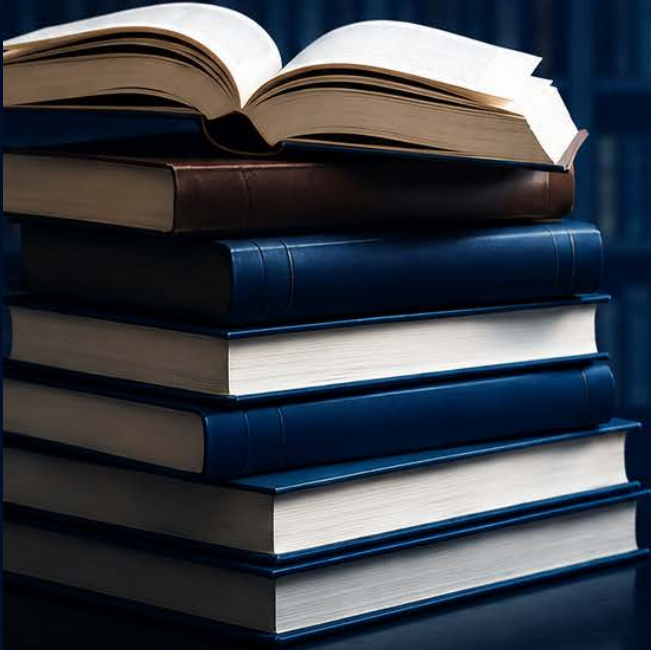


MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA GÜNCEL KONULAR VE AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

Editör: Prof. Dr. Hikmet ÇİÇEK



yaz
yayınları

**Makine Mühendisliği Alanında
Güncel Konular ve Akademik Değerlendirmeler**

Editör

Prof. Dr. Hikmet ÇİÇEK

yaz
yayınları

2026

**Makine Mühendisliği Alanında Güncel
Konular ve Akademik Değerlendirmeler**

Editör: Prof. Dr. Hikmet ÇİÇEK

© 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 978-625-8926-92-7

Ekim 2026 – 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

From Computed Tomography to Cranium: The Digital Workflow, Additive Manufacturing and Regulatory Qualification of Patient-Specific Cranial Implants.....	1
<i>Sinan KÖSE</i>	
Katı İnce Film Kaplamalarda Adezyon Karakterizasyonu ve Test Yöntemleri.....	22
<i>Ahmet Melik YILMAZ, Hikmet ÇİÇEK</i>	
Auxetic Structures in Engineering: Design, Manufacturing, and Industrial Applications.....	49
<i>Hilmi TEKDIR</i>	
Material – Process - Property Relationship in Additive Manufacturing.....	70
<i>Ümit ZEYBEK</i>	
Bina Isı Yalıtımında Kullanılan Biyo-Esaslı Malzemeler.....	91
<i>Veli Gökhan DEMİR</i>	
Makine Meslek Resmi Eğitiminde Yapay Zekâ Destekli Öğrenme Modelinin Tasarlanması	113
<i>Aysu AKILLI ARI</i>	
Yapay Zekâ ve Sürdürülebilirlik: Akıllı Teknolojilerden Yeşil Dönüşüme	126
<i>Aysu AKILLI ARI</i>	

"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."

FROM COMPUTED TOMOGRAPHY TO CRANIUM: THE DIGITAL WORKFLOW, ADDITIVE MANUFACTURING AND REGULATORY QUALIFICATION OF PATIENT-SPECIFIC CRANIAL IMPLANTS

Sinan KÖSE¹

1. INTRODUCTION

Decompressive craniectomy is now a standard response to refractory intracranial hypertension, and its benefit is no longer seriously disputed. Mee et al. (2024) counted 4,627 such operations and 4,466 cranioplasties in England between 2014 and 2019 alone. Survival is bought at the price of a second problem, since the patient is left with a large defect in the vault. Closing it is not a matter of appearance; Sveikata et al. (2022) found that 65 % of craniectomised patients met the criteria for the syndrome of the trephined and improved within four days of cranioplasty. The repair, however, fails more often than one would expect of an elective reconstruction: pooling thirty-one studies, Henry et al. (2021) reported revision in 14 % of cases, infection in 8 % and implant exposure in 6 %, while complications proved more frequent after reconstruction with autogenous bone (33.2 %) than with substitutes (26.7 %) (Liu et al., 2020).

Two bodies of work have grown up around the alloplastic alternative without ever quite meeting: one

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

biomechanical, asking how stress is distributed and which material should carry it, the other clinical, asking how often the reconstruction fails. Between them lies the process chain along which a validated geometry becomes a sterile, traceable and lawfully supplied device, and it is this chain that accounts for most of the remaining variation in implant quality. The present chapter treats the whole sequence as one engineering system, asking where error accumulates between the voxel and the implanted part, how materials and processes compare on measured rather than nominal performance, and what must be demonstrated before a sound implant may lawfully be used. The review is structured rather than systematic, drawing on Scopus, Web of Science and PubMed and on the repositories of ISO, ASTM, the European Commission and the United States Food and Drug Administration, with preference for quantitative studies published between 2015 and 2026.

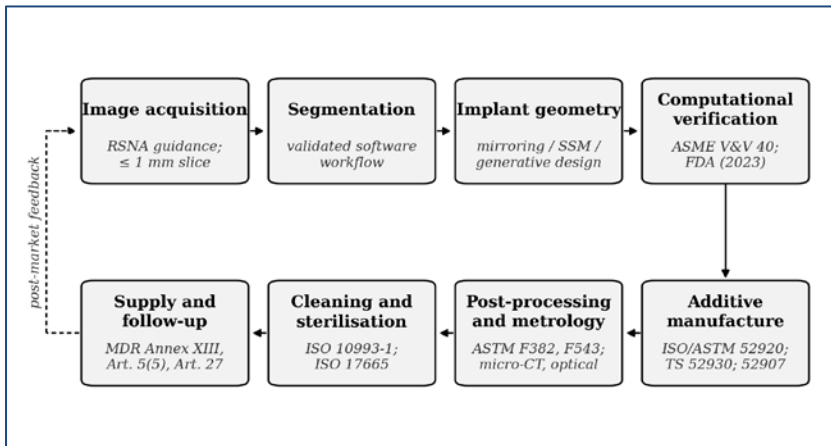


Figure 1. The digital thread of patient-specific cranial reconstruction, with the principal normative instrument governing each stage.

2. THE DIGITAL DESIGN CHAIN

2.1. Imaging and Segmentation

Whatever else it may be, the implant is a reconstruction of an image, and nothing further down the chain restores information the scan failed to record. Chepelev et al. (2018) recommend a slice thickness of no more than 1 mm, overlapping reconstruction and a sharp kernel; where these conditions are met, imaging itself contributes little to the final error.

The critical step is the next one. Chae et al. (2021) attributed mean absolute errors of 0.34 mm to computed tomography, 1.02 mm to segmentation and 1.16 mm to printing, segmentation being statistically dominant over imaging. Its weakness lies in the choice of threshold: given identical datasets, four trained engineers selected bone thresholds spanning 113–303 HU where the software default was 500 HU, with a geometric consequence of 0.13 mm on multidetector data and 0.55 mm on cone beam images (van Eijnatten et al., 2017). Convolutional networks have largely removed this variability, an nnU-Net trained on 300 craniomaxillofacial scans reaching a volumetric Dice coefficient of 0.96 for the upper skull; what deserves attention is that an industrial expert accepted only 82 % of those same segmentations (Dot et al., 2022). Automation does not dispense with verification, then, but shifts it from the operator to the validation protocol.

2.2. Implant Geometry Generation

Three families of method compete here. Mirroring about the mid-sagittal plane remains the clinical default, though it is the least accurate and fails outright when the defect is bilateral; across thirty-one validation skulls, Fuessinger et al. (2018) measured a mean reconstruction error of 1.13 mm for mirroring against 0.47 mm for a statistical shape model. Generative methods have advanced quickly, the winning entry of the 2021

AutoImplant challenge reaching an average Dice coefficient of 0.91 across three public benchmarks (Wodziński et al., 2022). Such figures invite caution rather than confidence: when Li et al. (2022) turned to large irregular clinical defects, a statistical shape model produced reconstructions surgeons found acceptable, whereas convolutional methods that had beaten it on synthetic defects failed or returned unsatisfactory implants. Performance on artificial defects is not yet evidence of clinical adequacy.

2.3. Computational Design Verification

Almost every design study screens its candidates by finite element analysis, yet no agreement exists on the load to be applied. Reported cases range from 50 N over 550 mm² and 700 N at the implant apex (Mejía Rodríguez et al., 2024) to 950 N with an intracranial pressure of 15 mmHg (Jindal et al., 2026) and 2,000 N on a model with a viscoelastic brain (Shash, 2024). Because the assumed loads differ by two orders of magnitude, the resulting factors of safety cannot be compared, and this alone prevents such analyses from serving as regulatory evidence. The physical findings are more consistent than the load cases. Thickness matters more than material choice for peak displacement, every configuration examined by Mejía Rodríguez et al. (2024) remaining below a 2 mm limit at 700 N, whereas stiffness governs how much stress reaches the surrounding bone: an unfilled polyetheretherketone implant transmitted peak skull stresses of 41.68 and 87.61 MPa in tension and compression, against roughly 22–25 MPa for a carbon-fibre-reinforced grade and for titanium (Shash, 2024). Fixation is a further variable that practice treats as a detail rather than as part of the design; curved plates reduced peak stress by 36–38 % relative to straight ones, while two-plate arrangements exceeded the yield limit of the polymer at 112.80 MPa (Jindal et al., 2026). One caveat concerns the boundary condition, which

does not stay fixed: as osseointegration proceeds the interface stiffens, so an analysis at the immediate post-operative state describes a conservative bound rather than the condition in service.

3. MATERIALS AND ADDITIVE MANUFACTURING ROUTES

3.1. Titanium Alloys by Powder Bed Fusion

Laser powder bed fusion leaves Ti-6Al-4V fully martensitic, strong but of limited ductility, and the residual stress that comes with it is the principal process risk for a thin part of large area: Aversa et al. (2025) measured von Mises stresses of up to 494 MPa in the as-built state, falling to 44 MPa after two hours of stress relief at 800 °C. Durability, though, is decided at the surface. Machined specimens sustained a fatigue limit above 480 MPa, comparable with wrought material, while as-built specimens managed some 222.5 MPa, a factor of two attributable almost entirely to roughness (Mancisidor et al., 2023). Since as-built roughness ranges from about 8 µm for laser powder bed fusion to 19 µm for electron beam melting and falls to roughly 1 µm once finished (Rotar et al., 2026), post-processing is a load-bearing requirement rather than a cosmetic one. The persistent objection to titanium is its stiffness: nanoindentation gives 133.2 GPa for the dense alloy against 15–17 GPa for cortical bone (Chen et al., 2022), so the implant is some eight times stiffer than the tissue it replaces. Architected porosity, which brings powder bed fused lattices down to 2.5–3.2 GPa, is the usual answer, although it complicates cleaning and inspection alike.

3.2. Polyaryletherketones

Polyetheretherketone has become the reference polymer for cranial use, partly because its modulus is within an order of magnitude of cortical bone and partly because it is radiolucent.

Yang et al. (2025) measured an attenuation of -253 to -261 HU against $6,612$ – $7,422$ HU for solid titanium, with radiotherapy gamma pass rates of 96.1 – 98.1 % and 89.0 – 94.1 %, the latter falling below the 95 % clinical threshold in some scenarios. Carbon fibre reinforcement keeps most of this advantage while raising stiffness to 13.2 GPa (Chen et al., 2022).

Processing is demanding. Extrusion calls for nozzle temperatures above 400 °C, a chamber at 200 – 250 °C and prolonged drying of the filament (Sharma et al., 2026), and layer heights above 0.2 mm leave internal voids (Sharma et al., 2021); specimens produced at the point of care nonetheless reached tensile strengths of 89.7 – 101.8 MPa. What remains unsolved is the bond between layers. Doyle et al. (2024) obtained 84 MPa in the X direction but only 69 MPa in Z, and a two-stage anneal that raised crystallinity to some 18 % improved the X figure to 96.4 MPa while leaving Z untouched. Crystallisation does not repair the weld line, so build orientation belongs in the design specification. The last limitation is biological: the polymer is markedly less wettable than titanium and mineralises poorly in vitro (Chen et al., 2022), and although surface treatment improves osseointegration reliably in small animals (Dondani et al., 2023), almost none of that work has reached a clinical series.

3.3. Acrylic Cements, Mould-Based Routes and Bioceramics

Polymethyl methacrylate is still the cheapest option and, combined with a printed mould, the most widely accessible: Mejía Rodríguez et al. (2024) assign it a modulus of about 2.7 GPa and a tensile strength of 36 MPa at roughly 55 % lower cost than polyetheretherketone, and printed moulds reportedly reduce implant cost by an order of magnitude. Custom porous hydroxyapatite is the only genuinely osteoconductive alternative and shows the lowest infection rate among heterologous

materials at 6.7 %, but remains liable to fracture (Faedo et al., 2025). Table 1 brings the trade-offs together.

Table 1. Comparative properties of cranial implant material and process combinations

Property	Ti-6Al-4V (PBF)	PEEK (extrusion)	CFR- PEEK	PMMA	HA ceramic
Elastic modulus	133.2 GPa	3.2–4.5 GPa	7.4–13.2 GPa	≈ 2.7 GPa	71.8 GPa (coating)
Strength	935 MPa yield (HIP)	89.7–101.8 MPa	101.4 MPa	36 MPa	brittle
Radiology (HU)	6612–7422 HU	–253 to –261 HU	low artefact	radiolucent	radiopaque
Surface Ra	8.3 → 0.31 µm (L-PBF); 19.4 → 1.4 µm (EBM)	layer-defined; ≤ 0.2 mm layer	as PEEK	mould-defined	as substrate
Main liability	stress shielding; residual stress	bioinertness; weak Z direction	cost; limited clinical data	exotherm; residual monomer	brittleness
Procedure cost	CAD 18,335–31,956	CAD 27,379	not reported	CAD 20,786	not reported
Lead time	days to weeks	3–5 days at point of care	not reported	intra-operative to 13 days	weeks

Note. Compiled from Chen et al. (2022), Mancisidor et al. (2023), Rotar et al. (2026), Mejía Rodríguez et al. (2024), Yang et al. (2025), Binhammer et al. (2020) and Sharma et al. (2026).

4. QUALITY ASSURANCE AND PROCESS QUALIFICATION

4.1. Dimensional Verification and Mechanical Qualification

Checking a finished implant against its design has become straightforward: polishing removed some 93 % of the positive deviation from an electron beam melted lattice implant (Rotar et al., 2026), and extruded polymeric implants reproduced the planned geometry within 0.731 ± 0.013 mm (Sharma et al., 2021). More interesting is how little geometric conformity says about what follows. Moellmann et al. (2022)

found 95.2 % of surface measurements inside a ± 1.5 mm tolerance band in thirty-nine patients whose complication rate was 64.1 %; dimensional verification is a release criterion that must be met, not a proxy for clinical performance.

Mechanical acceptance is less settled, since no standard addresses cranial implants directly; qualification is assembled in practice from ASTM F382 for bone plates, ASTM F543 for bone screws and the material specifications ASTM F136, F2924, F3001 and F2026. Test data on complete implants are scarce but instructive: implants extruded at the point of care failed at a mean peak load of 798 ± 211 N, the weakest showing air gaps and unfused infill lines, which ties load capacity to the interlayer bond (Sharma et al., 2021). Regulatory expectation is explicitly worst-case, covering the least favourable combination of dimensions, features and build orientation (FDA, 2017).

4.2. Sterilisation, Biological Safety and Process Qualification

Steam sterilisation at 134–137 °C for eighteen minutes altered extruded polymeric implants by a mean root mean square error of only 0.16 ± 0.09 mm, within the threshold adopted by the authors and not statistically significant (Sharma et al., 2023); the finding is specific to the material and should not be generalised. Biological evaluation follows ISO 10993-1 within a risk management process, a permanent cranial implant belonging to the long-term, bone-contacting category; additively manufactured devices carry the further obligation to remove residual manufacturing material, sterilisation being validated at the worst case of residue, surface area and porosity (FDA, 2017).

Three standards frame the qualification of the process itself: ISO/ASTM 52920:2023 for processes and production sites, supplementary to a quality system such as ISO 13485;

ISO/ASTM TS 52930:2021 for powder bed fusion equipment; and ISO/ASTM 52907:2019 for metal powder characterisation, reuse included. Reuse is far from marginal. Over nine cycles with a top-up strategy, McFadden et al. (2020) recorded oxygen rising from 0.095 to 0.126 wt % by the eighth cycle, crossing the 0.13 wt % limit set by ASTM F136 for the extra-low-interstitial grade, while particle size and circularity remained unchanged. It is the chemistry, not the morphology, that limits how often a powder may be reused.

4.3. Credibility of the Computational Evidence

Simulation can replace physical testing only so far as its credibility has been demonstrated. ASME V&V 40-2018 requires the rigour of verification, validation and uncertainty quantification to be proportional to model risk — the product of the model’s influence on the decision and the consequence of an error — and to be organised around an explicit context of use, and the FDA guidance of November 2023 builds a risk-informed framework on the same foundation. A worked example exists in orthopaedics, where Nagaraja et al. (2024) validated a pedicle screw construct with three independent modellers and then predicted a modified design without further testing. Judged by this standard, the literature of Section 2.3 is not yet regulatory-grade: contexts of use are seldom stated, validation against measurement is uncommon and uncertainty quantification almost entirely absent.

5. REGULATORY AND CLINICAL TRANSLATION

5.1. Device Categories and Manufacturing at the Point of Care

European law draws distinctions that the engineering literature tends to blur. Regulation (EU) 2017/745 defines a custom-made device as one manufactured according to a written prescription specifying design characteristics for an individual patient. Guidance MDCG 2021-3 separates this from the patient-matched device, mass-produced and fitted to the patient's anatomy within a validated design envelope under the manufacturer's own responsibility, which therefore requires CE marking through the ordinary conformity assessment route; additive manufacture does not by itself make a device custom-made. Manufacturers of custom-made devices must issue the Annex XIII statement, retain documentation for fifteen years for implants and involve a notified body for Class III. United States practice differs: cranial plates fall under 21 CFR 882.5330 as Class II devices cleared through the 510(k) route, and patient-matched devices must remain within a design envelope specifying dimensional and mechanical limits (FDA, 2017).

The most significant development of recent years is that manufacturing has begun to move into the hospital. Article 5(5) exempts devices made and used within a single health institution, provided, among the conditions set out in MDCG 2023-1, that the device is not transferred to another legal entity, that manufacture takes place under an appropriate quality management system, that no equivalent device on the market meets the needs of the patient group, and that clinical experience is reviewed and acted upon. Two implementations show what the choice costs. A Swiss centre took the Article 5(5) route for a service producing extruded polymeric implants under a quality

system aligned with ISO 13485, delivering more than forty implants with a turnaround of three to five days (Sharma et al., 2026); a university facility chose Annex XIII instead, precisely because Article 5(5) forbids transfer to another legal entity (Oliva et al., 2026). What remains unsettled, according to Pettersson et al. (2024), is that the Regulation makes no explicit provision for patient-matched devices and leaves liability across distributed manufacturing undefined. Traceability carries its own inconsistency: Article 27 requires a unique device identifier for Class III implants yet exempts custom-made devices, so the most individualised implants are the least traceable.

5.2. Clinical Outcomes, Economics and Environmental Burden

The comparative evidence supports patient-specific implants, though less firmly than the enthusiasm surrounding them suggests. Drawing on 125 observational studies and 10,034 patients, Nolden et al. (2025) reported explantation in 6.1 % of patient-specific titanium implants against 9.9 % of hand-moulded ones; the odds ratio of 0.34 did not reach significance, but operating time fell from roughly 151 to 116 minutes and cosmetic scores rose appreciably. Two weaknesses limit what may be concluded. The evidence is almost wholly observational, 72 % of 205 studies covering 74,996 patients being retrospective and only two randomised (Mee et al., 2023), and outcome definitions cannot be reconciled, reported complication rates varying from 14 % to 37 % according to definition and observation window rather than to risk. The COAST core outcome set (Mee et al., 2025) is the obvious remedy, and its adoption is a precondition for any meaningful comparison of manufacturing routes.

On cost, a Canadian analysis found procedure costs rising from CAD 14,291 for autogenous bone to CAD 31,956

for custom titanium (Binhammer et al., 2020). Production inside the hospital changes this structure rather than merely shifting it: Ebel et al. (2023) reported manufacturing costs of USD 748–1,129 per implant, labour accounting for 55–63 % and materials for only 15–17 %, and a point-of-care service estimated savings of 25–45 % against outsourced procurement (Sharma et al., 2026). Since labour dominates, savings come from throughput and automation rather than from a change of material. The environmental case is stronger than is often supposed but not unqualified: life-cycle assessment of laser powder bed fusion reports global warming potential lower by about a third and waste lower by 96 % than subtractive routes, yet the burden migrates upstream, atomisation accounting for 55 % of global warming potential and 64 % of waste generation (Rahmani et al., 2025). Any claim of sustainability must therefore set its system boundary around feedstock production and the powder lifecycle, and no assessment specific to cranial implants was found in this review.

6. CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES

Several problems look tractable within the present decade. The first is the validation of automated design: networks now report Dice coefficients above 0.94, yet expert acceptance trails the metric (Dot et al., 2022) and performance on synthetic defects does not carry over to irregular clinical ones (Li et al., 2022), so what is wanted is not a better benchmark score but acceptance criteria that mean something clinically. The second is the credibility of computational evidence, where both the framework and a worked exemplar already exist (Nagaraja et al., 2024); an explicit context of use, an agreed load case and quantified uncertainty would turn a descriptive literature into evidence a regulator could use. The last is accounting, in both

senses: adopting the COAST outcome set (Mee et al., 2025) would make a credible comparison of manufacturing routes possible, and a life-cycle assessment specific to cranial implants would place sustainability claims on a defensible footing (Rahmani et al., 2025).

7. CONCLUSION

Cranial reconstruction is better understood as a single chain, along which error, risk and legal responsibility travel together, than as a design problem followed by a manufacturing problem. Three conclusions follow. The dominant geometric error arises in segmentation rather than in imaging or printing, contributing roughly 1.0 mm of a budget of some 2.5 mm (Chae et al., 2021), so effort spent on reproducible segmentation buys more accuracy than effort spent on the scanner or the printer. Material performance depends less on nominal properties than on the state in which the process leaves the material: surface condition alters the fatigue limit of titanium by a factor of two (Mancisidor et al., 2023), the interlayer bond governs polymer anisotropy and is not repaired by annealing (Doyle et al., 2024), and powder chemistry limits feedstock reuse (McFadden et al., 2020). Geometric conformity, finally, must be met but does not predict clinical outcome (Moellmann et al., 2022). The regulatory framework, meanwhile, has moved faster than the engineering literature seems to have noticed: manufacture at the point of care under Article 5(5) is a demonstrated clinical reality (Sharma et al., 2026), while the credibility framework that would let simulation stand in for physical testing has been available since 2018 and is still hardly used here. The most useful contributions the biomechanics community can make are accordingly not further parametric studies of implant thickness, but agreement on load cases and contexts of use, validation of

automated design against clinically meaningful criteria, and participation in the infrastructure through which the field will discover whether patient-specific manufacture delivers what it promises.

REFERENCES

- Aversa, A., Carrozza, A., Mercurio, V., Calignano, F., Sereda, O., Pejchal, V., & Lombardi, M. (2025). A comparison between the residual stresses of Ti6Al4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo processed by laser powder bed fusion. *Materials*, 18(3), 689. doi:10.3390/ma18030689
- Binhammer, A., Jakubowski, J., Antonyshyn, O., & Binhammer, P. (2020). Comparative cost-effectiveness of cranioplasty implants. *Plastic Surgery*, 28(1), 29-39. doi:10.1177/2292550319880922
- Chae, M. P., Chung, R. D., Smith, J. A., Hunter-Smith, D. J., & Rozen, W. M. (2021). The accuracy of clinical 3D printing in reconstructive surgery: Literature review and in vivo validation study. *Gland Surgery*, 10(7), 2293-2303. doi:10.21037/gs-21-264
- Chen, J., Huang, S., Cheng, W., & Lin, Y. (2022). In vitro physicochemical and biological properties of titanium alloy, zirconia, polyetheretherketone, and carbon fiber-reinforced polyetheretherketone. *Frontiers in Materials*, 9, 992351. doi:10.3389/fmats.2022.992351
- Chepelev, L., Wake, N., Ryan, J., Althobaity, W., Gupta, A., Arribas, E., ... Sheikh, A. (2018). Radiological Society of North America 3D Printing Special Interest Group: Guidelines for medical 3D printing and appropriateness for clinical scenarios. *3D Printing in Medicine*, 4, 11. doi:10.1186/s41205-018-0030-y
- Dondani, J. R., Iyer, J., & Tran, S. D. (2023). Surface treatments of PEEK for osseointegration to bone. *Biomolecules*, 13(3), 464. doi:10.3390/biom13030464
- Dot, G., Schouman, T., Dubois, G., Rouch, P., & Gajny, L. (2022). Fully automatic segmentation of

craniomaxillofacial CT scans for computer-assisted orthognathic surgery planning using the nnU-Net framework. *European Radiology*, 32(6), 3639-3648. doi:10.1007/s00330-021-08455-y

Doyle, R., Perez-Ferrero, M., Garcia-Molleja, J., Losada, R., Romero-Rodriguez, M., & Fernandez-Blazquez, J. P. (2024). Fused filament fabrication of slow-crystallizing polyaryletherketones. *Polymers*, 16(23), 3354. doi:10.3390/polym16233354

Ebel, F., Schon, S., Sharma, N., Guzman, R., Mariani, L., Thieringer, F. M., & Soleman, J. (2023). Clinical and patient-reported outcome after patient-specific 3D printer-assisted cranioplasty. *Neurosurgical Review*, 46(1), 93. doi:10.1007/s10143-023-02000-9

Faedo, F., Zaed, I., Pizzi, A., Iaccarino, C., & Servadei, F. (2025). Infection rates following custom-made cranioplasty using heterologous materials: Insights from a systematic review on 3260 patients. *Neurosurgical Review*, 48, 1-12. doi:10.1007/s10143-025-03818-1

Fuessinger, M. A., Schwarz, S., Cornelius, C.-P., Metzger, M. C., Ellis, E., Probst, F., ... Schlager, S. (2018). Planning of skull reconstruction based on a statistical shape model combined with geometric morphometrics. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 13(4), 519-529. doi:10.1007/s11548-017-1674-6

Henry, J., Amoo, M., Taylor, J., & O'Brien, D. P. (2021). Complications of cranioplasty in relation to material: Systematic review, network meta-analysis and meta-regression. *Neurosurgery*, 89(3), 383-394. doi:10.1093/neuros/nyab180

- Jindal, P., Kalra, A., Dadwal, N., Goel, A., Gupta, V., Reinwald, Y., ... Juneja, M. (2026). Optimising surgical efficiency by designing lightweight skull-PSI assemblies and curved fixture plates for cranial reconstruction using FEA. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L*, 240(1), 77-93. doi:10.1177/14644207241312947
- Li, J., Ellis, D. G., Pepe, A., Gsaxner, C., Aizenberg, M. R., Kleesiek, J., & Egger, J. (2022). Back to the roots: Reconstructing large and complex cranial defects using an image-based statistical shape model (arXiv:2204.05703).
- Liu, L., Lu, S. T., Liu, A. H., Hou, W. B., Cao, W. R., Zhou, C., Zhang, H. J. (2020). Comparison of complications in cranioplasty with various materials: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Neurosurgery*, 34(4), 388-396. doi:10.1080/02688697.2020.1742291
- Mancisidor, A. M., Garcia-Blanco, M. B., Quintana, I., Arrazola, P. J., Espinosa, E., Cuesta, M., ... Garciandia, F. (2023). Effect of post-processing treatment on fatigue performance of Ti6Al4V alloy manufactured by laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(4), 119. doi:10.3390/jmmp7040119
- McFadden, S., Harkin, R., Wu, H., Nikam, S., & Quinn, J. (2020). Reuse of Grade 23 Ti6Al4V powder during the laser-based powder bed fusion process. *Metals*, 10(12), 1700. doi:10.3390/met10121700
- Mee, H., Castano Leon, A., Anwar, F., Grieve, K., Owen, N., Turner, C., ... Hutchinson, P. (2023). Towards a core outcome set for cranioplasty following traumatic brain injury and stroke: A systematic review of reported

- outcomes. *Brain and Spine*, 3, 101735.
doi:10.1016/j.bas.2023.101735
- Mee, H., Harris, J. M., Korhonen, T., Anwar, F., Wahba, A. J., Whiting, G., ... Hutchinson, P. J. (2024). Decompressive craniectomy to cranioplasty: A retrospective observational study using Hospital Episode Statistics in England. *BMJ Surgery, Interventions, & Health Technologies*, 6(1), e000253. doi:10.1136/bmjst-2023-000253
- Mee, H., Korhonen, T. K., Castano-Leon, A. M., Adeleye, A., Allanson, J., ... Hutchinson, P. J. (2025). A core outcome set for cranioplasty following stroke or traumatic brain injury: The COAST study. *Brain and Spine*, 5, 104288. doi:10.1016/j.bas.2025.104288
- 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. doi:10.3390/designs8020031
- Moellmann, H. L., Mehr, V. N., Karnatz, N., Wilkat, M., Riedel, E., & Rana, M. (2022). Evaluation of the fitting accuracy of CAD/CAM-manufactured patient-specific implants for the reconstruction of cranial defects. *Journal of Clinical Medicine*, 11(7), 2045. doi:10.3390/jcm11072045
- Nagaraja, S., Loughran, G., Baumann, A. P., Kartikeya, K., & Horner, M. (2024). Establishing finite element model credibility of a pedicle screw system under compression-bending: An end-to-end example of the ASME V&V 40 standard. *Methods*, 225, 74-88. doi:10.1016/j.ymeth.2024.03.005

- Nolden, E.-L., Guimaraes Carvalho, B. K., Barkovskij-Jakobsen, K. S., Schulze Wenning, A., Szentes, B. L., Agocs, G., ... Vaszilko, M. (2025). Comparative safety and efficacy of patient-specific versus hand-molded implants in cranioplasty: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Medicine*, 14(24), 8655. doi:10.3390/jcm14248655
- Oliva, P., Cereda, E., & Robles, E. (2026). Bridging clinical integration and regulatory compliance in 3D printing: A hybrid model for university-based manufacturing of custom-made medical devices. *Frontiers in Medical Engineering*, 4, 1869701. doi:10.3389/fmede.2026.1869701
- Pettersson, A. B. V., Ballardini, R. M., Mimler, M., Li, P., Salmi, M., Minssen, T., ... Makitie, A. (2024). Core legal challenges for medical 3D printing in the EU. *Healthcare*, 12(11), 1114. doi:10.3390/healthcare12111114
- Rahmani, R., Bashiri, B., Lopes, S. I., Hussain, A., Maurya, H. S., & Vilu, R. (2025). Sustainable additive manufacturing: An overview on life cycle impacts and cost efficiency of laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(1), 18. doi:10.3390/jmmp9010018
- Rotar, H., Cosma, C., Balci, N., Kim, S.-G., & Ostas, D. (2026). Multi-stage micro-CT-based dimensional accuracy assessment of a Voronoi-based patient-specific cranial implant fabricated by electron beam melting. *Frontiers in Medical Technology*, 8, 1811963. doi:10.3389/fmedt.2026.1811963
- Sharma, N., Aghlmandi, S., Dalcanale, F., Seiler, D., Zeilhofer, H.-F., Honigmann, P., & Thieringer, F. M. (2021).

