğu gösterilmiştir (Korcušková et al., 2025). Benzer şekilde grafen takviyesi %0.5 oranında çekme dayanımında %45 artış sağlarken daha yüksek oranlarda aglomerasyon nedeniyle kazanç düşmektedir (Shah et al., 2023; Ko, 2024).

Dolgu maddeleri ayrıca polimerizasyon büzülmesini azaltarak boyutsal kararlılığı iyileştirir. Saf akrilat ağlarında hacim küçülmesi %3–6 arasında iken (Al Rashid et al., 2021; Brighenti & Cosma, 2021), seramik parçacıklarla doldurulmuş sistemlerde büzülme daha düşüktür ve sinterleme sonrası mikro çatlak oluşumu minimuma indirilebilir (Wang et al., 2024; Zheng et al., 2025; Shah et al., 2023; Choi et al., 2024). Diğer taraftan, doğal lignin veya kitosan gibi biyopolimer dolgular nem emilimini artırarak uzun süreli ortam etkilerine duyarlılığı yükseltebilir (Zhang et al., 2019; Maalihan et al., 2020).

5.2. Süreç Parametrelerinin Etkilerinin Değerlendirilmesi

Katman kalınlığı, ışık gücü ve poz süresi kür derinliğini ve tabakalar arası bağlanmayı belirler. Saf reçinelerde yüksek çözünürlük için 25–50 µm katman kalınlığı tercih edilmelidir; bu durum büzülme gerilmelerini de düşürür (Guven et al., 2022;

Wang et al., 2024). Kompozitlerde dolgu maddeleri ışığı soğurduğu için daha kısa katman kalınlıkları ($\leq 50 \mu\text{m}$), yüksek enerjili LED'ler ve fotobleachable başlatıcılar gereklidir (Shah et al., 2023; Choi et al., 2024; Maalihan et al., 2020; Korcušková et al., 2025).

Baskı yönelimi anizotropi üzerinde önemli etkiye sahiptir. DLP sistemleriyle üretilen saf reçine parçalarında yatay ve dikey yönler arasında modül farklılıkları rapor edilmiş; post-kür uygulaması bu farkı %5'in altına indirirken pigment içeren reçinelerde anizotropi %16'ya kadar çıkmıştır (Weng et al., 2023; Monzón et al., 2017). Katman düzlemi ile hizalanan lif takviyeli kompozitlerde baskı yönünde mukavemet artarken, diğer yönlerde zayıflama görülmüştür (Wang et al., 2024; Zheng et al., 2025; Shah et al., 2023; Choi et al., 2024). Homojen dispersiyona sahip nano-dolgu maddeleri, katman oryantasyonu kaynaklı mukavemet farklarını azaltarak daha izotropik bir yapı sunabilir (Wang et al., 2024; Zheng et al., 2025; Shah et al., 2023; Choi et al., 2024).

Kür derinliğinin yetersiz olduğu durumlarda ağ tamamlanmadığı için tabakalar arası bağ zayıf kalır ve viskoelastik sürünme artabilir. Uzun süreli UV/termal post-kür, elastik modül ve T_g 'yi yükseltirken aşırı kürlenme malzemenin kırılma hızına neden olur (Al Rashid et al., 2021; Brighenti & Cosma, 2021; Li et al., 2009; Fu et al., 2019; Caldas et al., 2018; Bacchi et al., 2018). Kompozit reçinelerde post-kür sırasında dolgu maddelerinin ısı iletkenliği farklılıkları nedeniyle sıcaklık gradyanları oluşabilir; bu durum çatlak başlatıcı gerilimler yaratabileceğinden kür profili dikkatle optimize edilmelidir (Wang et al., 2024; Zheng et al., 2025; Shah et al., 2023; Choi et al., 2024).

5.3. Tartışma: Güçlendirme Stratejileri ve Tasarım Önerileri

Güç-esneklik dengesi: Saf akrilat veya epoksi reçineler yüksek çözünürlük ve yüzey kalitesi sunarken, çekme dayanımları genellikle 30–60 MPa ile sınırlıdır. Hibrit ağlar ve dinamik kovalent bağlar eklenerek tokluk ve kendini iyileştirme özellikleri artırılabilir (Al Rashid et al., 2021; Brighenti & Cosma, 2021; Li et al., 2009; Fu et al., 2019; Caldas et al., 2018; Bacchi et al., 2018). Kompozitlerde ise uygun oranda (genellikle %0.1–1 ağ.-%) nano-dolgu eklenmesi modül ve dayanımı iki kata kadar artırılabilir (Shah et al., 2023; Ko, 2024; Korcušková et al., 2025). Ancak bu artışlar çoğu zaman süneklik kaybı ve işlenebilirliğin zorlaşması pahasına gerçekleşir.

Işık saçılma ve viskozite: Seramik ve metal oksit dolgu maddelerinin kırılma indisleri yüksek olduğundan ışığı saçma eğilimleri artar; kür derinliği azalır ve anizotropi riski büyür (Wang et al., 2024; Zheng et al., 2025; Shah et al., 2023; Choi et al., 2024). Bu nedenle reçine viskozitesini düşüren seyrelticiler, yüzey fonksiyonelleştirmesi ve vakum altında karıştırma gibi yöntemlerle homojen dispersiyon sağlanmalıdır. Dinamik maske ve gri-tonlama teknikleri kullanılarak poz enerjisi lokal olarak ayarlanabilir, böylece ince detaylarda aşırı kurlenme ve büzülme önlenir (Güven et al., 2022; Wang et al., 2024).

Çevresel ve termal stabilite: Saf akrilat ağları UV ve nem etkilerine duyarlıdır; su emilimi modül düşüşüne ve hidrolize yol açabilir (Cazin et al., 2022). Kompozitlerde TiO_2 , ZnO gibi metal oksitler T_g ve HDT'yi yükselterek ısı dayanımını artırır; lignin ve chitin gibi biyopolimer dolgular UV dayanımı kazandırır da nem emilimini artırır (Zhang et al., 2019; Maalihan et al., 2020).

Tabakalar arası bağ ve anizotropi: Yüksek modüllü dolgu maddeleri gerilme yığılması oluşturarak çatlakların katmanlar boyunca ilerlemesine neden olabilir. Küçük boyutlu nano-dolgu

maddeleri daha izotropik bir güçlendirme sunar ve katman oryantasyonu kaynaklı dayanım farklarını azaltır (Wang et al., 2024; Zheng et al., 2025; Shah et al., 2023; Choi et al., 2024). Baskı yönünün yük taşıma doğrultusuna göre seçilmesi ve post-kür sürelerinin optimize edilmesi anizotropiyi minimuma indirir (Weng et al., 2023; Monzón et al., 2017).

