

MALZEME VE METALURJİ MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA GÜNCEL KONULAR VE AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

Editör: Dr.Öğr.Üyesi İbrahim PINARCI



yaz
yayınları

**Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Alanında
Güncel Konular ve Akademik Değerlendirmeler**

Editör

Dr.Öğr.Üyesi İbrahim PINARCI

yaz
yayınları

2026

**Malzeme ve Metalurji Mühendisliği
Alanında Güncel Konular ve Akademik
Değerlendirmeler**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi İbrahim PINARCI

© 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 978-625-8926-93-4

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

Magnezyum Alaşımlarında İnorganik ve Organik Kitosan Kaplama Yöntemleriyle Uygulanan Yeni Yaklaşımlar.....	1
<i>Halil Ahmet GÖREN</i>	
Sırlı Porselen Karolarda Köşe Eğriliği Kontrolünde Angop Kompozisyonunun Rolü : Diopsitli Frit Yaklaşımı.....	17
<i>Müge TARHAN</i>	
Metalik Camların Sentezinde Yapay Zeka Uygulamaları: Tarihsel Gelişim, Kompozisyon Tasarımı ve İmalat Süreçlerinin Optimizasyonu	40
<i>Rıza KARA, Merve GENEL</i>	
Üretim Mühendisliğinde Yapay Zekâ Uygulamaları.....	81
<i>Rıza KARA, Merve GENEL</i>	
Fonksiyonel Derecelendirilmiş Tİ6AL4V/HA/GRAFİT Kompozitinin Mikroyapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi	134
<i>İdris GÖKALP, Egemen AVCU, Rıdvan YAMANOĞLU</i>	
Yüksek Entropili Alaşım Kaplamalar – Kısım I: Malzeme Tasarımı ve Üretim Teknolojileri.....	151
<i>Burcu YİĞİT, Ahmet ŞİMŞEK, Özkan ÖZDEMİR</i>	
Yüksek Entropili Alaşım Kaplamalar – Kısım II: Mikroyapı, Performans ve Güncel Gelişmeler	190
<i>Burcu YİĞİT, Ahmet ŞİMŞEK, Özkan ÖZDEMİR</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."

MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA İNORGANİK VE ORGANİK KİTOSAN KAPLAMA YÖNTEMLERİYLE UYGULANAN YENİ YAKLAŞIMLAR

Halil Ahmet GÖREN¹

1. GİRİŞ

Magnezyum (Mg) elementi yerkabuğunda bol bulunan yaklaşık %2 gibi bir Clarke sayısına sahip olan hafifliğiyle mühendislerin ve tasarımcıların dikkatini çeken önemli bir hafif metaldir. Mg önemli derecede hafifliği, uygun mekanik özellikleri, bolluğu karbon salınımını düşürmek isteyen firmalar tarafından dikkat çekmekte ve talebi arttırmaktadır. Ayrıca biyomedikal uygulamalar için biyolojik olarak uyumlu bir malzeme olması insan için toksit olmaması Mg alaşımlarına olan talebi bu konuda da arttırmaktadır. Özellikle kemik benzeri mekanik özellikler göstermesi, üstün sönümle özellikleri, sarsıntıyı absorbe etme özelliği, implant uygulamaları gibi sağlık sektöründe tercih edilme oranını arttırmıştır (Alateyah vd., 2021; Koç ve Turan, 2019; Li vd., 2021; Willbold vd., 2015). Mühendislerin, araştırmacıların ve sektörlerin bu kadar önem atfettiği Mg elbette korozyon gibi bazı zayıf özelliklere sahiptir. Araştırmacılar bu özelliklerin geliştirilmesi için çok farklı yöntemler denemişlerdir. Korozyon özelliğinin geliştirilmesi için özellikle alaşım elementi ilavesi metodu kullanılarak bu özellik geliştirilmeye çalışılmış ve önemli sonuçlar alınmıştır (Antoniac vd., 2020; Çicek vd., 2024; Comba vd., 2022; Elen vd., 2019;

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Sinop Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, ORCID: 0000-0003-4455-4024.

Elen vd., 2026; Elen ve Elen, 2025; Elen vd., 2022; Elen vd., 2022; Gray ve Luan, 2002; Hornberger vd., 2012; Özdemir vd., 2023).

Bir çok araştırmacı tarafından Mg alaşımlarının mikroyapı, mekanik, ısı, ve korozyon özelliklerini geliştirmek için birçok çalışma yapılmıştır (Gören, 2021, Gören, 2026; Gören ve Ünal, 2025; Gören vd., 2021; Gören vd., 2022; Gören vd., 2019; Koç vd., 2018; Ünal ve Gören, 2024).

Biyo-uyumluluğundan dolayı biyo-parçalanabilen polimerlere alternatif umut vadeden bir malzeme olarak, özellikle biyomedikal uygulamalarda yeni beklentiler doğuran Mg bu alanda araştırmalara konu olsa da hala kullanımı sadece kardiyovasküler stent, kemik malzemeleri ve kemik onarımında kullanılan gözenekli iskelelerin geliştirilmesinde kullanılmıştır (Hornberger vd., 2012; Witte vd., 2008; Zeng vd., 2008).

Son yıllarda Mg korozyon özelliklerinin geliştirilmesinde bir çok metot kullanılsa da daha fazla teknik gerektiren araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu nedenle kaplamalar Mg korozyon araştırmalarına önemli bir kapı aralamaktadır. Elementlerin bir çoğunun Mg içinde düşük çözünürlüğe sahip olmasından dolayı kaplama teknikleri Mg alaşımlarının korozyon dirençlerini geliştirmek için önemli bir alan açmaktadır. Bugüne kadar geliştirilen kaplamaların çoğu biyomedikal uygulamaların haricindeki sektörler için geliştirilmiştir. Bu çalışmalar uçak malzemelerinin korozyon ve aşınma direncini geliştirmede kullanılmıştır. Bazı çalışmalarda, elektronik el aletlerinin parçalarında dekoratif amaçlıdır. Mg 'un biyo-uyumluluklarını geliştirmek için alaşımlarının korozyon dirençlerini artırma çalışmaları ana amaç olmuştur ve son zamanlarda kaplamaların geliştirilmesine duyulan ihtiyaç yayın sayısındaki artış ile kendini göstermiştir (Di Mario vd., 2004; Hornberger vd., 2012).

Mg biyouyumlu bir malzemeye göre çok daha fazla korozyona uğramaktadır. Ayrıca korozyonun lokal olması implant uygulamalarında kullanımını zorlaştırmaktadır. Buna ek olarak korozyon ürünü olarak hidrojen oluşur, hızlı emilmez ise balon oluşturduğu bildirilmektedir. Korozyona uğrayan kısmın yanındaki pH kayması tıbbi uygulamalar için endişe vericidir.

Mg alaşımlarında korozyondan korunma için iki genel yol vardır. Bunlardan biri mikroyapıyı iyileştirerek alaşım kompozisyonunu değiştirerek tane boyutunu modifiye ederek alaşımlamadır (Hornberger vd., 2012; Makar vd., 1993).

Diğer genel yöntemler ise yüzey işlemleri, koruyucu seramik, polimer, kompozit kaplamalar, diğer bazı kaplama yöntemleridir (Gray ve Luan, 2002; Hornberger vd., 2012).

2. METODOLOJİ

Bu bölümde Mg alaşımlarında kullanılan kaplama yöntemlerini ve bu konuda yapılan son çalışmaları ve yeni yaklaşımları ele alınmıştır.

Bölümde ilk etapta Mg metalinin yakın tarihteki öneminden bahsedilmiş ve önemli özelliklerine ve piyasadaki yerine atıfta bulunulmuştur. Ardından Mg alaşımlarının en zayıf özelliği olan korozyon direncinin geliştirilmesi, ve daha uygun kullanım imkanı sunması için kullanılan kaplama yöntemlerinden bahsedilmiş ve yeni yaklaşımlar incelenmiştir.

Korozyon özellikleri optimum seviyeye çıkan bir Mg alaşımı, hafiflik ve dayanım özellikleriyle birlikte mükemmel bir kombinasyona ulaşacaktır. Kullanım alanı çok daha artacak hafif metelik malzemeler alanında bir çok sorunu çözecektir. Ayrıca, biyouyumlu Metal Mg implant imalatına umut vadeden bir malzeme olması beklenmektedir. Bunların ötesinde elektrikli araç ve batarya teknolojilerinde Mg önemli rol alarak son derece ileri

teknolojik ekipmanlarda kullanımının artması onu korozyondan daha iyi koruma ihtiyacını doğurmaktadır.

Bölümde kaplamaların önemi ve kaplamalar hakkındaki son gelişmelerin araştırılması, farkındalığın arttırılması, bilimsel literatüre, endüstriyel araştırmalara, katkı sunulması hedeflenmiştir. Mg alaşımlarındaki kaplama üzerine yapılan tüm çalışmalara faydalı etki sunacaktır.

2.1. Magnezyum Alaşımlarında Kaplama Yöntemleri

Mg alaşımlarında korozyon önlemenin bir yolu da alaşımların kaplanmasıdır. Genel olarak kaplamalar iki sınıfa ayrılır. Dönüşüm kaplamaları ve biriktirilmiş kaplamalar olarak ikiye ayırabiliriz. İnorganik, organik kaplama iki ana gurubu oluşturur. Bu iki malzemeyi kullanılarak yapılan kaplamalara hibrit kaplamalar denmektedir.

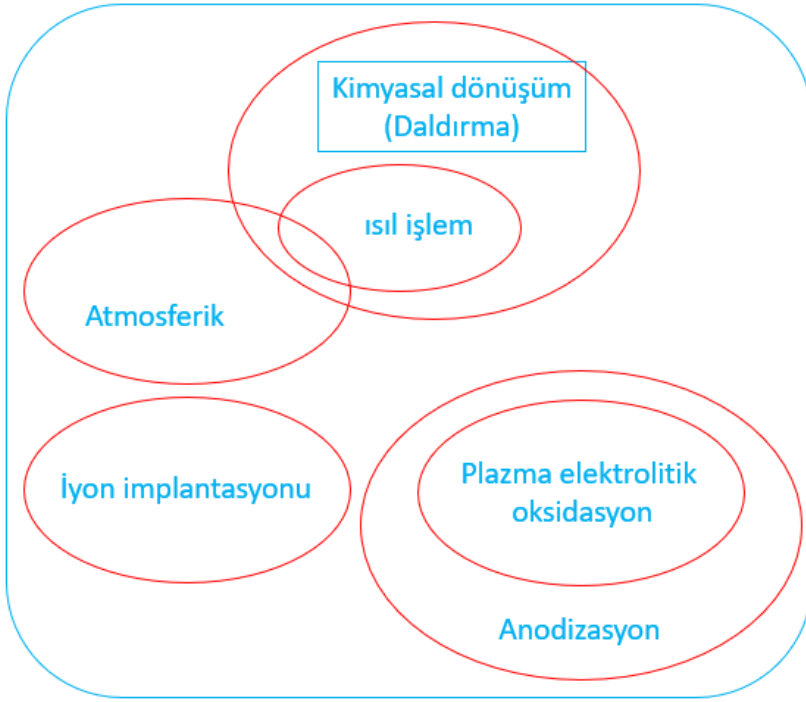
2.2. Dönüşüm Kaplamaları

Dönüşüm kaplamaları ana malzeme ile çevre arasında bir reaksiyon sonucunda yerinde büyüyen kaplama yöntemidir. Metalin yüzeyi kimyasal veya elektrokimyasal işlemler ile oluşan oksit tabakası hem içe hem dışa doğru büyür bileşenin geometrisi değişir. Üretilen katmanlar inorganiktir ve seramik benzeri yapıdadır.

Biriktirilmiş kaplamalar genelde organik kaplamalar olarak bilinir, örnek vernik verilebilir, uygulanmadan önce yüzey işlemi gerektirir (Hornberger vd., 2012). Şekil 1'de, Mg ve Mg alaşımlı alt tabakalar üzerinde dönüştürme kaplamaları geliştirmek için kullanılan teknikler gösterilmiştir (Hornberger vd., 2012).

Dönüşüm kaplamaları sulu çözeltilerde metal çözünmesi ve çökelpmenin etkileşiminden oluşur. Kimyasal dönüşüm katmanları alt tabakaların bir banyoya daldırılmasıyla oluşur.

Kimyasal dönüşüm katmanları, alt tabakaların bir banyoya daldırılmasıyla elde edilir ve magnezyum oksit ve magnezyum hidroksitin yanı sıra, diğer metal oksit ve hidroksit karışımları oluşur. Yerinde büyütülen dönüşüm kaplamalarında alt tabakaya yapışma iyi olur. Mg alaşımlarının korozyon direncini arttıran dönüşüm kaplamaları etkili bir işlemdir (Hornberger vd., 2012; Liu ve Gao, 2006)

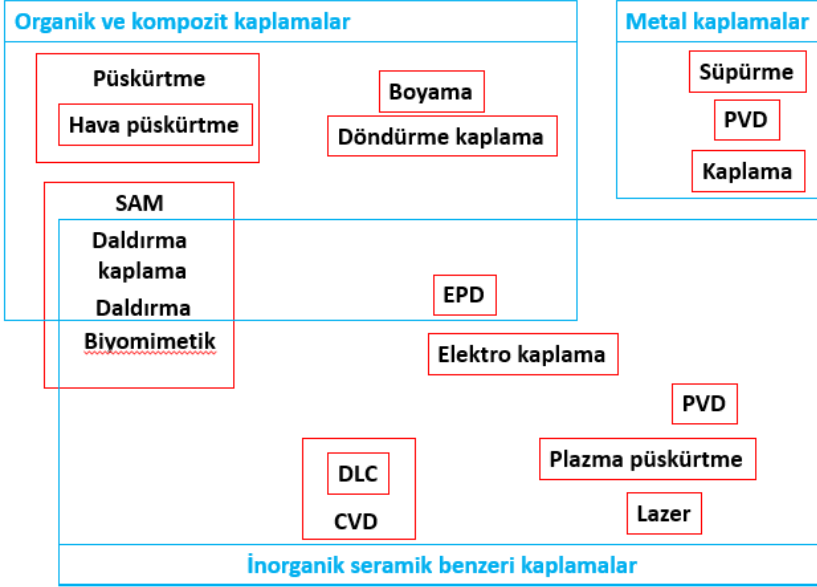


Şekil 1'de, Mg ve Mg alaşımlı alt tabakalar üzerinde dönüştürme kaplamaları geliştirmek için kullanılan teknikler (Hornberger vd., 2012).

2.3. Biriktirme Kaplamalar

Kaplamalar metal, inorganik ve organik bazlı kaplamalar olarak sınıflandırılabilir. Farklı uygulama yöntemleri Şekil 2'de genel bir bakışla gösterilmiştir (Hornberger vd., 2012).

Literatürdeki en güncel durumu yansıtan en önemli teknikler bu bölümde kapsamlı bir şekilde sunulmuş ve tartışılmıştır.



Şekil 2. Kaplamalar metal, inorganik ve organik bazlı kaplamaların farklı uygulama yöntemleri (Hornberger vd., 2012)

2.4. Son Yöntemler ve Yeni Yaklaşımlar

Payampur ve arkadaşları çalışmalarında Mg alaşımlarının implant edilebilir cihazlarda kullanılmalarının hızlı korozyonlarından dolayı zor olduğunu bildirmişlerdir. Mg alaşımlarının yüzeyini modifiye etmekte özellikle kitosan (CS) bazlı kaplamalar, bu sorunu gidermek için faydalı bir potansiyele sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca, biyopolimer olarak CS, Mg alaşımlarının korozyon oranını azalttığı gibi birde biyolojik performanslarını da artırdığı bildirilmiştir. Elektroforetik biriktirme (EPD), CS ve CS- kompozit kaplamaları Mg alaşımları üzerine mükemmel bir şekilde biriktirilmesini sağlayan kapsamlı bir tekniktir. (Payampur ve diğerleri, 2026).

Vasküler stentler yapımında örnek olarak nikel-titanyum alaşımları ve kemik rejenerasyonu için magnezyum (Mg) bazlı

alaşımlar verilebilir. Mg alaşımlarının insan kemiğinininkine çok yakındır ve stres kalkanı ve osteoporoz riskini en aza indiren mükemmel özelliğe sahiptir. Bununla birlikte, Mg vücutta doğal olarak bulunur ve kemik oluşumunda hayati bir rol oynayan bir elementtir (Badkoobeh vd., 2023; Daroonparvar vd., 2022; Khorashadizade vd., 2021; A. Motaharinia vd., 2024; Amir vd., 2025; Parai ve Bandyopadhyay-Ghosh, 2019).

Simchi ve arkadaşlarına göre, süspansiyonun pH'ı, sulu çözeltilerden CS birikiminin gerçekleşme hızını etkilediği hatta büyük bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. CS'nin sulu çözeltileri ve katyonik yapısı ile üstün film oluşturma özelliği, kompozit kaplamaların oluşturulması için EPD ile uyumludur (Simchi, vd., 2009). Ayrıca, Biyoaktif cam (BG) ve diğer inert parçacıklar gibi inorganik maddelerinin CS matrislerine eklenmesi kompozit kaplamaların yapışma mukavemetini geliştirir (Avcu vd., 2019).

Bu özel kaplamalar, pH değişimi, iyon konsantrasyonu, korozyon başlangıcı veya mekanik hasar gibi ortamdaki yerel değişikliklere dinamik olarak yanıt vermelidir. Örneğin, pH'a duyarlı bir sistemde, lokalize bozunma süreçleriyle ilişkili asidik bölgelerde biyolojik olarak aktif iyonların veya korozyon inhibitörlerinin salınımı, korozyon oranlarını azaltabilir ve doku onarımını artırabilir. Daha önce açıklandığı gibi, mikro/nanokonteyner içeren kendi kendini onaran kaplamalar, mikro çatlak oluşumunu geri kazandırabilir ve kolay bir şekilde mekanokimyasal bozunma döngüsünü kesintiye uğratabilir (Zhao vd., 2023). Bununla beraber sol-jel matrisleri, polimerler, biyolojik aktif seramikler içeren akıllı hibrit kaplamalar, doğal dokuda farklı iyileşme süreçlerinde uygun iyon salınım kinetiğini modüle ettiği rapor edilmiştir. Böyle önemli gelişmeler olmuş fakat, akıllı kaplamalar konusu daha tam oturmamıştır. Bu konuda in vivo araştırmalara ve mekanik yük analizleri

konularının daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Yang vd., 2024; Zhao vd., 2023).

Yapılan araştırmalar incelendiğinde mekanik stres ve döngüsel yük altında sıvı ortam test araştıran ve Mg alaşımlarında dönüştürme kaplama yöntemiyle uzun süreli performans araştıran araştırmalara daha çok ihtiyaç olduğu rapor edilmiştir. Mg alaşımları için standartlaşmış test protokolleri bulunmadığı ve bunun tekrarı sorgulanmasına yol açtığı bildirilmiştir. Kaplamaların çözünme, iyon salınımı, biyolojik yanıt gibi parametreleri aynı anda gerçekleşebileceği göz önünde bulundurulduğunda bu olayları analizi edebilecek fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak tüm mekanizmalar iyi anlaşılmalıdır. Bioaktif etkiyi arttırmak aynı zamanda korozyon koruması sağlamak için hibrit sistemlerin optimize edilmesi gelecek çalışmalar için zorlu süreçler devam etmektedir (Manescu vd., 2026).

3. SONUÇ

Bu bölümde Mg alaşımlarında kullanılan kaplama yöntemleri ve bu konuda yapılan son çalışmalar ve yeni yaklaşımlar ele alınmıştır.

1. Mg alaşımlarında biyolojik olarak uyumlu organik kaplamalar, Kitosan kaplamanın sonuçları. İnorganik kaplamalar, hibrit kaplamalar, konuları ele alınmıştır. Barındırdığı birçok mükemmel özelliğin yanında korozyon gibi bazı geliştirilmeye muhtaç özelliklere sahip Mg alaşımlarında kaplamalar ile önemli sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir.

2. Özellikle organik kaplamalardan kitosan Mg uyumu dikkat çekici sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Elektroforetik biriktirme yöntemiyle kitosanın Mg alaşımları üzerine mükemmel bir şekilde biriktirilmesini sağlayan kapsamlı bir

tekniktir. Mg kemik mekanik özelliklerine uyum sağlayan biyolojik olarak parçalanabilen bir biyo-malzemedir. Mg alaşımları için kitosan ile uyumlu kaplamalar yapılmaktadır, fakat organik, inorganik ve hibrit kaplamalar üzerinde daha etkin çalışmalar yapılmasına gerek vardır.

3. Organik kaplama malzemelerine inorganik kaplama malzemeleri eklenilerek yapılan hibrit modellerde de başarı sonuçlar görülmüştür. Fakat Mekanik döngüsel korozyon ortamında kaplamaların test edilmesi için önemli sürelerde testlere ihtiyaç vardır. Bu çalışma Mg alaşımlarının kaplamaları üzerinde çalışmalar yürütecek araştırmacılara, endüstrilere katkı sunacaktır.

KAYNAKÇA

- Alateyah, A. I., Aljohani, T. A., Alawad, M. O., Elkatatny, S. ve El-Garaihy, W. H. (2021). Improving the Corrosion Behavior of Biodegradable AM60 Alloy through Plasma Electrolytic Oxidation. *Metals*, 11(6), 953. doi:10.3390/met11060953
- Antoniac, I., Miculescu, F., Cotrut, C., Ficai, A., Rau, J. V., Grosu, E., ... Cristescu, I. (2020). Controlling the Degradation Rate of Biodegradable Mg–Zn–Mn Alloys for Orthopedic Applications by Electrophoretic Deposition of Hydroxyapatite Coating. *Materials*, 13(2), 263. doi:10.3390/ma13020263
- Avcu, E., Baştan, F. E., Abdullah, H. Z., Rehman, M. A. U., Avcu, Y. Y. ve Boccaccini, A. R. (2019). Electrophoretic deposition of chitosan-based composite coatings for biomedical applications: A review. *Progress in Materials Science*, 103, 69-108. doi:10.1016/j.pmatsci.2019.01.001
- Badkoobeh, F., Mostaan, H., Rafiei, M., Bakhsheshi-Rad, H. R., RamaKrishna, S. ve Chen, X. (2023). Additive manufacturing of biodegradable magnesium-based materials: Design strategies, properties, and biomedical applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 11(3), 801-839. doi:10.1016/j.jma.2022.12.001
- Cicek, B., Elen, L., Koc, E., Saud, A. N. ve Sun, Y. (2024). Investigation of Intermetallic Phase Fractions and Dry-corrosive Wear Properties in Mg–Al–Si Ternary Alloy. *International Journal of Metalcasting*, 18(1), 331-342. doi:10.1007/s40962-023-00992-0
- Comba, A., Cicek, B., Comba, B., Sancak, T., Arslan Akveran, G., Sun, Y., ... Torkamanian Afshar, M. (2022). Investigation of in-vitro biocompatibility and in-vivo

biodegradability of AM series Mg alloys. *Materials Technology*, 37(13), 2819-2831.
doi:10.1080/10667857.2022.2081115

Daroonparvar, M., Bakhsheshi-Rad, H. R., Saberi, A., Razzaghi, M., Kasar, A. K., Ramakrishna, S., ... Berto, F. (2022). Surface modification of magnesium alloys using thermal and solid-state cold spray processes: Challenges and latest progresses. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(8), 2025-2061. doi:10.1016/j.jma.2022.07.012

Di Mario, C., Griffiths, H., Goktekin, Ö., Peeters, N., Verbist, J., Bosiers, M., ... Erbel, R. (2004). Drug-Eluting Bioabsorbable Magnesium Stent. *Journal of Interventional Cardiology*, 17(6), 391-395. doi:10.1111/j.1540-8183.2004.04081.x

Elen, L., Cicek, B., Koc, E., Turen, Y., Sun, Y. ve Ahlatci, H. (2019). Effects of alloying element and cooling rate on properties of AM60 Mg alloy. *Materials Research Express*, 6(9), 096511. doi:10.1088/2053-1591/ab2b13

Elen, L. ve Çevik Elen, N. (2025). Effect of cooling rate on microstructure, mechanical and wear properties of Mg-2Zn and Mg-2Zn-1Mn alloys. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 64(1), 61-76. doi:10.1080/00084433.2024.2331372

Elen, L., Elen, N. Ç. ve Djebari, K. (2026). Effect of Cooling Rate on Microstructure and Corrosion Properties of Mg-2Zn and Mg-2Zn-1Mn Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*. doi:10.1007/s11665-026-13654-z

Elen, L., Turen, Y., Ahlatci, H., Sun, Y. ve Unal, M. (2022). Investigation of Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of Biodegradable Mg-Ag Alloys.

Archives of Metallurgy and Materials, 67(3), 889-900.
doi:10.24425/amm.2022.139680

- Elen, L., Turen, Y., Ahlatci, H., Unal, M. ve Ergin, D. (2022). Microstructural, mechanical, and in vitro corrosion properties of biodegradable Mg-Ag alloys. *Biointerphases*, 17(4), 041001. doi:10.1116/6.0001858
- Gören, Halil Ahmet. (2021). *The Effect of The Elements Added to Magnesium Alloy on The Mechanical and Corrosion Properties After Rolling*. (Ph.D.Thesis). <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp> adresinden erişildi.
- Gören, Halil Ahmet. (2026). Corrosion and Under-Load Wear Behaviors of Mg-Al-Mn Alloys in a NaCl Environment. *Metals*, 16(5), 540. doi:10.3390/met16050540
- Gören, Halil Ahmet ve Ünal, M. (2025). NTE katkılı Mg-2Zn Alaşımının Yük Altında Aşınma Davranışı ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 549-561. doi:10.33484/sinopfbid.1700424
- Gören, Halil Ahmet, Ünal, M., Turen, Y. ve Ahlatçı, H. (2021). ZM21 Magnezyum Alaşımına Lantan ve Kalsiyum İlavesinin Mikroyapı, Mekanik ve Hadde Özelliklerine Etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1024-1031. doi:10.35193/bseufbid.1003822
- Gören, Halil Ahmet, Ünal, M., Turen, Y., Ahlatçı, H. ve Sun, Y. (2022). A Comparative Study on the Mechanical and Corrosion Properties of the ZM20 and ZM21 Alloys After Casting and Rolling. *Archives of Metallurgy and Materials*, 67(4), 1387-1394. doi:10.24425/amm.2022.141066

- Gören, H.A., Ünal, M. ve Koç, E. (2019). A comparative study on microstructure properties of AZ91 magnesium alloy with silicon addition using ceramic mold. *Acta Physica Polonica A*, 135(5). doi:10.12693/APhysPolA.135.884
- Gray, J. E. ve Luan, B. (2002a). Protective coatings on magnesium and its alloys — a critical review. *Journal of Alloys and Compounds*, 336(1-2), 88-113. doi:10.1016/S0925-8388(01)01899-0
- Hornberger, H., Virtanen, S. ve Boccaccini, A. R. (2012). Biomedical coatings on magnesium alloys – A review. *Acta Biomaterialia*, 8(7), 2442-2455. doi:10.1016/j.actbio.2012.04.012
- Khorashadizade, F., Abazari, S., Rajabi, M., Bakhsheshi-Rad, H. R., Ismail, A. F., Sharif, S., ... Berto, F. (2021). Overview of magnesium-ceramic composites: mechanical, corrosion and biological properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 6034-6066. doi:10.1016/j.jmrt.2021.10.141
- Koc, E., Ünal, M., Türen, Y., Gören, H. A. ve Candan, E. (2018). Effect of Lead Additions on Microstructure and Casting Properties of AZ91 Magnesium Alloy. *International Journal of Materials Science and Applications*, 7(1), 13. doi:10.11648/j.ijmsa.20180701.13
- Koç, E. ve Turan, M. E. (2019). Effect of Zn content and heat treatment on tribological behavior of biodegradable Mg-xZn alloys in simulated body fluid. *Materials Research Express*, 6(8), 0865b5. doi:10.1088/2053-1591/ab1955
- Li, H., Wang, P., Lin, G. ve Huang, J. (2021). The role of rare earth elements in biodegradable metals: A review. *Acta Biomaterialia*, 129, 33-42. doi:10.1016/j.actbio.2021.05.014

- Liu, Z. ve Gao, W. (2006). Electroless nickel plating on AZ91 Mg alloy substrate. *Surface and Coatings Technology*, 200(16-17), 5087-5093. doi:10.1016/j.surfcoat.2005.05.023
- Makar, G. L. ve Kruger, J. (1993). Corrosion of magnesium. *International Materials Reviews*, 38(3), 138-153. doi:10.1179/imr.1993.38.3.138
- Manescu (Paltanea), V., Antoniac, A., Rau, J. V., Plakhotnaia, O. N., Fosca, M., Paltanea, G., ... Antoniac, I. (2026). Current Options and Future Perspectives for Conversion Coatings on Biodegradable Magnesium Alloys to Control the Biodegradation Rate and Biological Features. *Biomimetics*, 11(4), 265. doi:10.3390/biomimetics11040265
- Motaharinia, A., Drelich, J. W., Goldman, J., Bakhsheshi-Rad, H. R., Sharif, S., Ismail, A. F. ve Razzaghi, M. (2024). Current status and recent advances in magnesium-matrix syntactic foams: Preparation, mechanical properties, and corrosion behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 8316-8344. doi:10.1016/j.jmrt.2024.05.191
- Motaharinia, Amir, Drelich, J. W., Sharif, S., Ismail, A. F., Naeimi, F., Glover, A., ... Bakhsheshi-Rad, H. R. (2025). Overview of porous magnesium-based scaffolds: development, properties and biomedical applications. *Materials Futures*, 4(1), 012401. doi:10.1088/2752-5724/ad9493
- Özdemir, Ü., Koç, E., Türen, Y., Elen, L., Çiçek, B. ve Saud, A. N. (2023). Effect of Rolling Deformation on Microstructure and Mechanical Properties of As-Cast and Rolled ZM21 Magnesium Alloy. *Journal of Materials*

Engineering and Performance, 32(11), 5043-5051.
doi:10.1007/s11665-022-07468-y

Parai, R. ve Bandyopadhyay-Ghosh, S. (2019). Engineered bio-nanocomposite magnesium scaffold for bone tissue regeneration. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 96, 45-52.
doi:10.1016/j.jmbbm.2019.04.019

Payampur, M. H., Azimi, D., Milligan, W. W., Razzaghi, M., Bakhsheshi-Rad, H. R. ve Drelich, J. W. (2026). Electrophoretic deposition of chitosan-based coatings on magnesium alloys for implant applications: a review. *Emergent Materials*, 9(4), 100. doi:10.1007/s42247-026-01331-9

Simchi, A., Pishbin, F. ve Boccaccini, A. R. (2009). Electrophoretic deposition of chitosan. *Materials Letters*, 63(26), 2253-2256. doi:10.1016/j.matlet.2009.07.046

Ünal, M. ve Gören, H. A. (2024). The effects of Nd, La, and Ca addition on the corrosion properties of as-cast and as-rolled ZM21 Mg alloys. *Metallurgical Research & Technology*, 121(2), 207. doi:10.1051/metal/2024004

Willbold, E., Gu, X., Albert, D., Kalla, K., Bobe, K., Brauneis, M., ... Witte, F. (2015). Effect of the addition of low rare earth elements (lanthanum, neodymium, cerium) on the biodegradation and biocompatibility of magnesium. *Acta Biomaterialia*, 11, 554-562.
doi:10.1016/j.actbio.2014.09.041

Witte, F., Hort, N., Vogt, C., Cohen, S., Kainer, K. U., Willumeit, R. ve Feyerabend, F. (2008). Degradable biomaterials based on magnesium corrosion. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 12(5-6), 63-72.
doi:10.1016/j.cossms.2009.04.001

- Yang, Y., Zha, M., Wang, D., Wang, T., Wang, Y., Wang, C., ... Wang, H. (2024). Responsive Protection of Magnesium Alloys From Multicorrosive Media by Constructing Nanofluidic Channels in Self-Repairing Coatings. *Advanced Materials*, 36(45). doi:10.1002/adma.202409877
- Zeng, R., Dietzel, W., Witte, F., Hort, N. ve Blawert, C. (2008). Progress and Challenge for Magnesium Alloys as Biomaterials. *Advanced Engineering Materials*, 10(8). doi:10.1002/adem.200800035
- Zhao, Y., Bai, J., Xue, F., Zeng, R., Wang, G., Chu, P. K. ve Chu, C. (2023). Smart self-healing coatings on biomedical magnesium alloys: A review. *Smart Materials in Manufacturing*, 1, 100022. doi:10.1016/j.smmf.2023.100022

SIRLI PORSELEN KAROLARDA KÖŞE EĞRİLİĞİ KONTROLÜNDE ANGOP KOMPOZİSYONUNUN ROLÜ: DİOPSİTLİ FRİT YAKLAŞIMI

Müge TARHAN¹

1. GİRİŞ

Porselen karolar; düşük su emme, yüksek mekanik dayanım, kimyasal maddelere karşı direnç ve boyutsal kararlılık gibi üstün özellikleri nedeniyle zemin ve duvar kaplamalarında yaygın olarak kullanılan ileri seramik malzemelerdir. Hızlı pişirim koşullarında sıvı faz sinterleşmesi, porselen karoların yoğunlaşmasında temel mekanizmalardan biri olmakta ve pişirim sırasında gerçekleşen faz dönüşümleri nihai ürünün fiziksel, mekanik ve boyutsal özelliklerini belirlemektedir (Zanelli vd., 2011; Martín-Márquez vd., 2008, Martín-Márquez vd., 2009, Martín-Márquez vd., 2010a).

Porselen karo bünyeleri genel olarak kil mineralleri, feldispatik ergiticiler ve kuvars içeren üçlü bir hammadde sistemi üzerine kuruludur. Pişirim sırasında kil mineralleri ayrışarak mullit oluşumuna katkıda bulunurken, feldispatik bileşenler alkali ve alkali toprak elementler açısından zengin sıvı fazın oluşmasını sağlamaktadır. Kuvars ise yüksek sıcaklıklarda nispeten refrakter davranış gösteren ve bünyenin mikroyapısında artık kristalin faz olarak bulunan temel bileşenlerden biridir (Martín-Márquez vd., 2009; Carty & Senapati, 1998; Carbajal vd., 2007). Bünyede

¹ Doçent Doktor, Uşak Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Seramik Bölümü, ORCID: 0000-0001-6985-3085.

oluşan camsı fazın miktarı, kimyasal bileşimi ve gelişimi, porselen karoların sinterleşme davranışının ve nihai boyutsal özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bünye kompozisyonunda veya pişirim koşullarında meydana gelen nispeten küçük değişiklikler dahi camsı fazın viskozitesini ve buna bağlı olarak karonun pişirim sırasındaki deformasyon eğilimini değiştirebilmektedir (Zanelli vd., 2011; Martín-Márquez vd., 2010b). Pişirim sırasında oluşan kristalin fazların gelişimi de porselen karoların nihai özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle mullit oluşumu ve kuvarsın davranışı, pişirim rejimi ve sıcaklığı ile yakından ilişkilidir (Carty & Senapati, 1998; Amoros vd., 2007).

Pişirim sırasında meydana gelen boyutsal deformasyonlar, yüksek derecede vitrifiye olan seramik karoların üretiminde karşılaşılan önemli teknolojik problemlerden biridir. Özellikle piroplastik deformasyon, pişirim sırasında oluşan sıvı fazın viskozitesinin yeterince düşmesi ve bünyenin yüksek sıcaklıkta mekanik rijitliğinin azalması sonucunda, yerçekimi veya diğer mekanik etkiler altında şekil değişiminin meydana gelmesi olarak tanımlanmaktadır (Bernardin vd., 2006; Dos Santos Conserva vd., 2017; Sánchez vd., 2019; Frizzo vd., 2020). Piroplastik davranış yalnızca oluşan toplam sıvı faz miktarıyla değil; sıvı fazın kimyasal bileşimi, viskozitesi, bünyedeki kristalin faz miktarı, tane boyutu dağılımı ve mikroyapısal homojenliği ile de ilişkilidir (Bernardin vd., 2006; Dos Santos Conserva vd., 2017; Sánchez vd., 2019; Frizzo vd., 2020).

Özellikle büyük ebatlı ve ince kesitli seramik karoların yaygınlaşmasıyla birlikte geometrik doğruluk ve düzlemsellik daha kritik kalite parametreleri haline gelmiştir. Karo boyutlarının büyümesi, küçük miktardaki boyutsal sapmaların dahi nihai üründe belirgin hale gelmesine ve döşeme sırasında problemlere neden olmasına yol açabilmektedir. Yapılan çalışmalar, seramik karoların boyutsal kararlılığının tek bir

üretim parametresi tarafından belirlenmediğini; kompozisyon, mikroyapı ve ısı geçişi arasındaki etkileşimin bir sonucu olduğunu göstermektedir (Amoros vd., 2007; Rambaldi vd., 2007; Sánchez vd., 2019; Elias vd., 2024).

Sırlı porselen karolarda ise düzlemsellik ve boyutsal kararlılık problemi daha karmaşık bir hale gelmektedir. Bunun temel nedeni, nihai ürünün tek fazlı ve homojen bir seramik malzeme olmaktan ziyade, genel olarak bünye–angop–sır şeklinde birbirinden farklı özelliklere sahip katmanlardan oluşan çok tabakalı bir sistem olmasıdır. Angop, bünye ile sır arasında yer alan ara tabaka olup bünye renginin maskelenmesi, yüzeyin opaklığının ve renginin düzenlenmesi, bünye ile sır arasındaki fiziksel ve kimyasal farklılıkların azaltılması, sır uyumunun geliştirilmesi ve nihai yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gibi çeşitli işlevleri yerine getirmektedir (Elias vd., 2024; Rambaldi vd., 2007; Dal Bó vd., 2014). Her ne kadar angop tabakasının kalınlığı seramik bünyeye kıyasla oldukça düşük olsa da bu tabakanın pişirim ve soğutma sırasındaki termal ve mekanik davranışı, çok tabakalı sistemin genel davranışını etkileyebilmektedir.

Seramik angoplarının formülasyonlarında genel olarak kil mineralleri, kuvars, feldispatik hammaddeler ve seramik fritler kullanılmaktadır. Bu bileşenler arasında fritler özel bir öneme sahiptir. Çünkü fritler pişirim sırasında yumuşamakta, viskoz akış göstermekte ve bazı formülasyonlarda kristalleşmeye uğramaktadır. Dolayısıyla fritin kimyasal bileşimi yalnızca angobun erime ve yumuşama davranışını değil, aynı zamanda pişirim sonrasında oluşan kristalin fazları, camsı fazın özelliklerini, mikroyapıyı, termal genleşme katsayısını ve bünye ve sır ile olan uyumu da etkileyebilmektedir (Dal Bó vd., 2014; Montedo vd., 2015; Becker vd., 2017; Tarhan ve Tarhan 2020). Dal Bó ve ark. (2014), angop kompozisyonunda yapılan değişikliklerin lineer küçülme, su emme, beyazlık ve termal

genleşme katsayısı gibi çeşitli özellikleri önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Ayrıca farklı hammaddelerin pişirim sırasında birbirleriyle etkileşiminin, nihai angop özelliklerinin belirlenmesinde önemli olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçlar, angobun yalnızca optik özellikler açısından değerlendirilecek bir yüzey tabakası olmadığını; termal ve boyutsal davranışının da bünye ile uyum açısından dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Çok tabakalı seramik sistemlerde özellikle önemli olan parametrelerden biri termal genleşme uyumudur. Bünye, angop ve sırnın termal genleşme katsayılarının birbirinden farklı olması durumunda, pişirim sıcaklığından soğuma sırasında tabakalar arasında farklı oranlarda termal büzülme meydana gelmektedir. Komşu tabakaların birbirlerinin serbest büzülmesini kısıtlaması sonucunda sistem içerisinde artık gerilmeler oluşabilmektedir. Bu gerilmelerin büyüklüğü ve işareti; bileşenlerin termal genleşme katsayılarının yanı sıra elastik özellikleri, tabaka kalınlıkları ve sıcaklığa bağlı davranışları tarafından belirlenmektedir (Montedo vd., 2015; Becker vd., 2017; Tarhan ve Tarhan 2020, Mariot vd., 2025)). Dolayısıyla angobun ısı genleşme davranışının kontrol edilmesi, sırlı seramik karolarda oluşan gerilme durumunun değiştirilmesine yönelik önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Isıl genleşme uyumsuzluğunun seramik sistemlerin davranışı üzerindeki etkisi özellikle sır-bünye sistemlerinde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Carbajal ve ark. (2007), porselen seramiklerde kuvars taneleri ile camsı matris arasındaki termal genleşme farklılığının, camsı faz içerisinde iç gerilmelerin oluşmasına neden olduğunu ve bu gerilmelerin malzemenin mekanik davranışını etkilediğini göstermiştir. Benzer bir mekanizma, çok tabakalı seramik sistemlerde de geçerlidir. Bünye ve yüzey kaplamalarının farklı termal genleşme davranışlarına sahip olması, soğuma sırasında artık gerilmelerin gelişmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle angobun ısı

genleşme katsayısının kontrol edilmesi, sırlı seramik karoların termal gerilme ve boyutsal kararlılığının düzenlenmesinde önemli bir araç olabilir.

Angop içerisinde kullanılan fritin kimyasal bileşiminin değiştirilmesi, bu açıdan angobun termal davranışının kontrol edilmesi için etkili bir yöntem sunmaktadır. Özellikle CaO ve MgO içeren sistemlerde pişirim sırasında diopsit ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) ve anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) gibi kristalin fazların oluşması mümkün olmaktadır. Bu fazların oluşumu, geriye kalan camsı fazın miktarını ve kimyasal bileşimini değiştirerek angobun termal genleşme ve reolojik özelliklerini etkileyebilmektedir (Romero vd., 2002; Torres & Alarcon, 2005; Suvaci & Yıldız, 2017). Bu nedenle frit kompozisyonunda yapılacak kontrollü değişikliklerle angobun pişirim sırasındaki faz gelişimi ve termal davranışının düzenlenmesi mümkün olabilir.

Diopsit, CaO–MgO–SiO₂ sisteminde bulunan kararlı bir piroksen fazıdır ve düşük termal genleşme, yüksek sıcaklık kararlılığı ve uygun mekanik özellikleri nedeniyle seramik ve cam-seramik sistemlerde önemli bir kristalin faz olarak değerlendirilmektedir. Diopsit içeren fritler ve cam-seramik sistemler, ısıtım işlem sırasında belirgin kristalleşme davranışı gösterebilmektedir. Torres ve Alarcon (2005), yer karolarında kullanılmak üzere geliştirilen piroksen esaslı cam-seramik kaplamaları incelemiş ve ısıtım işlem sonrasında piroksen esaslı kristalin fazların oluştuğunu XRD ve SEM analizleri ile göstermiştir. Suvaci ve Yıldız (2017) ise endüstriyel hızlı pişirim koşullarında diopsit esaslı cam-seramik sırların kristalleşme ve mikroyapı gelişimi üzerinde CaO, MgO ve SiO₂ bileşenlerinin etkisini araştırmıştır. Çalışmada CaO/MgO/SiO₂ dengesinin kristalleşme sıcaklığı, kristal morfolojisi ve yoğunlaşma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. MgO miktarındaki artışın daha ince ve iğnemsiz diopsit kristallerinin oluşumunu desteklediği, CaO miktarındaki artışın ise daha kaba

kristal morfolojilerine yol açabildiği bildirilmiştir. Bu sonuçlar, CaO–MgO–SiO₂ sistemindeki bileşim değişikliklerinin frit esaslı seramik kaplamaların kristalleşme davranışını ve nihai mikroyapısını önemli ölçüde değiştirebileceğini göstermektedir.

Diopsit ve anortit gibi kristalin fazların oluşumu, yalnızca CaO ve MgO miktarlarıyla değil, sistemin genel kimyasal bileşimiyle de ilişkilidir. Diopsit ve anortit içeren seramik sır sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda, fritin kimyasal bileşiminin farklı kristalin fazların oluşumunu belirlediği ve özellikle SiO₂/Al₂O₃ oranı ile B₂O₃ içeriğindeki değişikliklerin diopsit ve anortit oluşumunun birbirine göre baskınlığını değiştirebildiği gösterilmiştir (Karamanov & Pelino, 2008; Gajek vd., 2022; Tulyaganov vd., 2023). Bu durum, angop formülasyonunda kullanılan fritin kimyasal bileşiminin değiştirilmesinin, pişirim sonrasında oluşan kristalin fazların yanı sıra artık camsı fazın bileşimini de değiştirebileceğini göstermektedir.

Frit içerisinde kontrollü kristal faz oluşumunun sağlanması, bu nedenle angobun termal ve mikroyapısal özelliklerinin tasarlanması açısından değerlendirilebilecek bir kompozisyonel yaklaşımdır. Burada yalnızca frit miktarının değiştirilmesinden ziyade, bir frit türünün farklı kimyasal özelliklere sahip başka bir frit ile kısmen değiştirilmesi daha kapsamlı bir etki yaratmaktadır. Böyle bir değişiklik, angobun toplam oksit bileşimini, yüksek sıcaklıktaki yumuşama davranışını, sıvı faz oluşumunu, kristalleşme kinetiğini, artık camsı fazın bileşimini ve termal genleşme davranışını birlikte değiştirebilmektedir. Bu nedenle frit kimyası, faz gelişimi ve termal genleşme arasındaki ilişkinin sistematik olarak incelenmesi, angobun bünnye ile termal uyumunun anlaşılması açısından önem taşımaktadır.

Seramik angopları üzerine yapılan önceki çalışmaların önemli bir bölümünde yüzey özellikleri, geçirgenlik, beyazlık, opaklık, su lekesi davranışı, sürdürülebilirlik ve farklı fritlerin kullanımı gibi konular ele alınmıştır (Montedo vd., 2015; Becker vd. 2017; Tarhan & Tarhan 2020; Mariot vd., 2025). Örneğin Tarhan ve Tarhan (2020), seramik duvar karolarında su geçirmez angop tabakasının geliştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, frit türü ve angop özelliklerinin pişirim sonrasında oluşan mikroyapı ve işlevsel özellikler üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Becker ve ark. (2017) ise seramik karo angoplarında kullanılan hammaddelerin değiştirilmesinin ardından oluşan kristalin fazları XRD ve SEM yöntemleriyle incelemiş; kuvars, zirkonyum silikat ve anortit gibi fazların angobun nihai mikroyapısında bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, angop kompozisyonunun pişirim sırasında meydana gelen faz gelişimi ve mikroyapı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, porselen karoların sinterleşmesi, piropplastik deformasyonu, sır–bünye uyumu ve angop formülasyonu üzerine önemli miktarda literatür bulunmasına rağmen, angop frit kimyası, angobun ısıl genişleme davranışı, faz gelişimi ve sırlı porselen karolarda köşe eğriliği arasındaki ilişkinin henüz yeterince açıklığa kavuşturulmadığı görülmektedir.

Köşe eğriliği, özellikle büyük ebatlı zemin karolarında önemli bir düzlemsellik problemi olup, karoların döşenmesi sırasında kenar ve köşelerin aynı düzlemde bulunmamasına ve buna bağlı olarak görsel ve fonksiyonel problemlere neden olabilmektedir. Bu tür deformasyonlar yalnızca seramik bünye içerisindeki pişme küçülmesi veya piropplastik deformasyon ile açıklanamayabilir. Sırlı çok tabakalı bir sistemde bünye deformasyonu, yüksek sıcaklıkta viskoz akış, bünye–angop–sır arasındaki termal genişleme farklılıkları ve soğuma sırasında

oluşan artık gerilmelerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla köşe eğriliği probleminin çözümünde yalnızca bünye kompozisyonunun veya fırın pişirim koşullarının değiştirilmesine dayalı yaklaşımlar her zaman yeterli olmayabilir. Angop tabakasının ısı davranışının bünye ile uyumlu hale getirilmesi, çok tabakalı sistemde oluşan gerilme durumunun kontrol edilmesi ve dolayısıyla nihai ürünün geometrik kararlılığının iyileştirilmesi açısından alternatif bir yaklaşım sunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, sırlı porselen karolarda gözlenen köşe eğriliği probleminin azaltılmasında angop kompozisyonunun ve özellikle angobun ısı davranışının rolü araştırılmıştır. Bu doğrultuda çalışmanın temel amacı, diopsit içeren frit kullanımının angobun faz gelişimi ve ısı davranışı üzerindeki etkisini belirlemek ve bu değişimin bünye–angop uyumu ile nihai karonun geometrik kararlılığına yansımaları ortaya koymaktır. Böylece köşe eğriliği probleminin yalnızca bir üretim prosesi kusuru olarak değil, bünye–angop–sır sistemindeki kompozisyon, faz gelişimi ve ısı genleşme uyumunun bir sonucu olarak değerlendirilmesi hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada kullanılan standart ve modifiye edilmiş angop kompozisyonları Tablo 1'de verilmiştir. STD kompozisyon, mevcut endüstriyel angop reçetesini temsil etmektedir. Modifiye edilen D1, D2 ve D3 kompozisyonlarında ise standart reçetede bulunan opak frit sırasıyla %5, %10 ve %15 oranlarında diopsitli frit ile yer değiştirilmiştir. Fritlere ait kimysala analizler Tablo 2'de verilmiştir. Bu değişiklik sırasında diğer hammaddelerin miktarları sabit tutulmuştur. Böylece deneysel tasarımda temel değişken yalnızca opak frit/diopsitli frit oranı olarak belirlenmiş ve bu yaklaşım ile diopsitli frit miktarının artışına bağlı olarak

angobun ısı genleşme davranışında, pişirim sırasında meydana gelen faz gelişiminde ve nihai mikroyapısında meydana gelebilecek değişikliklerin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan angop kompozisyonları (ağırlıkça, %)

Hammaddeler	STD	D1	D2	D3
Opak Frit	30	25	20	15
Diopsitli Frit	-	5	10	15
Kil	15	15	15	15
Kuvars	29	29	29	29
Zirkon	10	10	10	10
Kaolen	12	12	12	12
WG 41	4	4	4	4

Tablo 2. Fritlerin kimyasal analizleri

Hammaddeler	A.Z	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO	B ₂ O ₃	ZrO ₂
Opak Frit	0,12	62,8	8,21	0,07	0,13	10,2	0,2	4,95	0,1	-	5,32	7,9
Diopsitli Frit	0,22	53,6	1,5	0,08	0,1	18,7	11,5	0,1	0,2	2,8	3,9	7,3

Geliştirilen angop kompozisyonları Tablo 1’de verilen hammadde oranlarında, %0,07 CMC ve %0,25 STPP elektrolit ilavesi ile katı madde miktarı %70 olacak şekilde, alümina bilyeli sır değirmenlerine yüklenmiş ve 45 µ üzere elek bakiye değeri % 0,5-1,0 aralığında olacak şekilde yaklaşık 22 dk. öğütmeye tabi tutulmuştur. Hazırlanan angoplar ham sırlı porselen karosuna ragle ile uygulanmış ve angoplu karolar 1195°C 43 dk. süre ile endüstriyel pişirim koşullarında pişirilmiştir.

Angopların pişme küçülme değerleri TS-EN ISO 10545-2, su emme ölçümleri TS-EN ISO 10545-3 Standardına göre yapılmıştır. Isıl davranışları ve ısı genleşme katsayıları Netzsch DIL 402 dilatometre cihazı ile, renk ölçümü (L*, a*, b* renk değerleri) Minolta Konica model renk ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Karo üzerine uygulanan angoplar pişirildikten sonra yapıda oluşan kristal fazların analizinde X-ışınları kırınımı (XRD) yöntemi kullanılmıştır. XRD ölçümleri Rigaku MiniFlex X-ışını kırınımı ile $2\theta = 10^{\circ}-70^{\circ}$ aralığında

2°/dk tarama hızında 40 kV ve 30 mA'da monokromatik Cu-K α radyasyonu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim denemesi yapılan karoların köşe eğriliği ölçümleri pulkometre ile ölçülmüştür. Mikroyapı analizi için karolar kesit yüzeylerinden parlatılmıştır. Bütün numuneler yüzey iletkenliği sağlamak altın-paladyum kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin mikroyapı analizleri Phenom Prox marka taramalı elektron mikroskopunda (SEM) gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada yürütülen tüm test, analiz ve karakterizasyon değerlendirmeleri doğrultusunda seçilen D3 angobu ve STD angop için 60x60 cm ebadında üretim denemesi alınarak yine 1195°C 43 dk. süre ile endüstriyel pişirim koşullarında pişirilmiştir. Deneme karoların pulkometre ile deformasyon ölçüleri yapılmış ve köşe eğriliği değerleri belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

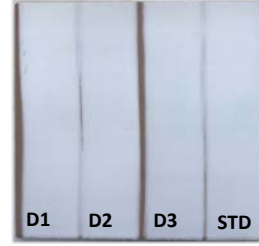
Proselen karo üzerine uygulaması yapılan angopların yüzey görünümleri Şekil 1'de, angoplara ait fiziksel test sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Angop kompozisyonunda diopsitli frit miktarının artırılmasıyla pişme küçülmesinin düzenli olarak arttığı görülmektedir. Bu sonuç, opak fritin diopsitli frit ile ikame edilmesinin angobun pişirim sırasında meydana gelen boyutsal değişimini belirgin şekilde etkilediğini göstermektedir. Özellikle değişimin STD'den D3'e kadar kademeli ve sürekli olması, gözlenen davranışın kompozisyondaki diopsitli frit miktarıyla ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Diopsitli frit miktarının artmasıyla birlikte angobun daha fazla küçülme göstermesi, pişirim sırasında gerçekleşen yoğunlaşma ve/veya sıvı faz oluşum davranışında bir değişiklik meydana geldiğine işaret etmektedir. Pişme küçülmesindeki bu artış, XRD sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde daha anlamlı hale gelmektedir. Angopların faz analizi sonuçlarında diopsitli frit miktarının artmasına bağlı

olarak diopsit fazının gelişiminin belirginleşmesi, frit bileşimindeki değişimin yalnızca camsı faz miktarını veya kimyasal bileşimini değil, aynı zamanda pişirim sonrasında oluşan kristalin faz yapısını da değiştirdiğini göstermektedir. Dolayısıyla gözlenen pişme küçülmesindeki artışın, fritin pişirim sırasında yumuşama, sıvı faz oluşumu, yoğunlaşma ve kristalleşme davranışındaki değişimlerle ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Angopların su emme değerleri incelendiğinde, tüm kompozisyonların oldukça düşük su emme değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, tüm kompozisyonların pişirim sırasında yüksek derecede yoğunlaşmış ve düşük açık gözenekliliğe sahip bir yapı geliştirdiğini göstermektedir.

Tablo 3. Angop kompozisyonlarına ait fiziksel test sonuçları

Reçete Kodları	Std	D1	D2	D3
Pişme Küçülmesi (%)	6,80	7,15	7,75	8,15
L*	82,79	83,27	83,63	83,32
Renk değerleri a	-0,11	-0,20	-0,18	-0,06
b	0,62	0,69	0,79	0,56
Su Emme (%)	0,09	0,04	0,00	0,02
Isıl Genleşme Katsayısı 400°C (K ⁻¹)	71,28	73,65	74,22	75,19



Şekil 1. Uygulama yapılan standart ve deneme angopların yüzey görünüşleri

Pişme küçülmesi ve su emme sonuçları birlikte ele alındığında, diopsitli frit miktarı arttıkça pişme küçülmesi sürekli olarak artarken, su emme değerleri genel olarak azalmaktadır. Başka bir ifadeyle, daha yüksek pişme küçülmesi ile daha düşük açık gözeneklilik arasında bir ilişki bulunmaktadır. Bu durum, diopsitli frit ikamesinin angobun pişirim sırasında daha fazla yoğunlaşmasına katkıda bulunmuş olabileceğini göstermektedir.