Quantitative assessment of point-of-care 3D-printed patient-specific polyetheretherketone cranial implants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16), 8521. doi:10.3390/ijms22168521

Sharma, N., Zubizarreta-Oteiza, J., Seiler, D., Abazi, S., Seifert, L. B., Roethlisberger, M., ... Thieringer, F. M. (2026). Clinical implementation of an EU MDR-compliant point-of-care manufacturing framework for patient-specific 3D-printed PEEK implants in craniomaxillofacial reconstruction. *3D Printing in Medicine*, 12(1), 13. doi:10.1186/s41205-026-00325-x

Sharma, N., Zubizarreta-Oteiza, J., Tourbier, C., & Thieringer, F. M. (2023). Can steam sterilization affect the accuracy of point-of-care 3D printed polyetheretherketone customized cranial implants? *Journal of Clinical Medicine*, 12(7), 2495. doi:10.3390/jcm12072495

Shash, Y. H. (2024). Cranial reconstruction utilizing polymeric implants in two different designs: Finite element investigation. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 25, 935. doi:10.1186/s12891-024-08066-w

Sveikata, L., Vasung, L., El Rahal, A., Bartoli, A., Bretzner, M., Schaller, K., ... Leemann, B. (2022). Syndrome of the trephined: Clinical spectrum, risk factors, and impact of cranioplasty on neurologic recovery in a prospective cohort. *Neurosurgical Review*, 45(2), 1431-1443. doi:10.1007/s10143-021-01655-6

U.S. Food and Drug Administration. (2017). Technical considerations for additive manufactured medical devices: Guidance for industry and Food and Drug Administration staff (Docket FDA-2016-D-1210). Silver Spring, MD: FDA.

- van Eijnatten, M., Koivisto, J., Karhu, K., Forouzanfar, T., & Wolff, J. (2017). The impact of manual threshold selection in medical additive manufacturing. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 12(4), 607-615. doi:10.1007/s11548-016-1490-4
- Wodziński, M., Daniol, M., Socha, M., Hemmerling, D., Stanuch, M., & Skalski, A. (2022). Deep learning-based framework for automatic cranial defect reconstruction and implant modeling. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 226, 107173. doi:10.1016/j.cmpb.2022.107173
- Yang, S., Choi, E., Park, S. G., Kim, B., Kim, Y. W., & Kim, M. (2025). Comparative evaluation of PEEK, 3D-printed titanium mesh and solid titanium implants on HU distortion and dose calculation accuracy in radiotherapy. *Applied Sciences*, 15(20), 11264. doi:10.3390/app152011264

KATI İNCE FİLM KAPLAMALARDA ADEZYON KARAKTERİZASYONU VE TEST YÖNTEMLERİ

Ahmet Melik YILMAZ¹

Hikmet ÇİÇEK²

1. GİRİŞ

Katı ince filmler, bir altlık malzemenin yüzey özelliklerini hacimsel özelliklerini değiştirmeden düzenlemek amacıyla tribolojik, mekanik, optik, elektronik vb. uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle sert seramik ve tribolojik kaplamalarda yüksek sertlik ve aşınma direnci tek başına yeterli değildir. Filmin çalışma sırasında altlık üzerinde kalabilmesi, film-altlık ara yüzeyinin uygulanan mekanik ve termal yükleri ayrılma meydana gelmeden aktarabilmesine bağlıdır. Bu nedenle adezyon, kaplama sisteminin yalnızca üretim kalitesini değil, kullanım sırasında oluşabilecek delaminasyon ve kaplama kaybını da belirleyen temel özelliklerden biridir (Mattox, 1978; Valli, 1986).

Adezyon genel olarak film ile altlık arasındaki ara yüzeyde meydana gelen fiziksel, kimyasal ve mekanik etkileşimlerin oluşturduğu bağlılık olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte deneysel olarak ölçülen adezyon, yalnızca ara yüzeydeki bağların kuvvetini temsil etmez. Kalıntı gerilmeler, film kalınlığı, film ve altlığın mekanik özellikleri, yüzey durumu

¹ Dr., Erzurum Teknik Üniversitesi, Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Erzurum, Türkiye, 0000-0003-2939-3592.

² Prof. Dr., Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği, Erzurum, Türkiye, 0000-0003-3038-4466.

ve uygulanan yükleme biçimi de ölçülen hasar davranışını etkileyebilir (Mattox, 1978; Perry, 1983). Bu nedenle literatürde temel adezyon ile deneysel koşullar altında belirlenen pratik adezyon arasında ayırım yapılmış ve farklı test yöntemlerinin aynı fiziksel büyüklüğü ölçmediği belirtilmiştir (Ollendorf ve Schneider, 1999).

Katı ince filmlerin adezyonunun değerlendirilmesi için çekme, çizik, indentasyon, eğilme, darbe, akustik ve lazer tabanlı farklı yöntemler geliştirilmiştir. Özellikle çizik testi sert ve ince kaplamalarda yaygınlaşmış olmakla birlikte, bu testte belirlenen kritik yükün film–altlık adezyonuna ek olarak film kalınlığına, altlık sertliğine, sürtünmeye ve oluşan hasar mekanizmasına bağlı olduğu uzun süredir bilinmektedir (Perry, 1983; Bull, 1991). Bu nedenle adezyon test sonuçlarının kullanılan yöntem, deney parametreleri ve gözlenen adezif veya kohezif hasar biçimiyle birlikte değerlendirilmesi önemlidir.

2. KATI İNCE FİMLERDE ADEZYON VE ADEZYON TESTLERİNİN TEMEL ESASLARI

Film–altlık sistemlerinin mekanik değerlendirilmesinde temel adezyon ile pratik adezyon arasında ayırım yapılması gerekir. Temel adezyon, ara yüzeydeki fiziksel ve kimyasal etkileşimlerin oluşturduğu bağlanmayı ifade ederken, pratik adezyon bu sistemin belirli bir deney geometrisi ve yükleme koşulu altında ayrılmaya karşı gösterdiği davranışla ilişkilidir. Bu nedenle deneysel olarak belirlenen kritik yük, ayrılma kuvveti veya benzeri parametreler doğrudan ara yüzeydeki bağ kuvvetinin tekil bir ölçüsü olarak kabul edilmemelidir. Farklı test yöntemlerinin farklı gerilme durumları oluşturması ve aynı film–altlık sistemi için farklı deneysel çıktılar üretmesi bu ayırımın temel nedenlerinden biridir (Ollendorf ve Schneider, 1999; Chen ve ark., 2019).

Deney sırasında elde edilen sonuç, ara yüzey bağlanmasının yanı sıra film ve altlığın mekanik özelliklerinden, kaplama kalınlığından, artık gerilmelerden, yüzey durumundan ve mevcut kusurlardan etkilenmektedir. Özellikle film ile altlık arasındaki elastik-plastik uyumsuzluk, dış yük altında gerilmelerin film içinde, ara yüzeyde veya altlıkta yoğunlaşmasını değiştirebilir. Bu nedenle aynı nominal yük altında farklı film–altlık çiftlerinde kohezif çatlama, ara yüzey ayrılması veya altlık deformasyonu gibi farklı hasar biçimleri oluşabilir. Güncel derlemelerde de kaplama adezyonunun değerlendirilmesinde test yönteminin, film–altlık sisteminin gevrek veya sünek karakterinin ve beklenen hasar mekanizmasının birlikte dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir (Chen ve ark., 2019).

Altlık yüzeyinin durumu da deneysel olarak belirlenen adezyon üzerinde doğrudan etkili olabilir. Yüzey pürüzlülüğü mekanik kenetlenmeyi değiştirebilirken, yüzey kimyası ara yüzeyde oluşan bağların niteliğini belirleyebilir. Tiringe ve ark. (2021), alüminyum–sol-jel sistemlerinde farklı yüzey ön işlemlerini karşılaştırmış ve adezyon dayanımının yalnızca pürüzlülükle açıklanamayacağını ve yüzey kimyasının, özellikle yüzey hidroksil gruplarının, ara yüzey bağlanmasında belirleyici olabildiğini göstermiştir (Tiringe ve ark. (2021)). Benzer biçimde PVD kaplamalarda altlığın ön işleminden geçirilmesi film–altlık temas koşullarını değiştirebilmekte ve adezyon testlerinde belirgin farklılıklar oluşturabilmektedir. Özkan ve ark. (2023), nitrürlenmiş ve nitrülenmemiş AISI H13 altlıklar üzerindeki çok katmanlı PVD kaplamaları karşılaştırmış ve altlık nitrülmesinin Rockwell-C testiyle belirlenen adezyon sınıflarını önemli ölçüde değiştirdiğini bildirmiştir (Tiringe ve ark., 2021; Özkan ve ark., 2023).

Adezyonun belirlenmesinde kullanılan yöntemler uygulanan yükleme biçimine ve oluşturulan hasarın niteliğine

göre farklı gruplarda değerlendirilebilir. Bu kapsamda ele alınan başlıca adezyon test yöntemleri ve temel çalışma prensipleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Adezyon test yöntemleri ve temel prensipleri

Test	Yöntem	Temel prensip
Scratch testi	Tahribatlı	Batıcı uç ile yüzeye normal ve teğetsel yük uygulanması
Pull-off testi	Tahribatlı	Filme yüzeye dik çekme yükü uygulanması
İndentasyon testi	Tahribatlı	Lokal temas yükü ile çatlak ve ayrılma oluşturulması
Four-point bending	Tahribatlı	Eğilme yükü altında çatlak oluşumunun izlenmesi
Impact testi	Tahribatlı	Tekrarlı temas yükleri altında hasar oluşumu
Akustik görüntüleme	Tahribatsız	Akustik dalgalarla ara yüzey kusurlarının belirlenmesi
Lazer esaslı yöntemler	Dalga/şok esaslı	Lazer kaynaklı gerilme veya şokla ara yüzeyin zorlanması

Geleneksel sınıflandırmada scratch, pull-off, indentasyon, eğilme ve impact gibi yöntemler kontrollü hasar meydana getiren tahribatlı yöntemler kapsamında ele alınırken, akustik veya dalga yayılımına dayalı bazı teknikler tahribatsız yöntemler içerisinde değerlendirilmektedir. Güncel yaklaşımlarda ise bu ikili sınıflandırmaya ek olarak mikro/nano-indentasyon, nanoscratch, lazer kaynaklı şok, blister ve buckle yöntemleri gibi minimum tahribatlı teknikler de ayrı olarak ele alınmaktadır (Chen ve ark., 2019).

Bu yöntemlerin her biri farklı bir fiziksel büyüklüğü esas almaktadır. Scratch testte artan veya sabit normal yük altında oluşan çatlaklar, delaminasyon ve kritik yükler incelenirken pull-off testinde film-altlık sisteminin yaklaşık normal yöndeki çekme yüküne karşı davranışı belirlenmektedir. İndentasyon yönteminde yerel temas gerilmeleri altında meydana gelen çatlak ve ayrılmalar değerlendirilirken, eğilme ve impact testlerinde sırasıyla bükülme ve tekrarlı temas yükleri altında gelişen hasar

dikkate alınmaktadır. Akustik emisyon, optik mikroskopi, profilometri ve benzeri yardımcı teknikler ise mekanik test sırasında hasarın başlangıcının ve ilerlemesinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır (Chen ve ark., 2019; Randall, 2019).

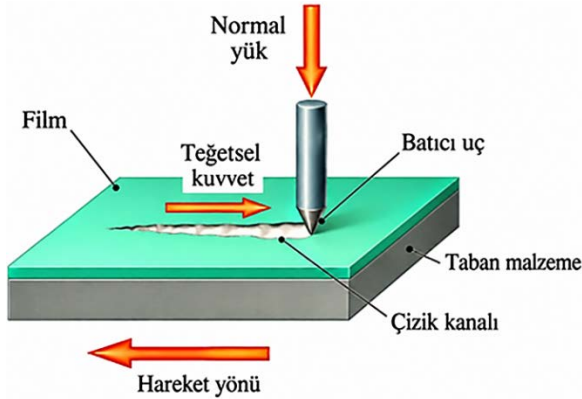
Bir test sonucunun yorumlanmasında kullanılan tek bir sayısal parametrenin yeterli kabul edilmemesi özellikle scratch testi için önem taşımaktadır. Güncel scratch test sistemlerinde kritik yük değerleri çizik izi boyunca eş zamanlı optik görüntüleme, penetrasyon derinliği, sürtünme kuvveti ve akustik emisyon verileriyle birlikte değerlendirilebilmektedir. Böylece ilk çatlak oluşumu, kohezif hasar ve ara yüzey delaminasyonu birbirinden daha güvenilir biçimde ayırt edilebilmektedir. Randall (2019), gelişmiş görüntüleme, derinlik profillemesi ve senkronize mikroskopik gözlemlerin scratch testinin nicel yorumlanabilirliğini önemli ölçüde artırdığını belirtmiştir. Bununla birlikte kritik yükün yine de film kalınlığı, altlık davranışı, batıcı uç geometrisi ve temas koşullarından bağımsız bir malzeme sabiti olmadığı dikkate alınmalıdır (Randall, 2019). Bu nedenle adezyon test yönteminin seçiminde film–altlık sisteminin özellikleri, film kalınlığı, beklenen hasar biçimi ve ölçülmek istenen parametre birlikte değerlendirilmelidir. Güncel literatürde tek bir yöntemin bütün kaplama sistemleri için evrensel olarak yeterli olmadığı, bazı durumlarda ara yüzey davranışının güvenilir biçimde değerlendirilmesi için birden fazla mekanik testin ve yüzey karakterizasyon tekniğinin birlikte kullanılmasının gerekli olabileceği vurgulanmaktadır (Chen ve ark., 2019).

3. SCRATCH ESASLI ADEZYON TESTLERİ

Scratch testi, katı ince filmlerin film–altlık sistemindeki mekanik bütünlüğünü değerlendirmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Yöntemde elmas bir batıcı uç kaplanmış

yüzey üzerinde belirli bir hızla hareket ettirilirken yüzeye normal yönde kontrollü bir yük uygulanır. Uzun ilerlemesi sırasında normal temas gerilmelerine sürtünmeden kaynaklanan teğetsel gerilmeler de eşlik eder ve yük yeterli düzeye ulaştığında film içerisinde çatlama, kenar hasarı, parçalanma veya film-altlık ara yüzeyinde ayrılma meydana gelebilir. Güncel scratch sistemlerinde uygulanan normal kuvvet, teğetsel kuvvet, sürtünme katsayısı ve penetrasyon derinliği eş zamanlı olarak kaydedilebilmekte ve çizik izi optik mikroskopi veya diğer yüzey görüntüleme teknikleriyle incelenebilmektedir. Bu nedenle yöntem yalnızca bir kritik yükün belirlenmesine değil, yük artışıyla birlikte gelişen hasar sürecinin izlenmesine de olanak sağlamaktadır (Randall, 2019; Jan ve ark., 2026).

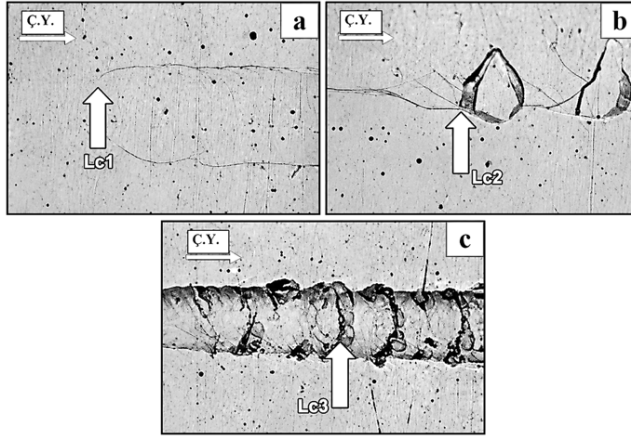
Scratch testi, uygulanan yükleme programına göre farklı biçimlerde gerçekleştirilebilir. Artan yük scratch testinde (progressive load scratch test) normal yük çizik boyunca sürekli artırılır ve filmde meydana gelen ardışık hasar olayları belirlenir. Bu yaklaşım özellikle farklı hasar eşiklerinin tek bir çizik izi üzerinde izlenmesine uygundur. Sabit yük scratch testinde (constant load scratch test) ise çizik boyunca normal yük sabit tutulur ve farklı sabit yük seviyelerinde gerçekleştirilen deneylerle hasarın oluştuğu yük aralığı belirlenebilir.



Şekil 1. Scratch testi

Bu iki uygulamaya ek olarak, multi-pass scratch testi aynı iz üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı geçişler yoluyla filmin yorulma hasar davranışını incelemek için kullanılmaktadır. Bu yöntemde tek geçişte doğrudan büyük ölçekli ayrılma oluşturmak yerine, çoğunlukla kritik yükün altındaki veya kontrollü biçimde artırılan yükler altında aynı bölge tekrar tekrar zorlanır. Böylece filmde çevrimlerle gelişen kohezif çatlama, yerel ayrılma ve yüzey bozulması izlenebilir. Multi-pass yaklaşımının özellikle tek geçişli scratch testinden farklı olarak hasar birikimi ve yorulma benzeri davranış hakkında bilgi sağlayabildiği gösterilmiştir. Storchak ve ark. (2022), PVD kaplamalarda ardışık scratch profillerinin karşılaştırılmasına dayalı gelişmiş bir multi-pass yöntemi kullanmış ve tekrar eden geçişler sırasında yüzey profilindeki değişimin kaplama hasarının belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir (Storchak ve ark., 2022).

Scratch testinde hasarın meydana geldiği karakteristik yükler genel olarak kritik yük (L_c) ile ifade edilmektedir. Bununla birlikte L_c , film-altlık sistemine ait tekil ve yöntemden bağımsız bir adezyon dayanımı olarak değerlendirilmemelidir. Artan yük altında birden fazla hasar olayı ortaya çıkabildiğinden literatürde L_{c1} , L_{c2} ve bazı uygulamalarda L_{c3} gibi birden fazla kritik yük tanımlanmaktadır. Bu indislerin fiziksel karşılığı her çalışma için açık biçimde belirtilmelidir. L_{c1} 'in her sistemde aynı hasarı veya L_{c2} 'nin her durumda tam ara yüzey ayrılmasını temsil ettiği varsayılmaz. Güncel değerlendirmelerde kritik yüklerin çizik izi görüntüleriyle eşleştirilmesi ve gözlenen hasarın kohezif mi yoksa adezif mi olduğunun ayrıca tanımlanması önerilmektedir (Randall, 2019; Roshan ve ark., 2026).



Şekil 2. Scratch testte oluşan çatlaklar: a) L_{c1} , b) L_{c2} , c) L_{c3}

Sonuç olarak düşük yük seviyesinde çizik kenarlarında başlayan ilk çatlaklar L_{c1} , film içerisinde gelişen daha belirgin kohezif çatlaklar L_{c2} ve ilerleyen yükleme altında film–altlık ara yüzeyindeki belirgin ayrılma L_{c3} ile gösterilebilir (Şekil 2). Bu gösterimin belirli bir hasar sınıflandırmasına ait olduğu belirtilmeli ve diğer çalışmalarda aynı L_c indislerinin farklı hasar olaylarına karşılık gelebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Kritik yükün büyüklüğü yalnızca film ile altlık arasındaki bağlanmadan etkilenmez. Film kalınlığı, film ve altlığın sertliği, elastik özellikleri, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilmeler ve ara yüzey yapısı sistem kaynaklı değişkenler arasındadır. Bunlara batıcı uç geometrisi ve yarıçapı, yükleme hızı, çizme hızı ve sürtünme koşulları gibi deney parametreleri de eklenmektedir. Özellikle batıcı ucun temas geometrisindeki değişim aynı normal yük altında oluşan gerilme alanını değiştirdiğinden, farklı uçlarla elde edilen kritik yüklerin doğrudan karşılaştırılması uygun değildir. Randall (2019) bu nedenle scratch test sonuçlarının film–altlık özellikleri ve test parametreleri birlikte verilerek raporlanması gerektiğini vurgulamaktadır (Randall, 2019). Benzer bir çalışmada da kritik yük değerlendirmesinin kaplama mikroyapısı, porozite, artık gerilmeler ve hasar biçimleriyle

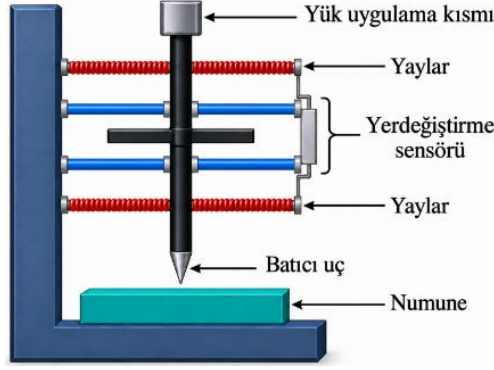
birlikte ele alınması gerektiği belirtilmiştir (Roshan ve ark., 2026).

Hasarın belirlenmesinde yalnızca yük–mesafe eğrisi kullanılmaz. Optik mikroskopi, çizik boyunca kohezif çatlakların, kenar kırılmalarının ve delaminasyon bölgelerinin doğrudan belirlenmesine imkan verirken, akustik emisyon ani kırılma olaylarına duyarlı ek bir sinyal sağlayabilir. Sürtünme katsayısındaki veya penetrasyon derinliğindeki değişimler de filmin uzaklaştırıldığı ya da batıcı ucun altlıkla etkileşiminin belirginleştiği bölgelerin belirlenmesine yardımcı olabilir. Güncel cihazlarda panoramik görüntüleme, çizik derinliği profillemeye ve eş zamanlı optik gözlem gibi tekniklerin birlikte kullanılması kritik olayların konumlandırılmasını kolaylaştırmıştır. Bununla birlikte akustik emisyon veya sürtünme katsayısındaki tek bir ani değişimin, mikroskobik olarak doğrulanmadan doğrudan ara yüzey ayrılması şeklinde yorumlanması doğru değildir (Randall, 2019; Jan ve ark., 2026).

4. İNDENTASYON ESASLI ADEZYON TESTLERİ

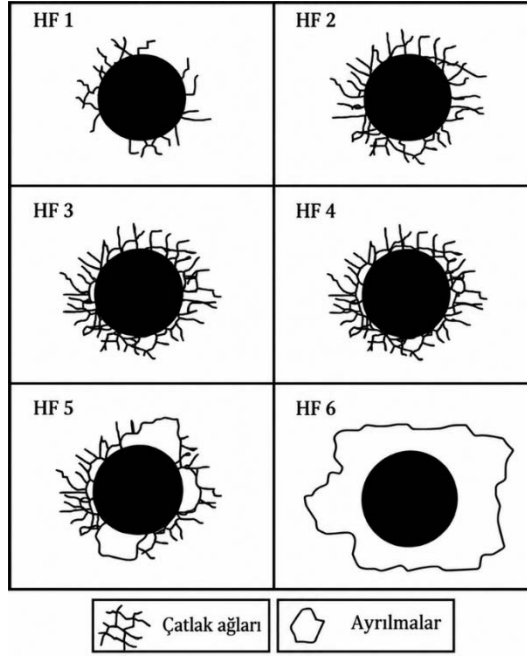
Geleneksel scratch testinin sert ve nispeten ince tribolojik kaplamalarda yaygın kullanımına karşılık, daha düşük yüklerin ve daha küçük temas geometrilerinin gerektiği sistemlerde mikro- ve nanoscratch uygulamaları kullanılmaktadır. Bu ölçekte uygulanan yükler ve penetrasyon derinlikleri azaltılarak çok ince filmlerin lokal deformasyon ve kırılma davranışı incelenebilir. Ancak test ölçeği küçüldükçe yüzey pürüzlülüğü, film kalınlığı, uç geometrisi ve yüzey heterojenliği sonuç üzerinde daha belirgin hale gelebilir. Bu nedenle nanoscratch, geleneksel scratch testinin yalnızca daha düşük yüklü bir biçimi olarak değil, temas koşullarının yeniden değerlendirilmesi gereken mikro/nano

ölçekli bir karakterizasyon yöntemi olarak ele alınmaktadır (Chen ve ark., 2019; Jan ve ark., 2026).



Şekil 3. İndentasyon testi

Scratch testine alternatif veya tamamlayıcı olarak kullanılan indentasyon testlerinde (Şekil 3) ise batıcı uç yüzey üzerinde ilerletilmez. Belirli bir noktada yüzeye normal yönde bastırılarak film, ara yüzey ve altlık çevresinde lokal bir gerilme alanı oluşturulur. Uygulanan yükün büyüklüğüne, batıcı uç geometrisine ve film–altlık özelliklerine bağlı olarak iz çevresinde radyal çatlaklar, film içi çatlama veya yerel delaminasyon gelişebilir. Böylece iz çevresindeki hasarın tipi ve yayılımı kullanılarak kaplama–altlık sisteminin adezyon davranışı nitel veya yarı nicel olarak değerlendirilebilir. Güncel literatüründe Rockwell-C indentasyon testi ile scratch testinin aynı kaplama sistemlerinde birbirini tamamlayan yöntemler olarak birlikte kullanıldığı görülmektedir (Muhammed ve ark., 2024; Dalibon ve ark., 2024).



Şekil 4. İndentasyon test sonucunun sınıflandırılması (Heinke et al. 1995)

Rockwell indentasyon yaklaşımında elmas baticı uç ile oluşturulan izin çevresindeki çatlak ve kaplama ayrılmaları görsel olarak değerlendirilir. Bu yöntem, Rockwell elmas baticı kullanılarak 20 μm 'ye kadar olan seramik kaplamaların adezyonunun nitel olarak değerlendirilmesine ve indentasyon sonrasında oluşan çatlakların kohezif hasarı hakkında bilgi verebilir. Bu yöntem belirli metalik kaplamalara da uygulanabilmekle birlikte, sert altlık üzerindeki elastik kaplamalar için uygun değildir. Rockwell-C indentasyon görüntülerinin sınıflandırılmasında HF1–HF6 ölçeği yaygın biçimde kullanılmaktadır. HF1 ve HF2 sınıflarında indent çevresinde sınırlı çatlama ve kaplama ayrılması görülürken, daha yüksek HF sınıflarında çatlak yoğunluğu ve delaminasyon alanı artmaktadır. HF5 ve HF6 geniş ölçekli kaplama ayrılmasıyla karakterize edilen daha ağır hasar durumlarını temsil eder. Bu

yaklaşım tek bir sayısal adezyon değeri üretmek yerine, indent çevresindeki hasar morfolojisinin karşılaştırmalı olarak sınıflandırılmasına dayanır. HF sınıflandırmasının PVD nitrür kaplamaların scratch ve impact sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmesi Heinke ve ark. (1995) tarafından sistematik olarak ele alınmış, yöntem daha sonraki PVD çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmıştır (Heinke ve ark., 1995; Muhammed ve ark., 2024).

Vickers gibi piramidal batıcı uçlarla yapılan indentasyonlarda ise indent köşelerinden veya çevresinden gelişen çatlakların biçimi ve uzunluğu incelenebilir. Bu yaklaşım film içi kırılma ile ara yüzey ayrılmasının birlikte gözlenebildiği sistemlerde hasar mekanizmasının belirlenmesine katkı sağlar. Daha düşük yüklerde gerçekleştirilen mikro- ve nanoindentasyon testleri çoğunlukla sertlik ve elastik modül gibi mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılmakla birlikte, uygun film-altlık sistemlerinde indentasyonla kontrollü delaminasyon oluşturulması ve uygun kırılma mekaniği modellerinin kullanılması halinde ara yüzey davranışına ilişkin nicel bilgiler de elde edilebilir. Bu nedenle her nanoindentasyon ölçümünün doğrudan bir adezyon testi olduğu kabul edilmemelidir. Adezyon değerlendirmesi için ara yüzeyde meydana gelen hasarın tanımlanması ve uygun mekanik modellerle ilişkilendirilmesi gerekir (Chen ve ark., 2019; Reuther ve ark., 2022).

Scratch ve indentasyon yöntemleri aynı film-altlık sistemi üzerinde farklı gerilme durumları meydana getirdiğinden birbirlerinin doğrudan alternatifi değildir. Scratch test hareketli temas altında hasarın çizik boyunca gelişimini ve ardışık kritik olayları izlemeye olanak sağlarken, indentasyon belirli bir bölgede oluşturulan lokal temas gerilmeleri altında çatlak ve delaminasyon morfolojisine odaklanır. Bu nedenle özellikle sert kaplamaların karakterizasyonunda iki yöntemin birlikte kullanılması, tek bir yöntemden elde edilen sonuca kıyasla film

içi kohezif hasar ile ara yüzeydeki adezif ayrılmanın daha kapsamlı değerlendirilmesine imkan verebilir (Jan ve ark., 2026; Muhammed ve ark., 2024).

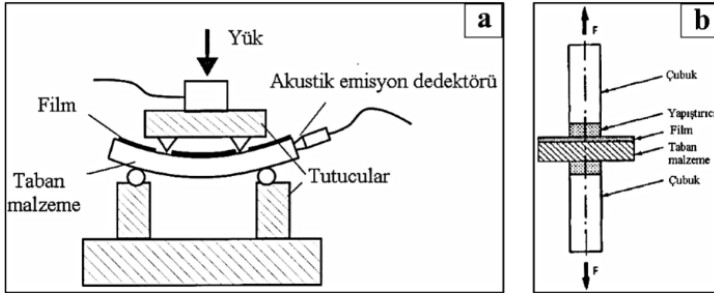
5. DİĞER ADEZYON TEST YÖNTEMLERİ

Scratch ve indentasyon testleri dışında, film–altlık ara yüzeyinin farklı gerilme durumları altında değerlendirilmesine olanak sağlayan çeşitli mekanik ve fiziksel yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin bir bölümü kaplamaya doğrudan çekme veya eğilme yükü uygularken, bazıları tekrarlı temas, akustik dalga veya lazer kaynaklı şok etkisinden yararlanmaktadır. Yükleme biçiminin değişmesi, ara yüzeyde oluşan gerilme dağılımını ve buna bağlı olarak gözlenen hasar mekanizmasını da değiştirdiğinden, bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar aynı fiziksel büyüklüğün alternatif ölçümleri olarak değerlendirilmemelidir. Güncel çalışmalar da kaplama adezyonunun tek bir testle tam olarak karakterize edilmesinin güç olduğu ve yöntemin film–altlık sistemi ile incelenmek istenen hasar mekanizmasına göre seçilmesi gerektiği belirtilmektedir (Cho ve ark., 2025; Jan ve ark., 2026).