5.4. Sonuçlar ve Geleceğe Dönük Perspektifler

Havuz fotopolimerizasyonu, yüksek çözünürlük ve yüzey kalitesi ile karmaşık geometrileri üretebilen bir eklemeli imalat yöntemi olarak mekanik performans açısından önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Saf fotopolimer reçineler, optimize edilmiş fotokür stratejileri ve hibrit ağ tasarımları ile orta düzeyde mekanik özellikler sunar. Dolgu maddelerinin eklenmesiyle bu sınırlar aşılmakta ve VPP ile üretilen parçalar metallerle yarışabilecek sertlik ve dayanım seviyelerine yaklaşmaktadır.

Gelecekteki araştırmaların odak noktasının, çok malzemeli ve fonksiyonel dereceli yapılar ile volümetrik additif imalat gibi katmansız yöntemlere kayacağı öngörülmektedir. Bu yaklaşımlar, farklı reçine ve dolgu kombinasyonlarının tek bir parçanın içinde ardışık olarak kürlenmesine olanak vererek fonksiyonel bölgeleme sağlayacaktır. Aynı zamanda makine öğrenmesi ve veri odaklı modelleme, fotobaşlatıcı dozunun, katman kalınlığının ve dolgu dağılımının optimum kombinasyonlarını belirlemek için kullanılabilir. Yüzey ve post-proses teknolojilerindeki ilerlemelerle birleştirildiğinde VPP'nin endüstriyel ölçekte güvenilir ve tekrarlanabilir bir üretim yöntemi haline gelmesi beklenmektedir.

Sonuç olarak, bu derleme saf reçineler ve dolgu maddeli kompozitlerin mekanik performansını karşılaştırarak VPP ile üretilen parçaların tasarımında izlenmesi gereken esasları ortaya koymuştur. Uygulama gereksinimleri doğrultusunda malzeme seçimi, süreç optimizasyonu ve post-kür protokollerinin bilinçli

biçimde ayarlanması, VPP teknolojisinin sunduğu potansiyelin tam anlamıyla kullanılmasını sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Acosta Ortiz, R., Hernández Jiménez, A. I., Ku Herrera, J. de J., Yañez Macías, R., & García Valdez, A. E. (2025). Design and performance of 3D-printed hybrid polymers exhibiting shape memory and self-healing via acrylate–epoxy–thiol–ene chemistry. *Polymers*, 17, 2594. <https://doi.org/10.3390/polym17192594>
- Afridi, A., Al Rashid, A., & Koç, M. (2024). Recent advances in the development of stereolithography-based additive manufacturing processes: A review of applications and challenges. *Bioprinting*, 43, e00360. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2024.e00360>
- Al Rashid, A., Khan, S. A., Al-Ghamdi, S. G., & Koç, M. (2021). Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications. *Additive Manufacturing*, 47, 102279. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102279>
- Bacchi, A., Yih, J. A., Platt, J., Knight, J., & Pfeifer, C. S. (2018). Shrinkage / stress reduction and mechanical properties improvement in restorative composites formulated with thio-urethane oligomers. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 78, 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.11.011>
- Brighenti, R., & Cosma, M. P. (2021). Mechanical behavior of photopolymerized materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 153, 104456. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104456>
- Brighenti, R., Cosma, M. P., & Monchetti, S. (2024). Mechanics of polymers obtained by layered photopolymerization. *European Journal of Mechanics / A Solids*, 106, 105323. <https://doi.org/10.1016/j.euomechsol.2024.105323>

- Caldas, R. A., Bacchi, A., Barão, V. A. R., & Versluis, A. (2018). Should adhesive debonding be simulated for intra-radicular post stress analyses? *Dental Materials*, 34, 1331–1341. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.06.025>
- Cazin, I., Gleirscher, M. O., Fleisch, M., Berer, M., Sangermano, M., & Schlögl, S. (2022). Spatially controlling the mechanical properties of 3D printed objects by dual-wavelength vat photopolymerization. *Additive Manufacturing*, 57, 102977. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102977>
- Chen, D., Jin, G., Zhang, Z., Ma, Y., Liu, Y., Lim, J.-H., ... Kim, J.-E. (2025). Effects of silica particle size on the mechanical surface and printing-trueness properties of 3D-printing dental resin. *Scientific Reports*, 15, 35644. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19615-1>
- Chen, K. J., Elkaseer, A., Scholz, S. G., & Hagenmeyer, V. (2024). On the correlation between pre-processing workflow and dimensional accuracy of 3D printed parts in high-precision Material Jetting. *Additive Manufacturing*, 91, 104335. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104335>
- Choi, Y., Kim, J., Lee, C., Lee, G., Hyeon, J., Jeong, S.-K., & Cho, N. (2024). Enhancing the mechanical strength of a photocurable 3D printing material using potassium titanate additives for craniofacial applications. *Biomimetics*, 9, 698. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9110698>
- Dai, J., Luo, K., Liu, Q., Unkovskiy, A., Spintzyk, S., Xu, S., & Li, P. (2024). Post-processing of a 3D-printed denture base polymer: Impact of a centrifugation method on the surface characteristics, flexural properties, and cytotoxicity. *Journal of Dentistry*, 147, 105102. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105102>

- Fu, W., Wang, L., & He, J. (2019). Evaluation of mechanical properties and shrinkage stress of thiol-ene-methacrylate dental composites with synthesized fluorinated allyl ether. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 95, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.03.027>
- Formlabs. (2024, October 7). Grey Pro Resin: Resin for versatile prototyping (Technical data sheet FLPRGR01).
- Fortify. (2022, April). Fortify high temperature & strength (HTS) materials data sheet (RevA) [Data sheet]. Fortify.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Graça, A., Bom, S., Martins, A. M., Ribeiro, H. M., & Marto, J. (2024). Vat-based photopolymerization 3D printing: From materials to topical and transdermal applications. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 19, 100940. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2024.100940>
- Güven, E., Karpat, Y., & Cakmakci, M. (2022). Improving the dimensional accuracy of micro parts 3D printed with projection-based continuous vat photopolymerization using a model-based grayscale optimization method. *Additive Manufacturing*, 57, 102954. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102954>
- Han, D., Yang, C., Fang, N. X., & Lee, H. (2019). Rapid multi-material 3D printing with projection micro-stereolithography using dynamic fluidic control. *Additive Manufacturing*, 27, 606–615. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.031>

