
MALZEME VE METALURJİ MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ ARAŞTIRMALAR

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Kübra YAKINCI

Malzeme ve Metalurji Mühendisliğinde İleri Araştırmalar

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Kübra YAKINCI

yaz
yayınları

2024

**MALZEME VE METALURJİ
MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ
ARAŞTIRMALAR**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Kübra YAKINCI

© 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 978-625-6171-60-2

Aralık 2024 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

"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."

İÇİNDEKİLER

Malzeme Özelliklerini Belirlemede Simülasyon ve Modellemeye Ayrıntılı Bir Bakış	1
<i>SümeYra CAN</i>	

Zirkonya Matrisli Hbn İçeren Kompozitler	42
<i>Zuhal YILMAZ</i>	

Yerli Hammadde Kullanımıyla Elde Edilen Renklendiricilerin Seramik Sırlarında Değerlendirilmesi	66
<i>Hale YILDIZAY</i>	

Süperiletken Sistemler, Temel Özellikleri ve Teknolojideki Önemi.....	79
<i>Kübra YAKINCI, M. Eyyuphan YAKINCI</i>	

Kaynakların Tahribatsız Muayenesi ve Hata Karakterlerine Göre Doğru Yöntemin Seçimi.....	108
<i>Levent Cenk KUMRUOĞLU, Cihan ÇELİK</i>	

Aısı 1010 Çelik Boruların Soğuk Çekiminde Kalıp Açısının ProsesE Etkisinin Fea Analizi İle İncelenmesi	132
<i>Mutlu Çağrı YİĞİT, Funda Gül KOÇ, Memduh GÜRBÜZ</i>	

Düşük Karbonlu Çelikte Kaynak Uygulaması Sonrası Isıl İşlemin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi.....	141
<i>Mutlu Çağrı YİĞİT, Özge ARARAT, Abdullah ÖTER</i>	

Giyilebilir Teknolojilerde Sensörlerin Üretimi ve Kullanım Alanları	155
<i>Enes NAYMAN</i>	

Tribological Performance Under Abrasive Wear Conditions Of 3d Printed Pet-G, Pla and Wood Specimens By Fused Filament Fabrication (Fff).....	175
<i>Rüçhan YILDIZ, Bayram YILDIZ, Hilal CAN, Engin TAN, İsmail OVALI</i>	

MALZEME ÖZELLİKLERİNİ BELİRLEMEDE SİMÜLASYON VE MODELLEMeye AYRINTILI BİR BAKIŞ

SümeYra CAN¹

1. GİRİŞ

Simülasyon ve modelleme, özellikle moleküler dinamik (MD) simülasyonları ve makine öğrenimi (ML) tekniklerinin entegrasyonu yoluyla malzeme özelliklerinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu metodolojilerin kombinasyonu araştırmacıların malzemelerin özelliklerini geleneksel deneysel yöntemlerden daha yüksek verimlilik ve doğrulukla tahmin etmelerine ve analiz etmelerine olanak tanır.

Moleküler dinamik simülasyonları, malzemelerin atomik düzeydeki davranışlarının keşfedilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Polimerler ve nanokompozitler de dahil olmak üzere çeşitli malzemelerin yapısal, termal ve mekanik özellikleri hakkında bilgi sağlamaktadır. Örneğin, MD simülasyonları tek duvarlı karbon nanotüp / poli(fenilenesülfon) nanokompozitlerin termal özelliklerini araştırmak için etkin bir şekilde kullanılmış ve mikroskobik gözlemleri makroskobik özelliklere bağlama kabiliyetlerini göstermiştir (Taheri ve ark., 2014). Benzer şekilde MD simülasyonları nano katmanlı malzemelerin gerilme özelliklerini analiz etmek için kullanılmış ve nano ölçekte mekanik özellikleri değerlendirmedeki etkinliklerini

¹ Öğr. Gör. Dr., Bayburt Üniversitesi, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Optisyonluk Programı, sumeyrasacakli@bayburt.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2471-5786.

göstermiştir (Uehara, 2013). Bu simülasyonlar araştırmacıların deformasyon mekanizmalarını anlamalarını ve malzemelerin farklı koşullar altında nasıl davranacağını tahmin etmelerini sağlamaktadır; bu da malzeme tasarımı ve optimizasyonu için çok önemlidir (Tsai & Jeng, 2022).

Son yıllarda makine öğreniminin simülasyon teknikleriyle entegrasyonu malzeme biliminde devrim yaratmıştır. Makine öğrenimi algoritmaları, simülasyonlardan elde edilen geniş veri kümelerini analiz ederek hemen fark edilemeyecek örüntüleri ve korelasyonları belirleyebilmektedir. Örneğin, malzeme özellikleri hakkında kapsamlı veriler içeren Materials Project veritabanı, termofiziksel özellikleri verimli bir şekilde tahmin eden makine öğrenimi modelleri geliştirmek için kullanılmış ve doğrudan MD simülasyonlarına kıyasla tahminler için gereken süreyi önemli ölçüde azaltmıştır (Wu, 2024). Ayrıca gözeneklilik oranı ve basınç dayanımı da dahil olmak üzere çeşitli malzeme özelliklerini sentez koşullarından tahmin etmek için makine öğrenimi çerçeveleri oluşturulmuş ve böylece istenen özelliklere sahip malzemelerin tasarımı kolaylaştırılmıştır (Motojima ve ark., 2023). Makine öğrenimi ve simülasyon arasındaki bu sinerji sadece yeni malzemelerin keşfini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda tahminlerin doğruluğunu da artırarak onu malzeme bilişiminde güçlü bir araç haline getirmektedir (Ramprasad ve ark., 2017). Ayrıca, rastgele orman regresörleri ve çizge sinir ağları gibi gelişmiş makine öğrenimi tekniklerinin uygulanması, malzeme özellikleri için öngörücü modeller oluşturmada umut vaat ettiğini göstermiştir. Bu yöntemler magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini tahmin etmek ve yüksek entropili seramiklerde yapı-özellik ilişkileri kurmak için kullanılmıştır (Zhang, 2023; Kaufmann ve ark., 2020). Bu modellerin mevcut verilerden öğrenme kabiliyeti, deneysel doğrulamanın maliyetli veya zaman alıcı olduğu senaryolarda özellikle faydalı olan hızlı tahminlere olanak tanır.

Moleküler dinamik simülasyonları ve makine öğrenimi tekniklerinin entegrasyonu, malzeme bilimi alanında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Araştırmacılar bu metodolojilerden yararlanarak malzeme özelliklerini verimli bir şekilde tahmin ve optimize edebilir, böylece belirli uygulamalara göre uyarlanmış yenilikçi malzemelerin geliştirilmesinin önünü açabilirler.

2. SİMÜLASYON VE MODELLEME NEDİR?

Simülasyon ve modelleme karmaşık sistemlerin davranışını anlamak, analiz ve tahmin etmek için çeşitli disiplinlerde kullanılan kritik metodolojilerdir. Bu teknikler gerçek dünya süreçlerinin veya sistemlerinin soyut temsillerini oluşturmayı içerir ve araştırmacıların ve mühendislerin gerçekte test edilmesi pratik olmayan veya imkânsız olabilecek senaryoları keşfetmelerine olanak tanır.