Four-point bending yöntemi, film–altlık sisteminin eğilme altında ara yüzey hasarına karşı davranışının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Numunenin dört noktadan yüklenmesiyle iki iç yükleme noktası arasında yaklaşık sabit eğilme momenti oluşturulur ve filmde veya ara yüzeyde çatlak başlangıcı ve ilerlemesi izlenir. Geleneksel uygulamalarda mekanik yükleme sırasında meydana gelen mikroçatlakların belirlenmesinde akustik emisyon ölçümlerinden de yararlanılabilmektedir (Ollendorf ve Schneider, 1999). Kırılma mekaniği esaslı uygulamalarda ise önceden oluşturulmuş bir ara yüzey çatlağının kritik yük altında ilerlemesi kullanılarak enerji salınım hızı veya ara yüzey kırılma tokluğu belirlenebilir. Peng

ve ark. (2024), ince ve düşük rijitlikli filmlerde geleneksel iki tabakalı numune geometrisinin delaminasyonu başlatmakta yetersiz kalabildiğini göstermiş ve üst yüzeye daha rijit ek bir tabaka yerleştirilen üç tabakalı bir four-point bending geometrisi geliştirmiştir. Bu yaklaşım ile epoksi film-çelik ara yüzeyinin kırılma tokluğu kritik delaminasyon yükü üzerinden belirlenmiştir (Peng ve ark., 2024).

Pull-off testi ise kaplama yüzeyine yaklaşık normal yönde çekme gerilmesi uygulanmasına dayanır. Testte bir çekme elemanı uygun bir yapıştırıcı ile kaplama yüzeyine bağlanır ve artan çekme kuvveti altında sistemin ayrıldığı yük belirlenir. Elde edilen maksimum kuvvetin etkin alana oranlanması ile bir çekme gerilmesi hesaplanabilmekle birlikte, kırılmanın gerçekleştiği bölgenin ayrıca belirlenmesi gerekir. Ayrılmanın film-altlık ara yüzeyinde meydana gelmesi ile film içerisinde, altlıkta veya bağlantı için kullanılan yapıştırıcı tabakada meydana gelmesi aynı sonucu ifade etmez. Bu nedenle pull-off sonucunun değerlendirilmesinde yalnızca maksimum gerilmenin değil, kırılma yüzeyinin de raporlanması gerekir. Güncel değerlendirmelerde yöntemin nicel bir çıktı sağlayabilmesine karşın kullanılan yapıştırıcının dayanımının ölçülebilecek üst sınırı kısıtlayabileceği ve karmaşık kaplama sistemlerinde kohezif ve adeziv kırılmanın birbirinden ayrılması gerektiği vurgulanmaktadır (Cho ve ark., 2025).

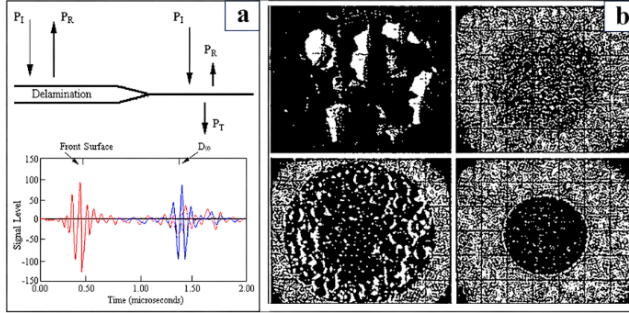


Şekil 5. a) Four-point bending testi b) Pull-off testi (Ollendorf and Schneider 1998; Peng ve ark., 2024)

Kaplama–altlık ara yüzeyindeki kusurların ayrılma oluşturmada incelenmesinde akustik görüntüleme önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Taramalı akustik mikroskopide yüksek frekanslı ultrasonik dalgalar numuneye gönderilir ve farklı akustik empedansa sahip bölgelerden yansıyan sinyaller değerlendirilir. Ara yüzeyde bulunan boşluk, delaminasyon, çatlak veya diğer süreksizlikler dalga yansıma ve iletim davranışını değiştirdiğinden bu bölgeler görüntülenebilir. Böylece yöntem doğrudan kaplamayı koparmadan ara yüzey bütünlüğü hakkında bilgi sağlayabilir. Koller ve ark. (2024), Fe kaplama–Al altlık sistemlerinde taramalı akustik mikroskopi ile yapılan incelemelerde, bazı kaplama kusurlarının standart SEM görüntülerinde görülenden daha geniş bölgeleri etkileyebildiğini göstermiştir. Bu sonuç, akustik yöntemlerin yüzey veya tek bir kesitle sınırlı mikroskobik gözlemlere tamamlayıcı bilgi sağlayabileceğini göstermektedir (Koller ve ark., 2024). Burada akustik görüntüleme ile akustik emisyonun birbirinden ayrılması gerekir. Akustik görüntüleme, mevcut ara yüzey kusurlarının ultrasonik dalga davranışı üzerinden konumlandırılmasına dayanırken, akustik emisyon mekanik yükleme sırasında oluşan ani çatlama veya ayrılma olaylarının meydana getirdiği elastik dalgaların algılanmasını esas alır. Bu nedenle akustik emisyon çoğu zaman scratch, eğilme veya impact gibi mekanik testlere eşlik eden yardımcı bir ölçüm tekniğidir. Güncel çalışmalarda akustik emisyon verilerinin kaplama hasarının belirlenmesinde yararlı olduğu, ancak sinyallerin mümkün olduğunca optik veya SEM incelemeleriyle doğrulanması gerektiği bildirilmektedir (Jan ve ark., 2026).

Lazer esaslı adezyon testlerinde ise film–altlık sistemine mekanik bir aparatla temas etmek yerine kısa süreli ve yüksek enerjili lazer darbeleriyle şok dalgası oluşturulur. Oluşturulan basınç dalgası malzeme içerisinde ilerler ve serbest yüzeylerden yansıyan dalgaların etkileşimi sonucunda ara yüzey yakınında

çekme gerilmeleri meydana gelebilir. Bu gerilmelerin yeterli seviyeye ulaşması durumunda delaminasyon veya parçalanma oluşur ve ayrılmanın başladığı lazer yükleme seviyesi ara yüzey davranışının değerlendirilmesinde kullanılır. Chen ve ark. (2019), lazer kaynaklı şok yöntemlerini kaplama-altlık sistemlerinin minimum tahribatlı karakterizasyonunda gelişen yaklaşımlar arasında değerlendirmiştir (Chen ve ark., 2019). Lazer şok adezyon testlerinin güncel uygulamaları yöntemin özellikle lokal ara yüzey bölgelerinin değerlendirilmesinde kullanılabildiğini göstermektedir. Sma ve ark. (2024), alüminyum altlık üzerindeki termal olarak yaşlandırılmış epoksi kaplamalarda lazer şok testi uygulamış ve yaşlandırma süresine bağlı ara yüzey değişimlerini kaplamanın ayrılması için gerekli lazer güç yoğunluğu üzerinden değerlendirmiştir. Daha güncel bir derlemede lazer şok yönteminin temassız yükleme ve yerel ara yüzey değerlendirmesi açısından avantajlar sunduğu, buna karşılık şok parametrelerinin kalibrasyonu, altlıkta istenmeyen hasar oluşması ve yöntemin standartlaştırılması gibi konuların halen önemli sınırlılıklar olduğu belirtilmiştir (Sma ve ark., 2024; Wu ve ark., 2025).

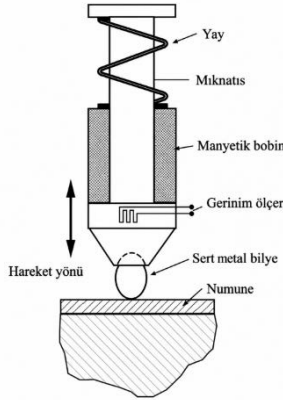


Şekil 6. a) Akustik görüntüleme, b) Lazer esaslı adezyon testi (Moore 1991; Fedenev et al. 2003)

Film-altlık sistemlerinin tekrarlı dinamik yükler altındaki davranışını inceleyen impact testinde ise küresel veya farklı geometrili bir batıcı uç kaplama yüzeyine belirli bir yük veya enerjiyle tekrarlı olarak uygulanır. Tekrarlanan temas sonucunda

film içinde çatlaklar, kalıcı deformasyon, parçalanma ve ara yüzey delaminasyonu gelişebilir. Test sonucu; hasarın başladığı çevrim sayısı, penetrasyon veya krater boyutundaki değişim ve yüzeyde oluşan hasar morfolojisi üzerinden değerlendirilebilir. Bu nedenle impact testi doğrudan tek bir “adezyon dayanımı” belirleyen bir yöntemden çok, film–altlık sisteminin tekrarlı temas altında hasar birikimi ve dinamik dayanımının değerlendirilmesine olanak sağlar (Beake, 2022).

Nano- ve mikro-impact yöntemlerinin gelişmesiyle çok daha düşük yükler ve küçük temas alanlarında ince kaplama sistemlerinin çevrimsel davranışı incelenebilir hale gelmiştir. Beake (2022), sert karbon filmler, DLC kaplamalar ve PVD nitrürler üzerinde yapılan çalışmaları değerlendirerek impact hasarının yalnızca kaplama özelliklerine değil, altlığın yük taşıma kapasitesine, film kalınlığına, uç geometrisine ve uygulanan darbe enerjisine de bağlı olduğunu göstermiştir. Bazı sistemlerde ara yüzey delaminasyonu penetrasyon derinliğinde belirgin değişimlerle izlenebilmekle birlikte, impact testiyle elde edilen hasarın kohezif kırılma, plastik deformasyon ve adezif ayrılmanın birlikte etkisini içerebileceği dikkate alınmalıdır (Beake, 2022).



Şekil 7. Impact testi (Ollendorf and Schneider 1998)

Bu yöntemler birlikte değerlendirildiğinde four-point bending ve pull-off testleri kontrollü makroskobik yükleme altında ayrılmanın değerlendirilmesine, akustik görüntüleme mevcut ara yüzey kusurlarının konumlandırılmasına, lazer yöntemleri lokal ve temassız şok yüklemesine, impact testi ise tekrarlı dinamik temas altında hasar birikiminin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla yöntem seçimi yalnızca ölçüm kolaylığına göre değil, incelenen film-altlık sisteminde oluşturulmak istenen gerilme durumu ve belirlenmek istenen hasar mekanizmasına göre yapılmalıdır.

6. ADEZYON TEST YÖNTEMLERİNİN UYGULAMALARI, KARŞILAŞTIRILMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Katı ince filmlerin adezyonunun değerlendirilmesine yönelik çalışmalar, deney sonucunun yalnızca film-altlık ara yüzeyindeki bağlanmaya değil, kullanılan test yöntemine ve film-altlık sisteminin mekanik özelliklerine de bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle scratch ve indentasyon gibi yaygın yöntemlerde uygulanan gerilme durumu birbirinden farklı olduğundan, aynı kaplama sistemi için elde edilen sonuçların doğrudan eşdeğer olması beklenmemektedir. Güncel PVD kaplama çalışmalarını kapsamlı biçimde değerlendiren Jan ve ark. (2026), scratch ve indentasyon testlerinden lazer kaynaklı spallation ve akustik emisyon yöntemlerine kadar farklı tekniklerin farklı ara yüzey özelliklerine duyarlı olduğunu ve test sonucunun altlık hazırlığı, biriktirme parametreleri, artık gerilmeler ve kaplama mimarisiyle birlikte yorumlanması gerektiğini belirtmiştir (Jan ve ark., 2026). Bu yöntem bağımlılığı, de Freitas ve ark. (2025) tarafından TiAlN ve AlTiN/TiSiN kaplamaların farklı Co içeriklerine sahip WC-Co altlıklar üzerindeki davranışının incelendiği çalışmada açık

biçimde görülmektedir. Araştırmacılar %6, %8 ve %10 Co içeren altlıklar üzerinde hem indentasyon hem de scratch testlerini kullanmıştır. İndentasyon sonuçlarında Co miktarındaki artış her iki kaplama sistemi için daha yüksek adezyonla ilişkilendirilirken, scratch testi TiAlN ve AlTiN/TiSiN sistemleri arasında farklı bir eğilim ortaya koymuştur. TiAlN kaplamada scratch ile belirlenen adezyon ile H/E oranı arasında makul bir ilişki bulunurken, AlTiN/TiSiN kaplamada aynı ilişkinin daha zayıf olduğu bildirilmiştir. Bu sonuçlar, bir film-altlık sisteminin adezyonunun kullanılan ölçüm tekniğine bağlı olarak farklı biçimde temsil edilebildiğini göstermektedir (de Freitas ve ark., 2025).

Literatürde üzerinde durulan diğer bir değişken, kaplama öncesinde uygulanan altlık yüzey hazırlığıdır. Lopes Dias ve ark. (2024), WC-Co altlıkların geleneksel glow discharge (GD) ve arc-enhanced glow discharge (AEGD) iyon aşındırması sonrasında TiAlSiN ile kaplanmasını incelemiştir. AEGD işleminin daha yüksek aşındırma hızı sağladığı, işlem süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün değiştiği ve TiAlSiN filmin adezyonunun geleneksel GD işlemine kıyasla iyileştiği belirlenmiştir. Beş dakikalık AEGD işlemi sonrasında dahi Rockwell-C indentasyon testinde en yüksek adezyon sınıfının elde edilmesi, film bileşimi değiştirilmeden yalnızca ara yüzey hazırlığının kaplama davranışını önemli ölçüde değiştirebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte uzun süreli aşındırmanın altlık yüzeyinden tane uzaklaştırılması ve kesici kenar geometrisinin değişmesi gibi ilave etkiler oluşturduğu da raporlanmıştır (Lopes Dias ve ark., 2024). Benzer şekilde Stangier ve ark. (2025), gelişmiş AEGD teknolojisini hem yüzey temizleme hem de plazma nitrürleme amacıyla değerlendirerek kaplama öncesi işlemlerin film adezyonu üzerindeki etkisini incelemiştir. Yoğunlaştırılmış iyon bombardımanının yüzey bütünlüğünü belirgin biçimde bozmadan aşındırma hızını artırabildiği ve

sonrasında biriktirilen AlTiN kaplamaların adezyonunun iyileştiği belirtilmiştir. Çelik altlıklarda uygulanan nitrürleme işlemi ise yüzeye yakın bölgede kademeli bir sertlik artışı oluşturarak altlığın yük taşıma kapasitesini yükseltmiş ve kaplama davranışını olumlu yönde etkilemiştir (Stangier ve ark., 2025). Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, ölçülen adezyonun yalnızca film malzemesinin bir özelliği olmadığı, altlığın yüzey ve yüzeye yakın bölgesinin mekanik durumunun da test sonucunda belirleyici olduğu anlaşılmaktadır.

Kaplama kalınlığı ve artık gerilmeler arasındaki ilişki de adezyon değerlendirmelerinde tek yönlü bir genelleme yapılmasını güçleştirmektedir. Bobzin ve ark. (2024), yüksek hızlı PVD yöntemiyle üretilen AlCrN ve AlCrO sistemlerinde film kalınlığı, artık gerilmeler ve adezyon arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çalışmada kaplama kalınlığının artmasıyla artık bası gerilmelerinin azalabildiği ve aynı zamanda kaplama–altlık adezyonunun iyileştiği belirlenmiştir. Özellikle 20–25 μm 'nin üzerindeki yüksek hızlı PVD kaplamalarda gözlenen bu davranış, “film kalınlığı arttıkça adezyon mutlaka azalır” biçimindeki basit bir yaklaşımın bütün kaplama teknolojileri için geçerli olmadığını göstermektedir. Film büyüme mekanizması, iyon bombardımanı ve artık gerilmenin gelişimi birlikte değerlendirilmelidir (Bobzin ve ark., 2024).

Tek geçişli scratch testlerinden farklı olarak, tekrarlı çizme esaslı yöntemler kaplamada hasarın nasıl biriktiğini araştırmak amacıyla da kullanılmaktadır. Storchak ve ark. (2022), PVD kaplı kesici uçlarda geliştirdikleri multi-pass progressive scratch yaklaşımında ardışık çizik profillerinin birbiriyle korelasyonunu kullanarak kaplama hasarının başladığı yükü belirlemiştir. Her geçişte maksimum yükün kademeli olarak artırıldığı yöntemde, ardışık çizik profilleri arasındaki ilişkinin belirgin biçimde azalması kaplama hasarının başlangıcı için ölçüt olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım özellikle yüzey

pürüzlülüğünün yüksek olduğu kaplamalarda yalnızca tek bir kritik yük veya tek bir yüzey görüntüsüne dayanmadan hasar gelişiminin değerlendirilmesine imkan sağlamıştır (Storchak ve ark., 2022).

Scratch test sonuçlarının karşılaştırılmasında hasar kriterinin tanımlanması ayrıca önem taşımaktadır. Roshan ve ark. (2026) tarafından termal püskürtülmüş kaplamalar üzerine yapılan kapsamlı derlemede, kaplama mikroyapısı, porozite, artık gerilmeler ve tabakalar arası bağlanmanın scratch davranışını belirgin biçimde etkilediği gösterilmiştir. Çalışmalar arasında batıcı uç geometrisi, yükleme programı, çizme hızı ve kritik yükün belirlenme ölçütlerinin farklı olması ise literatürde verilen değerlerin doğrudan karşılaştırılmasını sınırlandırmaktadır. Optik mikroskopi, akustik emisyon ve çok eksenli kuvvet ölçümlerinin birlikte kullanılmasının hasarın başlangıcı ve ilerlemesinin daha güvenilir biçimde tanımlanmasını sağladığı belirtilmiştir (Roshan ve ark., 2026). Bu değerlendirme, özellikle yalnızca L_c değeri verilerek yapılan karşılaştırmaların test koşulları farklı olduğunda yanıltıcı olabileceğini göstermektedir.

Güncel literatürde elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, adezyon testlerinin birbirinin yerine geçen yöntemlerden çok birbirini tamamlayan karakterizasyon araçları olduğu görülmektedir. İndentasyon, belirli bir noktadaki lokal yük aktarımı ve delaminasyon davranışına duyarlıyken scratch testi hareketli temas altında kohezif ve adezif hasarın gelişimini ortaya koymaktadır. Multi-pass scratch, daha düşük veya kademeli yükler altında hasar birikiminin izlenmesine imkan verirken kırılma mekaniği, lazer ve akustik esaslı yöntemler ara yüzey davranışını farklı fiziksel büyüklükler üzerinden değerlendirmektedir. Bu nedenle bir yöntemde daha yüksek kritik yük elde edilmesi, film-altlık sisteminin diğer bütün yükleme durumlarında daha güçlü bir ara yüzeye sahip olduğu anlamına gelmemektedir.

Bu çalışmalar, adezyon sonuçlarının yorumlanmasında üç unsurun birlikte dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bunlar, film–altlık sisteminin özellikleri, uygulanan test koşulları ve gözlenen hasar mekanizmasıdır. Kritik yük, HF sınıfı veya ayrılma gerilmesi gibi tek bir deneysel parametre, ancak bu koşullar açık biçimde tanımlandığında anlamlı bir karşılaştırma ölçütüne dönüşmektedir. Güncel literatürde, tek bir adezyon değeri üzerinden değerlendirme yapmak yerine, mekanik test sonuçlarının hasar morfolojisi ile yüzey ve ara yüzey karakterizasyonu bulgularıyla birlikte yorumlanması gerektiği benimsenmektedir (Jan ve ark., 2026; Roshan ve ark., 2026).

7. SONUÇ

Katı ince filmlerde adezyonun güvenilir biçimde değerlendirilmesi, tek bir sayısal parametreye dayanmaktan çok film–altlık sisteminin bütüncül mekanik davranışının incelenmesini gerektirir. Elde edilen sonuçlar; ara yüzey bağlanmasının yanı sıra kaplama yapısı, altlığın mekanik desteği, ara yüzey koşulları ve uygulanan yükleme biçiminden etkilenmektedir. Bu nedenle test yöntemi, araştırmanın amacı, incelenen film–altlık sistemi ve beklenen hasar mekanizması dikkate alınarak seçilmelidir. Sonuçların anlamlı biçimde karşılaştırılabilmesi için deney parametrelerinin açıkça tanımlanması, hasarın olduğu bölgenin doğru belirlenmesi ve mekanik verilerin mümkün olduğunda yüzey veya ara yüzey incelemeleriyle desteklenmesi önemlidir. Özellikle karmaşık ve çok katmanlı kaplama sistemlerinde birbirini tamamlayan test ve karakterizasyon yöntemlerinin birlikte kullanılması, yalnızca hasarın başladığı yükün belirlenmesini değil, hasarın nerede ve hangi mekanizma ile geliştiğinin ortaya konulmasını da sağlar. Bu yaklaşım katı ince film sistemlerinde adezyon davranışının

daha güvenilir bütüncül ve mekanizma temelli biçimde değerlendirilmesine temel oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

- Beake, B. D. (2022). Nano-and micro-scale impact testing of hard coatings: a review. *Coatings*, 12(6), 793.
- Bobzin, K., Kalscheuer, C., Möbius, M. P., & Hassanzadegan Aghdam, P. (2024). Residual stress analysis in high-speed physical vapor deposition coatings. *Advanced Engineering Materials*, 26(24), 2401095.
- Bull, S. J. (1991). Failure modes in scratch adhesion testing. *Surface and Coatings Technology*, 50(1), 25-32.
- Chen, X., Shaw, C., Gelman, L., & Grattan, K. T. (2019). Advances in test and measurement of the interface adhesion and bond strengths in coating-substrate systems, emphasising blister and bulk techniques. *Measurement*, 139, 387-402.
- Cho, Y. R., Lee, D. H., Mun, S. Y., & Kim, M. J. (2025). Review on Adhesion Strength between Coatings and Substrates: Influencing Factors, Adhesion Mechanisms, and Evaluation Methods. *Korean Journal Of Metals And Materials*, 63(12), 1012-1021.
- Dalibon, E. L., Maskavizan, A. J., & Brühl, S. P. (2024). Tribological behaviour of TiAlN and AlCrN coatings on stainless steel. *Surface Engineering*, 40(2), 178-188.
- de Freitas, B. M., Weiss, D. S. L., Santos, L. S., Soares, P., Amorim, F. L., Junior, J. M. F. P., ... & Torres, R. D. (2025). Influence of cobalt content on the adhesion of TiAlN and AlTiN/TiSiN coatings on WC-Co substrates. *Surfaces and Interfaces*, 107339.
- Dias, N. F. L., Meijer, A. L., Jäckel, C. P., Frisch, A., Biermann, D., & Tillmann, W. (2024). Arc-enhanced glow discharge ion etching of WC-Co cemented carbide for improved PVD thin film adhesion and asymmetric cutting edge

preparation of micro milling tools. Surface and Coatings Technology, 491, 131166.

Fedenev, A. V., Alekseev, S. B., Goncharenko, I. M., Koval, N. N., Lipatov, E. I., Orlovskii, V. M., ... & Shulepov, M. A. (2003, June). Laser test of adhesion of thin metal films on glass substrate. In 2003 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO/Europe 2003)(IEEE Cat. No. 03TH8666) (p. 583). IEEE.

Heinke, W., Leyland, A., Matthews, A., Berg, G., Friedrich, C., & Broszeit, E. (1995). Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests. Thin solid films, 270(1-2), 431-438.

Jan, S. G., Arif, A. F. M., He, Q., Ahmed, Y. S., Abubakar, A., Ankah, N., & Akhtar, S. S. (2026). Adhesion mechanisms, evaluation techniques and modeling strategies in PVD coatings: From fundamentals to data-driven design. Journal of Materials Research and Technology.

Koller, M., Cizek, J., Janovská, M., Ševčík, M., Kondas, J., Singh, R., & Seiner, H. (2024). Scanning Acoustic Microscopy Characterization of Cold-Sprayed Coatings Deposited on Grooved Substrates. Journal of Thermal Spray Technology, 33(6), 1941-1954.

Mattox, D. M. (1978). Thin-film adhesion and adhesive failure-a perspective. Adhesion measurement of thin films, thick films and bulk coatings, 640, 54.

Moore, T. M. (1991). Reliable delamination detection by polarity analysis of reflected acoustic pulses. In Proceedings of International Symposium for Testing and Failure Analysis (pp. 49-54).

Muhammed, M., Javidani, M., Ebrahimi Sadrabadi, T., Heidari, M., Levasseur, T., & Jahazi, M. (2024). A comprehensive

- review of cathodic arc evaporation physical vapour deposition (CAE-PVD) coatings for enhanced tribological performance. *Coatings*, 14(3), 246.
- Ollendorf, H., & Schneider, D. (1999). A comparative study of adhesion test methods for hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 113(1-2), 86-102.
- Özkan, D., Yilmaz, M. A., Karakurt, D., Szala, M., Walczak, M., Bakdemir, S. A., ... & Sulukan, E. (2023). Effect of AISI H13 steel substrate nitriding on AlCrN, ZrN, TiSiN, and TiCrN multilayer PVD coatings wear and friction behaviors at a different temperature level. *Materials*, 16(4), 1594.
- Peng, O., Jiang, L., Yao, H., & Zayed, T. (2024). A four-point bending technique for characterizing the interface fracture toughness between soft thin films and stiff substrates. *Engineering Fracture Mechanics*, 297, 109881.
- Perry, A. J. (1983). Scratch adhesion testing of hard coatings. *Thin solid films*, 107(2), 167-180.
- Randall, N. X. (2019). The current state-of-the-art in scratch testing of coated systems. *Surface and Coatings Technology*, 380, 125092.
- Roshan, R., Mishra, A., Ghosh, A., Swain, S. R., Patel, P., Shrivastava, P., & Msomi, V. (2026). A critical analysis of the scratch test for thermally sprayed coatings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-24.
- Sma, I., Ünalı, S., Ayad, M., Gervais, M., Berthe, L., & Richaud, E. (2024). Laser shock adhesion testing of thermally aged epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*, 195, 108603.

- Stangier, D., Dias, N. F. L., Henning, T., Ontrup, F., Tillmann, W., & von der Heide, V. (2025). Improved plasma etching and nitriding technology for enhanced PVD coating performance using advanced arc enhanced glow discharge. *Surface and Coatings Technology*, 497, 131753.
- Storchak, M., Zakiev, I., Zakiev, V., & Manokhin, A. (2022). Coatings strength evaluation of cutting inserts using advanced multi-pass scratch method. *Measurement*, 191, 110745.
- Tiringer, U., Van Dam, J. P. B., Abrahami, S. T., Terryn, H., Kovač, J., Milošev, I., & Mol, J. M. C. (2021). Scrutinizing the importance of surface chemistry versus surface roughness for aluminium/sol-gel film adhesion. *Surfaces and Interfaces*, 26, 101417.
- Valli, J. (1986). A review of adhesion test methods for thin hard coatings. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 4(6), 3007-3014.
- Wu, Y., Hou, Y., & Ji, Z. (2025). Applications of laser shock generated tensile forces: From testing to processing. *Optics and Lasers in Engineering*, 194, 109114.

AUXETIC STRUCTURES IN ENGINEERING: DESIGN, MANUFACTURING, AND INDUSTRIAL APPLICATIONS

Hilmi TEKDIR¹

1. INTRODUCTION

Developing high-performance cellular materials is a fundamental goal in modern materials science and engineering. Advanced systems require these materials to be extremely lightweight. They must also possess high energy absorption and superior mechanical properties (Novak, Vesenjok, & Ren, 2016; Prawoto, 2012). Achieving these goals is quite difficult with conventional engineering materials. Most traditional materials suffer from a positive Poisson's ratio limitation. They contract transversely under axial tension and expand transversely under axial compression. This physical reality causes specific mechanical constraints. Examples include a limited shear modulus and low local impact resistance. It also inevitably leads to unwanted increases in structural weight (Joseph, Mahesh, & Harursampath, 2021; Lakes, 2017; Winczewski & Rybicki, 2022).

Auxetic mechanical metamaterials offer a unique and tunable solution to this structural problem. They exhibit a negative Poisson's ratio (NPR). They expand transversely under tension, which strongly contrasts with conventional material dynamics (Grima, Caruana-Gauci, Attard, & Gatt, 2012; Y. Liu,

¹ Asst. Prof. Dr., Erzurum Technical University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Erzurum, Turkey, ORCID: 0000-0002-9141-9514.

Zhao, Xu, Ren, & Zhong, 2023; Shuaibu et al., 2024). Auxetics produce extraordinary kinematic and mechanical responses through specific fundamental deformation mechanisms. These include re-entrant geometries and chiral networks. Rotating rigid units and perforated shapes also drive this distinct behavior (Cui, Zhang, & Gain, 2023; F. Wang, 2018; Zeng, Hu, & Zhou, 2017).

Recent years have seen a major transition in this scientific field. Auxetic metamaterials are successfully evolving from conceptual designs into highly complex three-dimensional engineering components. This shift is actively driven by the integration of topology optimization and computer-aided design. AI and machine learning supported modeling have also contributed significantly to this progress. Additive manufacturing technologies like 3D and 4D printing play the most critical role in their physical realization (Rahimi-Lenji, Heidari-Rarani, Mirkhalaf, & Mirkhalaf, 2025; Ramezani & Rahmani, 2024).

This book chapter explores the expanding role of auxetic structures in engineering. It examines unit cell geometries alongside their underlying design mechanisms. Advanced manufacturing methods and prominent industrial applications will also be detailed. The text finally evaluates the main challenges encountered in manufacturing these systems. Future research perspectives are outlined in the concluding sections.

2. THE AUXETIC CONCEPT AND BASIC DEFORMATION PRINCIPLES

Auxeticity represents a fundamental kinematic and mechanical behavior. It describes structural materials expanding or contracting transversely under axial loading. The term auxetic derives from the Greek word *auxetikos*. Evans introduced this specific terminology to the literature to identify systems possessing a negative Poisson's ratio (Y. Liu et al., 2023).

Poisson's ratio (ν) relies on a specific mathematical definition. It is the negative ratio of transverse strain (ϵ_{trans}) to axial strain (ϵ_{load}) under axial loading. This relationship is formally expressed as $\nu = -\epsilon_{\text{trans}} / \epsilon_{\text{load}}$ (Luo et al., 2025).

Auxeticity currently serves as a highly versatile scale-independent mechanical design principle. This structural concept enables the development of tunable and extraordinary functional properties in modern engineering metamaterials (Grima et al., 2012).

The presence of a negative Poisson's ratio significantly alters the fundamental elasticity behavior of isotropic materials. As the Poisson's ratio approaches negative one, the shear modulus theoretically increases by a massive margin. This notable change substantially boosts the overall resistance of the material against applied shear deformations (C. Zhang et al., 2026).

Indentation behavior also displays a marked enhancement in auxetic systems due to local densification mechanisms. Conventional materials typically flow outward from the contact zone under a concentrated local impact force, which inevitably reduces the local mass density. Auxetic materials contract transversely towards the exact impact site instead. This inward material movement creates a targeted mass accumulation, and the resulting local densification drastically multiplies both the indentation resistance and impact toughness of the material (Tripathi, Bag, & Dwivedi, 2023).