- Ko, J. W. (2024). Graphitic Carbon Nitride as Reinforcement of Photopolymer Resin for 3D Printing. *Polymers*, 16(3), 370. <https://doi.org/10.3390/polym16030370>
- Korcušková, M., Lepcio, P., & Jančař, J. (2025). Metal oxide-functionalized photopolymers: A perspective in 3D printing. *ACS Polymers Au*, 5, 458–480. <https://doi.org/10.1021/acspolymersau.5c00065>
- Kuang, N., Liu, Y., Zhao, W., & Wu, J. (2025). Experimental study of photopolymer resin composition for AlN ceramic 3D printing. *Polymers*, 17, 2344. <https://doi.org/10.3390/polym17172344>
- Lee, B. J., Hsiao, K., Lipkowitz, G., Samuelsen, T., Tate, L., & DeSimone, J. M. (2022). Characterization of a 30 μm pixel size CLIP-based 3D printer and its enhancement through dynamic printing optimization. *Additive Manufacturing*, 55, 102800. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102800>
- Liqcreate. (n.d.). Liqcreate Composite-X: An extremely rigid and high performance reinforced nano-micro composite resin for stereolithography (SLA), digital light processing (DLP) and masked stereolithography (LCD/MSLA) [Data sheet]. Liqcreate.
- Li, Q., Zhou, H., & Hoyle, C. E. (2009). The effect of thiol and ene structures on thiol–ene networks: Photopolymerization, physical, mechanical and optical properties. *Polymer*, 50, 2237–2245. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.03.026>
- Li, Y., Wang, W., Wu, F., & Kankala, R. K. (2023). Vat polymerization-based 3D printing of nanocomposites: A mini review. *Frontiers in Materials*, 9, 1118943. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1118943>

- Maalihan, R. D., Pajarito, B. B., & Advincula, R. C. (2020). 3D-printing methacrylate/chitin nanowhiskers composites via stereolithography: Mechanical and thermal properties. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1819–1824. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.063>
- Machado, T. O., Stubbs, C. J., Chiaradia, V., Alraddadi, H., Brandolese, A., Worch, J. C., & Dove, A. P. (2024). A renewably sourced, circular photopolymer resin for additive manufacturing. *Nature*, 629, 1069–1074. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07399-9>
- Monzón, M., Ortega, Z., Hernández, A., Paz, R., & Ortega, F. (2017). Anisotropy of photopolymer parts made by digital light processing. *Materials*, 10, 64. <https://doi.org/10.3390/ma10010064>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Piedra-Cascón, W., Krishnamurthy, V. R., Att, W., & Revilla-León, M. (2021). 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review. *Journal of Dentistry*, 109, 103630. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103630>
- Shah, M., Ullah, A., Azher, K., Rehman, A. U., Wang, J., Aktürk, N., ... Salamci, M. U. (2023). Vat photopolymerization-based 3D printing of polymer nanocomposites: Current trends and applications. *RSC Advances*, 13, 1456–1496. <https://doi.org/10.1039/d2ra06522c>

- Tessanan, N., Daniel, S., & Phinyocheep, P. (2023). Mechanical properties' strengthening of photosensitive 3D resin in lithography technology using acrylated natural rubber. *Polymers*, 15, 4110. <https://doi.org/10.3390/polym15204110>
- Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- Wang, H., Lai, Q., Zhang, D., Li, X., Hu, J., & Yuan, H. (2025). A systematic study on digital light processing 3D printing of 0-3 ceramic composites for piezoelectric metastructures. *Research*, 8, Article 0595. <https://doi.org/10.34133/research.0595>
- Wang, L., Wu, H., Guo, A., Kong, D., Zhao, Z., Liu, C., ... Wang, D. (2024). Vat photopolymerization of ceramic parts with high carbon fiber additives. *Materials*, 17, 3127. <https://doi.org/10.3390/ma17133127>
- Wang, X., Liu, J., Liu, Y., Zhao, Y., Li, Y., Gilchrist, M. D., & Zhang, N. (2024). High-precision and large-scale vat photopolymerization printing based on "Spatial-Pixel Integration Compensation" method. *Additive Manufacturing*, 92, 104351. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104351>
- Wang, Y., Zhang, Y., Liang, H., & Sun, X. (2024). Optimize projected mask images for improving three-dimensional printing accuracy for digital light processing based vat photopolymerization. *Additive Manufacturing*, 88, 104257. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104257>

- Wang, Z.-H., Zhang, Y.-Z., Miao, W.-J., Wu, F.-B., Wang, S.-Q., Ouyang, J.-H., ... Zou, Y.-C. (2025). Vat photopolymerization-based additive manufacturing of Si₃N₄ ceramic structures: Printing optimization, debinding/sintering, and applications. *Materials*, 18, 1556. <https://doi.org/10.3390/ma18071556>
- Weng, Z., Huang, X., Peng, S., Zheng, L., & Wu, L. (2023). 3D printing of ultra-high viscosity resin by a linear scan-based vat photopolymerization system. *Nature Communications*, 14, 4303. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39913-4>
- Whyte, D. J., Doeven, E. H., Sutti, A., Kouzani, A. Z., & Adams, S. D. (2024). Volumetric additive manufacturing: A new frontier in layer-less 3D printing. *Additive Manufacturing*, 84, 104094. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104094>
- Zakeri, S., Vippola, V., Levänen, E (2020). A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography. *Additive Manufacturing*, 35, 101177. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101177>
- Zhang, F., Zhu, L., Li, Z., Wang, S., Shi, J., Tang, W., Li, N., & Yang, J. (2021). The recent development of vat photopolymerization: A review. *Additive Manufacturing*, 48, 102423. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102423>
- Zheng, H., Zhu, S., Chen, L., Wang, X., Zhang, W., Wang, S., ... Liu, Y. (2025). D printing continuous fiber reinforced polymers: A review of material selection, process, and mechanics-function integration for targeted applications. *Polymers*, 17, 1601. <https://doi.org/10.3390/polym17121601>

- Zhang, L., Li, L., Chen, Y., Pi, J., Liu, R., & Zhu, Y. (2023). Recent advances and challenges in long wavelength sensitive cationic photoinitiating systems. *Polymers*, 15(11), 2524. <https://doi.org/10.3390/polym15112524>
- Zhang, S., Li, M., Hao, N., & Ragauskas, A. J. (2019). Stereolithography 3D printing of lignin-reinforced composites with enhanced mechanical properties. *ACS Omega*, 4, 20197–20204. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02455>

APPLICATION OF TUNED MASS DAMPER IN HELICOPTER GROUND RESONANCE CONTROL

Hüseyin AGGÜMÜŞ¹

1. INTRODUCTION

One of the critical instability problems encountered by helicopters is ground resonance, which originates from the coupling (interaction) between the rotor and fuselage dynamics (coleman1958). This phenomenon can reach high-amplitude destructive vibration levels within a short period at certain rotor speeds (ormiston1991). The Coleman transformation transfers the blade lag motions from the rotating coordinate system to fixed coordinates, enabling their decomposition into mean and periodic components. Among these components, particularly the regressive lag mode plays a determining role in the formation of critical frequency regions due to its interaction with fuselage modes (Johnson, 1980; Hammond, 1974).

There are active, semi-active, and passive control applications for these systems. Among these control solutions, elastomeric lag dampers are commonly used; however, limitations such as temperature sensitivity and material aging emerge as disadvantages (gandhi1994). Magnetorheological (MR) dampers can generate real-time variable forces, but they have disadvantages of cost and system complexity (zhao2004; spencer1997). Active control systems provide high performance.