Özünde simülasyon gerçek dünyadaki bir sürecin veya sistemin zaman içindeki işleyişini taklit etme sürecini ifade eder. Bu incelenen sistemin dinamiklerini temsil etmek için matematiksel modellerin kullanılmasını içerebilir. Örneğin, malzeme biliminde çeşitli koşullar altında malzemelerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için simülasyonlar kullanılabilir. Sonlu elemanlar analizi (FEA) gibi teknikler malzemelerin kuvvetlere, ısıya ve diğer fiziksel olaylara nasıl tepki verdiğinin incelenmesine olanak tanır (Siesing ve ark., 2016). Ayrıca simülasyonlar çeşitli fiziksel özellikleri ve etkileşimleri bir araya getirerek malzeme davranışının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayabilir (Guo ve ark., 2006). Öte yandan modelleme bir sistemin bileşenlerini ve bunların ilişkilerini tanımlayan kavramsal bir çerçevenin oluşturulmasını içerir. Bu sistem içindeki etkileşimleri tanımlayan matematiksel denklemlerin geliştirilmesini içerebilir. Örneğin, hibrit simülasyon modelleri karmaşık sistemlerin daha sağlam bir

analizini sağlamak için ayrıık olay simölasyonu, sistem dinamikleri ve ajan tabanlı modelleme gibi farklı simölasyon tekniklerini bir araya getirmektedir (Mustafee ve ark., 2017). Bu modeller özellikle birden fazla faktörün dinamik olarak etkileşime girdiğı sağıık ve üretim gibi alanlarda faydalı olabilir (Powell & Mustafee, 2017).

Simölasyon ve modellemenin önemi çok ölçekli analizi kolaylaştırma yetenekleriyle daha da vurgulanmaktadır. Çok ölçekli modelleme yaklaşımları, araştırmacıların kuantum mekaniğinden süreklilik mekaniğine kadar farklı uzunluk ve zaman ölçekleri arasında köprü kurmasına olanak tanıyarak malzeme özelliklerinin ve davranışlarının daha eksiksiz bir resmini sunar (Emmerich & Gemming, 2009; Emmerich, 2011). Bu durum atomik düzeydeki etkileşimlerin anlaşılmasının makroskopik özellikler ve performans hakkında bilgi verebileceğı malzeme bilimi için özellikle önemlidir. Ayrıca simölasyonun makine öğrenimi gibi gelişmiş hesaplama teknikleriyle entegrasyonu, modellerin tahmin yeteneklerini geliştirir. Makine öğrenimi algoritmaları, kalıpları ve korelasyonları tanımlamak için simölasyonlardan üretilen büyük veri kümelerini analiz ederek malzeme özelliklerinin daha hızlı ve daha doğru tahmin edilmesini sağlayabilir (Ahmad, 2018). Bu sinerji sadece yeni malzemelerin keşfini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda mevcut malzemeleri belirli uygulamalar için optimize eder.

Simölasyon ve modelleme, çağdaş araştırma ve mühendislikte vazgeçilmez araçlardır. Karmaşık sistemleri anlamak, çeşitli koşullar altındaki davranışları tahmin etmek ve yeni malzeme ve süreçlerin tasarımını kolaylaştırmak için bir çerçeve sağlarlar. Hesaplama gücü ve metodolojiler gelişmeye devam ettikçe, simölasyon ve modellemenin yetenekleri genişleyecek ve birçok alanda geçerliliklerini daha da artıracaktır.

3. MALZEME ÖZELLİKLERİNDE SİMÜLASYON VE MODELLEMENİN ÖNEMİ

Simülasyon ve modelleme, malzeme biliminde temel araçlardır ve malzeme özelliklerinin belirlenmesinde ve tahmin edilmesinde çok önemli bir rol oynar. Bu metodolojiler, araştırmacıların malzemelerin çeşitli koşullar altındaki davranışlarını keşfetmelerini sağlar ve sonuçta özel özelliklere sahip gelişmiş malzemelerin tasarlanmasına yol açar.

Simülasyon ve modellemenin başlıca avantajlarından biri malzemelerin mikroyapısal davranışları hakkında bilgi sağlama yetenekleridir. Örneğin, moleküler dinamikler (MD) ve yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) gibi atomistik simülasyonlar, malzemelerin mekanik davranışlarının atomik düzeyde incelenmesine olanak tanır. Bu simülasyonlar mikro yapı ile çekme mukavemeti ve süneklik gibi makroskobik özellikler arasındaki ilişkileri aydınlatılabilir. Möller ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada atomistik simülasyonların mekanik davranış ve bunun mikroyapısal özelliklerle korelasyonu konusundaki anlayışımızı önemli ölçüde geliştirebileceğini göstermiştir. Benzer şekilde Oda ve ark. (2019), malzemelerdeki mekanik mukavemeti ve iletkenliği belirlemek için kritik olan arayüz yapılarını anlamının önemini vurgulamıştır.

Makine öğrenimi tekniklerinin simülasyon ile entegrasyonu, malzeme özelliklerinin hızlı bir şekilde tahmin edilmesini sağlayarak bu alanda devrim yaratmıştır. Makine öğrenimi modelleri, geleneksel deneysel yöntemlerle belirgin olmayabilecek kalıpları ve ilişkileri tanımlamak için simülasyonlardan üretilen verileri analiz edebilmektedir. Bu yaklaşım farklı fazlar arasındaki etkileşimlerin genel performansı önemli ölçüde etkileyebildiği alaşımlar ve kompozitler gibi karmaşık malzemeler bağlamında özellikle faydalı olmuştur. Yang ve ark. (2010), malzeme özelliklerini optimize etmek için

çok önemli olan rasyonel katalizör tasarımında teorik simülasyonların rolünü vurgulamıştır. Ayrıca Kayser ve Adnan (2018) tarafından tane sınırı odaklı mekanik özellikler üzerine yapılan çalışma, atomistik simülasyonların nanokompozitlerin mekanik davranışları hakkında nasıl ayrıntılı bilgiler sağlayabileceğini göstermektedir.

Simülasyon ve modelleme aynı zamanda çok ölçekli analizi kolaylaştırarak atomik düzeyden makroskobik düzeye kadar farklı uzunluk ölçekleri arasında köprü kurar. Bu yetenek çeşitli ölçekler arasındaki etkileşimin anlaşılmasının malzeme davranışının daha iyi tahmin edilmesini sağlayabileceği malzeme biliminde özellikle önemlidir. Xia ve ark. (2011) tarafından tartışılan çok ölçekli modelleme yaklaşımı, dinamik simülasyonların kumaş malzemelerin balistik performansını etkileyen çeşitli faktörleri nasıl hesaba katabileceğini göstermiştir. Bu tür kapsamlı modelleme yaklaşımları, gerçek dünya uygulamalarındaki malzemelerin performansını doğru bir şekilde tahmin etmek için gereklidir. Mekanik özelliklere ek olarak, simülasyonlar malzemelerin termal ve dielektrik özelliklerini incelemek için de kullanılabilir. Storchak ve ark. (2021) kesme işlemlerinin sayısal simülasyonları için gerekli termal özelliklerin belirlenmesine yönelik metodolojiler geliştirerek üretimde doğru termal verilerin önemini vurgulamıştır. Benzer şekilde, Díaz ve ark. (2022) ise yalıtım malzemelerinin dielektrik özelliklerini değerlendirmek için sayısal modeller kullanmış ve çeşitli malzeme özelliklerini karakterize etmede simülasyon tekniklerinin çok yönlülüğünü göstermiştir.