Diopsitli frit ikamesinin angopların renk özellikleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, L^* değerlerinin standart kompozisyona kıyasla genel olarak daha yüksek seviyede kaldığı görülmektedir. Angop sistemlerinde beyazlık ve açıklık; zirkonun dağılımı, camsı fazın özellikleri, kristalin faz miktarı ve mikroyapısal özellikler gibi birçok faktörün ortak etkisiyle belirlenmektedir. Diopsitli frit miktarındaki artışla birlikte angopların L^* değerlerinde gözlenen genel artış, pişirim sırasında gelişen diopsit kristallerinin ışığın yapı içerisindeki saçılmasını artırmasıyla ilişkilendirilebilir. Diopsit kristallerinin camsı faza göre farklı ve nispeten yüksek kırılma indisine sahip olması, kristal–cam fazı arasındaki optik kırılma indisi farkını artırarak ışığın daha etkin saçılmasına katkıda bulunabilir. Elde edilen sonuçlar, diopsitli frit kullanımının angobun termal ve mikroyapısal özelliklerinin yanı sıra optik davranışını da olumlu yönde etkileyebildiğini göstermektedir.

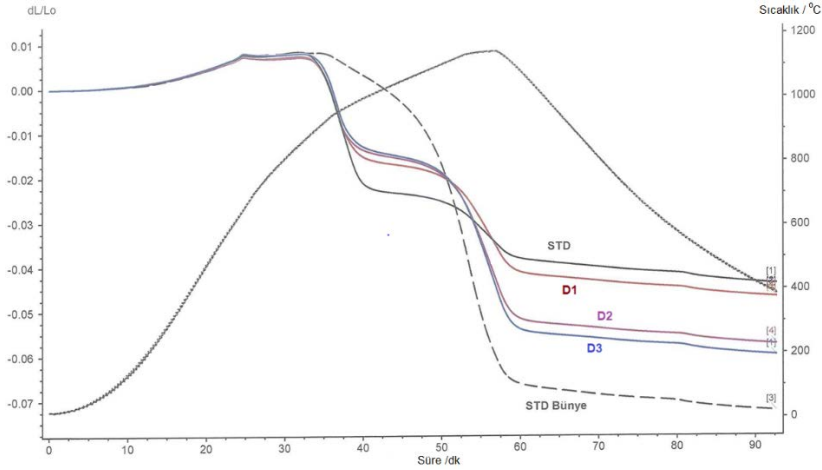
Angobların ısı genleşme katsayısı, diopsitli frit miktarındaki artışla birlikte düzenli olarak yükselmiştir. Bu durum, diopsitli frit kullanımıyla pişirim sonrasında gelişen diopsit kristal fazının artmasıyla ilişkilendirilebilir. Diopsit kristal fazının camsı faza kıyasla daha yüksek ısı genleşme davranışı göstermesi, yapıdaki kristalin faz miktarının artmasına bağlı olarak angobun toplam ısı genleşme katsayısının yükselmesine katkıda bulunmaktadır.

Standart ve diopsitli frit içeren angop kompozisyonlarının ısı analizleri Şekil 2'de verilmiştir. Dilatometre eğrileri incelendiğinde, tüm angop kompozisyonlarının düşük ve orta sıcaklık bölgelerinde benzer bir ısı genleşme davranışı gösterdiği görülmektedir. Bu bölgede numunelerde sıcaklık artışına bağlı olarak düzenli bir boyutsal genleşme meydana gelmekte ve eğriler pozitif değerlere ulaşmaktadır. Dilatometre eğrilerindeki en belirgin değişim, yaklaşık 30–55 dakika arasındaki yüksek sıcaklık bölgesinde meydana gelmektedir. Bu bölgede tüm angop

numunelerinde önceki genleşme davranışının yerini belirgin bir boyutsal küçülme/büzülme davranışının aldığı görülmektedir. Bu değişim, angoplarda pişirim sırasında yoğunlaşma ve sinterleşme mekanizmalarının etkin hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir. Seramik sistemlerde sıcaklığın artmasıyla birlikte partiküller arasında bağ oluşumu, gözeneklerin kapanması, sıvı faz oluşumu ve buna bağlı olarak yoğunlaşma meydana gelmekte ve bu süreç numunenin boyutsal olarak küçülmesine neden olmaktadır. Yapılan çalışmada standart angop eğrisi, yüksek sıcaklık bölgesinde daha sınırlı bir boyutsal küçülme gösterirken, diopsitli frit içeren D1, D2 ve D3 kompozisyonlarında büzülme daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle diopsitli frit miktarının artmasıyla eğrilerin daha düşük dL/L_0 değerlerine doğru ilerlemesi dikkat çekicidir. En belirgin boyutsal değişim en yüksek oranda diopsit fritin kullanıldığı D3 kompozisyonunda gözlenmektedir. Bu davranış, Tablo 2'de belirlenen pişme küçülmesi sonuçlarıyla doğrudan uyumludur.

Çalışmanın köşe eğriliği probleminin çözümüne yönelik olması nedeniyle, dilatometre analizlerinin en önemli kısmını angop numunelerinin standart bünye ile karşılaştırılması oluşturmaktadır. Şekil 2'de standart bünye eğrisi kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Bünye, angoplara kıyasla özellikle yüksek sıcaklık bölgesinde daha belirgin bir boyutsal küçülme göstermektedir. Bununla birlikte, diopsitli frit içeren angopların bünye eğrisine yaklaşma eğilimi dikkat çekmektedir. STD angop ile bünye arasında belirgin bir boyutsal davranış farkı bulunurken, D1, D2 ve özellikle D3 kompozisyonlarında yüksek sıcaklık bölgesindeki davranışın bünye eğrisine daha fazla yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, çalışmanın temel yaklaşımı açısından oldukça önemlidir. Sırlı porselen karolarda bünye ve angopun sıcaklığa bağlı boyutsal davranışlarının birbirinden önemli ölçüde farklı olması, pişirim ve soğuma sırasında tabakalar arasında gerilme oluşmasına neden olabilir. Bu bağlamda diopsitli frit kullanımıyla

angobun ısı/boyutsal davranışının bünye davranışına yaklaştırılması, bünye–angop arasındaki uyumsuzluğun azaltılması açısından potansiyel bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

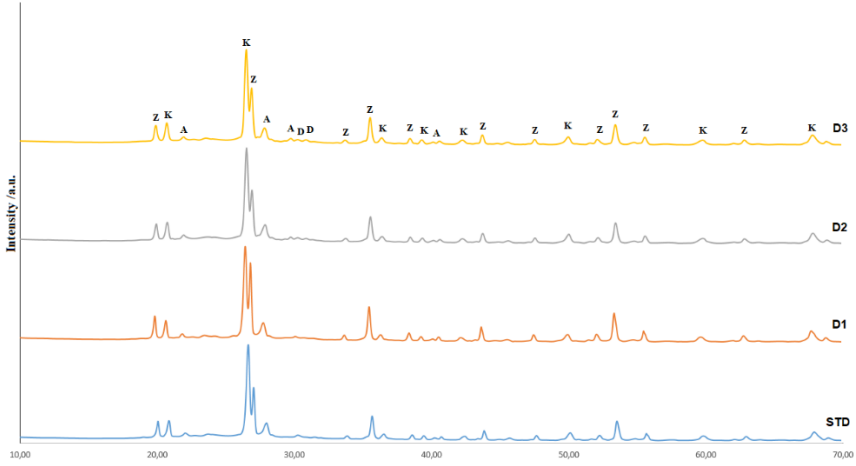


Şekil 2. Angopların dilatometre ile ısı davranış eğrileri

XRD analizi genel olarak değerlendirildiğinde, tüm kompozisyonlarda kuvars ve zirkon fazlarının karakteristik piklerinin bulunduğu görülmektedir. Bu durum, söz konusu kristalin fazların angop kompozisyonunun temel bileşenlerinden kaynaklandığını ve pişirim sonrasında da yapıda korunduğunu göstermektedir. Özellikle zirkon fazına ait piklerin tüm kompozisyonlarda belirgin şekilde gözlenmesi, reçetede sabit miktarda kullanılan zirkonun pişirim koşullarında önemli ölçüde yapıda kaldığını ortaya koymaktadır. Kuvars fazına ait karakteristik pikler de STD, D1, D2 ve D3 kompozisyonlarının tamamında benzer şiddetlerde görülmektedir. Bunun temel nedeni, tüm reçetelerde kuvars miktarının sabit tutulmasıdır. XRD analizlerinde tüm kompozisyonlarda anortit fazına ait karakteristik piklerin de bulunduğu görülmektedir. Anortit oluşumu, angop sisteminde bulunan CaO , Al_2O_3 ve SiO_2 bileşenlerinin yüksek sıcaklıkta reaksiyona girmesi sonucunda

gerçekleşebilen bir kristalleşme mekanizmasına işaret etmektedir.

XRD sonuçlarının çalışmanın amacı açısından en dikkat çekici bulgusu, diopsitli frit miktarındaki artışla birlikte diopsit fazına ait kırınım piklerinin belirginleşmesidir. Standart angop kompozisyonunda diopsit fazına ait bir gelişim gözlenmezken, diopsitli fritin %5 oranında kullanıldığı D1 kompozisyonunda diopsit fazına ait karakteristik kırınım sinyalleri ortaya çıkmaya başlamaktadır. Diopsitli frit miktarının D2 ve özellikle D3 kompozisyonlarında artırılmasıyla birlikte bu faza ait piklerin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Diopsitli fritin kimyasal bileşimi, pişirim sırasında oluşan sıvı fazın bileşimini ve kristalleşme koşullarını değiştirmekte; bunun sonucunda CaO–MgO–SiO₂ esaslı diopsit fazının gelişimi desteklenmektedir. Bu sonuç, diopsitli fritin angop içerisinde yalnızca başlangıç hammaddesi olarak bulunmadığını, pişirim sırasında yapıda kristalleşerek diopsit fazının gelişimine katkıda bulunduğunu açıkça göstermektedir. Dolayısıyla standart kompozisyondaki opak fritin diopsitli frit ile değiştirilmesi, angobun pişirim sonrası faz bileşimini sistematik olarak değiştirmiştir. D3 kompozisyonunda diopsit fazına ait piklerin daha belirgin olması, diopsitli frit miktarındaki artışın bu fazın oluşumu için gerekli bileşenlerin sistemdeki miktarını artırdığını göstermektedir.



Şekil 2. STD, D1, D2 ve D3 angop kompozisyonlarının XRD analizleri. K: Kuvars, Z: Zirkon, A: Anortit, D: Diopsit.

İşletme koşullarında üretim denemesi yapılan STD ve D3 angoplu 60×60 cm boyutundaki karolar üzerinde gerçekleştirilen köşe eğriliği ölçümleri Tablo 4'te verilmiştir. Pozitif ve negatif değerler eğriliğin farklı yönlerde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu nedenle numunelerin genel deformasyon davranışının karşılaştırılmasında mutlak değerler dikkate alındığında, STD numunesinin ortalama köşe eğriliği yaklaşık 0,71 iken D3 numunesinde bu değer yaklaşık 0,09 olarak hesaplanmıştır. Buna göre D3 numunesinde ortalama köşe eğriliğinde yaklaşık %87 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Benzer şekilde, maksimum mutlak eğrilik değeri STD numunesinde 0,78 iken D3 numunesinde 0,11'e düşmüştür.

D3 numunesinde gözlenen bu belirgin iyileşme, diopsit frit ilavesinin angobun ısı davranışı üzerindeki etkisi ve angop ile bünne arasındaki ısı uyumunun geliştirilmesi ile ilişkilendirilebilir. Angop ve bünne farklı ısı genleşme davranışlarına sahip olduğunda, pişirme sırasında gerçekleşen ısınma ve özellikle soğuma aşamasında iki tabaka arasında farklı miktarlarda boyutsal değişim meydana gelebilir. Bu farklılık, angop–bünne ara yüzeyinde gerilmelerin oluşmasına ve büyük

ebatlı ürünlerde eğrilik veya deformasyon gelişmesine neden olabilir. D3 bileşiminde diopsit frit kullanılmasıyla angobun ısı davranışının değiştirilmesi ve bunun sonucunda angobun ısı davranışının bünye davranışına yaklaştırılması, bu ısı uyumsuzluğun azalmasına katkıda bulunmuş olabilir.

Bu açıdan değerlendirildiğinde, D3 numunesinde ölçülen düşük köşe eğriliği değerleri yalnızca angobun kendi bünyesindeki mikroyapısal değişimlerin bir sonucu olarak değil, angop–bünye sisteminin birlikte daha uyumlu bir ısı davranış göstermesinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Özellikle 60×60 cm gibi büyük ebatlı karolarda, angop ve bünye arasındaki ısı genleşme farklılıklarının küçük değişimleri dahi ürünün düzlemselliği üzerinde belirgin deformasyonlara neden olabileceğinden, angobun ısı davranışının bünye davranışına yaklaştırılması geometrik stabilite açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

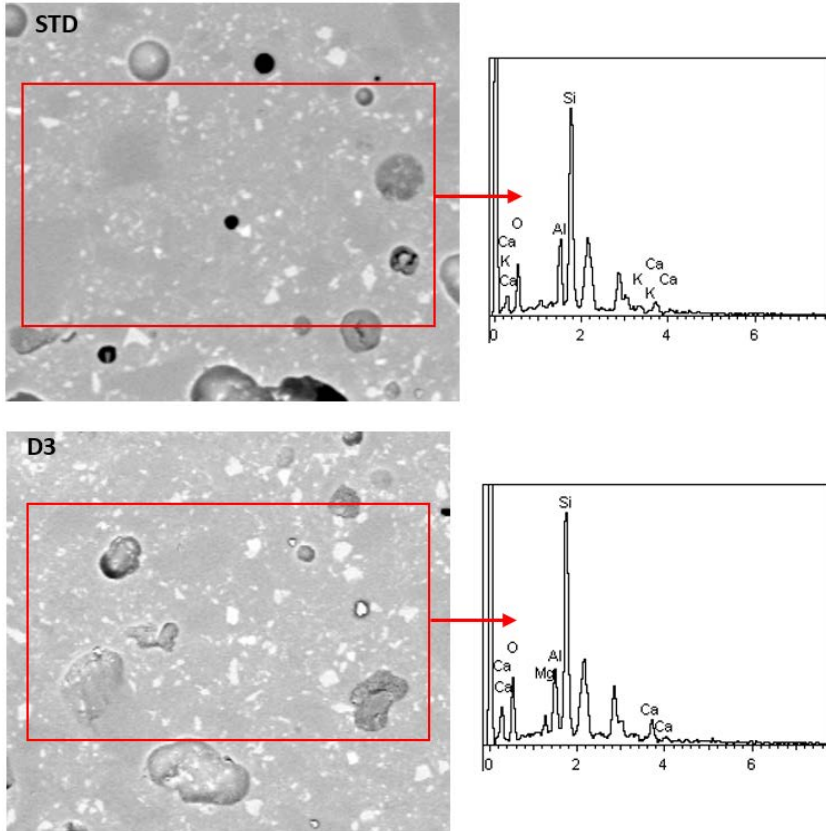
Tablo 4. Std ve D3 angopları ile 60x60 ebatında üretim denemesi yapılan karoların köşe eğriliği ölçüm değerleri

	1. Kenar	2. Kenar	3. Kenar	4. Kenar
STD	0,75	-0,67	0,78	-0,65
D3	0,11	0,08	0,10	0,08

Şekil 3'te verilen SEM–EDX görüntüleri ve analizleri de bu değerlendirmeyi mikroyapısal açıdan desteklemektedir. STD ve D3 numunelerinde benzer şekilde Si ve Al esaslı bir yapı gözlenirken, D3 numunesinin mikroyapısında diopsit frit ilavesiyle ilişkili olarak Mg içeren bölgelerin de bulunduğu görülmektedir. Diopsit esaslı fritin pişirme sırasında angobun cam fazı oluşumunu ve kimyasal yapısını değiştirmesi, angop tabakasının pişirme ve soğuma sırasında gösterdiği boyutsal davranışın değişmesine katkıda bulunmuş olabilir.

Sonuç olarak, D3 angobunda elde edilen yaklaşık %87'lik ortalama köşe eğriliği azalması, diopsit frit kullanımının yalnızca angobun mikroyapısal özelliklerini değil, aynı zamanda angop–

bünye arasındaki ısııl uyumu da olumlu yönde etkilediğini düşündürmektedir. Angobun ısııl davranışının bünye davranışına yaklaştırılması, pişirme ve soğuma sırasında oluşabilecek termal uyumsuzluk gerilmelerinin azalmasına ve dolayısıyla ürünün düzlemsellik ve boyutsal stabilitesinin iyileşmesine katkıda bulunmuş olabilir. Bu sonuç, laboratuvar ölçeğindeki ısııl davranış değerlendirmelerinde elde edilen bulguların işletme koşullarındaki 60×60 cm boyutlu ürünlerde de karşılığını bulduğunu göstermesi açısından önemlidir.



Şekil 3. Standart ve D3 angoplarına ait mikroyapı (SEM) görüntüleri ve alan taraması EDX analizleri

4. SONUÇ

Bu çalışmada, sırlı porselen karolarda gözlenen köşe eğriliğinin azaltılması amacıyla standart angop kompozisyonundaki opak fritin %5, %10 ve %15 oranlarında diopsitli frit ile ikame edilmesinin angobun ısı ve mikroyapısal davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, diopsitli frit miktarındaki artışın angopların pişme küçülmesini artırdığını ve yüksek sıcaklık bölgesindeki boyutsal davranışını standart bünyenin davranışına yaklaştırdığını göstermiştir. XRD analizlerinde diopsit fazının gelişiminin diopsitli frit miktarıyla birlikte belirginleşmesi, gözlenen ısı davranış değişiminin faz gelişimiyle ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, diopsitli frit ikamesinin angopların renk özellikleri üzerinde sınırlı bir değişime neden olduğu ve düşük su emme değerlerinin korunduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın en önemli sonucu, angobun ısı davranışının bünye davranışına yaklaştırılması ile işletme koşullarında köşe eğriliğinin önemli ölçüde azaltılabildiği olmasıdır. Bu sonuç, köşe eğriliğinin yalnızca bünye ve pişirim koşullarıyla değil, bünye–angop arasındaki ısı uyumuyla da ilişkili olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, angop kompozisyonunun ve özellikle frit kimyasının kontrollü olarak değiştirilmesi, sırlı porselen karolarda düzlemsellik ve geometrik kararlılığın geliştirilmesine yönelik uygulanabilir bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- Amorós, J. L., Orts, M. J., García-Ten, J., Gozalbo, A., & Sánchez, E. (2007). Effect of the green porous texture on porcelain tile properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(5), 2295–2301. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2006.07.005
- Becker, E., Jiusti, J., Minatto, F. D., & Delavi, D. G. G. (2017). Use of mechanically-activated kaolin to replace ball clay in engobe for a ceramic tile. *Cerâmica*, 63, 295–302. doi:10.1590/0366-69132017633672077
- Bernardin, A. M., Medeiros, D. S., & Riella, H. G. (2006). Pyroplasticity in porcelain tiles. *Materials Science and Engineering: A*, 427(1–2), 316–319. doi:10.1016/j.msea.2006.04.073
- Carbajal, L., Rubio-Marcos, F., Bengochea, M. A., & Fernández, J. F. (2007). Properties related phase evolution in porcelain ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 27, 4065–4069. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2007.02.096
- Carty, W. M., & Senapati, U. (1998). Porcelain—Raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 81, 3–20. doi:10.1111/j.1151-2916.1998.tb02290.x
- Dal Bó, M., Bernardin, A. M., & Hotza, D. (2014). Formulation of ceramic engobes with recycled glass using mixture design. *Journal of Cleaner Production*, 69, 243–249. doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.088
- Dos Santos Conserva, L. R., Melchiades, F. G., Nastri, S., Boschi, A. O., Dondi, M., Guarini, G., Raimondo, M., & Zanelli, C. (2017). Pyroplastic deformation of porcelain stoneware tiles: Wet vs. dry processing. *Journal of the European*

- Ceramic Society, 37, 333–342.
doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2016.08.015
- Elias, R., Zaccaron, A., Montedo, O. R. K., Raupp-Pereira, F., Bernardin, A. M., Arcaro, S., & Neto, J. B. R. (2024). Pyroplastic deformation analysis of Brazilian porcelain tile formulations using mixture design. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 21(6), 4241–4256. doi:10.1111/ijac.14813
- Frizzo, R. G., Zaccaron, A., Nandi, V. S., & Bernardin, A. M. (2020). Pyroplasticity on porcelain tiles of the albite-potassium feldspar-kaolin system: A mixture design analysis. *Journal of Building Engineering*, 32, 101432. doi:10.1016/j.jobe.2020.101432
- Gajek, M., Rapacz-Kmita, A., Stodolak-Zych, E., Zarzecka-Napierata, M., Wilk, M., Magdziarz, A., & Dudek, M. (2022). Microstructure and mechanical properties of diopside and anorthite glazes with high abrasion resistance. *Ceramics International*, 48, 6792–6798. doi:10.1016/j.ceramint.2021.11.230
- Karamanov, A., & Pelino, M. (2008). Induced crystallization porosity and properties of sintered diopside and wollastonite glass-ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 28, 555–562. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2007.08.001
- Mariot, M. L. M., Rosso, L. S., Redivo, N. C., & Peruchi, A. B. R. (2025). Estudo da influência da dilatação térmica do engobe no corte do porcelanato esmaltado polido 90 × 90 cm. *Cerâmica Industrial*. doi:10.4322/cerind.2025.004
- Martín-Márquez, J., Rincón, J. M., & Romero, M. (2008). Effect of firing temperature on sintering of porcelain stoneware

- tiles. *Ceramics International*, 34, 1867–1873. doi:10.1016/j.ceramint.2007.06.006
- Martín-Márquez, J., De la Torre, A. G., Aranda, M. A. G., Rincón, J. M., & Romero, M. (2009). Evolution with temperature of crystalline and amorphous phases in porcelain stoneware. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(1), 229–234. doi:10.1111/j.1551-2916.2008.02862.x
- Martín-Márquez, J., Rincón, J. M., & Romero, M. (2010a). Mullite development on firing in porcelain stoneware bodies. *Journal of the European Ceramic Society*, 30, 1599–1607. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.002
- Martín-Márquez, J., Rincón, J. M., & Romero, M. (2010b). Effect of microstructure on mechanical properties of porcelain stoneware. *Journal of the European Ceramic Society*, 30, 3063–3069. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.07.015
- Montedo, O. R. K., Nandi, V. S., Raupp-Pereira, F., & Oliveira, A. P. N. (2015). The use of ceramic sludge and recycled glass to obtain engobes for manufacturing ceramic tiles. *Journal of Cleaner Production*, 86, 461–470. doi:10.1016/j.jclepro.2014.08.091
- Rambaldi, E., Carty, W. M., Tucci, A., & Esposito, L. (2007). Using waste glass as a partial flux substitution and pyroplastic deformation of a porcelain stoneware tile body. *Ceramics International*, 33, 727–733. doi:10.1016/j.ceramint.2005.12.010
- Romero, M., Rincón, J. M., & Acosta, A. (2002). Effect of iron oxide content on the crystallisation of a diopside glass–ceramic glaze. *Journal of the European Ceramic Society*. doi:10.1016/S0955-2219(01)00395-8

- Sánchez, E., Sanz, V., Canas, E., Sales, J., Kayacı, K., Taşkiran, M. U., Anıl, Ü. E., & Türk, Ş. (2019). Revisiting pyroplastic deformation: Application for porcelain stoneware tile bodies. *Journal of the European Ceramic Society*, 39, 601–609. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2018.09.032
- Suvaci, E., & Yildiz, B. (2017). Roles of CaO, MgO and SiO₂ on crystallization and microstructure development in diopside-based glass-ceramic glazes under industrial fast-firing condition. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 53, 75–81. doi:10.1007/s41779-016-0011-9
- Tarhan, M., & Tarhan, B. (2020). Development of waterproof engobe layer for ceramic wall tiles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140, 555–565. doi:10.1007/s10973-019-08893-3
- Torres, F. J., & Alarcón, J. (2005). Pyroxene-based glass-ceramics as glazes for floor tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 25, 349–355. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2004.01.025
- Tulyaganov, D. U., Dimitriadis, K., Agathopoulos, S., & Fernandes, H. R. (2023). Glasses and glass-ceramics in the CaO–MgO–SiO₂ system: Diopside containing compositions—A brief review. *Journal of Non-Crystalline Solids*. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2023.122351
- Zanelli, C., Raimondo, M., Guarini, G., & Dondi, M. (2011). The vitreous phase of porcelain stoneware: Composition, evolution during sintering and physical properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357, 3251–3260. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2011.05.020

METALİK CAMLARIN SENTEZİNDE YAPAY ZEKA UYGULAMALARI

Rıza KARA¹

Merve GENEL²

1. GİRİŞ

Metalik camlar (amorf metaller), atomik düzeyde uzun mesafe kristal düzenden yoksun, ergiyik hâlden hızlı soğutma yoluyla elde edilen metalik alaşımlar olarak tanımlanmaktadır. Tane sınırlarının, dislokasyonların ve istiflenme kusurlarının bulunmaması, bu malzemelere kristal karşılıklarına kıyasla yüksek mukavemet, geniş elastik gerinim sınırı, üstün korozyon direnci ve manyetik yumuşaklık gibi özellikler kazandırmaktadır (Greer, 1995; Wang vd., 2004). Metalik camların keşfi, Klement, Willens ve Duwez tarafından 1960 yılında Au-Si sisteminde yaklaşık 10^6 K s^{-1} mertebesindeki soğuma hızlarıyla gerçekleştirilmiştir (Klement vd., 1960). Takip eden yıllarda Inoue ve Johnson gibi araştırmacıların öncülüğünde, düşük kritik soğuma hızlarına sahip çok bileşenli alaşım sistemlerinin geliştirilmesi ile santimetre mertebesinde kalınlığa sahip iri hacimli metalik camlar (Bulk Metallic Glass, BMG) üretilebilir hâle gelmiştir (Inoue, 2000; Peker & Johnson, 1993).

Bununla birlikte, metalik camların sentezi, geleneksel deneme-yanılma temelli alaşım geliştirme yaklaşımlarının doğasından kaynaklanan önemli zorluklar barındırmaktadır. Cam

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ORCID: 0000-0002-0820-2577.

² Öğr. Gör., Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, ORCID: 0000-0001-5961-1277.

Oluşturma Yeteneği (Glass-Forming Ability, GFA), geniş bir kompozisyon yelpazesine sahip olması nedeniyle deneysel taramayı gerekli kılmaktadır. Bu durum zaman ve maliyet açısından ciddi kısıtlar oluşturmaktadır (Suryanarayana vd., 2009). Son yirmi yılda, Yapay Zekâ (Artificial Intelligence, AI) ve özellikle Makine Öğrenmesi (Machine Learning, ML) yöntemlerinin malzeme bilimine entegrasyonu, bu zorlukların aşılmasında belirleyici bir rol üstlenmiştir. Veri odaklı modeller, kompozisyon-özellik ilişkilerinin öğrenilmesine, yeni aday alaşımların hızla taranmasına ve imalat süreç parametrelerinin optimize edilmesine olanak tanımaktadır (Butler vd., 2018).

Metalik camların sentezinde temel mühendislik problemi, kimyasal kompozisyonun, üretim sürecinin ve hedeflenen mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerin birlikte optimize edilmesidir. Geleneksel metalurji uygulamalarında bu unsurlar çoğunlukla ayrı ayrı ve ardışık biçimde ele alınır. Bu yaklaşım, uygun kompozisyon ve üretim koşullarının belirlenmesi için gereken süreyi artırır. AI destekli yaklaşımlar ise kompozisyon, üretim süreci ve malzeme özellikleri arasındaki ilişkileri ortak bir veri odaklı çerçevede değerlendirir. Böylece farklı tasarım seçenekleri daha kısa sürede incelenebilir ve optimizasyon süreci daha bütüncül bir şekilde yürütülebilir.

Bu bölümde ilk olarak AI'nın tarihsel gelişimi ele alınmaktadır. Ardından metalik camların temel kavramları ve geleneksel sentezleme yöntemleri açıklanmaktadır. Devam eden bölümlerde, malzeme biliminde AI kullanımının genel çerçevesi ortaya konulmakta ve metalik camların kompozisyon tasarımı, GFA tahmini ile mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin öngörülmesine yönelik AI uygulamaları incelenmektedir. Son bölümde ise alandaki mevcut sınırlılıklar ve gelecekteki araştırma yönelimleri değerlendirilmektedir.

AI'ın kuramsal temelleri, sinir hücrelerini ikili mantıksal birimler olarak modelleyen çalışmalara (McCulloch & Pitts, 1943) ve Turing'in makinelerin düşünme kapasitesini sorgulayarak önerdiği değerlendirme yöntemine dayanmaktadır (Turing, 1950). AI, 1956 Dartmouth Konferansı ile bağımsız bir araştırma alanı olarak şekillenmiştir. Sembolik AI döneminde hesaplama gücünün ve verinin sınırlı olması, alanın belirli dönemlerde yavaşlamasına yol açmış ve bu dönemler “yapay zekâ kışı” olarak adlandırılmıştır. 1986 yılında geri yayılım algoritmasının uygulanması, çok katmanlı sinir ağlarının eğitilmesini kolaylaştırmış ve AI araştırmalarında önemli bir gelişme sağlamıştır (Rumelhart vd. 1986). 2010'lu yıllarda GPU işlem kapasitesinin artması ve büyük veri kümelerinin yaygınlaşması, Derin Öğrenme (Deep Learning, DL) ve transformer mimarilerinin hızlı biçimde gelişmesini sağlamıştır. Bu gelişmelerle birlikte AI kullanım alanı genişlemiş ve yalnızca örüntü tanıma ile sınırlı kalmayarak yeni malzemelerin tasarımı ve üretimi gibi alanlara da uzanmıştır (LeCun vd., 2015).

AI'ın malzeme bilimine entegrasyonu, artan hesaplama gücü, açık veri tabanlarının yaygınlaşması ve algoritmalar üzerindeki gelişmelerle hız kazanmıştır (Butler vd., 2018). Özellikle 2011 yılında başlatılan Malzeme Genomu Girişimi (Materials Genome Initiative, MGI), hesaplamalı araçlar ile yüksek verimli deneysel yöntemleri bir araya getirerek malzeme keşif süreçlerinin hızlandırılmasına katkı sağlamıştır (Liu vd., 2020; Green vd., 2017). Bu süreçte geliştirilen Materials Project gibi açık veri tabanları, metalik camlar gibi karmaşık kompozisyon uzayına sahip malzemelerin AI destekli ve sistematik biçimde tasarlanmasına önemli bir altyapı sağlamıştır (Jain vd., 2013).

2. METALİK CAMLAR: TEMEL KAVRAMLAR, SINIFLANDIRMA VE GELENEKSEL SENTEZLEME YÖNTEMLERİ

Metalik camlar, ergimiş metalik alaşımın kristalleşmeyi önleyecek kadar hızlı soğutulmasıyla elde edilen ve atomik düzeyde düzensiz (amorf) yapıya sahip katı malzemelerdir. İlk metalik cam örneği, Klement vd., tarafından 1960 yılında Au₇₅Si₂₅ alaşımının ince şeritler hâlinde üretilmesiyle elde edilmiştir (Klement vd., 1960). Bu ilk nesil amorf alaşımların üretimi, yüksek kritik soğuma hızı gerektirmeleri nedeniyle mikron mertebesindeki ince kalınlıklarla sınırlı kalmıştır.

1990'lı yıllarda çok bileşenli alaşım sistemlerinin geliştirilmesi ile kritik soğuma hızı önemli ölçüde azalmış ve santimetre mertebesinde kalınlığa sahip toplu metalik camların (BMG) üretimi mümkün hâle gelmiştir. Bu gelişmede Inoue tarafından önerilen ampirik kurallar önemli rol oynamıştır. Bu kurallara göre alaşım sisteminin en az üç element içermesi, ana bileşenler arasındaki atomik yarıçap farkının yaklaşık %12'den büyük olması ve bu bileşenler arasında negatif karışım entalpisinin bulunması gerekmektedir (Inoue, 2000). Bu ilkeler doğrultusunda geliştirilen Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5} (Vitrelloy 1) alaşımı, düşük kritik soğuma hızı sayesinde santimetre mertebesinde döküm kalınlığına ulaşabilen ilk toplu metalik camlardan biri olmuştur (Peker & Johnson, 1993).

Metalik camlar, ana matris elementine göre Zr-, Cu-, Fe-, Mg-, Ti-, Pd- ve Ni-esaslı sistemler gibi farklı gruplara ayrılmaktadır. Kristal tane sınırlarının bulunmaması, bu malzemelere yüksek akma mukavemeti, yaklaşık %2'lik geniş bir elastik gerinim aralığı, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek korozyon direnci gibi özellikler kazandırmaktadır (Wang vd., 2004). Bununla birlikte, oda sıcaklığındaki sınırlı plastik deformasyon kapasitesi ve kayma bantlarının belirli bölgelerde

yoğunlaşması, gevrek kırılma eğilimini artırmaktadır. Bu durum, metalik camların yapısal uygulamalardaki kullanımını sınırlayan önemli bir dezavantajdır (Kruzic, 2016).

Metalik camların sahip olduğu üstün özellikler, bu malzemelerin farklı mühendislik alanlarında kullanılmasına olanak sağlamıştır. Zr-esaslı toplu metalik camlar, yüksek özgül mukavemetleri ve iyi biyouyumlulukları nedeniyle ortopedik implantlarda ve cerrahi aletlerde kullanılmaktadır. Fe- ve Co-esaslı metalik camlar, yumuşak manyetik özellikleri sayesinde transformatör çekirdekleri ve sensör bileşenlerinde tercih edilmektedir. Pd- ve Pt-esaslı sistemler ise yüksek işlenebilirlikleri nedeniyle mikro-elektromekanik sistemlerde (MEMS) ve saat endüstrisinde kullanılmaktadır (Kruzic, 2016).

Bu geniş kullanım alanlarına rağmen, her uygulama için farklı özelliklerin bir arada sağlanması gerekir. Örneğin, yüksek mukavemetin düşük elastik modülle veya yüksek korozyon direncinin iyi işlenebilirlik ile birlikte elde edilmesi gerekebilir. Bu nedenle, istenen özelliklerin aynı anda sağlanabileceği uygun alaşım kompozisyonunun belirlenmesi oldukça karmaşık bir tasarım problemi oluşturur.

Geleneksel sentezleme yöntemleri arasında bakır kalıba emme döküm (copper mold suction casting), yüksek basınçlı döküm, şerit dökümü (melt spinning) ve su verme (water quenching) yer almaktadır. Bu yöntemlerin ortak özelliği, ergiyik hâlin homojen biçimde ve kristalleşme kinetiğinin önüne geçecek kadar hızlı soğutulmasına dayanmasıdır. Cam oluşturma yeteneğinin nicel olarak değerlendirilmesinde $T_{rg} = T_g/T_l$ (indirgenmiş cam geçiş sıcaklığı) ve $\gamma = T_x/(T_g + T_l)$ gibi termal parametreler kullanılmaktadır; burada T_g cam geçiş sıcaklığını, T_x kristalleşme başlangıç sıcaklığını ve T_l likidüs sıcaklığını temsil etmektedir (Lu & Liu, 2002; Lu vd., 2007). Bununla birlikte, bu ampirik parametrelerin yeni geliştirilen alaşım

sistemlerine genellenebilirliği sınırlı kalmakta ve bu durum, kompozisyon tasarımı ve veri odaklı yöntemlere olan ihtiyacı artırmaktadır (Suryanarayana vd., 2009; Guo & Liu, 2010). Atomik boyut farkı ve karışım entalpisi gibi ölçütlerin yanı sıra, alaşımı oluşturan elementlerin periyodu ve atomik boyut dağılımı temel alınarak geliştirilen sınıflandırma şemaları da, metalik camların ana alaşımlama elementine göre sistematik biçimde kategorize edilmesine katkı sağlamıştır (Takeuchi & Inoue, 2005).

3. MALZEME BİLİMİNDE YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ: VERİ ODAKLI YAKLAŞIM

Malzeme bilimindeki geleneksel araştırma yaklaşımı uzun yıllar boyunca deneysel gözlemler ve teorik modeller üzerine kurulmuştur. Hesaplama gücündeki gelişmelerle birlikte yoğunluk fonksiyoneli teorisi gibi hesaplamalı yöntemler de bu sürece dâhil olmuştur. Bununla birlikte, geniş kompozisyon ve üretim parametrelerinin aynı anda incelenmesi hem deneysel çalışmalar hem de hesaplamalı yöntemler açısından zaman ve kaynak gerektirmektedir. Veri odaklı yaklaşımların malzeme bilimine dâhil olmasıyla bu sınırlılıkların azaltılması hedeflenmiş ve söz konusu yaklaşım literatürde “dördüncü paradigma” olarak tanımlanmıştır (Liu vd., 2020).

2011 yılında başlatılan MGI, hesaplamalı araçları, veri tabanlarını ve yüksek verimli deneysel yöntemleri bir araya getirerek yeni malzemelerin keşfini hızlandırmayı ve geliştirme süresini azaltmayı amaçlamıştır (Liu vd., 2020). Bu girişimle birlikte büyük ölçekli ve açık erişimli malzeme veri tabanlarının geliştirilmesi hız kazanmıştır. Bu veri tabanları, ML modellerinin eğitilmesi ve farklı malzeme özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi için önemli bir veri kaynağı oluşturmuştur. Butler ve

arkadaşlarının kapsamlı derlemesi, ML yöntemlerinin moleküler ve malzeme bilimde özellik tahmini, yapı belirleme ve yeni malzeme keşfi gibi birçok farklı amaçla kullanılabildiğini göstermiştir (Butler vd., 2018).

Malzeme bilimde kullanılan ML yöntemleri genel olarak denetimli, denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme olmak üzere üç grupta ele alınabilir. Denetimli öğrenmede regresyon ve sınıflandırma yöntemleri öne çıkarken, denetimsiz öğrenmede kümeleme ve boyut indirgeme gibi tekniklerden yararlanılır. Pekiştirmeli öğrenme ise bir ajanın çevresiyle etkileşime girerek belirli bir hedef doğrultusunda davranış geliştirmesine dayanır. Malzeme çalışmalarında Rastgele Orman (Random Forest), Destek vektör makineleri (Support Vector Machines, SVM), Gradyan artırmalı ağaçlar (Gradient Boosting) ve Yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks, ANN) yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır. Daha karmaşık problemlerde ise Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks, CNN), üretken çekişmeli ağlar (Generative Adversarial Networks, GAN) ve varyasyonel oto-kodlayıcılar gibi DL mimarilerinden yararlanılmaktadır. Malzeme çalışmalarında veri kümelerinin çoğu zaman sınırlı olması nedeniyle transfer öğrenme ve aktif öğrenme gibi yöntemler de giderek daha fazla kullanılmaktadır (Zhang & Ling, 2018).

ML'nin malzeme keşfine sağladığı önemli katkılardan biri, kompozisyon ve üretim parametreleri ile hedeflenen özellikler arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri doğrudan veriden öğrenebilmesidir. Bu yaklaşım, özellikle metalik camlar gibi çok bileşenli ve yüksek boyutlu kompozisyon uzayına sahip malzemeler açısından önemlidir. Çünkü bu tür sistemlerde oluşturulabilecek alaşım kombinasyonlarının sayısı milyonlara ulaşabilmektedir (Ren vd., 2018). Ward ve arkadaşları tarafından geliştirilen genel amaçlı bir ML çerçevesinin, yalnızca elementsel öznelikleri kullanarak kristalin inorganik bileşiklerin

yanı sıra amorf metalik alaşımların özelliklerini de başarılı biçimde tahmin edebildiği gösterilmiştir. Üstelik bu yaklaşımın farklı malzeme sınıflarına özel bir modelleme gerektirmemesi, genel ve genellenebilir öznelik mühendisliğinin metalik cam araştırmalarında da kullanılabileceğini göstermektedir (Ward vd., 2016).

Malzeme biliminde AI uygulamaları yalnızca özellik tahminiyle sınırlı değildir. Bu uygulamalar yapısal analiz, malzeme özelliklerinin tahmini, yeni malzemelerin keşfi ve tasarımı, üretim süreçlerinin optimizasyonu ve görüntü analizi gibi farklı alanları kapsamaktadır. Yapısal analizde kristal veya amorf yapıların belirlenmesi amaçlanırken, özellik tahmininde kompozisyon ile mekanik, termal, elektriksel ve manyetik özellikler arasındaki ilişkiler incelenir. Keşif ve tasarım çalışmalarında üretici modeller kullanılarak yeni malzeme adayları oluşturulabilir. Süreç optimizasyonunda ise sentez ve üretim parametrelerinin uygun değerlerinin belirlenmesi hedeflenir. Görüntü işleme yöntemleri de özellikle mikroyapıların otomatik olarak sınıflandırılması ve analiz edilmesinde kullanılmaktadır.

Mikroyapısal analizlerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) gibi karakterizasyon tekniklerinden elde edilen veriler, AI yöntemleri ile işlenebilmektedir. Özellikle CNN, görüntülerdeki karmaşık yapısal özellikleri otomatik olarak belirleyebilmektedir. Bu sayede kristalleşme oranı, faz dağılımı ve kusur yoğunluğu gibi önemli parametrelerin daha hızlı ve nicel biçimde belirlenmesi mümkün hâle gelmektedir (Butler vd., 2018).

Rastgele Orman algoritması, çok sayıda karar ağacının bir araya getirilmesine dayanan bir topluluk öğrenme yöntemidir. Hem regresyon hem de sınıflandırma problemlerinde kullanılabilen bu yöntem, aşırı öğrenmeye (overfitting) karşı

görece dayanıklı olması ve özelliklerin tahmin üzerindeki önemini incelemeye imkân vermesi nedeniyle malzeme çalışmalarında sıkça tercih edilmektedir. Özellikle orta büyüklükteki metalik cam veri kümelerinde bu özellikler yöntemi kullanışlı hâle getirmektedir (Ghorbani vd., 2022).

SVM, özellikle sınıflandırma problemlerinde kullanılan bir başka ML yöntemidir. Örneğin, belirli bir alaşım kompozisyonunun cam oluşturup oluşturamayacağının belirlenmesinde kullanılabilir. Yöntem, sınıflar arasındaki karar sınırını mümkün olan en geniş kenar boşluğunu sağlayacak şekilde belirler. Bu özelliği sayesinde sınırlı sayıdaki veriyle çalışılan problemlerde de kararlı sonuçlar verebilir.

Gradyan artırmalı ağaçlar ise, birden fazla karar ağacını ardışık olarak birleştirerek her aşamada önceki modelin hatalarını azaltmayı amaçlayan bir yöntemdir. XGBoost, bu yaklaşımın yaygın kullanılan örneklerinden biridir. Özellikle yapılandırılmış tablosal verilerde yüksek tahmin performansı sunması, malzeme özelliklerinin tahmininde bu yöntemin kullanılmasını desteklemektedir. ANN ve DL modelleri ise girdi ve çıktı arasındaki ilişkileri çok katmanlı doğrusal olmayan dönüşümler aracılığıyla öğrenir. Bu özellik, aynı anda birden fazla malzeme özelliğinin tahmin edilmesi gereken metalik cam uygulamalarında önemli bir avantaj sağlar (Forrest & Greer, 2022).

Genetik algoritmalar ve parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) gibi evrimsel ve metasezgisel yöntemler de malzeme tasarımında kullanılmaktadır. Bu yöntemler çoğunlukla doğrudan bir tahmin modeli yerine, eğitilmiş ML modelleriyle birlikte çalışır. Böylece kompozisyon uzayında uygun veya küresel optimum çözümlerin aranması mümkün olur (Liu vd., 2023).

Üretici yapay zekâ (Generative AI) modelleri arasında yer alan varyasyonel oto-kodlayıcılar ve GAN ise mevcut verilerin özelliklerini öğrenmenin ötesine geçerek yeni malzeme adaylarının oluşturulmasına olanak tanır. Bu modeller, verinin temel özelliklerinin temsil edildiği gizil uzaydan (latent space) örnekleme yaparak, eğitim kümesinde bulunmayan yepyeni bileşimler ve içerikler oluşturabilir. Böylece yüksek boyutlu kompozisyon uzayında insan sezgisiyle belirlenmesi zor olan bölgelerin sistematik biçimde araştırılması mümkün hâle gelir. Bununla birlikte, bu modellerin etkili biçimde eğitilebilmesi için görece büyük veri kümelerine ihtiyaç duyulması, metalik camlar gibi veri miktarının sınırlı olduğu alanlarda önemli bir kısıt oluşturmaktadır.

4. METALİK CAMLARIN SENTEZİNDE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI

Metalik camların sentezinde uygun kompozisyonun ve üretim koşullarının belirlenmesi, çok sayıda değişkenin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Geleneksel deneysel yöntemler bu süreçte önemli bir yere sahip olsa da geniş kompozisyon alanlarının ve farklı üretim koşullarının incelenmesi zaman ve kaynak açısından oldukça maliyetli olabilir. AI ve ML yöntemleri, deneysel verilerden yararlanarak bu karmaşık ilişkilerin daha hızlı ve sistematik biçimde değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır.

Metalik cam sentezinde AI'nın rolü yalnızca mevcut malzemelerin özelliklerini tahmin etmek ile sınırlı değildir. Üretim parametrelerinin optimizasyonu, bir alaşımın cam oluşturma yeteneğinin önceden tahmin edilmesi, hedeflenen özelliklere uygun kompozisyonların belirlenmesi ve yeni malzeme adaylarının oluşturulması gibi farklı aşamalarda da kullanılabilmektedir. Ayrıca fiziksel bilgiyi modele dâhil eden ve

model sonuçlarının yorumlanmasını kolaylaştıran yaklaşımlar, AI modellerinin malzeme davranışını daha anlamlı biçimde değerlendirmesine katkı sağlamaktadır.

Bu doğrultuda aşağıdaki bölümlerde AI uygulamaları, metalik cam sentezinin farklı aşamaları üzerinden ele alınmaktadır. İlk olarak geleneksel döküm ve hızlı katılaştırma süreçlerinde üretim parametrelerinin optimizasyonu incelenmektedir. Ardından cam oluşturma yeteneğinin ML yöntemleriyle tahminine odaklanılmaktadır. Daha sonra kimyasal kompozisyon tasarımı ve ters tasarım yaklaşımları ile mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerin tahmini ele alınmaktadır. Son olarak, fiziğe dayalı ve açıklanabilir modellerin yanı sıra kimyasal kompozisyonların hazırlanmasına yönelik AI destekli yaklaşımlar değerlendirilmektedir.

4.1. Geleneksel Döküm ve Hızlı Katılaştırma Proseslerinde Yapay Zekâ Destekli Optimizasyon

Metalik camların geleneksel üretiminde şerit dökümü ve bakır kalıba emme döküm gibi yöntemlerde, üretim koşullarının uygun biçimde belirlenmesi amorf yapının elde edilmesi açısından büyük önem taşır. Soğuma hızı, kalıp geometrisi, ergiyik sıcaklığı ve atmosfer koşulları gibi birçok parametre üretim sonucunu birlikte etkiler. Bu parametreler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiler nedeniyle uygun üretim koşullarının yalnızca deneysel yöntemlerle belirlenmesi zaman ve kaynak açısından sınırlayıcı olabilir. ML ve Entegre Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği (Integrated Computational Materials Engineering, ICME) yaklaşımları, üretim parametreleri ile oluşan mikroyapı arasındaki ilişkilerin belirlenmesine yardımcı olarak deneysel ve hesaplamalı çalışmalarda yükü azaltmaktadır (Liu vd., 2020).

AI modelleri, üretim sürecinin farklı aşamalarında da kullanılabilmektedir. Özellikle ön alaşım hazırlama sırasında

uygulanan ergitme koşullarının kompozisyonel homojenlik üzerindeki etkisi, süreçten elde edilen veriler üzerinden değerlendirilebilir. Bunun yanında, yüzey yanıt modelleri (surrogate models) kullanılarak şerit kalınlığı, kalıp tasarımı ve amorf faz oranı gibi hedefler için uygun üretim koşulları daha az sayıda deneyle belirlenebilir. Böylece geniş bir parametre alanının doğrudan deneylerle taranması yerine, AI destekli modeller öncelikli olarak incelenmesi gereken koşulların belirlenmesine katkı sağlar.

Eklemeli imalat (Additive Manufacturing, AM) ve Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting, SLM) yöntemleri de yüksek yerel soğuma hızları nedeniyle karmaşık geometrilere sahip metalik cam parçaların üretiminde kullanılmaktadır (Sohrabi vd., 2021; Zhang vd., 2022). Bununla birlikte, lazer gücü, tarama hızı, hat aralığı ve katman kalınlığı gibi parametrelerin oluşturduğu hacimsel enerji yoğunluğu (Volumetric Energy Density, VED), üretim kalitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Wu vd., 2022). VED değerinin uygun aralığın dışına çıkması gözeneklilik, kalıntı gerilmeler ve yerel kristalleşme gibi sorunlara neden olabilir. Bu nedenle amorf yapının korunması için üretim parametrelerinin dikkatli biçimde belirlenmesi gerekir (Tapia vd., 2016; Li vd., 2016).

ML yöntemleri, regresyon modelleri, CNN ve Bayesçi optimizasyon gibi farklı yaklaşımlar aracılığıyla çok sayıda üretim parametresinin birlikte değerlendirilmesine olanak tanır. Bu yöntemler, sınırlı sayıdaki deneysel veriden yararlanarak uygun işlem koşullarının belirlenmesine ve elde edilen mikroyapı ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlayabilir (Meng vd., 2020; Wang vd., 2020; Bordeenithikasem vd., 2018). Ayrıca üretimde kullanılan metalik ve ametalik tozların özellikleri ile sensörlerden elde edilen gerçek zamanlı verilerin modele dâhil edilmesi, üretim sırasında oluşabilecek kusurların daha erken belirlenmesini mümkün kılar. Gerçek zamanlı süreç izleme (in-

situ monitoring) ile birlikte kullanılan bu yaklaşım, kusurların oluşumuna hızlı şekilde müdahale edilmesini ve kapalı döngü kontrol sistemlerinin geliştirilmesini destekler (Meng vd., 2020). Bu veri odaklı yaklaşım, metalik cam üretiminde kompozisyon seçiminden proses kontrolüne kadar uzanan bütünleşik bir tasarım sürecinin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Böylece Endüstri 4.0 kapsamında, malzeme kompozisyonu, üretim koşulları, mikroyapı ve nihai ürün arasındaki ilişkilerin aynı dijital çerçevede değerlendirilmesi mümkün hâle gelmektedir (Zhong vd., 2017).

4.2. Cam Oluşturma Yeteneğinin Makine Öğrenmesi ile Tahmini

Metalik cam araştırmalarında AI kullanımının belirginleşmesi özellikle 2018 yılından itibaren hız kazanmıştır. Bu dönemden başlayarak veri güdümlü GFA tahmini, yüksek verimli deneylerle yinelenmeli model güncelleme, fiziksel anlamlı özniteliklerin kullanımı ve ters tasarım yaklaşımları birbirini izleyen bir gelişim çizgisi oluşturmuştur: 2018 yılında ML ile yüksek verimli deneylerin birlikte kullanıldığı öncü çalışmaların ardından, 2019-2022 döneminde çok bileşenli alaşımlarda GFA ve özellik tahminine yönelik daha isabetli modeller geliştirilmiş; 2022 sonrasında ise açıklanabilirlik (explainability) ve çok görevli (multi-task) mimariler öne çıkmıştır (Ren vd., 2018; Ward vd., 2018; Alcobaça vd., 2020; Ghorbani vd., 2022; Forrest & Greer, 2022). Bu gelişim, AI'nın yalnızca mevcut verilerden özellik tahmin eden bir araç olmaktan çıkarak, deney seçimini yönlendiren ve yeni alaşım adayları öneren bir araştırma bileşenine dönüştüğünü göstermektedir.

GFA doğru tahmini, metalik cam alaşım tasarımının en temel problemlerinden birini oluşturmaktadır. Geleneksel ampirik kriterler (T_{rg} , γ , ΔT_x gibi) belirli alaşım sistemlerinde geçerliliğini korurken, yeni geliştirilen sistemlere

genellenmesinde önemli sınırlılıklar sergilemektedir (Suryanarayana vd., 2009). Bu sınırlılığın aşılmasında ML modelleri etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Ward ve arkadaşları tarafından geliştirilen çalışmada, toplu metalik cam alaşımlarının mühendislik tasarımı için ML tabanlı bir yaklaşım önerilmiş ve elementsel özelliklerden türetilen betimleyicilerin (descriptor) GFA tahmininde yüksek doğruluk sağladığı gösterilmiştir (Ward vd., 2018). Benzer şekilde, Xiong vd., tarafından yürütülen çalışmada, amorf metalik alaşımların özelliklerinin tahmin edilmesi ve anlaşılmasında ML yaklaşımının kullanılabilirliği ortaya konmuştur (Xiong vd., 2020).

Termodinamik olarak yönlendirilmiş bir ML modellemesi üzerine yapılan çalışmada, rastgele orman algoritmaları yönteminin maksimum kritik çap (D_{max}) tahmininde yaklaşık %92 düzeyinde bir belirlilik katsayısına (R^2) ulaştığı ve karakteristik sıcaklıkların modele eklenmesinin tahmin doğruluğunu artırdığı bildirilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, geliştirilen modelin yeni sentezlenen toplu metalik camların D_{max} değerlerini güvenilir biçimde öngörebildiği deneysel karşılaştırmalarla desteklenmiştir (Ghorbani vd., 2022).

Forrest ve Greer (2022) tarafından geliştirilen çalışmada, yeni bir sinir ağı mimarisi kullanılarak likidüs sıcaklığı, cam geçiş sıcaklığı, kristalleşme başlangıç sıcaklığı, maksimum döküm çapı ve cam oluşma olasılığı tek bir model üzerinden eş zamanlı olarak tahmin edilmiştir. Modelde farklı özelliklere ait tahminler, ortak katmanlarda işlenen verilerin ardından ayrı tahmin dallarına yönlendirilmiştir. Bu yapı, farklı malzeme özellikleri arasındaki ilişkilerin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamış ve klasik ampirik GFA kriterlerinin ötesinde fiziksel ilişkilerin ortaya çıkarılmasına katkı sunmuştur (Forrest & Greer, 2022).

Ren vd. (2018), ML ile yüksek verimli deneysel yöntemleri yinelemeli bir süreç içinde birleştirerek metalik cam keşfinin hızlandırılabilceğini göstermiştir. Çalışmada ince film kütüphanelerinin yüksek verimli sentez ve karakterizasyonundan elde edilen veriler, ML modelinin tahminlerini sürekli olarak güncellemek için kullanılmıştır. Model tahminleri ile deneysel sonuçların birbirini takip ettiği bu süreç sayesinde, yeni cam oluşturan kompozisyonların geleneksel deneysel yaklaşımlara göre daha kısa sürede belirlenebildiği gösterilmiştir (Ren vd., 2018). Bu yaklaşım, metalik camlarda kapalı döngü (closed-loop) malzeme keşfinin erken örneklerinden biri olarak değerlendirilebilir.