¹ Asst. Prof. Dr., Şırnak University, Şırnak Vocational School, Department of Machine and Metal Technologies, ORCID: 0000-0002-7158-677X.

However, their application area remains limited due to power consumption and safety concerns (friedmann2004; kurt2018).

Tuned mass dampers (TMD) were first proposed by Frahm and classically formulated by Den Hartog. It is an advantageous passive control application in terms of simplicity and cost-effectiveness. (denhartog1956; rahimi2020). This technology is widely used in structural engineering, while in aviation applications, it remains more limited due to weight constraints. Its application to the helicopter ground resonance problem is a current research area in the literature (cinquemani2017).

Within the scope of this study, the 5-degree-of-freedom (5-DOF) rotor-fuselage model of the helicopter has been adopted. (coleman1958; ormiston1991; johnson1980); In this model used, the lag hinge offset and blade moment of inertia have been taken into account (Coleman, 1958; Johnson, 1980). Numerical modeling was performed through the LTP/LPTV form, obtained by linearization around the small-angle assumption (hammond1974; jhinaoui2014). The main objective here is to numerically analyze the effect of TMD application on ground resonance control

2. MATHEMATICAL MODEL AND TMD DESIGN

The rotor-fuselage system in this study is expressed with a 5-degree-of-freedom model consisting of a rigid fuselage moving in the lateral direction on the landing gear (y ; 1-DOF) and lag coordinates of four blades hinged to the rotor center ($\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$; 4-DOF) (coleman1958; ormiston1991; johnson1980). Here, β_i ($i = 1, \dots, 4$) represents the lead-lag angle (radians) of the i -th blade.

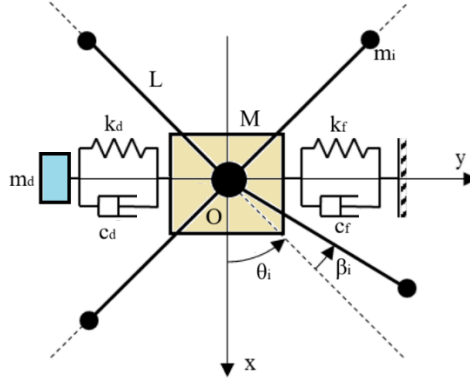


Figure 1. Schematic representation of rotor-fuselage system and TMD

The azimuth angle and blade center of mass position for each blade are given in Equation 1 and Equation 2, respectively.

$$\theta_i(t) = \Omega t + \phi_i, \quad \phi_i = (i - 1) \frac{\pi}{2}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

$$r_x = L \cos(\theta_i + \beta_i), \quad r_y = y + L \sin(\theta_i + \beta_i) \quad (2)$$

Here, L is the equivalent radius of the blade center of mass from the rotor hub (coleman1958). The blade center of mass velocity is as given in Equation 3.

$$v_i = \sqrt{[-L(\Omega + \dot{\beta}_i) \sin(\theta_i + \beta_i)]^2 + [\dot{y} + L(\Omega + \dot{\beta}_i) \cos(\theta_i + \beta_i)]^2} \quad (3)$$

By applying Lagrange equations to the kinetic, potential, and dissipation functions of the system without TMD (coleman1958; johnson1980), the fuselage equation of motion is obtained as follows.

$$(M + 4m)\ddot{y} + c_f \dot{y} + k_f y + mL \sum_{n=1}^4 [\ddot{\beta}_n \cos(\theta_n + \beta_n) - (\Omega + \dot{\beta}_n)^2 \sin(\theta_n + \beta_n)] = Q_f \quad (4)$$

The lead-lag equation for each blade ($i=1,2,3,4$) (coleman1958; johnson1980):

$$mL^2 \ddot{\beta}_i + C_\phi \dot{\beta}_i + K_\phi \beta_i + mL \ddot{y} \cos(\theta_i + \beta_i) = Q_i \quad (5)$$

Here, $\theta_i(t) = \Omega t + \phi_i$ is the azimuth angle, $\phi_i = (i - 1)\pi/2$ are the initial phase angles (90° apart for a four-bladed rotor), K_ϕ is the lag spring stiffness (Nm/rad), and C_ϕ is the lag damping coefficient (Nms/rad). Q_f is defined as the external force acting on the fuselage (N), and Q_i is the external moment acting on the i -th blade (Nm) (ormiston1991; johnson1980). In harmonic response analyses, $Q_i = 0$ was taken (coleman1958; ormiston1991).

The fuselage equation obtained with the addition of TMD is as follows.

$$\begin{aligned} (M + 4m)\ddot{y} + c_f \dot{y} + k_f y + mL \sum_{n=1}^4 [\ddot{\beta}_n \cos(\theta_n + \beta_n) \\ - (\Omega + \dot{\beta}_n)^2 \sin(\theta_n + \beta_n)] \\ + c_d (\dot{y} - \dot{y}_d) + k_d (y - y_d) = Q_f \end{aligned} \quad (6)$$

The equation of motion for the TMD is as given in Equation 7.

$$m_d \ddot{y}_d + c_d (\dot{y}_d - \dot{y}) + k_d (y_d - y) = 0 \quad (7)$$

In the numerical solution phase, the small-angle approximation was used to be consistent with the MATLAB implementation. The trigonometric terms were linearized, and the system was reduced to a time-periodic coefficient (LTP/LPTV) model in the form of Equation 8 (hammond1974; jhinaoui2014).

$$\mathbf{M}(t)\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(t)\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}(t)\mathbf{q} = \mathbf{F}(t) \quad (8)$$

Table 1. System parameters

Parameter	Symbol	Value
Fuselage mass	M	2902.9 kg
Blade mass	m	31.9 kg
Number of blades	N_b	4
Blade center of mass radius (equivalent)	L	2.5 m
Lag hinge offset distance	a	0.2 m
Blade moment of inertia	I_z	259.0 kg·m ²

Parameter	Symbol	Value
Landing gear stiffness	k_f	2.7275×10^4 N/m
Landing gear damping	c_f	1.091×10^3 Ns/m
Lag spring stiffness	K_ϕ	1.0313×10^3 Nm/rad
Lag damping	C_ϕ	41.252 Nms/rad
Rotor angular velocity	Ω	4.7 rad/s

In the LTP model, the inertia term ($mL^2 + I_z$) for blade dynamics and the centrifugal effect in lag stiffness ($K_\phi + m\Omega^2 aL$) were included to provide the stiffness effect and correct inertia properties required for realistic rotor dynamics (coleman1958; johnson1980). System parameters are given in Table 1 (coleman1958; jhinaoui2014).

TMD parameters were calculated according to the Den Hartog criterion (denhartog1956; warburton1982):

$$r_{opt} = \frac{1}{1+\mu}, \quad \zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (9)$$

Here, $r = \omega_d/\omega_n$ is the frequency ratio, $\mu = m_d/M_{base}$ is the mass ratio, and ζ is the damping ratio. The main mass was selected as $M_{base} = M + N_b m$.