Furthermore, auxetic plates demonstrate a unique synclastic curvature when subjected to out-of-plane bending moments. Traditional plates naturally adopt a saddle-shaped anticlastic curvature under bending. Auxetic plates form a dome-like synclastic double curvature directly in the bending direction instead. This distinct geometrical transformation greatly

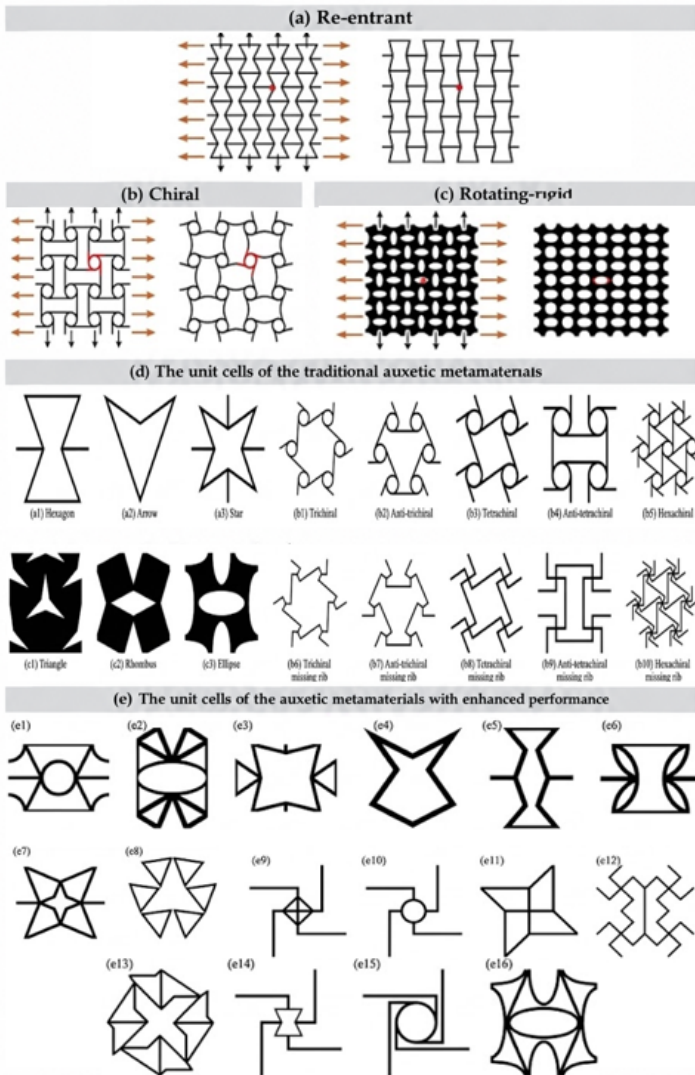
facilitates complex forming processes in aerospace components and shell structure designs (VO & KIM, 2026).

Finally, these metamaterials show superior fracture toughness and dynamic energy absorption capacity under mechanical loads. Transverse expansion actively occurs right at the crack tip during tensile deformation, which effectively restricts further crack propagation. This specific physical mechanism directly elevates both structural fracture toughness and dynamic impact energy absorption capabilities (Morvaridi et al., 2021).

3. CLASSIFICATION AND TOPOLOGIES OF AUXETIC UNIT CELLS

The macroscopic negative Poisson's ratio exhibited by auxetic metamaterials stems primarily from the internal topology designed at the unit cell level—and its kinematic transformation under loading—rather than the bulk chemical composition. In the current literature, the fundamental auxetic geometries and their associated mechanical properties are broadly categorized into four primary classes (Figure 1).

Figure 1. Classification and development of auxetic metamaterials. (a–c) Three typical categories of conventional auxetic metamaterials: (a) re-entrant structures, (b) chiral structures, and (c) rotating rigid unit structures. (d) A representative unit cell of traditional auxetic metamaterials. (e) Advanced auxetic metamaterials with enhanced mechanical properties inspired by conventional designs



Reference: (C. Zhang et al., 2026).

3.1. Re-entrant Geometries

Representing the earliest and most extensively studied topology in auxetic research, re-entrant geometries form a foundational class of metamaterials (Figure 1a). This category encompasses conventional configurations like the classic re-entrant hexagon (a1), arrowhead (a2), and star-shaped (a3) unit cells (Figure 1d).

The underlying kinematic mechanism driving the auxetic behavior of re-entrant structures relies on the flexing, unwrapping, and hinging of inwardly directed (concave) or angularly arranged cellular struts under axial loading. When subjected to axial tension, these concave ribs rotate outwards and unfold, generating significant transverse expansion. Conversely, under axial compression, the struts fold further inward, causing the structure to contract volumetrically (Fíla et al., 2021).

Under compressive forces, these geometries demonstrate a progressive folding behavior (gradual densification). This characteristic effectively mitigates localized stress concentrations and ensures high specific energy absorption (SEA). Moreover, advanced derivatives like the double arrowhead and star-shaped topologies eliminate the susceptibility to early buckling often observed in classic re-entrant hexagons under axial compression. Consequently, they deliver a more isotropic response over a broader deformation range and exceptional impact resistance (Rahimi-Lenji et al., 2025; Shuaibu et al., 2024; L. Zhang et al., 2025).

3.2. Chiral and Anti-Chiral Networks

Chiral metamaterials constitute a unique class of auxetic networks characterized by central node elements with rotational symmetry, from which flexible ligaments extend tangentially (Figure 1b).

The auxeticity in chiral structures is governed by the rotation of rigid central nodes and the subsequent bending or unwrapping of the attached ligaments around these nodes under axial loads. While all nodes in standard chiral systems rotate in the same direction, anti-chiral structures exhibit reflectional symmetry; thus, adjacent nodes rotate in opposite directions (clockwise and counter-clockwise) to achieve transverse expansion or contraction.

Chiral and anti-chiral networks are distinguished by their ability to maintain a nearly constant, ideal Poisson's ratio close to -1, especially across large deformation amplitudes. Furthermore, node-enhanced and missing-rib variants significantly alleviate the stress concentrations typically found at the node-ligament junctions in conventional chiral designs. As a result, they substantially improve the structural load-bearing capacity, fatigue life, and dynamic impact mitigation performance (Joseph et al., 2021; Y. Liu et al., 2023; Sun, Hu, Tian, Yang, & Min, 2024).

3.3. Rotating Rigid and Perforated Units

This class comprises networks constructed from rigid geometric blocks interconnected via corner hinges (Figure 1c), incorporating traditional unit shapes such as triangles (c1), rhombi (c2), and ellipses (c3) (Figure 1d). Topologies formed by periodic perforated slits or voids introduced into continuous flat plates (Figure 1e, e16) also fall within this category.

The primary auxetic mechanism in these structures is driven by rigid body rotation. Under tensile stress, the rigid geometric elements rotate around their corner contact points or the flexible connective bridges bridging the slits, thereby expanding the cellular voids and facilitating volumetric dilation. Under compression, the elements rotate to close these gaps, leading to structural contraction.

A distinct advantage of these structures is their ability to deliver a constant Poisson's ratio across an extensive deformation range, largely independent of the applied strain magnitude. In parallel, perforated plate designs preserve the manufacturability of continuous sheets while drawing mass toward the impact zone during localized loading. This mechanism guarantees substantial local densification, enhanced indentation resistance, and a noticeable increase in structural stiffness (Morvaridi et al., 2021; Zeng et al., 2017; G. Zhang & Khandelwal, 2019).

3.4. Advanced Hybrid and Multi-Mechanism Auxetic Topologies

Advanced hybrid topologies represent a new generation of metamaterial designs engineered to integrate multiple mechanisms—such as re-entrant, chiral, rotating rigid, and perforated features—within a single unit cell, or to induce graded deformation sequences (Figure 1e).

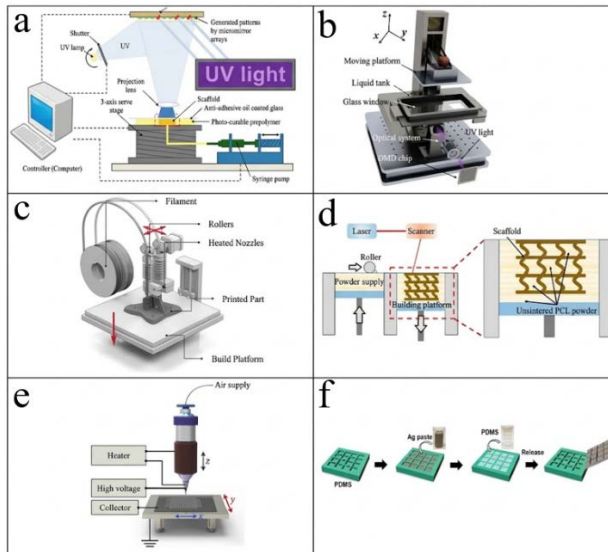
Hybrid topologies are specifically tailored to compensate for the inherent weaknesses of single-mechanism auxetic geometries. This multi-mechanism synergy unlocks advanced functionalities, including multi-stage plateau stress profiles, programmable and tunable Poisson's ratio-strain relationships, superior impact energy absorption, and seamless integration into smart or multi-material systems activated by thermal or electrical stimuli (Rahimi-Lenji et al., 2025; Ramezani & Rahmani, 2024; Winczewski & Rybicki, 2022).

4. FABRICATION TECHNOLOGIES AND STRATEGIES FOR AUXETIC METAMATERIALS

Fabricating these intricate micro- and meso-scale 2D and 3D architectures demands extreme precision. Even minor

geometric deviations, surface flaws, or imperfect connective hinges can disrupt the intended kinematic transformation and degrade the auxetic response under load (Bohara, Linforth, Nguyen, Ghazlan, & Ngo, 2023; Joseph et al., 2021; L. Zhang et al., 2025). Conventional subtractive methods such as laser cutting and CNC machining are cost-effective for planar designs but face severe geometric limitations, high material waste, and tooling access constraints when constructing complex 3D chiral or hierarchical networks (Blakey-Milner et al., 2021). Various manufacturing techniques employed for the fabrication of auxetic structures are schematically illustrated in Figure 2. Consequently, traditional replication techniques such as the mold method (Figure 2f) are only viable for specific, less complex cellular patterns.

Figure 2. Schematic diagrams of fundamental manufacturing techniques used in the fabrication of auxetic structures: (a) stereolithography, (b) digital light processing, (c) fused deposition modeling, (d) selective laser sintering, (e) melt electrowriting, and (f) mold method.



Reference: (Veerabagu, Palza, & Quero, 2022).

The true technical breakthrough in auxetic metamaterial fabrication emerged with additive manufacturing. By enabling the direct layer-by-layer construction of complex cellular networks from CAD data, 3D printing bypasses traditional assembly restrictions entirely (Joseph et al., 2021; L. Zhang et al., 2025). For flexible and micro-scale polymeric auxetics, liquid-based photo-curing methods like Stereolithography (Figure 2a) and Digital Light Processing (Figure 2b) provide exceptional resolution and surface quality (Veerabagu et al., 2022). Alternatively, Fused Deposition Modeling (Figure 2c) remains a highly accessible strategy for rapidly prototyping resilient auxetic pads and tubular structures using extruded thermoplastic filaments (Tripathi et al., 2023). When structural integrity and high mechanical strength are required, powder bed fusion technologies such as Selective Laser Sintering (Figure 2d), Selective Laser Melting, and Electron Beam Melting take precedence. Such structures are particularly critical in biomedical applications, where porous titanium bone plates and hip implants can mechanically match the elastic modulus of natural bone to minimize stress shielding and promote osseointegration (Periyasamy & Srinivasan, 2025; Sun et al., 2024).

Beyond rigid and elastomeric printed structures, auxetic behavior has been successfully translated to the fiber and fabric level. Advanced micro-scale spinning techniques, such as melt electrowriting (Figure 2e), allow for the precise fabrication of aligned auxetic webs. In textile engineering, specially designed helical auxetic yarns are manufactured by wrapping a stiff yarn around a thicker, flexible core. When subjected to tension, the stiff wrap straightens and forces the core to expand outward (Lekesiz, Bhullar, Karaca, & Jun, 2017; Shuaibu et al., 2024). Pushing the boundaries of smart materials further, 4D printing introduces time and functional responsiveness into the additive manufacturing process. Using shape-memory polymers, printed

structures can fold from a conventional shape into an auxetic geometry upon reaching a specific activation temperature, paving the way for self-deployable space structures, soft robotic actuators, and smart stents that expand at body temperature (Joseph et al., 2021).

5. CHALLENGES AND LIMITATIONS IN AUXETIC DESIGN AND MANUFACTURING

Despite offering superior mechanical properties and high energy absorption capacities, auxetic metamaterials encounter significant engineering obstacles during the transition to commercial structural applications (Yao et al., 2018). Scaling these cellular networks into macro-level industrial components for aerospace or civil infrastructure creates major manufacturing problems (Eren, Gokcekaya, Balkan, Nakano, & Mecitoğlu, 2024). Additive manufacturing technologies frequently utilized in laboratory environments are generally unsuitable for mass production due to slow fabrication speeds and excessive energy consumption (Zadpoor, 2019). The restricted build volumes of 3D printers make the single-piece production of large components incredibly difficult (Bohara et al., 2023). Furthermore, the high porosity ratio required for the auxetic mechanism to function inherently reduces the overall load-bearing capacity and structural stiffness compared to solid bulk materials.

Even the slightest dimensional deviations during the manufacturing process can directly disrupt the targeted negative Poisson's ratio (F. Wang, 2018). Fabrication defects such as the stair-case effect or inter-layer micro-voids during printing alter the load transfer pathways within the cell. Missing ribs and surface roughness prevent nodes from rotating properly. This

weakens the auxetic response or entirely reverses the material behavior to a positive ratio (Joseph et al., 2021).

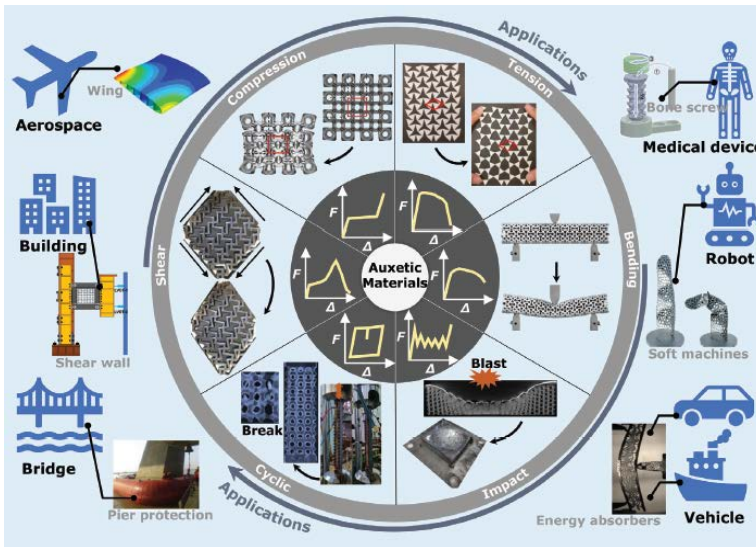
Localized bending and rotational movements within the unit cells lead to extreme stress concentrations throughout the overall structure. These severe stresses accumulating at the sharp corners of re-entrant designs or flexible hinge points cause early micro-crack initiation under cyclic loading (Joseph et al., 2021; S. Liu & Li, 2023; Y. Liu et al., 2023). Serious interfacial problems also arise in hybrid systems where auxetic lattices are embedded within a composite or polymer matrix (Y. Wang, 2022). The tendency of the auxetic core and the conventional outer matrix to deform in opposite directions under load generates extremely high shear stresses at the contact interface. This mechanical mismatch causes interfacial debonding and rapid propagation of delamination damage under dynamic loads (Y. Wang, 2022).

6. INDUSTRIAL AND TECHNOLOGICAL APPLICATION AREAS OF AUXETIC METAMATERIALS

The negative Poisson's ratio of auxetic metamaterials provides unique macroscopic advantages such as simultaneous bi-directional deformation and extraordinary local impact resistance (Vijayavenkataraman, Gopinath, & Lu, 2020). A comprehensive overview of these diverse application areas and corresponding loading mechanisms is presented in Figure 3. Auxetic stents expand radially during axial elongation to maintain constant internal volume and minimize tissue trauma on vessel walls (Veerabagu et al., 2022). Smart polymer bandages exploit the auxetic effect by widening their pores upon swelling to provide controlled drug delivery exactly when the wound tissue becomes inflamed (Tripathi et al., 2023). Also, the aerospace and

automotive industries heavily utilize these innovative materials for their superior specific energy absorption capabilities. Cellular auxetic cores integrated into crash boxes and protective vehicle pillars undergo local densification upon impact to effectively dampen peak collision forces and protect passengers (Y. Liu et al., 2023).

Figure 3. Main application areas and different loading mechanisms of auxetic metamaterials across various industries including aerospace building automotive robotics and medical devices.



Reference: (Y. Zhang et al., 2025).

Their synclastic bending properties greatly simplify the manufacturing of curved surfaces like aircraft nose cones or space shuttle fuselages without requiring complex molds (Y. Liu et al., 2023). The defense sector employs auxetic armor panels to draw material toward the impact center and absorb blast energy much more efficiently than conventional monolithic steel plates. Auxetic foams integrated into sports helmets and shoe soles similarly stiffen under sudden dynamic loads to reduce linear acceleration and minimize the risk of traumatic brain injuries

(Tripathi et al., 2023). Piezoelectric actuators harvesting energy from ambient vibrations and industrial filters featuring real-time tunable pore sizes further demonstrate the massive potential of these smart metamaterials in wearable technologies and environmental applications (Andrew, Uddin, Kumar, & Schiffer, 2024; C. Zhang et al., 2026).

7. CONCLUSION AND FUTURE PERSPECTIVES OF AUXETIC METAMATERIALS

Auxetic metamaterials have successfully evolved from conceptual physical curiosities into multifunctional engineering platforms across various critical sectors. The transition toward environmentally adaptive smart systems relies heavily on next-generation design and manufacturing approaches. Artificial intelligence and deep learning algorithms now facilitate inverse design procedures to automatically generate optimized unit cell geometries. Four-dimensional printing introduces the time domain to structural engineering by utilizing shape-memory polymers that dynamically alter their topology when exposed to external stimuli. Furthermore, biodegradable meta-biomaterials and recyclable thermoplastic composites increasingly dominate the future trajectory of green infrastructure and sustainable biomedical applications.

Successful conceptual and laboratory-scale examples clearly demonstrate the high energy absorption and adaptive capabilities of auxetic topologies. However, several critical problems still need to be solved before achieving widespread industrial commercialization:

- Mitigating the high computational costs and interpretability issues of current machine learning models.

- Enhancing the scalability of additive manufacturing technologies to overcome slow fabrication speeds.
- Developing universally accepted testing protocols to certify fatigue life under cyclic loading.
- Expanding the availability of eco-friendly bio-based polymers and multi-material integration techniques.

The continuous integration of physics-informed artificial intelligence with multi-scale additive manufacturing will directly address these limitations. Advancing the synergy between programmable smart materials and automated inverse design platforms will undoubtedly establish auxetic metamaterials as an indispensable structural standard.

REFERENCES

- Andrew, J. J., Uddin, M. A., Kumar, S., & Schiffer, A. (2024). Mechanical and piezoresistive performance of additively manufactured carbon fiber/PA12 hybrid honeycombs. *Thin-Walled Structures*, 201(PB), 111950. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111950>
- Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., ... du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials and Design*, 209, 110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
- Bohara, R. P., Linforth, S., Nguyen, T., Ghazlan, A., & Ngo, T. (2023). Anti-blast and -impact performances of auxetic structures: A review of structures, materials, methods, and fabrications. *Engineering Structures*, 276(December 2022), 115377. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115377>
- Cui, J., Zhang, L., & Gain, A. K. (2023). A novel auxetic unit cell for 3D metamaterials of designated negative Poisson's ratio. *International Journal of Mechanical Sciences*, 260(June), 108614. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108614>
- Eren, Z., Gokcekaya, O., Balkan, D., Nakano, T., & Mecitoğlu, Z. (2024). Comparison of in-plane compression of additively manufactured Ti6Al4V 2D auxetic structures: Lattice design, manufacturing speed, and failure mode. *Materials and Design*, 241(December 2023). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112885>
- Fíla, T., Koudelka, P., Falta, J., Šleichrt, J., Adorna, M., Zlámál, P., ... Jiroušek, O. (2021). Impact Behavior of Additively Manufactured Stainless Steel Auxetic Structures at

- Elevated and Reduced Temperatures. *Advanced Engineering Materials*, 23(1), 1–7. <https://doi.org/10.1002/adem.202000669>
- Grima, J. N., Caruana-Gauci, R., Attard, D., & Gatt, R. (2012). Three-dimensional cellular structures with negative Poisson's ratio and negative compressibility properties. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 468(2146), 3121–3138. <https://doi.org/10.1098/rspa.2011.0667>
- Joseph, A., Mahesh, V., & Harursampath, D. (2021). On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review. *Advances in Manufacturing*, 9(3), 342–368. <https://doi.org/10.1007/s40436-021-00357-y>
- Lakes, R. S. (2017). Negative-Poisson's-Ratio Materials: Auxetic Solids. *Annual Review of Materials Research*, 47, 63–81. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070616-124118>
- Lekesiz, H., Bhullar, S. K., Karaca, A. A., & Jun, M. B. G. (2017). Mechanical characterization of auxetic stainless steel thin sheets with reentrant structure. *Smart Materials and Structures*, 26(8), 085022. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aa73a4>
- Liu, S., & Li, Y. (2023). Mechanical Properties of Cochiral and Contrachiral Mechanical Metamaterials Under Different Temperatures. *Advanced Engineering Materials*, 25(6), 1–8. <https://doi.org/10.1002/adem.202201527>
- Liu, Y., Zhao, C., Xu, C., Ren, J., & Zhong, J. (2023). Auxetic meta-materials and their engineering applications: a review. *Engineering Research Express*, 5(4). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad0eb1>
- Luo, L., Wang, W., Wang, L., Guo, F., Sun, Y., Wang, P., ... Zhao, X. (2025). Understanding of the composition-

- structure-properties relationships in high-entropy rare earth zirconates. *Journal of the European Ceramic Society*, 45(5), 117103.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.117103>
- Morvaridi, M., Carta, G., Bosia, F., Gliozzi, A. S., Pugno, N. M., Misseroni, D., & Brun, M. (2021). Hierarchical auxetic and isotropic porous medium with extremely negative Poisson's ratio. *Extreme Mechanics Letters*, 48, 101405.
<https://doi.org/10.1016/j.eml.2021.101405>
- Novak, N., Vesenjaj, M., & Ren, Z. (2016). Auxetic cellular materials - A review. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 62(9), 485–493.
<https://doi.org/10.5545/sv-jme.2016.3656>
- Periyasamy, M., & Srinivasan, N. (2025). A review on auxetic structures: Applications, properties, classifications, finite element analysis, manufacturing methods, and selective laser melting process parameters. *Results in Engineering*, 28(October), 107660.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107660>
- Prawoto, Y. (2012). Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio. *Computational Materials Science*, 58, 140–153.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.012>
- Rahimi-Lenji, A., Heidari-Rarani, M., Mirkhalaf, M., & Mirkhalaf, M. (2025). On the internal architecture of lightweight negative Poisson's ratio (auxetic) metastructures: A review. *Materials and Design*, 260(May), 115225.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.115225>
- Ramezani, M. J., & Rahmani, O. (2024). Potential and

- applications of auxetic tubular: a review. *Functional Composites and Structures*, 6(1).
<https://doi.org/10.1088/2631-6331/ad1dc6>
- Shuaibu, A. S., Deng, J., Xu, C., Ade-Oke, V. P., Aliyu, A., & Momoh, D. (2024). Advancing auxetic materials: Emerging development and innovative applications. *Reviews on Advanced Materials Science*, 63(1).
<https://doi.org/10.1515/rams-2024-0021>
- Sun, M., Hu, X., Tian, L., Yang, X., & Min, L. (2024). Auxetic Biomedical Metamaterials for Orthopedic Surgery Applications: A Comprehensive Review. *Orthopaedic Surgery*, 16(8), 1801–1815.
<https://doi.org/10.1111/os.14142>
- Tripathi, N., Bag, D. S., & Dwivedi, M. (2023). A Review on Auxetic Polymeric Materials: Synthetic Methodology, Characterization and their Applications. *Journal of Polymer Materials*, 40(3–4), 227–269.
<https://doi.org/10.32381/jpm.2023.40.3-4.8>
- Veerabagu, U., Palza, H., & Quero, F. (2022). Review: Auxetic Polymer-Based Mechanical Metamaterials for Biomedical Applications. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 8(7), 2798–2824.
<https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.2c00109>
- Vijayavenkataraman, S., Gopinath, A., & Lu, W. F. (2020). A new design of 3D-printed orthopedic bone plates with auxetic structures to mitigate stress shielding and improve intra-operative bending. *Bio-Design and Manufacturing*, 3(2), 98–108. <https://doi.org/10.1007/s42242-020-00066-8>
- VO, T. S., & KIM, D. J. (2026). Auxetic meta-concrete: advances, challenges, and future directions. *Thin-Walled*

- Structures*, 221(December 2025), 114425.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.114425>
- Wang, F. (2018). Systematic design of 3D auxetic lattice materials with programmable Poisson's ratio for finite strains. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 114, 303–318.
<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.01.013>
- Wang, Y. (2022). Auxetic Composite Laminates with Through-Thickness Negative Poisson's Ratio for Mitigating Low Velocity Impact Damage: A Numerical Study. *Materials*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/ma15196963>
- Winczewski, S., & Rybicki, J. (2022). Negative Poisson's ratio from pentagons: A new auxetic structure combining three different auxetic mechanisms. *Computational Materials Science*, 201(October 2021), 110914.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110914>
- Yao, Y., Luo, Y., Xu, Y., Wang, B., Li, J., Deng, H., & Lu, H. (2018). Fabrication and characterization of auxetic shape memory composite foams. *Composites Part B: Engineering*, 152(May), 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.027>
- Zadpoor, A. A. (2019). Mechanical performance of additively manufactured meta-biomaterials. *Acta Biomaterialia*, 85, 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.12.038>
- Zeng, J., Hu, H., & Zhou, L. (2017). A study on negative Poisson's ratio effect of 3D auxetic orthogonal textile composites under compression. *Smart Materials and Structures*, 26(6). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa6fe6>
- Zhang, C., Lu, F., Mo, K., He, Y., Liu, Y., & Zhu, Y. (2026). Coupling negative Poisson's ratio with multifunctionality:

advances in auxetic metamaterials. *International Journal of Solids and Structures*, 328(December 2025). <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2025.113822>

Zhang, G., & Khandelwal, K. (2019). Computational design of finite strain auxetic metamaterials via topology optimization and nonlinear homogenization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 356, 490–527. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.07.027>

Zhang, L., Yan, S., Liu, W., Liu, Y., Cai, W., Zhang, Z., & Zhou, J. (2025). Mechanical metamaterials with negative Poisson's ratio: A review. *Engineering Structures*, 329(August 2024), 119838. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119838>

Zhang, Y., Jiang, W. Z., Jiang, W., Zhang, X. Y., Dong, J., Xie, Y. M., ... Ren, X. (2025). Recent Advances of Auxetic Metamaterials in Smart Materials and Structural Systems. *Advanced Functional Materials*, 35(23), 1–31. <https://doi.org/10.1002/adfm.202421746>

MATERIAL – PROCESS - PROPERTY RELATIONSHIP IN ADDITIVE MANUFACTURING

Ümit ZEYBEK¹

1. INTRODUCTION

Additive manufacturing (AM) is a manufacturing approach in which physical parts are produced by adding material layer by layer in a controlled manner according to a three-dimensional digital model. Unlike conventional machining, where material is removed, or casting, where a mold is used to shape the material, additive manufacturing creates the final part directly from a digital model. This feature establishes a more direct relationship between design and manufacturing and enables the production of geometries that are difficult or impossible to manufacture using conventional methods (Pérez et al., 2020; Zhou et al., 2024).

Although the development of additive manufacturing was initially associated mainly with rapid prototyping applications, today the technology is no longer limited to prototype production. It is also widely used to manufacture functional end-use products, customized components, complex engineering parts, and biomedical structures. The development of different processes, such as material extrusion, powder bed fusion, binder jetting, and directed energy deposition, has made it possible to process a wide range of materials, from polymers

¹ Öğr. Gör. Dr., Dokuz Eylül University, Bergama Vocational School, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, ORCID: 0000-0002-5164-3749.

and metals to ceramics and composites, using additive manufacturing (Negrău et al., 2020; Li et al., 2025).

One of the most important advantages of additive manufacturing is its high design freedom. In principle, layer-by-layer manufacturing allows the production of complex geometries, including internal channels, lattice structures, thin walls, organic surfaces, and geometries obtained through topology optimization. When combined with topology optimization, additive manufacturing enables not only the reduction of material usage but also the control of the mechanical behavior and functional properties of a part during the design stage. The ability to produce lattice and cellular structures using additive manufacturing makes it possible to achieve properties such as low weight, high specific strength, controlled porosity, and high surface area within the same component (Kladovasilakis et al., 2022).

Additive manufacturing also has significant potential for reducing material consumption and simplifying the production chain. Compared with machining, in particular, producing a part directly in a shape close to its final geometry can help reduce material waste during manufacturing. However, the actual environmental and economic benefits depend on many factors, including the material used, process type, energy consumption, production volume, and post-processing requirements. Therefore, rather than generalizing that additive manufacturing is always more sustainable than conventional manufacturing methods, its sustainability benefits should be evaluated on a process- and application-specific basis (Naser et al., 2023; Sabzi & Rivera-Díaz-del-Castillo, 2023).