Simülasyon ve modelleme, malzeme bilimi alanında vazgeçilmezdir ve mikroyapı ile malzeme özellikleri arasındaki ilişkiler hakkında kritik bilgiler sağlar. Araştırmacılar, atomistik simülasyonlar ve makine öğrenimi de dahil olmak üzere gelişmiş hesaplama tekniklerinden yararlanarak malzeme davranışını tahmin ve optimize edebilir, böylece belirli

uygulamalar için özel olarak tasarlanmış yenilikçi malzemelerin geliştirilmesinin önünü açabilirler.

4. SİMÜLASYON VE MODELLEME YÖNTEMLERİ NELERDİR?

Simülasyon ve modelleme yöntemleri, araştırmacılara çeşitli malzemelerin özelliklerini ve davranışlarını anlama, tahmin etme ve optimize etme yeteneği sağlayan malzeme biliminde temel araçlardır. Bu yöntemler, moleküler dinamikler (MD), sonlu elemanlar analizi (FEA), Monte Carlo simülasyonları ve yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) dahil olmak üzere, her biri farklı amaçlara ve uygulamalara hizmet eden çeşitli yaklaşımlar olarak geniş bir şekilde kategorize edilebilir.

4.1. Moleküler Dinamik (MD) Simülasyonları

Moleküler Dinamik (MD) simülasyonları, moleküler biyoloji ve malzeme bilimi alanında çok önemli bir hesaplama tekniği olarak ortaya çıkmış ve araştırmacıların moleküler sistemlerin karmaşık dinamiklerini atomik düzeyde keşfetmelerini sağlamıştır. MD simülasyonlarının çok yönlülüğü, protein katlanması ve ligand bağlanmasından karmaşık biyomoleküllerin ve malzemelerin yapısal dinamiklerine kadar çeşitli olayların araştırılmasına olanak tanımaktadır.

MD simülasyonları, başta proteinler ve nükleik asitler olmak üzere biyolojik makromoleküllerin dinamik davranışlarını anlamak için güçlü bir çerçeve sağlamaktadır. Atomik düzeydeki hareketleri ve zaman içindeki konformasyonel değişiklikleri yakalama yeteneği, biyolojik işlevlerin altında yatan mekanizmaların aydınlatılması için çok önemlidir. Torrens-Fontanals ve ark. (2020), MD simülasyonlarının X-ışını kristalografisi ve kriyoelektron mikroskobu gibi tekniklerden elde edilen statik yapısal verileri tamamlayarak G proteinine

bağlı reseptörlerin (GPCR'ler) dinamik doğasına ilişkin içgörüler sunabileceğini vurgulamaktadır. Bu dinamik bakış açısı araştırmacıların ligandların hedefleriyle gerçek zamanlı olarak nasıl etkileşime girdiğini görselleştirmelerine olanak tanıyarak bağlanma afiniteleri ve mekanizmalarının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağladığı için ilaç keşfi için çok önemlidir (Bruzze ve ark., 2020).

MD simülasyonlarının uygulanması, nükleik asitleri ve komplekslerini kapsayacak şekilde proteinlerin ötesine uzanmaktadır. Šponer ve ark. (2016), MD simülasyonlarının, deneysel tekniklerin sınırlamaları nedeniyle genellikle gizlenen RNA moleküllerinin yapısal dinamiklerini ortaya çıkarmada etkili olduğunu vurgulamaktadır. MD simülasyonları RNA davranışının atomistik bir görünümünü sağlayarak, RNA-protein etkileşimlerinin ve ribonükleoprotein komplekslerinin dinamiklerinin araştırılmasını kolaylaştırır, böylece gen düzenlemesi ve ifadesi anlayışımızı geliştirir (Krepl ve ark., 2016). Ayrıca, Sarcin-Ricin iç döngüsü gibi RNA motiflerinin incelenmesi, MD simülasyonlarının RNA biyolojisindeki karmaşık yapısal soruları ele alma kabiliyetini göstermektedir (Havrila ve ark., 2013).

Malzeme bilimi alanında, MD simülasyonlarının polimerler ve lipid çift tabakaları da dahil olmak üzere çeşitli malzemelerin özelliklerini araştırmak için çok değerli olduğu kanıtlanmıştır. Catte ve ark. (2018), lipid çift katmanlarından elektron paramanyetik rezonans (EPR) spektrumlarını tahmin etmek için MD simülasyonlarını kullanarak biyolojik membranların yapısal ve dinamik özelliklerine ilişkin içgörüler sağlamıştır. MD simülasyonlarının EPR gibi deneysel tekniklerle entegrasyonu, hesaplama modellerini doğrulamak ve karmaşık sistemlerdeki moleküler organizasyon ve hareket anlayışımızı geliştirmek için titiz bir test yatağı görevi görür. Simülasyon ve deney arasındaki bu sinerji, moleküler düzeyde

malzeme bilgimizi iletirmek için çok önemlidir. Dahası, MD simülasyonları, Wang ve ark. (2017) tarafından gösterildiği gibi, polimer matrisleri içindeki küçük moleküllerin difüzyonunu incelemek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Katkı maddeleri ve polimerik malzemeler arasındaki etkileşimleri simüle etme yeteneği, araştırmacıların malzeme özelliklerini yöneten altta yatan fizikokimyasal olayları aydınlatmasına olanak tanımaktadır. Bu anlayış, özellikle ilaç dağıtım sistemleri ve akıllı polimerler gibi özel işlevlere sahip gelişmiş malzemelerin geliştirilmesi için önemlidir.

MD simülasyonlarındaki metodolojik gelişmeler, bunların uygulanabilirliğini ve doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Gelişmiş örnekleme ve hedefli MD gibi teknikler, özellikle zaman ölçekleri ve konformasyonel örnekleme açısından geleneksel MD simülasyonlarıyla ilişkili sınırlamaların üstesinden gelmek için geliştirilmiştir (Ammerman ve ark., 2021). Çoklu ilaç çıkış pompalarının konformasyonel değişikliklerini modellemek için hedefli MD teknikleri kullanılmış ve bu da taşıma dinamikleri hakkında içgörü sağlamıştır (Ammerman ve ark., 2021). Ayrıca, makine öğrenimi yaklaşımlarının MD simülasyonları ile entegrasyonu, örnekleme verimliliğini ve tahmin yeteneklerini geliştirmek için umut verici bir yol olarak ortaya çıkmaktadır (Riniker ve ark., 2019).