Table 2. TMD design parameters

Parameter	Value	Unit
Mass ratio (μ)	0.02	–
Main mass (M_{base})	3030.5	kg
TMD mass (m_d)	60.61	kg
Frequency ratio (r)	0.98	–
Damping ratio (ζ_d)	0.12	–
Spring stiffness (k_d)	524	N/m
Damping coefficient (c_d)	43	Ns/m

3. SIMULATION AND SYSTEM RESPONSES

System responses were examined under harmonic force applied to the fuselage (coleman1958; ormiston1991; johnson1980):

$$Q_f(t) = F_0 \sin(\omega_{exc} t) \quad (10)$$

In harmonic analyses, $Q_i = 0$ was taken (coleman1958; ormiston1991). In the numerical simulation, the total duration was selected as $T_{sim} = 30$ s.

In the time domain, the displacement and acceleration responses of the system without TMD (passive) and with TMD are shown in Figure 2.

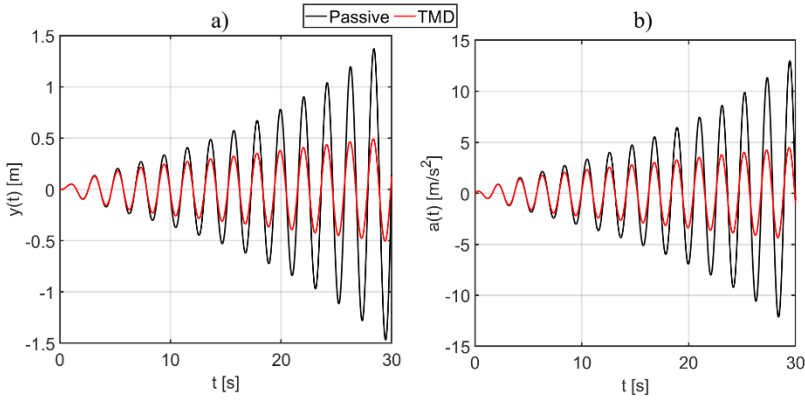


Figure 2. Time domain responses a) Displacement responses, b) Acceleration responses

The simulations showed that the TMD added to the fuselage provided significant reduction in acceleration and displacement responses. This result demonstrated that it is fundamentally consistent with TMD behavior. Additionally, this effect can also be observed in maximum responses.

The system response evaluation in the frequency domain was obtained by taking the solution in the time domain for the excitation frequency and extracting the steady-state amplitudes (sine-sweep approach) (rahimi2020; warburton1982). The TMD effect on the system is shown in Figure 3. It demonstrates that the TMD reduces the peak amplitudes in ground resonance and the system response exhibits stable behavior.

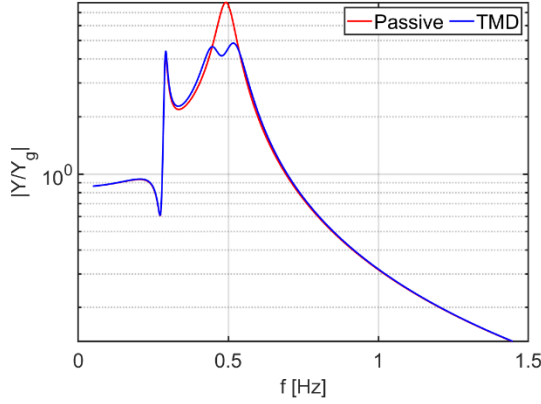


Figure 3. Frequency response functions $|Y/Y_g|$ obtained under base excitation for passive and TMD-equipped systems.

4. CONCLUSIONS AND DISCUSSION

In this study, the effectiveness of TMD technology in helicopter ground resonance control was demonstrated through numerical simulations. TMD parameters calculated based on the Den Hartog approach were used to analyze system responses under harmonic excitation. Approximately 48-52% reduction was achieved in fuselage acceleration and displacement amplitudes. In frequency domain evaluations of the TMD, the resonance peak was observed to be reduced, and effective damping was provided in a $\pm 15\%$ bandwidth around the frequency.

The use of TMD in ground resonance control offers a viable passive control alternative in terms of simplicity and cost-effectiveness. In future studies, experimental validation and integration of semi-active/adaptive solutions are recommended.

REFERENCES

- Cinquemani, S., Braghin, F., Resta, F. (2017). Semiactive tuned mass damper control strategy via magnetorheological actuators. *Journal of Vibration and Control*, 23(16), 2795–2809. doi:10.1177/1077546315616046
- Coleman, R. P., Feingold, A. M. (1958). Theory of self-excited mechanical oscillations of helicopter rotors with hinged blades. NACA Report, 1351.
- Den Hartog, J. P. (1956). *Mechanical Vibrations* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Friedmann, P. P. (2004). Rotary-wing aeroelasticity: Current status and future trends. *AIAA Journal*, 42(10), 1953–1972.
- Gandhi, F., Chopra, I. (1994). An analytical model for a nonlinear elastomeric lag damper and its effect on aeromechanical stability in hover. *Journal of the American Helicopter Society*, 39(4), 59–69.
- Hammond, C. E. (1974). Stability/instability prediction for ground resonance using Floquet theory (time-periodic systems). *Journal of the American Helicopter Society*, 19(4), 14–23.
- Jhinaoui, A., Mevel, L., Morlier, J. (2014). A new SSI algorithm for LPTV systems: Application to a hinged-bladed helicopter. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1–2), 152–166. doi:10.1016/j.ymssp.2013.07.025
- Johnson, W. (1980). *Helicopter Theory*. Princeton University Press.
- Kurt, İ. (2018). Active control of helicopter ground resonance with lead-lag actuators. *International Journal of Engineering Science and Application*, 2(3), 83–87.

- Ormiston, R. A. (1991). Rotor-fuselage dynamics of helicopter air and ground resonance. *Journal of the American Helicopter Society*, 36(2), 3–20.
- Rahimi, F., Aghayari, R., Samali, B. (2020). Application of tuned mass dampers for structural vibration control: A state-of-the-art review. *Civil Engineering Journal*, 6(8), 1622–1651. doi:10.22034/CEJ.2020.248058.1742
- Spencer, B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., Carlson, J. D. (1997). Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(3), 230–238.
- Warburton, G. B. (1982). Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(3), 381–401.
- Zhao, Y., Choi, Y. T., Wereley, N. M. (2004). Semi-active damping of ground resonance in helicopters using magnetorheological dampers. *Journal of the American Helicopter Society*, 49(4), 468–482.

DESIGN AND APPLICATION OF A PLC-BASED VIBRATORY STRESS RELIEF SYSTEM¹

Can GÖNENLİ²

Okan DUYMAZLAR³

Emre ERCAN⁴

Çetin AKA⁵

1. INTRODUCTION

Vibratory Stress Relief (VSR) is a method used to reduce residual stresses formed in the internal structures of metal parts, particularly those that have been welded, machined, or heat treated (Walker, Waddell, & Johnston, 1995). While conventional stress relief methods require high-temperature ovens, long processing times, and significant energy consumption, the VSR process is based entirely on mechanical vibration, which makes it a lower-cost, faster, and easily integrated solution for manufacturing applications. In this regard, VSR has become an increasingly popular method for industrial applications requiring stress relief of large-volume parts (Claxton, 1991; Gao et al., 2025).