Recent developments have further expanded the capabilities of AM toward multi-material manufacturing, bioprinting, 4D printing, artificial intelligence-assisted process

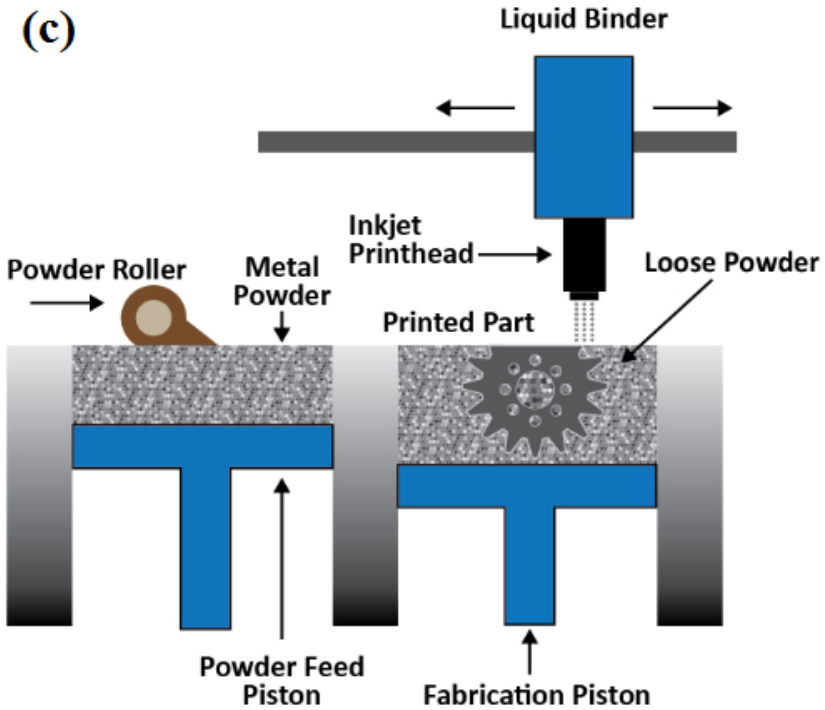
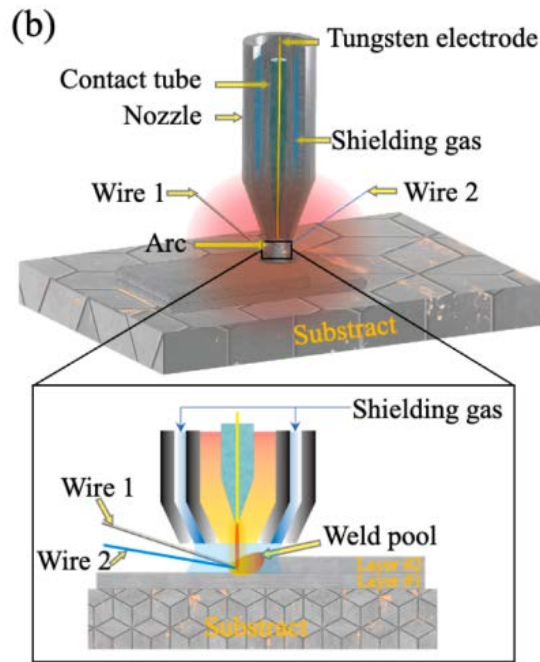
control, and large-scale production. Multi-material AM is particularly promising because it enables different materials and functions to be integrated within a single component, providing additional opportunities for functional and structural design (Nazir et al., 2023). At the same time, limitations related to production rate, material availability, dimensional accuracy, surface quality, process repeatability, cost, and post-processing continue to restrict the wider industrial adoption of some AM technologies (Zhou et al., 2024; Jemghili et al., 2022).

In AM, the properties of the final component are determined not only by the material composition but also by its interaction with the selected manufacturing process and process parameters. Parameters such as laser power, scanning speed, layer thickness, and scanning strategy affect the melting and solidification behavior and the thermal history of the material. These factors consequently influence microstructural development, defect formation, and the resulting mechanical properties (Oliveira et al., 2020; Gorsse et al., 2017).

The material-process relationship is therefore central to achieving the desired performance of AM components. The selection of appropriate materials and process conditions affects microstructural evolution, porosity, residual stresses, anisotropy, and mechanical performance. Consequently, AM process development requires an integrated understanding of the material-process-microstructure-property relationship rather than considering material selection and process optimization independently (Sabzi & Rivera-Díaz-del-Castillo, 2023; Zhang et al., 2022).

2. ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES

Metal additive manufacturing processes are manufacturing technologies that enable the production of parts



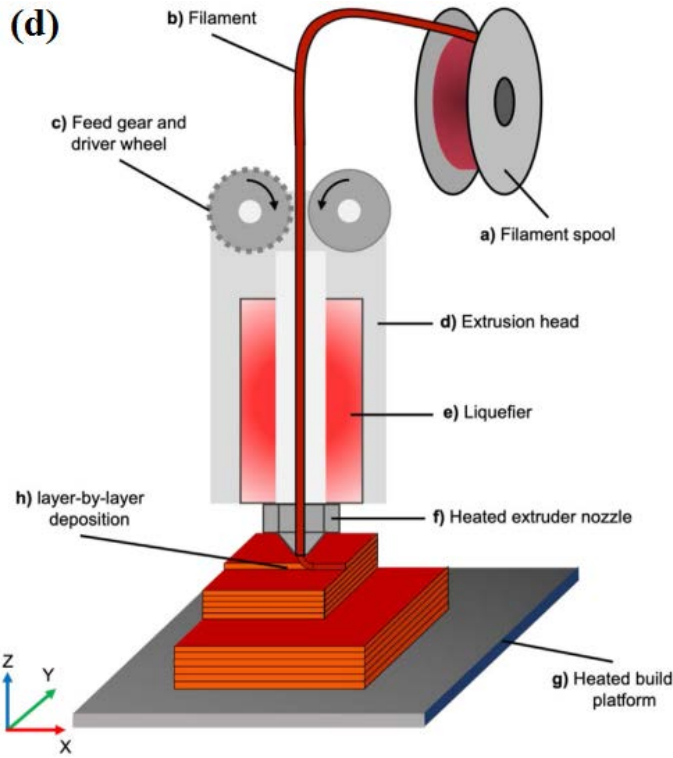


Figure 1. Schematic representations of the working principles of selected metal additive manufacturing processes: (a) Powder Bed Fusion (PBF), (b) Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), (c) Binder Jetting (BJ), and (d) Material Extrusion (ME). (a) Adapted from Armstrong et al. (2022); (b) adapted from Ji et al. (2023); (c) adapted from the Association for Metal Additive Manufacturing (AMAM); (d) adapted from Golab et al. (2022).

In Powder Bed Fusion (PBF) processes, fine metal powder is distributed in thin layers over a build platform, and selected regions are selectively fused using an energy source. PBF processes based on laser or electron beams are widely used for producing complex metal components because they can provide high geometric accuracy and resolution. Laser Powder Bed Fusion (LPBF) and Electron Beam Powder Bed Fusion (E-PBF) are important examples of this process family. However,

limited production rate, high equipment cost, thermal stresses, and defects such as porosity are among the main challenges associated with PBF processes (Parab et al., 2019; Khorasani et al., 2020).

In Directed Energy Deposition (DED), metallic material, typically supplied in powder or wire form, is continuously delivered to the deposition zone while an energy source simultaneously melts the material. The molten material is deposited layer by layer onto a substrate or previously deposited layer to build the component. DED processes offer particular advantages for the production of large components, repair of existing parts, and addition of material to specific regions of a component. However, compared with PBF processes, DED generally provides lower surface quality and dimensional accuracy, and post-processing may therefore be required (Xu et al., 2024).

In Binder Jetting (BJ), the metal powder is not directly melted during the printing stage. Instead, a liquid binder is selectively deposited to bond the powder particles and form the desired geometry. The printed part generally undergoes subsequent processes such as debinding and sintering to obtain the required density and final properties. This approach can provide advantages in terms of production rate and the ability to manufacture complex geometries. However, the final properties and dimensional characteristics of the component are strongly influenced by the debinding and sintering conditions (Zhang et al., 2017; Fuchs et al., 2022).

In Material Extrusion (ME) processes for metals, metal powder is generally combined with a polymeric binder to produce a filament- or paste-like feedstock, which is extruded layer by layer to form the component. After printing, debinding and sintering are typically applied to remove the binder and

densify the metallic part. Compared with metal AM systems based on lasers or electron beams, this approach can offer advantages such as lower equipment cost and relatively simple process infrastructure. However, dimensional shrinkage, distortion, and process control become important considerations because of the debinding and sintering stages (Gonzalez-Gutierrez et al., 2018; Rane & Strano, 2019).

The selection of a suitable metal additive manufacturing process depends on criteria such as part geometry, component size, required mechanical properties, surface quality, dimensional accuracy, production rate, material type, and cost. In addition, the thermal history and interactions between successive layers during manufacturing can significantly affect the microstructure of the metal and, consequently, its mechanical properties. Therefore, the selection and optimization of appropriate process parameters are critical for achieving the desired quality and performance of metal components produced by additive manufacturing (Jemghili et al., 2022; Gorsse et al., 2017).

3. EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON MICROSTRUCTURE

In metal additive manufacturing, process parameters directly affect the thermal cycle and, consequently, the microstructure and mechanical properties of the part. In particular, parameters such as laser power, scanning speed, layer thickness, and hatch spacing influence the energy input and melt-pool behavior during processing (Oliveira et al., 2020).

Laser power and scanning speed strongly influence melt-pool dimensions and stability. Low energy input may result in insufficient melting and lack-of-fusion defects, whereas excessive energy input can promote unstable melt-pool behavior

and keyhole-related porosity. Therefore, laser power and scanning speed should be selected together within an appropriate processing window (Chen et al., 2022; Vaglio et al., 2024).

Layer thickness affects the amount of material processed in each layer and the required energy input. Thinner layers can generally improve surface quality and geometric resolution, although they may increase manufacturing time. Increasing the layer thickness can also alter melt-pool conditions and microstructure development (Pauza & Rollett, 2021).

Volumetric Energy Density (VED) is commonly used to evaluate the combined effects of major process parameters. It relates laser power, scanning speed, hatch spacing, and layer thickness. However, the same VED can be obtained using different combinations of these parameters, and such combinations do not necessarily produce the same microstructure or part quality. Therefore, VED should not be considered a sufficient optimization criterion on its own (Buhairi et al., 2023; Oliveira et al., 2020).

In conclusion, porosity and other manufacturing defects are strongly influenced by process parameters. Insufficient energy input can cause lack-of-fusion pores, whereas excessive energy input can promote keyhole-related porosity. Optimizing the process parameters is therefore essential for achieving high density and reducing defects (Huynh et al., 2022; Mulhi et al., 2023).

4. MICROSTRUCTURE-PROPERTY RELATIONSHIP

The microstructure formed during metal additive manufacturing directly affects the mechanical properties and

overall performance of the produced part. Grain size, grain morphology, crystallographic texture, phase distribution, and porosity are the main microstructural features that determine strength, ductility, fatigue resistance, and anisotropy (Weaver & Rosenthal, 2021).

Fine and relatively homogeneous grains generally increase strength, while elongated columnar grains and pronounced crystallographic texture can cause anisotropic mechanical behavior, meaning that properties may vary depending on the loading direction (Mian et al., 2022; Yvinec et al., 2022).

Porosity and lack-of-fusion defects can act as stress concentrators and significantly reduce ductility, fatigue resistance, and fracture performance. Therefore, controlling the microstructure and minimizing defects are essential for achieving reliable mechanical properties (Javidrad et al., 2024).

In metal additive manufacturing, there is a process conditions → thermal cycle → microstructure → mechanical properties relationship. Therefore, microstructural control should be considered a fundamental requirement for achieving the desired mechanical performance.

5. POST-PROCESSING AND PERFORMANCE

Parts produced by metal additive manufacturing may contain surface roughness, internal pores, residual stresses, and other manufacturing defects after production. Therefore, post-processing treatments are applied depending on the intended use of the part and the required properties (Ye et al., 2021).

Heat treatment is performed to modify the microstructure and reduce residual stresses generated during the manufacturing process. Methods such as solution treatment, ageing, annealing,

and hot isostatic pressing (HIP) can affect the strength, ductility, and fatigue properties of the material (Balachandramurthi et al., 2019).

Surface treatments are mainly used to reduce surface roughness and improve fatigue performance. Processes such as machining, polishing, and shot peening can reduce surface irregularities that may cause crack initiation on the surface (Roudnická & Vojtěch, 2020).

The removal of manufacturing defects is particularly important, and HIP is an important method for this purpose. This process can help close internal pores and improve the density and mechanical properties of the part. However, the results depend on the material type and the applied processing conditions (Mehmeti et al., 2021).

In conclusion, appropriate post-processing treatments can reduce defects, control the microstructure, improve surface quality, and enhance the mechanical performance of the part. Therefore, post-processing is an important stage in producing reliable and high-performance metal additive manufactured parts (Ojo & Taban, 2023).

6. CONCLUSION AND FUTURE PERSPECTIVE

Metal additive manufacturing has become an important manufacturing approach that complements traditional manufacturing methods due to its ability to produce complex geometries, provide design freedom, and use materials more efficiently. However, the production of high-performance and reliable parts depends not only on the selection of a suitable manufacturing process but also on considering design, material selection, processing conditions, and quality control together. Therefore, the future development of additive manufacturing is

expected to focus more on the better management of the entire production chain rather than improving a single process (Zhang et al., 2018).

Process optimization is expected to focus on methods that require fewer experiments and provide faster results. In particular, numerical modeling and data-driven approaches can accelerate the determination of suitable conditions for a new material or manufacturing process. In addition, considering topology optimization together with manufacturability criteria can enable the development of lighter and more functional parts (Ibhadode et al., 2023).

Artificial intelligence and machine learning will be important tools in this transformation. These technologies can be used not only to predict manufacturing results but also to support decision-making at different stages, from the beginning of design to quality control. In particular, combining data obtained from different sensors can help detect potential problems earlier during manufacturing and allow the production process to be adjusted automatically (Sustacha et al., 2026).

In the future, digital twins, autonomous manufacturing systems, new-generation alloys, and hybrid manufacturing technologies are also expected to play an important role in the development of metal additive manufacturing. In particular, the combined use of physical experiments and computer simulations can make it possible to develop materials and parts with the desired properties in a shorter time (Koizumi & Okugawa, 2022).

In conclusion, the future of metal additive manufacturing is moving not only toward faster part production but also toward the development of smarter, more predictable systems that can optimize their own manufacturing conditions. These developments may support the transition of additive

manufacturing from prototyping to serial production and more critical engineering applications.

REFERENCES

- Association for Metal Additive Manufacturing. (n.d.). Binder jetting. Retrieved September 17, 2026, from <https://www.amamweb.org/Processes/Binder-Jetting.aspx>.
- Armstrong, M., Mehrabi, H., & Naveed, N. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1001–1029. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060.
- Balachandramurthi, A. R., Moverare, J., Mahade, S., & Pederson, R. (2019). Additive manufacturing of Alloy 718 via electron beam melting: Effect of post-treatment on the microstructure and the mechanical properties. *Materials*, 12(1), 68. DOI: 10.3390/ma12010068.
- Buhairi, M. A., Foudzi, F. M., Jamhari, F. I., Sulong, A., Radzuan, N. M., Muhamad, N., Mohamed, I. F., Azman, A. H., Harun, W., & Al-Furjan, M. S. H. (2023). Review on volumetric energy density: Influence on morphology and mechanical properties of Ti6Al4V manufactured via laser powder bed fusion. *Progress in Additive Manufacturing*, 8, 265–283. DOI: 10.1007/s40964-022-00328-0.
- Chen, Z., Lu, Y., Luo, F., Zhang, S., Wei, P., Yao, S., & Wang, Y. (2022). Effect of laser scanning speed on the microstructure and mechanical properties of laser-powder-bed-fused K418 nickel-based alloy. *Materials*, 15(9), 3045. DOI: 10.3390/ma15093045.
- Fuchs, S. L., Praegla, P. M., Cyron, C. J., Wall, W. A., & Meier, C. (2022). A versatile SPH modeling framework for coupled microfluid-powder dynamics in additive manufacturing: Binder jetting, material jetting, directed

- energy deposition and powder bed fusion. *Engineering with Computers*, 38, 4853–4877. DOI: 10.1007/s00366-022-01724-4.
- Golab, M., Massey, S., & Moultrie, J. (2022). How generalisable are material extrusion additive manufacturing parameter optimisation studies? A systematic review. *Heliyon*, 8(11), e11592. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11592.
- Gonzalez-Gutierrez, J., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J., & Holzer, C. (2018). Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives. *Materials*, 11(5), 840. DOI: 10.3390/ma11050840.
- Gorsse, S., Hutchinson, C., Gouné, M., & Banerjee, R. (2017). Additive manufacturing of metals: A brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Science and Technology of Advanced Materials*, 18, 584–610. DOI: 10.1080/14686996.2017.1361305.
- Huynh, T., Mehta, A., Graydon, K., Woo, J., Park, S., Hyer, H. C., Zhou, L., Imholte, D. D., Woolstenhulme, N., Wachs, D., & Sohn, Y. (2022). Microstructural development in Inconel 718 nickel-based superalloy additively manufactured by laser powder bed fusion. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 11, 88–107. DOI: 10.1007/s13632-021-00811-0.
- Ibhadode, O., Zhang, Z., Sixt, J., Nsiempba, K. M., Orakwe, J., Martinez-Marchese, A., Ero, O., Shahabad, S. I., Bonakdar, A., & Toyserkani, E. (2023). Topology optimization for metal additive manufacturing: Current trends, challenges, and future outlook. *Virtual and*

Physical Prototyping, 18(1), e2181192. DOI: 10.1080/17452759.2023.2181192.

Javidrad, H., Koç, B., Bayraktar, H., Şimşek, U., & Gunaydin, K. (2024). Fatigue performance of metal additive manufacturing: A comprehensive overview. *Virtual and Physical Prototyping*, 19(1), e2302556. DOI: 10.1080/17452759.2024.2302556.

Jemghili, R., Aittaleb, A., & Mansouri, K. (2022). Additive manufacturing technology, process parameters influencing product quality and its applications. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, 9(97), 1678–1703. DOI: 10.19101/IJATEE.2022.10100102.

Ji, W., Zhou, R., Vivegananthan, P., Wu, M. S., Gao, H., & Zhou, K. (2023). Recent progress in gradient-structured metals and alloys. *Progress in Materials Science*, 140, 101194. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101194.

Khorasani, A., Gibson, I., Veetil, J. K., & Ghasemi, A. (2020). A review of technological improvements in laser-based powder bed fusion of metal printers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 191–209. DOI: 10.1007/s00170-020-05361-3.

Kladovasilakis, N., Tsongas, K., Karalekas, D., & Tzetzis, D. (2022). Architected materials for additive manufacturing: A comprehensive review. *Materials*, 15(17), 5919. DOI: 10.3390/ma15175919.

Koizumi, Y., & Okugawa, M. (2022). Digital twin science of metal powder bed fusion additive manufacturing: A selective review of simulations for integrated computational materials engineering and science. *ISIJ*

International, 62(11), 2183–2196. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-184.

Li, H., Peng, C., & Mu, B. (2025). A review: Ceramic additive manufacturing. *Advances in Applied Ceramics*, 124(7–8), 173–204. DOI: 10.1177/17436753251414940.

Mehmeti, A., Lynch, D., Penchev, P., Martinez Ramos, R., Vincent, D., Maurath, J., Wimpenny, D. I., Essa, K., & Dimov, S. (2021). The effect of hot isostatic pressing on surface integrity, microstructure and strength of hybrid metal injection moulding and laser-based powder bed fusion stainless-steel components. *Applied Sciences*, 11(16), 7490. DOI: 10.3390/app11167490.

Mian, M. J., Razmi, J., & Ladani, L. (2022). Grain scale investigation of the mechanical anisotropic behavior of electron beam powder bed additively manufactured Ti6Al4V parts. *Metals*, 12(1), 163. DOI: 10.3390/met12010163.

Mulhi, A., Dehgahi, S., Waghmare, P., & Qureshi, A. J. (2023). Process parameter optimization of 2507 super duplex stainless steel additively manufactured by the laser powder bed fusion technique. *Metals*, 13(4), 725. DOI: 10.3390/met13040725.

Naser, A. Z., Defersha, F., Pei, E., Zhao, Y., & Yang, S. (2023). Toward automated life cycle assessment for additive manufacturing: A systematic review of influential parameters and framework design. *Sustainable Production and Consumption*, 41, 253–274. DOI: 10.1016/j.spc.2023.08.009.

Nazir, A., Gokcekaya, O., Billah, K. M. M., Ertugrul, O., Jiang, J., Sun, J., & Hussain, S. (2023). Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design,

properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials. *Materials & Design*, 226, 111661. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111661.

Negrău, D. C., Grebenișan, G., & Gherghe, C. (2020). A brief overview of additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 898(1), 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/898/1/012029.

Ojo, O., & Taban, E. (2023). Post-processing treatments—microstructure—performance interrelationship of metal additive manufactured aerospace alloys: A review. *Materials Science and Technology*, 39(1), 1–41. DOI: 10.1080/02670836.2022.2130530.

Oliveira, J. P., Lalonde, A., & Ma, J. (2020). Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 193, 108762. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108762.

Parab, N., Zhao, C., Cunningham, R. W., Escano, L. I., Fezzaa, K., Rollett, A., Chen, L., & Sun, T. (2019). In situ characterization of laser powder bed fusion using high-speed synchrotron X-ray imaging technique. *Microscopy and Microanalysis*, 25(S2), 2566–2567. DOI: 10.1017/S1431927619013564.

Pauza, J., & Rollett, A. (2021). Simulation study of hatch spacing and layer thickness effects on microstructure in laser powder bed fusion additive manufacturing using a texture-aware solidification Potts model. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 7007–7018. DOI: 10.1007/s11665-021-06110-7.

- Pérez, M., Carou, D., Rubio, E. M., & Teti, R. (2020). Current advances in additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 88, 439–444. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.076.
- Rane, K., & Strano, M. (2019). A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts. *Advances in Manufacturing*, 7(2), 155–173. DOI: 10.1007/s40436-019-00253-6.
- Roudnická, M., & Vojtěch, D. (2020). Fractography of additively manufactured titanium alloy: Influence of post-processing treatment. *Defect and Diffusion Forum*, 405, 187–192. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.405.187.
- Sabzi, H. E., & Rivera-Díaz-del-Castillo, P. E. J. (2023). Sustainable powder-based additive manufacturing technology. *Sustainability*, 15(20), 15081. DOI: 10.3390/su152015081.
- Sustacha, J., Uralde, V., Rodríguez-Díaz, Á., & Veiga, F. (2026). Artificial intelligence in metal additive manufacturing: Applications in design, process modeling, monitoring, and quality optimization. *Materials*, 19(7), 1301. DOI: 10.3390/ma19071301.
- Vaglio, E., Totis, G., Lanzutti, A., Fedrizzi, L., & Sortino, M. (2024). A novel thermo-geometrical model for accurate keyhole porosity prediction in laser powder-bed fusion. *Progress in Additive Manufacturing*, 9, 247–261. DOI: 10.1007/s40964-023-00446-3.
- Weaver, J., & Rosenthal, I. (2021). Understanding anisotropic tensile properties of laser powder bed fusion additive metals: A detailed review. *National Institute of Standards and Technology*. DOI: 10.6028/NIST.AMS.100-44.

- Xu, J., Fei, Y., Zhu, Y., Yu, W., Yao, D., & Zhou, J. G. (2024). A review of non-powder-bed metal additive manufacturing: Techniques and challenges. *Materials*, 17(19), 4717. DOI: 10.3390/ma17194717.
- Ye, C., Zhang, C., Zhao, J., & Dong, Y. (2021). Effects of post-processing on the surface finish, porosity, residual stresses, and fatigue performance of additive manufactured metals: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 6407–6425. DOI: 10.1007/s11665-021-06021-7.
- Yvinec, T., Naït-Ali, A., Mellier, D., Bertheau, D., Cormier, J., Villechaise, P., Rat, L., & Hémery, S. (2022). Tensile properties of Ti-6Al-4V as-built by laser metal deposition: The relationship between heat affected zone bands, strain localization and anisotropy in ductility. *Additive Manufacturing*, 55, 102830. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102830.
- Zhang, D., Sun, S., Qiu, D., Gibson, M. A., Dargusch, M. S., Brandt, M., Qian, M., & Easton, M. (2018). Metal alloys for fusion-based additive manufacturing. *Advanced Engineering Materials*, 20(5), 1700952. DOI: 10.1002/adem.201700952.
- Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.-G., Lee, J.-H., & Zhang, J. (2017). Additive manufacturing of metallic materials: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1), 1–13. DOI: 10.1007/s11665-017-2747-y.
- Zhang, Z., Wang, Y., Ge, P., & Wu, T. (2022). A review on modelling and simulation of laser additive manufacturing: Heat transfer, microstructure evolutions and mechanical properties. *Coatings*, 12(9), 1277. DOI: 10.3390/coatings12091277.

Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive manufacturing: A comprehensive review. *Sensors*, 24(9), 2668. DOI: 10.3390/s24092668.

BİNA ISI YALITIMINDA KULLANILAN BİYO-ESASLI MALZEMELER

Veli Gökhan DEMİR¹

1. GİRİŞ

Çalışmalar Dünya genelinde hızlı nüfus artışı, aşırı kentleşme, binalardaki artan termal konfor gereksinimleri vb. nedenler ile enerjiye olan ihtiyaç giderek artırmaktadır (Tongtuam & Jinanukul, 2026) . Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, bina sektörü tek başına küresel nihai enerji kullanımının yaklaşık %36'sını ve CO₂ emisyonlarının neredeyse %40'ını oluşturmaktadır (IEA, 2021). Buna bağlı olarak binalarda enerji tüketiminin ve buna bağlı sera gazı emisyonlarının azaltılması için güncel çalışmalar yeni nesil ısı yalıtım malzemeleri (Gong et al., 2026) , aşırı ısıtma (Caner, 2025) , pencere ve cam teknolojileri (Talpur et al., 2026) , sıfır enerjili/sıfıra yakın enerjili binalar (Wang et al., 2024) ve yapay zeka destekli enerji tasarrufu (Caner et al., 2026) gibi konular üzerine yoğunlaşmıştır.

Binalarda dış cephe ısı yalıtımı, iç ortam ile dış çevre arasındaki ısı transferinin kısıtlayarak bina enerji ihtiyacının azaltılması ve ısı konforunun iyileştirilmesi açısından kritik bir role sahiptir. Buna karşın, geleneksel ısı yalıtım malzemeleri olan polistiren (EPS, XPS) gibi ürünler çoğunlukla fosil yakıt olan petrolden elde edilmekte, bu nedenle hem ham madde hem de üretim süreçleri dikkate alınarak yüksek karbon ayak izine sahip yapı bileşenleri olarak tanımlanmaktadırlar (Eren & Alıç, 2025) .

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-5667-1909.

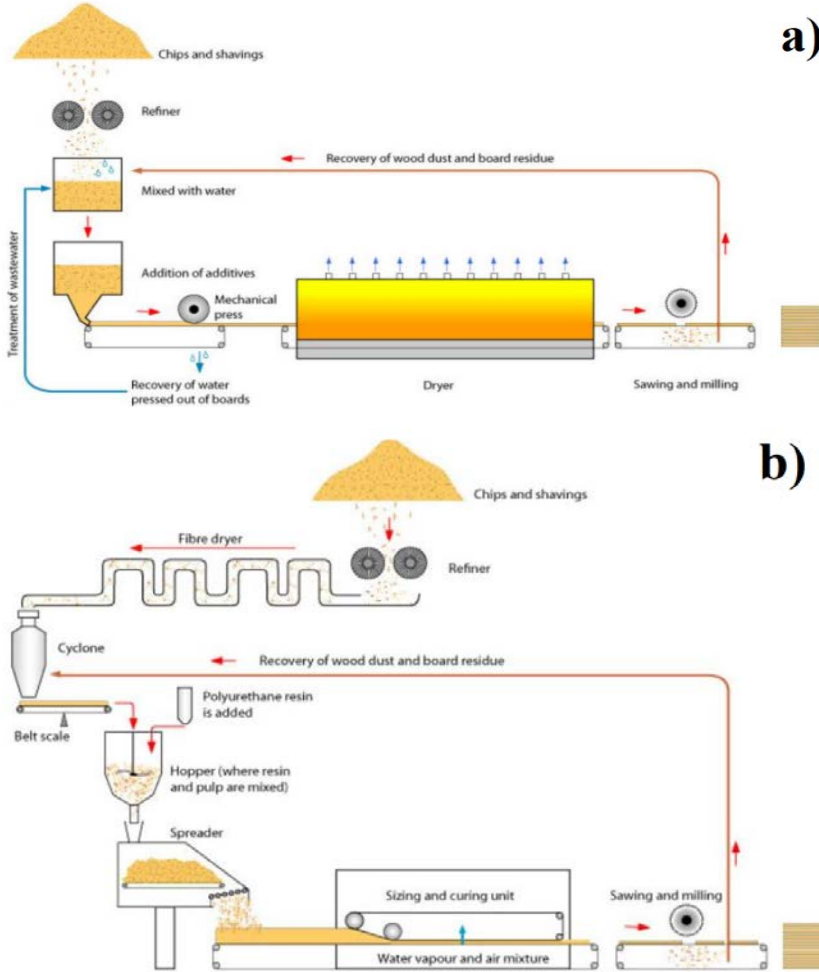
Düşük gömülü karbon değerlerine sahip biyo-esaslı ısı yalıtım malzemeleri ise geleneksel ısı yalıtım malzemelerine alternatif olarak bitkisel lifler, orman atıkları, mantar miselyumları, hayvansal yan ürün ve atıkları, mantar ve benzeri yenilenebilir biyolojik kaynaklardan elde edilebilen sürdürülebilir yapı bileşenleridir (Raja et al., 2023a). Çevresel endişeler ve bina enerji tüketimini azaltma çabaları, geri dönüştürülebilir biyokütle içerikli biyo-esaslı ısı yalıtım malzemelerinin önemini giderek artırmaktadır. Bu çalışmada, hammadde olarak orman/kereste ve tarımsal atıkların kullanıldığı bina ısı yalıtım malzemeleri hakkında yapılmış bilimsel araştırmalar derleme halinde sunularak bu malzemelerin binalarda enerji verimliliğini sağlama potansiyelleri ve döngüsel ekonomiye sundukları katkılar ortaya konmuştur. Çalışmanın, yapı sektöründeki araştırmacılara ve uygulayıcılara biyo-esaslı yalıtım malzemelerini konu alan gelecek araştırmalar ve uygulama alanları hakkında faydalı olması hedeflenmiştir.

2. BİYO-ESASLI ISI YALITIM MALZEMELERİ

2.1. Ahşap Esaslı Isı Yalıtım Malzemeleri

Genellikle orman ve kereste atıklarından elde edilen ahşap lifli ısı yalıtım ürünleri, doğal ve çevreci yapısıyla öne çıkan köklü ve sürdürülebilir yapı malzemelerindendir. Üretimleri esnasında geleneksel yapı malzemelerine göre daha az enerjiye ihtiyaç duyduklarından karbon ayak izleri düşüktür. Endüstride, ahşap lifi esaslı elyaf yalıtım ürünleri üretiminde yaygın olarak ıslak veya kuru işlem yöntemleri tercih edilmektedir (Bkz. Şekil 1. a ve b) (Anlar, 2025). Geleneksel yöntem olarak kabul edilen ıslak ve nispeten daha yeni olan kuru işlem yöntemlerini karşılaştırmalı olarak inceleyen araştırma bulgularına göre, kuru yöntemle üretilen levhaların daha az su ve enerji tüketimleri sayesinde karbon ayak izi gibi çevresel etkilerinin daha düşük

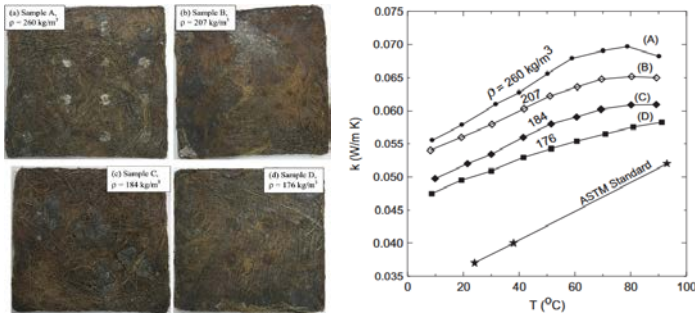
olduğu, ancak ıslak yöntemin doğal lignin bağlayıcılığından faydalanarak yapısal bütünlüğü daha iyi sağladığı söylenebilir. Bununla birlikte aynı çalışmaya göre, kereste atıklarından elde edilen her iki ürün grubunun da geleneksel petrol türevli yalıtım malzemelerine kıyasla çok daha iyi ısı direnç değerlerine sahip olduğu ve sürdürülebilir yapı konseptine tam uyum sağladığı anlaşılmaktadır (Schneider et al., 2021).