Liu vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise literatürdeki deneysel veriler kullanılarak kapsamlı bir veri kümesi oluşturulmuş ve farklı malzeme özelliklerinin tahmini için sınıflandırma ve regresyon modelleri geliştirilmiştir. Kritik döküm çapı temel alınarak oluşturulan sınıflandırma modelinde yaklaşık %98 doğruluk elde edilirken, kristalleşme sıcaklığı, cam geçiş sıcaklığı ve likidüs sıcaklığı için regresyon modelleri kurulmuştur. Ayrıca Zr-Cu-Ni-Al alaşım sistemi üzerinde regresyon modelleri ile genetik algoritmanın birlikte kullanılması sonucunda, yüksek GFA gösteren uygun alaşım kompozisyonlarının kompozisyon uzayında belirlenebildiği gösterilmiştir. Geliştirilen modelin test kümesinde R^2 değerinin 0,89'un üzerinde olduğu bildirilmiştir. Model sonuçlarının daha anlaşılır hâle getirilmesi amacıyla özellik önemi (feature importance), kısmi bağımlılık grafikleri (partial dependence plot) ve bireysel koşullu beklenti (individual conditional expectation) yöntemlerinden de yararlanılmıştır (Liu vd., 2023).

Metalik cam araştırmalarında önemli sorunlardan biri, deneysel verilerin çoğu zaman küçük ve dengesiz veri kümelerinden oluşmasıdır. Cam oluşturan ve oluşturmayan kompozisyonların veri kümesindeki dağılımının dengeli

olmaması, ML modellerinin genelleme performansını olumsuz etkileyebilir. Bunun ile ilgili yapılan çalışmada önerilen yaklaşımda, veri artırma (data augmentation) yöntemi ile fizikokimyasal özneliklerin boyut indirgeme işlemi birlikte kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde yüksek boyutlu kompozisyon uzayında GFA tahmininin iyileştirilebildiği ve elde edilen modelin yeni alaşım tasarımıyla kullanılabileceği gösterilmiştir (Zhu vd., 2026).

Gao vd. (2025), demir esaslı amorf alaşımların kritik döküm çapını (D_{max}) tahmin etmek amacıyla literatürden derlenen 241 veri noktasını kullanmıştır. Çalışmada, deneysel karakteristik sıcaklık girdilerine ihtiyaç duymayan Otomatik makine öğrenmesi (AutoML) modelleri geliştirilmiştir. Karşılıklı bilgi ve özellik mühendisliği yöntemleriyle belirlenen 10 temel fiziksel parametre kullanılarak eğitilen FastAI modeli, test kümesinde 0,817 R^2 değeri ve 1,88 ortalama kare hata (Mean Squared Error, MSE) elde etmiştir. Model çıktılarının SHAP (Shapley Additive Explanations) yöntemiyle incelenmesi sonucunda erime sıcaklığı (T_m), iş fonksiyonu farkı (δW_f) ve konfigürasyonel entropi ($\Delta S_{(r)}$) gibi parametreler için kritik eşik değerleri belirlenmiştir. Bu koşullar dikkate alınarak tasarlanan ($Fe_{0.72}B_{0.22}Nb_{0.04}Cr_{0.02}$) $_{96.5}Gd_{3.5}$ alaşımının deneysel olarak 3 mm kritik döküm çapına ulaştığı ve yüksek nötron soğurma performansı gösterdiği doğrulanmıştır (Gao vd., 2025).

Büyük hacimli amorf alaşım (Bulk Metallic Glass, BMG) sistemlerinde tahmin doğruluğunu geliştirmeye yönelik olarak Zhang, Long ve Peng (2024), CNN ile geleneksel ML algoritmalarını birleştiren hibrit bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yöntemde deneysel fiziksel özelliklere ihtiyaç duyulmadan, yalnızca alaşım kompozisyonlarından CNN aracılığıyla özellik vektörleri çıkarılmıştır. Elde edilen vektörler Rastgele Orman (Random Forest, RF), K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbors, KNN), Gradyan Artırmalı Karar Ağaçları (Gradient Boosting

Decision Trees, GBDT) ve XGBoost modellerine girdi olarak verilmiştir. CNN tabanlı hibrit modellerin, geleneksel ML yöntemleri ve klasik GFA kriterlerine göre daha yüksek tahmin doğruluğu sağladığı bildirilmiştir (Zhang vd., 2024).

Liu vd. (2024), fiziksel mekanizmaların veri gruplama sürecine dâhil edilmesinin model performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Inoue'nin amorf alaşım sınıflandırma kuralları temel alınarak veri seti yedi fizik temelli alt gruba ayrılmış ve her grup için ayrı Rastgele Orman modelleri geliştirilmiştir. Grup içi testlerde yaklaşık %96 ortalama doğruluk elde edilirken, tüm veri kümesi kullanılarak eğitilen modellerde doğruluk yaklaşık %81 düzeyinde kalmıştır. Ayrıca özellik önemlerinin (feature importance) gruplar arasında belirgin biçimde değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlar, farklı alaşım sistemlerinde ortaya çıkan amorflaşma mekanizmalarının fizik temelli alt gruplama yoluyla dikkate alınmasının model performansına önemli katkı sağlayabileceğini göstermektedir (Liu vd., 2024).

Luo vd. (2026), amorf ince film metalik camların (Thin-Film Metallic Glass, TFMG) yapısını incelemek amacıyla 6835 ikili ve üçlü kompozisyondan oluşan geniş bir veri setinden yararlanmıştır. Çalışmada, Gauss Süreç Sınıflandırma (Gaussian Process Classification, GPC) tabanlı olasılıksal bir ML modeli geliştirilmiştir. Elementel özelliklerden elde edilen tanımlayıcılar, Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis, PCA) ile daha düşük boyutlu bir gösterime dönüştürülmüştür. Geliştirilen model, bağımsız test kümesinde %87 tahmin doğruluğuna ulaşmıştır. Ayrıca magnetron sıçratma yöntemiyle üretilen Cu–Zr–Al ince filmler üzerinde gerçekleştirilen deneysel doğrulamalar, modelin çok bileşenli sistemlerde amorf faz oluşum sınırlarını başarılı biçimde tahmin edebildiğini göstermiştir (Luo vd., 2026).

Allec vd., (2024), amorf oksit camların kararlılığını incelemek amacıyla karakteristik sıcaklıkları ve cam kararlılığı (Glass Stability, GS) parametrelerini tahmin eden önceden eğitilmiş yapay sinir ağı modeli GlassNet'i değerlendirmiştir. Bireysel karakteristik sıcaklıkların (T_g , T_c , T_x , T_i) tahmininde 0,93 ile 0,98 arasında değişen yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Buna karşın, bu tahminlerin fiziksel denklemlerde birlikte kullanılmasıyla hesaplanan GS değerlerinde hata birikimi (compounding error) ortaya çıkmıştır. Çalışmada ayrıca, Rastgele Orman modellerinin GlassNet ile benzer tahmin doğruluğu sağlayabildiği ve amorf bölge sınırlarının belirlenmesinde özellikle $H'(T_c)$ parametresinin güvenilir bir gösterge olduğu bildirilmiştir (Allec vd., 2024).

Schultz vd., (2025) ise ML modellerinin farklı kimyasal sistemlere genellenebilirliğini inceleyerek amorf alaşımların kritik soğutma hızını (R_c) tahmin etmeye yönelik bir regresyon modeli geliştirmiştir. Modelde birincil elementel özelliklerin yanı sıra kuantum mekaniksel hesaplamalar ve atomik ölçekli simülasyonlardan elde edilen fiziksel özellikler kullanılmıştır. Moleküler dinamik simülasyonları ve ML potansiyellerinden elde edilen verilerin de modele dâhil edilmesi, farklı ölçekteki fiziksel bilgilerin birlikte değerlendirilmesini sağlamıştır. Farklı kimyasal sistemlerin test kümesinden tamamen dışarıda bırakıldığı sistem-dışı doğrulama (leave-system-out) testlerinde 0,78 R^2 ve 0,76 $lg(K/s)$ MAE değerleri elde edilmiştir. SHAP analizleri sonucunda ideal konfigürasyonel entropi, konveks kabuk üzerindeki enerji (E_{above}), ısı kapasitesi değişimi (ΔC_p) ve icosahedral Voronoi poliedra oranının kritik soğutma hızının tahmininde öne çıkan parametreler olduğu belirlenmiştir (Schultz vd., 2025).

Bu çalışmalar, ML yöntemlerinin metalik cam araştırmalarında kompozisyon ve GFA tahmininin ötesine

geçtiğini göstermektedir. Kritik döküm çapı, amorf faz oluşumu, cam kararlılığı ve kritik soğutma hızı gibi farklı özelliklerin tahmininde deneysel verilerin yanı sıra fiziksel ve atomik ölçekte elde edilen bilgilerden de yararlanılabilmektedir. ML modelleri ayrıca yeni alaşım kompozisyonlarının belirlenmesini ve geniş kompozisyon alanlarının daha az sayıda deneyle taranmasını desteklemektedir. Özellikle yüksek verimli deneylerle birlikte kullanılan kapalı döngü yaklaşımlar, model tahminleri ile deneysel sonuçların birbirini izlediği daha hızlı bir malzeme keşif sürecine olanak sağlamaktadır. Küçük veri kümelerinde veri artırma ve fiziksel olarak anlamlı özniteliklerin kullanılması modelin genellenebilirliğini desteklerken, SHAP gibi açıklanabilir AI yöntemleri tahminlerde etkili olan değişkenlerin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu yönüyle ML, metalik camlarda özellik tahmini yanı sıra, fiziksel bilgiyi deneysel verilerle birleştirerek yeni alaşımların tasarımını ve keşif sürecini yönlendiren bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 1. Metalik camların cam oluşturma yeteneği ve özelliklerinin tahmininde makine öğrenmesi kullanan seçilmiş çalışmalar

Çalışma	Kullanılan Yöntem	Temel Bulgu
(Ward vd., 2018)	Regresyon (öznitelik mühendisliği)	Elementsel betimleyicilerle GFA tahmininde yüksek doğruluk elde edilmiştir.
(Ghorbani vd., 2022)	Rastgele orman algoritmaları	D_{max} tahmininde $R^2 \approx 0,92$ düzeyine ulaşılmış; karakteristik sıcaklıkların eklenmesi doğruluğu artırmıştır.
(Forrest & Greer, 2022)	Çok görevli yapay sinir ağı	T_l , T_g , T_x , D_{max} ve cam oluşma olasılığı tek modelle eş zamanlı tahmin edilmiştir.
(Ren vd., 2018)	Kapalı döngü ML + yüksek verimli deney	İnce film kütüphanelerinde yeni cam oluşturan kompozisyonlar hızla belirlenmiştir.

(Liu vd., 2023)	Sınıflandırma, Regresyon, Genetik Algoritma	Sınıflandırma doğruluğu $\approx$ %98; Zr-Cu-Ni-Al sisteminde optimum kompozisyon belirlenmiştir.
(Xiong vd., 2019)	Regresyon (elastik özellik-GFA)	Elastik modül ile GFA eş zamanlı ve yüksek doğrulukla tahmin edilmiştir.
(Alcobaça vd., 2020)	Açıklanabilir ML (XAI)	T_g tahmininde yüksek doğruluk korunurken model yorumlanabilirliği artırılmıştır.
(Liu vd., 2023)	Karşılaştırmalı öznetelik analizi	Alan bilgisi temelli özneteliklerin genel özneteliklere göre çok daha yüksek tahmin gücü sağladığı gösterilmiştir.
(Liu vd., 2024)	Rastgele Orman Algoritması	Fiziksel içgörüyeye dayalı alt gruplandırma ile $\%96 \pm 2$ doğruluk elde edilmiştir.
(Schultz vd., 2025)	XGBoost, Aktif Öğrenme ve Ab initio Destekli ML Potansiyelleri	Modelde $R^2=0,78$ ve $MAE=0,76$ lg(K/s) elde edilmiş; S_{mix} , E_{above} ve DC en etkili özellikler olarak belirlenmiştir.
(Gao vd., 2025)	AutoGluon (12 algoritma: FastAI, XGBoost, CatBoost vb.)	NeuralNetFastAI en iyi performansı ($R^2=0.817$, $MSE=1.88$) göstermiştir. Kritik GFA kriterleri belirlenmiştir.
(Allec vd., 2024)	GlassNet ve Rastgele Orman Algoritması	Rastgele Orman modelleri, GlassNet ile benzer performans göstermiş. $H'(T_c)$, GFA tahmininde en güvenilir gösterge olarak belirlenmiştir.
(Zhang vd., 2024)	CNN-RF (Evrişimsel Sinir Ağı ve Rastgele Orman)	CNN tabanlı yaklaşım, manuel özellik çıkarımına kıyasla yüksek GFA tahmin başarısı sağlamış ve eğitimde $\%97,75$ R^2 elde edilmiştir.
(Luo vd., 2026)	Bayesyen Sınıflandırma (Gaussian Process Classification)	$\%87$ tahmin doğruluğu elde edilmiştir. TFMG oluşumunun kompozisyonel düzensizlik, termodinamik ve elektronik yapı özelliklerine bağlı olduğu belirlenmiştir.

4.3. Kimyasal Kompozisyon Tasarımı, Optimizasyon ve Ters Tasarım Yaklaşımları

ML'nin metalik cam sentezindeki en dönüştürücü katkılarından biri, kimyasal kompozisyonun ileri tasarımından (forward design) ters tasarıma (inverse design) geçişte gözlemlenmektedir. Geleneksel yaklaşımda belirli bir kompozisyonun özellikleri tahmin edilirken, ters tasarım yaklaşımında hedef özelliklerden yola çıkılarak bu özellikleri sağlayacak kompozisyonlar üretilmektedir.

Bu bağlamda geliştirilen varyasyonel oto-kodlayıcı (variational autoencoder, VAE) tabanlı modellerde, gizil uzayda (latent space) basit işlemler gerçekleştirilerek yeni metalik cam kompozisyonlarının otomatik olarak üretilebildiği gösterilmiştir. Binlerce yeni kompozisyonun rastgele üretildiği bu tür çalışmalarda, literatürde bildirilmemiş bazı kompozisyonların mevcut alaşımlara kıyasla daha yüksek GFA'ya sahip olabileceği öngörülmüştür. Bu yaklaşımın optimizasyon algoritmaları ile birleştirilmesi, gizil uzayda yüksek GFA'ya sahip yeni metalik camların aranmasını verimli hâle getirmektedir.

Yüksek entropili alaşımlar alanında geliştirilen benzer bir yaklaşımda, faz tasarımının ML rehberliğinde değerlendirilmesi ve keşfedilmesi hedeflenmiş; bu yöntemin kompozisyonel karmaşıklığı yüksek sistemlerde de uygulanabilir olduğu gösterilmiştir (Zhou vd., 2019). Bu tür yaklaşımların metalik camlara, özellikle yüksek entropili metalik camlar (high-entropy metallic glasses) gibi kimyasal olarak karmaşık sistemlere uyarlanması, alandaki güncel araştırma eğilimlerinden birini oluşturmaktadır.

Küçük veri kümeleri ile çalışmanın getirdiği zorluk, metalik cam araştırmalarında sıklıkla karşılaşılan bir kısıtlayıcı unsurdur; zira deneysel BMG veri tabanları, diğer malzeme sınıflarına kıyasla görece sınırlı sayıda veri noktası içermektedir.

Bu zorluğun aşılmasında transfer öğrenme stratejilerinin uygulanabilirliği araştırılmış ve küçük veri kümelerinde dahi güvenilir tahminler elde edilebileceği gösterilmiştir (Zhang & Ling, 2018). Bu bulgu, kompozisyon optimizasyonu çalışmalarının, veri kısıtlı metalik cam sistemlerine de genişletilebileceğine işaret etmektedir.,

4.4. Mekanik, Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerin Yapay Zekâ ile Tahmini

Kompozisyon tasarımının yanı sıra, ML yöntemleri metalik camların mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kompozisyondan tahmin edilmesinde de kullanılmaktadır. Xiong vd. 2019 tarafından elde edilen sonuçlar, ML yöntemlerinin toplu metalik camların elastik özellikleri ile GFA eş zamanlı olarak tahmin etmede kullanılabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, cam geçiş sıcaklığının tahminine yönelik açıklanabilir bir ML modelinde yüksek tahmin doğruluğunun yanı sıra kompozisyon ile özellikler arasındaki ilişkilerin yorumlanabildiği ortaya konmuştur (Alcobaça vd., 2020). Bu tür modeller, yalnızca tahmin sonucuna bakmadan, tahminin hangi malzeme özellikleriyle ilişkili olduğuna da odaklanması açısından önem taşımaktadır.

Model performansında alan bilgisinin rolünü inceleyen bir çalışmada, fiziksel olarak anlamlı özniteliklerle oluşturulan modellerin genel malzeme özniteliklerine veya yalnızca kompozisyona dayalı modellere göre daha yüksek tahmin gücü sağladığı belirlenmiştir. İnsan uzmanlığına dayalı modelin tahmin gücünün genel malzeme modeline kıyasla yirmi kattan fazla olduğu, yalnızca kompozisyona dayalı modelin ise bilinmeyen kompozisyon uzayında sınırlı tahmin gücü gösterdiği bildirilmiştir (Liu vd., 2023). Bu sonuç, özellikle veri miktarının sınırlı olduğu malzeme problemlerinde fiziksel ve alan bilgisinin ML modellerine dâhil edilmesinin önemini göstermektedir.

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, ML yöntemlerinin GFA'nın yanı sıra elastik modül, sertlik, cam geçiş sıcaklığı (T_g) ve diğer termal ve yapısal özelliklerin tahmininde de kullanılabildiği görülmektedir. Böylece deneysel karakterizasyon gerektiren adayların önceden belirlenmesi ve deney sayısının azaltılması mümkün hâle gelmektedir. Bu durum, yeni alaşım adaylarının değerlendirilmesinde hem zaman hem de kaynak tasarrufu sağlayabilmektedir.

Bununla birlikte, yüksek tahmin doğruluğu tek başına yeterli değildir. Özellikle malzeme biliminde kullanılan modellerin fiziksel açıdan anlamlı sonuçlar üretmesi ve bu sonuçların hangi değişkenlerden kaynaklandığının anlaşılabilmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle son yıllarda fiziğe dayalı sinir ağları (Physics-Informed Neural Networks, PINN) ve açıklanabilir yapay zekâ (Explainable Artificial Intelligence, XAI) yaklaşımları öne çıkmıştır.

Rastgele orman, gradyan artırmalı ağaçlar ve derin sinir ağları gibi yöntemler doğrusal olmayan ilişkileri başarılı biçimde modelleyebilse de karar süreçlerinin doğrudan yorumlanamaması önemli bir sınırlılık oluşturur (Choudhary vd., 2022). PINN yaklaşımı, fiziksel bilgileri modelin öğrenme sürecine dâhil ederek fiziksel açıdan tutarsız sonuçların ortaya çıkmasını sınırlandırmayı amaçlar. Örneğin termodinamik kısıtların modele eklenmesi, modelin malzemenin fiziksel davranışıyla uyumsuz tahminler üretmesini önlemeye yardımcı olabilir. XAI yöntemleri ise bir tahminin hangi özelliklerden ve ne ölçüde etkilendiğini ortaya koyarak model sonuçlarının yorumlanmasını kolaylaştırır. SHAP (SHapley Additive exPlanations) gibi yöntemler, atomik boyut farkı, karışım entalpisi ve valans elektron yoğunluğu gibi özelliklerin tahmin üzerindeki katkısının incelenmesine olanak tanır (Alcobaça vd., 2020).

PINN ve XAI yaklaşımlarının birlikte değerlendirilmesi, metalik cam tasarımında yüksek tahmin doğruluğunun sağlanmasının yanında, aynı zamanda fiziksel temeli ve karar süreçleri daha iyi anlaşılabilen modellerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu yaklaşım, AI modellerinin deneysel ve teorik malzeme bilgisiyle daha güçlü biçimde bütünleştirilmesi açısından önemli bir adım oluşturmaktadır.

4.5. Kimyasal Kompozisyonların Hazırlanmasında Yapay Zekâ Destekli Yaklaşımlar

Metalik cam üretiminde ilk ve en önemli aşamalardan biri, hedeflenen özellikleri sağlayacak kimyasal kompozisyonun belirlenmesi ve uygun oranlarda hazırlanmasıdır. Geleneksel yaklaşımda ana alaşım elementleri atomik yarıçap farkı, karışım entalpisi ve elektronegatiflik farkı gibi ampirik ölçütler dikkate alınarak seçilmektedir. Daha sonra kompozisyon üzerinde yapılan küçük değişiklikler deneysel olarak test edilmektedir. Yapılan test işleminden sonra uygun bileşim deneme-yanılma yoluyla belirlenmektedir (Inoue, 2000). Ancak bileşen sayısının artmasıyla birlikte incelenmesi gereken olası kompozisyonların sayısı da hızla artmaktadır, Özellikle dörtlü ve beşli alaşım sistemlerinde bu yaklaşım zaman ve kaynak açısından önemli bir yük oluşturmaktadır.

AI destekli kompozisyon tasarımında ise bu geniş arama alanının daha sistematik biçimde incelenmesi amaçlanmaktadır. Bunun için atomik yarıçap, ergime sıcaklığı, elektronegatiflik, valans elektron sayısı ve atomik hacim gibi elementsel özelliklerden yararlanılarak çeşitli betimleyiciler oluşturulmaktadır. Bu betimleyicilerden elde edilen öznelik uzayı üzerinde eğitilen regresyon ve sınıflandırma modelleri, farklı element kombinasyonlarının ve atomik oranların GFA üzerindeki etkisini tahmin edebilmektedir (Ward vd., 2018). Böylece tüm kompozisyonların deneysel olarak denenmesi

yerine, model tarafından daha yüksek GFA göstermesi beklenen adaylar öncelikli olarak belirlenebilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar belirlenen bu adaylara yönlendirilebilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle çok bileşenli alaşımlarda kompozisyon taramasının daha kısa sürede gerçekleştirilmesine ve deneysel kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sağlamaktadır.

Kompozisyon tasarımında kullanılan betimleyiciler, elementlerin tekil özelliklerinin yanı sıra elementler arasındaki fiziksel ve termodinamik ilişkileri de yansıtabilmektedir. Bu nedenle çok bileşenli sistemlerde ML modellerine girdi olarak kullanılan betimleyicilerin, alaşımın cam oluşturma davranışını açıklayabilecek özellikleri kapsamı önem taşımaktadır. Çok bileşenli metalik cam sistemlerinde kompozisyon tasarımını yönlendiren başlıca termodinamik ve kristalografik betimleyiciler aşağıda verilmiştir (Takeuchi & Inoue, 2005).

Karışım entropisi: $\Delta S_{\text{mix}} = -R \cdot \sum (c_i \cdot \ln c_i)$ (burada R gaz sabitini, c_i ise i. elementin atomik oranını temsil etmektedir)

Valans elektron yoğunluğu: $VEC = \sum (c_i \cdot VEC_i)$ (amorflaşma kararlılığı ile kristal fazlar arasındaki geçiş sınırlarının belirlenmesinde kritik bir betimleyicidir)

Elektronegatiflik farkı: $\Delta\chi = \sqrt{\sum c_i \cdot (\chi_i - \chi_{\text{ort}})^2}$ (burada χ_i Pauling elektronegatiflik değerini, χ_{ort} ise ortalama elektronegatifliği ifade etmektedir)

Bu tür betimleyicilerin doğrudan elementel özneliklerin yerine veya onlarla birlikte modele dâhil edilmesi, cam oluşum mekanizmasıyla fiziksel olarak ilişkili bir temsil sunmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle veri miktarının sınırlı olduğu durumlarda modelin kompozisyon ile malzeme özellikleri arasındaki ilişkileri daha kararlı biçimde öğrenmesine katkı sağlayabilmektedir.

Kompozisyonun hazırlanması aşamasında ise bileşen oranlarının hassas biçimde belirlenmesi önem taşımaktadır. Ana

bileşenlerin ağırlıkça veya atomik yüzde olarak yalnızca %1–2 oranında değişmesi bile GFA ve buna bağlı olarak malzemenin özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle ML modelleri uygun kompozisyonun belirlenmesinin yanında, mevcut bir kompozisyonun küçük değişimlere karşı duyarlılığının incelenmesinde de kullanılabilir. Duyarlılık analizi (sensitivity analysis), hangi elementlerin oranındaki değişimlerin hedeflenen özellikler üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koyarak kompozisyonun daha kontrollü biçimde ayarlanmasına yardımcı olmaktadır. Bu yaklaşım, alaşımlama sürecinde kalite kontrolünün geliştirilmesinin yanı sıra gereksiz miktarda alaşım elementinin kullanımının önlenmesine ve dolayısıyla üretim maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlayabilir (Liu vd., 2023).

Ters tasarım yaklaşımları bu süreci bir adım ileri taşıyarak hedeflenen özelliklerden uygun kompozisyona ulaşılmasını mümkün kılmaktadır. Örneğin belirli bir mekanik dayanım, elastik özellik veya termal davranış hedeflendiğinde, model bu özellikleri sağlayabilecek kompozisyon adaylarını belirleyebilir. Elde edilen adayların üretilebilirlik ve cam oluşturma koşulları açısından değerlendirilmesi ile, hedef özelliklere uygun bir alaşım reçetesi oluşturulabilir. Böylece alaşım geliştirme süreci yalnızca mevcut kompozisyonların özelliklerinin tahmin edilmesine dayanmaktan çıkarak, istenen özelliklerden hareketle yeni kompozisyonların tasarlanabildiği daha sistematik bir yapıya dönüşmektedir. Bu yaklaşım, deneysel deneme sayısının azaltılmasına ve özellikle çok bileşenli alaşımlarda geliştirme sürecinin hızlandırılmasına katkı sağlayabilir.

5. METALİK CAM ARAŞTIRMALARINDA VERİ TABANLARI VE VERİ ALTYAPISI

AI destekli malzeme tasarımında elde edilen sonuçların güvenilirliği, kullanılan verilerin miktarı kadar niteliğine ve tutarlılığına da bağlıdır. MGI kapsamında geliştirilen Materials Project, AFLOW ve Open Quantum Materials Database gibi açık veri tabanları, çok sayıda malzemeye ilişkin hesaplamalı ve deneysel veriyi bir araya getirmektedir. Bununla birlikte, bu veri tabanlarının önemli bir bölümü kristal yapıli malzemelere odaklanmakta ve amorf malzemelere ilişkin veri miktarı görece sınırlı kalmaktadır (Liu vd., 2020). Bu durum, metalik camlar üzerinde çalışan araştırmacıların farklı bilimsel yayınlardan elde edilen verileri manuel olarak derlemesini gerektirmektedir. Farklı kaynaklardan toplanan verilerin format, ölçüm koşulları ve içerik açısından farklılık göstermesi ise veri kümelerinin bütünlüğünü ve doğrudan karşılaştırılabilirliğini zorlaştırmaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla metalik camlara özgü veri kümeleri oluşturulmaya başlanmıştır. Bu veri kümelerinde kritik döküm çapı (D_{max}), cam geçiş sıcaklığı (T_g), kristalleşme sıcaklığı (T_x), likidüs sıcaklığı (T_l) ve kimyasal kompozisyon gibi farklı parametreler bir araya getirilmektedir. Böylece ML modellerinin daha geniş ve düzenli veri kümeleri üzerinde eğitilmesi ve farklı çalışmaların sonuçlarının daha sağlıklı biçimde karşılaştırılması mümkün hâle gelmektedir (Ward vd., 2018). Bununla birlikte, farklı araştırma gruplarının kullandığı üretim yöntemleri, ölçüm koşulları ve karakterizasyon teknikleri arasında önemli farklılıklar bulunabilmektedir. Aynı özelliğın farklı koşullarda ölçülmesi, veri değeri arasında doğrudan karşılaştırılmasını güçlendirebilmektedir. Bu nedenle farklı kaynaklardan elde edilen verilerin birleştirilmesinden önce eksik verilerin belirlenmesi, değışkenlerin ortak bir yapıya dönüştürülmesi ve ölçüm koşullarının mümkün olduğunca dikkate alınması önem taşımaktadır.

Veri altyapısının geliştirilmesinde veri miktarının artırılmasının yanında, verilerin izlenebilir ve yeniden kullanılabilir olması da önemlidir. Deneysel koşulların, kullanılan kompozisyonların ve ölçüm yöntemlerinin veriyle birlikte kayıt altına alınması, daha sonra geliştirilecek AI modellerinin güvenilirliğini artırabilir. Ayrıca veri ve kodların araştırmalarla birlikte kamuya açık platformlarda paylaşılması, sonuçların bağımsız araştırmacılar tarafından yeniden üretilmesini ve farklı veri kümeleri ile karşılaştırılmasını kolaylaştırmaktadır. GitHub gibi platformlarda kod ve veri kümelerinin paylaşılması, metalik cam araştırmalarında açık bilim yaklaşımının gelişmesine katkı sağlayan uygulamalardan biridir.

Gelecekte daha kapsamlı ve standartlaştırılmış veri tabanlarının oluşturulması, metalik cam araştırmalarında AI uygulamalarının gelişimini doğrudan destekleyecektir. Özellikle deneysel verilerin üretim koşulları, kompozisyon, mikroyapı ve malzeme özellikleriyle birlikte düzenli biçimde saklanması, farklı araştırma gruplarından elde edilen verilerin aynı çerçevede değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Böyle bir veri altyapısı, başarılı ML modellerinin geliştirilmesinin yanında, aynı zamanda yeni metalik cam kompozisyonlarının daha hızlı belirlenmesini ve deneysel çalışmaların daha etkin biçimde planlanmasını da destekleyecektir.

6. ZORLUKLAR, SINIRLILIKLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

AI destekli metalik cam tasarımında karşılaşılan temel sorunlardan biri, yeterli miktarda ve güvenilir nitelikte deneysel veriye ulaşılmasıdır. Metalik camlara ilişkin veriler farklı laboratuvarlardan, üretim koşullarından ve karakterizasyon yöntemlerinden elde edildiği için veri kümeleri arasında önemli

farklılıklar oluşabilmektedir. Bu durum, belirli bir veri kümesi üzerinde başarılı sonuç veren modellerin farklı alarım sistemlerine veya deney koşullarına uygulandığında aynı performansı göstermesini zorlaştırmaktadır (Zhang & Ling, 2018). Bunun yanında, cam oluşturmaya kompozisyonlara ilişkin sonuçların literatürde daha sınırlı biçimde raporlanması da veri kümelerinde dengesizliğe yol açmaktadır. Negatif sonuçların yeterince temsil edilmemesi, modelin yalnızca başarılı örneklerden öğrenmesine ve farklı kompozisyonların değerlendirilmesinde yanlış sonuçlar üretmesine neden olabilmektedir (Zhu vd., 2026).

Veri sorununa ek olarak, geliştirilen modellerin fiziksel açıdan yorumlanabilmesi de önemli bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. DL modelleri karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri başarılı biçimde öğrenebilse de model kararlarının hangi fiziksel değişkenlere dayandığını doğrudan açıklamak her zaman mümkün değildir. Bu nedenle XAI yaklaşımlarının malzeme bilgisiyle birlikte kullanılması önem kazanmaktadır. Modelin hangi kompozisyon veya fiziksel özelliklerden etkilendiğinin belirlenmesi, elde edilen sonuçların istatistiksel açıdan olduğu gibi, malzeme davranışı açısından da değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır (Alcobaça vd., 2020).

Bir diğer önemli konu, model tahminlerinin deneysel olarak doğrulanmasıdır. Yüksek tahmin doğruluğu tek başına yeni bir alarımın gerçekten istenen özellikleri sağlayacağını garanti etmemektedir. Bu nedenle hesaplamalı tahminlerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması ve gerektiğinde modelin yeni verilerle güncellenmesi gerekmektedir. Kapalı döngü yaklaşımlar bu süreci daha sistematik hâle getirmektedir. Bu yapılarda model tarafından belirlenen adaylar deneysel olarak test edilmektedir. Elde edilen sonuçlar yeniden modele aktarılmakta ve sonraki tahminler bu yeni bilgiler doğrultusunda gerçekleştirilmektedir (Ren vd., 2018). Böylece deney ve

hesaplama arasındaki etkileşim güçlenirken, geniş kompozisyon alanlarının daha az sayıda deneyle araştırılması mümkün hâle gelmektedir. Uzun vadede bu yaklaşımın daha ileri bir aşaması, ML modellerinin robotik sentez sistemleri ve yüksek verimli karakterizasyon teknikleriyle birleştirildiği otonom laboratuvarların geliştirilmesidir. Böyle bir sistemde kompozisyon seçimi, malzemenin sentezlenmesi, karakterizasyonu ve elde edilen sonuçların yeniden modele aktarılması aynı çalışma döngüsü içinde gerçekleştirilebilir. Bu yapı, geleneksel yöntemlerle uzun zaman alan geniş kapsamlı kompozisyon taramalarının daha kısa sürede gerçekleştirilmesine olanak sağlayabilir. DL tabanlı malzeme keşif çalışmalarının milyonlarca aday arasından deneysel olarak incelenebilecek malzemelerin belirlenmesine katkı sağlaması, bu yaklaşımın ölçeklenebilirliğini göstermektedir (Merchant vd., 2023).

Gelecekte Generative AI yöntemlerinin metalik cam kompozisyonlarının tasarımında daha fazla kullanılması beklenmektedir. Varyasyonel oto-kodlayıcılar ve GAN gibi modeller, mevcut veri kümelerinden öğrenerek daha önce incelenmemiş kompozisyonların oluşturulmasına yardımcı olabilir. Bunun yanında, süreç, yapı ve özellik arasındaki ilişkileri aynı model içerisinde ele alan çok görevli öğrenme (multi-task learning) yaklaşımları, özellikle eklemeli imalatla üretilen metalik camlarda farklı değişkenlerin birlikte değerlendirilmesini sağlayabilir (Forrest & Greer, 2022). Fiziksel kısıtların ML modellerine dâhil edilmesi de tahminlerin malzeme davranışıyla daha uyumlu hâle getirilmesine ve modelin farklı koşullardaki genellenebilirliğinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Hesaplama maliyeti ve uzmanlık gereksinimi de bu alandaki uygulamaların yaygınlaşmasını etkileyen faktörler arasındadır. Özellikle DL modellerinin eğitimi yüksek hesaplama gücü gerektirmektedir. Model geliştirme sürecinde kapsamlı hiperparametre ayarlamaları da yapılabilmektedir. Bu durum,

sınırlı donanım ve insan kaynağına sahip araştırma grupları için önemli bir engel oluşturabilir. AutoML yöntemleri, model seçimi ve hiperparametre ayarlama süreçlerinin otomatikleştirilmesi yoluyla bu yükün azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Veri standardizasyonu da gelecekte üzerinde durulması gereken konulardan biridir. Farklı laboratuvarlarda üretilen verilerin ortak ölçütler ve benzer veri formatları kullanılarak raporlanması, farklı kaynaklardan elde edilen bilgilerin bir araya getirilmesini kolaylaştıracaktır. Daha standart ve paylaşılabılır veri altyapılarının oluşturulması, federatif öğrenme (federated learning) gibi yöntemlerin metalik cam araştırmalarında kullanılmasına da zemin hazırlayabilir. Böylece farklı kurumların verilerini doğrudan merkezi bir veri tabanında birleştirmesine gerek kalmadan ortak modeller geliştirmesi mümkün olabilir. Bu gelişmeler, veri paylaşımı, hesaplama kaynakları ve deneysel doğrulama arasındaki bütünlüğün güçlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

7. SONUÇ

Bu bölümde, AI ve ML yöntemlerinin metalik camların tasarımı, sentezi ve üretim süreçlerindeki kullanım alanları ele alınmıştır. İncelenen çalışmalar, veri odaklı yaklaşımların yalnızca mevcut malzemelerin özelliklerini tahmin etmekle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda cam oluşturma yeteneğinin değerlendirilmesi, kompozisyon tasarımı, üretim parametrelerinin belirlenmesi ve yeni alaşım adaylarının keşfi gibi farklı aşamalarda kullanılabildiğini göstermektedir. Özellikle geniş kompozisyon alanlarının kısa sürede taranabilmesi, deneysel çalışmaların daha hedefli biçimde planlanmasına katkı sağlamaktadır.

Literatürdeki sonuçlar, ML modellerinin kritik döküm çapı, cam oluşturma yeteneği, cam geçiş sıcaklığı, mekanik

özellikler ve kritik soğutma hızı gibi farklı malzeme özelliklerinin tahmininde kullanılabildiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte model başarısı yalnızca kullanılan algoritmaya bağlı değildir. Veri kalitesi, fiziksel olarak anlamlı özniteliklerin seçimi, farklı alaşım sistemlerine genellenebilirlik ve deneysel doğrulama da elde edilen sonuçların güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle gelecekteki çalışmaların daha yüksek tahmin doğruluğuna sahip olmasının yanında, aynı zamanda daha güvenilir, açıklanabilir ve fiziksel açıdan tutarlı modellere odaklanması önem taşımaktadır.

Metalik cam araştırmalarında AI'nın gelişimi, veri altyapısının güçlendirilmesi ile de yakından ilişkilidir. Daha kapsamlı ve standartlaştırılmış veri kümelerinin oluşturulması, farklı araştırma gruplarından elde edilen sonuçların birlikte değerlendirilmesini kolaylaştıracaktır. Deneysel çalışmaların ML modelleriyle sürekli etkileşim hâlinde olduğu kapalı döngü sistemlerinin yaygınlaşması ise malzeme keşif sürecinin daha hızlı ve sistematik biçimde yürütülmesine olanak sağlayabilir. Generative AI, fiziğe dayalı modeller, çok görevli öğrenme ve otonom deney sistemlerindeki gelişmeler de bu dönüşümün önemli bileşenleri arasında yer almaktadır.

Bu gelişmeler, metalurji ve malzeme mühendisliği alanında ihtiyaç duyulan yetkinliklerin de çeşitlenmesine neden olmaktadır. Geleceğin araştırmacılarının malzeme bilimi ve metalurjiye ilişkin temel bilgilerin yanında, aynı zamanda ML, istatistiksel modelleme, veri analizi ve veri yönetimi konularında da yeterli bilgiye sahip olması önem kazanmaktadır. Disiplinler arası bu yaklaşım, AI yöntemlerinin malzeme mühendisliği problemlerine daha doğru biçimde uyarlanmasına ve elde edilen sonuçların fiziksel açıdan anlamlandırılmasına katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak AI, metalik cam araştırmalarında deneysel yöntemlerin yerine geçen bir araçtan ziyade, deneysel ve hesaplamalı yaklaşımları birlikte değerlendirmeyi sağlayan tamamlayıcı bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Veri, fiziksel bilgi ve deneysel doğrulamanın aynı süreç içerisinde birleştirilmesi, yeni metalik camların daha hızlı ve sistematik biçimde geliştirilmesi için önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bu potansiyelin gelecekte biyomedikal implantlar, spor ekipmanları, elektronik bileşenler ve mikro-elektromekanik sistemler gibi yapısal ve işlevsel uygulamalara yönelik yeni nesil metalik camların geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Alcobaça, E., Mastelini, S. M., Botari, T., Pimentel, B. A., Cassar, D. R., de Carvalho, A. C. P. L. F., & Zanotto, E. D. (2020). Explainable machine learning algorithms for predicting glass transition temperatures. *Acta Materialia*, 188, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.047>
- Allec, S. I., Lu, X., Cassar, D. R., Nguyen, X. T., Hegde, V. I., Mahadevan, T., ... Saal, J. E. (2024). Evaluation of GlassNet for physics-informed machine learning of glass stability and glass-forming ability. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(12), 7784–7799. <https://doi.org/10.1111/jace.19937>
- Bordeenithikasem, P., Stolpe, M., Elsen, A., & Hofmann, D. C. (2018). Glass forming ability, flexural strength, and wear properties of additively manufactured Zr-based bulk metallic glasses produced through laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 21, 312–317. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.018>
- Butler, K. T., Davies, D. W., Cartwright, H., Isayev, O., & Walsh, A. (2018). Machine learning for molecular and materials science. *Nature*, 559(7715), 547–555. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0337-2>
- Choudhary, K., DeCost, B., Chen, C., Jain, A., Tavazza, F., Cohn, R., ... Wolverton, C. (2022). Recent advances and applications of deep learning methods in materials science. *npj Computational Materials*, 8(1), 59. <https://doi.org/10.1038/s41524-022-00734-6>
- Forrest, R. M., & Greer, A. L. (2022). Machine-learning improves understanding of glass formation in metallic systems.

Digital Discovery, 1(4), 369–380.
<https://doi.org/10.1039/D2DD00025D>

Gao, J., Hou, J., Wu, Y., Ji, B., Wang, D., Qiu, K., ... Wang, J. (2025). Machine learning-enabled design of Fe-based bulk metallic glasses for superior thermal neutron absorption properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 1010, Makale 177595.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177595>

Ghorbani, A., Askari, A., Malekan, M., & Nili-Ahmadabadi, M. (2022). Thermodynamically-guided machine learning modelling for predicting the glass-forming ability of bulk metallic glasses. *Scientific Reports*, 12(1), 11605.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-15822-2>

Green, M. L., Choi, C. L., Hatrick-Simpers, J. R., Joshi, A. M., Takeuchi, I., Barron, S. C., ... Zakutayev, A. (2017). Fulfilling the promise of the materials genome initiative with high-throughput experimental methodologies. *Applied Physics Reviews*, 4(1), 011105.
<https://doi.org/10.1063/1.4977487>

Greer, A. L. (1995). Metallic glasses. *Science*, 267(5206), 1947–1953. <https://doi.org/10.1126/science.267.5206.1947>

Guo, S., & Liu, C. T. (2010). New glass forming ability criterion derived from cooling consideration. *Intermetallics*, 18(10), 2065–2068.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.06.012>

Inoue, A. (2000). Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys. *Acta Materialia*, 48(1), 279–306.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00300-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00300-6)

Jain, A., Ong, S. P., Hautier, G., Chen, W., Richards, W. D., Dacek, S., ... Persson, K. A. (2013). Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to

- accelerating materials innovation. *APL Materials*, 1(1), 011002. <https://doi.org/10.1063/1.4812323>
- Klement, W., Willens, R. H., & Duwez, P. (1960). Non-crystalline structure in solidified gold–silicon alloys. *Nature*, 187(4740), 869–870. <https://doi.org/10.1038/187869a0>
- Kruzic, J. J. (2016). Bulk metallic glasses as structural materials: A review. *Advanced Engineering Materials*, 18(8), 1308–1331. <https://doi.org/10.1002/adem.201600066>
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Li, X. P., Roberts, M. P., O’Keeffe, S., & Kruzic, J. J. (2016). Selective laser melting of Zr-based bulk metallic glasses: Processing, microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*, 112, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.071>
- Liu, C., Wang, X., Cai, W., He, Y., & Su, H. (2023). Machine learning aided prediction of glass-forming ability of metallic glass. *Processes*, 11(9), 2806. <https://doi.org/10.3390/pr11092806>
- Liu, G., Sohn, S., Kube, S. A., Raj, A., Mertz, A., Nawano, A., ... Schroers, J. (2023). Machine learning versus human learning in predicting glass-forming ability of metallic glasses. *Acta Materialia*, 243, 118497. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118497>
- Liu, G., Sohn, S., O’Hern, C. S., Gilbert, A. C., & Schroers, J. (2024). Effective subgrouping enhances machine learning prediction in complex materials science phenomena: Inoue's subgrouping in discovering bulk

- metallic glasses. *Acta Materialia*, 265, Makale 119590.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119590>
- Liu, Y., Niu, C., Wang, Z., Gan, Y., Zhu, Y., Sun, S., & Shen, T. (2020). Machine learning in materials genome initiative: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 57, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.01.067>
- Lu, Z. P., & Liu, C. T. (2002). A new glass-forming ability criterion for bulk metallic glasses. *Acta Materialia*, 50(13), 3501–3512. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00166-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00166-0)
- Lu, Z. P., Bei, H., & Liu, C. T. (2007). Recent progress in quantifying glass-forming ability of bulk metallic glasses. *Intermetallics*, 15(4), 618–624. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2006.10.017>
- Luo, X., Mäkinen, T., Huo, W., Bonfanti, S., Chen, Z., Mizohata, K., ... Alava, M. (2026). Data-driven prediction of thin-film metallic glass forming ability via Bayesian classification and experimental verification in the Cu–Zr–Al system. *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/D6RA07674B>
- McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>
- Meng, L., McWilliams, B., Jarosinski, W., Park, H.-Y., Jung, Y.-G., Lee, J., & Zhang, J. (2020). Machine learning in additive manufacturing: A review. *JOM*, 72(6), 2363–2377. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04155-y>
- Merchant, A., Batzner, S., Schoenholz, S. S., Aykol, M., Cheon, G., & Cubuk, E. D. (2023). Scaling deep learning for

- materials discovery. *Nature*, 624(7990), 80–85.
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06735-9>
- Peker, A., & Johnson, W. L. (1993). A highly processable metallic glass: $\text{Zr}_{41.2}\text{Ti}_{13.8}\text{Cu}_{12.5}\text{Ni}_{10.0}\text{Be}_{22.5}$. *Applied Physics Letters*, 63(17), 2342–2344.
<https://doi.org/10.1063/1.110520>
- Ren, F., Ward, L., Williams, T., Laws, K. J., Wolverton, C., Hattrick-Simpers, J., & Mehta, A. (2018). Accelerated discovery of metallic glasses through iteration of machine learning and high-throughput experiments. *Science Advances*, 4(4), eaaq1566.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aaq1566>
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533–536.
<https://doi.org/10.1038/323533a0>
- Schultz, L. E., Afflerbach, B., Voyles, P. M., & Morgan, D. (2025). Machine learning metallic glass critical cooling rates through elemental and molecular simulation based featurization. *Journal of Materiomics*, 11, Makale 100964. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2024.100964>
- Sohrabi, N., Jhabvala, J., & Logé, R. E. (2021). Additive manufacturing of bulk metallic glasses—Process, challenges and properties: A review. *Metals*, 11(8), 1279. <https://doi.org/10.3390/met11081279>
- Suryanarayana, C., Seki, I., & Inoue, A. (2009). A critical analysis of the glass-forming ability of alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355(6), 355–360.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2008.12.009>
- Takeuchi, A., & Inoue, A. (2005). Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and

- period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element. *Materials Transactions*, 46(12), 2817–2829. <https://doi.org/10.2320/matertrans.46.2817>
- Tapia, G., Elwany, A. H., & Sang, H. (2016). Prediction of porosity in metal-based additive manufacturing using spatial Gaussian process models. *Additive Manufacturing*, 12, 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.009>
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236), 433–460. <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>
- Wang, C., Tan, X. P., Tor, S. B., & Lim, C. S. (2020). Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives. *Additive Manufacturing*, 36, 101538. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101538>
- Wang, W. H., Dong, C., & Shek, C. H. (2004). Bulk metallic glasses. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 44(2–3), 45–89. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.03.001>
- Ward, L., Agrawal, A., Choudhary, A., & Wolverton, C. (2016). A general-purpose machine learning framework for predicting properties of inorganic materials. *npj Computational Materials*, 2(1), 16028. <https://doi.org/10.1038/npjcompumats.2016.28>
- Ward, L., O’Keeffe, S. C., Stevick, J., Jelbert, G. R., Aykol, M., & Wolverton, C. (2018). A machine learning approach for engineering bulk metallic glass alloys. *Acta Materialia*, 159, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.08.002>

- Wu, W., Li, X., Liu, Q., Hsi Fuh, J. Y., Zheng, A., Zhou, Y., & Li, G. (2022). Additive manufacturing of bulk metallic glass: Principles, materials and prospects. *Materials Today Advances*, 16, 100319. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2022.100319>
- Xiong, J., Shi, S.Q., & Zhang, T.Y. (2020). A machine-learning approach to predicting and understanding the properties of amorphous metallic alloys. *Materials & Design*, 187, 108378. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108378>
- Xiong, J., Zhang, T.Y., & Shi, S.Q. (2019). Machine learning prediction of elastic properties and glass-forming ability of bulk metallic glasses. *MRS Communications*, 9(2), 576–585. <https://doi.org/10.1557/mrc.2019.53>
- Zhang, P., Tan, J., Tian, Y., Yan, H., & Yu, Z. (2022). Research progress on selective laser melting (SLM) of bulk metallic glasses (BMGs): A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(7–8), 2017–2057. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08051-z>
- Zhang, Y., & Ling, C. (2018). A strategy to apply machine learning to small datasets in materials science. *npj Computational Materials*, 4(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s41524-018-0081-z>
- Zhang, T., Long, Z., & Peng, L. (2024). Glass forming ability prediction of bulk metallic glasses based on fused strategy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 34(5), 1558–1570.
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review. *Engineering*, 3(5), 616–630. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.05.015>

- Zhou, Z., Zhou, Y., He, Q., Ding, Z., Li, F., & Yang, Y. (2019). Machine learning guided appraisal and exploration of phase design for high entropy alloys. *npj Computational Materials*, 5(1), 128. <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0265-1>
- Zhu, S., Zhu, K., Zhang, H., Zhao, X., Cao, Y., Fu, H., & Xie, J. (2026). Feature screening and sample synthesis for enhancing generalization predictive performance on imbalanced small data: amorphous alloy design. *Materials & Design*, 265, 115928. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2026.115928>

ÜRETİM MÜHENDİSLİĞİNDE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI

Rıza KARA¹

Merve GENEL²

1. GİRİŞ

Üretim sistemleri, son yirmi yılda dijitalleşme, siber-fiziksel sistemler, endüstriyel nesnelerin interneti (Industrial Internet of Things, IIoT) ve veri odaklı karar destek mekanizmalarının yaygınlaşmasıyla önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Bu dönüşümün temelinde, üretim hatlarından elde edilen büyük hacimli verilerin anlamlı bilgiye dönüştürülmesi yer almaktadır. Yapay Zekâ (Artificial Intelligence, AI) ve Makine öğrenmesi (Machine Learning, ML), bu verilerin analiz edilmesini sağlayarak üretim süreçlerinin daha verimli, esnek ve güvenilir hâle gelmesine katkıda bulunmaktadır. Endüstri 4.0 ile birlikte akıllı üretim sistemleri; üretkenliği artırmak, kaliteyi iyileştirmek, kaynak kullanımını optimize etmek ve maliyetleri azaltmak amacıyla AI tabanlı çözümlerden yararlanmaktadır (Xu vd., 2022). Sensör ve kamera teknolojilerindeki gelişmeler, bulut ve kenar bilişim altyapıları ile IIoT tabanlı haberleşme teknolojilerinin yaygınlaşması, bu dönüşümü hızlandırmıştır. Günümüzde sensör verileri, görüntüler ve makine kayıtları birlikte analiz edilerek süreç performansı izlenebilmektedir. Bununla birlikte arızalar önceden tahmin edilebilmekte ve kalite

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ORCID: 0000-0002-0820-2577.

² Öğr. Gör., Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, ORCID: 0000-0001-5961-1277.

problemleri üretim devam ederken belirlenebilmektedir (Ameri vd., 2024; Kausik vd., 2025). Böylece üretim sistemleri, öğrenebilen ve değişen koşullara uyum sağlayabilen yapılara dönüşmektedir.

Literatürdeki sistematik derlemeler, AI ve ML tekniklerinin üretim verimliliği, kalite güvencesi, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve karar destek süreçlerinde önemli kazanımlar sağladığını göstermektedir (Plathottam vd., 2023; Kausik vd., 2025). Artan veri hacmi ve çeşitliliği, geleneksel yöntemlerin birçok uygulamada yetersiz kalmasına neden olurken, Derin öğrenme (Deep Learning, DL) tabanlı yöntemlerin kullanımını artırmıştır. Evrimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network, CNN), Vision Transformer (ViT) ve çok ölçekli derin öğrenme modelleri, özellikle yüzey kusurlarının tespiti ve otomatik optik muayene uygulamalarında başarılı sonuçlar sunmaktadır (Ameri vd., 2024). AI uygulamalarının endüstriyel ortamlara aktarılmasında veri heterojenliği, etiketli veri eksikliği, yüksek hesaplama maliyetleri, gerçek zamanlı çalışma gereksinimi, veri güvenliği ve insan kaynağı yetersizliği önemli sorunlar oluşturmaktadır (Nti vd., 2022; Ameri vd., 2024). Özellikle kalite kontrol uygulamalarında piksel düzeyinde etiketleme gereksinimi, veri hazırlama sürecini zaman alıcı ve maliyetli hâle getirmektedir. Kusurlu örneklerin az olması ve yeni kusur türlerinin ortaya çıkması da geleneksel denetimli öğrenme (Supervised Learning) yöntemlerinin uygulanabilirliğini sınırlandırabilmektedir.

Aktif öğrenme (Active Learning), açık küme tanıma (Open Set Recognition), az örnekli öğrenme (Few-shot Learning), zayıf denetimli öğrenme (Weakly Supervised Learning) ve sentetik veri üretimi (Synthetic Data Generation), bu veri kısıtlarının çözümünde öne çıkan yaklaşımlardır. Shin vd. (2025), aktif öğrenme yaklaşımıyla daha önce görülmemiş wafer kusurlarının sınırlı etiketli örneklerden belirlenmesine yönelik bir

çerçeve geliştirmiştir. Gong vd. (2024), az sayıda kusurlu örneğin bulunduğu üretim ortamları için few-shot learning tabanlı bir yöntem geliştirmiştir. Tao (2024), difüzyon modelleri (Diffusion Models) kullanarak sentetik kusur görüntüleri üretmiş ve bu yaklaşımın sınırlı veriyle eğitilen modellerin performansına katkı sağlayabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, sentetik verilerin gerçek üretim koşullarını temsil etmesi ve genelleme üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır. Üretim sistemlerinde hesaplama kaynakları ve işlem süresi de AI uygulamalarının başarısını etkileyen önemli unsurlardır. Özellikle kalite kontrol işlemlerinde doğruluk ile işlem hızı arasında denge sağlayan Lightweight modeller önem kazanmaktadır. Shi vd. (2025), düşük donanım gereksinimine sahip bir lightweight YOLO mimarisi geliştirerek gerçek zamanlı kalite kontrol uygulamalarında dengeli bir performans elde edilebileceğini göstermiştir.

AI alanındaki güncel gelişmeler, kalite kontrolün yanı sıra tasarım, üretim planlama, bakım yönetimi ve karar destek süreçlerini de dönüştürmektedir. Büyük dil modelleri (Large Language Models, LLM), üretken AI ve temel modeller (Foundation Models); mühendislik dokümanlarının yorumlanması, bakım kayıtlarının analiz edilmesi, teknik bilgiye erişim ve tasarım süreçlerinin desteklenmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bunun yanında dijital ikiz, otonom robot sistemleri ve Multimodal AI çözümleri, üretim süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesini ve optimize edilmesini sağlayarak Endüstri 5.0 vizyonunun önemli bileşenleri hâline gelmektedir.

Bu bölümde öncelikle AI'nın gelişim süreci ve üretim mühendisliği açısından önemi ele alınmakta, ardından geleneksel ve ileri imalat yöntemlerindeki kullanım alanları incelenmektedir. Devamında Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design, CAD), Bilgisayar Destekli Üretim (Computer Aided Manufacturing, CAM), Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method, FEM), kestirimci bakım, görüntü tabanlı

otomatik kalite kontrol, yüzey kusuru tespiti, üretim planlama, dijital ikiz ve üretken tasarım uygulamaları değerlendirilmektedir. Ayrıca az örnekli öğrenme, sentetik veri üretimi, aktif öğrenme ve Lightweight DL modelleri ele alınmakta; bölüm sonunda mevcut teknolojilerin sınırlılıkları, araştırma boşlukları ve gelecekteki gelişim yönleri değerlendirilmektedir.

2. YAPAY ZEKÂ VE ÜRETİM MÜHENDİSLİĞİ

Üretim mühendisliği; hammaddelerin katma değerli ürünlere dönüştürülmesini sağlayan üretim süreçlerinin, makinelerin ve sistemlerin tasarımı, geliştirilmesi, planlanması ve optimize edilmesi ile ilgilenen disiplinler arası bir mühendislik alanıdır. AI ise insan zekâsına özgü algılama, öğrenme, muhakeme etme ve karar verme gibi bilişsel süreçlerin bilgisayar sistemleri tarafından gerçekleştirilebilmesini sağlayan algoritmalar ve yöntemler bütünüdür. Günümüzde AI; ML, DL, LLM ve bilgisayarlı görü gibi birçok alt disiplini kapsayan geniş bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Üretim mühendisliği açısından değerlendirildiğinde ise bu teknolojiler; süreç izleme, arıza teşhisi, kalite kontrolü, üretim planlama, kestirimci bakım ve tasarım optimizasyonu gibi birçok kritik süreçte kullanılmaktadır (Jan vd., 2023).