¹ This work was supported by Ege University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: 32402.

² Assoc. Prof. Dr., Ege University, Ege Vocational School, Mechanical and Metal Technologies, ORCID: 0000-0001-9163-1569.

³ Lecturer, Ege University, Ege Vocational School, Mechatronics, ORCID: 0000-0002-1327-7493.

⁴ Prof. Dr., Ege University, Ege University, Civil Engineering Department, ORCID: 0000-0001-9325-8534.

⁵ Res. Asst. Dr., Dokuz Eylül University, Department of Textile Engineering, ORCID: 0000-0003-0170-2322.

The basic operating principle of a VSR system is to apply vibration to the workpiece over a wide frequency range via a vibration motor and to measure the dynamic response of the workpiece during this process (Munsi, Waddell, & Walker, 2001). When the natural frequencies of the workpiece are observed, the vibration amplitude increases significantly, indicating that the resonance region has been reached. Controlled vibration applied at the resonance region rearranges irregularities in the crystal structure within the part, thereby reducing residual stresses. Typically, a VSR system consists of the following main components:

- **Vibration motor and frequency driver:** A variable frequency drive that applies controlled vibration energy to the part and operates the motor within specific frequency ranges.

- **Control Unit (PLC or Microcontroller):** The main control unit that manages the vibration scanning process, provides frequency reference to the motor driver, and processes sensor data.

- **Vibration Sensor (Accelerometer):** A sensor that measures the dynamic vibration amplitude of the part and monitors resonance responses in real time.

- **Data Acquisition and Processing Software:** A software component that records sensor data, analyzes resonance frequencies, and performs post-processing reporting.

Within the scope of this study, a PLC-based VSR system, schematically shown in Figure 1, was designed; frequency scanning, sensor signal processing, data recording, and resonance analysis were performed in a single automation architecture.

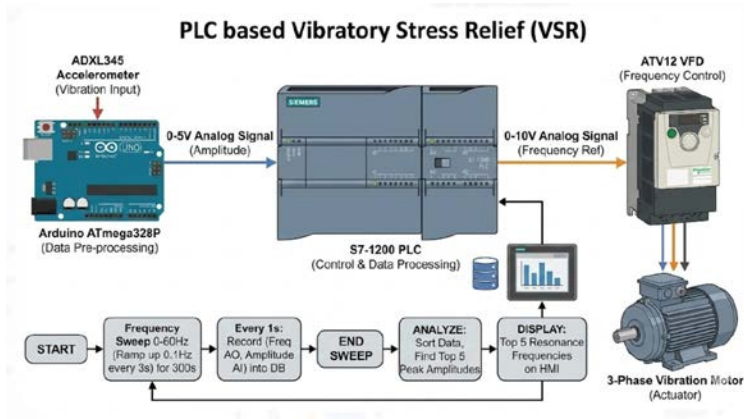


Figure 1. Schematic of PLC-based VSR System

2. MATERIAL AND METHOD

In this study, a PLC (Programmable Logic Controller) was chosen as the main controller for the VSR system's control and data acquisition structure, taking into account industrial reliability, electromechanical durability, and real-time control requirements (Alphonsus & Abdullah, 2016). A PLC offers advantages such as high stability, strong input/output isolation, industrial communication protocols, and uninterrupted operation in field conditions, making it an ideal platform for tasks such as frequency scanning, analog output generation, and user interaction in a VSR application (M. Engin & Engin, 2015). The PLC's deterministic control cycle provides a significant advantage, particularly for the precise control of the motor driver's frequency reference and the synchronized execution of the scanning process (D. Engin, Engin, Pinar, & Candan, 2021).

However, the analog input reading speeds of PLCs are typically limited to a few samples per second, which is insufficient for vibration sensors (accelerometers) that require a high sampling frequency. The ADXL345 accelerometer used in

this study can generate data at a sampling rate of 200 Hz, which is necessary for vibration analysis (Anggana & Solikin, 2025; Johari, Chee, Mohd. Hashim, Golutin, & Dayou, 2023). Since the PLC cannot directly collect and process raw data at this speed, the sensor signal is first transmitted to an ATmega328P-based microcontroller.

Microcontroller reads high-speed raw data from the accelerometer, performs filtering and amplitude calculations using root mean square (RMS), and transmits the calculated vibration amplitude values to the PLC as an analog 0–5 V signal once per second. Through this structure, the data, which is preprocessed in a suitable way for vibration analysis, is reliably transmitted within the PLC's own data reading speed boundaries.

2.1. PLC-based VSR System Hardware Components

PLC-based VSR system developed in this study is based on an automation architecture in which multiple hardware components work together to drive the vibration motor in a controlled manner, process high-speed sensor data, and execute the scanning process reliably. The system's core components and hardware are configured specifically for the VSR system.

- **PLC:** It is the main control unit of the system. The internal analog inputs of the Siemens S7-1200 Series used in this study were used to receive sensor data processed by the microcontroller. However, since the 0–10 V analog output required for speed control of the motor driver was not available on the PLC, an analog output module that could be directly connected to the PLC from the front panel was added. For this purpose, a 6ES7232-4HA30-0XB0 analog output module was used, which is compatible with the S7-1200. This module controls the driver's frequency reference by providing precise analog voltage output in the 0–10 V range.

- **Motor Driver:** The motor driver used in the system is the Schneider ATV12H075M2 model. This model operates with single-phase input power, yet it is suitable for driving three-phase vibration motors because it can generate a variable frequency between 0–400 Hz at its output. The driver is configured to use an external 0–10 V analog voltage input as the control signal. The voltage value from the PLC analog output module determines the driver's output frequency between 0–60 Hz.

- **Three-Phase Vibration Motor:** An industrial-grade vibration motor operating within a 0–3600 rpm range proportional to the applied frequency. Its eccentric weight design enables it to generate mechanical vibration across a wide frequency band and provides the dynamic energy required for VSR operations.

- **Microcontroller (ATmega328P):** Responsible for processing high-speed vibration data from the ADXL345 accelerometer. Using an ATmega328P-based controller, the high-speed raw data from the sensor is filtered, RMS calculations are performed, and an analog vibration amplitude value obtained from the average of 200 samples collected per second is transmitted as a 0–5 V analog signal to the PLC's analog input. This unit acts as an intermediate layer that pre-processes the sensor data due to the PLC's insufficient analog input speed. Thus, it enables the evaluation of high-speed sensor data despite the PLC's low sampling capacity.