Şekil 1. Ahşap lifi esaslı elyaf yalıtım ürünleri üretimi: (a) ıslak işlem ve (b) Kuru işlem (Anlar, 2025).

Manohar (2012) , tarımsal atık niteliğindeki doğal lifli yapıya sahip palmiye ağacı, hindistan cevizi ve şeker kamışının enerji verimliliğinde kullanılabilirliğini incelemiştir. Çalışmasında, malzemelerin yoğunluğu ile orantılı olarak değişen ısı iletkenlik katsayılarını, 686 kg/m^3 ile en düşük yoğunluğa sahip şeker kamışı için 0.0461 W/mK , 755 kg/m^3 yoğunluklu hindistan cevizi için 0.048 W/mK , 797 kg/m^3 yoğunluklu palmiye ağacı için ise 0.0555 W/mK olarak tespit etmiştir. Araştırmacı, elde edilen bu ısı özelliklerin günümüzde yaygın kullanılan sentetik yalıtım malzemeleriyle rekabet edebilir düzeyde olduğunu belirterek, biyo-esaslı ve çevre dostu bu yapıların enerji verimliliğine önemli katkılar sunabileceğini vurgulamıştır.

Diğer bir çalışmada, Ali ve Alabdulkarem (2017) , mısır nişastası reçinesi matrisli hurma ağacı lifi katkılı biyo-kompozit levhaların ısı performansını incelemiştir. Dört farklı yoğunlukta üretilen numunelerde yapılan ASTM C518 standartlı ölçümlerde 176 kg/m^3 ile 260 kg/m^3 aralığındaki yoğunluk artışına bağlı olarak malzemenin ısı iletkenlik katsayısının da $0,0475 \text{ W/mK}$ değerinden $0,0697 \text{ W/mK}$ seviyesine yükseldiği tespit edilmiştir. Farklı yoğunlukta hurma ağacı lifi katkılı biyo-kompozit levhaların görselleri ve bu levhaların iletim katsayılarına ait grafik Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Farklı yoğunlukta hurma ağacı lifi katkılı biyo-kompozit levhalar ve iletim katsayıları (Ali & Alabdulkarem, 2017).

Astrubali vd. (2023) , kereste fabrikalarından elde edilen atık ahşapların geri dönüştürülmesiyle üretilen ahşap lifli yalıtım levhalarının ısı performansını, yalıtımsız referans bir yapı ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Şekil 3). Elde edilen deneysel sonuçlara göre ahşap lifli levhaların ısı geçirgenliği %57 oranında azaltarak iç ortam sıcaklığının daha kararlı olmasını sağladığını, sıcaklık sönümleme oranını yaz ve kış koşullarında sırasıyla %60 ve %74 artırdığını göstermiştir.



(a)



(b)

Şekil 3. (a) Ahşap elyaf panellerle yalıtılmış test binası, (b) Referans bina (Asdrubali et al., 2023) .

Farklı miktarda kereste atığı olarak talaş, kil ve tutkaldan üretilen kompozit biyo esaslı ısı yalıtım malzemelerinin sıcak ve kurak iklimlerde bulunan binalarda kullanılabilirliğini inceleyen bir çalışmada, $0.44 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ iletkenlik değerine sahip %20 talaş ve %80 kilden üretilen ısı yalıtım malzemelerinin ısı performansının, geleneksel yalıtım malzemeleri ile benzer düzeyde olduğu gösterilmiştir. Gerçek iklim koşullarında test odalarında yapılan ölçümlerde, talaş-kil yalıtımlı odanın enerji tüketimini yalıtımsız duruma göre %37'ye kadar azalttığı hesaplanmıştır (Alwan et al., 2025).

Mialeshka vd. (2025), ıhlamur ve yalancı akasya ağaçlarının kabuk lifleri kullanılarak, hiçbir yapıştırıcı veya alev geciktirici ilave etmeden alev dirençli yalıtım levhaları üretmeye çalışmışlardır (Bkz. Şekil 4). Ölçümlerde, üretilen numunelerin

yoğunlukları ve ısı iletkenlik değ erlerinin sı rasıyla 218 ila 231 kg/m³ ve 0,055 ila 0,057 W/mK aralı ğında değ işti ği görülmüştür. Yapılan yangın testlerinde, biyo-esaslı kompozit yalıtım levhalarının sentetik alev geciktirici iç ermemesine rağmen alev almadı ğı ve duman salınımının makul seviyelerde kaldı ğı gözlemlenmiştir.



Ş ekil 4. Yalıtım levha numuneleri (üstteki levha yalanca akasya, alttaki levha ise ıhlamur ağ acı kabu ğu liflerinden ü retilmiştir) (Mialeshka et al., 2025).

Nav vd. (2026), kompozit matris iç erisine n-heptadekan ve n-oktadekan bazlı mikro kapsüllenmiş faz değ iştiren malzemeler ilave ederek elde edilen ahş ap lifli biyo-esaslı yalıtım levhalarının, EPS ve XPS gibi sentetik malzemelere görece daha düşük olan termal direncini ve neme karşı hassasiyetini iyileştirmeye çalışmış lardır. Yaptıkları testlerde, FDM ilavesi ile biyo-esaslı yalıtım kompozit levhalarının gizli ısı kapasitesinin anlamlı bir oranda artırılabilirdikleri gözlemlenmiştir. Bunun yanında, FDM ilavesi ile modifiye edilmiş levhaların su buharı direncinde hafif bir artış gözlemlense de malzemenin yapısal buhar geçirgenliğinde kayda değ er bir değ işim olmadı ğı tespit edilmiştir. Beş yıllık geçici rejim duvar simülasyonlarıyla da desteklenen bu sonuçlar, FDM ilave edilmiş biyo-esaslı

yalıtların, akıllı ısıl tamponlama ve yoğunlaşma kontrolünü bir arada sunarak düşük karbonlu binalar için yüksek dayanımlı bir izolasyon alternatifi olduğunu göstermiştir.

2.2. Tarımsal Atık Esaslı Isı Yalıtım Malzemeleri

Tarımsal üretim ve diğer faaliyetler neticesinde oluşan saman, sap, kabuk, lif ve benzeri diğer bitkisel artıklar, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri, nispeten düşük maliyetleri ve biyo-bozunur özellikleri nedeniyle sürdürülebilir ısı yalıtım malzemelerinin geliştirilmesinde önemli hammadde kaynaklarıdır. Bu atıkların yapı sektöründe değerlendirilmesi ile hem tarımsal atıkların bertaraf sorununun çözümüne katkıda bulunulmakta, hem de düşük gömülü enerji ve karbon ayak izine sahip alternatif ısı yalıtım ürünlerinin üretimi sağlanmaktadır (Raja et al., 2023b).

Tarımsal atık esaslı ısı yalıtım malzemelerinin üretiminde, atığın fiziksel yapısı ve nihai ürünün istenen özelliklerine bağlı olarak değişen bağlayıcı kullanımı, presleme/sıcak presleme, doğal formda balyalama ve liflerin mekanik olarak birleştirilmesine dayalı üretim yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, rijit ve yarı rijit yalıtım levhalarının üretimleri genellikle tarımsal atıkların lif veya partikül formuna getirildikten sonra bağlayıcılarla karıştırılması ve presleme veya sıcak presleme yoluyla direkt şekillendirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Saman gibi lifsiz tarımsal atıklardan yalıtım malzemesi üretiminde ise ilave bağlayıcı veya karmaşık işlemler uygulanmadan, balyalama ve sıkıştırma yoluyla doğrudan kullanım yöntemleri tercih edilebilmektedir (Cintura et al., 2021). Şekil 5'te tarım atığı olarak ortaya çıkan samanın binalarda yalıtım malzemesi olarak kullanımına dair örnekler sunulmuştur (Anlar, 2025) .

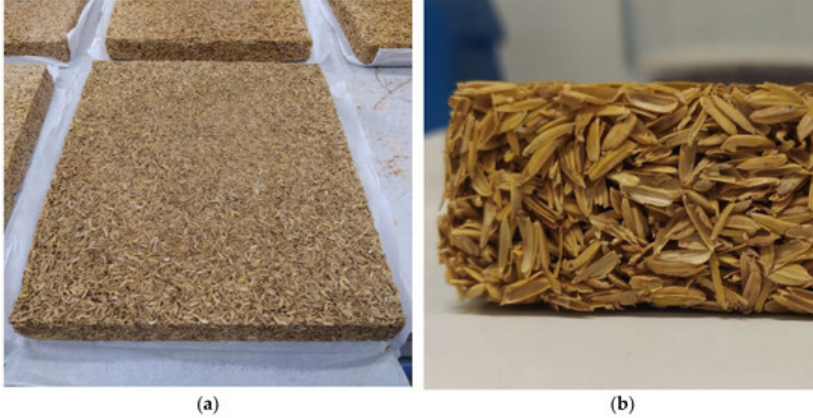


Şekil 5. Binalarda saman kullanımına dair uygulama örnekleri (Anlar, 2025).

Binici vd. (2014) öğütülmüş mısır koçanları kullanarak, epoksi ile inorganik bağlayıcı (alçı ve çimento) matrislere sahip biyo-esaslı ısı yalıtım malzemeleri üretmiş ve bu malzemelerin birim hacim ağırlıklarını, su emme oranlarını, ultrasonik ses geçirgenliklerini ve ısıl iletkenlik katsayılarını deneysel olarak tespit edilmişlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre, mısır koçanı katkılı yalıtım malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısı $0,075 \text{ W/mK}$ değerine kadar düşürülebilmektedir. Ayrıca bağlayıcı olarak farklı oranlarda alçı ve çimento içeren alternatif numunelerde elde edilen yalıtım değerlerinin de standartların öngördüğü kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu ifade etmişlerdir.

Polimer bazlı yalıtım malzemelerinin sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik bir çalışmada, beyaz hardal tohumu yağı esaslı biyo-polioller ile sert poliüretan köpükler geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümlerde, üretilen biyo-esaslı köpüklerin geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla yaklaşık 35 kg/m^3 yoğunluğa, %1,5-2 civarında düşük su emme oranına ve $0,025 \text{ W/mK}$ gibi oldukça düşük bir ısıl iletkenlik katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Mekanik testler sonucunda biyo-poliol ilavesinin basma dayanımında kısmi bir düşüşe yol açtığı gözlemlense de elde edilen değerlerin ($>280 \text{ kPa}$) yalıtım standartlarını başarıyla karşıladığı rapor edilmiştir (Borowicz et al., 2019) .

Tarımsal atıkların ve istilacı bitki türlerinin yalıtım potansiyelini araştıran Silva vd. (2023), pirinç kabuğu ve kargı kamışı liflerini sodyum silikat bağlayıcı ile karıştırılarak biyo-esaslı yalıtım levhaları üretmişlerdir. Yoğunlukları 0,219 ile 0,352 g/cm³ arasında değişen bu kompozit levhaların ısı iletkenlik katsayıları 0,0602 ile 0,0745 W/mK aralığında ölçülmüştür. Çalışma neticesinde üretilen biyo-esaslı ısı yalıtım malzemelerin (Bkz. Şekil 6) eğilme dayanımı ve su emme oranı değerlerinin, bitkisel kökenli kompozitler için beklenen sınırlar içinde kaldığı ve standart ısı yalıtım malzemesi gereksinimlerini başarıyla karşıladığı rapor edilmiştir.



Şekil 6. Üretilen kompozit ısı yalıtım levhaları: (a) Üstten görünüm ve (b) Yandan görünüm (Silva et al., 2023).

Yaşar ve Altınok (2023) yaptıkları çalışmada, orman ve tarım atığı olan tohumuz çam kozalakları ile hasat sonrası ayçiçeği saplarını kullanarak düşük yoğunluklu kompozit ısı yalıtım levhaları üretmişlerdir. Gerçekleştirdikleri ısı testlerinde, farklı bileşen miktarlarına sahip kompozit levhalarının en yüksek ısı iletkenlik ve geçirgenlik katsayılarını sırasıyla 0,147 W/mK ve 2,94 W/m²K; en düşük ısı iletkenlik ve geçirgenlik katsayılarını ise sırasıyla 0.8347 W/mK ve 2,94 W/m²K olarak ölçmüşlerdir. Mekanik test verileri sonucunda, ayçiçeği saplarının levhaların mekanik özelliklerini iyileştirdiğini tespit

etmişlerdir. Araştırmacılar, çam kozalağı ve ayçiçeği sapının birlikte muhtelif oranlarda kullanılarak, yalıtım levhası endüstrisi için alternatif yalıtım ürünleri üretilebileceğini, böylelikle tarım ve orman atıklarının ekonomiye katkı sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Solis vd. (2024), tarımsal atık ürünü olarak pirinç kabuğundan, ısıl iletkenlik değeri 0,073 W/mK olan yalıtım panelleri geliştirilmişlerdir. Araştırmacılar, karşılaştırmalı test odalarında (Bkz. Şekil 7) yaptıkları analizler sonucunda geliştirdikleri panellerin çatı yalıtımında kullanılmasıyla 28,18 W/m²'ye ulaşan iç mekan ısı akısının neredeyse tamamen engellendiğini, dolayısıyla bu panellerin geleneksel yalıtım malzemelerine sürdürülebilir bir alternatif olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.



Şekil 7. Test odaları: Pirinç kabuğu yalıtkan olmayan 1. oda ve pirinç kabuğu yalıtkan olan 2. oda. (a) Galvanizli çatısı olmayan odalar ve (b) galvanizli çatısı olan odalar.

Literatürdeki diğer bir araştırmada tarımsal atık olarak pirinç kabuğu ile denizsel bir atık olan *Posidonia oceanica* (deniz eriştesi) yapraklarından üretilen biyo-esaslı ısı yalıtım malzemelerinin ısıl, akustik, mekanik, suya duyarlılık ve yangına tepki özellikleri incelenmiştir. Yapılan testlerde, pirinç kabuğu ve *Posidonia oceanica* bazlı panellerin ısıl iletkenlik katsayıları sırasıyla 0,055 W/mK ve 0,045 W/mK olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bu biyo-esaslı ısı yalıtım malzemelerinin geleneksel yalıtım malzemelerine yakın termal performans sergilediği, ayrıca düşük ısı ve duman salınımı ile yangına karşı gösterdiği yüksek direnç nedeniyle bina güvenliği açısından uygun yapı malzemeleri oldukları vurgulanmıştır (Pascual et al., 2024) .

Mustafa vd. (2026), tarımsal atıkların yapı sektöründe direkt kullanımını inceleyen çalışmalarında, buğday sapının herhangi bir bağlayıcıya ihtiyaç duyulmaksızın dökme/püskürtme şeklinde yalıtım malzemesi olarak kullanımının ısı performansını değerlendirilmişlerdir. Özellikle kapalı boşluklara ve karmaşık bina geometrilerine kolayca uygulanabilme avantajı olan dökme buğday sapının ısı iletkenlik katsayısı 0,0435 ile 0,0526 W/mK aralığında ölçülmüş; en düşük ısı iletkenlik değerine 90 kg/m³ yoğunlukta ulaşıldığı kaydedilmiştir. Ancak, malzemenin zamanla kendi ağırlığıyla çökmesini engellemek adına uygulamalarda 110-115 kg/m³ yoğunluklu malzeme kullanılmasının daha uygun olacağı vurgulanmıştır. Araştırmacılar, kabul edilebilir yalıtım performansına, yüksek poroziteye ve iyi bir nem tamponlama kapasitesine sahip olan bu malzemenin, geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla tamamen biyo-esaslı ve sürdürülebilir bir alternatif olarak umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

Ayati vd. (2026) şeker kamışı küspesini fiber, sönmüş kireci ise bağlayıcı kullanılarak biyo-esaslı kompozitler üretilmişlerdir. Yoğunlukları 330 ile 510 kg/m³ aralığında değişen bu malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları yoğunlukla ilintili olarak 0,057 ile 0,078 W/mK arasında ölçülmüştür. Üretilen biyo-esaslı kompozit malzemelerinin nem tamponlama kapasitesinin mükemmel olması ve mekanik dayanımının 0,14–0,38 MPa seviyelerine ulaşması, kirecin kimyasal karbonatlaşmasından ziyade sıkıştırmadaki presleme oranıyla ilişkilendirilmiştir. Araştırmacılar, deney sonuçlarına göre şeker

kamışı küspesi ve kireç kombinasyonunun higrotermal stabilitesinin yüksek, etkili bir ekolojik yalıtım alternatifi olduğunu belirtmişlerdir.

2.3. Diğer Biyo-esaslı Isı Yalıtım Malzemeleri

Zeytinyağı endüstrisi atıklarından zeytin çekirdeğinin yapı malzemelerinde değerlendirebilme potansiyelini inceleyen çalışmada, zeytin çekirdeğinin farklı oranlarda çimento-kireç harçlarına ilave edilmesiyle elde edilen malzemenin termal ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Test sonuçları, harca kuru ağırlıkça %70 oranında zeytin çekirdeği eklenmesinin malzemenin ortalama ısı iletkenliğini %76'nın üzerinde, yoğunluğunu ise yaklaşık %30 oranında azalttığını göstermiştir (Barreca & Fichera, 2013).

Binalarda ısı yalıtımı amacıyla kullanılabilecek yeni nesil biyo-kompozitlerin geliştirilmesine yönelik yapılan diğer bir çalışmada, çimento harcı içerisine dolgu maddesi olarak farklı boyutlarda hurma ağacı lifleri ilave edilmiştir. Yapılan deneyler ile kompozit malzeme içerisinde hurma ağacı oranının artmasıyla birlikte malzemenin hem ısı iletkenlik katsayısının hem de mekanik direncinin düştüğü tespit edilmiştir. Ancak, lif oranının %15'in altında tutulmasıyla malzemenin hem yalıtım hem de taşıyıcılık açısından inşaat sektörü standartlarını karşılayabileceği, böylelikle yeşil duvar sistemlerinde etkili bir yalıtım harcı potansiyeli taşıdığı gösterilmiştir (Benmansour et al., 2014).

Tarımsal atıkların çimento ikamesi olarak değerlendirildiği bir çalışmada ise şeker kamışı küspesi külü ve pirinç kabuğu külü kullanılarak sürdürülebilir hafif harçlar üretilmiştir (Bkz. Şekil 8). Elde edilen test sonuçları, çimento yerine ağırlıkça %30 oranında şeker kamışı küspesi külü kullanılmasının malzemenin ısı iletkenliğini %33 oranında düşürdüğünü; %15 şeker kamışı küspesi külü ile %15 pirinç

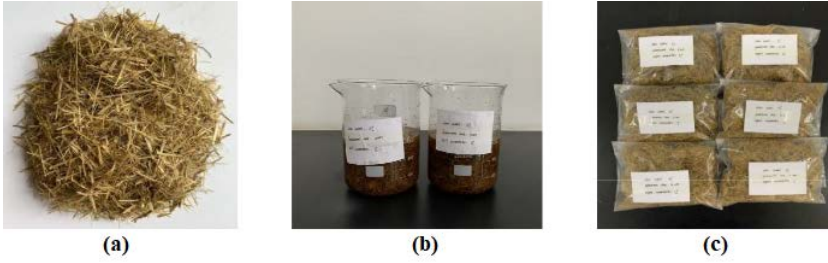
kabuğu külünün hibrit kullanımının ise %31'lik bir ısı iletkenlik düşüşü sağladığını göstermiştir. Üretilen biyo-katkılı kompozitlerin yeterli yalıtım performanslarının yanı sıra yapısal standartlar için gereken basma dayanımını başarıyla sağladığı da saptanmıştır. Bu sonuçlara göre, yapı sektöründe biyo atık külü kullanarak çimento tüketiminin azaltılabileceği, buna bağlı olarak her 1 kg şeker kamışı küspesi külü için %28 oranında sera gazı emisyonlarında azaltım sağlanabileceği ortaya konmuştur (Srikanth et al., 2022).



Şekil 8. Biyo katkılı harç örnekleri (Srikanth et al., 2022).

Liu vd. (2022), geleneksel püskürtme betonların yalıtım performansını artırmaya yönelik gerçekleştirdikleri araştırmada agrega ikamesi olarak keramzit (genleştirilmiş kil) ve takviye elemanı olarak polivinil alkol işlemi görmüş pamuk sapı lifleri kullanılmışlardır. Farklı oranlarda bileşen içeren beton numunelerinin deney sonuçlarına göre optimum pamuk sapı lifi katkısının 2 kg/m^3 olduğu belirlenmiştir. Bu oranda eklenen lifler, keramzit ile birlikte beton matrisi içerisinde ağısı ve gözenekli bir yapı kurarak malzemenin ısı iletkenliğini başarılı bir şekilde düşürmüş, aynı zamanda basma ve çekme dayanımlarını iyileştirmiştir. Lif oranının 2 kg/m^3 'den fazla olduğu durumlarda matris içinde topaklanma gözlemlenmiş, bu durumda ısı yalıtımını iyileşse de mekanik özelliklerin zayıfladığı tespit edilmiştir.

Zhao vd. (2024) sodyum hidroksit ile saman liflerine alkali modifikasyon işlemi uygulayarak, sıva harcına eklenen saman liflerinin matris ile uyumunu artırmaya çalışmışlardır. Alkali modifikasyonun uygulama adımları Şekil 9'de sunulmuştur. Yapılan deneylerde, alkali ön işlem ile lif-matris arasındaki mekanik kenetlenmenin artırıldığı, böylelikle biyo esaslı sıva harcının ısı iletkenlik katsayısının 0,211 W/mK seviyelerine düşürülerek ısı yalıtım karakteristiğinin iyileştirildiği görülmüştür. Bunun dışında, zorlu iklim şartlarını simüle eden donma-çözülme döngülerinde, alkali işlemi gören numunelerin ısı iletkenliğinin referans numunelere kıyasla %26 oranında daha düşük kaldığı ve malzemenin uzun vadeli termal performansını koruduğu belirlenmiştir.



Şekil 9. Saman lifi alkali işlem adımları: (a) Öğütme (b) NaOH solüsyonunda bekletme (c) Kurutma sonrası paketleme (Zhao et al., 2024).

Toktaş (2025), kahve telvesini dolgu malzemesi, yumurta akı ise biyolojik bağlayıcı olarak kullanılarak yeni nesil ısı yalıtımlı biyo-sıva numuneleri üretmiştir. SEM görüntüleri üzerinden yapılan segmentasyon analizlerinde, matrise eklenen yumurta akının köpürtülerek kullanılmasının kompozitin iç yapısındaki porozite oranını %65–85 seviyelerine çıkardığını, buna bağlı olarak malzemenin ısı iletkenliğinin dramatik ölçüde düşürülebileceği görülmüştür. Araştırmacı, geleneksel çimento esaslı sıvalara kıyasla yüksek termal direnç sunan biyo esaslı bu

karişımın, döngüsel ekonomi modeline uygun, düşük karbon ayak izine sahip bir yalıtım çözümü olabileceğini iddia etmiştir.

Sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirmeyi amaçlayan Mesli vd. (2026), yaptıkları çalışma ile kompozit alçı harçlarında kum yerine %100'e varan oranlarda zeytin prinası atığı denemişlerdir. Deneysel test ve sonlu elemanlar yöntemi simülasyon sonuçlarına göre %100 zeytin prinası katkılı harçların duvar yüzeyindeki ısı akısını %12 oranında azalttığı ve iç ortam sıcaklığını 2,4 °C'ye kadar düşürebildiği tespit edilmiştir. Araştırmacılar, ilave edilen pirina oranına bağlı olarak yalıtım malzemesinin mekanik dayanımında bir miktar düşüş yaşandığını ancak halen standartlar içinde kaldığını; bununla birlikte prina ilavesinin harcın higrotermal kapasitesini arttığını, böylece harca avantajlı bir yapı elamanı özelliği kazandırılabilceğini vurgulamışlardır.

3. SONUÇ

Sürdürülebilir ve ekolojik yapı ürünleri ve üretim yöntemleri, inşaat sektöründe son dönemdeki en önemli araştırma ve uygulama konuları arasında yer almaktadır. Yeni nesil bina ısı yalıtım ürünlerinden beklenen özellikler; üretimlerinin görece az enerji gerektirmesi ve çevreye zararlı atık oluşturmaması veya en az miktarda oluşturmaması, bileşiminde zehirli ham madde veya gazlar bulundurmaması, bunun dışında geri dönüştürülebilir, karbon ayak izinin düşük ve doğada çabuk yok olabilir olmasıdır. Bu bağlamda biyo-esaslı bina ısı yalıtım malzemeleri sahip olduğu karakteristik özellikler ile öne çıkmaktadır.

Çalışma kapsamında incelenen çalışmalar göstermiştir ki ahşap lifleri, mısır koçanı, pirinç kabuğu, şeker kamışı küspesi gibi çeşitli orman/kereste atıkları, tarımsal atıklar ya da bu atıkların birlikte ya da geleneksel yapı malzemeleri ile kompozit bir yapıda kullanıldığı hibrit biyo-esaslı yalıtım malzemeleri

genel olarak sahip oldukları düşük ısı iletkenlik değeri (yaklaşık 0,025 ile 0,08 W/mK aralığında) ile sektör standartlarında istenen yalıtım performansına ulaşmaktadır. Yapılan çalışmalarda, biyo-esaslı yalıtım malzemelerinin üretiminde tercih edilen yöntemlerinin birçoğunda uygulanan proseslerin ticari nitelikte ya da ticarileşebilecek yapıda olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, atık veya yan ürün biyokütle içeren, düşük gömülü karbon değerine sahip, geri dönüştürülebilir, biyo-bozunur ve karbon tutucu özellikteki bu malzemeler üzerine kısa ve orta vadede Ar-Ge çalışmalarının yoğunlaşması ve net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda kullanımlarının yaygınlaşması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Ali, M. E., & Alabdulkarem, A. (2017). On thermal characteristics and microstructure of a new insulation material extracted from date palm trees surface fibers. *Construction and Building Materials*, 138, 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.012>
- Alwan, N. T., Tarish, A. L., Yaqoob, S. J., Bajaj, M., & Zaitsev, I. (2025). Enhancing energy efficiency in buildings using sawdust-based insulation in hot arid climates. *Scientific Reports*, 15(1), 8349. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92924-7>
- Anlar, N. (2025). Comparative analysis of embodied carbon values of bio-based thermal insulation materials [Ms Thesis]. Konya Technical University Institute of Graduate Studies.
- Asdrubali, F., Evangelisti, L., Guattari, C., Roncone, M., & Milone, D. (2023). Experimental Analysis of the Thermal Performance of Wood Fiber Insulating Panels. *Sustainability*, 15(3), 1963. <https://doi.org/10.3390/su15031963>
- Ayati, B., Arachchi, H. M., Gutierrez, A., Chandler, A., & Watson, D. (2026). Properties of sugarcane bagasse-hydrated lime bio-based insulation materials. *Industrial Crops and Products*, 246, 123388. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2026.123388>
- Barreca, F., & Fichera, C. R. (2013). Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation. *Energy and Buildings*, 62, 507–513. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.040>
- Benmansour, N., Agoudjil, B., Gherabli, A., Kareche, A., & Boudenne, A. (2014). Thermal and mechanical

- performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*, 81, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.032>
- Binici, H., Sevinç, A. H., Eken, M., & Demirhan, C. (2014). Mısır Koçanı Katkılı Isı Yalıtım Malzemesi Üretimi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 13–26. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.242831>
- Borowicz, M., Paciorek-Sadowska, J., Lubczak, J., & Czupryński, B. (2019). Biodegradable, Flame-Retardant, and Bio-Based Rigid Polyurethane/Polyisocyanurate Foams for Thermal Insulation Application. *Polymers*, 11(11), 1816. <https://doi.org/10.3390/polym11111816>
- Caner, I. (2025). Comparative study of overheating assessment approaches in university buildings: Impact of different climate zones and shading devices in Turkey. *Journal of Building Engineering*, 99, 111536. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111536>
- Caner, I., Ilten, N., Ergün, K., & Attia, S. (2026). Effect of passive energy retrofitting strategies by using ANN: a case of a hospital building. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 179(1), 57–80. <https://doi.org/10.1680/jener.23.00042>
- Cigarruista Solís, L., Chen Austin, M., Deago, E., López, G., & Marin-Calvo, N. (2024). Rice Husk-Based Insulators: Manufacturing Process and Thermal Potential Assessment. *Materials*, 17(11), 2589. <https://doi.org/10.3390/ma17112589>
- Cintura, E., Nunes, L., Esteves, B., & Faria, P. (2021). Agro-industrial wastes as building insulation materials: A

- review and challenges for Euro-Mediterranean countries. *Industrial Crops and Products*, 171, 113833. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113833>
- Eren, M., & Alıç, E. (2025). Ekolojik ve Endüstriyel Atıklardan Yalıtım Malzemesi Üretimi. *Adana Alparslan Türkeş Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi Bilim Dergisi*, 1(2), 84–95.
- Gong, X., Shi, S., Yin, J., Liu, R., Chen, J., & Wang, X. (2026). Advances in Micro/Nanofiber-Based Porous Materials for High-Performance Thermal Insulation. *Advanced Functional Materials*, 36(1). <https://doi.org/10.1002/adfm.202509492>
- IEA. (2021). Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer.
- Liu, G., Yao, W., & Pang, J. (2022). Study on the Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Cotton Stalk Fiber Heat-Insulating Shotcrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2022/3130276>
- Manohar, K. (2012). Experimental investigation of building thermal insulation from agricultural by-products. *British Journal of Applied Science & Technology*, 2(3), 227–239.
- Mialeshka, V., Kowaluk, G., & Pásztor, Z. (2025). Sustainable Insulation Panels Made of Tree Bark Fibers: Thermal and Fire Performance. *Forests*, 17(1), 26. <https://doi.org/10.3390/f17010026>
- Mustafa, M., Zmamou, H., Bacoup, F., Seguin, V., Rabuel, N., Seddiki, Y., Garon, D., & Leblanc, N. (2026). Physicochemical and hygrothermal characterization of loose-fill wheat straw for building insulation. *Industrial*

- Crops and Products, 251, 124109.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2026.124109>
- Nam, J., Choi, J. Y., Yuk, H., & Kim, S. (2026). Wood fiber insulation reinforced with phase change materials for advanced hygrothermal control. *Energy and Buildings*, 354, 116980.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.116980>
- Pascual, A. M., Romero, M. L., Serra, E., Guerrero, J. C., & Perez, R. (2024). Sustainable insulation panel for buildings made of rice husks and posidonia. *Construction and Building Materials*, 445, 137983.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137983>
- Raja, P., Murugan, V., Ravichandran, S., Behera, L., Mensah, R. A., Mani, S., Kasi, A., Balasubramanian, K. B. N., Sas, G., Vahabi, H., & Das, O. (2023a). A Review of Sustainable Bio-Based Insulation Materials for Energy-Efficient Buildings. *Macromolecular Materials and Engineering*, 308(10).
<https://doi.org/10.1002/mame.202300086>
- Raja, P., Murugan, V., Ravichandran, S., Behera, L., Mensah, R. A., Mani, S., Kasi, A., Balasubramanian, K. B. N., Sas, G., Vahabi, H., & Das, O. (2023b). A Review of Sustainable Bio-Based Insulation Materials for Energy-Efficient Buildings. *Macromolecular Materials and Engineering*, 308(10).
<https://doi.org/10.1002/mame.202300086>
- Schneider, J., Ruda, A., & Blahová, M. (2021). Stakeholders' Perception of the Impact of the Declaration of New Protected Areas on the Development of the Regions Concerned, Case Study: Czech Republic. *Forests*, 12(5), 580. <https://doi.org/10.3390/f12050580>

- Silva, A., Gaspar, F., & Bakatovich, A. (2023). Composite Materials of Rice Husk and Reed Fibers for Thermal Insulation Plates Using Sodium Silicate as a Binder. *Sustainability*, 15(14), 11273. <https://doi.org/10.3390/su151411273>
- Srikanth, G., Fernando, A., Selvaranjan, K., Gamage, J. C. P. H., & Ekanayake, L. (2022). Development of a plastering mortar using waste bagasse and rice husk ashes with sound mechanical and thermal properties. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00956. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00956>
- Talpur, B. D., Cannavale, A., Liuzzi, S., Rubino, C., & Martellotta, F. (2026). Towards sustainable smart window design: Life cycle assessment of innovative electrochromic devices. *Energy and Buildings*, 359, 117290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117290>
- Toktaş, S. N. (2025). Kahve Telvesi ve Yumurta Akı Esaslı Kompozitlerin Isıl Yalıtım Potansiyeli: SEM Görüntüleme ve Segmentasyon Analizi. *Alfa Mühendislik ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(2), 15–28. <https://doi.org/10.70988/ajeas.1763775>
- Tongtuam, Y., & Jinanukul, P. (2026). Mycelium insulation and orientation strategies for reducing building energy demand in Southeast Asia. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/13467581.2026.2614137>
- Wang, Y., Hu, B., Meng, X., & Xiao, R. (2024). A Comprehensive Review on Technologies for Achieving Zero-Energy Buildings. *Sustainability*, 16(24), 10941. <https://doi.org/10.3390/su162410941>

- Yaşar, M., & Altunok, M. (2023). Orman ve Tarım Atıklarından Sürdürülebilir Bitkisel Lifli Düşük Yoğunluklu Kompozit İzolasyon Levhası Üretimi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(2), 699–712. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1318101>
- Zhao, R., Fu, J., Feng, B., & Gao, W. (2024). Optimization Research of Sodium Hydroxide Pretreatment to Enhance the Thermal Properties of Straw–Mortar Composite Materials. *Sustainability*, 16(12), 5239. <https://doi.org/10.3390/su16125239>
- Zohra Mesli, I. F., Hachemi, H., Benosman, A. S., Taleb, O., Houti, F. B., Seladji, C., & Mouaissa, M. S. (2026). Enhancing thermal insulation and humidity control in composite plaster mortars with olive pomace waste: Experimental and numerical study. *Energy and Buildings*, 351, 116726. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116726>

MAKİNE MESLEK RESMİ EĞİTİMİNDE YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ ÖĞRENME MODELİNİN TASARLANMASI

Aysu AKILLI ARI¹

1. GİRİŞ

Teknik resim, makine ve imalat sektörlerinde tasarım ve üretim bilgilerinin ortak bir teknik iletişim dili aracılığıyla aktarılmasını sağlayan temel araçlardan biridir (Emreli, 2019). Bir makine parçasının geometrisinin, boyutlarının ve tasarıma ilişkin diğer bilgilerinin üretilebilir ve anlaşılabilir biçimde ifade edilebilmesi, teknik resim kurallarının doğru biçimde uygulanmasını gerektirmektedir (Sürmen vd, 2020; Kocaman, 2023). Bu nedenle makine meslek resmi dersleri, öğrencilerin yalnızca çizim yapma becerilerini değil; geometrik düşünme, uzamsal görselleştirme, problem çözme ve teknik iletişim becerilerini de geliştirmeyi amaçlamaktadır (Emreli, 2019; Arsoy vd, Çavuşoğlu, 2024; Çetin, (2019)).