Endüstri 4.0 ile birlikte üretim ortamlarında sensör teknolojileri, IIoT, büyük veri analitiği, bulut bilişim ve siber-fiziksel sistemlerin kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Bu teknolojiler sayesinde üretim hatlarından sürekli olarak büyük miktarda veri elde edilmektedir. AI ise bu verileri anlamlı bilgiye dönüştüren temel teknoloji olarak görev yapmaktadır. AI; Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri arasında veri, fiziksel sistemler ve karar destek mekanizmaları arasında bağ kuran akıllı bir katman oluşturmaktadır (Alenizi vd., 2023). Dijital ikiz

teknolojileri ile birlikte değerlendirildiğinde ise AI, fiziksel üretim süreçlerinin sanal ortamda modellenmesini, gerçek zamanlı izlenmesini ve değişen üretim koşullarına göre dinamik kararlar alınmasını mümkün hâle getirmektedir (Monostori vd., 2016).

AI üretim mühendisliğindeki gelişimi, sanayide yaşanan teknolojik dönüşümlerle paralel ilerlemiştir. İlk uygulamalar, sayısal kontrollü tezgâhlar, programlanabilir mantıksal denetleyiciler ve uzman sistemlere dayalı kural tabanlı yapılarla sınırlı kalmıştır. Bu erken dönem yaklaşımında karar alma mekanizmaları, gerçek zamanlı veri analitiğinden ziyade alan uzmanlarının tecrübelerine dayalı deterministik mantık modelleri üzerinden yürütülmekteydi (Hitomi, 1996). Daha sonraki dönemde yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte üretim parametrelerinin modellenmesi, takım aşınmasının tahmin edilmesi ve süreç optimizasyonu gibi problemlerde öğrenebilen algoritmalar kullanılmaya başlanmıştır (Wang ve Kusiak, 2000). Özellikle son on beş yılda grafik işlem birimlerinin (Graphics Processing Unit, GPU) gelişmesi, veri depolama maliyetlerinin azalması ve IIoT tabanlı veri toplama altyapılarının yaygınlaşmasıyla birlikte DL tabanlı yöntemler üretim sistemlerine hızla entegre edilmiştir. Böylece kestirimci bakım, görüntü tabanlı kalite kontrolü, robotik sistemler ve otonom üretim uygulamaları önemli ölçüde gelişmiştir (Lee vd., 2018).

Akıllı üretim yaklaşımı, üretim süreçlerinin izlenmesini, aynı zamanda elde edilen verilerin analiz edilerek süreçlerin sürekli iyileştirilmesini hedeflemektedir (Kusiak, 2018). Geleneksel kalite kontrol yöntemleri büyük ölçüde operatör deneyimine ve manuel öznitelik çıkarımına dayanırken, günümüzde DL tabanlı modeller ham verilerden otomatik olarak anlamlı öznitelikler öğrenebilmektedir. Özellikle gelişmiş kamera sistemleri ve modern sensör altyapıları sayesinde üretim

hatları gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte, yüzey kusurları ve üretim hataları insan müdahalesine gerek kalmadan tespit edilebilmektedir (Ameri vd., 2024; Kausik vd., 2025). Bu gelişmeler, kalite kontrol süreçlerinin daha hızlı, tutarlı ve güvenilir yürütülmesini sağlamaktadır.

Literatürde yapılan sınıflandırma çalışmaları, üretim mühendisliğinde AI uygulamalarının genel olarak dört temel alanda yoğunlaştığını göstermektedir. Bunlar; süreç izleme ve arıza teşhisi, kalite kontrolü ve kusur tespiti, üretim planlama ile kaynak optimizasyonu ve ürün ya da süreç tasarımıdır (Chen vd., 2023). Bununla birlikte son yıllarda dijital ikiz, üretken tasarım, otonom robot sistemleri ve akıllı karar destek mekanizmaları da bu uygulama alanlarına eklenmiştir. Böylece AI, yalnızca üretim süreçlerini otomatikleştiren bir teknoloji olmaktan çıkmış; üretim sistemlerinin öğrenmesini, değişen koşullara uyum sağlamasını ve karar verme süreçlerini destekleyen stratejik bir bileşen hâline gelmiştir.

2.1. Yapay Zekânın Tarihsel Gelişimi

AI kavramının kökenleri, hesaplama makinelerinin zeki davranış sergileyip sergileyemeyeceği sorusunu felsefî ve matematiksel bir zeminde ele alan çalışmalara dayanmaktadır. Turing, bir makinenin insan benzeri zekâ sergileyip sergilemediğinin davranışsal bir sınama yoluyla değerlendirilebileceğini öne sürmüştü ve bu öneri, alanın kuramsal temellerinden birini oluşturmuştur (Turing, 1950). Bu araştırma, ilerleyen dönemlerde ortaya çıkan bilişsel ve öğrenme tabanlı mimarilerin kuramsal altyapısını hazırlaması açısından alandaki öncü çalışmalardan biri sayılmaktadır. AI kavramının akademik bir disiplin olarak temelleri, 1956 yılında gerçekleştirilen Dartmouth Yaz Araştırma Projesi'ne dayanmaktadır. Söz konusu çalışmanın temel dayanağını; insan zekâsına özgü tüm niteliklerin ilkeler düzeyinde tanımlanarak bir makine vasıtasıyla simüle

edilebileceği hipotezi oluşturmuştur. Bu yaklaşım, takip eden yıllarda araştırmaların sembolik akıl yürütme, arama algoritmaları ve bilgi tabanlı sistemler ekseninde şekillenmesine öncülük etmiştir (McCarthy vd., 2006).

1960'lı ve 1970'li yıllarda öne çıkan yaklaşımlardan biri uzman sistemler olmuştur. Uzman sistemler, belirli bir alana ilişkin uzmanlık bilgisinin açık biçimde tanımlanarak çeşitli kurallar aracılığıyla bilgi tabanında tutulmasına dayanmaktadır. Bu sistemler, insan uzmanların bilgi ve problem çözme biçimini belirli kurallar çerçevesinde bilgisayar ortamına aktarmayı amaçlamıştır. Ancak gerçek dünyadaki problemlerin karmaşık ve değişken yapısı, özellikle belirsizliğin yüksek olduğu ortamlarda kural tabanlı sistemlerin esnekliğini sınırlamıştır. Bilgi tabanında yer almayan durumlarla karşılaşılması, doğru karar üretilmemesine ve performansın düşmesine neden olmuştur (Toosi vd., 2021). Bu durum, AI sistemlerinin önceden tanımlanmış kurallardan, verilerden öğrenebilen daha esnek yapılara doğru geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu ihtiyaç sonucunda, yapay sinir ağlarının veriden öğrenmesini mümkün kılan geri yayılım algoritmasının geliştirilmiştir. Geri yayılım algoritması, ağıın ürettiği çıktı ile beklenen sonuç arasındaki hatayı hesaplayarak bağlantı ağırlıklarının gradyan tabanlı olarak güncellenmesini sağlamaktadır (Rumelhart vd., 1986). Böylece problem çözmek için gerekli tüm kuralların önceden insanlar tarafından tanımlanmasına duyulan ihtiyaç azalmış, modellerin veriler arasındaki ilişkileri ve örüntüleri öğrenebilmesinin önü açılmıştır.

2000'li yılların sonlarından itibaren hesaplama kapasitesindeki artış, büyük veri kümelerinin erişilebilir hâle gelmesi ve GPU'ların sunduğu yüksek paralel hesaplama kapasitesi dönüşümü ileri bir aşamaya taşımıştır. Bu gelişmeler, çok katmanlı sinir ağlarının daha büyük veri kümeleri üzerinde eğitilmesini ve DL yöntemlerinin yaygınlaşmasını sağlamıştır.

DL, verinin farklı özelliklerini birden fazla katman üzerinden öğrenebilmesi sayesinde özellikle yüksek boyutlu ve karmaşık problemlerde önemli avantajlar sunmuştur. Bu dönemde DL; bilgisayarlı görü, konuşma tanıma ve LLM gibi alanlarda önemli performans artışları ortaya koymuştur (Toosi vd., 2021). DL'nin sağladığı dönüşümün dikkat çekici örneklerinden biri AlexNet modelinin başarısıdır. Krizhevsky vd. (2012) tarafından geliştirilen AlexNet, büyük ölçekli görsel nesne tanıma görevinde önceki yöntemlere kıyasla önemli ölçüde daha düşük hata oranına ulaşmıştır. Bu sonuç, derin CNN'lerin karmaşık görsel örüntüleri doğrudan veriden öğrenme kapasitesini ortaya koymuş ve DL yöntemlerine yönelik akademik ve endüstriyel ilgiyi artırmıştır (Krizhevsky vd., 2012). Böylece AI sistemlerinin önceden belirlenmiş kuralları uygulayan yapılardan, büyük miktarda veriden karmaşık ilişkileri öğrenebilen yapılara dönüşümü hız kazanmıştır.

AI gelişimi zamanla algılama ve sınıflandırmanın ötesine geçerek karar verme ve strateji geliştirme gibi daha karmaşık görevleri de kapsamıştır. Bu açıdan DL ile Pekiştirmeli Öğrenmenin (Reinforcement Learning) bir araya getirilmesi önemli bir gelişme olmuştur. Silver vd. (2016) tarafından geliştirilen AlphaGo, derin sinir ağları ile Reinforcement Learning yöntemlerini birlikte kullanarak Go oyununda dünya düzeyindeki insan oyunculara karşı başarılı sonuçlar elde etmiştir. AlphaGo'nun başarısı, AI sistemlerinin veriler içerisindeki örüntüleri tanımanın yanı sıra farklı seçenekleri değerlendirerek stratejik kararlar geliştirebileceğini göstermiştir (Silver vd., 2016).

LLM alanındaki ilerlemeler ise AI'nın bilgiyle etkileşim biçimini değiştirmiştir. Vaswani vd. (2017) tarafından önerilen Transformer mimarisi, metin içerisindeki farklı unsurlar arasındaki ilişkileri öz-dikkat (self-attention) mekanizmasıyla değerlendirmektedir. Özellikle uzun metinlerde birbirinden uzak

unsurlar arasındaki ilişkilerin daha etkin biçimde modellenebilmesi, LLM uygulamalarında önemli bir ilerleme sağlamıştır (Vaswani vd., 2017). Transformer mimarisi, sonraki yıllarda geliştirilen LLM'lerin temel yapı taşlarından biri hâline gelmiştir.

AI alanındaki bu teknolojik gelişmelerin sanayiye yansması, üretim sistemlerinin dijitalleşmesiyle hız kazanmıştır. Bu dönüşümün önemli dönüm noktalarından biri, Endüstri 4.0 kavramının 2011 yılında Almanya'da düzenlenen Hannover Sanayi Fuarı'nda gündeme getirilmesi olmuştur. Sonraki yıllarda kapsamı genişletilen Endüstri 4.0; akıllı fabrikalar, siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti ve veri temelli üretim yönetimi gibi kavramları sanayinin temel gündemlerinden biri hâline getirmiştir (Kagermann vd., 2013). Üretim makineleri, sensörler ve bilgi sistemlerinin birbirleriyle bağlantılı hâle gelmesi, üretim süreçlerinden büyük miktarda verinin sürekli olarak toplanmasını ve üretim kararlarında kullanılmasını mümkün kılmıştır.

Endüstri 4.0 kapsamında oluşan dijital ve bağlantılı üretim altyapısı, AI'ın üretim mühendisliğine sistematik biçimde entegre edilmesi için uygun bir ortam oluşturmuştur. Üretim süreçlerinden elde edilen yüksek hacimli ve farklı nitelikteki veriler ML, DL ve diğer AI yöntemleri kullanılarak analiz edilmeye başlanmıştır (Xu vd., 2022). Bu gelişmeler sonucunda kalite kontrol, kestirimci bakım, üretim planlama, proses optimizasyonu, hata ve arıza tespiti gibi birçok üretim faaliyeti veri temelli bir yapıya kavuşmuştur. Bununla birlikte, üretim sistemlerindeki dijital dönüşüm yalnızca otomasyon ve verimlilik artışıyla sınırlı kalmamıştır. 2020'li yılların başından itibaren insan faktörü, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık gibi unsurların daha fazla öne çıkmasıyla Endüstri 5.0 yaklaşımı gündeme gelmiştir. Endüstri 5.0, Endüstri 4.0'ın teknolojik ve verimlilik odaklı yaklaşımını insan merkezlik, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık boyutlarıyla genişletmektedir (Rožanec vd., 2022).

Bu yaklaşımda insanın problem çözme ve karar verme yetenekleri ile AI ve diğer gelişmiş teknolojilerin analiz ve hesaplama kapasitesinin bir araya getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle AI'ın üretim mühendisliğindeki rolü yalnızca süreçlerin otomatikleştirilmesiyle sınırlı olmayıp, insan kararlarını destekleme, üretim süreçlerinin güvenilirliğini artırma ve daha sürdürülebilir üretim modellerinin geliştirilmesini de kapsamaktadır.

Sonuç olarak, AI'ın üretim mühendisliğindeki bugünkü konumu, yaklaşık yetmiş yıllık teknolojik birikimin sonucudur. Uzman sistemlerden veri temelli öğrenmeye, derin öğrenmeden Transformer tabanlı modellere uzanan bu gelişim, Endüstri 4.0 ile dijital ve bağlantılı üretim altyapısına, Endüstri 5.0 ile insan, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık odaklı bir yaklaşıma dönüşmüştür. Bu nedenle üretim ortamlarında AI uygulamaları değerlendirilirken yalnızca doğruluk ve verimlilik değil, veri kalitesi, gerçek zamanlı çalışma, insan faktörü ve sürdürülebilirlik de dikkate alınmalıdır.

2.2. Öğrenme Paradigmaları ve Veri Türleri

Üretim mühendisliğinde kullanılan AI modelleri, problemin yapısına ve veri özelliklerine bağlı olarak denetimli, denetimsiz ve Reinforcement Learning yaklaşımlarından yararlanmaktadır. Supervised Learning yöntemleri, etiketlenmiş geçmiş verilere dayanarak sınıflandırma ve regresyon problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Kalite kontrolü, arıza tahmini ve ürün sınıflandırması bu yöntemlerin en yaygın uygulama alanları arasında yer almaktadır. Denetimsiz öğrenme ise etiketlenmemiş veri kümelerinde örüntü keşfi ve anomali tespiti amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle üretim süreçlerinde daha önce görülmemiş hata türlerinin belirlenmesinde bu yöntemlerden yararlanılmaktadır (Nti vd., 2022). Reinforcement learning ise çevreden alınan geri bildirimler doğrultusunda en

uygun karar politikasını öğrenmekte ve üretim çizelgeleme, otonom robot kontrolü ile dinamik süreç optimizasyonu gibi sıralı karar verme problemlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır (Chen vd., 2023).

Üretim ortamlarında elde edilen veriler oldukça heterojen bir yapıya sahiptir. Sensör verileri, titreşim sinyalleri, termal görüntüler, kamera görüntüleri, makine parametreleri, bakım kayıtları ve üretim logları farklı veri türlerini oluşturmaktadır. Bu nedenle günümüzde geliştirilen AI sistemleri, yalnızca tek bir veri kaynağına yönlendirmek yerine, farklı veri türlerini birlikte değerlendirebilen multimodal öğrenme yaklaşımlarına yönelmektedir (Xu vd., 2022). Bu yaklaşım, üretim süreçlerinin daha doğru modellenmesini sağlarken veri ön işleme, veri bütünleştirme ve model doğrulama süreçlerini de daha karmaşık hâle getirmektedir.

Son yıllarda üretim ortamlarında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri yeterli miktarda etiketli verinin bulunmamasıdır. Özellikle nadir görülen kusurların tespitinde veri eksikliği, DL modellerinin performansını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, few-shot learning, aktif öğrenme, sentetik veri üretimi ve Lightweight DL modelleri gibi yeni yaklaşımlara yönelmektedir. Few-shot öğrenme yöntemleri, sınırlı sayıda örnekle başarılı modeller geliştirilmesini mümkün kılarken (Gong vd., 2024), aktif öğrenme yaklaşımları insan uzman geri bildirimini kullanarak model performansını sürekli iyileştirebilmektedir (Shin vd., 2025). Benzer şekilde difüzyon modelleriyle oluşturulan sentetik görüntüler veri çeşitliliğini artırmaktadır (Tao, 2024). Lightweight DL modelleri ise düşük donanım kapasitesine sahip üretim hatlarında gerçek zamanlı kalite kontrol uygulamalarına olanak sağlamaktadır (Shi vd., 2025).

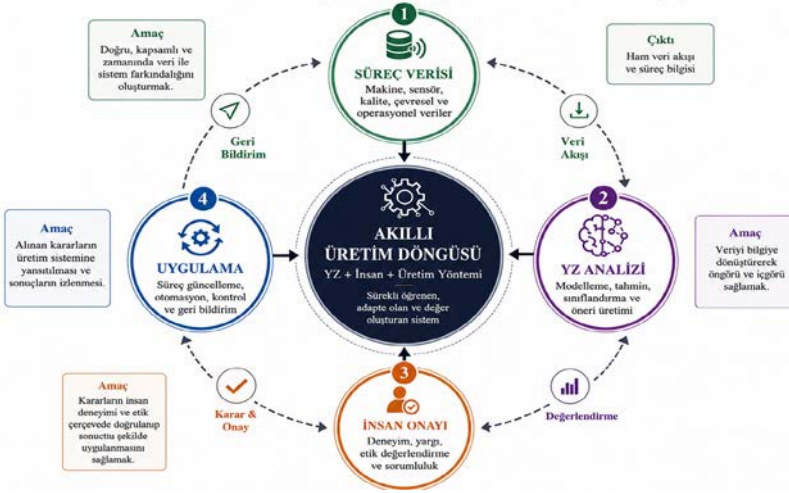
2.3. İnsan-Yapay Zekâ İş Birliği ve Endüstri 5.0 Perspektifi

Endüstri 4.0 yaklaşımı ağırlıklı olarak otomasyon, verimlilik ve dijitalleşmeye odaklanırken, Endüstri 5.0 insanı yeniden üretim süreçlerinin merkezine yerleştirmektedir. Bu yaklaşımda AI'nın temel amacı, insanların yerini almak yerine, karar verme süreçlerini desteklemek, uzman bilgisini güçlendirmek ve üretim süreçlerini daha güvenli, sürdürülebilir ve esnek hâle getirmektir. Bu nedenle günümüzde geliştirilen açıklanabilir yapay zekâ (Explainable Artificial Intelligence, XAI), insan geri bildirimi ve aktif öğrenme mekanizmaları giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Rožanec vd., 2022).

Üretim mühendisliğinde başarılı bir AI uygulaması yalnızca yüksek doğruluk oranına sahip olmakla değerlendirilmemektedir. Aynı zamanda sistemin şeffaf, güvenilir, açıklanabilir ve operatör tarafından kolaylıkla denetlenebilir olması beklenmektedir. İnsan uzmanlardan alınan geri bildirimlerin model geliştirme sürecine dâhil edilmesi, özellikle kalite kontrolü, kestirimci bakım ve süreç optimizasyonu uygulamalarında daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Böylece AI, insan deneyimini tamamlayan ve sürekli öğrenen bir karar destek sistemi olarak üretim süreçlerine değer katmaktadır.

Bu kavramsal çerçeve, AI'nın üretim mühendisliğinde yalnızca otomasyon sağlayan bir teknoloji olmadığını göstermektedir. Günümüzde AI; üretim süreçlerinden elde edilen verileri analiz eden, insan uzmanların deneyimlerinden öğrenen ve elde edilen sonuçları yeniden üretim sistemine geri besleyen döngüsel bir karar mekanizmasının temel bileşeni hâline gelmiştir. Şekil 1'de gösterilen yapı da bu etkileşimi özetlemektedir. Üretim verisinin toplanması, AI tarafından analiz edilmesi, insan uzman tarafından değerlendirilmesi ve elde edilen

kararların yeniden üretim sürecine aktarılmasıyla sürekli gelişen bir öğrenme döngüsünü ifade etmektedir.



Şekil 1. AI, insan ve üretim yöntemi arasındaki etkileşim döngüsü (Lee vd., 2015; Tao vd., 2018; Wang vd., 2016; Raj vd., 2020 and Lu, Y., 2017).

3. GELENEKSEL VE İLERİ İMALAT YÖNTEMLERİNDE YAPAY ZEKA

AI teknolojilerinin imalat sektörüne entegrasyonu, farklı üretim disiplinlerinde heterojen bir gelişim seyri izlemiştir. Bu gelişim; üretim yöntemlerinin fiziksel dinamiklerine, veri toplama kapasitelerine ve süreç karmaşıklığına bağlı olarak şekillenmektedir. Talaşlı imalat, kaynak, döküm ve metal şekillendirme gibi geleneksel imalat yöntemlerinde AI, başlangıçta süreç parametrelerinin optimizasyonu ve reaktif kalite denetimi amacıyla uygulanmıştır. Zamanla bu yaklaşımlar, tezgâh durumunun kestirimci takibine ve anlık süreç denetimine evrilmiştir (Ameri vd., 2024; Kausik vd., 2025). Buna karşılık, eklemeli imalat gibi ileri üretim teknolojilerinde AI, doğrudan tasarım aşamasından nihai ürün denetimine kadar uzanan

bütüncül bir veri ekosisteminin merkezinde yer almaktadır. Üretim sistemlerindeki bu dijital evrim, imalat kalitesinin sürdürülebilir biçimde artırılmasını ve insan faktörüne bağlı hataların minimize edilmesini sağlamaktadır (Kausik vd., 2025). Aşağıdaki alt bölümlerde, temel imalat yöntemleri bazında AI'nın tarihsel gelişimi, güncel uygulama alanları ve sunduğu teknik çözümler detaylı biçimde ele alınmaktadır.

3.1. Talaşlı İmalat ve Bilgisayarlı Sayısal Kontrol Tezgâhlarında Yapay Zekâ

Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (Computer Numerical Control, CNC) tezgâhlarında AI uygulamaları, ilk olarak kesme kuvveti tahmini ve takım aşınmasının izlenmesi gibi görevlerde uzman sistemler ve yapay sinir ağları aracılığıyla ortaya çıkmıştır. Zamanla bu uygulamalar; kesme parametrelerinin çevrimiçi biçimde optimize edilmesi, yüzey pürüzlülüğünün öngörülmesi ve enerji tüketiminin azaltılması gibi daha karmaşık görevlere doğru genişlemiştir. Çalışmalarda, ML tabanlı yaklaşımların takım ömrünün uzatılmasına, işleme hatalarının azaltılmasına ve üretim kararlılığının artırılmasına katkı sağladığı bildirilmektedir (Soori vd., 2023b).

Günümüz talaşlı imalat sistemlerinde, kesici takım ve iş parçası etkileşimi yüksek titreşim ve sıcaklık altında gerçekleşmektedir. Bu durum, yüzey kalitesini doğrudan etkileyen mikroskobik kusurların oluşmasına neden olmaktadır. Bu tür kusurların tespitine yönelik olarak bilgisayarlı görü yöntemleri ve Lightweight CNN mimarileri geliştirilmektedir. Bu kapsamda, iş parçası yüzeylerinde oluşan talaş kaldırma kusurlarının gerçek zamanlı olarak tespit edilmesi amacıyla, parametre sayısı azaltılmış ve düşük hesaplama maliyetine sahip DFP-YOLO gibi Lightweight CNN tabanlı mimariler geliştirilmiştir. Söz konusu modeller, CNC tezgâhlarına entegre edilen kameralar aracılığıyla yüksek doğrulukta görsel denetim

gerçekleştirebilmektedir (Shi vd., 2025). Ayrıca, işleme sonrası metal yüzeylerde meydana gelen kompleks kusur kalıplarını belirlemek amacıyla çok ölçekli öznetelik çıkarımı yapan derin ağlarda kullanılmaktadır. Çoklu dalgacık ve çok ölçekli öznetelik birleşimi sunan LWMS-Net benzeri mimariler, arka plan gürültüsünü bastırarak yüzey pürüzlülüğü ve çizik kusurlarını hassasiyetle ayırmaktadır (Zheng vd., 2025). Sadece piksel bazlı etiketleme gerektirmeyen, görüntü seviyesindeki etiketlerle çevrimiçi yüzey denetimi yapabilen çoklu örneklemeli öğrenme yaklaşımları da talaşlı imalatla işlem yükünü önemli ölçüde hafifletmektedir (Xu vd., 2024).

3.2. Kaynak ve Birleştirme Süreçlerinde Yapay Zekâ

Kaynak süreçlerinde dikiş kalitesinin kararlılığı, malzeme özellikleri, ısı girdisi ve işlem parametreleri arasındaki karmaşık ilişkilere bağlı olduğundan, geleneksel kural tabanlı denetim yöntemleri sınırlı kalmaktadır. DL tabanlı görüntü tanıma yöntemleri, kaynak dikişindeki gözenek, nüfuziyet eksikliği ve çatlak gibi kusurların çevrimiçi biçimde tespit edilmesine olanak tanımaktadır (Liu vd., 2023). Bu sayede kaynak kalite denetimi, tahribatsız muayene sonrası gerçekleştirilen tepkisel bir süreçten, kaynak sırasında yürütülen anlık bir izleme mekanizmasına dönüşmektedir.

Kaynak havuzunun sıcaklık dağılımı ve geometrik formundaki anlık değişimler, kaynak dikiş sağlamlığının temel göstergeleridir. DL mimarileri, termal kameralar ve akustik sensörlerden gelen eşzamanlı verileri işleyerek kaynak parametrelerinde anlık düzeltmeler yapılmasına imkân sağlamaktadır (Ameri vd., 2024). Kaynak dikişi üzerindeki mikro boyutlu çatlak ve nüfuziyet kusurlarının tespitinde CNN yüksek hassasiyet sunmaktadır. Anlık geri bildirim mekanizmaları sayesinde, kaynak işlemi devam ederken dolgu maddesi miktarı veya ark gerilimi otonom olarak ayarlanabilmektedir. Bu durum,

kaynak sonrası yapılan tahribatsız muayene maliyetlerini düşürmektedir ve hurda oranlarını belirgin şekilde azaltmaktadır (Kausik vd., 2025).

3.3. Döküm, Şekillendirme ve Diğer Geleneksel Süreçlerde Yapay Zekâ

Döküm ve şekillendirme gibi geleneksel imalat yöntemlerinde AI, öncelikle kalıp tasarımı ve sıcaklık, basınç, şekillendirme hızı ve soğuma süresi gibi proses parametrelerinin optimize edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Farklı imalat süreçlerini kapsayan sistematik derlemeler, ML ve DL tabanlı kestirimci kalite modellerinin, üretim hattı sonunda yapılan örnekleme temelli kalite kontrolüne kıyasla daha erken aşamada sapmaların tespit edilmesine imkân tanıdığını göstermektedir (Tercan ve Meisen, 2022). Bu yaklaşım, geleneksel imalat süreçlerinde de hatalı üretimin önlenmesine ve hurda oranlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Döküm ve plastik deformasyon süreçlerinde erimiş metalin katılaşması veya sac metalin gerilmesi sırasında karmaşık fiziksel fenomenler meydana gelmektedir. Söz konusu süreçlerde kalıp aşınması, sıcaklık dalgalanmaları ve iç boşluklar ürün kalitesini bozmaktadır. Bu zorlukları aşmak için ML algoritmaları, sensör verilerini analiz ederek üretim esnasında kalite bozulmalarını öngörmektedir (Kausik vd., 2025). Ancak döküm ve şekillendirme hatlarında hatalı ürün verisinin azlığı ciddi bir veri dengesizliği yaratmaktadır. Bu kısıtı ortadan kaldırmak için sentetik görüntü üretimi ve few-shot learning tekniklerinden yararlanılmaktadır. Uzman bilgisini ve öznitelik zenginleştirmeyi birleştiren yaklaşımlar, çok az sayıda kusurlu örnekle bile yüksek tespit başarısı yakalamaktadır (Gong vd., 2024). Benzer şekilde, Gürültü azaltıcı olasılıksal difüzyon modelleri (Denoising Diffusion Probabilistic Models, DDPM) ve silme-onarma (erasing-inpainting) tabanlı veri artırma

yöntemleri, eğitici veri kümesini zenginleştirerek kestirimci kalite modellerinin doğruluğunu artırmaktadır (Tao, 2024). Böylece döküm parçalarındaki gözenek ve sac metal yüzeyindeki katlanma hataları üretim esnasında tespit edilebilmektedir (Ameri vd., 2024).

3.4. Eklemeli İmalatta Yapay Zekâ

Eklemeli imalat, katman katman üretim ilkesine dayanması nedeniyle, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha fazla proses parametresinin (lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı vb.) eş zamanlı kontrol edilmesini gerektirmektedir. Bu karmaşıklık, AI tabanlı yaklaşımların eklemeli imalatta tasarım, süreç optimizasyonu ve performans tahmini olmak üzere üç temel aşamada yoğun biçimde kullanılmasına yol açmıştır. Tasarım aşamasında topoloji optimizasyonu ve üretilebilirlik analizleri için ML modelleri kullanılırken, süreç aşamasında gözeneklilik ve ergime havuzu kararlılığı gibi kalite göstergelerinin gerçek zamanlı izlenmesi amacıyla DL tabanlı iç izleme sistemleri geliştirilmektedir (Goh vd., 2021).

Eriyik Filament Üretimi (Fused Filament Fabrication) ve Toz Yataklı Lazer Ergitme (Powder Bed Fusion) gibi eklemeli imalat tekniklerinde, katmanlar arasındaki yapışma yetersizliği veya fazla malzeme akışı parçanın geometrik doğruluğunu bozmaktadır. Katmanlar bazında anlık kusur tespiti yapmak amacıyla referans tabanlı optik izleme ve DL modelleri başarıyla uygulanmaktadır. Üretilen katmanın geometrisi ideal dijital referans modeliyle anlık olarak karşılaştırılmaktadır ve katman ayrışmaları veya malzeme birikimleri hızla belirlenmektedir (Bast vd., 2025). Bu otonom izleme sistemleri, baskı sürecinde hatalı katman oluştuğunda işlemi durdurarak malzeme ve zaman tasarrufu sağlamaktadır (Bast vd., 2025; Kausik vd., 2025).



Şekil 2. İmalat yöntemlerine göre AI uygulama örnekleri (Tao vd., 2019; Gindy vd., 2021; Wang vd., 2022; qui vd., 2021; Salmi vd., 2022; Debroy vd., 2017; Li vd., 2021; Lee vd., 2015; Raj vd., 2020).

4. İMALAT PROJELENDİRME SÜREÇLERİNDE YAPAY ZEKÂ

Üretim mühendisliğinde projelendirme süreçleri, bir ürünün fikir aşamasından başlayarak üretime aktarılmasına kadar uzanan bütüncül bir iş akışını kapsamaktadır. Bu süreç; teknik resim ve meslek resmi ile başlayan, CAD, CAM ve FEM ile gerçekleştirilen analiz aşamalarını içeren birbirini tamamlayan adımlardan oluşmaktadır. Geleneksel üretim anlayışında bu aşamalar çoğunlukla birbirinden bağımsız yürütülmekte, tasarım ile üretim arasında bilgi kayıpları ve zaman maliyetleri ortaya çıkabilmektedir.

Son yıllarda AI ve ML tekniklerinin bu süreçlere entegre edilmesiyle birlikte projelendirme yaklaşımı önemli ölçüde değişmiştir (Kausik vd., 2025). AI yalnızca operasyonel verimliliği artıran bir araç olmaktan çıkmış, tasarım kararlarını destekleyen, üretilebilirliği değerlendiren ve mühendislik analizlerini hızlandıran akıllı bir karar destek bileşeni hâline gelmiştir. Böylece tasarımdan üretime geçiş süresi kısılırken,

insan kaynaklı hatalar azaltılmaktadır ve mühendislik kararları daha güvenilir veriler doğrultusunda alınabilmektedir.

4.1. Teknik Resim ve Geometrik Özellik Tanıma (Feature Recognition)

Teknik resim, mühendislik tasarımlarının üretim ortamına doğru ve eksiksiz aktarılmasını sağlayan temel iletişim aracıdır. Teknik resimde yer alan delik, kanal, cep, pah ve benzeri geometrik özelliklerin doğru yorumlanması, üretim planlamasının başarısını doğrudan etkilemektedir. Uzun yıllar boyunca bu özelliklerin tanınması, önceden tanımlanmış geometrik kurallara dayanan kural tabanlı yöntemlerle gerçekleştirilmiştir (Babic vd., 2008). Ancak bu yöntemler özellikle karmaşık geometrilere yetersiz kalmış ve yoğun kullanıcı müdahalesi gerektirmiştir.

DL tabanlı yeni yaklaşımlar, Sınır Temsili (Boundary Representation, B-rep) modellerinde yer alan geometrik bilgileri doğrudan işleyerek, parçalara ait geometrik özelliklerin otomatik olarak tanınmasını mümkün kılmaktadır (Colligan vd., 2022). Bu yaklaşımlar, geleneksel yöntemlerde zaman ve uzmanlık gerektiren manuel öznitelik çıkarımı ihtiyacını büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Böylece özellikle karmaşık geometrik yapılara sahip parçaların daha hızlı ve yüksek doğrulukla analiz edilmesi sağlanmaktadır (Ameri vd., 2024). Bunun yanı sıra, bilgisayarlı görü ve Grafik Sinir Ağları (Graph Neural Networks, GNN) tabanlı yöntemler, parçaların yüzeyleri, kenarları ve bu geometrik unsurlar arasındaki ilişkileri birlikte değerlendirerek parçanın geometrik yapısının daha kapsamlı biçimde öğrenilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede, standart geometrik yapılardan farklılık gösteren veya karmaşık geometrik özellikler içeren parçaların da daha güvenilir biçimde tanımlanması ve sınıflandırılması mümkün hâle gelmektedir. Bu gelişmeler, teknik resimlerin otomatik olarak yorumlanmasının

yanında, Bilgisayar Destekli Proses Planlama (Computer-Aided Process Planning, CAPP) süreçlerinin daha doğru ve etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini de mümkün kılmaktadır. Parçanın geometrik özellikleri ile üretim kısıtlarının otomatik olarak belirlenebilmesi sayesinde, uygun işleme yöntemleri ve operasyon sıraları önerilebilmektedir. Elde edilen bilgiler sonraki CAD/CAM süreçlerine doğrudan aktarılabilmektedir (Shi vd., 2025).

4.2. CAD ve CAM Süreçlerinde Yapay Zekâ

CAD ve üretim yazılımları, modern üretim sistemlerinin temel bileşenleri arasında yer almaktadır. AI uygulamaları sayesinde CAD sistemleri yalnızca çizim yapılan platformlar olmaktan çıkmış, tasarım alternatifleri oluşturabilen, üretilebilirliği değerlendirebilen ve tasarımcıya karar desteği sunabilen akıllı sistemlere dönüşmüştür. Günümüzde AI algoritmaları; boyutlandırma, geometri onarma, kısıt tanımlama ve benzer tasarımlardan öğrenerek yeni tasarım önerileri geliştirme gibi birçok görevi otomatik olarak gerçekleştirebilmektedir.

Çok modlu (Multimodal) ML modelleri, geometrik bilgiler ile performans ve üretilebilirlik verilerini birlikte değerlendirerek tasarımcının belirlediği teknik kısıtları sağlayan alternatif modeller oluşturabilmektedir (Song vd., 2024). Bu yaklaşımda farklı veri türlerinin birlikte işlenmesi, tasarım seçeneklerinin geometrik açıdan olduğu gibi, aynı zamanda performans ve üretilebilirlik açısından da değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Üretken tasarım yaklaşımları ise, malzeme kullanımını azaltırken gerekli dayanım ve performans koşullarını karşılayan daha hafif yapıların geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede, ürünün toplam malzeme ve üretim maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlanırken, daha düşük

malzeme kullanımı ve ağırlık sayesinde enerji verimliliğinin artırılması da mümkün hâle gelmektedir.

CAM aşamasında AI, CAD ortamında oluşturulan geometrik bilgilerin takım yolu planlamasına ve üretim süreçlerine otomatik olarak aktarılmasını sağlamaktadır (Colligan vd., 2022). Takım yolu optimizasyonu, kesme parametrelerinin belirlenmesi ve işleme sıralarının oluşturulması gibi işlemler daha kısa sürede ve daha az kullanıcı müdahalesiyle gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca üretim sırasında elde edilen sensör verileri CAD modeliyle karşılaştırılarak olası geometrik sapmalar erken aşamada tespit edilebilmektedir (Bast vd., 2025). Böylece tasarım, üretim ve kalite kontrol süreçleri birbirinden bağımsız adımlar olmaktan çıkmaktadır. Sürekli veri alışverişi yapan bütünleşik bir mühendislik ekosistemine dönüşmektedir (Kausik vd., 2025).

4.3. FEM ile Yapay Zekâ Entegrasyonu

FEM, mühendislik yapılarının ve üretim süreçlerinin davranışını sayısal olarak incelemek amacıyla kullanılan temel analiz yöntemlerinden biridir. Üretim mühendisliğinde döküm, dövme, kaynak ve talaşlı imalat gibi farklı süreçlerin analizinde FEM'den yararlanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde malzeme üzerindeki gerilme ve deformasyon dağılımları, sıcaklık değişimleri ve yapısal dayanım gibi birçok fiziksel özellik ayrıntılı biçimde incelenebilmektedir. Böylece üretim sürecinin tasarım aşamasında olası sorunların önceden belirlenmesi ve farklı çalışma koşullarının değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, özellikle karmaşık geometrilere ve yüksek çözünürlüğe sahip modellerde FEM analizlerinin gerçekleştirilmesi yüksek hesaplama gücü ve uzun işlem süreleri gerektirebilmektedir. Bu durum, çok sayıda simülasyonun yapılması gereken tasarım ve optimizasyon çalışmalarında önemli bir zaman ve hesaplama maliyeti oluşturmaktadır. Bu

sınırlamaların azaltılmasında AI tabanlı vekil (surrogate) modeller önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu modeller, daha önce gerçekleştirilen FEM analizlerinden elde edilen veriler kullanılarak eğitilmekte ve fiziksel sistemin davranışını yaklaşık olarak öğrenmektedir. Özellikle DL algoritmaları kullanılarak geliştirilen vekil modeller, karmaşık fiziksel ilişkileri veriler üzerinden öğrenerek yeni tasarım veya çalışma koşulları için FEM sonuçlarını kısa sürede tahmin edebilmektedir (Vaktskjold vd., 2026). Böylece her yeni senaryo için FEM analizinin baştan gerçekleştirilmesine duyulan ihtiyaç azalmakta ve özellikle tekrarlanan analizlerde önemli ölçüde zaman tasarrufu sağlanabilmektedir.

AI tabanlı vekil modellerin sağladığı bu hız avantajı, üretim süreçlerinde tasarım optimizasyonu ve karar verme çalışmalarının daha etkin yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Çok sayıda alternatifin karşılaştırılması gereken durumlarda bu yaklaşım, geleneksel FEM analizlerine göre daha hızlı bir değerlendirme süreci sunmaktadır. Bunun sonucunda tasarım optimizasyonu, parametre analizi ve farklı üretim senaryolarının değerlendirilmesi daha kısa sürede gerçekleştirilebilmektedir (Kausik vd., 2025). Bu yönüyle AI tabanlı vekil modeller, FEM analizlerinin tamamen yerine geçen yöntemler olmak yerine, özellikle yoğun hesaplama gerektiren problemlerde FEM analizlerini destekleyen ve üretim mühendislerinin daha hızlı karar vermesine yardımcı olan tamamlayıcı araçlar olarak değerlendirilebilir.

Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, optimizasyon ve tasarım keşfinin AI destekli FEM uygulamalarının en yoğun araştırma alanlarından biri hâline geldiğini göstermektedir (Vaktskjold vd., 2026). Bunun yanında fizik tabanlı DL modelleri ve veri odaklı vekil modeller, yalnızca analiz sürelerini kısaltmakla kalmamakta, aynı zamanda tasarım sürecinin diğer aşamalarıyla daha güçlü bir bütünleşme sağlamaktadır (Ameri

vd., 2024). Teknik resimden elde edilen geometrik bilgiler, CAD/CAM ortamında geliştirilen modeller ve FEM analizlerinden elde edilen sonuçlar tek bir dijital iş akışı içerisinde değerlendirilebilmektedir. Böylece projelendirme süreci doğrusal bir yapıdan çıkarak, tasarım, analiz ve üretimin sürekli birbirini beslediği kapalı döngü bir mühendislik sürecine dönüşmektedir. Bu bütünlüklü yaklaşım, daha kısa geliştirme süreleri, daha düşük maliyet ve daha yüksek ürün kalitesi sağlayarak modern üretim mühendisliğinin temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir (Kausik vd., 2025).

5. KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI

Kestirimci bakım, üretim ekipmanlarında meydana gelebilecek arızaların önceden tahmin edilmesini ve bakım faaliyetlerinin bu tahminler doğrultusunda planlanmasını sağlayan veri odaklı bir bakım yaklaşımıdır. Geleneksel periyodik bakım uygulamalarında bakım işlemleri belirli zaman aralıklarında gerçekleştirilirken, arıza sonrası bakımda müdahale ancak ekipmanda bir arıza meydana geldikten sonra yapılmaktadır. Kestirimci bakım ise ekipmanın çalışma durumunu sürekli olarak izleyerek bakım ihtiyacının ortaya çıkabileceği zamanı belirlemeye odaklanmaktadır. Bu yaklaşımda üretim ekipmanlarına yerleştirilen sensörlerden elde edilen titreşim, sıcaklık, akım, basınç ve akustik emisyon gibi farklı türdeki veriler kullanılmaktadır. Toplanan veriler, ekipmanın mevcut çalışma durumunun değerlendirilmesi ve zaman içerisinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi amacıyla analiz edilmektedir. AI ve ML yöntemleri, bu veriler içerisindeki normal çalışma koşullarından sapmaları belirleyerek olası arızaların erken aşamada tespit edilmesine yardımcı olmaktadır. Bunun yanında, ekipmanın kalan kullanım ömrünün (Remaining Useful Life, RUL) tahmin edilmesi, bakım

planlamasının daha etkin biçimde yapılmasına olanak sağlamaktadır (Wu vd., 2024).

Kestirimci bakım sistemlerinde kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri arasında rastgele orman, gradyan artırma yöntemleri ve derin sinir ağları öne çıkmaktadır. Bu yöntemler, geçmiş bakım kayıtları ve sensör verilerinden yararlanarak ekipmanın davranışındaki değişimleri öğrenebilmekte ve gelecekte ortaya çıkabilecek arızalara ilişkin tahminler üretebilmektedir. Böylece bakım faaliyetleri yalnızca sabit bakım takvimlerine göre planlanması yerine, ekipmanın gerçek çalışma koşulları dikkate alınarak planlanabilmektedir.

5.1. Kalan Kullanım Ömrü Tahmini

Kestirimci bakımın önemli uygulama alanlarından biri, ekipmanın kalan kullanım ömrünün tahmin edilmesidir. Kalan kullanım ömrü, bir ekipmanın mevcut çalışma koşulları altında işlevini kabul edilebilir düzeyde sürdürebileceği tahmini süreyi ifade etmektedir. Bu tahmin, bakım zamanının belirlenmesi ve ekipmanın değiştirilmesine yönelik kararların verilmesi açısından önem taşımaktadır. Özellikle kritik üretim araçlarında meydana gelebilecek beklenmedik arızalar üretim kayıplarına ve yüksek bakım maliyetlerine neden olabileceğinden, RUL tahmininin doğru yapılması üretim sürekliliği açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. RUL tahmininde kullanılan DL yaklaşımları arasında uzun-kısa süreli bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) ağları, CNN ve son dönemde dikkat mekanizmalarından yararlanan modeller öne çıkmaktadır. Bu modeller, sensörlerden elde edilen zaman serisi verilerini analiz ederek ekipmanın çalışma sürecinde meydana gelen değişimleri öğrenebilmektedir. Özellikle LSTM gibi zaman bağımlılıklarını dikkate alabilen mimariler, ekipmanın bozulma sürecinin zaman içerisindeki gelişimini modellemede kullanılmaktadır. Böylece ekipmanın mevcut durumu ile gelecekteki olası bozulma durumu arasında

ilişki kurulabilmektedir ve bozulma eğrisinin daha isabetli biçimde tahmin edilmesi mümkün olmaktadır (Wu vd., 2024).

RUL tahmin modellerinin başarısı büyük ölçüde kullanılan eğitim verisinin niteliğine bağlıdır. Modelin ekipmanın farklı çalışma koşullarını ve arıza süreçlerini yeterli biçimde öğrenebilmesi için eğitim verilerinin bu durumları mümkün olduğunca temsil etmesi gerekmektedir. Özellikle üretim ortamlarında bazı arızaların nadir görülmesi, bu arızalara ilişkin yeterli sayıda veri elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum veri setlerinde sınıf dengesizliğine yol açabilmektedir. Dolayısı ile modelin daha az görülen arıza türlerini doğru biçimde tahmin etmesini güçleştirebilmektedir. Bu nedenle kestirimci bakım sistemlerinde modelin algoritmik başarımının yanı sıra, veri toplama ve veri hazırlama süreçlerine de önem verilmesi gerekmektedir.

5.2. Transfer Öğrenmesi ve Genellenebilirlik

Kestirimci bakım sistemlerinin karşılaştığı önemli sorunlardan biri, geliştirilen modellerin farklı ekipmanlar ve çalışma koşulları arasında aynı başarı düzeyini gösterememesidir. Bir makineden elde edilen verilerle eğitilen model, farklı bir makineye veya farklı bir üretim ortamına doğrudan uygulandığında beklenen performansı göstermeyebilir. Bunun temel nedenlerinden biri, makinelerin çalışma koşulları, yük seviyeleri, titreşim özellikleri ve arıza davranışları arasındaki farklılıklardır. Bu nedenle geliştirilen AI modellerinin farklı koşullara uyum sağlayabilmesi ve genellenebilir olması önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir.

Transfer öğrenmesi, bir alanda öğrenilen bilgi ve özelliklerin benzer bir başka alandaki probleme aktarılmasına olanak sağlamaktadır. Böylece her yeni ekipman veya üretim ortamı için modelin sıfırdan eğitilmesine duyulan ihtiyaç azaltılabilmektedir. Özellikle etiketli arıza verisinin sınırlı olduğu

üretim ortamlarında bu yaklaşım, mevcut modellerden yararlanarak daha az veriyle etkili sonuçlar elde edilmesine ve veri toplama maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu noktada alan uyarlama (domain adaptation) teknikleri de önemli bir rol üstlenmektedir. Alan uyarlama, kaynak alanda öğrenilen bilgi ve özelliklerin hedef alana aktarılmasını sağlayarak iki alan arasındaki veri dağılımı farklılıklarının model performansı üzerindeki olumsuz etkisini azaltmayı amaçlamaktadır. Örneğin belirli bir makine tipinden elde edilen verilerle eğitilmiş bir modelin farklı bir makine tipinde veya farklı bir çalışma rejiminde kullanılabilmesi için alan uyarlama yöntemlerinden yararlanılabilmektedir. Böylece farklı makineler ve çalışma koşulları arasında daha yüksek düzeyde model genellenebilirliği sağlanması hedeflenmektedir (Li vd., 2022).

Kestirimci bakım uygulamalarının üretim sistemlerinde yaygınlaşması; plansız duruş sürelerinin azaltılması, bakım maliyetlerinin düşürülmesi ve ekipmanların daha uzun süre verimli biçimde kullanılabilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır (Plathottam vd., 2023). Ancak bu kazanımlar yalnızca uygun bir AI modelinin geliştirilmesi ile kendiliğinden ortaya çıkmamaktadır. Sensörlerin ekipman üzerinde doğru noktalara yerleştirilmesi, verilerin uygun örnekleme sıklığıyla toplanması ve elde edilen verilerin güvenilir olması sistemin başarısı açısından büyük önem taşımaktadır. Bunun yanında, model tarafından üretilen tahminlerin bakım ekipleri tarafından doğru biçimde yorumlanması ve zamanında operasyonel kararlara dönüştürülmesi gerekmektedir. Dolayısıyla kestirimci bakımın başarısı, AI algoritmaları ile fiziksel üretim ortamının birlikte değerlendirilmesine bağlıdır. Sensörlerden veri toplama, verilerin işlenmesi, arıza veya kullanım ömrü tahmini ve bu tahminlerin bakım planlarına aktarılması birbirini tamamlayan aşamalardır. Bu bütüncül yaklaşım sayesinde AI, yalnızca arıza meydana geldikten sonra müdahale eden bir sistemin parçası

olmaktan çıkarak, bakım kararlarının önceden planlanmasına ve üretim sürekliliğinin desteklenmesine katkı sağlayan bir araç hâline gelmektedir.

6. GÖRÜNTÜ TABANLI KALİTE KONTROLÜ VE KUSUR TESPİTİ

Kalite kontrolü, üretim süreçlerinde ürün güvenilirliğinin sağlanması, standartların korunması ve müşteri beklentilerinin karşılanması açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel üretim sistemlerinde kalite denetimi büyük ölçüde eğitilmiş operatörlerin gerçekleştirdiği görsel muayenelere dayanmaktadır. Ancak manuel denetim; operatör yorgunluğu, dikkat dağınıklığı, kişisel değerlendirme farklılıkları ve düşük tekrarlanabilirlik gibi nedenlerle yüksek doğruluk ve süreklilik gerektiren modern üretim hatlarında önemli sınırlılıklar göstermektedir. Özellikle yüksek üretim hızına sahip endüstriyel ortamlarda bu kısıtlar, otomatik görsel denetim (Automatic Visual Inspection, AVI) sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu hâle getirmiştir (Kausik vd., 2025).

AI ve DL tabanlı bilgisayarlı görü yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte kalite kontrol süreçlerinde önemli bir dönüşüm yaşanmıştır. CNN, geleneksel görüntü işleme yöntemlerinde gerekli olan manuel öznitelik çıkarımını büyük ölçüde ortadan kaldırmış ve ham görüntülerden doğrudan temsil öğrenebilen modellerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Böylece karmaşık yüzey dokuları, düzensiz geometriler ve farklı aydınlatma koşullarında oluşan kusurlar daha yüksek doğrulukla analiz edilebilmektedir (Ameri vd., 2024). Günümüzde bu sistemler yalnızca kusurun varlığını belirlemekle kalmamakta; kusurun konumu, boyutu ve türünü de ayrıntılı biçimde analiz ederek kalite kontrol süreçlerine kapsamlı karar desteği sunmaktadır (Hütten vd., 2024).

6.1. Model Türleri ve Görüntü Tabanlı Kusur Tespit Yaklaşımları

Görüntü tabanlı kalite kontrol uygulamalarında kullanılan modeller, çözülmesi gereken probleme göre farklı görevler üstlenmektedir. Literatürde bu görevler genel olarak ikili sınıflandırma, çok sınıflı sınıflandırma, nesne tespiti ve piksel düzeyinde görüntü segmentasyonu olmak üzere dört temel grupta incelenmektedir (Hütten vd., 2024). İkili sınıflandırma yaklaşımları ürünün kusurlu veya kusursuz olduğunu belirlemeye odaklanırken, nesne tespit modelleri kusurun görüntü üzerindeki yerini belirlemektedir. Segmentasyon yöntemleri ise kusurun sınırlarını piksel düzeyinde çıkararak özellikle hassas üretim süreçlerinde daha ayrıntılı analiz yapılmasına olanak tanımaktadır.

Uzun yıllar boyunca kalite kontrol uygulamalarında CNN tabanlı modeller baskın yaklaşım olmuştur. Son yıllarda ise ViT tabanlı mimariler, görüntünün farklı bölgeleri arasındaki uzun mesafeli ilişkileri öğrenebilme yetenekleri sayesinde dikkat çekmektedir (Hütten vd., 2024). Bununla birlikte, dönüştürücü tabanlı modellerin yüksek hesaplama maliyeti ve donanım gereksinimleri, gerçek zamanlı üretim hatlarında kullanılmalarını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle araştırmalar, yüksek doğruluk ile düşük hesaplama maliyeti arasında denge kurabilen Lightweight modeller üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen DFP-YOLO gibi optimize edilmiş DL mimarileri, daha az parametre kullanmalarına rağmen yüzey kusurlarını yüksek doğrulukla tespit edebilmekte ve gerçek zamanlı kalite kontrol uygulamalarında başarılı sonuçlar vermektedir (Shi vd., 2025). Benzer şekilde, yalnızca görüntü düzeyindeki etiketlerle öğrenebilen Çoklu Örneklemeli Öğrenme (Multiple Instance Learning, MIL) yöntemleri, ayrıntılı piksel etiketleme ihtiyacını azaltarak endüstriyel uygulamalarda veri hazırlama maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir (Xu vd., 2024).

AI tabanlı kalite kontrol sistemleri günümüzde yalnızca üretim sonunda yapılan kusur tespitine odaklanmamaktadır. Kamera sistemleri, sensörler ve üretim ekipmanlarından elde edilen veriler birlikte değerlendirilerek süreç boyunca sürekli izleme gerçekleştirilebilmektedir. Böylece kusurlar belirlenebilmektedir, aynı zamanda da kusurların oluşmasına neden olan süreç parametreleri de analiz edilerek üretim sırasında gerekli düzeltmeler yapılabilir (Jan vd., 2023). Bu yaklaşım kalite kontrolünü, üretim sonrasında gerçekleştirilen bir denetim faaliyetinden çıkararak süreç boyunca devam eden önleyici bir kalite güvence mekanizmasına dönüştürmektedir.

Üretim sırasında elde edilen görüntüler, CAD ortamındaki referans model ile sürekli karşılaştırılarak katman kaymaları, malzeme birikimleri ve geometrik sapmalar henüz üretim devam ederken belirlenebilmektedir (Bast vd., 2025). Benzer şekilde yarı iletken üretiminde wafer bin map görüntülerinin AI ile analiz edilmesi, kusurlu ürünlerin belirlenmesini, aynı zamanda üretim ekipmanlarında oluşabilecek arızaların erken aşamada tespit edilmesini de mümkün hâle getirmektedir (Zhang vd., 2024). Böylece kalite kontrol süreçleri, üretimin tamamını kapsayan kapalı döngü bir karar destek mekanizmasına dönüşmektedir.