- **Accelerometer (ADXL345):** A digital MEMS-based three-axis accelerometer is connected to the microcontroller via I²C and is capable of reading vibration data at a sampling rate of 200 Hz. It provides adequate sensitivity for detecting sharp increases in vibration amplitude, especially in resonance regions.

2.2. Processing the Sensor Signals

One of the most critical aspects in VSR applications is the ability to accurately and reliably measure the vibration behavior of the workpiece. The ADXL345 accelerometer used in this study was chosen because it is capable of acquiring high-resolution acceleration data in three axes and supports sampling rates up to 200 Hz. However, since it is not possible for a PLC to process such a high data flow directly, the method of first passing the sensor data through a microcontroller, as shown in the representative connection diagram in Figure 2, was preferred.

The ADXL345 sensor is connected to an ATmega328P-based microcontroller via the I²C protocol. The microcontroller collects raw acceleration data from the sensor at a high sampling rate and applies the pre-processing steps necessary to determine the vibration characteristics. During these pre-processing stages, the three-axis acceleration data from the sensor is read at high speed, and a moving average filter is applied to filter out noise. An RMS calculation is performed to produce a single value representing the vibration magnitude for each sampling interval. The processed vibration amplitude, obtained from the average amplitude value, is produced as a single analog signal in the 0–5 V range that the PLC's analog input module can read.

By using this approach, sensor data which requires a high sampling rate is transmitted to the PLC as low-bandwidth but meaningful and processed data. PLC can thus perform resonance analysis by processing only the analog amplitude value updated once per second. This architecture both preserves data integrity and establishes a reliable measurement infrastructure within the hardware limitations of the PLC.

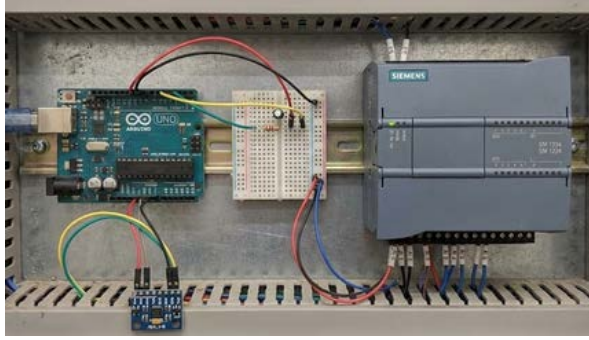


Figure 2. Adxl345 and PLC connection, as representative.

2.3. PLC-based Frequency Scanning Algorithm

In this study, a time-based state machine structure is used on the PLC to accelerate the vibration motor in a controlled manner and collect data simultaneously. The algorithm guarantees that the frequency ramp and data recording processes are executed independently yet synchronously. Thanks to the deterministic operating structure of the PLC, both processes are controlled with millisecond precision, and repeatable results are obtained throughout the scanning cycle.

The frequency scan performed in the VSR system requires not only changing the motor speed but also systematically capturing the vibration response in real time alongside this change. Therefore, data logging on the PLC is controlled by a timing mechanism that operates in parallel with the frequency ramp but is independent of it. These two stages form the basis for the system's ability to accurately identify resonance zones.

The designed main algorithm consists of four sub-algorithms. The variables defined in the PLC program for the operation of the algorithms and real-time data recording are shown in Figure 3.

VSR_Controller_PLC			
	Name	Data type	Default value
1	▼ Input		
2	■ I_Start	Bool	false
3	■ I_Reset	Bool	false
4	■ I_TitreSim_AI_Raw	Int	0
5	■ I_Max_Freq_Hz	Real	0.0
6	■ I_Adim_Sure_S	Time	T#0ms
7	■ I_Adim_Miktar_Hz	Real	0.0
8	■ <Add new>		
9	▼ Output		
10	■ Q_VSD_Freq_AO_Raw	Int	0
11	■ Q_Aktif_Freq_Hz	Real	0.0
12	■ Q_Tarama_Bitti	Bool	false
13	■ Q_Rezonans_Freq_Hz	Real	0.0
14	■ Q_Max_Genlik_Raw	Int	0
15	■ <Add new>		
16	▼ InOut		
17	■ <Add new>		
18	▼ Static		
19	■ S_Aktif_Freq_Hz	Real	0.0
20	■ S_Tarama_Aktif	Bool	false
21	■ S_Max_Genlik_Raw	Int	0
22	■ S_Rezonans_Freq_Hz	Real	0.0
23	▼ T_Adim_Zamanlayici	TON_TIME	
24	■ PT	Time	T#0ms
25	■ ET	Time	T#0ms
26	■ IN	Bool	false
27	■ Q	Bool	false

Figure 3 VSR control algorithm variable list

- In the designed algorithm, the VSR scanning cycle is triggered by the start signal (I_Start). With this signal, the algorithm activates the frequency ramp, resets all counters, and starts the timers required for both the frequency step and data recording. The control flags within the PLC are used as follows:
- **S_Tarama_Aktif:** Indicates that the frequency scan cycle is active.
- **S_Aktif_Freq_Hz:** Represents the operating frequency sent to the driver at that moment.
- **Q_Tarama_Bitti:** Indicates that the scanning process is complete.

If the I_Reset signal is active, all internal variables, timers, and counters are reset, returning the system to its initial state.

The vibration motor is accelerated gradually using a 3-second rising edge triggered (Timer On, TON) block called T_Step_Timer in the PLC. Each time this timer completes, the algorithm advances one frequency step:

- **Frequency Increase:** Every 3 seconds, the frequency value is increased by 0.1 Hz.
- **Timer Reset:** After each increase, the timer is reset and a new cycle begins.

The PLC continuously applies a scaling process to convert the current frequency into an analog output signal. Since the motor driver converts the PLC's 0–10 V analog output into a 0–60 Hz frequency, the following relationship is used in the PLC:

$$Q_{AO} = \frac{S_{Aktif\_Freq\_Hz}}{60} \times 27648$$

The raw value calculated is applied to the driver via the 6ES7 232-4HA30-0XB0 analog output module. When the frequency value reaches 60 Hz, the scan process control flag (S_Tarama_Aktif) is deactivated, and the Q_Tarama_Bitti signal is set to TRUE to indicate that the ramp is complete.

Independently of the frequency ramp but simultaneously, the vibration data and the currently applied frequency are recorded at 1-second intervals. This process is executed by a second TON block named T_Kayit_Zamanlayicisi.

Each time the timer is triggered, “S_Record_Counter” is incremented by one, then the current motor frequency (“S_Active_Freq_Hz”) and sensor amplitude value (“I_Vibration_AI_Raw”) are recorded as a row in the data table

located in “DB_VSR_Data”. Finally, the timer is reset to start a new recording cycle.