Teknik resim öğrenme sürecinde öğrencilerin karşılaştıkları güçlüklerin önemli bir bölümü iki boyutlu çizimler ile üç boyutlu nesneler arasında ilişki kurabilmelerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle görünüş çıkarma, kesitlerin oluşturulması, gizli kenarların belirlenmesi ve ölçülendirme gibi konular, öğrencilerin hem teorik bilgilerini hem de görsel-uzamsal becerilerini birlikte kullanmalarını gerektirmektedir. Mühendislik grafikleri alanındaki araştırmalar da uzamsal

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi, Merzifon Meslek Yüksek Okulu, ORCID: 0000-0002-1252-9417.

görselleştirme becerisinin teknik çizim öğrenimi açısından önem taşıdığını göstermektedir (Çavuşoğlu, 2024; Çetin, 2019).

Günümüzde teknik resim eğitimi, geleneksel çizim yöntemlerinin yanı sıra bilgisayar destekli tasarım (CAD) sistemlerinden de yararlanmaktadır. Ancak bir CAD yazılımının kullanılabilmesi, öğrencinin teknik resim kurallarını ve geometrik ilişkileri yeterli düzeyde kavradığı anlamına gelmemektedir. Dolayısıyla dijital araçların eğitimdeki rolü, temel teknik resim bilgisinin yerine geçmekten ziyade bu bilginin uygulanmasını ve geliştirilmesini desteklemek olmalıdır (Akkuş, 2016).

Üretken yapay zekâ sistemlerinin yaygınlaşması ise teknik resim eğitiminde yeni bir destek mekanizmasının kullanılmasını mümkün hâle getirmiştir. Yapay zekâ; kavramların açıklanması, öğrencinin sorularına yanıt verilmesi, çözüm basamaklarının yapılandırılması ve biçimlendirici geri bildirim sağlanması gibi alanlarda kullanılabilmektedir (Uzal vd; Hündür, 2025). Bununla birlikte yapay zekânın ürettiği bilgilerin her durumda doğru olmadığı ve özellikle teknik, geometrik ve standardizasyon gerektiren konularda hatalı çıktı oluşturabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Aydın, 2025).

Bu nedenle yapay zekânın makine meslek resmi eğitimindeki kullanımının temel amacı, öğrencinin yerine çizim yapmak değil, öğrencinin öğrenme ve problem çözme sürecini desteklemek olmalıdır. Bu yaklaşım doğrultusunda bu bölümde, yapay zekâ ile öğretim elemanı ve öğrenci arasında iş birliğine dayanan bir eğitim modeli önerilmektedir.

2. MAKİNE MESLEK RESMİ EĞİTİMİNDE YAPAY ZEKÂ KULLANIMININ EĞİTİMSSEL TEMELİ

Makine meslek resmi dersinde öğrencinin öğrenme süreci, teknik bilgiyi edinmenin yanı sıra bu bilgiyi uygulama ve uygulama sonucunu değerlendirme aşamalarını da içermektedir. Kendisinin yalnızca doğru teknik resmi görmesi, bu resmi kendisinin oluşturabileceği anlamına gelmemektedir. Bu nedenle öğrencinin çizim sürecine aktif olarak katılması ve yaptığı hataları fark ederek düzeltmesi önemlidir.

Bu noktada yapay zekâ, özellikle biçimlendirici geri bildirim açısından yararlı bir destek sağlayabilir. Öğrencinin çizimi üzerinde hangi noktaların tekrar incelenmesi gerektiğini belirtmek, teknik bir kavramı farklı biçimlerde açıklamak veya öğrencinin kendi çözümünü sorgulamasını sağlayacak sorular yöneltmek yapay zekânın eğitimsel kullanım alanları arasında değerlendirilebilir (Er vd, 2026; Uzun, 2024).

Ancak yapay zekânın sağladığı geri bildirimin doğrudan doğru kabul edilmesi bilimsel açıdan uygun değildir. Yapay zekâ sistemleri ikna edici fakat hatalı açıklamalar üretebilir. Teknik resim gibi standartlara ve geometrik doğruluğa dayalı bir alanda bu durum özellikle önemlidir. Bu nedenle öğrencinin yapay zekâ çıktısını güvenilir teknik kaynaklar, ders materyalleri ve öğretim elemanı değerlendirmesi ile karşılaştırması gerekmektedir.

2026 yılında yayımlanan ve doğrudan 2B teknik çizimlerin yapay zekâ ile analizini inceleyen bir çalışmada, 32 öğrenci çizimi beş ölçütlü bir değerlendirme rubriği kullanılarak değerlendirilmiş ve yapay zekâ sonuçları insan değerlendirici sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada belirli koşullar altında yapay zekâ ve insan değerlendirmeleri arasında anlamlı bir farklılık bulunmadığı bildirilmiş olmakla birlikte; OCR kaynaklı hatalar, farklı yapay zekâ modellerinin değişken sonuçları ve

istem tasarımına duyarlılık gibi sınırlılıklar da rapor edilmiştir. Bu nedenle çalışma, yapay zekânın teknik çizim değerlendirmesinde kullanılabileceğine ilişkin önemli bir araştırma alanı ortaya koymakta, ancak insan değerlendirmesinin tamamen ortadan kaldırılmasını desteklememektedir (Munguia, 2026).

Bu yaklaşım doğrultusunda makine meslek resmi eğitiminde yapay zekâ kullanımının üç temel aktör üzerinden yapılandırılması önerilmektedir:

Öğrenci: Teknik problemi çözen, çizimi oluşturan ve yapay zekâ tarafından verilen geri bildirimleri değerlendiren temel öğrenen.

Yapay zekâ: Açıklama, yönlendirme, soru sorma ve biçimlendirici geri bildirim sağlayan destekleyici araç.

Öğretim elemanı: Öğrenme hedeflerini belirleyen, süreci yöneten, teknik doğruluğu kontrol eden ve nihai değerlendirmeyi yapan uzman.

Bu yapı, yapay zekânın eğitim sürecine dahil edilmesini sağlarken öğrencinin öğrenme sorumluluğunu ve öğretim elemanının uzmanlığını korumaktadır.

3. YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ MAKİNE MESLEK RESMİ EĞİTİM MODELİ

Önerilen modelin temel amacı, öğrencinin teknik resim öğrenme sürecinde yapay zekâdan yararlanırken problem çözme ve karar verme sorumluluğunu korumasını sağlamaktır. Bu model aşağıdaki öğrenme döngüsünden oluşmaktadır:



Şekil 1. Yapay zekâ destekli makine meslek resmi eğitim modeli.

Şekil 1’de Makine Meslek Resmi eğitiminde önerilen yapay zekâ destekli öğrenme modelinin aşamalarını göstermektedir. Süreç, öncelikle öğrencinin kazanması gereken öğrenme hedeflerinin belirlenmesi ve buna uygun teknik çizim görevinin oluşturulmasıyla başlamaktadır. Öğrenci ilk çizimini gerçekleştirdikten sonra yapay zekâ, çizimi analiz ederek olası hata ve eksikliklere yönelik geri bildirim sağlamaktadır. Öğrenci bu geri bildirimleri eleştirel biçimde değerlendirerek gerekli düzeltmeleri yapmakta ve çizimini yeniden düzenlemektedir. Son aşamada ise öğretim elemanı revize edilen çizimi değerlendirerek öğrenme sürecini tamamlamaktadır. Böylece model, yapay zekâyı öğrencinin yerine çözüm üreten bir araçtan ziyade öğrenmeyi destekleyen ve biçimlendirici geri bildirim sağlayan bir araç olarak konumlandırmaktadır.

3.1. Öğrenme hedefinin belirlenmesi

Yapay zekâ kullanımından önce dersin öğrenme hedefi açık biçimde tanımlanmalıdır. Örneğin hedef, öğrencinin verilen

bir makine parçasının uygun görünüşlerini teknik resim kurallarına göre oluşturabilmesi olabilir.

Bu aşamada yapay zekâ yalnızca öğrenme hedefinin anlaşılmasına yardımcı olan bir araç olarak kullanılabilir. Öğrenci, konuyu anlamadığı durumlarda kavramların farklı örneklerle açıklanmasını isteyebilir.

3.2. Öğrencinin ilk çizimi oluşturması

Modelin önemli özelliklerinden biri, öğrencinin ilk çözümünü mümkün olduğunca kendi bilgisiyle oluşturmasıdır. Böylece öğrencinin mevcut bilgi düzeyi ve karşılaştığı güçlükler belirlenebilir (Balak, 2019).

Öğrenciden bir parçanın görünüşlerini oluşturması, gerekli ölçülendirmeyi yapması veya verilen teknik resmi yorumlaması istenebilir. Çizim tamamlandıktan sonra öğrenci hangi aşamalarda zorlandığını belirtebilir.

3.3. Yapay zekâ destekli geri bildirim

Öğrenci ilk çözümünü oluşturduktan sonra yapay zekâdan geri bildirim alabilir. Burada yapay zekânın doğrudan “doğru çizimi oluşturması” yerine öğrencinin dikkat etmesi gereken noktaları belirtmesi tercih edilmelidir.

Örneğin öğrenci:

“Çizimdeki görünüşler arasındaki geometrik ilişkileri kontrol et ve olası sorunları belirt. Kesin olarak hata olduğunu düşündüğün noktalar ile emin olmadığın noktaları birbirinden ayır. Çözümü doğrudan verme; öğrencinin hatayı kendisinin bulmasına yardımcı olacak sorular yönelt.” şeklinde bir istem kullanabilir.

Bu yaklaşımda yapay zekâ, öğrencinin yerine problemi çözmek yerine öğrencinin kendi çözümünü değerlendirmesine yardımcı olmaktadır.

3.4. Öğrencinin yapay zekâ çıktısını değerlendirmesi

Yapay zekâ tarafından verilen geri bildirim, doğrudan doğru kabul edilmemelidir. Öğrencinin her öneriyi teknik resim bilgisi ve güvenilir kaynaklarla karşılaştırması beklenmelidir.

Öğrenci yapay zekânın belirttiği bir hatanın gerçekten hata olup olmadığını araştırmalı ve kararının gerekçesini açıklamalıdır. Bu aşama modelin önemli bileşenlerinden biridir; çünkü öğrencinin yalnızca teknik resim bilgisini değil, aynı zamanda yapay zekâ çıktısını eleştirel değerlendirme becerisini geliştirmesi amaçlanmaktadır (Tatlı vd, 2025).

3.5. Çizimin revize edilmesi

Öğrenci, doğruluğunu değerlendirdiği yapay zekâ geri bildirimlerinden yararlanarak teknik çizimini yeniden düzenler. Bu aşamada hangi hataların düzeltileceğine ve hangi değişikliklerin yapılacağına öğrenci kendisi karar verir. Revizyon süreci, öğrencinin teknik resim bilgilerini uygulamasına ve kendi hatalarını fark ederek düzeltmesine olanak sağlar. Yapay zekâ burada yalnızca rehberlik ve geri bildirim sağlayan destekleyici bir araç olarak konumlandırılır. Böylece öğrencinin problem çözme, teknik karar verme ve öz değerlendirme becerilerinin geliştirilmesi amaçlanır.

3.6. Öğretim elemanı tarafından nihai değerlendirme

Modelin son aşamasında öğretim elemanı öğrencinin çalışmasını değerlendirir. Nihai değerlendirmede teknik doğruluk, standartlara uygunluk, çizim kalitesi ve öğrencinin problem çözme süreci dikkate alınabilir.

Böylece yapay zekâ, değerlendirme sürecinin tamamını üstlenmek yerine öğretim elemanının değerlendirmesini destekleyen bir araç hâline gelmektedir.

4. MODELİN MAKİNE MESLEK RESMİ DERSİNDEKİ UYGULAMA ALANLARI

Önerilen model, Makine Meslek Resmi dersinin farklı konu ve öğrenme kazanımlarına uyarlanabilecek esnek bir yapıya sahiptir. İzdüşüm, görünüş çıkarma, kesit alma, ölçülendirme, teknik resim okuma ve CAD uygulamaları gibi farklı konularda aynı öğrenme döngüsü kullanılabilir. Konuya göre teknik çizim görevi ve değerlendirme ölçütleri değiştirilirken, yapay zekânın rehberlik, hata farkındalığı ve biçimlendirici geri bildirim sağlama rolü korunur. Böylece model, dersin farklı içeriklerinde öğrencinin aktif katılımını ve eleştirel değerlendirme becerisini destekleyen bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

Tablo 1. Yapay zekâ destekli uygulama alanları.

Konu	Öğrenci etkinliği	Yapay zekânın rolü
İzdüşüm	Görünüşlerin oluşturulması	Yönlendirici sorular ve kavramsal açıklama
Görünüş çıkarma	2B–3B ilişkilerinin kurulması	Hata farkındalığı ve geri bildirim
Kesitler	Kesit düzleminin belirlenmesi	Kavramsal rehberlik
Ölçülendirme	Ölçülerin yerleştirilmesi	Eksikliklerin sorgulanması
Teknik resim okuma	Teknik çizimin yorumlanması	Öğrenci açıklamasının değerlendirilmesi
CAD	Model ve teknik resim oluşturma	İşlem basamaklarının açıklanması
Proje	Komple teknik dokümantasyon	Biçimlendirici geri bildirim

Bu uygulamalarda yapay zekânın kullanım amacı öğrencinin hazır bir çözüm elde etmesi değil, kendi çözümünü geliştirmesine yardımcı olmaktır. Tablo 1’de yapay zekâ destekli öğrenme modelinin Makine Meslek Resmi dersinin farklı konu alanlarına nasıl uyarlanabileceğini göstermektedir. İzdüşüm ve görünüş çıkarma konularında yapay zekâ, öğrencinin iki ve üç boyutlu ilişkileri kurmasına yönelik kavramsal açıklamalar ve hata farkındalığı sağlayabilir. Kesitler konusunda kesit

düzleminin belirlenmesi ve kesit görünüşünün yorumlanmasına yönelik rehberlik sunulabilir. Ölçülendirme aşamasında ise eksik veya hatalı ölçülerin fark edilmesine yönelik yönlendirici sorular kullanılabilir. Teknik resim okuma etkinliklerinde öğrencinin yaptığı açıklamaların sorgulanması ve geliştirilmesi desteklenebilir. CAD uygulamalarında yapay zekâ, işlem basamaklarının anlaşılmasına ve alternatif çözüm yollarının değerlendirilmesine katkı sağlayabilir. Proje çalışmalarında ise öğrencinin oluşturduğu teknik dokümantasyonun geliştirilmesine yönelik biçimlendirici geri bildirim sağlayabilir. Bu uygulamalarda yapay zekânın temel rolü, öğrencinin yerine teknik çizimi gerçekleştirmek değil, öğrencinin çizim sürecini anlamasını, hatalarını fark etmesini ve teknik kararlarını gerekçelendirmesini desteklemektir.

5. ÖLÇME DEĞERLENDİRME, ETİK VE SINIRLILIKLAR

Yapay zekâ destekli bir eğitim modelinin başarısının yalnızca öğrencilerin final notları üzerinden değerlendirilmesi yeterli değildir. Gelecekte yapılacak deneysel araştırmalarda teknik çizim başarısının yanı sıra öğrencilerin hata tespit becerileri, uzamsal görselleştirme becerileri, öz değerlendirme düzeyleri ve yapay zekâ çıktılarını eleştirel değerlendirme becerileri de incelenebilir.

Modelin deneysel olarak test edilmesi durumunda yapay zekâ destekli öğretim ile geleneksel öğretimin karşılaştırılması mümkündür. Bunun için ön test-son test tasarımı, kontrol grubu ve deney grubu karşılaştırması veya çizim performansına yönelik standartlaştırılmış rubrikler kullanılabilir. Ancak bu tür bir araştırma gerçekleştirilmeden modelin öğrenci başarısını artırdığı sonucuna varılması doğru değildir.

Yapay zekânın kullanımında akademik dürüstlük de önemli bir konudur. Öğrencinin bütün teknik çizimi yapay zekâyâ hazırlatıp kendi çalışması olarak teslim etmesi, dersin öğrenme hedefleriyle çelişebilir. Buna karşılık kavram açıklama, kendi çizimini değerlendirme ve hatalarını fark etme amacıyla yapay zekâdan yararlanılması öğrenme sürecini destekleyebilir.

Bu nedenle dersin başında yapay zekânın hangi amaçlarla kullanılabileceği açık biçimde belirlenmelidir. Ayrıca öğrencilerin yapay zekâ kullanımını gerektiğinde açıklayabilmeleri ve kullandıkları istemleri veya yapay zekâdan aldıkları geri bildirimleri süreç dosyasına eklemeleri sağlanabilir.

Modelin diğer önemli sınırlılığı teknik doğruluktur. Yapay zekâ sistemleri teknik çizimleri yanlış yorumlayabilir veya standartlara aykırı önerilerde bulunabilir. Bu nedenle modelde temel ilke şu şekilde ifade edilebilir:

“Yapay zekâ önerir, öğrenci sorgular, güvenilir teknik kaynak doğrular ve öğretim elemanı değerlendirir.” Bu yaklaşım, yapay zekânın eğitimde insan merkezli ve kontrollü kullanımını desteklemektedir. UNESCO da üretken yapay zekânın eğitimde kullanımında insan merkezli yaklaşım, etik ilkeler, veri gizliliği ve uygun yönetim mekanizmalarının önemini vurgulamaktadır.

6. SONUÇ

Makine meslek resmi eğitimi, öğrencilerin teknik çizim becerilerinin yanı sıra uzamsal düşünme, problem çözme ve teknik iletişim becerilerinin geliştirilmesini gerektiren uygulamalı bir öğrenme alanıdır. Yapay zekâ teknolojilerinin gelişmesi, bu derslerde öğrencilerin öğrenme süreçlerini desteklemek amacıyla yeni araçların kullanılmasını mümkün hâle getirmiştir.

Bu bölümde önerilen yapay zekâ destekli eğitim modeli; öğrencinin teknik çizimi oluşturmaları, yapay zekâdan geri bildirim alması, bu geri bildirimi eleştirel biçimde değerlendirmesi, çizimini geliştirmesi ve öğretim elemanının nihai değerlendirmeyi gerçekleştirmesi üzerine kurulmuştur. Modelin temel yaklaşımı, yapay zekânın öğrencinin veya öğretim elemanının yerine geçmesi değil, öğrenme sürecini destekleyen bir araç olarak kullanılmasıdır.

Özellikle teknik resim gibi geometrik doğruluk ve standartlara uygunluk gerektiren bir alanda yapay zekâ çıktılarının mutlaka doğrulanması gerekmektedir. Bu nedenle yapay zekânın sunduğu öneriler nihai teknik bilgi olarak kabul edilmemeli; öğrenci tarafından sorgulanmalı ve öğretim elemanı tarafından gerektiğinde kontrol edilmelidir.

Önerilen modelin eğitimsel etkinliğinin belirlenmesi için gelecekte deneysel araştırmalar yapılması gerekmektedir. Bu araştırmalarda öğrencilerin teknik çizim performansı, hata tespit becerisi, uzamsal düşünme, öz değerlendirme ve yapay zekâ okuryazarlığı birlikte ele alınabilir.

Sonuç olarak yapay zekânın makine meslek resmi eğitimindeki en önemli katkısının, öğrencinin yerine teknik çizim üretmekten ziyade öğrencinin çizimi anlamasına, hatalarını fark etmesine, çözümünü sorgulamasına ve teknik kararlarını gerekçelendirmesine yardımcı olmak olduğu değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda insan merkezli, öğretim elemanı denetimli ve öğrencinin aktif katılımını koruyan yapay zekâ destekli eğitim modelleri, makine meslek resmi öğretiminin dijital dönüşümünde kullanılabilecek potansiyel bir yaklaşımdır.

KAYNAKÇA

- Akkuş, İ. (2016). *Bilgisayar destekli teknik resim dersinde artırılmış gerçeklik uygulamalarının makine mühendisliği öğrencilerinin akademik başarısına ve uzamsal yeteneklerine etkisi* (Master's thesis, Inonu University (Turkey)).
- Arsoy, R., & Abdulla, G. *Teknik Resim-Teori ve Görsellerle Zenginleştirilmiş Uygulama Örnekleri*. Nobel akademik yayıncılık ltd. Şti..
- Aydın, M. (2025), *Yapay Zekâ Destekli Öğrenme Asistanlarının Eğitimde Kullanımı*. *Eğitim & Bilim*, 232.
- Balak, M. V. (2019). *Teknik Resim Derslerinde Kullanılmak Üzere Etkileşimli 3 Boyutlu Ders İçeriklerinin Geliştirilmesi ve Öğrenme Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması* (Doctoral dissertation).
- Çavuşoğlu, M. (2024). *Meslek lisesi öğrencilerinin geometrik cisimlerin iki boyutlu temsillerini yorumlama ve oluşturma süreçleri* (Master's thesis, Ankara Üniversitesi (Turkey)).
- Çetin, S. (2019). *Artırılmış gerçeklik uygulamalarının teknik resim dersinde ortaöğretim öğrencilerinin akademik başarıları, tutumları ve uzamsal görselleştirme becerilerine etkisi*.
- Emreli, D. (2019). *Makine imalat sektörüne yönelik teknik resim eğitimlerinde sanal ve artırılmış gerçeklik (V/AR) uygulamaları kullanımının öğrenme performansına etkilerinin incelenmesi* (Master's thesis, Bursa Uludag University (Turkey)).
- Er, Z., Akın, A., Alkan, S., & Güzeller, C. (2026). *Yapay Zekâ ile Güçlendirilmiş Geri ve İleri Bildirim Sistemleri: Matematik Eğitimi için Kişiselleştirme ve Etik Odaklı Bir*

Kavramsal Çerçevenin Geliştirilmesi ve Paydaş Temelli Değerlendirilmesi. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 10(1), 243-265.

Hündür, T. (2025). *Fen Bilgisi Eğitiminde Yapay Zekâya Dayalı Chatbotların Uygulanması ve Değerlendirilmesi.*

Kocaman, U. (2023). *Ürün Tasarımında Üretken Tasarımın Tasarım Süreçleri, Tasarımcı ve Tasarım Eğitimi Üzerine Etkileri. PHD Thesis.*

Munguia, J. (2026). *Leveraging AI for 2D technical drawing analysis, feedback and assessment in higher education. International Journal of Mechanical Engineering Education. <https://doi.org/10.1177/03064190251414394>.*

Sürmen, H. K., & Erdem, S. S. (2020). *Teknik Resim ve Uygulamaları. Nobel Akademik Yayıncılık.*

Tatlı, S., & Akçöltekin, A. (Eds.). (2025). *Öğrencilerin Eleştirel Düşünme Becerileri Üzerinde Yapay Zeka Kullanımının Etkileri. Livre de Lyon.*

Uzal, G., Erdem, A., Mete, Ö. Ü. H., Kılıç, Ö. Ü. E., Yazıcı, Ö. Ü. S. Ç., & Göçer, M. *Teknoloji ve Eğitimde Yeni Ufuklar: Yapay Zeka.*

Uzun, Z. Ö. (2024). *Öğrenme Odaklı Siülasyon Sistemlerinde Kullanılan Yapay Zeka Teknolojilerinin Görsel Tasarım Açısından İncelenmesi (Master's thesis, Istanbul Aydın University (Turkey)).*

YAPAY ZEKÂ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK: AKILLI TEKNOLOJİLERDEN YEŞİL DÖNÜŞÜME

Aysu AKILLI ARI¹

1. GİRİŞ

İklim değişikliği, doğal kaynakların azalması, enerji talebindeki artış, çevre kirliliği, biyolojik çeşitliliğin kaybı ve artan atık miktarı, günümüz toplumlarının karşı karşıya olduğu temel çevresel ve ekonomik sorunlar arasında yer almaktadır. Sanayi Devrimi ile hızlanan üretim faaliyetleri ve nüfus artışı, enerji ve doğal kaynaklara duyulan ihtiyacı önemli ölçüde artırmıştır. Bu süreç ekonomik büyümeyi desteklemiş olmakla birlikte, doğal kaynakların kullanımındaki artış çevresel baskıların da giderek belirginleşmesine yol açmıştır. Bu nedenle günümüzde ekonomik gelişmenin yalnızca üretim miktarındaki artış üzerinden değil, çevresel sınırlar ve toplumsal refah ile değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sürdürülebilir kalkınma yaklaşımı, ekonomik gelişme, çevrenin korunması ve toplumsal refahın birlikte ele alınmasını gerektirmektedir. Birleşmiş Milletler tarafından belirlenen 17 Sürdürülebilir Kalkınma Amacı (SKA), yoksulluğun azaltılmasından temiz enerjiye, sürdürülebilir şehirlerden sorumlu üretim ve tüketime, iklim eyleminden ekosistemlerin korunmasına kadar geniş bir alanı kapsamaktadır. Bu amaçların

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi, Merzifon Meslek Yüksek Okulu, ORCID: 0000-0002-1252-9417.

gerçekleştirilmesinde teknolojik gelişmeler önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir (Dere ve Dökelek, 2024).

Yapay zekâ (YZ), büyük veri, nesnelerin interneti, robotik, dijital ikizler ve gelişmiş sensör sistemleri bu teknolojik dönüşümün önemli bileşenleri arasında yer almaktadır. Yapay zekâ; verilerden örüntülerin belirlenmesi, tahmin yapılması, sınıflandırma, karar desteği ve karmaşık problemlerin çözümü gibi birçok işlevi yerine getirebilmesi nedeniyle sürdürülebilirlik uygulamalarında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Enerji talebinin tahmin edilmesi, yenilenebilir enerji üretiminin öngörülmesi, üretim süreçlerinin optimize edilmesi, makinelerin arıza ihtimalinin belirlenmesi, trafik akışının düzenlenmesi, tarımsal sulamanın planlanması ve atıkların sınıflandırılması bu kullanım alanlarından bazılarıdır.

Bununla birlikte yapay zekânın sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini yalnızca sağladığı faydalar üzerinden değerlendirmek doğru değildir. Özellikle büyük yapay zekâ modellerinin eğitilmesi ve çalıştırılması önemli miktarda hesaplama kapasitesi gerektirmektedir. Bu durum elektrik tüketiminin yanı sıra veri merkezlerinde soğutma amacıyla kullanılan su miktarını ve donanım üretiminde ihtiyaç duyulan hammaddeleri de gündeme getirmektedir. Dolayısıyla yapay zekâ bir taraftan çevresel sorunların çözümüne katkı sağlayabilirken diğer taraftan kendisi de çevresel bir ayak izi oluşturmaktadır.