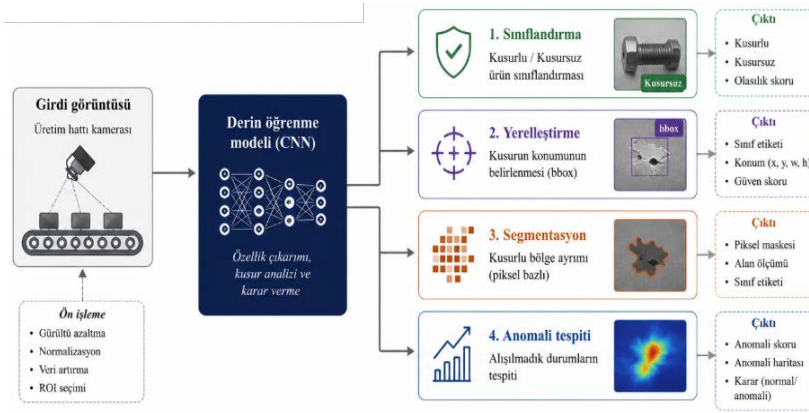
6.2. Veri Kıtlığı ve Öğrenme Stratejileri

Görüntü tabanlı AI uygulamalarının endüstride yaygınlaşmasının önündeki en önemli sorunlardan biri yeterli miktarda ve kaliteli eğitim verisine erişilememesidir. Üretim hatlarında kusursuz ürün sayısı oldukça fazla olmasına karşın kusurlu örneklerin sınırlı olması, veri dengesizliği problemi ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, teknik gelişmelerin yanında veri yönetimi, üretim altyapısı ve kurumsal uyum süreçlerinin de önemli olduğunu göstermektedir (Hütten vd., 2024). Bu nedenle son yıllarda transfer öğrenmesi, öz denetimli öğrenme (self-supervised learning) ve ince ayar (fine-tuning) yaklaşımları

yaygın olarak kullanılmaktadır. Büyük veri kümeleri üzerinde önceden eğitilmiş modeller, sınırlı sayıda endüstriyel görüntü ile yeniden eğitilerek başarılı sonuçlar verebilmektedir. Böylece yüksek miktarda etiketli veri gereksinimi önemli ölçüde azalmaktadır.

Sınırlı veri koşullarında model performansını artırmak amacıyla few-shot learning ve sentetik veri üretimi de giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Uzman bilgisini kullanan özellik zenginleştirme yöntemleri, çok az sayıda kusurlu örnekle yüksek doğrulukta sınıflandırma yapılmasına olanak sağlamaktadır (Gong vd., 2024). Bunun yanında DDPM ile geliştirilen veri artırma teknikleri, gerçeğe oldukça yakın kusur görüntüleri oluşturarak veri dengesizliği problemini azaltmaktadır (Tao, 2024). Bu gelişmeler, görüntü tabanlı kalite kontrol sistemlerinin laboratuvar ortamının yanında, gerçek zamanlı endüstriyel üretim hatlarında da daha güvenilir ve yaygın biçimde kullanılmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Kalite kontrolü, üretim süreçlerinin en kritik aşamalarından biri olup, geleneksel olarak insan denetçilerin görsel muayenesine dayanmaktadır. Ancak manuel muayenenin yorucu, öznel ve düşük tekrarlanabilirlikte olması, otomatik görsel denetim sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. DL tabanlı bilgisayarlı görü yöntemleri, özellikle CNN, yüzey kusurlarının sınıflandırılması, konumlandırılması ve segmentasyonu gibi görevlerde yüksek doğruluk oranları sunmaktadır (Hütten vd., 2024).



Şekil 3. Görüntü tabanlı kalite kontrolünde temel görev kategorileri (He vd., 2016; Redmon ve Farhadi 2018; Ronneberger vd., 2015).

7. ÜRETİM PLANLAMA, OPTİMİZASYON VE DİJİTAL İKİZ ENTEGRASYONU

Modern imalat sistemlerinde değişen müşteri talepleri, küresel rekabet ve karmaşılaşan tedarik zincirleri, daha esnek, öngörülebilir ve veriye dayalı üretim yönetimini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda üretim sistemlerinin gerçek zamanlı izlenmesi, olası sorunların önceden belirlenmesi ve üretim kararlarının değişen koşullara göre güncellenmesi önem kazanmıştır. Endüstri 4.0 kapsamında öne çıkan dijital ikiz teknolojisi, bu gereksinimlere yanıt veren önemli araçlardan biridir.

Dijital ikiz, fiziksel bir üretim varlığının, sisteminin veya sürecinin sanal ortamda temsil edilmesini ve bu temsilin fiziksel sistemden elde edilen verilerle sürekli güncellenmesini sağlayan bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır (Tao vd., 2019a). Fiziksel varlık, sanal model ve aralarındaki veri alışverişinin birlikte çalışması; üretim sisteminin mevcut durumunun izlenmesine,

olası değişimlerin değerlendirilmesine ve farklı kararların sonuçlarının incelenmesine olanak tanımaktadır (Tao vd., 2019b).

AI ve ML algoritmalarının dijital ikiz mimarileriyle bütünleştirilmesi, bu yapıya tahmin ve karar desteği yetenekleri kazandırmaktadır. Böylece dijital ikiz, mevcut durumu izleyen betimleyici bir araç olmanın ötesine geçerek, olası arızaları ve kalite sapmalarını öngören kestirimci ve müdahale seçeneklerinin belirlenmesine yardımcı olan bir yapıya dönüşebilmektedir (Kausik vd., 2025). Dijital ikiz ile fiziksel üretim sistemi arasındaki çift yönlü veri iletişimi, bu sürecin temelini oluşturmaktadır. Fiziksel sistemden alınan veriler sanal modeli güncellerken, sanal modelde gerçekleştirilen analiz ve simülasyon sonuçları da fiziksel sisteme yönelik kararları desteklemektedir. Bu etkileşim, üretim süreçlerinin değişen koşullara göre güncellenmesine, üretim duruşlarının azaltılmasına, kaynak kullanımının iyileştirilmesine ve üretim planlarının daha esnek yönetilmesine olanak sağlamaktadır.

7.1. Dijital İkizin Bileşenleri ve İşlevleri

Dijital ikiz mimarisi genel olarak fiziksel varlık, sanal model, bu iki ortam arasındaki veri bağlantısı ve verilerin bilgiye ve uygulamaya dönüştürüldüğü hizmet katmanından oluşmaktadır (Tao vd., 2019b). Bu bileşenler birlikte çalışarak fiziksel üretim ortamının sanal ortamda temsil edilmesini ve üretim kararlarının desteklenmesini sağlamaktadır. Fiziksel varlık katmanı; üretim tezgâhları, robotik kollar, sensörler, iş parçaları, taşıma sistemleri ve diğer ekipmanların bulunduğu gerçek üretim ortamını ifade etmektedir. Sanal model katmanı ise fiziksel sistemin geometrik özelliklerini, fiziksel davranışlarını, çalışma koşullarını ve işleyiş kurallarını dijital ortamda temsil etmektedir. Böylece sanal model fiziksel sistemin görünümünü ile birlikte, davranışını ve işleyişini de yansıtabilmektedir.

Veri bağlantısı katmanı, fiziksel varlık ile sanal model arasındaki veri alışverişini sağlamaktadır. Sensör ve üretim ekipmanlarından elde edilen veriler sanal modele aktarılırken, sanal modeldeki analiz sonuçları fiziksel sisteme yönelik kararları desteklemektedir. IIoT protokolleri ve düşük gecikmeli haberleşme altyapıları bu veri alışverişinin güvenilir ve zamanında gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır. Hizmet ve uygulama katmanında ise elde edilen veriler analiz edilerek kestirimci bakım, süreç optimizasyonu, kalite kontrol, üretim planlama ve karar destek uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu bileşenlerin birlikte çalışması, dijital ikizi fiziksel ve sanal ortamlar arasında sürekli etkileşim sağlayan bütünlük bir yapıya dönüştürmektedir. Siber-fiziksel sistemlerle (Cyber-Physical Systems, CPS) arasındaki temel fark, dijital ikizin fiziksel varlığın sanal model üzerinden izlenmesi, analiz edilmesi ve gerektiğinde yönlendirilmesine daha fazla odaklanmasıdır (Tao vd., 2019a).

Dijital ikizin güvenilirliği, sanal modelin fiziksel sistemi doğru biçimde temsil etmesine bağlıdır. Bu doğruluk geometrik özelliklerin yanı sıra fiziksel davranışların, çalışma koşullarının ve üretim sürecindeki değişimlerin de doğru yansıtılmasını gerektirmektedir. Özellikle katmanlı üretim ve gelişmiş imalat süreçlerinde tasarım aşamasında oluşturulan ideal 3D CAD geometrileri sanal modelin temel referansını oluşturmaktadır (Bast vd., 2026). Ancak gerçek üretim koşullarının tasarım modelinden farklılaşabilmesi nedeniyle dijital ikizin üretim sırasında elde edilen verilerle sürekli güncellenmesi gerekmektedir.

Görüntü tabanlı izleme sistemlerinin dijital ikizle bütünlleştirilmesi de bu güncelleme sürecini desteklemektedir. DL tabanlı bilgisayarlı görü sistemleri, fiziksel yüzeylerden otomatik olarak öznitelik çıkararak yüzey kusurları, geometrik farklılıklar

ve diğer üretim sapmalarının belirlenmesine katkı sağlamaktadır (Ameri vd., 2024).

7.2. Çizelgeleme ve Kaynak Optimizasyonu

Geleneksel üretim planlama ve çizelgeleme yaklaşımları, statik varsayımlara ve belirli zaman aralıklarıyla yapılan değerlendirmelere dayanmaktadır. Ancak gerçek üretim ortamlarında tezgâh arızaları, ham madde gecikmeleri veya acil sipariş güncellemeleri gibi dinamik kesintiler sıklıkla yaşanmaktadır. AI destekli dijital ikiz entegrasyonu sayesinde, üretim çizelgeleme, kaynak tahsisi ve enerji optimizasyonu gibi süreçler gerçek zamanlı veriyle desteklenerek dinamik biçimde güncellenebilmektedir (Kusiak, 2018).

Akıllı üretim sistemlerinde AI destekli dijital ikizler, arıza öncesi senaryo analizlerinin yapılmasına, üretim hattı darboğazlarının önceden belirlenmesine ve üretim planlarının değişen taleplere göre yeniden düzenlenmesine imkân tanımaktadır. Bu kapsamda, gerçek zamanlı kalite güvencesi ve kestirimci kalite kontrol algoritmaları, hatalı parçaların sonraki işleme istasyonlarına geçmesini engelleyerek gereksiz kaynak kullanımının önüne geçmektedir (Kausik vd., 2025). Özellikle sezgisel optimizasyon algoritmalarının Reinforcement Learning yöntemleriyle birleştirilmesi, çok değişkenli çizelgeleme problemlerinin daha kısa sürede ve daha az hesaplama yüküyle çözülmesine katkı sağlamaktadır (Chen vd., 2023). Reinforcement Learning ajanları, dijital ikizin sunduğu simülasyon ortamında binlerce olası çizelgeleme senaryosunu güvenle deneyimleyerek en düşük maliyetli ve en yüksek verimli stratejiyi öğrenebilmektedir. Yüksek doğrulukta bir dijital ikizin oluşturulabilmesi, güvenilir sensör altyapısı ve tutarlı veri yönetimi gerektirmektedir. Fiziksel sistem ile sanal model arasındaki senkronizasyonun bozulması, öngörülerin güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle model

güncelleme ve doğrulama süreçlerinin sürekli biçimde sürdürülmesi gerekmektedir (Tao vd., 2019b). Sensör gürültüleri, veri kayıpları ve yüksek boyutlu verinin işleme gecikmesi gibi teknik zorluklar, kenar bilişim (edge computing) ve Lightweight ML algoritmalarının dijital ikiz mimarilerine entegre edilmesiyle aşılmaktadır (Kausik vd., 2025).

Dijital ikiz, fiziksel bir üretim varlığının veya sürecinin sanal ortamda gerçek zamanlı olarak temsil edilmesini sağlayan bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır (Tao vd., 2019a). Fiziksel varlık, sanal model ve bu ikisi arasındaki çift yönlü veri akışından oluşan bu yapı, üretim sistemlerinin izlenmesi, simüle edilmesi ve optimize edilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Tao vd., 2019b). AI algoritmalarının dijital ikiz mimarileriyle bütünleştirilmesi, sanal modelin yalnızca tanımlayıcı değil, aynı zamanda öngörücü ve reçeteleyici işlevler üstlenmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 4. Dijital ikiz mimarisinde AI analitik katmanı (Tao vd., 2019; Grieves ve Vickers 2017 and Wang vd., 2022).

8. ÜRETKEN TASARIM VE ÜRÜN GELİŞTİRME SÜREÇLERİNDE YAPAY ZEKÂ

Ürün ve süreç tasarımı aşamasında AI, tasarım uzayının otomatik biçimde keşfedilmesine olanak tanıyan üretken tasarım (generative design) yaklaşımlarıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır. Geleneksel ürün geliştirme süreçlerinde tasarım

kararları, büyük ölçüde mühendislerin tecrübelerine ve sezgilerine dayanmaktadır. Bu durum, tasarım alternatiflerinin sınırlı kalmasına ve uzun deneme yanılma döngülerine yol açabilmektedir. Üretken tasarım yaklaşımları ise tanımlanan sınırlar çerçevesinde binlerce olası geometriyi otonom olarak üretebilmektedir.

Multimodal ML yöntemleri, geometrik, metinsel ve performansa ilişkin verileri bir arada işleyerek tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesini hızlandırmaktadır ve mühendislik tasarım sürecine yeni araçlar kazandırmaktadır (Song vd., 2024). Bu yaklaşımlar, ağırlık optimizasyonu, malzeme seçimi ve yapısal performans gibi çok kriterli mühendislik problemlerinde insan tasarımcının bilişsel sınırlarının ötesinde çözüm alternatifleri üretebilmektedir. ML algoritmalarının entegrasyonu, tasarım aşamasında üretim kısıtlarının dikkate alınmasını sağlamaktadır. Bu sayede hem ürün geliştirme süresi kısalmakta hem de imalat kalitesi güvence altına alınmaktadır (Kausik vd., 2025). Ayrıca üretken tasarım çıktıları, geleneksel talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesi güç olan karmaşık ve organik yapılardan oluşmaktadır. Bu noktada üretken tasarım mimarileri, katmanlı üretim teknolojileri ile doğrudan bütünleşmektedir. Katmanlı üretim, karmaşık nesneleri dijital üç boyutlu geometrilerden katman katman inşa ederek malzeme israfını azaltmaktadır ve esnek tasarımı desteklemektedir (Bast vd., 2026).

8.1. Multimodal Öğrenme ve Tasarım Uzayının Keşfi

Mühendislik tasarımında Multimodal ML yaklaşımları; üç boyutlu geometri, performans simülasyonu çıktıları ve doğal dil tabanlı tasarım gereksinimleri gibi farklı veri türlerini ortak bir temsil uzayında birleştirmektedir (Song vd., 2024). Bu bütünleştirme, tasarımcının önceden tanımlamadığı ancak performans kriterlerini karşılayan alternatif geometrilerin

otomatik biçimde üretilmesine olanak tanımaktadır. Böylece tasarım döngü süresi kısalmaktadır. DL mimarileri, karmaşık geometrik yapılardan manuel müdahale olmaksızın otonom öznitelik çıkarımı yapabilmektedir (Ameri vd., 2024).

Üretken çekişmeli ağlar (Generative Adversarial Networks, GAN) ve difüzyon tabanlı modeller, bu alanda öne çıkan üretken mimariler arasında yer almaktadır (Song vd., 2024). Özellikle gürültü azaltıcı DDPM, karmaşık veri dağılımlarını öğrenebilmektedir. Bu modeller, yüksek kaliteli ve gerçekçi tasarım numuneleri sentezleyerek tasarım uzayının daha geniş ölçekte taranmasını sağlamaktadır (Tao, 2024). Bunun yanı sıra uzman bilgisini temel alan üretken stratejiler, mekanik prensipleri ve deneysel tecrübeleri algoritmik süreçlere dahil etmektedir. Uzman tecrübesinin ve veri odaklı öznitelik zenginleştirme yöntemlerinin birleştirilmesi, sınırlı veri koşullarında dahi son derece zengin tasarım alternatiflerinin üretilmesine katkı vermektedir (Gong vd., 2024). Multimodal öğrenme teknikleri sayesinde mühendisler, mukavemet, ağırlık ve üretilebilirlik dengesini en üst düzeye çıkaran optimal formları hızla keşfedebilmektedir.

8.2. Robotik Otomasyon ve Esnek Üretim

Robotik ve otomasyon sistemleriyle bütünleşik olarak kullanılan AI teknikleri, üretim hattındaki montaj, kaynak ve malzeme taşıma gibi görevlerin de daha esnek ve adaptif biçimde gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır (Soori vd., 2023a). Geleneksel otomasyon sistemleri, sabit ve önceden programlanmış hareket hatlarına tabidir. Bu durum, ürün çeşidinin sık değiştiği modern üretim ortamlarında esnekliği kısıtlamaktadır. Derin Reinforcement Learning yöntemleri ise, robotik kolların değişken üretim koşullarına uyum sağlayarak görev planlamasını çevrimiçi biçimde güncelleyebilmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, ürün çeşitliliğinin yüksek ve

üretim miktarlarının az olduğu esnek imalat ortamlarında AI'nın önemli bir rol üstlenmesini sağlamaktadır

İncelenen çalışmalarda, DL tabanlı görü sistemlerinin robotik kavrama ve nesne tanıma görevlerindeki başarımının, geleneksel kural tabanlı robotik programlamaya kıyasla belirgin biçimde yüksek olduğu bildirilmektedir (Soori vd., 2023a). Görü tabanlı AI sistemlerinde Lightweight evrişimli ağların (örneğin DFP-YOLO gibi) tercih edilmesi, parametre karmaşıklığını azaltarak robotik kolların anlık nesne tespiti ve kavrama kararlarını gerçek zamanlı olarak almasına imkân sunmaktadır (Shi vd., 2025). Kameralar ve sensörlerle donatılmış robotik hücreler, iş parçası üzerindeki hataları veya konum sapmalarını işlem esnasında tespit edebilmektedir. Anlık görsel denetim ve otonom kavrama yetenekleri, hatalı parçaların montaj hattına girmesini önleyerek hat üstü kalite güvencesine doğrudan katkı sağlamaktadır (Kausik vd., 2025). Böylece AI destekli robotik otomasyon, üretkenliği artırırken esnek ve hatasız imalat süreçlerinin kurulmasına rehberlik etmektedir.

Ürün ve süreç tasarımı aşamasında AI, tasarım uzayının otomatik biçimde keşfedilmesine olanak tanıyan üretken tasarım yaklaşımlarıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır. Multimodal ML yöntemleri, geometrik, metinsel ve performans ilişkili verileri bir arada işleyerek tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesini hızlandırmaktadır. Bu durum mühendislik tasarım sürecine yeni araçlar kazandırmaktadır (Song vd., 2024).

9. UYGULAMA ZORLUKLARI VE GELECEK YÖNELİMLER

AI teknolojilerinin endüstriyel üretim ortamlarına entegrasyonu, yüksek teknik ve operasyonel potansiyeline rağmen çeşitli engellerle karşı karşıyadır. Bu teknolojilerin sanayi ölçeğinde etkin biçimde uygulanması yalnızca algoritmik

başarıya bağlı değildir. Endüstriyel altyapının olgunluğuna ve operasyonel süreçlerin uyarlanabilirliğine de bağlıdır. Veri toplama ve yönetimi eksiklikleri, açıklanabilirlik sorunları, siber güvenlik riskleri, altyapı maliyetleri ve nitelikli insan kaynağı yetersizliği başlıca sistematik engeller arasında yer almaktadır (Plathottam vd., 2023). İmalat sektöründeki heterojen üretim süreçleri, farklı dönemlere ait donanım mimarileri ve standartlaştırılmamış veri formatları, AI çözümlerinin uygulanmasını güçleştirmektedir. Her fabrikanın kendine özgü fiziksel ve operasyonel kısıtlara sahip olması, AI modellerinin ölçeklenmesini zorlaştırmakta ve özelleştirilmiş yazılım mimarilerine olan ihtiyacı artırmaktadır (Nti vd., 2022).

Model performansının farklı üretim koşullarına genellenebilirliği de önemli bir teknik sınırlılıktır. Kontrollü ortamlarda yüksek başarı gösteren modeller, değişken ve gürültülü endüstriyel verilerle karşılaştığında performans kaybı yaşayabilmektedir (Jan vd., 2023). Ayrıca sınırlı ve dengesiz veri kümeleri, nadir arıza ve kusurların tespitini zorlaştırmakta; DL modellerinin aşırı öğrenmesine (overfitting) veya nadir kusurları gözden kaçırmasına (missed detection) neden olabilmektedir (Wu vd., 2024; Hütten vd., 2024; Ameri vd., 2024).

Endüstriyel uygulamalardaki bir diğer önemli kısıt etiketleme maliyetidir. Piksel düzeyinde detaylı etiket üretmek zaman alan ve insan gücüne bağımlı bir süreçtir. Bu durum, modellerin kapalı dünya (closed-world) varsayımıyla eğitilmesine ve yeni veya bilinmeyen kusur desenlerini tanımakta zorlanmasına yol açabilmektedir (Xu vd., 2024; Zhang vd., 2025). Bu kısıtları aşmak için self-supervised learning, transfer öğrenmesi ve few-shot learning gibi yöntemler kullanılmaktadır. DDPM dayalı sentetik veri artırma yöntemleri de veri dengesizliğinin giderilmesine katkı sağlamaktadır (Gong vd., 2024; Tao, 2024).

AI sistemlerinin karar süreçlerindeki şeffaflık eksikliği, özellikle kritik üretim uygulamalarında operatör güvenliğini zayıflatılmaktadır (Alenizi vd., 2023). ML mimarilerinin karmaşıklığı, çıktıların izlenebilirliğini ve yorumlanabilirliğini kısıtlayabilmektedir. Bu nedenle AI sistemlerinin XAI teknikleriyle desteklenmesi önem taşımaktadır. Bunun yanında, hesaplama karmaşıklığı ile gerçek zamanlı çalışma gereksinimi arasındaki denge önemli bir donanımsal engeldir. Kenar cihazlarda (edge computing) veya tezgah başında gerçek zamanlı denetim için lightweight mimarilerin kullanılması gerekmektedir (Shi vd., 2025).

İşletmelerin AI projelerine yönelik örgütsel hazırlık düzeyi; veri yönetişimi kültürü, çalışanların dijital yetkinlikleri ve üst yönetim desteğiyle ilişkilidir (Plathottam vd., 2023). Nitelikli insan kaynağı yetersizliği ve örgütsel direnç, teknik olarak uygun çözümlerin sahada beklenen faydayı sağlayamamasına yol açabilmektedir (Nti vd., 2022). Akademik çalışmalardaki başarılar ile sanayi ortamına entegrasyon arasındaki zaman gecikmesi, teknik olgunlaşmanın yanında kurumsal uyumun da zaman aldığını göstermektedir (Kausik vd., 2025).

Gelecekte üretim mühendisliğinde AI araştırmalarının, Multimodal veri füzyonu, XAI, self-supervised learning ve insan ile makinenin ortak çalıştığı hibrit sistemler etrafında yoğunlaşması beklenmektedir (Chen vd., 2023). Özellikle sınırlı etiketli veriyle çalışabilen öğrenme paradigmasının geliştirilmesi, AI çözümlerinin küçük ve orta üretim kapasitesine sahip üretim işletmelerine yayılmasını kolaylaştırabilecektir (Hütten vd., 2024). Bu durum, KOBİ'lerin yüksek maliyetli etiketleme süreçlerinden kurtulmasını ve akıllı üretim teknolojilerine daha düşük bütçelerle erişmesini sağlayacaktır (Kausik vd., 2025). Dijital ikiz ile üretken AI modellerinin bütünleştirilmesi, sentetik veri üretimi yoluyla veri kıtlığı sorununun hafifletilmesine katkı sağlayabilecek bir yönelimdir

(Tao vd., 2019a). Gerçek imalat ortamlarında nadir görülen kusur türlerinin toplanmasındaki zorluklar, difüzyon modelleri ve üretken mimariler aracılığıyla sentetik örnekler üretilerek aşılabilmektedir (Tao, 2024).

Endüstri 5.0 tartışmalarıyla birlikte, üretim sistemlerinde insan merkezli, sürdürülebilir ve dayanıklı AI mimarilerinin geliştirilmesi de önemli bir araştırma eksenine hâline gelmiştir (Kusiak, 2018). Akıllı fabrikalarda insan tecrübesi ile AI'nın ortak karar mekanizmaları kurması operasyonel başarıyı desteklemekte, insan-makine iş birliği ise operatörlerin AI kararlarını denetlemesine olanak tanımaktadır (Bast vd., 2026).

Arıza teşhisi ve tasarım optimizasyonu gibi alanlarda fiziksel yasalarla bütünleştirilmiş öğrenme (physics-informed learning) yaklaşımlarının, salt veri temelli modellere kıyasla daha az veriyle daha güvenilir sonuçlar üretebileceği öngörülmektedir (Li vd., 2022; Song vd., 2024). Fizik kurallarının öğrenme sürecine dâhil edilmesi, modellerin hatalı tahminler yapma riskini azaltmaktadır (Ameri vd., 2024).

Standart veri kümelerinin ve karşılaştırma ölçütlerinin geliştirilmesi de farklı çalışmalar arasında yöntem karşılaştırmasını kolaylaştıracak ve alanın olgunlaşmasına katkı sağlayacaktır (Jan vd., 2023). Ortak veri tabanlarının ve standart değerlendirme metriklerinin oluşturulması, farklı akademik grupların geliştirdiği algoritmaların kıyaslanmasına zemin hazırlayacaktır (Zhang vd., 2024). Bu adımlar, AI tabanlı üretim teknolojilerinin laboratuvar ortamından çıkarak endüstriyel ölçekte uygulanmasını hızlandıracaktır.

10. SONUÇ

AI teknolojilerindeki hızlı gelişim, üretim mühendisliğinde tasarım, analiz, üretim ve kalite güvencesi

süreçlerini yeniden şekillendirmiştir. Endüstri 4.0 ile başlayan dijitalleşme; sensör teknolojileri, IIoT, büyük veri analitiği ve bulut bilişim altyapılarındaki gelişmelerle üretim sistemlerini daha bağlantılı, esnek ve veri odaklı hâle getirmiştir. Bu bölümde ele alınan çalışmalar, AI'nın üretim mühendisliğinde yalnızca otomasyonu sağlayan bir araç olmadığını, tasarımdan üretime ve kalite kontrolüne kadar ürün yaşam döngüsünü destekleyen stratejik bir teknoloji hâline geldiğini göstermektedir. ML, DL ve bilgisayarlı görü tabanlı yöntemler sayesinde üretim süreçleri gerçek zamanlı izlenebilmektedir. Olası hatalar önceden tahmin edilerek üretim parametreleri dinamik olarak güncellenebilmektedir. Böylece üretim süreçleri daha öngörülebilir, verimli ve sürdürülebilir hâle gelmektedir.

AI; talaşlı imalat, kaynak, döküm, metal şekillendirme ve eklemeli imalat gibi farklı üretim yöntemlerinde uygulanabilmektedir. Sensör verileri ile görüntü tabanlı analizlerin birlikte değerlendirilmesi, hem kusurların hem de bu kusurlara neden olan süreç değişkenlerinin belirlenmesini sağlayarak kalite kontrolü üretim sürecinin ayrılmaz bir bileşeni hâline getirmektedir. AI'nın katkısı üretim hattıyla sınırlı kalmamaktadır. Teknik resim, CAD, CAM ve FEM gibi projelendirme süreçlerini de desteklemektedir. Özellik tanıma sistemleri teknik çizimlerden üretim bilgilerinin çıkarılmasını, üretken tasarım yaklaşımları farklı tasarım alternatiflerinin oluşturulmasını ve AI destekli vekil modeller karmaşık mühendislik analizlerinin daha kısa sürede gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu gelişmeler tasarım-üretim arasındaki bilgi akışını güçlendirerek ürün geliştirme süresinin ve maliyetlerin azaltılmasına katkı sunmaktadır.

Kestirimci bakım ve görüntü tabanlı kalite kontrol de AI'nın üretimdeki önemli uygulama alanlarıdır. Titreşim, sıcaklık, akım ve akustik verilerin sürekli analiziyle ekipman arızaları önceden tahmin edilebilmekte, plansız duruşlar azaltılabilmekte

ve bakım faaliyetleri daha etkin planlanabilmektedir. DL tabanlı bilgisayarlı görü sistemleri ise yüzey kusurlarının tespitini desteklemektedir. Hafif DL modelleri, transfer öğrenmesi, az örnekli öğrenme ve sentetik veri üretimi gibi yöntemler de veri yetersizliği ve yüksek hesaplama maliyeti gibi kısıtların aşılmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, AI'nın üretim sistemlerine tam entegrasyonu için kaliteli ve dengeli veri kümelerinin oluşturulması, farklı sistemlerden elde edilen verilerin birlikte kullanılabilmesi, modellerin açıklanabilirliğinin artırılması, gerçek zamanlı ve düşük maliyetli algoritmaların geliştirilmesi ve siber güvenlik risklerinin yönetilmesi gerekmektedir. Ayrıca kontrollü laboratuvar ortamlarında başarılı olan modellerin farklı gerçek endüstriyel koşullardaki performansının doğrulanmasına ihtiyaç vardır.

Dijital ikiz teknolojileri, üretken AI, LLM ve Multimodal AI sistemleri ise üretim mühendisliğinde yeni araştırma alanları oluşturmaktadır. Dijital ikizler fiziksel üretim sistemlerinin sanal ortamda izlenmesini ve üretim senaryolarının değerlendirilmesini sağlarken, üretken AI tasarım alternatiflerinin oluşturulmasını ve mühendislik süreçlerinin desteklenmesini mümkün kılmaktadır. LLM ise teknik dokümantasyonun yorumlanması, bakım kayıtlarının analizi ve mühendislik bilgi yönetimi gibi alanlarda kullanılabilecek yeni olanaklar sunmaktadır.

Üretim mühendisliğinde AI'nın geleceği, daha gelişmiş algoritmalar geliştirmenin yanında tasarım, analiz, üretim, bakım, kalite kontrol ve karar destek süreçlerini ortak bir veri ekosisteminde bütünleştiren akıllı üretim sistemleri geliştirmekten geçmektedir. Bu sistemlerin değişen koşullara uyum sağlaması, süreçlerini sürekli öğrenerek geliştirmesi ve sürdürülebilir üretimi desteklemesi hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

- Alenizi, F. A., Abbasi, S., Hussein Mohammed, A., & Masoud Rahmani, A. (2023). The artificial intelligence technologies in Industry 4.0: A taxonomy, approaches, and future directions. *Computers & Industrial Engineering*, 185, Article 109662. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109662>
- Ameri, R., Hsu, C.-C., & Band, S. S. (2024). A systematic review of deep learning approaches for surface defect detection in industrial applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 130, Article 107717. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107717>
- Babic, B., Nesic, N., & Miljkovic, Z. (2008). A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition. *Computers in Industry*, 59(4), 321–337. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.09.001>
- Bast, S., Scherer, K., Wahl, M., Naumann, S., Dartmann, G., & Didas, S. (2025). *Quality control in additive manufacturing: Image dataset for defect detection in fused filament fabrication* (Version 1.0.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14712897>
- Bast, S., Scherer, K., Wahl, M., Naumann, S., Dartmann, G., & Didas, S. (2026). Reference-based monitoring for defect detection in fused filament fabrication using image feature classification. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 144, 2047–2059. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-14981-0>
- Chen, T., Sampath, V., May, M. C., Shan, S., Jorg, O. J., Aguilar Martín, J. J., Stamer, F., Fantoni, G., Tosello, G., & Calaon, M. (2023). Machine learning in manufacturing towards Industry 4.0: From “for now” to “four-know”.

Applied Sciences, 13(3), Article 1903.
<https://doi.org/10.3390/app13031903>

Colligan, A. R., Robinson, T. T., Nolan, D. C., Hua, Y., & Cao, W. (2022). Hierarchical CADNet: Learning from B-Reps for machining feature recognition. *Computer-Aided Design*, 147, Article 103226.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103226>

DebRoy, T., Zhang, W., Turner, J., & Mukherjee, T. (2017). Building blocks for a digital twin of additive manufacturing. *Scripta Materialia*, 135, 119–124.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.12.024>

Gindy, N. N. Z., Kappmeyer, G., & Shuaib, M. (2021). Artificial intelligence in manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 484–493.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.012>

Goh, G. D., Sing, S. L., & Yeong, W. Y. (2021). A review on machine learning in 3D printing: Applications, potential, and challenges. *Artificial Intelligence Review*, 54(1), 63–94. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09876-9>

Gong, Y., Liu, M., Wang, X., Liu, C., & Hu, J. (2024). Few-shot defect detection using feature enhancement and image generation for manufacturing quality inspection. *Applied Intelligence*, 54(1), 375–397.
<https://doi.org/10.1007/s10489-023-05187-5>

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Ed.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* içinde (ss. 85–113). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-38743-7_4

- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
- Hitomi, K. (1996). *Manufacturing systems engineering: A unified approach to manufacturing technology, production management and industrial economics* (2nd ed.). Taylor & Francis.
- Hütten, N., Alves Gomes, M., Hölken, F., Andricevic, K., Meyes, R., & Meisen, T. (2024). Deep learning for automated visual inspection in manufacturing and maintenance: A survey of open-access papers. *Applied System Innovation*, 7(1), Article 11. <https://doi.org/10.3390/asi7010011>
- Jan, Z., Ahamed, F., Mayer, W., Patel, N., Grossmann, G., Stumptner, M., & Kuusk, A. (2023). Artificial intelligence for Industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 216, Article 119456. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119456>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Acatech – National Academy of Science and Engineering.
- Kausik, A. K., Rashid, A. B., Baki, R. F., & Maktum, M. M. J. (2025). Machine learning algorithms for manufacturing quality assurance: A systematic review of performance metrics and applications. *Array*, 26, Article 100393. <https://doi.org/10.1016/j.array.2025.100393>

- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25, 1097–1105.
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 508–517. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18, 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>
- Li, W., Huang, R., Li, J., Liao, Y., Chen, Z., He, G., Yan, R., & Gryllias, K. (2022). A perspective survey on deep transfer learning for fault diagnosis in industrial scenarios: Theories, applications and challenges. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 167, Article 108487. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108487>
- Liu, T., Zheng, P., & Bao, J. (2023). Deep learning-based welding image recognition: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 601–625. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.011>
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- McCarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N., & Shannon, C. E. (2006). A proposal for the Dartmouth summer research

- project on artificial intelligence, August 31, 1955. *AI Magazine*, 27(4), 12–14.
<https://doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904>
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), 621–641. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>
- Nti, I. K., Adekoya, A. F., Weyori, B. A., & Nyarko-Boateng, O. (2022). Applications of artificial intelligence in engineering and manufacturing: A systematic review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(6), 1581–1601. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01772-0>
- Plathottam, S. J., Rzonca, A., Lakhnori, R., & Iloeje, C. O. (2023). A review of artificial intelligence applications in manufacturing operations. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 5(3), Article e10159. <https://doi.org/10.1002/amp2.10159>
- Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of Industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics*, 224, Article 107546. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>
- Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). *YOLOv3: An incremental improvement* (arXiv Preprint No. arXiv:1804.02767). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767>
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. N. Navab, J. Hornegger, W. M. Wells, & A. F. Frangi (Ed.), *Medical Image Computing and*

Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015 içinde
(ss. 234–241). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Rožanec, J. M., Novalija, I., Zajec, P., Kenda, K., Tavakoli Ghinani, H., Suh, S., Veliou, E., Papamartzivanos, D., Giannetsos, T., Menesidou, S. A., Alonso, R., Cauli, N., Meloni, A., Reforgiato Recupero, D., Kyriazis, D., Sofianidis, G., Theodoropoulos, S., Fortuna, B., Mladenčić, D., & Soldatos, J. (2022). Human-centric artificial intelligence architecture for Industry 5.0 applications. *International Journal of Production Research*, 61(20), 6847–6872.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2149957>

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533–536.
<https://doi.org/10.1038/323533a0>

Salmi, A., Atzeni, E., & Iuliano, L. (2022). Artificial intelligence applications in coordinate metrology: A review. *Measurement*, 190, Article 110618.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110618>

Shi, T., Ding, Y., Zhu, K.-F., & Su, Y.-J. (2025). DFP-YOLO: A lightweight machine tool workpiece defect detection algorithm based on computer vision. *The Visual Computer*, 41, 5029–5041.
<https://doi.org/10.1007/s00371-024-03710-1>

Shin, J. S., Kim, M. J., & Lee, D. H. (2025). A framework for detecting unknown defect patterns on wafer bin maps using active learning. *Expert Systems with Applications*, 260, Article 125378.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125378>

- Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., Guez, A., Sifre, L., Van Den Driessche, G., Schrittwieser, J., Antonoglou, I., Panneershelvam, V., Lanctot, M., Dieleman, S., Grewe, D., Nham, J., Kalchbrenner, N., Sutskever, I., Lillicrap, T., Leach, M., Kavukcuoglu, K., Graepel, T., & Hassabis, D. (2016). Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, 529(7587), 484–489.
<https://doi.org/10.1038/nature16961>
- Song, B., Zhou, R., & Ahmed, F. (2024). Multi-modal machine learning in engineering design: A review and future directions. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 24(1), Article 010801.
<https://doi.org/10.1115/1.4063250>
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023a). Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. *Cognitive Robotics*, 3, 54–70.
<https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001>
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023b). Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools, a review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 2, Article 100009.
<https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100009>
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019a). Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653–661.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019b). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415.
<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>

- Tao, H. (2024). Erasing-inpainting-based data augmentation using denoising diffusion probabilistic models with limited samples for generalized surface defect inspection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 208, Article 111082. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.111082>
- Tercan, H., & Meisen, T. (2022). Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: A systematic review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(7), 1879–1905. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-01963-x>
- Toosi, A., Bottino, A. G., Saboury, B., Siegel, E., & Rahmim, A. (2021). A brief history of AI: How to prevent another winter (a critical review). *PET Clinics*, 16(4), 449–469. <https://doi.org/10.1016/j.cpet.2021.06.008>
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236), 433–460. <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>
- Vaktskjold, V. E., Toppe, L. O., Luczkowski, M., Rønnquist, A., & Morin, D. (2026). Systematic mapping of artificial intelligence applications in finite-element-based structural engineering. *Buildings*, 16(3), Article 644. <https://doi.org/10.3390/buildings16030644>
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 5998–6008.
- Wang, L., Yang, S., Wang, X., & Li, D. (2022). AI-enabled smart machining: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78, Article 102400. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102400>

- Wang, J., & Kusiak, A. (Ed.). (2000). *Computational intelligence in manufacturing handbook*. CRC Press.
- Wu, F., Wu, Q., Tan, Y., & Xu, X. (2024). Remaining useful life prediction based on deep learning: A survey. *Sensors*, 24(11), Article 3454. <https://doi.org/10.3390/s24113454>
- Xu, G., Ren, M., & Li, G. (2024). Efficient online surface defect detection using multiple instance learning. *Expert Systems with Applications*, 252, Article 124244. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124244>
- Xu, J., Kovatsch, M., Mattern, D., Mazza, F., Harasic, M., Paschke, A., & Lucia, S. (2022). A review on AI for smart manufacturing: Deep learning challenges and solutions. *Applied Sciences*, 12(16), Article 8239. <https://doi.org/10.3390/app12168239>
- Zhang, J., Zhang, Z., Chen, Q., Ding, S., Xiong, M., Li, G., Li, W., Zhang, W., & Chen, S. (2025). Representation learning based on co-evolutionary combined with probability distribution optimization for precise defect location. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2024.3479734>
- Zhang, X., Jiang, Z., Yang, H., Mo, Y., Zhou, L., Zhang, Y., Li, J., & Wei, S. (2024). DMWMNet: A novel dual-branch multi-level convolutional network for high-performance mixed-type wafer map defect detection in semiconductor manufacturing. *Computers in Industry*, 161, Article 104136. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104136>
- Zheng, X., Liu, W., & Huang, Y. (2025). LWMS-Net: A novel defect detection network based on multi-wavelet multi-

scale backbone. *Measurement*, 252, Article 117393.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.117393>

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ Ti6Al4V/HA/GRAFİT KOMPOZİTİNİN MİKROYAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İdris GÖKALP¹

Egemen AVCU²

Rıdvan YAMANOĞLU³

1. GİRİŞ

Yaşlanan nüfus ve artan travmatik vakalar hasar gören iskelet dokularının onarımında kullanılan biyomalzemelere duyulan gereksinimi hızla artırmaktadır [1,2]. Özellikle kalça, diz ve dental implantlar gibi yük taşıyan bölgelerde metalik biyomalzemeler öne çıkmaktadır. Günümüze kadar paslanmaz çelik ve kobalt-krom alaşımları yaygın kullanılmış olmalarına rağmen düşük yoğunlukları, yüksek özgül mukavemetleri, üstün biyouyumlulukları ve mükemmel korozyon dirençleri sayesinde titanyum ve alaşımları modern implant uygulamalarında temel malzeme grubu hâline gelmiştir [3,4]. Biyomedikal alanda en fazla kullanılan titanyum alaşımlarından biri olan çift fazlı ($\alpha+\beta$) Ti6Al4V alaşımı yüksek mekanik dayanımı ve yüzeyinde kendiliğinden oluşan ince ve kararlı titanyum dioksit tabakası sayesinde biyolojik ortamlarda yüksek korozyon direnci

¹ Ar. Gör. Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, ORCID: 0000-0001-5270-696X.

² Prof. Dr. Kocaeli Üniversitesi, Ford Otosan İhsaniye Otomotiv MYO, ORCID: 0000-0002-3244-1316.

³ Prof. Dr. Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, ORCID: 0000-0002-4661-8215.

sergilemektedir [5]. Ancak özellikle hareketli implant sistemlerinde karşıt yüzeylerle doğrudan temas eden Ti6Al4V alaşımı tekrarlı yüklemeler altında plastik deformasyona uğramakta ve yüzeyindeki koruyucu pasif film mekanik temas nedeniyle bütünlüğünü kaybedebilmektedir. Bunun sonucunda meydana gelen malzeme kaybı implantın yapısal bütünlüğünü ve kullanım ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir [6,7].

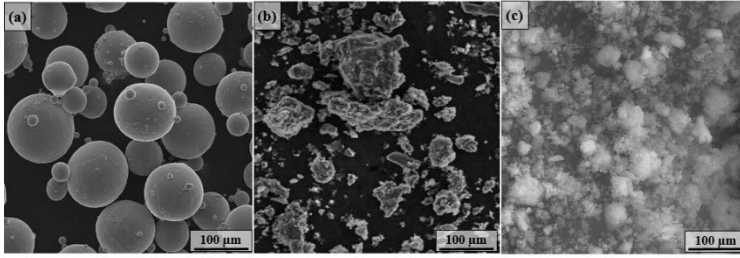
Titanyum ve alaşımlarının yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla nitrürleme, oksidasyon ve termal kaplama gibi çeşitli yüzey modifikasyon yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerle oluşturulan yüzey tabakalarında tekrarlı mekanik yüklemeler altında çatlama, delaminasyon ve kaplama ile altlık malzemenin ayrılması gibi hasarlar meydana gelebilmektedir [8,9]. Özellikle yüzeyden ayrılan parçacıkların üçüncü cisim olarak davranması aşındırıcı etkiyi artırarak malzeme kaybını hızlandırabilmektedir. Bu sınırlamalara alternatif olarak geliştirilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FGM) yaklaşımı sadece aşınma direncini değil aynı zamanda mekanik özelliklerin de aynı yapı içerisinde birlikte geliştirilmesine olanak sağlamaktadır [10]. Geleneksel kaplama yöntemlerinden farklı olarak FGM tasarımında bileşim ve mikroyapı yüzeyden iç bölgelere doğru kademeli olarak değiştirilmektedir. Böylece aşınmaya maruz kalan yüzeyin tribolojik performansının geliştirilmesi hedeflenirken alt katmanlarda ana matrisin mekanik dayanımı ve yük taşıma kapasitesi korunabilmektedir. Yapıda kademeli bir geçiş oluşturulması ani gerilme yığılmalarını sınırlandırarak arayüzey hasarının önlenmesine önemli katkı sağlamaktadır [11,12]. Son yıllarda FGM yaklaşımından yararlanılarak Ti6Al4V matrisinin aşınma direncini geliştirmeye yönelik kompozit malzemelerin üretimi ve incelenmesi önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir [13,14]. Bu kapsamda hidroksiapatit (HA) ve karbon esaslı malzemeler tribolojik performans üzerindeki etkileri nedeniyle sıklıkla tercih edilen

takviyeler arasında yer almaktadır. HA sert seramik yapısıyla kompozitin yüzey sertliğine, yük taşıma kapasitesine ve aşınma direncine katkı sağlarken grafit ise tabakalı kristal yapısı ve tabakaları arasındaki zayıf bağlar sayesinde katı yağlayıcı olarak davranmaktadır. Sürtünme sırasında grafit tabakalarının kayma yüzeyinde oluşturduğu yağlayıcı film karşıt yüzeyler arasındaki doğrudan teması ve kayma direncini azaltarak sürtünmeden kaynaklanan malzeme kaybını sınırlandırabilmektedir. Bununla birlikte HA ve grafitin aşınma direnci üzerindeki etkileri takviye oranlarına, matris içerisindeki dağılımlarına ve kompozit yapının yoğunlaşmasına da bağlıdır [15,16].

Bu çalışmada tek bir takviye içeren FGM yapılar yerine hem sertlik hem de katı yağlayıcılık etkisini bir araya getiren hibrit bir tasarım benimsenmiştir. HA ve grafit takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş Ti6Al4V kompozitler basınç destekli sinterleme yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri ile birlikte aşınma davranışları incelenmiştir. Hibrit takviyelerin tribolojik performans üzerindeki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir.

2. DENENYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmada kullanılan Ti6Al4V, grafit ve HA tozlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM/JEOL 6060) görüntüleri Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 1-a Ti6Al4V tozunu temsil ederken Şekil 1-b ve Şekil 1-c ise sırasıyla grafit ve HA tozlarına ait görüntülerdir. SEM görüntülerinde grafit ve HA tozlarının düzensiz oldukları Ti6Al4V tozunun ise yüksek oranda küresel bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Ti6Al4V tozlarının sergilediği bu küresel geometri kalıplama aşamasında toz akışkanlığını ve paketlenme yoğunluğunu olumlu yönde desteklemektedir.



Şekil 1. Tozların SEM görüntüleri: a) Ti6Al4V, b) Grafit ve c) Hidroksiapatit

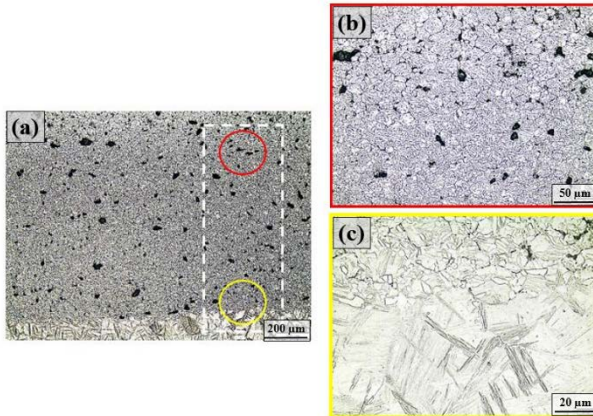
Numune üretimlerinden önce tozlar, homojen bir dağılım elde edilinceye kadar FRITSCH marka PULVERISETTE model gezegen tipi bilyalı değirmende karıştırılmıştır. Hibrit sisteme sahip Ti6Al4V/grafit/HA kompozit tozlarının hazırlanmasında kademeli bir karıştırma yöntemi izlenmiştir. İlk aşamada yalnızca Ti6Al4V ile HA tozları bilyalı değirmende 150 rpm devir hızında 1 saat süreyle karıştırılmıştır. Karışıma grafit tozu dahil edilmeden önce bu ön karıştırmanın tercih edilmesinin nedeni grafitin sergilediği katı yağlayıcı etkisinin Ti6Al4V partikülleri ile HA takviyesi arasındaki doğrudan teması sınırlandırmasını engellemek ve ikisi arasında daha güçlü bir mekanik tutunma sağlamaktır. Bu ön aşamanın ardından grafit tozu ilave edilmiş ve elde edilen Ti6Al4V/grafit/HA kompozit tozu 150 rpm hızda 1 saat daha karıştırılmıştır. Bu işlemten sonra numune üretimlerine başlanmıştır. Kompozit numuneler 2000 µm kalınlığındaki %100 Ti6Al4V birinci katman, 1000 µm kalınlığındaki Ti6Al4V/%2,5HA/%2,5grafit (hacimce) ikinci katman ve 1000 µm kalınlığındaki Ti6Al4V/%5 HA/%2,5grafit (hacimce) üçüncü katmandan oluşmaktadır. Numuneler grafit kalıplar içerisinde 4 mm kalınlıkta ve 35 mm çapta olacak şekilde basınç destekli sinterleme cihazı ile 950 °C sıcaklıkta, 50 MPa basınç altında ve 30 dakika süreyle yoğunlaştırılmıştır. Ardından numunelerin mikroyapısal incelemeleri, mekanik karakterizasyonları ve tribolojik performanslarının belirlenmesi için numune hazırlama işlemleri yapılmıştır. Metalografik işlemlerde numunelerin kesit

arayüzeyleri sırasıyla 320, 600, 1000 ve 2000 SiC zımparalar ile hazırlanmıştır. Parlatma işlemlerinde 3 μm ve 1 μm elmas süspansiyonlar kullanılarak numune yüzeyleri ayna parlaklığına getirilmiştir. Mikroyapının ortaya çıkarılması amacıyla numuneler, Kroll çözeltisi (15 mL HNO_3 , 5 mL HF ve 100 mL H_2O) içinde daldırma yöntemiyle dağlanmıştır. Mikroyapısal incelemelerde Olympus Bx4m-LED marka optik mikroskop kullanılmıştır. Grafit ve HA takviyelerinin kompozitin mekanik davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla üretilen numunelerin üst, orta ve alt katmanları boyunca sertlik profili çıkarılmıştır. Sertlik testleri Berkovich tipi elmas uca sahip Anton Paar marka nanoindentasyon cihazı (Step 501/NHT3, Avusturya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İndentasyon testleri sırasında maksimum yük 100 mN olarak uygulanmış yükleme süresi 10 saniye, yükte bekleme süresi 5 saniye ve yük boşaltma süresi 10 saniye olacak şekilde tamamlanmıştır. Kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemek amacıyla Turkeyus marka (POD/HT/WT) pin-on-disk tribometre cihazı kullanılmıştır. Tribolojik testler oda sıcaklığında, 150 rpm hızda, 15 N yük altında ve 200 m kayma mesafesi boyunca gerçekleştirilmiştir. Testlerin ardından numune yüzeylerinde meydana gelen aşınma izleri SEM ile incelenerek aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

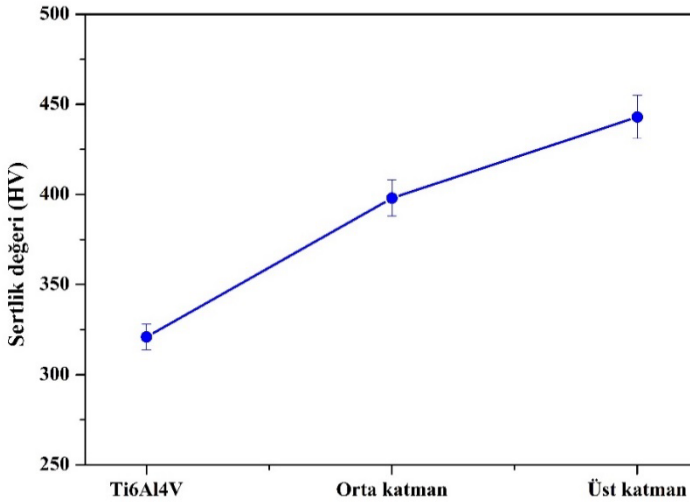
Şekil 2’de Ti6Al4V/HA/Grafit kompozitinin genel mikroyapısı ve farklı bölgelerinden alınan mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 2-a’da verilen genel kesit mikroyapı görüntüsünde takviyeli üst katmanlar ile ana matrisi oluşturan alt katman arasındaki geçişin oldukça belirgin olduğu ve katmanlar boyunca herhangi bir makroskobik çatlak, delaminasyon veya yapısal ayrılmanın meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Kompozitin orta ve üst katmanlarına ait görüntüde (Şekil 2-b)

yüksek oranda homojen bir mikroyapı ile birlikte belirli bölgelerde takviyelerin topaklandığı ve tane sınırlarında konumlandığı görülmektedir. Özellikle takviyelerin tane sınırları boyunca konumlanması sinterleme esnasında matrisin büyümesini engelleyerek mikroyapıda belirgin bir tane incelmeye meydana getirmiştir. Kompozitin orta ve alt katman bölgesini gösteren Şekil 2-c’de ise mikroyapının kademeli bir şekilde değişimi gözlenmektedir. Alt katmanda lamelli $\alpha+\beta$ fazları ile Widmanstätten morfolojisinin baskın olduğu yapılar net bir şekilde görülmektedir. Orta katmana doğru yaklaşıldığında ise HA ve grafit partiküllerinin tane sınırlarında konumlanması ile bu lamelli yapı yerini çok daha ince ve eş eksenli tanelere bırakmıştır [17]. Katmanlar arasında gözlenen bu kademeli geçiş fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin başarılı bir şekilde üretilebildiğini göstermektedir. FGM yaklaşımıyla geliştirilen bu yapıda üst katmanlarda elde edilen ince taneli mikroyapılar ile birlikte yüzey özelliklerinin önemli ölçüde geliştirildiği görülmektedir. İyileşen yüzey özelliklerinin malzemenin sertliğinde artış sağlaması ve özellikle aşınma performansına doğrudan olumlu katkı sağlaması beklenmektedir.



Şekil 2. Ti6Al4V/HA/Grafit kompozitinin (a) genel kesit görüntüsü, (b) orta-üst katman ve (c) alt-orta katmanların mikroyapı görüntüleri

Şekil 3'te kompozit numunenin katmanları boyunca elde edilen sertlik değerlerinin değişimi verilmiştir. Ti6Al4V'da yaklaşık 321 HV olarak ölçülen sertlik değerinin orta katmanda yaklaşık 398 HV seviyesine yükseldiği ve en üst katmanda yaklaşık 443 HV değerine ulaştığı görülmektedir. Katmanlar arasında gözlenen bu kademeli artış derecelendirmenin mekanik performansa etkisini yansıtmaktadır. Sertlik değerlerinde kaydedilen bu önemli artış katmanlar boyunca değişen kompozisyonel dağılım ve tane morfolojisinden kaynaklanmaktadır. Bu sayede ana matrisin sünekliği ve yük taşıma kapasitesi korunurken orta ve üst katmanlarda yüksek sertliğe sahip HA partiküllerinin varlığı ile sinterleme sırasında grafit ve titanyum matrisi arasındaki katı faz reaksiyonu sonucu in-situ olarak oluşan TiC fazları sertleşmenin temel mekanizmasını oluşturmuştur [18].