Büyük ölçekli MD simülasyonları için gereken hesaplama gücü de önemli gelişmeler göstermiş ve milyonlarca atomdan oluşan sistemlerin uzun zaman ölçeklerinde simülasyonunu mümkün kılmıştır. Bu kabiliyet, karmaşık biyolojik sistemlerin büyük ölçekli simülasyonlarını gerçekleştirmek için GPU hızlandırmalı moleküler simülasyon araç setlerini kullanan Zhu ve ark. (2013) çalışmasıyla örneklendirilmiştir. MD simülasyonlarının ölçeklenebilirliği, giderek karmaşılaşan moleküler sistemlerin ortaya çıkardığı zorlukların üstesinden gelmek için çok önemlidir ve araştırmacıların daha önce

hesaplama sınırlamaları nedeniyle erişilemeyen fenomenleri keşfetmelerine olanak tanır. Ayrıca, ilaç keşfi ve geliştirilmesinde MD simülasyonlarının uygulanması önemli bir ilgi görmüştür. Araştırmacılar, potansiyel ilaç adayları ve biyolojik hedefleri arasındaki etkileşimleri simüle ederek, bağlanma yakınlıkları, konformasyonel değişiklikler ve ilaç-reseptör etkileşimlerinin genel dinamikleri hakkında bilgi edinebilirler (Nair & Miners, 2014). Bu etkileşimleri atomik düzeyde görselleştirme yeteneği, yeni terapötiklerin rasyonel tasarımını geliştirir ve öncü bileşiklerin optimizasyonunu kolaylaştırır.

Moleküler dinamik simülasyonları, modern hesaplamalı bilimin temel taşlarından birini temsil etmekte ve çeşitli alanlardaki moleküler sistemlerin dinamik davranışları hakkında benzersiz bilgiler sağlamaktadır. MD simülasyonlarının deneysel tekniklerle entegrasyonu, hesaplama metodolojilerindeki gelişmeler ve makine öğrenimi yaklaşımlarının uygulanması, araştırmacıların giderek daha karmaşık hale gelen biyolojik ve malzeme bilimi zorluklarının üstesinden gelmelerini sağlayarak alanı ileriye taşımaktadır. Hesaplama kaynakları genişlemeye devam ettikçe, MD simülasyonlarının yeni moleküler içgörülerini ortaya çıkarma ve ilaç keşfi ve malzeme tasarımında yeniliği teşvik etme potansiyeli de artacaktır.

4.2. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), yapıların ve malzemelerin çeşitli koşullar altındaki davranışlarını analiz etmek için mühendislik ve uygulamalı bilimlerde yaygın olarak kullanılan güçlü bir hesaplama tekniğidir. Karmaşık geometrileri daha basit, yönetilebilir elemanlara ayırarak, FEA fiziksel olayları yöneten diferansiyel denklemlerin sayısal çözümüne izin verir. Bu yöntem, mühendislerin ve bilim insanlarının yapısal mekanik, akışkan dinamiği, ısı transferi ve diğer birçok alandaki sorunlara yaklaşım biçiminde devrim yaratmıştır.

SEA'nın temeli, 1950'lerde geliştirilen ve o zamandan beri gerçek dünyadaki fiziksel sistemleri simüle etmek için sofistike bir araca dönüşen sonlu elemanlar yönteminde (FEM) yatmaktadır. Süreç, geometrik bir modelin oluşturulmasıyla başlar ve bu model daha sonra sonlu elemanlardan oluşan bir ağı bölünür. Her bir eleman kendi malzeme özellikleri ve davranışı ile karakterize edilir ve uygulanan yükler altında stres, gerilme ve deformasyonun ayrıntılı bir analizine olanak tanır. Ahmad ve ark. (2014), FEM'in özellikle karmaşık modellerdeki stres dağılımlarını tahmin etmede etkili olduğunu ve mühendislik tasarımı ve analizinde önemli bir araç haline geldiğini vurgulamaktadır.

Son yıllarda FEA makine, inşaat ve havacılık mühendisliği de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmuştur. Özdemir ve Hartomacıoğlu (2022), bir elektromanyetik kavramanın sonlu elemanlar analizini gerçekleştirerek yöntemin doğrusal olmayan malzemeleri ve karmaşık geometrileri ele alma kabiliyetini göstermiştir. Bu çok yönlülük, basit yapılardan karmaşık montajlara kadar çok çeşitli mühendislik problemlerine uygulanmasına olanak tanıyan FEA'nın ayırt edici özelliğidir.

FEA'da kabuk elemanlarının kullanımı da özellikle ağı yapıların analizinde önem kazanmıştır. Selhorst ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada kabuk elemanlarının ince duvarlı yapıları modellemek için avantajlı olduğunu, çünkü hesaplama maliyetlerini düşürürken eğilme ve membran etkilerini verimli bir şekilde yakalayabildiklerini vurgulamaktadır. Bu özellik, ağırlık azaltma ve yapısal bütünlüğün çok önemli olduğu havacılık ve otomotiv mühendisliği gibi alanlarda çok önemlidir.

FEA statik analizle sınırlı değildir; dinamik simülasyonlarda da aynı derecede beceriklidir. Kim (2019),

FEA'da elektromanyetik kuvvetlerin hesaplanmasını tartışmakta ve yöntemin zamanla değişen yükleri içeren geçici problemlere nasıl uygulanabileceğini göstermektedir. FEA'nın bu dinamik yönü, sismik olaylar veya makinelerdeki operasyonel yükler sırasında yaşananlar gibi dalgalanan kuvvetlere maruz kalan yapıların davranışını anlamak için gereklidir. FEA uygulaması, Lu ve ark. (2017) yaptıkları çalışmadaki gerilim altındaki göbek kabloları üzerine yaptıkları çalışmada gösterdikleri gibi kompozit malzemelerin analizine kadar uzanmaktadır. Kompozit malzemelerin doğrusal olmayan özellikleri FEA kullanılarak etkili bir şekilde modellenabilir ve çeşitli yükleme koşulları altında performansın doğru tahmin edilmesine olanak tanır. Bu yetenek, kompozit malzemelerin yüksek mukavemet-ağırlık oranları nedeniyle giderek daha fazla kullanıldığı havacılık ve otomotiv gibi endüstrilerde özellikle değerlidir.

Tıp alanında, FEA biyolojik yapıların biyomekaniğinin anlaşılmasında etkili olmuştur. Shaw ve ark. (2004), ortodontik kuvvetlerin diş yapıları üzerinde oluşturduğu mekanik stresi analiz etmek için sonlu elemanlar modellemesini kullanmış ve çeşitli tedavi yöntemlerinin etkileri hakkında bilgi sağlamıştır. Bu uygulama, klinik sonuçları iyileştirmek için mühendislik ve biyolojik bilimler arasında köprü kuran FEA'nın disiplinler arası doğasının altını çizmektedir.

Sac metal şekillendirmede derin çekme işlemi, FEA'nın faydalı olduğu kanıtlanmış bir başka alandır. Kantikar ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada derin çekme sırasında deformasyon sürecini analiz etmek için FEA'yı kullanarak, yöntemin malzeme davranışını nasıl tahmin edebileceğini ve üretim süreçlerini nasıl optimize edebileceğini göstermiştir. Bu öngörü yeteneği, imalat endüstrilerinde üretim verimliliğini ve ürün kalitesini artırmak için çok önemlidir. Ayrıca, FEA kirişler ve çerçeveler gibi yapısal bileşenlerin analizinde yaygın olarak benimsenmiştir. Zuo ve ark. (2014), prefabrike elemanlardan oluşan mobil

kulelerin sonlu eleman analizini inceleyerek, güvenlik standartlarına ve performans gereksinimlerine uygunluğu sağlamak için FEA'nın nasıl kullanılabileceğini göstermiştir. Bu uygulama özellikle yapısal bütünlüğün kritik olduğu inşaat ve inşaat mühendisliği ile ilgilidir.