The data recording process is a collection and storage cycle performed at fixed 1-second intervals using the PLC's time-deterministic structure. The purpose of this sub-algorithm is to accurately match the frequency value sent to the frequency drive at each point in time with the vibration amplitude data of the workpiece. The data recording process continues until 300 samples are obtained. Each of these records is a data pair and is written together on the same row. All records are stored in a Global Data Block called “DB_VSR_Kayit” specifically defined for the system. This DB contains a structured Array of 300 rows (a structure consisting of frequency and amplitude fields for each row). Thus, the system produces a total of 300 data pairs, one for every second, during the 300-second frequency scan. When the counter reaches 300, both the scanning processes and the recording operations are stopped. The data structure used for recording operations is shown in Figure 4.

VSR_Struct		
	Name	Data type
1	AO_Freq_Hz	Real
2	AI_Genlik_Raw	Int

DB_VSR_Kayit		
	Name	Data type
1	Static	
2	Static_1	Array[0..300] of "VSR_Struct"
3	Static_1[0]	"VSR_Struct"
4	Static_1[1]	"VSR_Struct"
5	Static_1[2]	"VSR_Struct"
6	Static_1[3]	"VSR_Struct"
7	Static_1[4]	"VSR_Struct"
8	Static_1[5]	"VSR_Struct"
9	Static_1[6]	"VSR_Struct"
10	Static_1[7]	"VSR_Struct"

Figure 4. Datablock structure for logging the VSR data

After the scanning process is complete, the PLC proceeds to the resonance analysis phase. This phase runs only once. All frequency–amplitude data pairs stored in the system are processed by sorting them according to their amplitude values from largest to smallest. Throughout the sorting process, the PLC processes the 300-element array in its internal memory. The processing load may increase during this process, but since it is a one-time operation, it is suitable for resonance analysis. Once the sorting is complete, the first 5 frequency pairs with the highest amplitude values are extracted. The highest resonance frequency is recorded as “Q_Rezonans_Freq_Hz”.

Through this approach, both ramped frequency scanning and regular data logging are fully synchronized by the PLC, and the results are obtained in a reliable and repeatable manner within a single process flow.

The designed PLC-based resonance frequency scanning algorithm has been integrated into a single function block to enable more modular use. The function block created and added to the main program is shown in Figure 5.

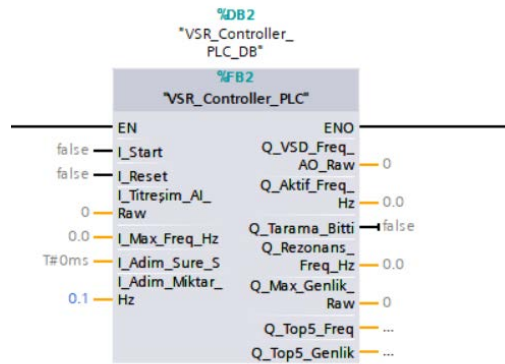


Figure 5. Frequency Scan Function Block

The VSR process requires scanning procedures to be performed on two separate occasions, both before and after application, in order to verify the stress relief effect. The resonance frequencies determined in the initial scan constitute the critical working regions for the process. Vibration is applied at frequencies close to these resonance regions for a duration longer than the scanning time, ensuring the redistribution of internal stresses in the workpiece. After the process is completed, the same scanning procedure is reapplied without changing any parameters. Comparing the results of the initial and final scans provides a fundamental criterion for evaluating the effectiveness of the VSR process(Mei, Jiang, & Yu, 2025).

In the VSR applications, applying vibration in the resonance zone is a technically straightforward process; it is sufficient to apply the voltage value corresponding to the detected frequency to the relevant analog output of the PLC. Therefore, the critical component of the system is the comprehensive scanning processes performed before and after VSR(Klauba & Adams, 2012). Increasing the frequency on a stable time basis, simultaneously recording the vibration response, and accurately analyzing this data are the key elements that determine the success of the method.

3. RESULTS

Within the scope of this study, an integrated architecture consisting of analog control of the vibration source, data acquisition, and resonance analysis was successfully implemented using a PLC-based architecture. A fully integrated VSR system has been developed by combining a PLC, analog I/O modules, a motor driver, an ATmega328P-based microcontroller, and an ADXL345 accelerometer. Frequency ramp generation, analog control of the vibration source, high-speed sensor data

processing, synchronized data acquisition, and resonance analysis were performed in a well coordinated manner through the PLC-based architecture.

As a result, the processes of precisely controlling the vibration source—the most critical component of the VSR system—and simultaneously recording the vibration responses generated in the workpiece have been successfully implemented using a PLC-based architecture. The frequency ramp, sensor data processing, data recording, and resonance analysis were all integrated and performed in a PLC-controlled structure, thus developing a reliable and repeatable VSR control system suitable for industrial conditions.

REFERENCES

- Alphonsus, E. R., & Abdullah, M. O. (2016). A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.025>
- Anggana, H., & Solikin, M. (2025). Development of a Real-Time Vibration Monitoring System for Drum Tester Machines Using ADXL345 Sensor and ESP32 Microcontroller. *Journal of Automotive and Mechanical Applied Technology*, 2, 66–75. Retrieved from <https://doi.org/10.21831/jamat.v2i1.1277>
- Claxton, R. A. (1991). Vibratory stress relieving - an effective alternative to thermal treatment for component stabilisation. *Heat Treatment of Metals*.
- Engin, D., Engin, M., Pinar, S., & Candan, M. (2021). PLC and SCADA Based Real-Time Monitoring and Control of Networked Processes, 8, 14070–14080.
- Engin, M., & Engin, D. (2015). Project-Based Programmable Logic Controller Application. *Journal of Mechatronics*, 3, 185–192. Retrieved from <https://doi.org/10.1166/jom.2015.1107>
- Gao, L., Yao, Q., Yang, Y., Sun, D., Xu, G., Gu, B., ... Li, S. (2025). Effects of Vibratory Stress Relief on Microstructure and Mechanical Properties of Marine Welded Structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/jmse13010011>
- Johari, N., Chee, F. pien, Mohd. Hashim, S. R., Golutin, B., & Dayou, J. (2023). DESCRIPTIVE STATISTICAL CALIBRATION METHOD OF TRIAXIAL DIGITAL ACCELEROMETER ADXL345 AS EARTHQUAKES

SENSOR. *Borneo Science | The Journal of Science and Technology*, 44, 13–19. Retrieved from <https://doi.org/10.51200/bsj.v44i1.4340>

Klauba, B., & Adams, C. (2012). The Physics of Vibratory Stress Relief.

Mei, X., Jiang, Y., & Yu, Y. (2025). Experimental and Numerical Analysis of Vibratory Stress Relief Effects on Impact Toughness Enhancement in Q235 Welded Joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11762-w>

Munsi, A. S. M. Y., Waddell, A. J., & Walker, C. A. (2001). The influence of vibratory treatment on the fatigue life of welds: A comparison with thermal stress relief. *Strain*. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2001.tb01250.x>

Walker, C. A., Waddell, A. J., & Johnston, D. J. (1995). Vibratory stress relief—an investigation of the underlying processes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. Retrieved from https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1995_209_228_02

**TÜRKİYE VE DÜNYADA
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

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