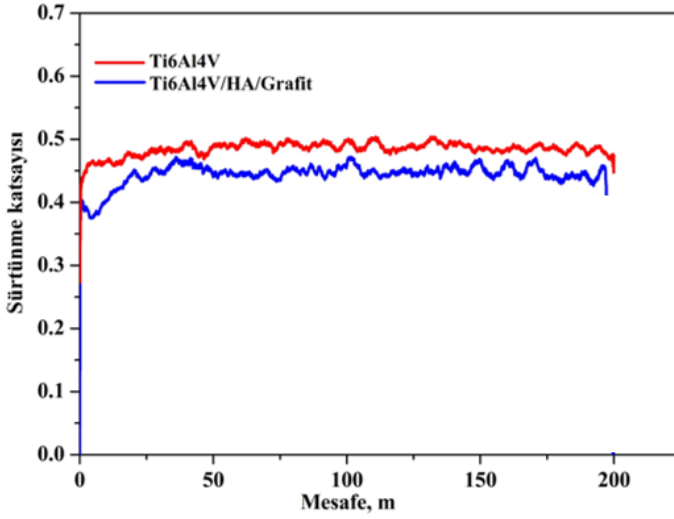


Şekil 3. Ti6Al4V/HA/Grafit kompozitinin sertlik değerleri

Diğer yandan grafitten matrise difüze olan karbon atomlarının ve HA yapısından ayrılan oksijenin güçlü birer α -stabilizör olarak davranması da yapının α -fazı ağırlıklı bir mikroyapıya dönüşmesini sağlamıştır [19, 20]. Bu faz dönüşümünün yanı sıra daha önce mikroyapı incelemelerinde

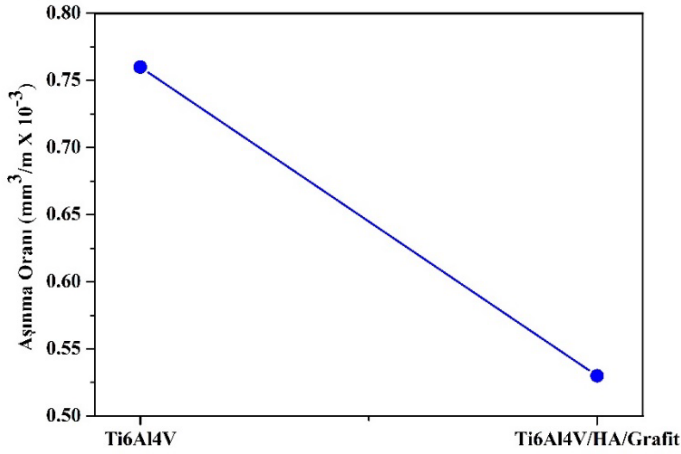
belirlenen tane incelmesi ve sert fazların oluşturduğu partikül takviyesi üst katmanlara doğru sertliğin belirgin bir şekilde artmasında etkin rol oynamıştır. Elde edilen sonuçlar alt bölgede mekanik bütünlüğü ve yapısal desteği sağlayan Ti6Al4V ile üst bölgelerde plastik deformasyon direncini ve buna bağlı olarak aşınma dayanımını artırması beklenen HA ve grafit takviyeli kompozit yapının kademeli bir sertlik gradyanı ile başarıyla üretildiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4’te numunelerin sürtünme katsayısı eğrileri verilmiştir. Ti6Al4V’da sürtünme katsayısı test boyunca yaklaşık 0,48 ile 0,50 arasında yer alırken kompozit yapıda ise bu değer belirgin bir düşüş sergileyerek ortalama 0,44 ile 0,46 seviyelerinde seyretmiştir. Kompozit numunenin tüm kayma mesafesi boyunca ana matrise kıyasla daha düşük bir sürtünme katsayısına sahip olduğu ve geliştirilen hibrit yüzey katmanının tribolojik performansı doğrudan iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Kompozitin en üst katmanında yer alan grafit tabakalı kristal yapısı ve düzlemler arası zayıf van der Waals bağları sayesinde sürtünme sırasında oluşan kayma gerilmeleri altında temas arayüzüne transfer olarak ince ve sürekli bir katı yağlayıcı film meydana getirmiştir. B tribofilm katmanı numune yüzeyi ile karşıt malzeme arasındaki teması engelleyerek kayma direncini belirgin bir biçimde sınırlandırmıştır [21]. Eş zamanlı olarak HA’in seramik etkisi ve ince taneli matris sayesinde yüzeyin plastik deformasyona ve karşı direncini artırmıştır. Sonuç olarak grafitin sağladığı katı yağlayıcı film etkisi ile seramik takviyeli matrisin sunduğu yüksek taşıma kapasitesi bir araya gelerek sürtünme katsayısını kararlı bir şekilde düşürmüş ve Ti6Al4V/HA/Grafit hibrit kompozitinin aşınma direncini artırmıştır.



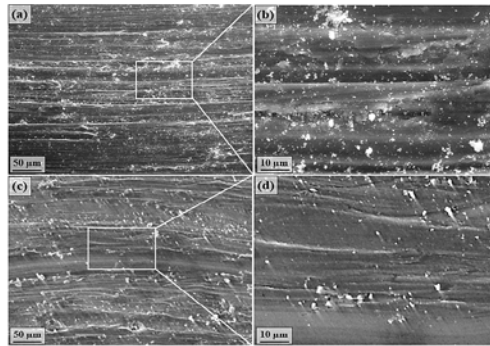
Şekil 4. Ti6Al4V/HA/Grafit kompozitinin sürtünme katsayısı grafiği

Şekil 5'te ana matris ile kompozitin aşınma oranları verilmiştir. Ana matrisin aşınma oranı $0,76 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$ iken kompozitin aşınma oranı ise $0,53 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Aşınma oranındaki bu düşüş Şekil 4'te gösterilen sürtünme katsayısındaki azalmayla uyumludur. Grafitin temas yüzeyinde oluşturduğu yağlayıcı filmin sürtünmeyi sınırlandırması ve takviyeli katmanların plastik deformasyona karşı direnci kompozitteki malzeme kaybının azalmasına katkıda bulunmuştur. Sonuç olarak düşük sürtünme katsayısı ile düşük aşınma oranı birbirini destekleyerek Ti6Al4V/HA/Grafit kompozitinin tribolojik performansının belirgin bir biçimde iyileştiği görülmüştür.



Şekil 5. Ti6Al4V/HA/Grafit kompozitinin aşınma oranı

Şekil 6’da aşınma testleri sonrasında Ti6Al4V ile Ti6Al4V/HA/Grafit kompozit numunelerinin aşınma izlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6-a,b Ti6Al4V ve Şekil 6-c,d kompozit numunelerine ait aşınma izi SEM görüntüleridir. Ti6Al4V’a ait yüzey morfolojisinde kayma doğrultusunda uzanan derin ve belirgin aşınma olukları ile yoğun plastik deformasyon izleri dikkat çekmektedir. Bununla birlikte yer yer mikro kesme ve pullanma şeklinde malzeme kopmaları meydana gelmiştir [21,22]. Yüzeyde yerel olarak biriken aşınma döküntüleri ise temas esnasında üçüncü cisim aşındırıcı etkisi oluşturarak yüzey hasarının derinleşmesine yol açmıştır.



Şekil 6. Numunelerin aşınma izi SEM görüntüleri: (a,b) Ti6Al4V ve (c,d) Ti6Al4V/HA/Grafit kompoziti

Gözlenen aşırı plastik deformasyon ana matrisin sergilediği yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma kaybı ile örtüşmektedir. Diğer yandan Ti6Al4V/HA/Grafit kompozit numunesinde ise aşınma izlerinin belirgin biçimde sığlaştığı ve plastik deformasyonun büyük oranda sınırlandığı görülmektedir. Kompozit numune yüzeyinde derin yarıkların yerini ince ve yüzeysel kayma çizgileri almıştır. Ayrıca yüzey morfolojisi Ti6Al4V'a göre çok daha düzgün ve kararlı bir yapı sergilemiştir. Yüzeydeki plastik deformasyonun bu ölçüde baskılanmasında hibrit takviye fazlarının birlikte oluşturduğu koruyucu mekanizma etkili olmuştur [22]. Grafitin arayüzeye yayılarak meydana getirdiği yağlayıcı film tabakası doğrudan yüzey temasını ve kayma direncini zayıflatırken sert HA partiküllerinin varlığı da yüzeyin deformasyona karşı kabiliyetini artırmıştır. Sonuç olarak Ti6Al4V'da abrazif ve adeziv aşınma mekanizmalarının daha baskın olduğu ve kompozit numunede ise yüzey bütünlüğünün başarıyla korunduğu anlaşılmıştır. SEM görüntülerinde gözlenen daha sınırlı yüzey hasarları kompozitin daha düşük sürtünme katsayısı ve düşük aşınma oranı sayesinde. Bununla birlikte hibrit takviye yaklaşımının malzemenin tribolojik performansını belirgin şekilde geliştirdiğini ortaya koymaktadır.

4. SONUÇ

Basınç destekli sinterleme yöntemi ile 950 °C sıcaklıkta, 50 MPa basınçta ve 30 dakika süre ile FGM tasarımında Ti6Al4V/HA/Grafit kompozitler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Katmanlar arasında herhangi bir makroskobik çatlak, delaminasyon veya yapısal bir süreksizlik gözlenmemiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

- ❖ Mikroyapı incelemelerinde ana matris Ti6Al4V'da lamelli $\alpha+\beta$ Widmanstätten morfolojisi baskın iken üst

katmanlara doğru gidildikçe tane yapısının belirgin biçimde incelendiği ve eş eksenli tanelere dönüştüğü gözlemlenmiştir. HA ve grafit partiküllerinin tane sınırlarında konumlanarak tane büyümesini sınırlandırması mikroyapısal ölçekte etkili bir tane incilmesi meydana getirmiştir.

- ❖ Mekanik karakterizasyonlar ana matriste yaklaşık 321 HV olan sertlik değerinin orta katmanda yaklaşık 398 HV seviyesine ve üst katmanda ise yaklaşık 443 HV değerine kademeli olarak yükseldiğini göstermiştir. Bu sertlik artışı mikroyapıdaki tane incelmesinin yanı sıra sert HA partikülleri, in-situ oluşan TiC fazları ve karbon ile oksijen difüzyonunun tetiklediği α -fazı oluşumuna katkısıyla gerçekleşmiştir.
- ❖ Aşınma testleri sonucunda ana matriste ortalama 0,48-0,50 arasındaki sürtünme katsayısı elde edilirken kompozit yapıda ise 0,44-0,46 seviyelerine gerileyerek kayma mesafesi boyunca daha kararlı bir sürtünme davranışı sergilenmiştir. Aşınma oranlarında ise yaklaşık olarak %30 oranında bir azalış meydana gelmiştir.
- ❖ Aşınma izi SEM görüntüleri ana matriste derin aşınma olukları, şiddetli plastik deformasyon izleri ve üçüncü cisim aşındırıcılar ile abrazif ve adeziv aşınmanın baskın olduğunu ortaya koymuştur. Kompozit numunede ise aşınma izlerinin belirgin biçimde sığlaştığı, derin olukların yerini ince çiziklerin aldığı ve yüzey bütünlüğünün korunduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar yük taşıma kapasitesini koruyan sünek Ti6Al4V altlık ile yüzeyde yüksek sertlik ve katı yağlayıcılık sağlayan HA/Grafit hibrit takviyeli üst katmanın birlikte tasarlandığı FGM yaklaşımının titanyum esaslı

biyomalzemelerin tribolojik performansını geliştirmede etkili olduğunu göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 125M966 numaralı proje ve Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından FDK-2025-4681 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- 1) Winkler, T., Sass, F. A., Duda, G. N., Schmidt-Bleek, K. (2018). A review of biomaterials in bone defect healing, remaining shortcomings and future opportunities for bone tissue engineering: The unsolved challenge. *Bone & Joint Research*, 7(3), 232-243.
- 2) Farag, M. M. (2023). Recent trends on biomaterials for tissue regeneration applications. *Journal of Materials Science*, 58(2), 527-558.
- 3) Alontseva, D., Yavuz, H. İ., Azamatov, B., Khoshnaw, F., Safarova, Y., Dogadkin, D., Yamanoglu, R. (2025). Improving corrosion and wear resistance of 316L stainless steel via in situ pure Ti and Ti6Al4V coatings: Tribocorrosion and electrochemical analysis. *Materials*, 18(3), 553.
- 4) Yamanoglu, R., Alontseva, D., Bahador, A., Uzuner, H., Khoshnaw, F., Muratal, O., Ozdemir, Y. (2025). A new approach to titanium-hydroxyapatite-bio composite: Pressure-assisted coating on the antibacterial and electrochemical properties of Ti6Al4V: Increase in stability and electrochemical performance. *Johnson Matthey Technology Review*, 69(1), 126.
- 5) Avcu, E., Abakay, E., Yıldırım Avcu, Y., Çalım, E., Gökalp, İ., Iakovakis, E., Guney, M. (2023). Corrosion behavior of shot-peened Ti6Al4V alloy produced via pressure-assisted sintering. *Coatings*, 13(12), 2036.
- 6) Avcu, E., Guney, M., Yıldırım Avcu, Y., Sulak, M., Uzuner, H., İlçe Bahadır, M., Wagner, M. F. X. (2025). Comparative effects of fine and conventional shot peening on surface morphology, topography, wettability, and

antibacterial activity of biomedical Ti6Al4V alloy. Coatings, 15(9), 1071.

- 7) Boukhalfa, C., Fellah, M., Baccouche, M., Yamanoğlu, R., Gökalp, İ., Zegai, A. A., Gani, A. (2025). High-energy ball milling and pressure-assisted sintering of Ti-6Al-4V alloy: A powder design approach for controlled microstructure, enhanced mechanical properties, and improved wear resistance. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 141(5), 3259-3270.
- 8) Zhecheva, A., Sha, W., Malinov, S., Long, A. (2005). Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. Surface and Coatings Technology, 200(7), 2192-2207.
- 9) Lin, J., Stinnett, T. C. (2020). Development of thermal barrier coatings using reactive pulsed dc magnetron sputtering for thermal protection of titanium alloys. Surface and Coatings Technology, 403, 126377.
- 10) Liu, L., Huang, X., Wang, G., Zhang, X., Zhou, K., Wang, B. (2025). Microstructure and mechanical properties of functionally graded materials on a Ti-6Al-4V titanium alloy by laser cladding. Materials, 18(13), 3032.
- 11) Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T. (2017). Functionally graded materials. Cham: Springer.
- 12) Safavi, S., Yu, Y., Robinson, D. L., Gray, H. A., Ackland, D. C., Lee, P. V. (2023). Additively manufactured controlled porous orthopedic joint replacement designs to reduce bone stress shielding: A systematic review. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 18(1), 42.

- 13) Xu, G., Song, C., Zhang, H., Lu, H., Wu, D., Luo, K., Lu, J. (2022). Spatially heterogeneous microstructure in in-situ TiO-reinforced Ti6Al4V/316L functionally graded material fabricated via directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 59, 103178.
- 14) Ostolaza, M., Arrizubieta, J. I., Lamikiz, A., Plaza, S., Ortega, N. (2023). Latest developments to manufacture metal matrix composites and functionally graded materials through AM: A state-of-the-art review. *Materials*, 16(4), 1746.
- 15) Milazzo, M., Contessi Negrini, N., Scialla, S., Marelli, B., Farè, S., Danti, S., Buehler, M. J. (2019). Additive manufacturing approaches for hydroxyapatite-reinforced composites. *Advanced Functional Materials*, 29(35), 1903055.
- 16) Sheikh, T. M., Anwar, M. P., Muthoosamy, K., Jaganathan, J., Chan, A., Mohamed, A. A. (2021). The mechanics of carbon-based nanomaterials as cement reinforcement—A critical review. *Construction and Building Materials*, 303, 124441.
- 17) Avcu, E., Armağan, M., Yıldırım Avcu, Y., Abakay, E., Çalım, E., Koç, F. G., Yamanoğlu, R. (2025). Modification of surface and subsurface properties of cold-rolled Ti6Al4V sheets through water jet shot peening. *Materials Research Express*, 12(1), 016503.
- 18) Ustundag, C. B., Avciata, O., Kaya, F., Kaya, C. (2013). Hydrothermally mixed hydroxyapatite-multiwall carbon nanotubes composite coatings on biomedical alloys by electrophoretic deposition. *The Journal of Physical Chemistry B*, 117(6), 1571-1576.

- 19) Alontseva, D., Safarova, Y., Voinarovych, S., Obrosof, A., Yamanoglu, R., Khoshnaw, F., Weiß, S. (2025). Microplasma-sprayed titanium and hydroxyapatite coatings on Ti6Al4V alloy: In vitro biocompatibility and corrosion resistance: Part I. Johnson Matthey Technology Review, 69(1), 45.
- 20) Kolli, R. P., Devaraj, A. (2018). A review of metastable beta titanium alloys. Metals, 8(7), 506.
- 21) Guo, Y., Yu, K., Niu, J., Sun, M., Dai, G., Sun, Z., Chang, H. (2021). Effect of reinforcement content on microstructures and mechanical properties of graphene nanoflakes-reinforced titanium alloy matrix composites. Journal of Materials Research and Technology, 15, 6871-6882.
- 22) Dixit, T., Prasad, K. E. (2022). Effect of temperature and sliding velocity on the dry sliding wear mechanisms of boron modified Ti-6Al-4V alloys. Lubricants, 10(11), 296.

YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIM KAPLAMALAR

KISIM I: MALZEME TASARIMI VE ÜRETİM

TEKNOLOJİLERİ

Burcu YİĞİT¹

Ahmet ŞİMŞEK²

Özkan ÖZDEMİR³

1. GİRİŞ

Alaşım, bir metalin en az bir metal veya ametal elementlerle belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle elde edilen metalik esaslı malzeme grubudur. Alaşımlama işlemi, ana elementin tek başına sahip olmadığı veya yetersiz düzeyde sahip olduğu mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini kullanım amacına uygun şekilde iyileştirmek için ilave farklı elementlerin ana element içerisine kontrollü oranlarda eklenmesi esasına dayanmaktadır. Tarihsel olarak alaşım geliştirme yaklaşımı, tek bir ana elementin matris olarak seçilmesi ve diğer elementlerin genellikle düşük oranlarda ana elemente ilave edilmesi prensibine dayanmıştır (Cantor, 2021). Demir, nikel ve alüminyum esaslı mühendislik alaşımları bu geleneksel yaklaşımın yaygın örneklerini oluşturmaktadır. Ancak 20. yüzyılın sonlarına doğru mevcut elementlerin büyük ölçüde tanımlanması ve tek ana elementli tasarımın sunduğu seçeneklerin sınırlı kalması, çok

¹ Müh. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji. Fakültesi. Metalurji ve Malzeme Müh. ORCID: 0009-0004-1576-7367

² Arş. Gör. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji. Fakültesi. Metalurji ve Malzeme Müh. ORCID: 0000-0002-4747-3783

³ Prof. Dr. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji. Fakültesi. Metalurji ve Malzeme Müh. ORCID: 0000-0003-2366-8196

bileşenli alaşım sistemlerine dayanan yeni malzeme tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesini teşvik etmiştir (Ye, Wang, Lu, Liu, & Yang, 2016).

Yüksek entropili alaşım (HEA) kavramı, 2004 yılında Yeh ve arkadaşları (Yeh, Chen, Lin, & Chen, 2007) tarafından ortaya konulan ve tek bir ana element yerine birden fazla ana element kullanımını esas alan yeni bir alaşım tasarım yaklaşımıdır. HEA sistemleri genellikle en az beş ana elementin yaklaşık %5–35 atomik oranlarında bulunduğu çok bileşenli alaşım sistemleri olarak tanımlanır. Bu yapı, yüksek konfigürasyonel entropi sağlayarak Gibbs serbest enerjisinin entropik katkısını artırabilir ve uygun termodinamik koşullarda karmaşık intermetalik fazlar yerine daha basit katı çözeltili fazlarının oluşumunu destekleyebilir (Daiy, Najafi, Ragheb, & Abedi, 2023; Yeh, Chen, Lin, & Chen, 2007; Zhang et al., 2014). HEA kavramı, yalnızca yeni bir alaşım sınıfı ortaya koymakla kalmayıp alaşım tasarım metodolojisini de değiştirmiştir. Geleneksel yaklaşımın faz diyagramlarının sınırlı bölgelerine odaklanmasının aksine, HEA tasarımı çok boyutlu bileşim uzayının geniş bir bölümünü değerlendirmeye olanak sağlayarak ulaşılabilir alaşım kombinasyonlarının ve keşfedilebilir kompozisyon alanının önemli ölçüde genişlemesini sağlamıştır (Miracle, 2019).

Yüksek Entropili Alaşımlar (HEA'lar), geleneksel alaşımlardan farklı olarak, çok sayıda intermetalik faz yeri⁴ne yüksek konfigürasyonel entropi sayesinde tek veya sınırlı fazlı katı çözeltiler (YMK veya HMK) oluşturabilirler (Cantor, 2021; Daiy et al., 2023; Yeh et al., 2007). Bu yapı, atomik ölçekte belirgin kafes bozulmalarına ve karmaşık konfigürasyonlara yol açarak dislokasyon hareketini, difüzyon davranışını ve mekanik özellikleri doğrudan etkiler (Cantor, 2021). Özellikle Cantor

alaşımı gibi sistemler; geniş bileşim aralığında tek fazlı YMK yapıları, yüksek dayanımları, yeterli süneklikleri ve yüksek sıcaklıktaki mikroyapısal kararlılıkları ile öne çıkmaktadır (Cantor, 2021).

1.1. Dört Temel Etki

HEA'ların geleneksel alaşımlardan ayrılan mikroyapısal ve fiziksel davranışları literatürde "dört temel etki" yaklaşımıyla açıklanmaktadır (Daiy et al., 2023; Lu et al., 2015; Miracle & Senkov, 2017; Pickering & Jones, 2016; Verma, Belcher, Apelian, & Lavernia, 2024). Ancak güncel çalışmalar ve eleştirel değerlendirmeler, bu etkilerin her alaşım sistemi için aynı derecede baskın olmadığını, evrensel kabul edilmediğini ve bazılarının halen tartışmalı olduğunu göstermektedir (Daiy et al., 2023; Lu et al., 2015; Miracle & Senkov, 2017).

Yüksek Entropi Etkisi: Artan konfigürasyonel entropi, özellikle yüksek sıcaklıklarda Gibbs serbest enerjisini etkileyerek karmaşık intermetalik fazların oluşumunu sınırlandırır ve basit katı çözelti fazlarının kararlılığını destekler (Daiy et al., 2023; Song et al., 2017; Yeh et al., 2007). Yeh ve arkadaşlarının (Yeh et al., 2007) ilk yaklaşımında, yüksek karışım entropisinin özellikle yüksek sıcaklıklarda katı çözelti fazlarını stabilize eden temel faktörlerden biri olduğu öne sürülmüştür. Ancak sonraki çalışmalar, HEA faz kararlılığının yalnızca entropik katkıyla açıklanamayacağını; karışım entalpisi, atomik boyut uyumsuzluğu, elektronik yapı ve üretim koşulları gibi faktörlerin de birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur (Lu et al., 2015; Miracle & Senkov, 2017). Pickering ve Jones (Pickering & Jones, 2016) gibi araştırmacılar, entropi etkisinin bazı sistemlerde varsayıldığı kadar baskın olmayabileceğini vurgulamaktadır.

Yavaş Difüzyon Etkisi: Çok bileşenli yapıdaki farklı atomik boyutlar ve karmaşık kimyasal çevreler atom

hareketliliğini sınırlar. Bu durum difüzyon hızını azaltarak tane büyümesini yavaşlatır, yüksek sıcaklık kararlılığını artırır ve metastabil yapıların korunmasına katkı sağlar (Li et al., 2018; Lu et al., 2015; Miracle & Senkov, 2017; Pickering & Jones, 2016). Buna karşın, bazı YMK tabanlı Al-Co-Cr-Fe-Ni sistemlerinde difüzyon katsayılarının geleneksel alaşımlarla benzer olduğu görülmüştür (Lu et al., 2015; Miracle & Senkov, 2017). Bu etkinin evrensel bir HEA özelliği olduğunu doğrulamak için henüz yeterli deneysel kanıt yoktur (Li et al., 2018; Lu et al., 2015; Pickering & Jones, 2016).

Şiddetli Kafes Bozulması: Farklı atomik yarıçaplara sahip elementlerin kristal kafeste oluşturduğu elastik gerilmeler ve lokal düzensizliklerdir (Song et al., 2017). Bu bozulmalar dislokasyon hareketini sınırlandırarak katı çözelti sertleşmesine ve dayanım artışına katkıda bulunur; ayrıca difüzyon, faz dönüşümleri ve deformasyon mekanizmalarını etkiler (Daiy et al., 2023). Atomistik modellemeler bu etkinin refrakter HEA’larda YMK sistemlerine göre daha belirgin olduğunu gösterse de, bozulma büyüklüğünün deneysel olarak kesin tespiti güçtür (Daiy et al., 2023; Li et al., 2018; Miracle & Senkov, 2017; Song et al., 2017).

Kokteyl Etkisi: Alaşımı oluşturan elementlerin bireysel özelliklerinden ziyade, aralarındaki sinerjik etkileşimler sonucunda özgün malzemelerin ortaya çıkmasını ifade eder (Daiy et al., 2023; Song et al., 2017). Bu etkileşimler yüksek dayanım, süneklik, yüksek sıcaklık performansı, korozyon ve aşınma direncini bir arada sunabilir (Cantor, 2021; Miracle & Senkov, 2017; Song et al., 2017). Özellikle HEA kaplamalardaki yüksek sertlik ve oksidasyon direnci bu etkiyle ilişkilendirilir (Dabrowa & Danielewski, 2020). Kokteyl etkisinin nicel tanımı güç olup, değerlendirmeler çoğunlukla deneysel gözlemlere dayanır (Daiy et al., 2023).

Sonuç olarak; dört temel etki HEA davranışını anlamak için yararlı bir kavramsal çerçeve sunsa da, entropi etkisinin tek başına faz kararlılığını açıklayamaması ve yavaş difüzyonun evrensel olmaması bu yaklaşımın sınırlarını göstermektedir (Daiy et al., 2023; Lu et al., 2015; Miracle & Senkov, 2017; Pickering & Jones, 2016). Bu nedenle, HEA davranışlarının tam olarak açıklanmasında termodinamik hesaplamalar (CALPHAD), atomistik modellemeler ve deneysel karakterizasyon yöntemlerinin birlikte kullanılması daha kapsamlı bir yaklaşım sağlamaktadır (Miracle & Senkov, 2017; Verma et al., 2024).

1.2. HEA'lerin Yüzey Mühendisliğindeki Önemi

Yüzey mühendisliğinde malzemelerin servis ömrü ve güvenilirliği büyük ölçüde yüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir. Aşınma, korozyon, oksidasyon ve yorulma gibi hasarların çoğunlukla yüzeyden başlaması nedeniyle, yüzey modifikasyonu ve kaplama teknolojileri malzeme performansının geliştirilmesinde önemli bir yere sahiptir. Yüzey özelliklerinin kontrollü olarak iyileştirilmesi, malzeme dayanıklılığının yanı sıra sistem güvenilirliğini ve ekonomik kullanım ömrünü artırmaktadır (Kumar, 2024; Luo et al., 2022; Rashidy Ahmady et al., 2023; Sharma, 2021). Günümüzde kaplamalardan yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci ile termal kararlılığın birlikte sağlanması beklenmektedir. Bu nedenle HEA'lar, çok ana bileşenli yapıları ve geniş kompozisyon tasarım olanakları sayesinde birden fazla yüzey özelliğinin geliştirilebildiği yeni nesil kaplama malzemeleri olarak değerlendirilmektedir (Luo et al., 2022; Rashidy Ahmady et al., 2023; Sharma, 2021). HEA kaplamalar, çekirdek etkiler sayesinde bazı sistemlerde karmaşık intermetalik fazların oluşumunu sınırlayarak YMK, HMK veya HSP tipi katı çözümlü fazlarının ve daha homojen mikroyapıların oluşumunu destekleyebilmekte; ayrıca yüksek sıcaklıklarda faz kararlılığı ve sınırlı mikroyapı değişimleri sağlayabilmektedir (Luo et al., 2022; Rashidy Ahmady et al., 2023; Sharma, 2021).

Literatürde HEA kaplamaların yüksek sertlik, gelişmiş aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı ve üstün yüksek sıcaklık performansı gösterdiği; özellikle tribolojik uygulamalarda aşınma mekanizmalarını değiştirerek yüzey bütünlüğünün daha uzun süre korunmasına katkı sağladığı belirtilmektedir (Rashidy Ahmady et al., 2023; Sharma, 2021; Wang et al., 2025). Ayrıca bazı HEA sistemlerinde ince taneli yapı ve HMK faz miktarındaki artışın sertliği yükselttiği ifade edilmektedir (Rashidy Ahmady et al., 2023; Sharma, 2021). HEA kaplamalar mekanik korumanın yanı sıra biyouyumluluk, yüzey kimyası, elektriksel özellikler ve difüzyon davranışı gibi fonksiyonel özelliklerin bileşim tasarımıyla kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır (Li, Liu, & Liaw, 2018; Rashidy Ahmady et al., 2023). Bu özellikleri nedeniyle HEA kaplamalar; biyomedikal implantlar, enerji sistemleri, yüksek sıcaklık bileşenleri ve ileri mühendislik uygulamaları için umut verici bir malzeme grubu olarak değerlendirilmektedir (Luo et al., 2022; Rashidy Ahmady et al., 2023; Sharma, 2021).

2. ALAŞIM TASARIMI VE TERMODİNAMİK KRİTERLER

2.1. Faz Oluşum Tahmini

Yüksek entropili alaşımlarda (HEA) faz oluşumunun öngörülmesi, alaşım tasarım sürecinin temel aşamalarından biridir. Çok ana bileşenli sistemlerin sahip olduğu geniş kompozisyonel uzayı nedeniyle faz oluşum eğilimini belirlemek amacıyla çeşitli termodinamik, geometrik ve elektronik parametrelerden yararlanılmaktadır. Kimyasal etkileşimleri, konfigürasyonel düzensizliği, atomik boyut uyumsuzluğunu ve kristal yapı eğilimini değerlendirmek için kullanılan en yaygın parametreler; karışım entalpisi (ΔH_{mix}), karışım entropisi (ΔS_{mix}), atomik yarıçap farkı (δ) ve valans elektron

konsantrasyonudur (VEC) (Cantor, 2021; Guo & Liu, 2011; Singh, Katiyar, Goel, & Joshi, 2023; Ye et al., 2016).

2.1.1. Termodinamik yaklaşım ve karışım serbest enerjisi

HEA sistemlerinde faz kararlılığı, elementler arasındaki kimyasal etkileşimler ile konfigürasyonel entropinin Gibbs serbest enerjisine katkısının birlikte değerlendirilmesiyle açıklanmaktadır ve bu kapsamda karışım entalpisi (ΔH_{mix}) ve karışım entropisi (ΔS_{mix}) temel termodinamik parametrelerdir. Karışımın Gibbs serbest enerjisi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (Cantor, 2021; Guo & Liu, 2011; Singh, Katiyar, Goel, & Joshi, 2023; Ye et al., 2016);

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T\Delta S_{mix} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte ΔH_{mix} , alaşımı oluşturan element çiftleri arasındaki kimyasal bağlanma eğilimini ve karışımın endotermik ya da ekzotermik karakterini ifade ederken; ΔS_{mix} , elementlerin kristal kafes içinde rastgele dağılmasından kaynaklanan konfigürasyonel entropiyi temsil etmektedir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte $T\Delta S_{mix}$ teriminin etkisi büyümekte ve bu durum, serbest enerjiyi düşürerek yüksek entropili alaşımlarda katı çözelti fazlarının termodinamik açıdan daha kararlı hale gelmesine katkı sağlamaktadır (Caramarin et al., 2024; Guo & Liu, 2011; Singh et al., 2023). İdeal çözelti yaklaşımına göre konfigürasyonel karışım entropisi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır (Guo & Liu, 2011; Singh et al., 2023);

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i \quad (2.2)$$

Burada x_i , alaşım içerisindeki i . elementin atomik oranını, n toplam element sayısını ve R gaz sabitini ifade etmektedir. Eş atomik oranlı sistemlerde elementlerin kafes içerisindeki

bulunma olasılıkları birbirine yaklaştığından konfigürasyonel düzensizlik ve buna bağlı karışım entropisi maksimuma ulaşmaktadır. Beş bileşenli eş atomik sistemde teorik konfigürasyonel entropi maksimum olup yaklaşık 1.61R'dir (Caramarin et al., 2024; Montes & Ternero, 2025; Ye et al., 2016; Yeh et al., 2007). Bu yüksek entropi, özellikle yüksek sıcaklıklarda Gibbs serbest enerjisini düşürerek karmaşık intermetalik faz oluşumunu sınırlayabilir ve katı çözelti oluşumunu destekleyebilir. Ancak HEA faz oluşumu yalnızca karışım entropisiyle açıklanamaz; atomik yarıçap farkı, karışım entalpisi, elektronegatiflik farkı ve VEC de faz kararlılığı ve kristal yapının belirlenmesinde birlikte değerlendirilmelidir (Caramarin et al., 2024; Guo & Liu, 2011; Singh et al., 2023).

2.1.2. Karışım entalpisi (ΔH_{mix})

Karışım entalpisi (ΔH_{mix}), HEA sistemlerinde elementler arasındaki kimyasal etkileşimlerin yönünü ve şiddetini belirleyen temel bir termodinamik parametredir. ΔH_{mix} HEA'ların, katı çözelti, intermetalik veya amorf faz oluşumu eğilimlerinin belirlenmesinde, ΔS_{mix} ve atomik boyut farkı (δ) ile birlikte kullanılan önemli bir tasarım kriteridir (Guo & Liu, 2011; Singh et al., 2023).

$$\Delta H_{mix} = \sum_{i \neq j} \Omega_{ij} c_i c_j \quad (2.3)$$

Bu bağlamda c_i ve c_j , alaşım içerisindeki i . ve j . elementlerin atomik oranlarını; Ω_{ij} ise bu iki element arasındaki etkileşim parametresini ifade etmektedir. Ω_{ij} değeri çoğunlukla ikili alaşım sistemlerinin karışım entalpileri üzerinden değerlendirilmekte ve element çiftlerinin birbirleriyle ne ölçüde kararlı bağlanma eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle ΔH_{mix} , çok bileşenli HEA sistemlerinde tüm ikili etkileşimlerin toplam etkisini yansıtan ortalama bir kimyasal uyumluluk göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Qi, Ibarra

Hoyos, & Poon, 2022; Singh et al., 2023). Karışım entalpisinin sıfıra yakın veya sınırlı negatif değerlere sahip olması, elementler arasında aşırı güçlü bileşik oluşturma eğiliminin bulunmadığını ve bu nedenle düzensiz katı çözelti fazlarının oluşumunun daha olası olduğunu göstermektedir. Literatürde katı çözelti oluşumu için çoğunlukla $-10 \leq \Delta H_{mix} \leq 5$ kJ/mol aralığı uygun bir bölge olarak kabul edilmektedir (Guo & Liu, 2011; Qi, Ibarra Hoyos, & Poon, 2022; Singh et al., 2023). ΔH_{mix} değerinin aşırı negatif olması ise elementler arasında güçlü kimyasal çekim bulunduğunu ve atom çiftlerinin düzenli yapılar oluşturma eğiliminin arttığını göstermektedir. Özellikle $\Delta H_{mix} < -10$ kJ/mol olduğunda, sistemde intermetalik bileşiklerin veya düzenli fazların oluşma ihtimali yükselmektedir (Caramarin et al., 2024; Guo & Liu, 2011; Montes & Ternero, 2025; Singh et al., 2023). Bu nedenle HEA tasarımında yüksek entropinin yanı sıra, katı çözelti oluşumunu destekleyecek uygun ΔH_{mix} aralığının sağlanması önem taşımaktadır (Caramarin et al., 2024; Guo & Liu, 2011; Montes & Ternero, 2025; Singh et al., 2023).

2.1.3. Atomik yarıçap farkı (δ)

Atomik yarıçap farkı (δ), alaşımı oluşturan elementler arasındaki boyut uyumsuzluğunu ifade eder. Farklı atom yarıçaplarına sahip elementlerin aynı kristal kafeste bulunması, kafes düzlemlerinde elastik gerilmelere ve yerel atomik bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenle δ , katı çözelti oluşumunun değerlendirilmesinde ΔH_{mix} ve ΔS_{mix} ile birlikte kullanılmaktadır (Guo & Liu, 2011; Singh et al., 2023).

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{r_i}{\bar{r}}\right)^2} \quad (2.4)$$

Bu bağıntıda c_i , alaşım içerisindeki i . elementin atomik oranını; r_i , ilgili elementin atomik yarıçapını; $\bar{r}$ ise alaşımın ortalama atomik yarıçapını ifade etmektedir. Ortalama atomik yarıçap, alaşımı oluşturan elementlerin atomik oranları dikkate alınarak

hesaplanmakta ve her bir elementin bu ortalama sapması toplam kafes uyumsuzluğunun büyüklüğünü belirlemektedir (Singh et al., 2023). Literatürde, katı çözelti oluşumu için atomik boyut uyumsuzluğunun sınırlı olması gerektiği genel olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda $\delta \leq 6-7\%$ aralığındaki sistemlerde kafes bozulmasının yönetilebilir düzeyde kaldığı ve YMK, HMK veya YMK+HMK katı çözelti fazlarının oluşumunun desteklendiği bildirilmektedir. Buna karşılık $\delta > 8\%$ olduğunda atomik boyut farkı belirgin şekilde artmakta; bu durum sistemin amorf faz, intermetalik faz veya çok fazlı yapı oluşturma eğilimini güçlendirmektedir (Guo & Liu, 2011; Qi et al., 2022; Singh et al., 2023). Ayrıca belirli düzeydeki kafes distorsiyonu katı çözelti sertleşmesine katkı sağlayabilmektedir (Caramarin et al., 2024; Montes & Ternero, 2025).

2.1.4. Valans elektron konsantrasyonu (VEC)

Valans elektron konsantrasyonu (VEC), yüksek entropili alaşımlarda kristal yapı eğiliminin değerlendirilmesinde kullanılan temel elektronik parametrelerden biridir. Atomik boyut farkı ve karışım entalpisi daha çok geometrik ve kimyasal etkileşimleri açıklarken, VEC alaşımın ortalama valans elektron karakterini temsil etmektedir (Caramarin et al., 2024; Singh et al., 2023).

$$VEC = \sum_{i=1}^n c_i (VEC)_i \quad (2.5)$$

Burada c_i , alaşım içerisindeki i . elementin atomik oranını; $(VEC)_i$ ise ilgili elementin valans elektron konsantrasyonunu ifade etmektedir. Dolayısıyla VEC değeri, alaşımı oluşturan elementlerin valans elektron sayılarının bileşim oranlarına göre ağırlıklandırılmış ortalaması olarak hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle geçiş metalleri esaslı HEA sistemlerinde kristal yapı tercihinin elektronik kökenli olarak yorumlanmasına olanak sağlamaktadır (Guo & Liu, 2011; Singh et al., 2023). Literatürde VEC değerine bağlı olarak kristal yapı oluşumu için

belirli eşik aralıkları tanımlanmıştır. Buna göre $VEC \geq 8,0$ olan alaşımlarda YMK fazın oluşma eğilimi baskın hale gelirken, $VEC \leq 6,87$ olan sistemlerde HMK fazın daha kararlı olduğu kabul edilmektedir. Bu iki sınır arasında kalan $6,87 < VEC < 8,0$ aralığında ise YMK ve HMK fazlarının birlikte bulunduğu çift fazlı veya çok fazlı mikroyapılar oluşabilmektedir (Guo & Liu, 2011). Bununla birlikte VEC yaklaşımı tek başına kesin bir faz tahmin aracı olarak değerlendirilmemelidir. HEA sistemlerinde faz oluşumu; karışım entalpisi, karışım entropisi, atomik yarıçap farkı, elektronegatiflik farkı, işlem sıcaklığı ve soğuma hızı gibi çok sayıda parametrenin ortak etkisiyle belirlenmektedir. Özellikle hızlı katılaşma koşullarında, termodinamik denge dışında metastabil fazların oluşabilmesi sebebiyle VEC tahminlerinin deneysel sonuçlarla her zaman birebir örtüşmemesine yol açabilmektedir (Caramarin et al., 2024; Luo et al., 2022; Montes & Ternero, 2025).

2.1.5. Parametrelerin birlikte değerlendirilmesi ve sınırlamalar

HEA sistemlerinde faz oluşumunu açıklamak amacıyla kullanılan ΔS_{mix} , ΔH_{mix} , δ ve VEC gibi parametreler, alaşım tasarımı için önemli ön değerlendirme araçları sunmaktadır. Yüksek ΔS_{mix} , düşük δ ve uygun ΔH_{mix} değerlerinin birlikte sağlanması katı çözültü fazlarının oluşumunu desteklerken, VEC kristal yapı eğiliminin belirlenmesine katkı sağlamaktadır (Guo & Liu, 2011; Qi et al., 2022; Singh et al., 2023). Bununla birlikte bu ampirik kriterler faz oluşumunu kesin olarak belirleyen kurallar değildir. Üretim yöntemi, işlem sıcaklığı, soğuma hızı, ısıtma işlemi ve katılaşma koşulları faz yapısını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Özellikle lazer tabanlı üretim ve eklemeli imalat süreçlerinde hızlı katılaşma ve yerel bileşim farklılıkları metastabil fazların oluşmasına neden olabilmektedir (Luo et al., 2022; Montes & Ternero, 2025). HEA kaplamalarda ise ısı girdisi, altlıkla etkileşim, seyreltme, difüzyon ve hızlı

katılma gibi etkiler nedeniyle nominal bileşime dayalı faz tahminleri gerçek mikroyapıdan sapabilmektedir (Guo & Liu, 2011; Luo et al., 2022; Montes & Ternero, 2025).

Son yıllarda bu eksiklikleri azaltmak amacıyla Ω , Φ , γ ve Λ gibi birleşik parametrelerin de dikkate alınması önerilmektedir. Bu parametreler entropik kararlılık, karışım entalpisi ve kafes distorsiyonu gibi etkileri birlikte değerlendirerek tek kriterli yaklaşımların sınırlamalarını azaltmayı amaçlamaktadır (Montes & Ternero, 2025; Qi et al., 2022). Bununla birlikte birleşik parametrelerin de tek başına yeterli olmadığı; ampirik kriterlerin CALPHAD, makine öğrenmesi ve deneysel doğrulama ile desteklenmesinin daha güvenilir faz tahmini sağlayabileceği belirtilmektedir (Anis, 2021; Montes & Ternero, 2025; Qi et al., 2022).

2.2. CALPHAD Yöntemi: Kaplama Öncesi Faz Analizi

Yüksek entropili alaşımların tasarımındaki temel güçlüklerden biri, çok bileşenli sistemlerde faz oluşumunun geniş kompozisyon aralığında güvenilir biçimde tahmin edilmesidir. Deneysel yöntemlerin zaman, maliyet ve iş gücü açısından sınırlı olması nedeniyle hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları HEA tasarımında önem kazanmıştır. Bu yaklaşımlar içerisinde CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) yöntemi, çok bileşenli alaşım sistemlerinin termodinamik davranışını modelleyerek faz kararlılığının üretim öncesinde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Anis, Youssef, & Attallah, 2019; Caramarin et al., 2024; Montes & Ternero, 2025). Termodinamik veri tabanları ve faz denge modelleri kullanılarak belirli sıcaklık, bileşim ve basınç koşullarında YMK, HMK, HSP, intermetalik veya çok fazlı yapıların oluşum eğilimleri öngörülebilme, böylece deneysel olarak taranması güç geniş kompozisyon alanı daha sistematik bir tasarım alanına

dönüştürülebilmektedir (Montes & Ternero, 2025; Qi et al., 2022; Zhang et al., 2014). CALPHAD'ın önemli katkılarından biri, deneysel üretim öncesinde faz diyagramlarının oluşturulması ve hedeflenen mikroyapıya uygun bileşim aralıklarının belirlenmesidir. Literatürde CALPHAD tahminleri ile XRD ve SEM sonuçları arasında önemli ölçüde uyum bulunduğu ve özellikle geçiş metalleri esaslı HEA sistemlerinde faz oluşum eğilimlerinin başarılı şekilde tahmin edilebildiği bildirilmektedir (Caramarin et al., 2024; Singh et al., 2023). Bununla birlikte faz oluşumu yalnızca denge termodinamiği ile açıklanamayacağından üretim koşullarının da dikkate alınması gerekmektedir. Yavaş difüzyon ve hızlı katılaşma, bazı metastabil fazların korunmasına neden olabilmekte ve özellikle lazer tabanlı üretim ve kaplama yöntemlerinde deneysel mikroyapı ile CALPHAD tahminleri arasında farklılıklar oluşturabilmektedir. Bu nedenle CALPHAD sonuçları kesin bir faz haritasından ziyade, deneysel çalışmaları yönlendiren bir ön tasarım aracı olarak değerlendirilmelidir (Guo & Liu, 2011; Luo et al., 2022; Ma et al., 2015).

Kaplama ve eklemeli imalat teknolojilerinde CALPHAD, uygun HEA bileşimlerinin ve hedeflenen faz yapısının üretim öncesinde belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Lazer kaplama, lazer metal biriktirme, termal püskürtme ve eklemeli imalat gibi yöntemlerde deneysel deneme sayısının azaltılmasına ve uygun kompozisyon aralıklarının daha kısa sürede belirlenmesine olanak sağlayabilmektedir. Ayrıca Gibbs serbest enerjisi, karışım entalpisi, entropik katkı, faz stabilitesi ve çökeltme eğilimi gibi termodinamik parametrelerin değerlendirilmesi, HEA kaplamaların mikroyapısal ve servis davranışlarının öngörülmesine katkı sağlamaktadır (Caramarin et al., 2024; Guo & Liu, 2011; Luo et al., 2022; Montes & Ternero, 2025; Qi et al., 2022). Son yıllarda CALPHAD, makine öğrenmesi ve veri tabanlı malzeme tasarımı yöntemleriyle birlikte kullanılmaya

başlanmış; böylece geniş kompozisyon alanlarında faz tahmininin hızlandırılması ve yeni HEA bileşimlerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bununla birlikte CALPHAD'ın denge koşullarına dayanması nedeniyle hızlı soğuma, kinetik kısıtlamalar, lokal segregasyon, altlık-kaplama etkileşimi ve metastabil faz oluşumu gibi gerçek üretim koşullarını her zaman tam olarak temsil edememesi önemli bir sınırlılıktır. Ayrıca bazı çok bileşenli HEA sistemlerinde termodinamik veri tabanlarının sınırlı olması tahmin doğruluğunu etkileyebilmektedir. Bu nedenle CALPHAD sonuçlarının deneysel karakterizasyon, proses bilgisi ve gerektiğinde makine öğrenmesi destekli modellerle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Caramarin et al., 2024; Guo & Liu, 2011; Luo et al., 2022; Montes & Ternero, 2025; Qi et al., 2022; Singh et al., 2023).

3. HEA KAPLAMALAR VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Yüksek entropili alaşımlar (HEA), çok ana bileşenli yapılarından kaynaklanan yüksek katı çözelti sertleşmesi, şiddetli kafes distorsiyonu ve kompleks atomik etkileşimlerin malzeme özellikleri üzerinde olumlu katkısı nedeniyle son yıllarda yüzey mühendisliğinde önemli kaplama malzemeleri arasında yer almaktadır. Yüksek sertlik, aşınma ve oksidasyon direnci ile yüksek sıcaklık kararlılığı sunmaları, özellikle havacılık, enerji, otomotiv, savunma ve petrokimya gibi zorlu servis koşullarındaki uygulamalara yönelik ilgiyi artırmıştır (Kumar, 2024; Sathish, Radhika, & Saleh, 2021; Zhao et al., 2023). YMK, HMK veya çok fazlı yapıların oluşturulabilmesi, HEA kaplamaların özelliklerinin uygulamaya yönelik olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Yüzey kaplama teknolojileri ise altlık malzemenin hacimsel özelliklerini büyük ölçüde korurken yüzeyin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu

kapsamda HEA kaplamaların yüksek sertlik, düşük aşınma oranı, korozyon direnci ve termal stabiliteyi birlikte sunabilmesi, onları geleneksel kaplama sistemlerine alternatif hale getirmektedir (Bolelli et al., 2025; Kuczyk et al., 2019; Kumar, 2024; Sathish et al., 2021; Zhao et al., 2023). Ayrıca bazı HEA sistemlerinin biyomedikal uygulamalarda biyouyumluluk ve difüzyon direnci açısından potansiyel taşıdığı bildirilmektedir (Kumar, 2024). HEA kaplamaların performansı, alaşım bileşiminin yanı sıra üretim yöntemine de bağlıdır. Üretim yöntemi; faz yapısı, tane morfolojisi, porozite, altlık malzemesinin kaplamaya karışma düzeyini ifade eden seyreltme oranı, artık gerilmeler ve altlık-kaplama bağ dayanımı gibi özellikleri doğrudan etkileyebilmektedir. HEA kaplamaların üretiminde lazer kaplama, lazer metal biriktirme (LMD), termal püskürtme, Fiziksel ve Kimyasal Buhar Biriktirme (PVD/CVD) ve elektrokimyasal kaplama gibi farklı üretim tekniklerinden yararlanılmaktadır. Bu yöntemlerin her biri farklı proses koşulları ve mekanizmalar sunmakta olup, elde edilen kaplamanın mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerini etkileyebilmektedir. Bu nedenle HEA kaplamalarda üretim yönteminin seçimi, hedeflenen yüzey özellikleri ve uygulama koşulları dikkate alınarak yapılmalıdır (Kumar, 2023; Lian et al., 2024; Sathish et al., 2021; Zhao et al., 2023).

3.1. Lazer Tabanlı Yöntemler: Lazer Kaplama (Laser Cladding) ve Lazer Metal Biriktirme (LMD)

Lazer tabanlı kaplama yöntemleri, yüksek enerji yoğunluklu lazer ışınıyla kaplama malzemesi ve altlık yüzeyinde kontrollü bir eriyik havuzu oluşturulması prensibine dayanır. Toz veya tel formundaki malzemenin lokal ergime bölgesine beslenerek altlığın ince bir kısmıyla birlikte katılması sonucunda yoğun, homojen ve metalurjik olarak bağlı kaplamalar elde edilir. Bu nedenle lazer kaplama ve lazer metal biriktirme (LMD), güçlü arayüzey bağlanması, düşük seyreltme, sınırlı ısı

tesiri altındaki bölge ve düşük porozite gibi avantajları nedeniyle HEA kaplamalarda öne çıkmaktadır. LMD ayrıca üç boyutlu yapıların yanı sıra kompozisyonel gradyanlı ve fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamaların üretimine olanak sağlamaktadır (Lian et al., 2024; Zhao et al., 2023). Lazer kaplama prosesinin performansı; lazer gücü, tarama hızı, spot çapı, toz besleme hızı, bindirme ve seyreltme oranı gibi parametrelere bağlı olup, bu parametreler eriyik havuzu geometrisi, kaplama kalınlığı, porozite, çatlak oluşumu ve mikroyapısal homojenliği doğrudan etkilemektedir (Sathish et al., 2021; Zhao et al., 2023). Yüksek ısıtma ve soğuma hızları ($\sim 10^3\text{--}10^5$ K/s), denge dışı katılaşma koşulları oluşturarak elementlerin uzun mesafeli difüzyonunu ve segregasyonu sınırlandırırken ince taneli mikroyapıların oluşumunu desteklemektedir. Bu koşullar ayrıca metastabil fazların, aşırı doymuş katı çözeltilerin ve bazı sistemlerde amorf veya nanokristalin yapıların oluşmasına olanak sağlayabilmektedir (Kuczyk et al., 2019; Lian et al., 2024; Sathish et al., 2021; Zhao et al., 2023). Örneğin AlxCoCrFeNi sistemlerinde Al miktarına bağlı olarak YMK yapıdan çok fazlı HMK yapılara geçişin lazer kaplama ile kontrol edilebildiği gösterilmiştir (Lian et al., 2024).

Lazerle üretilen HEA kaplamalarda hızlı katılaşmaya bağlı tane incelmesi, Hall–Petch mekanizması üzerinden sertlik ve mukavemet artışına katkı sağlarken, HMK/YMK faz oranının kontrolü mekanik özelliklerin ayarlanmasına olanak tanımaktadır (Kumar, 2023). Ayrıca bu kaplamaların sertlik, aşınma ve korozyon performansı açısından geleneksel Ni ve Co esaslı kaplamalara kıyasla üstünlük gösterebildiği; seramik veya karbür takviyelerinin ise dispersiyon sertleşmesi, ikinci faz sertleşmesi ve tane incelmesi yoluyla performansı artırabildiği bildirilmektedir (Kumar, 2023). Bununla birlikte yüksek sıcaklık gradyanları ve hızlı katılaşma; artık gerilme birikimi, çatlak, porozite ve istenmeyen metastabil fazların oluşumu gibi proses

kaynaklı sorunlara yol açabilmektedir. Denge dışı fazların servis koşullarında dönüşüme uğrama ihtimali de kaplamanın uzun süreli kararlılığı açısından dikkate alınmalıdır. Bu nedenle lazer kaplama ve LMD ile üretilen HEA kaplamaların mikroyapısının deneysel karakterizasyonun yanı sıra CALPHAD ve kinetik değerlendirmelerle birlikte incelenmesi önem taşımaktadır (Kuczyk et al., 2019; Kumar, 2024; Lian et al., 2024; Sathish et al., 2021; Zhao et al., 2023).

3.2. Termal Püskürtme Teknolojileri: HVOF, Plazma Püskürtme ve Soğuk Püskürtme

Termal püskürtme teknolojileri, HEA kaplamaların üretiminde yaygın olarak kullanılan yüzey mühendisliği yöntemlerindendir. Bu yöntemlerde toz formundaki kaplama malzemesi yüksek sıcaklık veya kinetik enerji yardımıyla altlık yüzeye püskürtülerek katmanlı bir yapı oluşturmaktadır. Kalın kaplamaların üretilmesi, farklı alaşım sistemlerine uygulanabilmesi ve geniş yüzeylerin ekonomik biçimde kaplanabilmesi, termal püskürtmeyi HEA kaplamalar için önemli bir üretim alternatifi haline getirmektedir (Bolelli et al., 2025; Kumar, 2024; Taghian et al., 2023). Ergimiş veya yarı ergimiş partiküllerin altlık yüzeyine çarpması ve hızla katılaşması sonucunda oluşan lamelli yapı; partikül sınırları, oksitler, mikro boşluklar ve ergimemiş partiküller içerebilmekte ve bunlar kaplamanın sertlik, aşınma, korozyon ve arayüzey dayanımını doğrudan etkileyebilmektedir. HEA'larda katı çözeltiler sertleşmesi ve yüksek kafes distorsiyonu gibi etkiler ise bu mikroyapısal özelliklerle birleşerek yüzey performansının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Bolelli et al., 2025; Kumar, 2023; Sathish et al., 2021; Taghian et al., 2023).

HEA kaplamaların termal püskürtme ile üretiminde Yüksek Hızlı Oksijen-Yakıt Püskürtme (HVOF), plazma püskürtme ve soğuk püskürtme öne çıkan yöntemler arasında yer

almaktadır. HVOF ve plazma püskürtme yüksek sıcaklık etkisinden yararlanırken, soğuk püskürtme partiküllerin yüksek kinetik enerjisi ile yüzeye biriktirilmesine dayanmaktadır. Bu yöntemler arasındaki farklı ısı ve kinetik koşullar; partikül deformasyonu, oksit oluşumu, porozite, faz yapısı ve kaplama-altlık bağlanması gibi mikroyapısal özellikleri etkileyerek HEA kaplamaların nihai mekanik ve tribolojik performansını belirlemektedir (Bolelli et al., 2025; Bortolotti, 2026). HEA kaplamaların termal püskürtme ile üretiminde proses parametreleri de mikroyapı ve performans üzerinde belirleyicidir. HVOF'ta partikül hızı ve alev sıcaklığı, plazma püskürtmede plazma gücü ve püskürtme mesafesi, soğuk püskürtmede ise gaz basıncı ve partikül kinetik enerjisi temel parametrelerdir. Bu parametrelerin optimize edilmesi; porozitenin azaltılması, oksit oluşumunun kontrolü, kaplama-altlık bağının güçlendirilmesi ve istenen faz yapısının korunması açısından önem taşımaktadır (Bortolotti, 2026; Kumar, 2024; Sathish et al., 2021). Özellikle HEA sistemlerinde alaşım bileşimi ile birlikte bu proses koşullarının kontrolü, kaplama mikroyapısının ve buna bağlı olarak sertlik, aşınma ve korozyon davranışının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Bortolotti, 2026; Kumar, 2023).