FEA'nın hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) gibi diğer hesaplama teknikleriyle entegrasyonu, uygulanabilirliğini daha da genişletmiştir. Erdemir ve ark. (2012), akışkanlar ve yapılar arasındaki karmaşık etkileşimleri simüle etmedeki rolünü vurgulayarak biyomekanikte FEA'nın önemini tartışmaktadır. Bu disiplinler arası yaklaşım, vasküler sistemlerdeki kan akışı veya aerodinamik yüzeyler etrafındaki hava akışı gibi olayların anlaşılmasını geliştirmektedir.

Hesaplama gücü artmaya devam ettikçe, FEA modellerinin karmaşıklığı da artmıştır. Uyarlanabilir ağ oluşturma ve çok ölçekli modelleme gibi gelişmiş teknikler, karmaşık sistemlerin daha doğru simülasyonlarına olanak tanımaktadır. Özcan ve Ersoy (2021), modern mühendislik uygulamalarında doğru modellemenin önemini vurgulayarak, 3D veriler kullanarak araç yapılarını analiz etmek için FEA uygulamasını göstermiştir. Daha sofistike modelleme tekniklerine yönelik bu eğilim, giderek daha karmaşık hale gelen mühendislik sorunlarının ortaya çıkardığı zorlukların üstesinden gelmek için gereklidir.

Yapı mühendisliği alanında FEA, betonarme yapıların performansını değerlendirmek için standart bir araç haline gelmiştir. Halahla (2018), betonarme kirişlerin davranışı üzerine yaptığı çalışma, çeşitli yükleme koşulları altında yapısal bileşenlerin tepkisini değerlendirmek için FEA'nın nasıl kullanılabileceğini göstermektedir. Bu yetenek, altyapı projelerinin güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamak için hayati önem taşımaktadır. FEA'nın çok yönlülüğü, nanoteknoloji araştırmalarına uygulanmasında da gösterilmiştir. Chandran

(2021), nanoyapıların mekanik özelliklerinin anlaşılmasında FEA'nın rolünü vurgulayarak malzeme bilimi ve biyoteknoloji gibi gelişmekte olan alanlarla ilgisini ortaya koymaktadır. FEA'nın farklı ölçeklere ve alanlara uyarlanabilirliği, bir hesaplama aracı olarak öneminin altını çizmektedir.

Birçok avantajına rağmen, FEA sınırlamalardan yoksun değildir. FEA sonuçlarının doğruluğu büyük ölçüde ağın kalitesine ve kullanılan malzeme modellerine bağlıdır. Dutt (2015), sonlu elemanlar analizinin doğruluğunun belirlenmesinde ağ boyutunun kritik rolünü vurgulayarak, daha ince ağların genellikle daha doğru sonuçlar verdiğini, ancak hesaplama süresinin artması pahasına olduğunu belirtmektedir. Doğruluk ve hesaplama verimliliği arasındaki bu değiş tokuş, FEA uygulamalarında önemli bir husustur.

Sonlu Elemanlar Analizi, karmaşık sistemlerin simülasyonu ve analizi için sağlam bir çerçeve sağlayan modern mühendislik ve uygulamalı bilimlerin temel taşıdır. Çok yönlülüğü, uyarlanabilirliği ve doğrusal olmayan malzemeleri ele alma yeteneği, onu çeşitli disiplinlerde paha biçilmez bir araç haline getirmektedir. Hesaplama kaynakları gelişmeye devam ettikçe, FEA'nın giderek daha karmaşık hale gelen mühendislik zorluklarını ele alma potansiyeli artacak ve mühendislik araç setinin temel bir bileşeni olarak rolünü güçlendirecektir.

4.3. Monte Carlo Simülasyonları

Monte Carlo simülasyonları (MCS), doğası gereği deterministik olabilen karmaşık problemler için sayısal sonuçlar elde etmek amacıyla rastgele örnekleme kullanan güçlü bir hesaplama tekniğidir. Bu yöntem özellikle analitik çözümlerin genellikle pratik olmadığı veya türetilmesinin imkânsız olduğu fizik, finans, mühendislik ve malzeme bilimi gibi alanlarda kullanışlıdır. Monte Carlo yöntemlerinin çok yönlülüğü, finasta

risk değerlendirmesinden istatistiksel mekanikte fiziksel sistemlerin modellenmesine kadar geniş bir senaryo yelpazesinde uygulanmasına olanak tanır.

Monte Carlo simülasyonlarının temel ilkelerinden biri, belirli bir sürecin olası sonuçlarını keşfetmek için rastgele örneklemeye dayanmasıdır. Bu yaklaşım özellikle belirsizlik veya değişkenlik ile karakterize edilen sistemlerle uğraşırken etkilidir. Finansal modellemede Monte Carlo simülasyonları, bir dizi olası piyasa koşulunu ve bunların varlık fiyatları üzerindeki etkilerini simüle ederek yatırımların gelecekteki değerini tahmin etmek için kullanılabilir (Ding & Li, 2009). Bu yöntemin esnekliği, çeşitli olasılık dağılımlarının dahil edilmesine olanak tanıyarak karmaşık finansal araçların modellenmesi ve bunlarla ilişkili risklerin değerlendirilmesi için uygun hale getirmektedir (Mehrdoust ve ark., 2014).

Fizik alanında, Monte Carlo simülasyonları parçacık etkileşimlerini ve taşıma olaylarını incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Popescu ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada radyoterapi ışınları için mutlak doz dağılımlarının hesaplanmasında Monte Carlo yöntemlerinin uygulanmasını göstermekte ve medikal fizikteki önemini vurgulamaktadır. Benzer şekilde, biyolojik dokularda foton göçünün modellenmesinde Monte Carlo simülasyonlarının kullanılması, dokuların optik özellikleri hakkında değerli bilgiler sağlayarak teşhis ve tedavi tekniklerinin geliştirilmesine yardımcı olmuştur (Palmer & Ramanujam, 2006). Bu uygulamalar, karmaşık fiziksel sistemleri anlamamızı ilerletmede Monte Carlo yöntemlerinin öneminin altını çizmektedir.

Monte Carlo simülasyonlarının hesaplama verimliliği, varyans azaltma yöntemleri ve paralel işleme dahil olmak üzere çeşitli tekniklerle geliştirilmiştir. Akarsu ve Özbaş (2005) tarafından yapılan çalışma, Monte Carlo simülasyonlarının yarı

iletken cihazlardaki elektron dinamiklerini analiz etmek için nasıl kullanılabileceğini göstermekte ve yöntemin doğrudan gözlemlenmesi zor olan karmaşık fiziksel süreçleri ele alma yeteneğini vurgulamaktadır. Maigne ve ark. (2004) tarafından tartışıldığı üzere Monte Carlo simülasyonlarının paralelleştirilmesi, büyük ölçekli simülasyonların verimli bir şekilde yürütülmesine olanak tanıyarak hesaplama süresini önemli ölçüde azaltır ve daha karmaşık sistemlerin analiz edilmesini sağlar.