Bu ikili ilişki, sürdürülebilirlik açısından yapay zekânın iki farklı yönden ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Birinci yaklaşım, “sürdürülebilirlik için yapay zekâ” anlayışıdır. Burada yapay zekâ; enerji, üretim, ulaşım, tarım ve atık yönetimi gibi alanlarda kaynak kullanımının azaltılması ve verimliliğin artırılması amacıyla kullanılmaktadır. İkinci yaklaşım ise “sürdürülebilir yapay zekâ” anlayışıdır. Bu yaklaşımda yapay

zekâ sistemlerinin kendisinin daha az enerji, su ve malzeme kullanacak biçimde geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu bölümde yapay zekâ ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişki bu iki yönlü bakış açısı üzerinden ele alınmaktadır. Öncelikle sürdürülebilirlik ve yapay zekâ kavramları açıklanmakta, ardından enerji sistemleri, üretim, döngüsel ekonomi, atık yönetimi, akıllı şehirler ve tarım gibi alanlarda yapay zekânın kullanımına değinilmektedir. Sonraki bölümde yapay zekânın kendi çevresel etkileri ve sürdürülebilir yapay zekâ yaklaşımı incelenmekte; son olarak yapay zekânın yeşil dönüşümün geleceğindeki fırsatları ve sınırlılıkları değerlendirilmektedir.

2. YAPAY ZEKÂ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK İLİŞKİSİ

2.1. Sürdürülebilirlik ve Sürdürülebilir Kalkınma

Sürdürülebilirlik, günümüz ihtiyaçlarının karşılanması sırasında gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama olanaklarının korunmasını ifade eden geniş kapsamlı bir yaklaşımdır. Sürdürülebilir kalkınma ise ekonomik, çevresel ve sosyal boyutların birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Bu nedenle sürdürülebilirlik yalnızca çevrenin korunmasıyla sınırlı değildir; ekonomik faaliyetlerin uzun vadede devam edebilmesi ve toplumun refahının korunması da bu yaklaşımın önemli unsurlarıdır.

Sürdürülebilirliğin çevresel boyutu doğal kaynakların korunması, enerji tüketiminin azaltılması, sera gazı emisyonlarının düşürülmesi, ekosistemlerin korunması ve atık oluşumunun azaltılması gibi konuları kapsamaktadır. Ekonomik boyut, üretim ve tüketim faaliyetlerinin uzun vadede uygulanabilir olmasını ifade ederken sosyal boyut insan refahı,

eşitlik, eğitim, sağlık, güvenlik ve adil çalışma koşullarıyla ilişkilidir.

Yapay zekâ bu üç boyutun tamamıyla ilişkilendirilebilir. Üretim süreçlerinde enerji ve hammadde kullanımının azaltılması çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilirken, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ekonomik sürdürülebilirliği destekleyebilir. Sağlık ve eğitim hizmetlerine erişimin iyileştirilmesi gibi uygulamalar ise sosyal sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır.

Vinuesa ve arkadaşları (2020), yapay zekânın Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarının önemli bir bölümünün gerçekleştirilmesine katkı sağlayabileceğini, ancak bazı hedefler üzerinde olumsuz etkiler oluşturma ihtimalinin de bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuç, yapay zekânın sürdürülebilirlik açısından kendiliğinden olumlu bir teknoloji olarak kabul edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Teknolojinin etkisi, hangi amaçla geliştirildiği, hangi kaynakları kullandığı ve hangi koşullarda uygulandığı ile yakından ilişkilidir.

2.2. Yapay Zekânın Sürdürülebilir Kalkınmadaki Rolü

Yapay zekânın sürdürülebilir kalkınmaya katkısı temel olarak verimlilik, tahmin, otomasyon ve optimizasyon kapasitesi üzerinden açıklanabilir.

İlk olarak yapay zekâ kaynak verimliliğinin artırılmasına yardımcı olabilir. Aynı üretim miktarının daha az enerji veya hammadde kullanılarak gerçekleştirilmesi hem ekonomik hem de çevresel açıdan avantaj sağlayabilir.

İkinci olarak tahmin yeteneği önemlidir. Enerji talebi, yenilenebilir enerji üretimi, trafik yoğunluğu, tarımsal verim veya makine arızalarının önceden tahmin edilmesi, kaynakların daha etkin planlanmasına olanak sağlayabilir.

Üçüncü olarak yapay zekâ, insanların sürekli olarak gerçekleştirmesinin zor olduğu bazı izleme ve sınıflandırma işlemlerinin otomatikleştirilmesini sağlayabilir. Kalite kontrol, çevresel izleme ve atık ayrıştırma bu kapsamda değerlendirilebilir.

Son olarak yapay zekâ çok sayıda değişkenin aynı anda değerlendirilmesini gerektiren optimizasyon problemlerinde karar desteği sunabilir. Enerji şebekeleri, üretim hatları ve lojistik ağları buna örnek gösterilebilir.

Bununla birlikte bu faydaların ortaya çıkması için yalnızca yapay zekâ teknolojisinin mevcut olması yeterli değildir. Uygun veri altyapısına, doğru model seçimine, güvenilir sensörlere ve uygulama alanına uygun bir sistem tasarımına ihtiyaç vardır.

2.3. Yapay Zekâdan Yeşil Dönüşüme

Yeşil dönüşüm, ekonomik faaliyetlerin çevresel etkilerinin azaltılarak düşük karbonlu, kaynak verimli ve sürdürülebilir üretim ve tüketim sistemlerine geçişi ifade etmektedir. Dijital teknolojiler bu dönüşümü destekleyen önemli araçlardan biridir.

Yapay zekânın burada doğrudan bir “yeşil teknoloji” olarak değerlendirilmesinden ziyade, diğer teknolojilerin sürdürülebilirlik performansını artıran bir etkinleştirici teknoloji olarak görülmesi daha doğru olacaktır. Örneğin güneş enerjisi kendi başına yenilenebilir bir enerji teknolojisidir. Ancak güneş ışınımı ve hava koşullarından yararlanılarak üretimin önceden tahmin edilmesi ve depolama sistemlerinin buna göre yönetilmesi, yapay zekâ ile yenilenebilir enerji teknolojisinin bütünleşmesini sağlar.

Dolayısıyla yeşil dönüşüm yalnızca yeni teknolojilerin geliştirilmesine değil, mevcut teknolojilerin daha akıllı ve verimli biçimde yönetilmesine de bağlıdır.

3. SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKÂ

Enerji sektörü, sürdürülebilir kalkınma açısından kritik bir öneme sahiptir. Fosil yakıtların çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasını ve mevcut enerjinin daha verimli yönetilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda yapay zekâ; enerji talebinin ve yenilenebilir enerji üretiminin tahmin edilmesi, akıllı şebekelerin yönetilmesi ve enerji depolama sistemlerinin optimize edilmesi gibi alanlarda kullanılarak enerji sistemlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hâle getirilmesine katkı sağlayabilmektedir.

3.1. Enerji Talebinin Tahmin Edilmesi

Elektrik sistemlerinin güvenilir biçimde işletilebilmesi için gelecekteki enerji talebinin mümkün olduğunca doğru tahmin edilmesi gerekir. Sıcaklık, nem, günün saati, mevsim, tatil dönemleri ve geçmiş tüketim verileri gibi çok sayıda değişken enerji talebini etkileyebilir.

Yapay zekâ modelleri bu değişkenler arasındaki ilişkileri öğrenerek gelecekteki talebe ilişkin tahminler oluşturabilir. Örneğin sıcaklıkların yükseldiği dönemlerde soğutma sistemlerinin kullanımının artması elektrik tüketimini etkileyebilir. Geçmiş tüketim ve meteorolojik veriler birlikte değerlendirildiğinde benzer koşullarda ortaya çıkabilecek talep hakkında daha gerçekçi öngörüler yapılabilir.

Daha doğru talep tahmini, gereğinden fazla enerji üretiminin önlenmesine ve üretim kaynaklarının daha etkin planlanmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte tahmin

doğruluğunun kullanılan verinin niteliğine ve modelin gerçek koşullara uygunluğuna bağlı olduğu unutulmamalıdır.

3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yönetimi

Güneş ve rüzgâr enerjisinin önemli özelliklerinden biri üretimin hava koşullarına bağlı olmasıdır. Güneş enerjisinde güneş ışınımı ve bulutluluk, rüzgâr enerjisinde ise rüzgâr hızı ve yönü üretim miktarını etkiler.

Yapay zekâ, geçmiş enerji üretim verilerini meteorolojik bilgilerle birlikte değerlendirerek gelecekteki üretimin tahmin edilmesine yardımcı olabilir. Bu tahminler enerji şebekelerinin planlanmasını kolaylaştırabilir. Örneğin güneş enerjisi üretiminde azalma bekleniyorsa enerji depolama sistemlerinin kullanımının veya alternatif enerji kaynaklarının planlanması mümkün olabilir.

Bu tür uygulamalar yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonundaki belirsizliğin azaltılmasına katkı sağlayabilir.

3.3. Akıllı Şebekeler ve Enerji Optimizasyonu

Akıllı şebekeler; gerçek zamanlı veri toplama, haberleşme ve otomatik karar desteğini enerji sistemleriyle bir araya getirmektedir. Akıllı sayaçlar, sensörler ve enerji üretim tesislerinden elde edilen veriler yapay zekâ modelleri tarafından analiz edilebilir.

Yük tahmini, arıza tespiti, enerji fiyatlarının tahmini, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve talep tarafı yönetimi bu sistemlerin kullanım alanları arasında yer almaktadır.

Dağıtık enerji üretiminin yaygınlaşmasıyla tüketicilerin aynı zamanda enerji üreticisi hâline gelmesi, enerji akışlarını daha karmaşık bir yapıya dönüştürmektedir. Yapay zekâ bu karmaşık verileri analiz ederek enerji sistemlerinin işletilmesine yönelik karar desteği sağlayabilir.

3.4. Enerji Depolama Sistemleri

Yenilenebilir enerji üretiminin değişken yapısı enerji depolama sistemlerinin önemini artırmaktadır. Bataryalarda yapay zekâ; şarj durumu, sağlık durumu, kalan kullanım ömrü ve olası arızaların tahmin edilmesinde kullanılabilir.

Bataryaların uygun olmayan şarj ve deşarj koşullarında çalıştırılması kullanım ömrünü olumsuz etkileyebilir. Yapay zekâ modellerinin geçmiş çalışma verilerini analiz ederek uygun şarj-deşarj stratejilerinin belirlenmesine katkı sağlaması mümkündür. Batarya kullanım ömrünün uzatılması, yeni batarya üretimi için gerekli hammadde ihtiyacının azaltılmasına dolaylı olarak katkıda bulunabilir.

3.5. Binalarda ve Endüstride Enerji Verimliliği

Binalarda ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma sistemleri önemli enerji tüketim kaynaklarıdır. Yapay zekâ; sıcaklık, nem, bina doluluk oranı ve geçmiş tüketim verilerini analiz ederek bu sistemlerin daha uygun biçimde çalıştırılmasına yardımcı olabilir.

Benzer şekilde sanayi tesislerinde makine ve proses bazında enerji tüketimi izlenerek yüksek tüketim oluşturan süreçler belirlenebilir. Böylece enerji verimliliğinin yalnızca genel tüketim miktarı üzerinden değil, üretim sürecinin belirli aşamaları üzerinden değerlendirilmesi mümkün olabilir.

IEA'nın (2025) Energy and AI raporu, yapay zekânın enerji sektöründe önemli verimlilik fırsatları oluşturduğuna dikkat çekerken, veri merkezlerinin enerji talebindeki artışın da dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Raporda veri merkezlerinin küresel elektrik tüketiminin 2030 yılında yaklaşık 945 TWh seviyesine ulaşabileceği öngörülmektedir. Bu durum yapay zekânın enerji sektöründeki rolünün iki yönlü olduğunu göstermektedir: YZ enerji sistemlerini daha verimli hâle

getirebilirken, YZ altyapısının kendisi de yeni bir enerji talebi oluşturmaktadır.

4. YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM

Üretim faaliyetleri enerji, hammadde ve su gibi kaynakların yoğun biçimde kullanıldığı sistemlerdir. Üretim sırasında meydana gelen hatalar, fireler, plansız duruşlar ve gereksiz enerji tüketimleri yalnızca işletme maliyetlerini değil, çevresel etkileri de artırmaktadır.

Yapay zekâ, üretim sistemlerinden elde edilen verileri analiz ederek süreçlerin daha etkin yönetilmesine ve kaynak kullanımının azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Akıllı üretim sistemlerinde makineler, sensörler ve üretim yazılımları birbirleriyle bağlantılı biçimde çalışır. Sıcaklık, titreşim, basınç, enerji tüketimi, üretim hızı ve kalite gibi veriler sürekli olarak toplanabilir. Yapay zekâ bu verileri analiz ederek üretim sürecindeki değişimleri belirleyebilir ve olası problemlerin daha erken fark edilmesine yardımcı olabilir.

Bu yaklaşımın önemli uygulamalarından biri tahmine dayalı bakımdır. Makinelerin plansız arızalanması üretim kayıplarına, bakım maliyetlerinin artmasına ve kaynak israfına neden olabilir. Titreşim, sıcaklık, ses veya elektrik akımı gibi parametreler izlenerek makinenin normal çalışma davranışı belirlenebilir. Normal davranıştan meydana gelen sapmalar, olası arızaların erken göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Örneğin bir rulmanın titreşim karakteristiğinde ortaya çıkan değişim, ileride meydana gelebilecek mekanik bir problemin işareti olabilir. Yapay zekâ bu değişimi belirleyerek bakım ekibine erken uyarı sağlayabilir. Böylece plansız

duruşların azaltılması, makine kullanım ömrünün uzatılması ve gereksiz yedek parça tüketiminin önlenmesi mümkün olabilir.

Yapay zekâ aynı zamanda üretim parametrelerinin optimizasyonunda kullanılabilir. Kesme hızı, ilerleme miktarı, takım geometrisi, sıcaklık, basınç ve işlem süresi gibi parametreler ürün kalitesi ve enerji tüketimi üzerinde etkili olabilir. Geçmiş üretim verilerinden yararlanılarak bu değişkenler ile ürün performansı arasındaki ilişkiler incelenebilir. CNC işleme, eklemeli imalat, enjeksiyon, kaynak ve metal şekillendirme gibi süreçler bu açıdan önemli uygulama alanlarıdır.

Üretimde sürdürülebilirliğin bir diğer boyutu kalite kontrolüdür. Hatalı ürünlerin üretim sürecinin erken aşamalarında belirlenmesi malzeme ve enerji kayıplarını azaltabilir. Bilgisayarlı görü ve derin öğrenme tabanlı görüntü işleme sistemleri yüzey kusurları, çatlaklar, çizikler ve geometrik farklılıkların belirlenmesinde kullanılabilir.

Dijital ikizler de yapay zekâ ile sürdürülebilir üretim arasında önemli bir bağlantı oluşturmaktadır. Dijital ikiz, fiziksel bir ürünün, makinenin veya üretim sisteminin gerçek verilerle güncellenen sanal temsidir. Yapay zekâ ile kullanıldığında farklı üretim senaryolarının fiziksel üretim gerçekleştirilmeden önce değerlendirilmesine olanak sağlayabilir. Örneğin üretim hattının hızının değiştirilmesinin enerji tüketimi ve ürün kalitesi üzerindeki olası etkileri sanal ortamda incelenebilir. Bu durum deneme üretimlerinin ve buna bağlı kaynak tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Bu gelişmeler Endüstri 5.0 yaklaşımıyla birlikte değerlendirildiğinde yapay zekânın rolü yalnızca otomasyonla sınırlı değildir. Endüstri 5.0; insan merkezlilik, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık kavramlarını üretim sistemlerinin önemli bileşenleri hâline getirmektedir (Nalbant ve Aydın, 2025).

Dolayısıyla yapay zekânın insanı tamamen üretim sürecinden çıkarmaktan ziyade insanın bilgi ve deneyimini destekleyen bir araç olarak değerlendirilmesi daha kapsayıcı bir yaklaşım sunmaktadır.

5. DÖNGÜSEL EKONOMİ VE ATIK YÖNETİMİNDE YAPAY ZEKÂ

Geleneksel doğrusal ekonomi “al-üret-kullan-at” anlayışına dayanırken, döngüsel ekonomi kaynakların ve ürünlerin mümkün olduğunca uzun süre ekonomik sistemde tutulmasını amaçlamaktadır. Yapay zekâ; tasarım, üretim, kullanım, geri toplama ve geri dönüşüm süreçlerinde yaşam döngüsü verilerini analiz ederek kaynak kullanımının daha etkin yönetilmesine katkı sağlayabilir. Ürünlerin malzeme içeriği, kullanım süresi, bakım geçmişi ve geri kazanılabilir bileşenleri dijital sistemlerde izlenebilir. Atık yönetiminde sensörlerden alınan konteyner doluluk verileri analiz edilerek toplama zamanları ve güzergâhlar optimize edilebilir. Böylece gereksiz seferlerin, yakıt tüketiminin ve emisyonların azaltılması mümkün olabilir.

Geri dönüşüm tesislerinde bilgisayarlı görü ve derin öğrenme yöntemleri plastik, metal, cam ve kâğıt gibi farklı atıkların otomatik olarak sınıflandırılmasında kullanılabilir. Görüntü tabanlı sistemler robotik uygulamalarla birlikte çalışarak atıkların uygun bölmelere ayrılmasını sağlayabilir. Ancak laboratuvar ortamındaki başarılı sonuçların gerçek tesis koşullarına doğrudan aktarılması doğru değildir; kirli, ezilmiş veya üst üste bulunan atıklar sınıflandırma performansını etkileyebilir. Bu nedenle yapay zekâ sistemlerinin gerçek çalışma koşullarında test edilmesi gerekmektedir. Ayrıca yapay zekâ, kullanılmış ürünlerin üreticiye veya geri dönüşüm tesislerine

ulaştırılmasında tersine lojistik süreçlerini ve taşıma rotalarını optimize ederek döngüsel ekonominin etkinliğini artırabilir.

6. AKILLI ŞEHİRLER, ULAŞIM VE TARIMDA YAPAY ZEKÂ

Kent nüfusunun ve şehirlerdeki ekonomik faaliyetlerin artması enerji, su, ulaşım ve atık sistemleri üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Akıllı şehir yaklaşımında sensörlerden elde edilen veriler kullanılarak kentsel sistemlerin daha etkin yönetilmesi amaçlanmaktadır.

Su yönetimi bu alanlardan biridir. Su tüketimindeki olağan dışı değişimler yapay zekâ tarafından analiz edilerek olası kaçakların belirlenmesine yardımcı olunabilir. Benzer şekilde bina ve mahalle düzeyindeki elektrik tüketiminin incelenmesi, yüksek tüketim noktalarının belirlenmesini sağlayabilir.

Ulaşım sistemlerinde trafik yoğunluğunun tahmin edilmesi de önemli bir uygulama alanıdır. Trafik sıklığı yakıt tüketiminin ve araç emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Trafik kameraları, GPS verileri ve sensörlerden elde edilen bilgiler kullanılarak yoğunluğun tahmin edilmesi ve trafik ışıklarının buna göre düzenlenmesi mümkün olabilir. Toplu taşımada yolcu yoğunluğunun öngörülmesi ise seferlerin daha uygun biçimde planlanmasına katkı sağlayabilir.

Elektrikli araçların yaygınlaşması ulaşım sektörünün karbonsuzlaştırılması açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Bununla birlikte çok sayıda elektrikli aracın aynı anda şarj edilmesi elektrik şebekesinde yüksek talep oluşturabilir. Yapay zekâ, kullanıcıların şarj alışkanlıklarını, enerji fiyatlarını ve şebeke koşullarını değerlendirerek şarj zamanlarının planlanmasına yardımcı olabilir.

Tarımda ise su ve gübre kullanımının verimli hâle getirilmesi sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Uydu ve drone görüntüleri ile toprak sensörlerinden elde edilen veriler yapay zekâ modelleriyle birlikte değerlendirilebilir. Böylece bitkilerin gelişim durumu ve su ihtiyacı hakkında bölgesel tahminler yapılabilir. Tarlanın tamamını aynı miktarda sulamak yerine yalnızca ihtiyaç duyulan bölgelere müdahale edilmesi kaynak kullanımının azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Yapay zekâ gıda kayıplarının azaltılmasında da kullanılabilir. Talep tahmini, stok yönetimi, lojistik planlama ve raf ömrü tahmini gibi uygulamalar üretim ile tüketim arasındaki uyumsuzlukların azaltılmasına yardımcı olabilir. Geçmiş satış verileri ve mevsimsel değişkenlerden yararlanılarak gelecekteki talebin tahmin edilmesi, gereğinden fazla üretimin önlenmesine katkı sağlayabilir.

7. YAPAY ZEKÂNIN ÇEVRESEL AYAK İZİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPAY ZEKÂ

Yapay zekânın çevresel etkisi yalnızca kullandığı elektrikle sınırlı değildir; veri merkezlerinin kurulması, donanım ve yarı iletken üretimi, soğutma sistemleri, kullanılan hammaddeler ve elektronik atıklar da bu etkiye katkıda bulunmaktadır. Özellikle büyük yapay zekâ modellerinin eğitimi ve çok sayıda sorgunun işlenmesi yüksek miktarda hesaplama ve enerji gerektirebilir. Veri merkezlerinde kullanılan soğutma sistemleri de önemli miktarda su tüketebilir (Li et al., 2025). Bu nedenle yapay zekâ sistemlerinin değerlendirilmesinde yalnızca doğruluk ve performans değil, enerji ve su tüketimi ile karbon ve kaynak kullanımı da dikkate alınmalıdır.

Sürdürülebilir yapay zekâ, gerekli performansı daha az enerji ve kaynak kullanarak sağlamayı amaçlamaktadır. Daha küçük ve probleme özgü modellerin kullanılması, gereksiz model

eğitimlerinin azaltılması ve model sıkıştırma yöntemlerinden yararlanılması enerji tüketimini düşürebilir. Yenilenebilir enerji kullanımı, su tüketimi düşük soğutma sistemleri ve enerji verimli donanımlar da çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlar. Ayrıca donanımların kullanım ömrünün uzatılması, yeniden kullanılması ve elektronik atıkların geri dönüştürülmesi önemlidir. Bu nedenle daha büyük bir yapay zekâ modeli her zaman daha sürdürülebilir veya daha uygun bir çözüm değildir; önemli olan gerekli performansı en düşük kaynak kullanımıyla sağlayabilmektir.

8. YEŞİL DÖNÜŞÜMÜN GELECEĞİ: FIRSATLAR VE ZORLUKLAR

Geleceğin sürdürülebilir sistemlerinde yapay zekânın tek başına çalışan bir teknoloji olmaktan ziyade diğer dijital teknolojilerle bütünleşmesi beklenmektedir. Nesnelerin interneti sayesinde makineler, araçlar, binalar ve çevresel sistemler sürekli veri üretecek; büyük veri teknolojileri bu verilerin depolanmasını ve işlenmesini sağlayacak; yapay zekâ ise verilerden anlamlı sonuçların çıkarılmasına yardımcı olacaktır.

Bir üretim tesisinde makinelerden gelen enerji tüketim verilerinin sürekli analiz edilmesi, enerji kayıplarının kaynağının belirlenmesine örnek olarak verilebilir. Benzer şekilde şehirlerde trafik, enerji ve su verilerinin birlikte değerlendirilmesi, kentsel kaynakların daha etkin yönetilmesine katkı sağlayabilir.

Dijital ikiz teknolojilerinin gelişmesi de bu dönüşümü destekleyebilir. Üretim tesislerinin, enerji sistemlerinin veya şehir altyapılarının gerçek verilerle güncellenen sanal modellerinin oluşturulması, farklı senaryoların uygulanmadan önce değerlendirilmesine olanak sağlayabilir. Yapay zekâ bu modeller üzerinde gelecekteki davranışların tahmin edilmesinde kullanılabilir.

Net sıfır hedefleri açısından da yapay zekânın çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır. Üretim süreçlerinin karbon yoğunluğunun belirlenmesi, enerji tüketimi ile emisyonlar arasındaki ilişkinin incelenmesi ve yüksek emisyon oluşturan faaliyetlerin tespit edilmesi bunlardan bazılarıdır. Ancak burada da yapay zekânın kendi çevresel etkisinin hesaba katılması gerekir. Bir alanda sağlanan emisyon azaltımının başka bir alandaki yapay zekâ kaynaklı çevresel etkiler tarafından kısmen dengelenmesi mümkündür.

Sürdürülebilirlik yalnızca çevresel boyutla da sınırlı değildir. Yapay zekânın yaygınlaşması istihdam, veri gizliliği, algoritmik önyargı, dijital eşitsizlik ve karar süreçlerinin şeffaflığı gibi sosyal konuları da gündeme getirmektedir. Gelişmiş yapay zekâ teknolojilerine erişimin yalnızca ekonomik olarak güçlü ülkeler ve kuruluşlarla sınırlı kalması, mevcut teknolojik eşitsizlikleri artırabilir. Bu nedenle Birleşmiş Milletlerin de vurguladığı üzere yapay zekânın sağlayacağı faydaların toplumun farklı kesimlerine mümkün olduğunca kapsayıcı biçimde ulaşması önemlidir.

Gelecekteki araştırmaların yapay zekânın yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin daha doğru ölçülmesi, enerji ve su tüketiminin standart yöntemlerle değerlendirilmesi, enerji verimli algoritmaların geliştirilmesi, küçük ve özelleştirilmiş modellerin yaygınlaştırılması, yenilenebilir enerji kullanan veri merkezlerinin geliştirilmesi ve elektronik atıkların azaltılması gibi alanlara yönelmesi beklenebilir.

Bunun yanında yapay zekânın döngüsel ekonomiyle ilişkisi, sosyal ve ekonomik etkilerinin ölçülmesi ve sürdürülebilir yapay zekâ için ortak değerlendirme ölçütlerinin oluşturulması da önem taşımaktadır.

9. SONUÇ

Yapay zekâ, dijital dönüşümün temel teknolojilerinden biri hâline gelmiş ve sürdürülebilirlik alanında farklı sektörlerde uygulanabilecek önemli fırsatlar ortaya çıkarmıştır. Enerji talebinin tahmin edilmesi, yenilenebilir enerji üretiminin yönetilmesi, akıllı şebekelerin işletilmesi, üretim süreçlerinin optimize edilmesi, tahmine dayalı bakım, kalite kontrol, atık sınıflandırma, akıllı ulaşım ve hassas tarım bu potansiyelin başlıca örneklerini oluşturmaktadır.

Yapay zekânın sürdürülebilirlik açısından en önemli katkılarından biri, karmaşık sistemlerde çok sayıda değişkenin birlikte değerlendirilmesine ve kararların daha fazla veriye dayalı hâle gelmesine olanak sağlamasıdır. Enerji tüketimindeki değişimlerin izlenmesi, üretim makinelerinin durumunun değerlendirilmesi veya tarımsal alanlardaki su ihtiyacının belirlenmesi gibi işlemlerde yapay zekâ önemli bir karar destek aracı olabilir.

Bununla birlikte yapay zekânın sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi tek yönlü değildir. Büyük modellerin eğitilmesi ve çalıştırılması elektrik tüketimini artırmakta, veri merkezlerinde soğutma amacıyla su kullanılabilenmekte ve yapay zekâ donanımlarının üretiminde çeşitli hammaddelere ihtiyaç duyulmaktadır. Donanımların hızlı yenilenmesi ise elektronik atık miktarının artmasına neden olabilecek bir başka unsurdur.

Bu nedenle yapay zekâ ve sürdürülebilirlik arasındaki ilişki iki tamamlayıcı yaklaşım üzerinden ele alınmalıdır. Sürdürülebilirlik için yapay zekâ, mevcut sistemlerin daha verimli, kaynak tasarruflu ve çevresel açıdan daha uygun hâle getirilmesini amaçlarken; sürdürülebilir yapay zekâ, yapay zekâ teknolojisinin kendisinin çevresel etkisini azaltmayı hedeflemektedir.

Gerçek anlamda bir yeşil dönüşüm için bu iki yaklaşımın birlikte yürütülmesi gerekmektedir. Bir sistemde enerji tasarrufu sağlayan ancak çalışması için çok yüksek miktarda enerji ve su tüketen bir yapay zekâ uygulamasının toplam çevresel etkisi değerlendirilmeden sürdürülebilir olduğu sonucuna varılmamalıdır. Benzer biçimde yalnızca yapay zekânın enerji tüketimine odaklanmak ve onun sağlayabileceği kaynak verimliliğini göz ardı etmek de eksik bir değerlendirme olacaktır.

Geleceğin sürdürülebilir teknolojilerinde yapay zekânın nesnelerin interneti, büyük veri, robotik, dijital ikizler, gelişmiş sensörler ve yenilenebilir enerji sistemleriyle birlikte kullanılması beklenmektedir. Bu bütünleşme, üretim ve tüketim sistemlerinin daha esnek ve kaynak verimli hâle gelmesine katkı sağlayabilir.

Ancak teknolojik gelişmenin kendiliğinden sürdürülebilirlik sağlamadığı unutulmamalıdır. Yapay zekânın hangi amaçla kullanıldığı, hangi kaynaklarla geliştirildiği, hangi toplumsal koşullarda uygulandığı ve sağladığı faydanın çevresel maliyetine kıyasla ne ölçüde anlamlı olduğu belirleyici olacaktır.

Sonuç olarak yapay zekâ, sürdürülebilir kalkınma ve yeşil dönüşüm açısından güçlü bir araçtır. Ancak bu potansiyelin ortaya çıkması yalnızca daha büyük ve daha güçlü modeller geliştirilmesine bağlı değildir. Asıl önemli olan, ihtiyaç duyulan problemi mümkün olan en düşük kaynak kullanımıyla çözebilen, çevresel etkileri ölçülebilen, ekonomik açıdan uygulanabilir ve toplumsal açıdan kapsayıcı yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesidir.

Bu nedenle geleceğin temel yaklaşımı yalnızca “daha fazla yapay zekâ” geliştirmek değil, “gerektiği kadar ve mümkün olan en sürdürülebilir biçimde yapay zekâ” kullanmak olmalıdır.

KAYNAKÇA

- Dere, İ., & Dölek, E. D. (2024). Türkiye sosyal bilgiler öğretim programında Birleşmiş Milletler 2030 sürdürülebilir kalkınma amaçları. *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 24(3), 1813-1837.
- Nalbant, K. G., & Aydın, S. (2025). Endüstri 4.0'dan Endüstri 5.0'a geçiş: Dijital dönüşümde yapay zekâ ve metaverse'in rolü. *Sosyal, Beşerî ve İdari Bilimler Dergisi*, 8(1), 41-54.
- International Energy Agency. (2025). *Energy and AI*. Paris, France: International Energy Agency.
- Li, P., Yang, J., Islam, M. A., & Ren, S. (2025). Making AI less “thirsty”: Uncovering and addressing the secret water footprint of AI models. *Communications of the ACM*, 68(7), 32–39.
- Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., ... Fuso Nerini, F. (2020). The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Communications*, 11, 233. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14108-y>.
- Walk, J., Köhl, N., Saidani, M., & Schatte, J. (2023). *Artificial intelligence for sustainability: Facilitating sustainable smart product-service systems with computer vision*. Proceedings/Preprint.

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER**

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