3.2.1. HVOF (high velocity oxy-fuel) yöntemi

HVOF, yakıt ve oksijen karışımının kontrollü yanmasıyla oluşan yüksek sıcaklık ve hızlı gaz akımının kaplama partiküllerini yüksek hızlarda altlık yüzeye taşıdığı bir termal püskürtme yöntemidir. Partiküllerin yüksek kinetik enerjiyle yüzeye çarpması ve deformasyona uğraması sonucunda yoğun, düşük poroziteli ve güçlü ara yüzey bağlanmasına sahip tabakalı kaplamalar oluşmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle HVOF, özellikle aşınma, korozyon ve oksidasyon direncinin önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Bununla birlikte işlem sıcaklığı; yakıt türü, püskürtme mesafesi, partikül boyutu ve gaz akış parametrelerine bağlı olarak partikül yüzeylerinde oksit

oluşumuna neden olabilmekte ve oluşan oksit miktarı kaplamanın nihai performansını etkileyebilmektedir (Bortolotti, 2026; Kumar, 2024; Taghian et al., 2023). HVOF ile üretilen HEA kaplamalarda hızlı katılaşma, alaşım bileşimine bağlı olarak YMK, HMK veya çok fazlı yapıların korunmasına ya da metastabil fazların oluşmasına katkı sağlayabilmektedir (Bortolotti, 2026). Özellikle CoCrFeMnNi ve Al ilaveli türevlerinde YMK, HMK ve YMK+HMK faz kombinasyonlarının elde edilebildiği; faz yapısının alaşım bileşimi, Al miktarı, VEC ve toz üretim yöntemi gibi faktörlerden etkilendiği bildirilmektedir YMK fazları genellikle süneklik ve tokluğa, HMK ve B2 fazları ise daha yüksek sertlik ve aşınma direncine katkı sağlamaktadır. Al miktarının artmasıyla YMK yapıdan YMK+HMK ve HMK/B2 ağırlıklı yapılara geçiş görülebilmekte, ancak aşırı HMK oluşumu gevrekliği artırabilmektedir. Bu nedenle HEA kaplamalarda mekanik performans açısından kontrollü çok fazlı mikroyapılar önem taşımaktadır (Bortolotti, 2026; Kumar, 2023, 2024). HVOF ile üretilen HEA kaplamalarda yüksek soğuma hızları ve ince taneli tozların kullanımı, ince taneli mikroyapıların ve bazı durumlarda nano veya mikrometre altı oksit dispersiyonlarının oluşumunu destekleyebilmektedir. Oksit dispersiyonları dislokasyon hareketini sınırlandırarak sertliğe katkı sağlayabilirken, aşırı oksit oluşumu gevrek bölgeler oluşturarak kaplamanın mekanik bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle kaplama performansının yalnızca sertlik üzerinden değil, oksit dağılımı, tane boyutu, faz dengesi ve kaplama yoğunluğu ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Bortolotti, 2026; Kumar, 2023).

Tribolojik açıdan HVOF ile üretilen HEA kaplamalar yüksek aşınma direnci potansiyeline sahiptir. Sert HMK/B2 fazları ve ince dağılmış oksitler yüzey deformasyonunu sınırlandırırken, YMK bölgeleri yük transferine ve çatlak

ilerlemesinin sınırlandırılmasına katkı sağlayabilmektedir. Kontrollü oksit oluşumu aşınma hızını azaltabilirken, aşırı oksitlenme çatlak başlangıç bölgeleri oluşturarak mekanik bütünlüğü zayıflatabilmektedir. Bu nedenle optimum tribolojik performans, sertlik ve tokluk arasındaki dengenin sağlanmasına bağlıdır (Bolelli et al., 2025; Bortolotti, 2026; Taghian et al., 2023). Korozyon açısından ise HVOF kaplamaların düşük poroziteli ve yoğun yapısı, korozif ortamların kaplama içerisine nüfuzunu sınırlandırmaktadır. Özellikle Cr içeren HEA sistemlerinde oluşan Cr_2O_3 esaslı pasif filmler elektrokimyasal dayanımın geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte alaşım bileşimi ve proses parametreleri pasiflik davranışını etkilediğinden, tribolojik ve elektrokimyasal performansın birlikte optimize edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda HVOF ile HEA kaplamalarda yüksek performansın elde edilmesi; alaşım bileşimi, faz dengesi, oksit oluşumu ve proses parametrelerinin birlikte kontrol edilmesine bağlıdır (Bortolotti, 2026; D. Kumar, 2023; S. Kumar, 2024; Taghian et al., 2023).

3.2.2. Plazma püskürtme yöntemi

Plazma püskürtme (Plasma Spraying), elektrik arkı ile oluşturulan yüksek enerjili plazma jetinin kullanıldığı bir termal püskürtme yöntemidir. Kaplama tozları plazma jeti içerisinde ergitilerek veya yarı ergimiş hale getirilerek yüksek hızlarda altlık yüzeye taşınmakta ve burada katılaşarak lamelli bir kaplama yapısı oluşturmaktadır. Yüksek plazma sıcaklıkları sayesinde seramikler, refrakter metaller ve yüksek ergime sıcaklığına sahip HEA'lar gibi malzemelerin kaplanmasına olanak sağlayan yöntem; havacılık, enerji, otomotiv ve savunma sanayii gibi alanlarda, özellikle termal bariyer kaplamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Arun et al., 2024; Meghwal et al., 2020). Plazma püskürtme ile üretilen kaplamalarda ergimiş partiküllerin altlık yüzeye çarpmasıyla oluşan “splat” yapılarının üst üste

birikmesi sonucunda karakteristik lamelli bir mikroyapı meydana gelmektedir. Bu yapı içerisinde porozite, oksit fazları ve kısmen ergimemiş partiküller bulunabilmekte; porozite oranı, splatlar arası bağlanma ve kaplama yoğunluğu kaplamanın mekanik bütünlüğü, yorulma dayanımı ve çatlak ilerleme davranışını doğrudan etkileyebilmektedir (Kumar, 2024; Meghwal et al., 2020). Bununla birlikte kontrollü porozite, kaplamanın ısı iletkenliğinin azaltılmasına katkı sağlayarak özellikle termal bariyer uygulamalarında avantaj oluşturabilmektedir (Vaßen, 2022).

HEA kaplamaların üretiminde plazma püskürtme; çok bileşenli alaşım sistemlerine uygulanabilmesi ve hızlı katılaşma koşulları sayesinde YMK, HMK veya çok fazlı yapıların yanı sıra ince taneli mikroyapıların elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Katı çözelti oluşumu, kafes bozulması ve yavaş difüzyon gibi HEA karakteristikleri ile hızlı katılaşmanın etkisi, kaplamaların sertlik, aşınma direnci ve termal kararlılık özelliklerine katkı sağlayabilmektedir. Özellikle Cr ve Al içeren HEA sistemlerinde oluşan koruyucu oksit tabakaları, yüksek sıcaklık oksidasyon direncinin geliştirilmesine katkıda bulunabilmektedir (D. Kumar, 2023; S. Kumar, 2024; Wang et al., 2025). Bununla birlikte plazma püskürtme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar, düşük ergime sıcaklığı veya yüksek buhar basıncına sahip elementlerin kısmi buharlaşmasına ve alaşım bileşiminde sapmalara neden olabilmektedir. Ayrıca işlem sırasında oluşan oksitler sınırlı miktarlarda sertliğe katkı sağlayabilirken, aşırı oksitlenme gevrekliği ve çatlak oluşumunu artırabilmektedir. Bu nedenle plazma gücü, gaz debisi, püskürtme mesafesi, toz boyutu ve besleme hızı gibi proses parametrelerinin kontrolü; oksidasyonun sınırlandırılması, istenen faz yapısının korunması ve kaplama performansının optimize edilmesi açısından önem taşımaktadır (Meghwal et al., 2020; Sathish et al., 2021).

3.2.3. Soğuk püskürtme (cold spray) yöntemi

Soğuk püskürtme, diğer termal püskürtme yöntemlerinden farklı olarak kaplama partiküllerinin ergitilmeden, yüksek hızlarda altlık yüzeye çarptırılması ve yoğun plastik deformasyona uğrayarak yüzeyde kaplama oluşturmaya esasına dayanır. Yüksek basınçlı taşıyıcı gaz ile süpersonik hızlara ulaştırılan partiküllerin altlık malzemeye çapma esnasında katı halde deformasyona uğraması sayesinde ergime ve yeniden katılaşma olmaksızın yoğun kaplama tabakaları elde edilebilmektedir. Bu nedenle işlem sırasında oksidasyon, element buharlaşması ve faz dönüşümü gibi termal etkiler büyük ölçüde sınırlandırılmakta ve yöntem özellikle HEA kaplamaların üretiminde dikkat çekmektedir (Bolelli et al., 2025; Klenam et al., 2023). Soğuk püskürtmenin önemli avantajlarından biri, başlangıç tozunun mikroyapısal ve kimyasal özelliklerini büyük ölçüde koruyabilmesidir. HVOF ve plazma püskürtme gibi yüksek sıcaklıklı yöntemlerin aksine, mekanik alaşımlama ile üretilmiş HEA tozlarında bulunan ince taneli yapı, metastabil fazlar ve homojen element dağılımı kaplama sonrasında önemli ölçüde korunabilmektedir. Ayrıca başlangıç tozunda bulunan ince oksit dispersiyonlarının kaplama içerisinde muhafaza edilmesi, sertleşmeye katkı sağlayabilmektedir. Bu özellikler, HEA sistemlerinde proses kaynaklı mikroyapısal değişimlerin ve ilave oksit oluşumunun sınırlandırılması açısından önem taşımaktadır (Bolelli et al., 2025; Meghwal et al., 2020).

Bununla birlikte, kaplama oluşumu yoğun plastik deformasyona dayandığından partiküllerin belirli bir kritik hızın üzerine çıkarılması ve yeterli deformasyon kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle daha sünek YMK ağırlıklı HEA sistemleri daha kolay biriktirilebilirken, HMK veya B2 fazlarının baskın olduğu yüksek sertlikteki alaşımlarda deformasyon kabiliyetinin sınırlandırılması kaplama verimini

düşürebilmektedir. Gaz basıncı ve sıcaklığı, püskürtme mesafesi, partikül boyutu ve toz morfolojisi gibi parametrelerin optimize edilmesi; yeterli partikül hızı, yüksek kaplama yoğunluğu ve güçlü bağlanma elde edilmesi açısından kritik önem taşımaktadır (Champagne & Helfritch, 2016; Klenam et al., 2023; Sharma et al., 2024). Soğuk püskürtme ile üretilen HEA kaplamalar, düşük oksidasyon düzeyi ve başlangıç mikroyapısının korunması sayesinde aşınma ve korozyon performansı açısından önemli potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte yoğun plastik deformasyon yüksek artık gerilmelerin oluşmasına neden olabilmekte ve kaplama performansı; faz yapısı, tane boyutu, deformasyon derecesi ve kaplama yoğunluğu gibi mikroyapısal parametrelerden etkilenebilmektedir. Bu yönüyle soğuk püskürtme, HEA kaplamalarda yalnızca düşük sıcaklıkta biriktirme sağlayan bir yöntem değil, aynı zamanda faz dönüşümlerini ve proses kaynaklı mikroyapısal değişimleri sınırlandıran bir üretim yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir (Bolelli et al., 2025; Klenam et al., 2023).

3.3. Fiziksel ve Kimyasal Buhar Biriktirme (PVD/CVD): Magnetron Sıçratma (Sputtering) ile HEA İnce Film Kaplamalar

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleri, yüksek entropili alaşımların ince film formunda üretilmesinde kullanılan ileri yüzey mühendisliği teknikleridir. Bu yöntemlerde kaplama malzemesi atomik veya moleküler boyutta taşınarak kontrollü biçimde altlık yüzeyine biriktirilmekte ve yüksek yoğunluklu, homojen ve kontrollü kalınlığa sahip ince filmler elde edilebilmektedir (Oladijo et al., 2024; Padamata, Yasinskiy, & Yanov, 2022). Özellikle vakum ortamında gerçekleştirilen PVD işlemleri, kaplama bileşiminin hassas kontrolü, düşük kirlenme riski ve ince taneli yapı oluşumu açısından HEA ince film üretiminde önemli avantajlar sunmaktadır (Oladijo et al., 2024; Padamata, Yasinskiy, &

Yanov, 2022). Bu yöntemler; mikroelektronik, enerji, biyomedikal ve aşınmaya dayanıklı yüzey uygulamaları gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır (Kumar, 2024; Oladijo et al., 2024).

PVD yöntemleri içerisinde magnetron sıçratma (magnetron sputtering), HEA ince film üretiminde yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Plazmada iyonlaştırılan gaz atomlarının hedefe çarptırılmasıyla koparılan atomların altlıkta birikmesine dayanan yöntemde, manyetik alan elektronların plazmada tutulma süresini artırarak iyonizasyon verimi ve proses kararlılığını geliştirmektedir (Oladijo et al., 2024; Padamata, Yasinskiy, & Yanov, 2022). Düşük işlem sıcaklıklarında uygulanabilmesi, altlıkta termal hasarı sınırlandırması ve çok bileşenli film kompozisyonlarının kontrollü ayarlanabilmesi, magnetron sıçratmayı HEA ince filmleri için önemli bir üretim yöntemi haline getirmektedir (Braeckman et al., 2015; Padamata et al., 2022). Magnetron sıçratma ile üretilen HEA ince filmler genellikle yoğun, düşük poroziteli ve ince taneli mikroyapılar sergilemektedir. Hızlı biriktirme ve sınırlı atomik difüzyon nedeniyle amorf veya nanokristalin yapıların oluşabildiği; çalışma basıncı ve diğer proses koşullarına bağlı olarak YMK, HMK veya çok fazlı kristalin yapıların gelişebildiği bildirilmektedir (Oladijo et al., 2024; Padamata, Yasinskiy, & Yanov, 2022). Örneğin Al içeren AlCoCrCuFeNi esaslı HEA ince filmlerde Al miktarındaki artışın YMK'dan HMK yapıya geçişi destekleyebildiği ve bunun kafes distorsyonu ile ilişkili olduğu belirtilmektedir (Braeckman et al., 2015). Faz yapısındaki bu değişimler, filmlerin sertlik, elektriksel direnç ve aşınma davranışını doğrudan etkileyebilmektedir (Khan et al., 2019; D. Kumar, 2023; S. Kumar, 2024). HEA ince filmlerin mikroyapı ve faz oluşumunda çalışma gazı basıncı, hedef gücü, bias voltajı (altlık öngerilimi), altlık sıcaklığı ve gaz bileşimi belirleyici rol oynamaktadır (Khan et al., 2019; Padamata et al., 2022). Düşük

basıncıta yüksek enerjili partikül/atom taşınımı yoğun ve amorf yapıların oluşumunu destekleyebilirken, basıncın artması atomik çarpışmaları artırarak kristalin büyümeyi teşvik edebilmektedir (Khan et al., 2019). Ayrıca reaktif sıçratmada Ar gazına N₂ veya O₂ ilavesi, yüksek entropili nitrid ve oksit esaslı seramik filmlerin üretimine olanak sağlamakta; bu kaplamalarda yüksek sertlik, oksidasyon direnci ve geliştirilmiş tribolojik performans elde edilebilmektedir (Girinaath et al., 2025; Mayandi et al., 2022).

Magnetron sıçratma, farklı hedef konfigürasyonları sayesinde geniş bir HEA kompozisyon aralığının araştırılmasına olanak sağlamaktadır. Tekli/çoklu, mozaik ve toz hedefler kullanılarak farklı alaşım bileşimleri üretilebilmekte; özellikle çoklu hedeflerde güçlerin ayrı ayrı kontrol edilmesiyle film kompozisyonu hassas biçimde ayarlanabilmektedir (Braeckman et al., 2015; Padamata et al., 2022). HEA ince filmlerde yüksek konfigürasyonel entropi, kafes distorsiyonu ve yavaş difüzyon; faz kararlılığı, sertlik, aşınma ve korozyon direncinin geliştirilmesine katkı sağlamakta ve bu özellikler katı çözelti ile tane incilmesi gibi sertleşme mekanizmalarıyla ilişkilendirilmektedir. Özellikle nitrid esaslı HEA kaplamalarda sertliğin belirgin şekilde arttığı ve tribolojik performansın iyileştiği bildirilmektedir (Girinaath et al., 2025; Khan et al., 2019). Bununla birlikte düşük biriktirme hızı, sınırlı kaplama kalınlığı, yüksek vakum gereksinimi ve çok bileşenli sistemlerde elementlerin farklı sıçratma verimleri nedeniyle hedef-film kompozisyonunda sapmalar oluşabilmesi yöntemin başlıca sınırlamalarıdır (Braeckman et al., 2015; Khan et al., 2019). Bu özellikleriyle magnetron sıçratma; kontrollü kompozisyon, yüksek homojenlik ve ayarlanabilir ince film mikroyapısı sayesinde HEA esaslı yüzeylerin ve fonksiyonel ince filmlerin üretiminde önemli bir yöntemdir (Kumar, 2024; Oladijo et al., 2024; Padamata et al., 2022).

3.4. Elektrokimyasal Kaplama: Düşük Maliyetli ve Karmaşık Geometrilili Parçalar için Elektroliz Yöntemleri

Elektrokimyasal kaplama yöntemleri, yüksek entropili alaşım (HEA) ince filmlerinin üretiminde dikkat çeken alternatif yüzey mühendisliği tekniklerindendir. Bu yöntemler, elektrolit çözeltisindeki metal iyonlarının elektriksel veya kimyasal indirgenme reaksiyonlarıyla altlık yüzeyinde çöktürülmesine dayanmaktadır. Geleneksel yüksek sıcaklıklı kaplama yöntemlerinden farklı olarak düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmesi; enerji tüketiminin azaltılması, sıcaklığa duyarlı altlıkların kaplanabilmesi ve termal etkilerin sınırlandırılması açısından avantaj sağlamaktadır (Rudnik, 2025). Ayrıca karmaşık geometrilili parçaların, iç yüzeylerin ve ulaşılması zor bölgelerin homojen biçimde kaplanabilmesi, bu yöntemlerin koruyucu ince filmler, mikroelektronik ve fonksiyonel yüzey uygulamalarındaki kullanım potansiyelini artırmaktadır (Rudnik, 2025). Elektrokimyasal kaplama teknikleri genel olarak elektrodpozisyon ve elektroless (akımsız) kaplama olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir. Elektrodpozisyonunda metal iyonları dış bir güç kaynağı ile katot yüzeyinde indirgenirken, elektroless kaplamada kimyasal indirgeme reaksiyonları yoluyla harici akım kullanılmadan çökelme gerçekleştirilmektedir. Özellikle elektroless yöntemler, karmaşık geometrilerde daha üniform kaplama kalınlığı sağlayabilmeleri açısından avantaj sunmaktadır (Rudnik, 2025). Çözelti temelli bu yöntemlerin atmosfer basıncında ve çoğunlukla 100°C'nin altında uygulanabilmesi, proses maliyetinin azaltılması ve ölçeklenebilir üretim açısından da önemli bir potansiyel oluşturmaktadır (Rudnik, 2025). Bu özellikler, elektrokimyasal yöntemleri HEA ince filmlerinin ekonomik üretimi açısından cazip hâle getirmektedir (Freitas et al., 2023; Rudnik, 2025). Bununla birlikte HEA'ların elektrokimyasal

yöntemlerle üretiminde, alaşımı oluşturan elementlerin standart indirgenme potansiyellerinin farklı olması nedeniyle eş zamanlı çökeltme önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Bu nedenle elektrolit bileşimi, pH, kompleksleştirici türü, sıcaklık ve akım yoğunluğu gibi parametrelerin hassas biçimde kontrol edilmesi gerekmektedir (Freitas et al., 2023; Rudnik, 2025). Literatürde sitrat bazlı elektrolitlerin farklı metal iyonlarının çökeltme davranışlarını dengeleyerek daha homojen HEA filmlerin elde edilmesine katkı sağlayabildiği; özellikle Fe, Co ve Ni esaslı sistemlerde görülen anomalik eş çökeltme davranışının ise nihai alaşım bileşimini etkileyebildiği bildirilmektedir (Freitas et al., 2023; Rudnik, 2025).

Elektrokimyasal yöntemlerle üretilen HEA ince filmlerin mikroyapısı; akım yoğunluğu, uygulanan potansiyel, çözelti kimyası ve çökeltme süresi gibi proses parametrelerine bağlı olarak değişmektedir (Freitas et al., 2023; Rudnik, 2025). Düşük sıcaklık ve sınırlı difüzyon koşulları, hızlı çekirdeklenmeyi destekleyerek bazı HEA sistemlerinde amorf veya nanokristalin yapıların oluşmasına olanak sağlayabilmektedir (Dong et al., 2024; Rudnik, 2025). Literatürde CoFeNiMoW gibi çok bileşenli HEA ince filmlerin galvanostatik elektrodepozisyonla başarıyla üretilebildiği, akım yoğunluğunun değiştirilmesiyle alaşım bileşimi ve faz karakteristiklerinin kontrol edilebildiği bildirilmektedir. Elektrodepozisyonun basit ekipman gereksinimi, düşük maliyeti ve geniş yüzeylere uygulanabilirliği yöntemin endüstriyel potansiyelini desteklemektedir (Freitas et al., 2023; Rudnik, 2025). Elektrokimyasal yöntemlerle üretilen HEA kaplamalarda katı çözelti sertleşmesi, yüksek konfigürasyonel entropi ve kafes distorsyonu gibi etkiler sertlik, aşınma ve korozyon direncine katkı sağlayabilmektedir. Özellikle yüksek sertlik ve kararlı oksit film oluşumunun sürtünme katsayısını ve aşınma hızını azaltabildiği bildirilmektedir (Rudnik, 2025; Shah et al., 2025). Düşük sıcaklıkta

gerçekleştirilen kaplama işlemleri, termal püskürtme ve lazer tabanlı yöntemlere kıyasla oksidasyon ve istenmeyen faz dönüşümlerini sınırlandırarak daha homojen mikroyapıların ve metastabil yapıların korunmasına katkıda bulunabilmektedir (Rudnik, 2025). Bu nedenle elektrokimyasal HEA kaplamalar; koruyucu yüzeyler, mikroelektronik, biyomedikal ve fonksiyonel ince film uygulamaları açısından önemli bir üretim yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir (Kumar, 2024; Rudnik, 2025).

3.5. Yöntemlerin Karşılaştırmalı Analizi

Yüksek entropili alaşım kaplamalarının üretiminde kullanılan yöntemler; biriktirme tekniklerinin yanında kaplama kalınlığı, porozite, altlık ile oluşan bağın karakteri, mikroyapısal özellikler ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından da belirgin şekilde birbirinden ayrılmaktadır. Bu nedenle üretim yöntemlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi, hedeflenen mühendislik uygulamasına uygun kaplama stratejisinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır (Kumar, 2024; Wang et al., 2025). Lazer tabanlı yöntemler, yüksek enerji yoğunluğu sayesinde kalın ve nispeten yoğun kaplamaların üretimine olanak sağlamakta; kaplama malzemesi ile altlığın birlikte ergimesi nedeniyle güçlü metalurjik bağlanma sunmaktadır. Hızlı katılaşma ve tane incilmesi gibi avantajlara karşın artık gerilme, seyreltme ve mikroyapısal heterojenlik gibi proses kaynaklı sınırlamalar oluşabilmektedir (Kumar, 2024; Xu et al., 2025). Termal püskürtme yöntemleri ise geniş bir proses aralığı sunmaktadır. HVOF, yüksek partikül hızı sayesinde düşük poroziteli ve iyi bağlanmış kaplamalar sağlayabilirken, plazma püskürtme yüksek işlem sıcaklığı nedeniyle yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin kaplanmasına olanak sağlamaktadır. Soğuk püskürtme ise partiküllerin ertilmeden biriktirilmesi sayesinde oksidasyonu ve proses kaynaklı faz dönüşümlerini sınırlandırarak başlangıç toz mikroyapısının korunmasına katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte soğuk

püskürtmede yeterli bağlanma için partikül hızının ve deformasyon koşullarının dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir (Gärtner et al., 2006; Klenam et al., 2023).

PVD/CVD tabanlı yöntemler, özellikle magnetron sıçratma, diğer yöntemlere göre daha düşük kaplama kalınlıklarında çalışmasına rağmen kompozisyon kontrolü, homojenlik, düşük porozite ve ince taneli veya amorf yapıların elde edilmesinde avantaj sağlamaktadır (Braeckman et al., 2015; Oladijo et al., 2024; Padamata et al., 2022). Elektrokimyasal kaplama yöntemleri ise düşük işlem sıcaklığı, ekipman maliyeti ve karmaşık geometrilere uygulanabilirlikleriyle öne çıkmaktadır. Bununla birlikte HEA sistemlerinde metal iyonlarının farklı indirgenme davranışları kompozisyon kontrolünü zorlaştırabilmekte ve proses optimizasyonunu gerekli kılmaktadır (Freitas et al., 2023; Rudnik, 2025). Yöntem seçimi; kaplama kalınlığı, porozite, bağlanma karakteri, yüzey özellikleri, parça geometrisi ve üretim koşullarına bağlıdır. Kalın ve güçlü bağlı koruyucu kaplamalarda lazer tabanlı yöntemler ve bazı termal püskürtme teknikleri; düşük oksidasyon ve yoğun yapı gerektiren uygulamalarda soğuk püskürtme; hassas kompozisyon ve yüzey özelliklerinin gerekli olduğu ince filmlerde ise magnetron sıçratma değerlendirilebilir. Elektrokimyasal yöntemler düşük sıcaklık, maliyet ve karmaşık geometrilere uygulanabilirlik açısından önemli bir alternatiftir (Freitas et al., 2023; Rudnik, 2025). HEA kaplama teknolojilerinin özelliklerinin verildiği Tablo 3.1 incelendiğinde, yöntemler arasındaki temel ayrımın kaplama kalınlığı, porozite ve arayüzey bağlanma mekanizması olduğu görülmektedir.

Tablo 3.1. HEA kaplama tekniklerinin temel karakteristik özellikleri.

Yöntem	Kaplama Kalınlığı	Porozite	Bağlanma türü	Endüstriyel uygunluk
Lazer Kaplama / LMD	Yüksek; kalın kaplamaya uygun	Düşük-orta	Metalurjik bağ	Yüksek; tamir, yüzey güçlendirme ve kalın kaplamaya uygun (Kuczyk et al., 2019; Lian et al., 2024; Xu et al., 2025)
HVOF	Orta-yüksek	Düşük	Mekanik kilitlenme + yerel metalurjik bağ	Yüksek; aşınma ve korozyon korumasında yaygın (Bolelli et al., 2025; Meghwal et al., 2020)
Plazma Püskürtme	Orta-yüksek	Orta	Esasen mekanik bağ	Yüksek; özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarına uygun (Bolelli et al., 2025; Meghwal et al., 2020)
Soğuk Püskürtme	Orta-yüksek	Çok düşük	Katı hal deformasyonlu bağ + güçlü ara yüzey tutunması	Artan düzeyde yüksek; oksidasyona duyarlı sistemlerde avantajlı (Bolelli et al., 2025; Klenam et al., 2023)
Magnetron Sıçratma (PVD)	Düşük; ince film üretimine uygun	Çok düşük	Atomik birikim kaynaklı ara yüzey bağı	Orta; hassas ve ince film uygulamalarına uygun (Braeckman et al., 2015; Oladijo et al., 2024; Padamata et al., 2022)
Elektrokimyasal Kaplama	Düşük-orta; genellikle ince	Düşük	Elektrokimyasal birikim kaynaklı sürekli bağ	Yüksek; karmaşık geometrilere uygun (Freitas et al., 2023; Rudnik, 2025; Shah et al., 2025)

Lazer tabanlı süreçler ve termal püskürtme teknikleri daha kalın kaplamaların üretimine olanak sağlarken, PVD ve elektrokimyasal yöntemler daha ince, kontrollü ve fonksiyonel yüzeylerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Porozite açısından ise soğuk püskürtme, magnetron sıçratma ve uygun proses koşullarında gerçekleştirilen elektrokimyasal kaplamalar düşük gözeneklilik sağlayabilirken, plazma püskürtme ve bazı termal püskürtme süreçlerinde porozite daha belirgin olabilmektedir (Meghwal et al., 2020; Oladijo et al., 2024; Rudnik, 2025). Bu nedenle HEA kaplama teknolojilerinin değerlendirilmesinde yalnızca elde edilen malzeme ve yüzey özelliklerinin değil, üretim maliyeti, proses gereksinimleri ve

uygulama koşullarının da birlikte dikkate alınması gerekmektedir. Yüzey mühendisliği açısından uygun yöntem seçimi; hedeflenen kaplama özellikleri ile üretim yönteminin avantaj ve sınırlılıklarının birlikte değerlendirilmesine dayanmalıdır (Kumar, 2024; Wang et al., 2025).

KAYNAKÇA

- Anis, G. (2021). *A computational study of CoCrFeNiTi high entropy alloys: Phase diagrams, thermodynamics, and mechanical properties from CALPHAD and first principles* (Master's thesis, The American University in Cairo). AUC Knowledge Fountain. Retrieved from <https://fount.aucegypt.edu/etds/1515>
- Anis, G., Youssef, M., & Attallah, M. (2019). Phase diagram and mechanical properties of a CoCrFeNi_{1-x}Ti_x high entropy alloy fabricated by mechanical alloying. In *Materials Science and Technology 2019* (pp. 1202–1207). doi:10.7449/2019/MST
- Arun, S., Radhika, N., & Saleh, B. (2024). Exploring the potential of high entropy alloys: A comprehensive review on microstructure, properties and applications: Part I. *Johnson Matthey Tech. Review*, 68(4), 549–566. doi:10.1595/205651324X17028969538851
- Bolelli, G., Francesca, M., Bortolotti, L., Bruera, A., Ferrari, L., Lassinantti, M., ... Dosta, S. (2025). Deposition of high-entropy alloy (HEA) coatings by HVOF and cold gas spray. *Journal of Alloys and Compounds*, 1039, 183050. doi:10.1016/j.jallcom.2025.183050
- Bortolotti, L. (2026). *High velocity oxygen fuel (HVOF) spraying of high-entropy alloy (HEA)-based coatings* (Doctoral dissertation, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Modena, Italy).
- Braeckman, B. R., Boydens, F., Hidalgo, H., Dutheil, P., Jullien, M., Thomann, A., & Depla, D. (2015). High entropy alloy thin films deposited by magnetron sputtering of powder targets. *Thin Solid Films*, 580, 71–76. doi:10.1016/j.tsf.2015.02.070

- Cantor, B. (2021). Multicomponent high-entropy Cantor alloys. *Progress in Materials Science*, 120, 100754. doi:10.1016/j.pmatsci.2020.100754
- Caramarin, S., Badea, I.-C., Mosinoiu, L.-F., Mitrica, D., Serban, B.-A., Vitan, N., ... Pogrebnjak, A. (2024). Structural particularities, prediction, and synthesis methods in high-entropy alloys. *Applied Sciences*, 14(17), 7576. doi:10.3390/app14177576
- Champagne, V., & Helfrich, D. (2016). The unique abilities of cold spray deposition. *International Materials Reviews*, 61(7), 437–455. doi:10.1080/09506608.2016.1194948
- Dabrowa, J., & Danielewski, M. (2020). State-of-the-art diffusion studies in the high entropy alloys. *Metals*, 10(3), 347. doi:10.3390/met10030347
- Daiy, H., Najafi, Y., Ragheb, Z. D., & Abedi, H. R. (2023). A review study on thermal stability of powder-based additively manufactured alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 965, 171384. doi:10.1016/j.jallcom.2023.171384
- Dong, M., Liu, P., Wang, C., Wang, Y., Tang, X., & He, M. (2024). Microstructure and properties of FeCoNiCr and FeCoNiCrW high entropy alloy coatings by electro-deposition. *Intermetallics*, 175, 108492. doi:10.1016/j.intermet.2024.108492
- Freitas, G. F. N., Gomes, W. S., Souza, J. P. I., Pinotti, C. N., Passamani, E. C., Montemor, M. F., & Della Noce, R. (2023). Direct electrodeposition of CoFeNiMoW high entropy alloy thin films from aqueous medium. *Materials Chemistry and Physics*, 309, 128438. doi:10.1016/j.matchemphys.2023.128438
- Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Voyer, J., Kreye, H., Riekehr, S., &

- Koçak, M. (2006). Mechanical properties of cold-sprayed and thermally sprayed copper coatings. *Surface and Coatings Technology*, 200(24), 6770–6782. doi:10.1016/j.surfcoat.2005.10.007
- Girinaath, R., Radhika, N., Ragunath, S., & Ravichandran, M. (2025). Recent advances in magnetron-sputtered high entropy ceramic coatings. *Journal of Materials Research and Technology*, 39, 3671–3691. doi:10.1016/j.jmrt.2025.10.063
- Guo, S., & Liu, C. T. (2011). Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase. *Progress in Natural Science: Materials International*, 21(6), 433–446. doi:10.1016/S1002-0071(12)60080-X
- Khan, N. A., Akhavan, B., Zhou, H., Chang, L., Wang, Y., Sun, L., ... Liu, Z. (2019). High entropy alloy thin films of AlCoCrCu_{0.5}FeNi with controlled microstructure. *Applied Surface Science*, 495, 143560. doi:10.1016/j.apsusc.2019.143560
- Klenam, D., Asumadu, T., Bodunrin, M., Vandadi, M., Bond, T., Van Der Merwe, J., ... Soboyejo, W. (2023). Cold spray coatings of complex concentrated alloys: Critical assessment of milestones, challenges, and opportunities. *Coatings*, 13(3), 538. doi:10.3390/coatings13030538
- Kuczyk, M., Kotte, L., Kaspar, J., Barbosa, M., Nowotny, S., Zimmermann, M., & Leyens, C. (2019). High entropy alloys generated with laser cladding. In *Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2019)*. doi:10.24406/publica-fhg-405383
- Kumar, D. (2023). Recent advances in tribology of high entropy

- alloys: A critical review. *Progress in Materials Science*, 136, 101106. doi:10.1016/j.pmatsci.2023.101106
- Kumar, S. (2024). Comprehensive review on high entropy alloy-based coating. *Surface and Coatings Technology*, 477, 130327. doi:10.1016/j.surfcoat.2023.130327
- Li, Q., Chen, W., Zhong, J., Zhang, L., Chen, Q., & Liu, Z. K. (2018). On sluggish diffusion in FCC Al–Co–Cr–Fe–Ni high-entropy alloys: An experimental and numerical study. *Metals*, 8(1), 16. doi:10.3390/met8010016
- Li, W., Liu, P., & Liaw, P. K. (2018). Microstructures and properties of high-entropy alloy films and coatings: A review. *Materials Research Letters*, 6(4), 199–229. doi:10.1080/21663831.2018.1434248
- Lian, G., Gao, W., Chen, C., Huang, X., & Feng, M. (2024). Review on hard particle reinforced laser cladding high-entropy alloy coatings. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 1366–1405. doi:10.1016/j.jmrt.2024.09.143
- Lu, Z. P., Wang, H., Chen, M. W., Baker, I., Yeh, J. W., Liu, C. T., & Nieh, T. G. (2015). An assessment on the future development of high-entropy alloys: Summary from a recent workshop. *Intermetallics*, 66, 67–76. doi:10.1016/j.intermet.2015.06.021
- Luo, D., Zhou, Q., Huang, Z., Li, Y., Liu, Y., Li, Q., & He, Y. (2022). Tribological behavior of high entropy alloy coatings. *Coatings*, 12(10), 1428. doi:10.3390/coatings12101428
- Ma, D., Yao, M., Pradeep, K. G., Tasan, C. C., Springer, H., & Raabe, D. (2015). Phase stability of non-equiatomic CoCrFeMnNi high entropy alloys. *Acta Materialia*, 98, 288–296. doi:10.1016/j.actamat.2015.07.030

- Mayandi, J., Finstad, T. G., Dahl, Ø., Vajeeston, P., Schrade, M., Løvvik, O. M., ... Carvalho, P. A. (2022). Thin films made by reactive sputtering of high entropy alloy FeCoNiCuGe: Optical, electrical and structural properties. *Thin Solid Films*, 744, 139083. doi:10.1016/j.tsf.2022.139083
- Meghwal, A., Anupam, A., Murty, B. S., & Berndt, C. C. (2020). Thermal spray high-entropy alloy coatings: A review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29, 857–893. doi:10.1007/s11666-020-01047-0
- Miracle, D. B. (2019). High entropy alloys as a bold step forward in alloy development. *Nature Communications*, 10, 1–3. doi:10.1038/s41467-019-09700-1
- Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511. doi:10.1016/j.actamat.2016.08.081
- Montes, J. M., & Ternero, F. (2025). On the optimisation of the composition of high-entropy alloys. *Journal of Materials Sci.*, 60, 19942–19958. doi:10.1007/s10853-025-11559-1
- Oladijo, S. S., Akinlabi, E. T., Mwema, F. M., Jen, T. C., & Oladijo, O. P. (2024). Sputtering of high entropy alloys thin films: An overview. *Engineering Solid Mechanics*, 12, 177–194. doi:10.5267/j.esm.2023.9.002
- Padamata, S. K., Yasinskiy, A., & Yanov, V. (2022). Magnetron sputtering high-entropy alloy coatings: A mini-review. *Metals*, 12(2), 319. doi:10.3390/met12020319
- Pickering, E. J., & Jones, N. G. (2016). High-entropy alloys: A critical assessment of their founding principles and future prospects. *International Materials Reviews*, 61, 183–202. doi:10.1080/09506608.2016.1180020
- Qi, J., Ibarra Hoyos, D., & Poon, S. J. (2022). Machine learning-

- based classification, interpretation, and prediction of high-entropy-alloy intermetallic phases. *arXiv*. doi:10.48550/arXiv.2208.02141
- Rashidy Ahmady, A., Ekhlasi, A., Nouri, A., Haghbini Nazarpak, M., Gong, P., & Solouk, A. (2023). High entropy alloy coatings for biomedical applications: A review. *Smart Materials in Manufacturing*, 1, 100009. doi:10.1016/j.smmf.2022.100009
- Rudnik, E. (2025). Electrochemical and electroless deposition of high-entropy alloy thin films: A review of plating conditions, properties, and applications. *Applied Sciences*, 15, 8009. doi:10.3390/app15148009
- Sathish, M., Radhika, N., & Saleh, B. (2021). A critical review on functionally graded coatings: Methods, properties, and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 225, 109278. doi:10.1016/j.compositesb.2021.109278
- Shah, A., Patel, M., Murugesan, J., & Kumar, R. (2025). Development of corrosion and fretting wear resistant AlCoCrFeNi high entropy alloy coatings prepared by electrodeposition using an aqueous electrolyte. *Intermetallics*, 187, 109021. doi:10.1016/j.intermet.2025.109021
- Sharma, A. (2021). High entropy alloy coatings and technology. *Coatings*, 11(4), 372. doi:10.3390/coatings11040372
- Sharma, D., Boruah, D., Ameen, A., & Alperen, A. (2024). Optimizing cold spray parameters for high entropy alloy coatings using Taguchi and Box–Behnken design approaches for mechanically alloyed powder. *Journal of Thermal Spray Technology*, 33, 2278–2297. doi:10.1007/s11666-024-01838-9
- Singh, S., Katiyar, N. K., Goel, S., & Joshi, S. N. (2023). Phase

- prediction and experimental realisation of a new high entropy alloy using machine learning. *Scientific Reports*, 13, 4811. doi:10.1038/s41598-023-31461-7
- Song, H., Tian, F., Hu, Q. M., Vitos, L., Wang, Y., Shen, J., & Chen, N. (2017). Local lattice distortion in high-entropy alloys. *Physical Review Materials*, 1(2), 023404. doi:10.1103/PhysRevMaterials.1.023404
- Taghian, M., Heydarian, M., Torkian, S., Dabir, M. P., Bahrami, A., Mousavi Anijdan, S. H., & Park, N. (2023). High-velocity oxy-fuel (HVOF) spray coating of Inconel, Colmonoy, and aluminum on AISI 316L stainless steel: A comparative investigation of the microstructure and corrosion resistance of coatings. *Coatings*, 13(1), 204. doi:10.3390/coatings13010204
- Vaßen, R. (2022). A perspective on thermally sprayed thermal barrier coatings: Current status and trends. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31, 685–698. doi:10.1007/s11666-022-01330-2
- Verma, V., Belcher, C. H., Apelian, D., & Lavernia, E. J. (2024). Diffusion in high entropy alloy systems—A review. *Progress in Materials Science*, 142, 101245. doi:10.1016/j.pmatsci.2024.101245
- Wang, J., Jia, D., Gao, Q., Fu, Y., & Wu, X. (2025). High-entropy alloy coatings: A systematic review on composition design, microstructural mechanisms, and multifunctional application. *Materials & Design*, 258, 114715. doi:10.1016/j.matdes.2025.114715
- Xu, Y., Wang, D., Wu, S., Lu, H., Yao, R., & Yang, J. (2025). Research progress on defect formation mechanism and process optimization of laser cladding high entropy alloy coatings. *Optics and Laser Tech.*, 187, 112819.

doi:10.1016/j.optlastec.2025.112819

- Ye, Y. F., Wang, Q., Lu, J., Liu, C. T., & Yang, Y. (2016). High-entropy alloy: Challenges and prospects. *Materials Today*, 19(6), 349–362. doi:10.1016/j.mattod.2015.11.026
- Yeh, J. W., Chen, Y. Y., Lin, S. J., & Chen, S. K. (2007). High-entropy alloys – A new era of exploitation. *Mat. Sci. Forum*, 560, 1–9. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1
- Zhang, F., Zhang, C., Chen, S. L., Zhu, J., Cao, W. S., & Kattner, U. R. (2014). An understanding of high entropy alloys from phase diagram calculations. *CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 45, 1–10. doi:10.1016/j.calphad.2013.10.006
- Zhang, Y., Ting, T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., & Zhang, P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 61, 1–93. doi:10.1016/j.pmatsci.2013.10.001
- Zhao, P., Shi, Z., Wang, X., Li, Y., Cao, Z., Zhao, M., & Liang, J. (2023). A review of the laser cladding of metal-based alloys, ceramic-reinforced composites, amorphous alloys, and high-entropy alloys on aluminum alloys. *Lubricants*, 11(11), 482. doi:10.3390/lubricants11110482

YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIM KAPLAMALAR

KISIM II: MİKROYAPI, PERFORMANS VE GÜNCEL GELİŞMELER

Burcu YİĞİT¹

Ahmet ŞİMŞEK²

Özkan ÖZDEMİR³

1. GİRİŞ

Yüksek entropili alaşımların (HEA), Nb, Cr, V, W ve Ti gibi pahalı elementler içermesi, kütsel üretim maliyetlerini artırmaktadır. Bu nedenle HEA'ların matris malzeme yüzeyine kaplama olarak uygulanması, hem maliyeti azaltan hem de malzeme kullanımını optimize eden bir yüzey mühendisliği yaklaşımıdır. Kaplama uygulamalarında, altlık malzemenin mekanik özellikleri korunurken yüzeye yüksek sertlik, mukavemet, aşınma ve korozyon direnci, termal kararlılık ve biyouyumluluk gibi özellikler kazandırılmaktadır. Kaplama-altlık arasındaki bağ mukavemeti, mekanik yükler altında kaplamanın ayrılma riskini azaltırken, kararlı pasif filmler elektrokimyasal reaksiyonları sınırlandırarak koruyucu bariyer oluşturmaktadır (Kumar, 2024; Rashidy et al., 2023).

HEA kaplamaların mekanik, tribolojik, elektrokimyasal ve yüksek sıcaklık performansı; faz yapısı, tane morfolojisi,

¹ Müh. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji. Fakültesi. Metalurji ve Malzeme Müh. ORCID: 0009-0004-1576-7367

² Arş. Gör. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji. Fakültesi. Metalurji ve Malzeme Müh. ORCID: 0000-0002-4747-3783

³ Prof. Dr. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji. Fakültesi. Metalurji ve Malzeme Müh. ORCID: 0000-0003-2366-8196

element dağılımı, segregasyon ve mikroyapısal kusurlar gibi özelliklerden etkilenmektedir. Birden fazla ana elementin yüksek oranlarda bir araya gelmesi, geleneksel alaşımlardan farklı faz yapılarının ve mikroyapısal özelliklerin gelişmesine olanak sağlamaktadır. Bu sistemlerde yüzey merkezli kübik (YMK), hacim merkezli kübik (HMK) ve σ fazları tek başına veya birlikte bulunabilmektedir. Dolayısıyla mikroyapısal karakterizasyon, üretim koşullarının faz oluşumu ve mikroyapı üzerindeki etkilerinin anlaşılması ve bunların kaplama performansı ile ilişkilendirilmesi açısından önem taşımaktadır (Klychevskikh et al., 2023; Luo et al., 2022; Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020).

HEA kaplamaların üretim yöntemi; tane boyutu, faz dağılımı ve kusur yoğunluğunu belirleyen önemli bir faktördür. Mekanik alaşımlama sırasında gerçekleşen yoğun plastik deformasyon ve kırılma–kaynaşma döngüleri tane incelmelerini ve kimyasal homojenliği desteklerken, lazer tabanlı üretim süreçleri gibi hızlı katılaşmaya sebep olan prosesler ince taneli ve yüksek kusur yoğunluklu mikroyapıların oluşmasına neden olmaktadır (Luo et al., 2022; Pachauri, Kumar, & Maurya, 2021; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

HEA kaplamalarda mikroyapı, faz bileşiminin yanı sıra dislokasyon yapıları, alt tane oluşumları, düşük açılı tane sınırları ve deformasyon mekanizmalarıyla da ilişkilidir. Elektron Geri Saçılım Kırınımı (EBSD) ve Elektron Kanallama Kontrast Görüntüleme (ECCI) analizleri, HEA sistemlerinde düşük açılı tane sınırları, yoğun dislokasyon ağları ve heterojen tane dağılımlarından oluşan çok ölçekli mikroyapıların gelişebildiğini ve bu yapıların yüksek dayanım ile sünekliğe katkı sağladığını göstermektedir (Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020).

Mikroyapısal karakterizasyonda Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) analizleri faz dağılımı, element segregasyonu ve kimyasal

heterojenliğin; EBSD analizleri kristal yönlenmeleri, tane boyutu ve tane sınırı özelliklerinin; Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) analizleri ise atomik ölçekte faz sınırları, dislokasyon yapıları ve çökeltilerin incelenmesinde kullanılmaktadır. Çok fazlı HEA sistemlerinde fazlar arası arayüzeylerin karakterizasyonu, mekanik ve tribolojik davranışın anlaşılması açısından önem taşımaktadır (Klychevskikh et al., 2023; Luo et al., 2022; Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020).

2. FAZ YAPISI

Yüksek entropili alaşımlarda faz yapısı, malzemenin mekanik özelliklerini, aşınma ve korozyon direncini ve termal kararlılığını belirleyen temel mikroyapısal unsurlardandır. Geleneksel alaşımlardan farklı olarak HEA sistemlerinde faz oluşumu; konfigürasyonel entropi, karışım entalpisi, atomik boyut farkı ve elektron konsantrasyonunun ortak etkisiyle şekillenmektedir. Yüksek konfigürasyonel entropi, karmaşık intermetalik bileşiklerin oluşumunu baskılayarak YMK ve HMK katı çözelti fazlarının kararlılığını destekleyebilmektedir (Tsai & Yeh, 2014; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

HEA sistemlerinde tek fazlı yapıların yanı sıra çok fazlı mikroyapılar da görülmektedir. Fe–Cr–Ni–Mo–W esaslı alaşımlarda YMK ve HMK fazlarına ek olarak σ fazının oluşabildiği ve bu durumun elementler arasındaki kimyasal etkileşimler ile yerel kompozisyon değişimlerinden kaynaklandığı bildirilmektedir. EDS ve EBSD analizleri, FeCrNiMoW alaşımında YMK fazının Fe ve Cr bakımından zengin bölgelerde, σ fazının ise Cr, Mo ve W bakımından zengin alanlarda oluştuğunu göstermektedir. YMK fazı sünekliği artırırken, σ fazı yüksek sertlik sağlamasına rağmen gevrek davranışı artırmaktadır (Klychevskikh et al., 2023).

Faz oluşumu, alaşım bileşiminin yanı sıra üretim yöntemi ve işlem parametrelerinden de etkilenmektedir. Toz metalurjisi ve mekanik alaşımlamada öğütme süresi, enerji girdisi ve sinterleme koşulları faz dağılımını belirlemektedir. Artan alaşımlama süresi element dağılımını homojenleştirirken, yetersiz alaşımlama Mo ve W bakımından zengin bölgelerde segregasyona ve faz ayrışmasına neden olabilmektedir (Klychevskikh et al., 2023; Pachauri, Kumar, & Maurya, 2021).

Katkılı imalat ve hızlı katılaşma esaslı üretim yöntemleri ile üretilen HEA sistemlerinde ise faz yapısı daha heterojen bir karakter kazanabilmektedir. Bu tür HEA sistemlerinde EBSD ve ECCI analizleri; bimodal tane dağılımı, düşük açılı tane sınırları ve yoğun dislokasyon ağlarının birlikte bulunduğunu göstermektedir. Bu mikroyapısal özelliklerin deformasyon sırasında kayma bantları ve mekanik ikizlenme ile birlikte etkili olması, yüksek gerinim pekleşme kapasitesi ile dayanım ve sünekliğin birlikte elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020). Magnetron sıçratma gibi fiziksel buhar biriktirme (PVD) tabanlı yöntemler ile üretilen HEA kaplamalarda ise belirli kristal düzlemlerinin tercihli büyüme gösterebildiği ve sertlik, aşınma direnci ve arayüzey davranışını etkilediği bildirilmektedir. Bu nedenle faz analizinde kristalografik yönlenme de dikkate alınmalıdır (Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

2.1. Dendritik Yapı ve Segregasyon

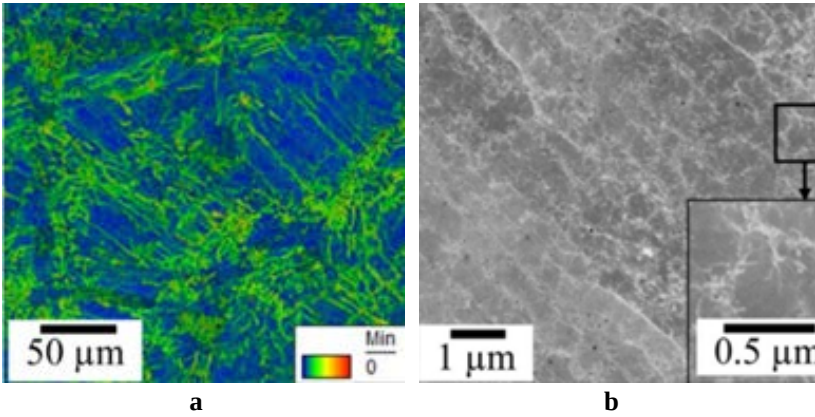
Yüksek entropili alaşım (HEA) kaplamalarda mikroyapının gelişimi büyük ölçüde katılaşma mekanizmalarına bağlıdır. Özellikle lazer kaplama ve plazma transfer ark kaplama gibi ergitme temelli yöntemlerde yüksek sıcaklık gradyenti ve hızlı katılaşma koşulları dendritik yapıların oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca katılaşma sırasında sıvı ve katı fazlar arasındaki element dağılımı farklılıkları, yerel kimyasal

heterojenliklere de yol açmaktadır (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Dendritik mikroyapı, dendrit çekirdekleri ve interdendritik bölgelerden oluşmaktadır. Elementlerin dağılım katsayıları ve difüzyon hızlarına bağlı olarak bazı elementler dendritlerde yoğunlaşırken, diğerleri interdendritik bölgelerde birikmektedir. Fe–Cr–Ni–Mo–W esaslı alaşımların EDS analizleri incelendiğinde, Mo ve W elementlerinin interdendritik bölgelerde zenginleştiği, Fe ve Cr elementlerinin ise daha homojen dağıldığı görülmektedir (Klychevskikh et al., 2023). Mikrosegregasyon olarak tanımlanan bu elementsel ayrışma, üretim yöntemi ve katılaşma koşullarına bağlıdır. Yüksek soğuma hızları, difüzyon süresini kısıtlayarak daha ince dendritik yapılar oluşturmakta ve segregasyon eğilimini azaltmaktadır. Düşük soğuma hızlarında ise interdendritik bölgelerde element zenginleşmesi ve kimyasal heterojenlik artabilmektedir (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Mikrosegregasyon, faz oluşumunu ve mekanik özellikleri de etkilemektedir. Özellikle Cr, Mo ve W bakımından zengin interdendritik bölgelerde σ gibi topolojik olarak sık paketlenmiş intermetalik fazlar oluşabilmektedir. Bu fazlar sertliği artırırken yerel gevrekliğe ve mekanik özelliklerin heterojen dağılımına neden olabilmektedir (Klychevskikh et al., 2023). Dolayısıyla segregasyon davranışının kontrol edilmesi, faz kararlılığı ve mekanik performans açısından kritik önem taşımaktadır. Dendritik yapı oluşumu üretim yöntemine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Toz metalurjisi ve mekanik alaşımlama gibi katı hal yöntemlerinde ergime ve yeniden katılaşma gerçekleşmediğinden klasik dendritik yapı oluşumu büyük ölçüde engellenmektedir. Yüksek enerjili öğütme sayesinde element dağılımı homojenleşmekte ve segregasyon eğilimi azaltılabilmektedir (Pachauri, Kumar, & Maurya, 2021).

2.2. Dislokasyon Yapıları ve Mekanik Davranış

Yüksek entropili alaşımlarda (HEA) mekanik özellikler; faz bileşimi ve tane morfolojisinin yanı sıra dislokasyon yapıları, tane sınırları ve deformasyon mekanizmalarına bağlıdır. Çok ölçekli mikroyapılar, malzemenin akma davranışı, pekleşme kapasitesi ve sünekliğini doğrudan etkilemektedir. Katkılı imalat yöntemleriyle üretilen HEA sistemlerinde yüksek dislokasyon yoğunluğunun mukavemet artışına katkı sağladığı bildirilmektedir. EBSD ve ECCI analizleri, HEA mikroyapılarında düşük açılı tane sınırları (LAGB) ve yoğun dislokasyon ağlarının birlikte bulunabildiğini göstermektedir. Bu sınırlar, dislokasyon hareketini engelleyerek plastik deformasyon sırasında gerilme birikimini ve malzemenin dayanımını artırmaktadır. Yüksek gerinimlerde pekleşmenin sürmesi, kayma bantları ve mekanik ikizlenmenin birlikte oluşmasıyla ilişkilendirilmiştir. Bu durum, HEA'larda dayanım ve sünekliğin birlikte sağlanmasında mikroyapının önemini göstermektedir (Şekil 1) (Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020).



Şekil 1. (a) HEA’de yerel misoryantasyon dağılımını gösteren Ortalama Çekirdek Yönelim Sapması (KAM) haritası ve (b) seçilen bölgede dislokasyon yapılarının Elektron Kanallama Kontrastı (ECC) görüntüsü (Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020).

HEA sistemlerinde plastik deformasyon; dislokasyon kayması, kayma bantları, deformasyon ikizlenmesi ve bazı sistemlerde faz dönüşümü mekanizmalarıyla gerçekleşebilmektedir. Özellikle düşük yığın hata enerjisine sahip YMK HEA'lerde mekanik ikizlenme, dislokasyon hareketini sınırlandırarak yüksek dayanım ve sünekliğin birlikte elde edilmesini sağlayan pekleşme mekanizmalarından biridir (Tsai & Yeh, 2014; Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020).