Monte Carlo simülasyonları, malzemelerin özelliklerini atomik düzeyde araştırmak için malzeme biliminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kholili ve ark. (2022) tarafından yürütülen araştırma, kuantum harmonik ve anharmonik osilatörleri incelemek için Monte Carlo yöntemlerinin uygulanmasını araştırmakta ve karmaşık kuantum sistemlerini çözmedeki etkinliğini göstermektedir. Shen ve Wang (2010) yapılan çalışma, Monte Carlo simülasyonlarının optik simülasyonlarda kullanımını vurgulamakta ve malzemelerle ışık etkileşimlerini modelleme yeteneklerini göstermektedir. Bu çalışmalar, Monte Carlo yöntemlerinin çeşitli bilimsel zorlukları ele almadaki çok yönlülüğünü göstermektedir.

Monte Carlo simülasyonları, fizik ve finans alanlarındaki uygulamalarına ek olarak, mühendislik disiplinlerinde, özellikle de güvenilirlik analizi ve risk değerlendirmesinde faydalı olmuştur. Kairn ve ark. (2009) çalışması, Monte Carlo simülasyonlarının doz dağılımlarını tahmin etmede ve tedavi doğruluğunu sağlamada çok önemli bir rol oynadığı radyoterapide geri saçılan radyasyonu anlamının önemini vurgulamaktadır. Benzer şekilde, Prakash ve ark. (2012) çalışması, Monte Carlo yöntemlerinin hizmet kalitesi için senaryo planlamasında uygulanmasını göstermekte ve stratejik karar alma süreçlerindeki önemini vurgulamaktadır. Bu örnekler, Monte Carlo simülasyonlarının çeşitli mühendislik

alanlarında geniş çaplı uygulanabilirliğinin altını çizmektedir. Ayrıca, Monte Carlo yöntemlerinin makine öğrenimi ve optimizasyon algoritmaları gibi diğer hesaplama teknikleriyle entegrasyonu, araştırma ve uygulama için yeni yollar açmıştır. Liu ve Ramanujam (2007) tarafından yapılan çalışma, dağınık yansıma hesaplaması için bir ölçeklendirme Monte Carlo yöntemi sunarak Monte Carlo tekniklerinin karmaşık simülasyonlarda hesaplama verimliliğini artırmak için nasıl uyarlanabileceğini göstermektedir. Metodolojilerin bu entegrasyonu, Monte Carlo simülasyonlarının bilimsel araştırmalarda çok yönlü bir araç olarak süregelen evrimini yansıtmaktadır.

Birçok avantajına rağmen Monte Carlo simülasyonları sınırlamalardan yoksun değildir. Monte Carlo yöntemlerinden elde edilen sonuçların doğruluğu büyük ölçüde simülasyonlarda kullanılan örnek sayısına bağlıdır. Dufek ve Mickus (2021) tarafından vurgulandığı gibi, simüle edilen nötron geçmişlerinin sayısı gibi parametrelerin optimize edilmesi Monte Carlo yanma simülasyonlarının verimliliğini önemli ölçüde artırabilir. Dikkatli parametre seçimine duyulan bu ihtiyaç, Monte Carlo yöntemlerini yöneten temel istatistiksel ilkeleri anlamının önemini vurgulamaktadır.

Monte Carlo simülasyonları fizik, finans, mühendislik ve malzeme bilimi de dahil olmak üzere çok çeşitli alanlarda uygulama alanı bulan güçlü ve esnek bir hesaplama aracıdır. Belirsizlik ve değişkenlik ile karakterize edilen karmaşık sistemleri modelleme yetenekleri, onları hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için paha biçilmez kılmaktadır. Hesaplama kaynakları gelişmeye devam ettikçe, Monte Carlo simülasyonlarının giderek daha karmaşık sorunları ele alma potansiyeli artacak ve modern bilimsel araştırmanın temel bir bileşeni olarak rollerini sağlamlaştıracaktır.

4.4. Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT)

Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT), çok cisimli sistemlerin elektronik yapısını anlamak için bir çerçeve sağlayarak modern hesaplamalı kimya ve malzeme biliminin temel taşı haline gelmiştir. DFT, bir kuantum sisteminin özelliklerinin dalga fonksiyonu yerine elektron yoğunluğu ile belirlenebileceği ilkesine dayanır ve hesaplamaları önemli ölçüde basitleştirir. Dalga fonksiyonuna dayalı yöntemlerden yoğunluğa dayalı yaklaşımlara geçiş, araştırmacıların kimya, fizik ve malzeme bilimindeki karmaşık sorunları daha yüksek verimlilik ve doğrulukla ele almalarını sağlamıştır.

DFT'nin teorik temeli, teorinin temelini oluşturan iki temel teoremi ortaya koyan Hohenberg ve Kohn'un ufuk açıcı çalışmalarıyla atılmıştır. İlk teorem, çok elektronlu bir sistemin temel durum özelliklerinin elektron yoğunluğu tarafından benzersiz bir şekilde belirlendiğini belirtirken, ikinci teorem enerji fonksiyoneli için bir varyasyon prensibi sağlar (Miranda & Buen, 2016). Bu ilkeler, DFT'nin atomlar, moleküller ve katılar da dahil olmak üzere çok çeşitli sistemlere uygulanabilirliğini genişleten çeşitli yaklaşımların ve hesaplama yöntemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır.

DFT'nin en yaygın kullanılan formülasyonlarından biri, etkileşen sistemle aynı elektron yoğunluğunu veren bir dizi etkileşmeyen parçacığı tanıtan Kohn-Sham (KS) yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, KS denklemlerini çözmek için standart kuantum mekaniksel tekniklerin kullanılmasına izin vererek DFT'yi büyük sistemler için hesaplama açısından uygulanabilir hale getirir (Helgaker & Teale, 2022). KS formülasyonunun başarısı, moleküler geometrilerin tahmin edilmesinden reaksiyon mekanizmalarının incelenmesine kadar çok sayıda uygulamada benimsenmesine yol açmıştır.

DFT hesaplamalarının doğruluğu, elektron-elektron etkileşimlerinin etkilerine yaklaşan değişim-korelasyon fonksiyonelinin seçiminden büyük ölçüde etkilenir. Yerel yoğunluk yaklaşımlarından (LDA) daha sofistike genelleştirilmiş gradyan yaklaşımlarına (GGA) ve tam değişimi içeren hibrit fonksiyonellere kadar çeşitli fonksiyoneller geliştirilmiştir (Mazziotti, 2000). Her fonksiyonelin güçlü ve zayıf yönleri vardır ve seçim genellikle araştırılan belirli özelliklere bağlıdır. LDA hesaplama açısından verimli olsa da, geçiş metal kompleksleri gibi önemli elektron korelasyonuna sahip sistemleri doğru bir şekilde tanımlayamayabilir (Maitra ve ark., 2010).

Temel hal özelliklerine ek olarak DFT, zamana bağlı yoğunluk fonksiyonel teorisi (TDDFT) aracılığıyla uyarılmış halleri tanımlamak için genişletilmiştir. Bu genişletme, uyarma enerjilerinin hesaplanmasına ve elektron transferi ve fotokimyasal reaksiyonlar gibi dinamik süreçlerin incelenmesine olanak sağlar (Chen ve Friessecke, 2015). TDDFT, doğruluk ve hesaplama maliyeti arasındaki dengesi nedeniyle popülerlik kazanmış ve uyarılmış durum fenomenlerinin çalışılmasında değerli bir araç haline gelmiştir.

DFT'nin çok yönlülüğü, katıların ve yüzeylerin elektronik özelliklerini araştırmak için kullanıldığı malzeme bilimi de dahil olmak üzere çeşitli alanlara uzanmaktadır. Örneğin, DFT hesaplamaları grafen ve diğer iki boyutlu malzemelerin davranışlarının anlaşılmasında etkili olmuş, elektronik bant yapıları ve nanoelektronikteki potansiyel uygulamaları hakkında bilgiler sağlamıştır (Papenbrock & Bhattacharyya, 2007). Karmaşık malzemeleri atomik düzeyde modelleme yeteneği, DFT'yi özel özelliklere sahip yeni malzemelerin tasarımında önemli bir araç haline getirmiştir. Ayrıca DFT, özellikle elektrokataliz alanında katalitik süreçleri incelemek için başarıyla uygulanmıştır. Araştırmacılar, katalizörlerin elektronik yapısı ile reaktiviteleri arasındaki ilişkiyi keşfetmek için DFT'yi kullanarak

daha verimli katalitik sistemlerin tasarımına yardımcı olmuştur (Lutsko & Schoonen, 2020). DFT, reaktanların ve ara ürünlerin adsorpsiyon enerjilerini hesaplayarak katalizör performansını optimize etmek için değerli bilgiler sağlar.

DFT'nin moleküler dinamikler (MD) ve Monte Carlo simülasyonları gibi diğer hesaplama teknikleriyle entegrasyonu, uygulanabilirliğini daha da artırmıştır. Örneğin, DFT'nin MD ile birleştirilmesi, malzemelerde sıcaklığa bağlı özelliklerin ve dinamik süreçlerin incelenmesine izin verirken, Monte Carlo yöntemleri faz davranışını ve termodinamik özellikleri keşfetmek için kullanılabilir (Kreibich & Gross, 2001). Farklı hesaplama yaklaşımları arasındaki bu sinerji, araştırmacıların malzemelerin ve davranışlarının çok yönlü bir şekilde anlaşılmasını gerektiren karmaşık problemlerin üstesinden gelmelerini sağlar.

Birçok avantajına rağmen, DFT'nin sınırlamaları da yok değildir. Önemli zorluklardan biri, geleneksel fonksiyonellerin doğru sonuçlar vermede başarısız olabileceği güçlü elektron korelasyonuna sahip sistemlerin ele alınmasıdır. Bu sorunu ele almak için araştırmacılar, korelasyonlu sistemler için DFT hesaplamalarının doğruluğunu artırmayı amaçlayan hibrit fonksiyoneller ve post-DFT düzeltmeleri gibi gelişmiş yöntemler geliştirmişlerdir (Park ve ark., 2015). Ayrıca, yerel olmayan etkileri ve diğer gelişmiş özellikleri içeren yeni fonksiyonellerin geliştirilmesi aktif bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir.

Hesaplama gücü ve algoritmik verimlilikte süregelen gelişmeler de DFT uygulamalarının büyümesine katkıda bulunmuştur. Yüksek performanslı hesaplama kaynakları, daha büyük sistemlerin ve daha karmaşık olayların simülasyonunu mümkün kılarak DFT'nin kapsamını biyomoleküler sistemleri ve karmaşık malzemeleri içerecek şekilde genişletmektedir (Lewin

ve ark., 2020). Hesaplama teknikleri gelişmeye devam ettikçe, DFT'nin yeni bilimsel zorluklara ilişkin içgörü sağlama potansiyeli de artacaktır.

Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi, hesaplamalı kimya ve malzeme biliminde temel bir araç olarak kendini kanıtlamıştır. Hesaplama verimliliğini korurken elektronik yapının doğru tahminlerini sağlama yeteneği, onu çeşitli disiplinlerdeki araştırmacılar için vazgeçilmez hale getirmiştir. Alan ilerlemeye devam ettikçe, yeni fonksiyonellerin geliştirilmesi, diğer hesaplama yöntemleriyle entegrasyon ve hesaplama kaynaklarındaki iyileştirmeler, DFT'nin yeteneklerini daha da artıracak ve giderek daha karmaşık sistemlerin ve olayların araştırılmasına olanak sağlayacaktır.

4.5. Çok Ölçekli Modelleme

Çok ölçekli modelleme (MSM), karmaşık sistemlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için farklı uzamsal ve zamansal ölçeklerdeki bilgileri entegre eden bir hesaplama yaklaşımıdır. Bu metodoloji özellikle malzeme bilimi, biyoloji, mühendislik ve çevre bilimi gibi, bir ölçekteki olguların başka bir ölçekteki davranışları önemli ölçüde etkileyebildiği alanlarda değerlidir. Araştırmacılar bu ölçekler arasında köprü kurarak, genellikle tek ölçekli modellerle ulaşılamayan içgörüler elde edebilirler.

Çok ölçekli modellemede karşılaşılan başlıca zorluklardan biri, modellerin farklı ölçeklerde doğrulanmasıdır. Pearce ve Kaczmarczyk (2011), mikro ölçekteki etkileşimlerin makro ölçekteki özellikleri etkileyebildiği heterojen malzemeler için sağlam bir doğrulama çerçevesi oluşturmanın önemini vurgulamaktadır. Bu doğrulama zorluğu kritiktir çünkü ölçekler arasındaki tutarsızlıklar yanlış tahminlere yol açarak modelin güvenilirliğini zayıflatır. Araştırmacılar ince ölçekli heterojenliklerin tam olarak çözülmesini sağlayarak bu

zorlukların üstesinden gelen ve böylece genel modelin doğruluğunu artıran sayısal birçok ölçekli modelleme stratejisi önermektedir.

Risk değerlendirmesi bağlamında, çok ölçekli modelleme çoklu tehlike senaryolarını analiz etmek için etkili bir şekilde uygulanmıştır. Paulik ve ark. (2022), bireysel maruziyetleri etkileyen birden fazla tehlikenin eşzamanlı veya sıralı analizine olanak tanıyan RiskScape modelleme motorunu tanımlamaktadır. Bu özellik, sel, deprem ve toprak kayması gibi çeşitli tehlikelerin altyapı ve topluluklar üzerindeki kümülatif etkilerini anlamak için çok önemlidir. RiskScape, jeo-uzamsal analizi çoklu tehlike risk modellemesiyle entegre ederek afet yönetimi ve kentsel planlamada bilinçli karar vermeyi desteklemektedir.

İşbirliğine dayalı çok ölçekli modelleme, özellikle kentsel planlama ve altyapı geliştirme alanlarında gelişmekte olan bir diğer alandır. Breunig ve ark. (2017), artırılmış ve sanal gerçeklik teknolojilerindeki ilerlemelerle geliştirilebilecek 3B şehir modellerinin iş birliğine dayalı olarak geliştirilmesini kolaylaştıran çerçevelere duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. Bu tür işbirlikçi yaklaşımlar, paydaşların kentsel ortamları birden fazla ölçekte görselleştirmesini ve analiz etmesini sağlayarak daha iyi iletişimi ve daha etkili planlama süreçlerini teşvik eder.