HEA yapılarında tane boyutunun küçülmesi, tane sınırı yoğunluğunu artırarak dislokasyon hareketini sınırlandırmakta ve Hall-Petch mekanizması doğrultusunda mukavemeti yükseltmektedir. Yine ince taneli yapı, yüksek dislokasyon yoğunluğu ve karmaşık tane sınırı ağının birlikte bulunması, çoklu pekleşme mekanizmaları aracılığıyla HEA sistemlerinde mekanik performansa katkı sağlamaktadır (Tsai & Yeh, 2014; Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

3. ARAYÜZEY ANALİZİ

HEA kaplamalarda arayüzey, kaplama ile altlık malzeme arasındaki fiziksel, kimyasal ve metalurjik etkileşimlerin gerçekleştiği kritik bir geçiş bölgesidir. Bu bölgede meydana gelen difüzyon, faz oluşumu, artık gerilmeler ve kristalografik uyum gibi mikroyapısal oluşumlar, kaplamanın bağ mukavemeti, yük transfer kapasitesi, çatlak oluşum eğilimi ve bunlara bağlı olarak servis ömrünü doğrudan etkilemektedir (Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Kaplama-altlık etkileşimleri kullanılan üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Termal püskürtme yöntemlerinde, ergimiş veya yarı ergimiş partiküllerin altlık yüzeyine çarparak hızla katılaşması sonucunda karakteristik lamelli bir mikroyapı oluşmaktadır. Bu yapıda bulunan splat sınırları, mikro boşluklar

ve oksit oluşumları, kaplamanın mekanik bütünlüğünü ve çevresel etkilere karşı dayanımını etkileyen mikroyapısal süreksizlikler olarak değerlendirilmektedir. Kaplama–altlık arayüzeyinde meydana gelen karşılıklı element difüzyonu, özellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen kaplama işlemlerinde, kimyasal bileşimin kademeli olarak değiştiği geçiş bölgelerinin oluşmasına yol açmaktadır (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Bu geçiş bölgeleri, mekanik ve termal özelliklerdeki ani değişimleri azaltarak arayüzeydeki gerilme yoğunlaşmalarının sınırlandırılmasına katkı sağlayabilmektedir. Ancak aşırı difüzyon sonucunda gevrek intermetalik fazların oluşması, arayüzeyin mekanik dayanımını olumsuz etkileyebilmektedir (Klychevskikh et al., 2023; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). Bunun yanı sıra, kaplama ile altlık arasındaki termal genleşme katsayısı farklılıkları, kaplama işlemi ve sonrasındaki soğuma sürecinde çekme veya basma karakterli artık gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle yüksek sertliğe ve sınırlı plastik deformasyon kabiliyetine sahip kaplamalarda, bu gerilmeler mikroçatlak oluşumunu kolaylaştırarak kaplama bütünlüğünün bozulmasına yol açabilmektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Ghadami, 2026; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

Soğuk püskürtme (cold spray) yönteminde ise bağlanma, yüksek hızlı katı partiküllerin oluşturduğu yoğun plastik deformasyonla gerçekleşmektedir. Ergime meydana gelmediğinden oksidasyon, element buharlaşması ve faz dönüşümleri sınırlandırılabilir. Bununla birlikte, partiküller arasında yetersiz bağlanma ve oksitlerin varlığı, kaplamaların mekanik özelliklerini olumsuz etkileyerek yükleme sırasında kırılma davranışını etkileyebilmektedir (Gärtner et al., 2005). PVD ile üretilen bazı ince film kaplamalarda, arayüzeyde atomik ölçekte kademeli geçiş katmanları oluşabilmektedir.

Kristalografik uyum ve yarı-koherent arayüzey yapıları, kaplama ile altlık arasındaki arayüzey özelliklerini etkileyebilmektedir. DC Magnetron sıçratma yöntemiyle üretilen AlTiN esaslı kaplamalarda bu geçiş katmanlarının film büyümesini ve tercihli kristal yönlenmesini etkilediği bildirilmiştir (Zhang et al., 2019).

3.1. Metalurjik ve Mekanik Bağlanma

HEA kaplamalarda kaplama–altlık arayüzeyindeki bağlanma, mekanik ve metalurjik olmak üzere iki temel mekanizmayla açıklanmaktadır. Bu mekanizmaların etkinliği; kaplama yöntemi, işlem sıcaklığı ve parçacıkların altlığa ulaşma kinetiğine bağlıdır (Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Mekanik bağlanma, özellikle termal püskürtme yöntemlerinde ergimiş veya yarı ergimiş parçacıkların altlık yüzeyine çarparak yayılması ve katılaşması sonucunda gerçekleşmektedir. Parçacıkların yüzey pürüzlülüklerine yerleşmesiyle oluşan fiziksel kilitleme, kaplamanın altlığa tutunmasını sağlamaktadır. Ancak splat sınırları, mikro boşluklar ve oksit bölgeleri bağlanma sürekliliğini azaltarak bağ mukavemetini sınırlandırabilmektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Lekatou, Sioulas, Karantzalis, & Grimalis, 2015).

Soğuk püskürtme yönteminde bağlanma, yüksek hızlı katı parçacıkların çarpma sırasında uğradığı yoğun plastik deformasyonla gerçekleşmektedir. Çarpma sırasında oluşan yerel sıcaklık artışı ve kesme kararsızlıkları, parçacık–altlık arayüzeyinde bağlanmayı desteklemektedir. Başarılı bağlanma için parçacıkların, kaplama ve altlık malzemesine bağlı kritik çarpma hızını aşması gerekmektedir (Gärtner et al., 2005).

Metalurjik bağlanma ise, kaplama ve altlık arasındaki atomik etkileşimlere dayanmaktadır. Yüksek sıcaklıklı kaplama işlemlerinde gerçekleşen karşılıklı element difüzyonu, kimyasal

bileşimin kademeli değiştiği geçiş bölgeleri oluşturarak metalurjik sürekliliği ve yük transferini iyileştirmektedir. Özellikle lazer kaplama ve PVD yöntemlerinde oluşan difüzyon bölgeleri ve geçiş katmanları, yüksek bağ mukavemetine katkı sağlamaktadır (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Bağlanma mekanizması, arayüzey bütünlüğünü ve kaplamanın uzun dönem performansını doğrudan etkilemektedir. Metalurjik bağlanmanın etkin olduğu sistemlerde daha homojen arayüzey yapısı ve dengeli gerilme dağılımı çatlak oluşumunu geciktirirken, mekanik bağlanmanın baskın olduğu kaplamalarda splat sınırları, poroziteler ve diğer arayüzey kusurları, gerilme yoğunlaşmalarına ve çatlak ilerlemesine neden olabilmektedir. Buna karşılık uygun metalurjik etkileşimler, arayüzey sürekliliğini ve yük transferini destekleyerek kaplamanın servis güvenilirliğine katkı sağlayabilmektedir (Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

3.2. İnterdifüzyon Bölgesi

Kaplama–altlık sistemlerinde arayüzey yapısı, kaplamanın yapısal uyumluluğunu ve mekanik davranışını etkileyen önemli unsurlardan biridir. Zhang ve ark. (2019), PVD yöntemiyle Co esaslı alaşım üzerine biriktirilen AlTiN esaslı kaplamada nanokristalin AlTiN ve hcp-Co geçiş katmanlarının yanı sıra HMK-W alt geçiş tabakasını belirlemiştir. Ayrıca HMK-W/AlTiN arayüzünde yarı-koherent kristalografik ilişki gözlenmiş ve geçiş katmanlarının oluşumu ile kaplamanın tercihli kristal yönelimi arasındaki ilişki incelenmiştir (Zhang et al., 2019). İnterdifüzyon bölgesinin genişliği ve kimyasal özellikleri; işlem sıcaklığı, bekletme süresi, elementlerin difüzyon katsayıları ve kaplama yöntemine bağlıdır. Artan sıcaklık ve işlem süresi, atomik taşınımı artırarak daha kalın geçiş bölgelerinin oluşmasını

sağlamaktadır. Bununla birlikte yüksek entropili alaşımlarda (HEA) çok sayıda ana elementin bulunması, difüzyon davranışını karmaşıktırmaktadır. HEA sistemlerinin karakteristik özelliklerinden biri olan yavaş difüzyon etkisi, bazı durumlarda element taşınımını sınırlandırarak arayüzeydeki mikroyapısal değişimi kontrol etmektedir (Tsai & Yeh, 2014; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). İnterdifüzyon bölgesi, kimyasal sürekliliğin yanı sıra mekanik uyum açısından da önemlidir. Kaplama ve altlık arasındaki elastik özellik ve termal genleşme farklılıkları, arayüzeyde gerilme yoğunlaşmalarına neden olabilmektedir. Kademeli bileşim değişimi, bu gerilmeleri azaltarak çatlak oluşumunu ve delaminasyon riskini sınırlandırmakta, böylece kaplamanın servis ömrüne katkı sağlamaktadır (Ghadami, 2026; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

Bununla birlikte aşırı interdifüzyon, çok bileşenli sistemlerde σ , μ ve diğer gevrek intermetalik fazların oluşumuna neden olabilmektedir. Bu fazlar yüksek sertlik sağlamalarına rağmen düşük süneklikleri nedeniyle arayüzey dayanımını olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca element segregasyonu, faz ayrışması ve yerel kimyasal zenginleşmeler arayüzey homojenliğini bozabilmektedir. Bu nedenle interdifüzyon bölgesinin kontrollü gelişimi, HEA kaplamaların uzun dönemli güvenilirliği açısından önem taşımaktadır (Klychevskikh et al., 2023; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

3.3. Artık Gerilmeler

Kaplama–altlık sistemlerinde oluşan artık gerilmeler, kaplamanın yapısal bütünlüğünü, bağ mukavemetini ve servis performansını etkileyen temel faktörlerdendir. Bu gerilmeler; üretim sırasındaki sıcaklık değişimleri, hızlı katılaşma, faz dönüşümleri ve plastik deformasyon mekanizmalarından kaynaklanmaktadır. HEA kaplamalarda çok bileşenli yapı ve mikroyapısal heterojenlik, artık gerilme dağılımını

karmaşılaştırabilmektedir (Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Termal kaynaklı artık gerilmeler, kaplama ve altlık arasındaki termal genleşme katsayısı farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Yüksek sıcaklıklardan soğuma sırasında malzemelerin farklı oranlarda büzülmesi, arayüzeyde çekme veya basma karakterli gerilmeler oluşturmaktadır. Özellikle termal püskürtme ve lazer kaplama gibi yüksek enerji girdili yöntemlerde sıcaklık gradyentleri ve hızlı soğuma, gerilme seviyelerini artırabilmektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Lekatou, Sioulas, Karantzalis, & Grimalis, 2015; Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021). HVOF yöntemiyle üretilen WC-Co kaplamalarda mikroyapı, püskürtme sırasında partiküllerin ergime derecesi ve çarpma koşullarından etkilenmektedir. Partiküllerin altlığa ve önceden biriktirilmiş kaplama tabakalarına çarpması, lamelli bir yapı oluşmasını sağlamaktadır. Partiküllerin daha yüksek derecede ergimesi, tabakalar arasındaki boşlukların dolmasını ve daha belirgin olmayan tabaka sınırlarının oluşmasını destekleyerek kaplamanın gözenekliliğini azaltabilmektedir (Lekatou, Sioulas, Karantzalis, & Grimalis, 2015). HEA kaplamalarda artık gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımı; kaplama kalınlığı, porozite, faz bileşimi, tane yapısı ve arayüzey morfolojisine bağlıdır. Özellikle YMK, HMK ve σ fazlarının birlikte bulunduğu sistemlerde fazlar arasındaki elastik ve termal özellik farklılıkları yerel gerilme yoğunlaşmalarına neden olabilmektedir. Ayrıca dislokasyon yoğunluğu, tane sınırları ve heterojen faz dağılımı da gerilmelerin homojen olmayan şekilde dağılmasına katkı sağlamaktadır (Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Artık gerilmeler kaplama performansını olumlu veya olumsuz etkileyebilmektedir. Basma yönlü gerilmeler çatlak oluşumunu geciktirerek yorulma dayanımını artırabilirken,

çekme yönlü gerilmeler mikroçatlak oluşumunu, delaminasyonu ve kaplama ayrılmasını kolaylaştırabilmektedir. Artık gerilmeler işlem parametrelerinin optimizasyonu, uygun altlık hazırlığı, kontrollü soğutma ve gerilim giderme ısıtma işlemleriyle azaltılabilmektedir. Ayrıca geçiş katmanları ve kontrollü interdifüzyon bölgeleri oluşturmak, arayüzdeki gerilme yoğunlaşmalarını sınırlandırarak kaplama–altlık uyumunu iyileştirmektedir (Ghadami, 2026; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

3.4. Termal Genleşme Uyumsuzluğu, Delaminasyon ve Çatlak Oluşum Mekanizmaları

Kaplama–altlık sistemlerinde uzun dönemli yapısal kararlılık, malzemelerin termal genleşme davranışlarının uyumuna bağlıdır. HEA kaplamalar ile altlık arasındaki termofiziksel özellik farklılıkları, özellikle tekrarlı ısıtma–soğutma çevrimlerinde arayüzde gerilme birikimine neden olmaktadır. Bu gerilmeler, bağ mukavemetini azaltarak çatlak oluşumu ve delaminasyon gibi hasar mekanizmalarını tetikleyebilmektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Ghadami, 2026; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

Termal püskürtme yöntemiyle üretilen kaplamalarda mikroyapı, gözeneklilik ve partiküller arasındaki bağlanma, kaplamanın mekanik ve tribolojik performansını etkileyen önemli faktörlerdir. Lekatou ve ark. (2015), Al7075-T6 altlığı üzerine uygulanan WC–Co kaplamalarda daha düşük mikro–gözeneklilik ile daha yüksek sertlik ve kırılma tokluğunun elde edilebildiğini bildirmiştir. Ganesh ve ark. (2022) ise termal püskürtme yöntemiyle üretilen yüksek entropili alaşım kaplamaların oksidasyon ve aşınma davranışlarını değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, kaplamaların performansının üretim yöntemi ve oluşan mikroyapısal özelliklerle yakından ilişkili olduğunu

göstermektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Lekatou, Sioulas, Karantzalis, & Grimanellis, 2015).

Kaplama üretim yöntemi, kaplamanın mikroyapısını ve hasar davranışını etkileyebilmektedir. HVOF yöntemiyle üretilen WC-Co kaplamalarda gözeneklilik, mikroyapısal homojenlik ve partiküller arasındaki bağlanma, kaplamanın mekanik ve aşınma performansı ile ilişkilidir. Lekatou ve ark. (2015), zayıf tabakalar arası bağlanmanın aşınma sırasında kaplama tabakalarının kopması ile ilişkili olabileceğini bildirmiştir. Termal püskürtme yöntemiyle üretilen HEA kaplamalarda da mikroyapı ve gözeneklilik, mekanik ve tribolojik özelliklerin değerlendirilmesinde önemli parametrelerdir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Gärtner et al., 2005; Lekatou, Sioulas, Karantzalis, & Grimanellis, 2015).

HEA kaplamaların çok fazlı mikroyapıları da çatlak oluşumunu etkilemektedir. YMK, HMK ve σ fazlarının birlikte bulunduğu sistemlerde elastik modül, sertlik ve termal genleşme farklılıkları heterojen gerilme dağılımlarına yol açmaktadır. Faz sınırları, yüksek dislokasyon yoğunluklu bölgeler ve sert ikinci faz parçacıkları çatlak oluşumuna duyarlı alanlar haline gelebilmektedir. Özellikle gevrek intermetalik ve σ fazları, çatlak ilerleme direncini azaltabilmektedir. Buna karşılık bazı HEA kaplamalarda arayüzeyde oluşan geçiş tabakaları ve kademeli bileşim değişimleri, termal genleşme uyumsuzluğunun etkilerini azaltabilmektedir. Bu yapılar, gerilme yoğunlaşmalarını sınırlandırarak kaplama ile altlık arasında daha dengeli yük transferi sağlamaktadır (Ghadami, 2026; Klychevskikh et al., 2023; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

4. PERFORMANS ANALİZİ

Yüksek entropili alaşım (HEA) kaplamaların performansı; kimyasal bileşim, faz yapısı, mikroyapısal özellikler

ve kullanılan üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Çok bileşenli alaşım tasarımının sağladığı yüksek konfigürasyonel entropi, kafes bozulması ve çoklu element etkileşimleri, bu kaplamaların mekanik, tribolojik ve kimyasal davranışlarını etkilemektedir. Bu kapsamda HEA kaplamaların performansı; mekanik özellikler, aşınma davranışı, yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyon direnci açısından değerlendirilmektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Luo et al., 2022; Patel et al., 2022).

4.1. Mekanik Özellikler

Yüksek entropili alaşım (HEA) kaplamaların mekanik özellikleri; aşınma direnci, yük taşıma kapasitesi ve yapısal kararlılık üzerinde doğrudan etkilidir. Bu kaplamaların mekanik performansı, yüksek konfigürasyon entropisi, kafes bozulması, çoklu element etkileşimleri ve mikroyapısal özelliklerin ortak etkisiyle şekillenmektedir (Tsai & Yeh, 2014; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

HEA sistemlerinde yüksek sertliğin temel mekanizmalarından biri katı çözelti sertleşmesidir. Farklı atom yarıçaplarına sahip elementlerin kristal kafeste oluşturduğu elastik gerinim alanları dislokasyon hareketini zorlaştırarak plastik deformasyona karşı direnci artırmaktadır (Ghadami, 2026; Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). HMK faz içeren sistemler genellikle daha yüksek sertlik ve mukavemet gösterirken, YMK fazlar daha yüksek süneklik sağlamaktadır [5,7]. YMK ve HMK fazlarının birlikte bulunduğu yapılarda dayanım-süneklik dengesi sağlanabilirken, σ gibi sert ikinci fazlar sertliği artırabilmekte; ancak gevrek faz miktarının aşırı artması kırılma tokluğunu azaltabilmektedir (Klychevskikh et al., 2023; Tsai & Yeh, 2014).

Üretim yöntemi de mekanik özelliklerin gelişiminde belirleyicidir. Lazer kaplamada yüksek katılaşma hızları ve tane

incelmesi sertlik artışını desteklerken, magnetron sıçratmayla üretilen ince filmlerde yoğun mikroyapı ve düşük porozite, yüksek sertlik ve elastisite modülü sağlamaktadır. Toz metalurjisi ve eklemeli imalatla üretilen sistemlerde ise mikroyapısal homojenlik, faz dağılımı ve dislokasyon yoğunluğu mekanik davranışı etkilemektedir (Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Sertlik, kaplama kalınlığı boyunca değişebilmektedir. Yüzeye yakın bölgelerde ince taneli yapı ve yüksek dislokasyon yoğunluğu nedeniyle daha yüksek sertlik değerleri görülürken, altlığa yaklaşıldıkça tane büyümesi ve element geçişleri nedeniyle sertlik azalabilmektedir. Kaplama–altlık arayüzeyindeki geçiş bölgeleri ise gerilme dağılımı ve metalurjik bağlanma açısından önem taşımaktadır (Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Elastisite modülü; atomlar arası bağ kuvvetleri, faz yapısı ve kristal düzeniyle ilişkilidir. Sertlik (H)/Elastisite modülü (E) oranı (H/E), kaplamanın elastik gerinim kapasitesi ve çatlak oluşumuna karşı direncinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Yüksek H/E oranına sahip HEA kaplamaların plastik deformasyona daha geç geçtiği ve daha yüksek aşınma direnci gösterdiği bildirilmektedir (Luo et al., 2022; Sabarinath et al., 2025).

Tane boyutunun küçülmesi, tane sınırı yoğunluğunu artırarak Hall–Petch mekanizmasıyla dislokasyon hareketini sınırlandırmakta ve sertlik ile akma dayanımını artırmaktadır (Klychevskikh et al., 2023; Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020). Yüksek dislokasyon yoğunluğu, düşük açılı tane sınırları ve heterojen mikroyapı bölgeleri de ilave sertleşmeye katkı sağlamaktadır (Wang, Gu, An, Liu, & Song, 2020). Ayrıca düşük poroziteli, yoğun ve homojen kaplamalar daha yüksek sertlik,

elastisite modülü ve yük taşıma kapasitesi gösterirken; poroziteler ve mikroyapısal süreksizlikler yerel gerilme yoğunlaşmalarına neden olarak mekanik performansı sınırlandırmaktadır (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Patel et al., 2022).

4.2. Tribolojik Performans

Yüksek entropili alaşım (HEA) kaplamaların tribolojik performansı; yüksek sertlik, katı çözelti sertleşmesi, kafes bozulması ve mikroyapısal kararlılıkla ilişkilidir. Bu özellikler aşınma, sürtünme ve yüzey hasarına karşı direnci artırmakta; HEA kaplamaları yüksek yük ve sıcaklığın söz konusu olduğu uygulamalar için uygun hale getirmektedir (Luo et al., 2022; Patel et al., 2022).

Kuru kayma koşullarında HEA kaplamalar, geleneksel alaşım ve kaplama sistemlerine göre daha düşük aşınma oranları ve yüksek yüzey dayanımı sergileyebilmektedir. Özellikle lazer kaplamada hızlı katılaşmayla oluşan ince ve homojen mikroyapı, plastik deformasyonu sınırlandırarak aşınma direncini artırmaktadır (Luo et al., 2022; Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021).

Aşınma davranışı, uygulanan yük ve çalışma koşullarının yanı sıra kaplamanın sertliği ve mikroyapısal özelliklerinden etkilenmektedir. Yüksek entropili alaşım kaplamalarda bildirilen başlıca aşınma mekanizmaları arasında plastik deformasyon, malzemenin yüzey boyunca sürülmesi ve yüzeyden parçacık kopması bulunmaktadır. Ayrıca kaplamanın mikroyapısı ve faz yapısı, aşınma direncinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021). Yüksek sıcaklıklarda özellikle Al, Cr ve Si içeren HEA kaplamalarda oluşan kararlı oksit tabakaları tribolojik davranışta önemli rol oynamaktadır (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Patel et al., 2022). Al_2O_3 ve Cr_2O_3 esaslı oksitler tribofilm oluşturarak doğrudan metal-metal temasını ve aşınma oranını

azaltmaktadır (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Luo et al., 2022). Ayrıca yavaş difüzyon etkisi, yüksek sıcaklıkta tane büyümesi ve mikroyapısal bozunmayı sınırlandırarak aşınma direncinin korunmasına katkı sağlamaktadır (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Tsai & Yeh, 2014).

Sürtünme katsayısı; faz yapısı, yüzey kimyası ve aşınma sırasında oluşan reaksiyon ürünlerinden etkilenmektedir (Luo et al., 2022; Sabarinath et al., 2025). YMK faz oranının yüksek olduğu sistemler daha düşük sürtünme katsayısı gösterirken, HMK faz bakımından zengin sistemler daha yüksek sertlik ve yük taşıma kapasitesi sağlayabilmektedir (Luo et al., 2022; Patel et al., 2022). Oksit esaslı tribofilmler sürtünme davranışını kararlı hale getirirken, Ag, Mo veya grafit benzeri katı yağlayıcı fazların ilavesi sürtünme katsayısını daha da düşürebilmektedir (Patel et al., 2022; Sabarinath et al., 2025).

HEA kaplamaların birçok geleneksel Ni ve Co esaslı kaplamaya kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha kararlı tribolojik davranış sergilediği bildirilmektedir (Patel et al., 2022; Sabarinath et al., 2025). Bu koşullarda gelişen koruyucu oksit tabakaları yüzey bütünlüğünün korunmasına katkı sağlayarak aşınma oranını azaltmakta ve sürtünme davranışını daha kararlı hale getirmektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Patel et al., 2022).

Üretim yöntemi de tribolojik performansı belirlemektedir. Magnetron sıçratmayla üretilen ince filmlerde düşük porozite ve yoğun yapı, termal püskürtme kaplamalarında porozite, lamelli yapı ve partikül sınırları; lazer kaplamada ise güçlü metalurjik bağ, düşük seyreltme oranı ve homojen mikroyapı aşınma ve sürtünme davranışını şekillendiren başlıca faktörlerdir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Kumar, 2024; Luo et al., 2022; Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021).

4.3. Korozyon ve Oksidasyon Direnci

HEA kaplamalar, çok bileşenli alaşım yapıları ve yüksek konfigürasyon entropileri sayesinde kararlı koruyucu oksit tabakalarının oluşumunu destekleyerek yüksek korozyon ve oksidasyon direnci gösterebilmektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). Bu özellikleri nedeniyle denizcilik, enerji üretimi, havacılık, petrokimya ve kimya endüstrilerindeki korozyon ve yüksek sıcaklıklı servis koşulları için önemli bir alternatif oluşturmaktadır (Ghadami, 2026; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

HEA kaplamaların korozyon direncinin temelinde yüzeyde kendiliğinden oluşan pasif filmler bulunmaktadır. Özellikle Cr, Al, Ti ve Nb gibi elementlerin oluşturduğu ince ve yoğun oksit filmleri, metal yüzeyi ile çevre arasındaki etkileşimi sınırlandırmaktadır (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). Bu tabakalar iyon taşınımını ve elektrokimyasal reaksiyonları engelleyerek korozyon hızını düşürürken, Cr_2O_3 ve Al_2O_3 esaslı oksitlerin yüksek kimyasal kararlılığı koruyucu özellikleri sürdürebilmesine katkı sağlamaktadır (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). Korozyon davranışı mikroyapısal homojenlikten de etkilenmektedir. Homojen katı çözeltiler, lokal elektrokimyasal potansiyel farklılıklarını ve galvanik çift oluşumunu azaltarak çukurcuk ve yarık korozyonu eğilimini sınırlandırmaktadır. Ayrıca yavaş difüzyon, korozyon sırasında element ayrışmasını ve mikroyapısal bozunmayı azaltarak pasif tabakanın kararlılığını desteklemektedir (Tsai & Yeh, 2014; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

Asidik ortamlarda HEA kaplamalar, özellikle sülfürik ve hidroklorik asit çözeltilerinde oluşan koruyucu oksit filmleri

sayesinde çözünme hızını azaltarak kararlı pasivasyon davranışı gösterebilmektedir (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Patel et al., 2022). Homojen katı çözelti yapısı ve dengeli element dağılımı, pasif filmin sürekliliğini koruyarak lokal çözünmeyi sınırlandırmaktadır. Deniz suyu ve klorür içeren ortamlarda ise Cr, Ni ve Mo içeren HEA sistemlerinin yüksek yeniden pasivasyon kabiliyeti, hasarlı bölgelerin koruyucu oksitlerle yeniden kaplanmasını sağlayarak korozyonun ilerlemesini sınırlandırmaktadır. Homojen faz dağılımı da lokal anot ve katot bölgelerinin oluşumunu azaltarak elektrokimyasal kararlılığa katkı sağlamaktadır. HEA kaplamaların elektrokimyasal performansı çoğunlukla potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ile değerlendirilmektedir. Düşük korozyon akım yoğunluğu, yüksek polarizasyon direnci ve geniş pasifleşme aralığı, koruyucu yüzey filmlerinin etkinliğinin göstergeleridir. Birçok HEA kaplamanın paslanmaz çeliklere göre daha düşük korozyon akım yoğunluğu ve daha yüksek polarizasyon direnci sergilediği bildirilmiştir (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

Yüksek sıcaklıklarda oluşan Al_2O_3 , Cr_2O_3 ve benzeri kompakt oksit tabakaları, oksijen difüzyonunu sınırlandırarak oksidasyon kinetiğini yavaşlatmaktadır. Özellikle Al ve Cr bakımından zengin sistemlerde bu koruyucu filmler yüksek sıcaklıklarda yüzey bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamaktadır (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Patel et al., 2022). Yavaş difüzyon etkisi ise oksit tabakasının büyüme hızını azaltarak uzun süreli oksidasyon direncini desteklemektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Tsai & Yeh, 2014).

Üretim yöntemi de korozyon ve oksidasyon performansını etkilemektedir. Magnetron sıçratmayla elde edilen HEA ince filmlerin düşük porozite ve yüksek yoğunluğu, korozif ortamların

kaplama içerisine nüfuzunu sınırlandırmaktadır. Lazer kaplamada güçlü metalurjik bağ ve düşük çatlak oluşumu yüksek korozyon direncini desteklerken, termal püskürtmede oluşabilen porozite ve oksit kalıntıları lokal korozyon hücrelerinin oluşmasına neden olarak performansı sınırlandırabilmektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Luo et al., 2022).

4.4. Termal Kararlılık

HEA kaplamalar, çok bileşenli alaşım yapıları ve yüksek konfigürasyon entropileri sayesinde yüksek sıcaklıklarda tane büyümesi, faz dönüşümü ve element ayrışması gibi mikroyapısal değişimlere karşı direnç gösterebilmekte, böylece mekanik ve tribolojik özelliklerdeki kayıplar sınırlandırılabilir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Yüksek entropili alaşım kaplamaların yüksek sıcaklıklardaki mekanik ve tribolojik özellikleri, zorlu çalışma koşullarında kullanılan bileşenlerin yüzey performansının geliştirilmesi açısından avantaj sağlamaktadır. Bu özellikler, yüksek sıcaklıkta çalışan endüstriyel sistemlerde HEA kaplamaların potansiyel kullanımını desteklemektedir (Patel et al., 2022). HEA kaplamaların termal kararlılığında yüksek entropi etkisine bağlı yavaş difüzyon davranışı önemli rol oynamaktadır. Farklı atomik yarıçaplara sahip elementlerin aynı kristal yapıda bulunması atomların yer değiştirmesini zorlaştırarak difüzyon katsayılarını düşürmektedir. Böylece tane sınırı hareketliliği ve tane büyümesi yavaşlamakta, uzun süreli termal maruziyetlerde mikroyapısal kararlılık korunarak mekanik özelliklerdeki bozulma geciktirilmektedir (Tsai & Yeh, 2014; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

Faz stabilitesi de yüksek sıcaklık performansını belirleyen temel faktörlerdendir. HEA sistemlerinde YMK ve HMK esaslı katı çözelti fazlarının yüksek konfigürasyon entropisi etkisiyle kararlılığını koruması, faz ayrışması ve intermetalik oluşumunu

sınırlandırabilmektedir (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021). Özellikle Al-Co-Cr-Fe-Ni esaslı sistemlerde yüksek sıcaklık maruziyetine rağmen katı çözeltili yapısının büyük ölçüde korunabildiği ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerin sürdürülebildiği bildirilmiştir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). Üretim yöntemi de termal kararlılığı etkilemektedir. Lazer kaplama ve magnetron sıçratma gibi yüksek soğuma hızına sahip yöntemler ince taneli ve metastabil mikroyapıların oluşmasını sağlamaktadır (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021). Bu yapılarda yüksek sıcaklıkta tane büyüme eğilimi bulunmasına rağmen, kafes bozulması ve düşük difüzyon hızı tane sınırı hareketini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle tane irileşmesi geleneksel alaşımlara göre daha yavaş ilerlemektedir. Termal püskürtme kaplamalarında ise porozite, lamelli yapı ve oksit fazları yüksek sıcaklık davranışını etkileyebilmektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Patel et al., 2022).

Tane boyutunun korunması, yüksek sıcaklıktaki mekanik özelliklerin sürdürülebilmesi açısından önemlidir. İnce taneli mikroyapılar dislokasyon hareketini sınırlandırarak dayanım kaybını azaltmaktadır. Kararlı faz yapısı ise termal çevrimlerde oluşan gerilmelerin daha homojen dağılmasına yardımcı olarak çatlak oluşumu ve ilerlemesini sınırlandırmaktadır. Ayrıca Mo, Nb, Ta ve W gibi refrakter elementler yüksek sıcaklıkta difüzyonu yavaşlatarak faz ayrışmasını geciktirmekte ve yapısal bütünlüğü desteklemektedir (Tsai & Yeh, 2014; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). Refrakter HEA sistemlerinin 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda dahi yüksek sertlik ve dayanımlarını büyük ölçüde koruyabildiği bildirilmiştir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Sabarinath et al., 2025).

4.5. Proses–Mikroyapı–Performans

HEA kaplamaların performansı, alaşım bileşiminin yanı sıra üretim yöntemine bağlı olarak gelişen mikroyapısal özelliklerle ilişkilidir. Katılaşma koşulları, difüzyon davranışı, tane morfolojisi, faz dağılımı, porozite ve kaplama–altlık arayüzü; mekanik, tribolojik ve termal özellikleri etkileyen başlıca faktörlerdir. Bu nedenle proses–mikroyapı–performans ilişkisinin değerlendirilmesi, HEA kaplamaların belirli servis koşullarına uygunluğunun belirlenmesi açısından önem taşımaktadır (Luo et al., 2022; Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Patel et al., 2022). Lazer kaplama yönteminde yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı katılaşma, ince taneli ve nispeten homojen mikroyapıların oluşumunu desteklemektedir. Hızlı katılaşmanın element segregasyonunu sınırlandırması ve katı çözeltili fazlarının oluşumunu etkilemesi, sertlik ve aşınma direncinin gelişmesine katkı sağlayabilmektedir. Ayrıca kaplama–altlık arasında oluşan güçlü metalurjik bağ, arayüzey bütünlüğünü ve yük taşıma kapasitesini desteklemektedir (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Magnetron sıçratma gibi fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinde oluşabilen nanokristalin veya amorf yapılar, yüksek sertlik ve aşınma direnci açısından avantaj sağlamaktadır. İnce taneli yapı ve faz sınırları dislokasyon hareketini sınırlandırırken, düşük yüzey pürüzlülüğü sürtünme davranışını olumlu etkileyebilmektedir. Bununla birlikte kaplama kalınlığının sınırlı olması ve artık gerilmeler, bazı servis koşullarında performansı kısıtlayabilmektedir (Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Termal püskürtme kaplamalarında ise lamelli mikroyapı, porozite ve oksit içeriği performansı belirleyen temel unsurlardır. Düşük porozite ve yüksek kaplama yoğunluğu sertlik, aşınma ve oksidasyon direncini desteklerken, mikroyapısal süreksizlikler

çatlak oluşumunu ve ilerlemesini kolaylaştırabilmektedir. Buna karşılık geniş yüzeylerin kaplanabilmesi ve yüksek sıcaklık uygulamalarına uygunluğu, yöntemin önemli avantajları arasındadır (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Elektrokimyasal biriktirmede düşük işlem sıcaklığı ve kimyasal bileşimin kontrol edilebilmesi, altlık üzerindeki termal etkilerin sınırlandırılmasına ve homojen kaplamaların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Homojen element dağılımı korozyon direncine katkı sağlayabilirken, sınırlı kaplama kalınlığı ve mikroçatlak oluşumu yük taşıma kapasitesini olumsuz etkileyebilmektedir (Kumar, 2024; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Genel olarak ince taneli ve homojen mikroyapılar sertlik ve aşınma direncini desteklerken, segregasyon, porozite, gevrek fazlar ve arayüzey kusurları yerel gerilme yoğunlaşmalarına ve performans kayıplarına neden olabilmektedir (Luo et al., 2022; Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Sabarinath et al., 2025). Dolayısıyla HEA kaplamalarda optimum performansın elde edilmesi, yalnızca uygun alaşım bileşiminin seçilmesine değil, üretim parametreleri aracılığıyla mikroyapının ve kaplama–altlık etkileşimlerinin kontrol edilmesine de bağlıdır (Luo et al., 2022; Patel et al., 2022; Sabarinath et al., 2025).

4.6. HEA Kaplamaların Performans Parametreleri ve Nicel Karşılaştırılması

HEA kaplamaların performansının değerlendirilmesinde mikroyapısal gözlemlerin yanı sıra sertlik, aşınma oranı, sürtünme katsayısı ve korozyon akım yoğunluğu gibi nicel parametrelerin birlikte incelenmesi gerekmektedir. Literatürde lazer kaplama, magnetron sıçratma ve termal püskürtme yöntemleriyle üretilen HEA kaplamalarda geniş bir performans aralığı bildirilmiştir (Luo et al., 2022; Patel et al., 2022;

Sabarinath et al., 2025). HEA kaplamaların sertliği alaşım bileşimi, faz yapısı ve üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Lazer kaplamalı sistemlerde yaklaşık 200–1100 HV sertlik değerleri bildirilirken, bor ve silisyum içeren bazı sistemlerde ise sertlik 8–12 GPa seviyelerine ulaşabilmektedir. Bu farklılıklar, incelenen alaşımlara bağlı olarak faz yapısı, amorf yapı oluşumu ve katı çözelti sertleşmesi gibi mikroyapısal etkenlerle ilişkilendirilebilir (Luo et al., 2022; Sabarinath et al., 2025).

Tribolojik çalışmalar incelendiğinde, HEA kaplamalar genel olarak geleneksel kaplama sistemlerine göre daha düşük malzeme kaybı gösterebilmektedir. Lazer kaplamalı sistemlerde aşınma oranının yaklaşık $0.0664-14.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ aralığında olduğu bildirilmiştir (Luo et al., 2022; Patel et al., 2022). Sert faz içeriği, tane incelmesi ve homojen element dağılımı aşınma direncini artırırken, porozite ve gevrek faz oluşumu performansı olumsuz etkileyebilmektedir (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Sabarinath et al., 2025).

Sürtünme katsayısı HEA kaplamalarda yaklaşık 0.12–0.66 arasında değişmektedir. Sülfürleme veya katı yağlayıcı faz oluşumu gibi yüzey modifikasyonları sürtünme katsayısını daha da düşürebilmektedir. Örneğin CoCrFeMoNi sisteminde bu değer 0.47’den 0.12’ye düştüğü bildirilmiştir. Bu durum, tribolojik performansın yalnızca sertliğe değil, tribofilm ve yağlayıcı fazların oluşumuna da bağlı olduğunu göstermektedir (Luo et al., 2022; Patel et al., 2022; Sabarinath et al., 2025). Korozyon açısından değerlendirmelerde, azalan korozyon akım yoğunluğu ve artan korozyon potansiyeli, yüksek korozyon direnci ile ilişkilendirilmektedir. $\text{Al}_x\text{FeCoNiCuCr}$ kaplamalarda korozyon akım yoğunluğunun bileşime bağlı olarak 7,6–47,9 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ aralığında değiştiği ve bazı bileşimlerin altlığa göre daha yüksek korozyon direnci gösterdiği bildirilmiştir. Bununla birlikte aşırı Al, Ti veya gevrek faz oluşumu, mikrogalvanik

hücre oluşumunu artırarak korozyon performansını sınırlandırabilmektedir (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). Bu veriler, HEA kaplamaların performansının tek bir parametreyle açıklanamayacağını göstermektedir. Yüksek sertlik genellikle düşük aşınma oranıyla ilişkili olmakla birlikte, sürtünme katsayısı oksit, sülfür veya katı yağlayıcı fazların oluşumuna bağlı olarak bağımsız şekilde değişebilmektedir (Luo et al., 2022; Sabarinath et al., 2025). Korozyon direnci yalnızca alaşımın elektrokimyasal soy karakterine değil, aynı zamanda oluşan pasif filmin kararlılığına ve bütünlüğüne de bağlıdır (Menghani, Vyas, Patel, Natu, & More, 2021; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025).

5. HEA KAPLAMALARDA GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE GELİŞMELER

HEA'lar, son yirmi yılda malzeme bilimi ve yüzey mühendisliği alanlarında hızla gelişen araştırma konularından biri haline gelmiş; mekanik, tribolojik, korozyon ve yüksek sıcaklık performansları nedeniyle akademik ve endüstriyel açıdan önem kazanmıştır (Tsai & Yeh, 2014; Yeh et al., 2004). Başlangıçta faz oluşumu, mikroyapı ve üretim yöntemlerine odaklanan çalışmalar, son yıllarda havacılık, enerji, denizcilik, savunma sanayii ve biyomalzeme gibi yüksek katma değerli uygulamalara yönelmiştir (Ghadami, 2026; Rashidy et al., 2023; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

4.6. Küresel Araştırma Eğilimleri ve Güncel Gelişmeler

HEA kavramı, 2004 yılında Yeh ve arkadaşları ile Cantor ve arkadaşlarının birbirinden bağımsız çalışmalarıyla literatüre kazandırılmış ve son yirmi yılda hızla gelişen bir araştırma alanı haline gelmiştir (Cantor, Chang, Knight, & Vincent, 2004; Yeh et al., 2004). Son yıllarda yüksek entropili alaşımlar, hacimsel

malzemelerin yanı sıra yüzey mühendisliği uygulamalarında kaplama malzemesi olarak da yoğun ilgi görmektedir. Lazer kaplama, termal püskürtme ve magnetron sıçratma gibi yöntemlerle üretilen HEA kaplamalar; mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerini geliştirme potansiyelleri nedeniyle araştırılmaktadır (Kumar, 2024; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Bibliyometrik incelemeler, HEA kaplamalara yönelik araştırma eğilimlerini ve öne çıkan konu başlıklarını ortaya koymaktadır. Bu çalışmalar; kaplama üretim yöntemleri, bileşim tasarımı, mikroyapı-özellik ilişkileri ve farklı uygulamalardaki performans üzerinde yoğunlaşmaktadır (Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). İşlevsel derecelendirilmiş HEA kaplamalar üzerine yapılan güncel derlemeler de üretim, mikroyapı, mekanik özellikler ve endüstriyel uygulamalar arasındaki ilişkileri ele almaktadır (Ghadami, 2026). Küresel araştırmalarda öne çıkan konulardan biri, yüksek sıcaklık uygulamalarına yönelik refrakter HEA sistemleridir. Mo, Nb, Ta, W ve V gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip elementler içeren bu alaşımlar, geleneksel nikel esaslı süperalaşımların çalışma sıcaklığı sınırlarını aşma potansiyelleri, yüksek sıcaklıkta yapısal kararlılıkları ve yüksek özgül dayanımları nedeniyle özellikle havacılık ve enerji sektörlerinde önemli araştırma konusu haline gelmiştir (Tsai & Yeh, 2014).

Güncel HEA araştırmaları, mekanik özelliklerin yanı sıra farklı fonksiyonel özelliklerin geliştirilmesine de odaklanmaktadır. Biyomalzemeler, hidrojen depolama, kataliz, radyasyon dayanımı ve koruyucu kaplamalar, HEA sistemlerinin araştırıldığı farklı uygulama alanları arasında yer almaktadır. Bu çeşitlilik, HEA'ların yalnızca yapısal malzemeler olarak değil, farklı disiplinlerde kullanılabilecek çok bileşenli malzeme sistemleri olarak da değerlendirildiğini göstermektedir (Ghadami, 2026; Tsai & Yeh, 2014). Günümüzde HEA araştırmaları, yeni

alaşım bileşimlerinin geliştirilmesinin yanı sıra üretim parametreleri, mikroyapı ve malzeme özellikleri arasındaki ilişkilerin anlaşılmasına ve endüstriyel uygulamalara uygun sistemlerin geliştirilmesine de odaklanmaktadır (Ghadami, 2026; Tsai & Yeh, 2014). Bu doğrultuda yapay zeka destekli alaşım tasarımı, CALPHAD tabanlı faz tahminleri ve yüksek verimli hesaplamalı yöntemlerin kullanımı giderek artmaktadır (Feng, Sun, Cao, & Chen, 2025; Lu, 2024; Yan et al., 2025; Zhang & Yang, 2025).

4.7. HEA Kaplamaların Performansı ve Uygulama Alanları

HEA kaplamalar, uygun bileşim ve üretim koşullarında elde edilebilen yüksek sertlik, aşınma direnci, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık performansı sayesinde zorlu servis koşullarında kullanılan bileşenlerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Luo et al., 2022; Patel et al., 2022; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). Lazer kaplama, termal püskürtme ve magnetron sıçratma gibi yöntemlerle üretilen HEA kaplamalar; havacılık, enerji, denizcilik, petrokimya ve takım-kalıp endüstrisi gibi farklı uygulama alanlarında araştırılmaktadır (Ghadami, 2026; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Bu uygulamalarda temel amaç, yüzey performansını iyileştirerek bileşenlerin servis ömrünü uzatmak, bakım gereksinimlerini azaltmak ve çalışma güvenilirliğini artırmaktır (Ghadami, 2026; Kumar, 2024).

Son yıllardaki çalışmalar, HEA kaplamaların yüksek performanslı yüzey mühendisliği malzemeleri olarak geliştirilmesine yönelik ilginin arttığını göstermektedir. Özellikle yüksek sıcaklıkta aşınma davranışı ve oksidasyon direnci üzerine yapılan çalışmalar, bu kaplamaların zorlu servis koşullarında

kullanılma potansiyelini ortaya koymaktadır. Havacılık ve uzay, enerji, denizcilik ve yüksek sıcaklıkta çalışan ekipmanlar, HEA kaplamaların araştırıldığı potansiyel uygulama alanları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, bu kaplamaların endüstriyel ölçekte yaygın kullanımının değerlendirilebilmesi için uzun süreli servis performansı, üretim ölçeklenebilirliği ve maliyet gibi etkenlerin de incelenmesi gerekmektedir (Luo et al., 2022; Patel et al., 2022; Sabarinath et al., 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

4.8. Yeni Nesil HEA Kaplama Yaklaşımları

HEA kaplamalara yönelik güncel araştırmalar, yeni alaşım bileşimlerinin geliştirilmesinin yanı sıra mikroyapı-özellik ilişkilerinin anlaşılması ve kaplama performansının optimize edilmesine de odaklanmaktadır. Bileşim tasarımı, üretim yöntemi ve mikroyapısal özelliklerin birlikte değerlendirilmesi, farklı uygulama koşullarına yönelik kaplamaların geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır (Feng, Sun, Cao, & Chen, 2025; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Bu kapsamda, makine öğrenmesi ve veri odaklı hesaplamalı malzeme tasarımı, HEA bileşimlerinin ve özelliklerinin öngörülmesi için kullanılan yaklaşımlar arasında yer almaktadır CALPHAD tabanlı termodinamik modelleme de faz kararlılığının ve faz oluşumunun değerlendirilmesinde kullanılabilir. Bu yaklaşımların deneysel çalışmalarla birlikte kullanılması, aday bileşimlerin belirlenmesini ve malzeme geliştirme sürecinin daha sistematik yürütülmesini destekleyebilir (Feng, Sun, Cao, & Chen, 2025; Lu, 2024; Yan et al., 2025; Zhang & Yang, 2025). HEA kaplama araştırmaları, metalik alaşım sistemlerinin yanı sıra farklı bileşim ve yapıdaki kaplama sistemlerini de kapsamaktadır. Yüksek entropili nitrür ve karbür esaslı kaplamalar, sertlik, aşınma direnci ve termal kararlılık gibi özellikleri geliştirmeye yönelik araştırma konuları arasındadır. Bu özelliklerin düzeyi, kaplamanın

bileşimine, faz yapısına ve üretim koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Sabarinath et al., 2025; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

Üretim yöntemleri bakımından lazer kaplama, magnetron sıçratma ve termal püskürtme, HEA kaplamaların hazırlanmasında kullanılan başlıca teknikler arasındadır (Ganesh, Majji, Vasudev, & Bansal, 2022; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Ayrıca işlevsel derecelendirilmiş HEA kaplamalar, bileşim ve özelliklerin kaplama boyunca değiştirilmesi yoluyla farklı performans gereksinimlerinin karşılanmasına yönelik bir yaklaşım sunmaktadır (Ghadami, 2026).

5. KRİTİK ZORLUKLAR VE GELECEK PERSPEKTİFİ

HEA kaplamalarda laboratuvar ölçeğinde elde edilen sonuçların endüstriyel uygulamalara aktarılabilmesi için teknolojik ve ekonomik sınırlamaların aşılması gerekmektedir (Ghadami, 2026; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025). Çok bileşenli alaşımların geniş bileşim uzayı yeni tasarım olanakları sunarken, uygun bileşimlerin geleneksel deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmesi önemli zaman ve kaynak gereksinimleri doğurabilmektedir (Lu, 2024). Ayrıca, alaşım bileşimine bağlı olarak Co, Ni, Nb, Ta ve W gibi elementlerin kullanımı hammadde maliyetlerini artırabilir; bu nedenle maliyet, üretim ölçeklenebilirliği ve uzun dönem servis performansı HEA kaplamaların endüstriyel uygulamalara aktarılmasında dikkate alınması gereken başlıca konular arasındadır (Ghadami, 2026; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025).

HEA kaplamaların endüstriyel ölçekte uygulanmasında üretim maliyeti, prosesin ölçeklendirilebilirliği ve uzun dönemli

servis performansının doğrulanması dikkate alınması gereken başlıca konular arasındadır (Ghadami, 2026; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Bu doğrultuda, maliyet etkin alaşım tasarımlarının geliştirilmesi ve kaplamaların farklı çalışma koşullarındaki performanslarının deneysel olarak değerlendirilmesi önem taşımaktadır (Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Ayrıca, endüstriyel uygulamalara aktarılabilirliğin güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi için uzun dönemli servis verilerinin artırılmasına ihtiyaç vardır (Ghadami, 2026; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Bu zorlukların aşılmasında malzeme bilişimi, yüksek verimli yöntemler ve yapay zekâ destekli tasarım yaklaşımları önemli olanaklar sunmaktadır. Makine öğrenmesi ve veri odaklı modelleme yöntemleri, HEA bileşimlerinin tasarımı ve malzeme özelliklerinin tahmin edilmesi yoluyla aday sistemlerin belirlenmesini ve tasarım sürecinin daha sistematik yürütülmesini desteklemektedir (Feng, Sun, Cao, & Chen, 2025; Lu, 2024; Yan et al., 2025; Zhang & Yang, 2025). Bununla birlikte, tahminlerin güvenilirliği mevcut verilerin kapsamına ve kalitesine, kullanılan modellerin doğruluğuna ve deneysel doğrulamaya bağlıdır. Bununla birlikte, hesaplamalı tahminlerin güvenilirliğinin değerlendirilmesi ve geliştirilen modellerin deneysel sonuçlarla doğrulanması, HEA bileşimlerinin tasarımı ve kaplama performansının optimizasyonu açısından önem taşımaktadır (Feng, Sun, Cao, & Chen, 2025; Lu, 2024; Yan et al., 2025; Zhang & Yang, 2025).

Gelecekte HEA kaplamaların geliştirilmesinde, yeni alaşım bileşimlerinin belirlenmesinin yanı sıra bileşim, üretim koşulları ve mikroyapı ile performans özellikleri arasındaki ilişkilerin birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır (Feng, Sun, Cao, & Chen, 2025; Wang, Jia, Gao, Fu, & Wu, 2025; Zhang, Gao, Jia, Fu, & Wu, 2025). Mikroyapısal homojenlik,

porozite, kaplama–altlık bağlanması ve artık gerilmeler, HEA kaplamaların performansını etkileyebilen önemli parametrelerdir. Bu özelliklerin üretim koşulları ve alaşım bileşimiyle ilişkilerinin deneysel olarak incelenmesi, kaplama performansının değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Hesaplamalı tasarım ve makine öğrenmesi yaklaşımlarının deneysel çalışmalarla birlikte kullanılması ise aday HEA bileşimlerinin belirlenmesi ve kaplama performansının optimizasyonu açısından önemli bir araştırma yönüdür (Feng, Sun, Cao, & Chen, 2025; Lu, 2024; Zhang & Yang, 2025).

KAYNAKÇA

- Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., & Vincent, A. J. B. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 375–377, 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
- Feng, S., Sun, X., Cao, W., & Chen, G. (2025). Optimization of high-entropy alloy coating design using machine learning methods. *npj Materials Degradation*, 9, 164. <https://doi.org/10.1038/s41529-025-00709-0>
- Ganesh, B., Majji, R., Vasudev, H., & Bansal, A. (2022). A review on the oxidation and wear behavior of the thermally sprayed high-entropy alloys. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1447–1451. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.016>
- Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Voyer, J., Kreye, H., Riekehr, S., & Koçak, M. (2006). Mechanical properties of cold-sprayed and thermally sprayed copper coatings. *Surface and Coatings Technology*, 200(24), 6770–6778. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.007>
- Ghadami, F. (2026). Functionally-graded high-entropy alloy coatings: New frontiers in cutting edge industrial applications. *Materials Today Communications*, 50, 114610. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.114610>
- Klychevskikh, Y. A., Statnik, E. S., Ivannikov, A. Y., Salimon, A. I., & Korsunsky, A. M. (2023). Microstructural characterization of FeCrNiMoW high entropy alloy. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.141>
- Kumar, S. (2024). Comprehensive review on high entropy alloy-based coating. *Surface and Coatings Technology*, 477,

130327. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130327>

- Lekatou, A., Sioulas, D., Karantzalis, A. E., & Grimanelis, D. (2015). A comparative study on the microstructure and surface property evaluation of coatings produced from nanostructured and conventional WC–Co powders HVOF-sprayed on Al7075. *Surface and Coatings Technology*, 276, 539–556. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.017>
- Lu, Z., Ma, D., Liu, X., & Lu, Z. (2024). High-throughput and data-driven machine learning techniques for discovering high-entropy alloys. *Communications Materials*, 5, 76. <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00487-3>
- Luo, D., Zhou, Q., Huang, Z., Li, Y., Liu, Y., Li, Q., & He, Y. (2022). Tribological behavior of high entropy alloy coatings: A review. *Coatings*, 12(10), 1428. <https://doi.org/10.3390/coatings12101428>
- Menghani, J., Vyas, A., Patel, P., Natu, H., & More, S. (2021). Wear, erosion and corrosion behavior of laser clad high entropy alloy coatings – A review. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2824–2829. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.763>
- Pachauri, P., Kumar, A., & Maurya, M. (2021). Effect of powder metallurgy on high entropy alloy materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4026–4033. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.529>
- Patel, P., Roy, A., Sharifi, N., Stoyanov, P., Chromik, R. R., & Moreau, C. (2022). A review. [Tam makale başlığı, dergi adı ve yayın bilgileri eksik.]
- Rashidy, A., Ekhlasi, A., Nouri, A., Haghbin, M., Gong, P., & Solouk, A. (2023). High entropy alloy coatings for biomedical applications: A review. *Smart Materials in*

- Manufacturing, 1, 100009.
<https://doi.org/10.1016/j.smmf.2022.100009>
- Sabarinath, S., Raj, V., Nair, L. V., Thomas, V., Ogunlakin, N., & Saji, V. S. (2025). High entropy alloy (HEA) coatings for tribological applications – A review. Results in Engineering, 27, 105695.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105695>
- Tsai, M. H., & Yeh, J. W. (2014). High-entropy alloys: A critical review. Materials Research Letters, 2(3), 107–123.
<https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>
- Wang, J., Jia, D., Gao, Q., Fu, Y., & Wu, X. (2025). High-entropy alloy coatings: A systematic review on composition design, microstructural mechanisms, and multifunctional application. Materials & Design, 258, 114715.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114715>
- Wang, Z., Gu, J., An, D., Liu, Y., & Song, M. (2020). Characterization of the microstructure and deformation substructure evolution in a hierarchical high-entropy alloy by correlative EBSD and ECCI. Intermetallics, 121, 106788. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106788>
- Yan, Y., Hu, X., Liao, Y., Zhou, Y., He, W., & Zhou, T. (2025). Recent machine learning-driven investigations into high entropy alloys: A comprehensive review. Journal of Alloys and Compounds, 1010, 177823.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177823>
- Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., ... Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. Advanced Engineering Materials, 6(5), 299–303.
<https://doi.org/10.1002/adem.200300567>

- Zhang, B., Gao, Q., Jia, D., Fu, Y., & Wu, X. (2025). Review on the preparation and properties of high-entropy alloys coating. *Materials Science and Engineering: A*, 945, 149009. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.149009>
- Zhang, L., Chen, Y., Chen, M., Huang, L., Wu, H., Liu, T., & Xiong, X. (2019). Growth of PVD-ALTiN film on Co-based alloy: Preferred orientation and adaptively formed transition layers. *Surface and Coatings Technology*, 377, 124905. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124905>
- Zhao, Y. M., Zhang, J. Y., Liaw, P. K., & Yang, T. (2025). Machine learning-based computational design methods for high-entropy alloys. *High Entropy Alloys & Materials*, 3, 41–100. <https://doi.org/10.1007/s44210-025-00055-5>

MALZEME VE METALURJİ 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