Malzeme biliminde, çok ölçekli modelleme, karmaşık malzemelerin çeşitli koşullar altındaki davranışlarının anlaşılmasında etkili olmuştur. Ge ve ark. (2023), çok ölçekli yapısal mühendislik yoluyla PdCu/C katalizörlerinin elektrokatalitik performansını artırmada süperkritik CO₂'nin rolünü araştırmaktadır. Bulguları, nano ölçekteki modifikasyonların makro ölçekteki malzemelerin performansını nasıl önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermekte ve malzeme tasarımında farklı ölçeklerin birbirine bağlılığını vurgulamaktadır.

Çok ölçekli simülasyonların üretim mühendisliğine entegrasyonu da giderek ilgi görmektedir. Hürkamp ve ark. (2020), çok ölçekli simülasyonların, özellikle Entegre Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği (ICME) bağlamında, ürünlerin ve üretim süreçlerinin farklı ölçeklerindeki etkileri nasıl yakalayabileceğini tartışmaktadır. Bu yaklaşım, işleme sırasındaki mikroyapısal değişikliklerin malzemelerin nihai özelliklerini nasıl etkileyebileceğinin daha bütünsel bir şekilde anlaşılmasını ve böylece üretim tekniklerinin optimize edilmesini sağlar.

Zhu'nun çok ölçekli açıklanabilir derin öğrenme üzerine çalışması, genler, yollar ve biyolojik süreçler arasındaki etkileşimlerin çeşitli ölçeklerde modellendiği biyolojik sistemlerde çok ölçekli modellemenin uygulanmasını göstermektedir (Zhu, 2024). Graf sinir ağlarını kullanan bu yaklaşım, gen ifadesi verilerine dayalı olarak hücre tiplerinin tanımlanmasını sağlayarak, karmaşık biyolojik sistemlere ilişkin anlayışımızı geliştirmede çok ölçekli modellemenin potansiyelini ortaya koymaktadır. Chopard ve ark. (2014), çok ölçekli modelleme metodolojilerine kapsamlı bir genel bakış sunarak, araştırma çabalarında fazlalıktan kaçınmak için standartlaştırılmış yaklaşımlara duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. Çok ölçekli modelleme için daha birleşik bir çerçevenin farklı bilimsel topluluklar arasında iş birliğini kolaylaştırabileceğini ve sonuçta daha verimli ve etkili modelleme uygulamalarına yol açabileceğini savunmaktadırlar.

Çok ölçekli modelleme uygulaması akışkanlar dinamiği ve çevre bilimine de uzanmaktadır. Hu ve arkadaşları, karmaşık sistemlerde geçici hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizi ile ilgili zorlukları ele alan çok ölçekli tek fazlı akış bağlantısı için bir strateji önermektedir (Hu ve ark., 2013). Bu yaklaşım, özellikle sistem tasarımı ve optimizasyonu için çoklu

ölçeklerde akışkan davranışını anlamının gerekli olduğu mühendislik uygulamaları için önemlidir.

Çok ölçekli modelleme, yapısal bütünlük ve malzeme performansı çalışmalarında da çok önemlidir. Zhao ve Qu (2014), sismik uyarım altında çelik çerçeve kaynaklı bağlantıların elastoplastik dinamik analizine odaklanarak, çok ölçekli yaklaşımların aşırı olaylar sırasında yapısal davranışın anlaşılmasını nasıl geliştirebileceğini göstermektedir. Bulguları, yapısal performansı doğru bir şekilde tahmin etmek için farklı ölçekler arasındaki etkileşimleri dikkate almanın önemini vurgulamaktadır.

Biyolojik sistemler alanında, kalp kapakçıklarının mekanik davranışını anlamak için çok ölçekli modelleme uygulanmıştır. Sodhani ve ark. (2016), tekstil takviyeli yapay tübüler aort kalp kapakçıklarının çok ölçekli modellemesini araştırarak biyolojik dokuların çeşitli ölçeklerdeki karmaşıklıklarını ele almıştır. Bu araştırma, doğal yapıları taklit eden tıbbi cihazların tasarımını bilgilendirmek için çok ölçekli modellemenin potansiyelini vurgulamaktadır.

Çok ölçekli modellemenin sistem biyolojisine entegrasyonu, gelecek vaat eden bir başka araştırma alanıdır. Dada ve Mendes (2011), biyolojik sistemlerin karmaşıklığını yakalamak için farklı ölçekleri birbirine bağlamanın önemini vurgulayarak sistem biyolojisinde çok ölçekli problemleri çözmek için çeşitli yöntemleri gözden geçirmektedir. Onların görüşleri, biyolojik araştırmalarda daha doğru ve öngörücü modellerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Çok ölçekli modelleme, çeşitli alanlardaki karmaşık sistemleri anlamak için güçlü bir yaklaşımı temsil etmektedir. Araştırmacılar, farklı ölçeklerden gelen bilgileri entegre ederek, genellikle tek ölçekli modellerle elde edilemeyen içgörüler elde edebilirler. Çok ölçekli modelleme için metodolojilerin,

çerçevelerin ve hesaplama araçlarının sürekli olarak geliştirilmesi, karmaşık bilimsel zorlukların üstesinden gelme yeteneğimizi artırmaya devam edecek ve sonuçta malzeme bilimi, biyoloji, mühendislik ve çevre biliminde ilerlemelere yol açacaktır.

4.6. Makine Öğrenimi ve Veri Tabanlı Yaklaşımlar

Makine öğrenimi (ML) ve veri odaklı yaklaşımlar tıp, mühendislik ve telekomünikasyon dahil olmak üzere çeşitli alanlarda çok önemli hale gelmiştir. Bu metodolojiler, karmaşık veri kümelerini analiz etmek ve yorumlamak için algoritmalar ve istatistiksel modellerden yararlanarak tahmine dayalı analitik ve otomatik karar verme süreçleri sağlar. Makine öğreniminin evrimi, her biri farklı amaçlara ve uygulamalara hizmet eden denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme dahil olmak üzere çeşitli tekniklerin geliştirilmesine yol açmıştır.

Denetimli öğrenme, algoritmaların tahminler veya sınıflandırmalar yapmak için etiketli veri kümeleri üzerinde eğitildiği makine öğreniminde en yaygın kullanılan paradigmalardan biridir. Bu yaklaşım, böbrek patolojilerini tahmin etmek ve kronik hastalıklar için tedavi protokollerini optimize etmek gibi tıbbi uygulamalarda önemli bir umut vaat etmiştir. Makine öğrenimi teknikleri glomerüler hastalıkların prognozunu tahmin etmek için kullanılmış ve hastalığın ilerlemesini ve potansiyel sonuçlarını belirlemedeki faydalarını göstermiştir (Magherini ve ark., 2022). Ayrıca, hemodiyaliz hastalarında anemi gibi durumlara yönelik tedavi stratejilerini optimize etmek için pekiştirmeli öğrenmeden yararlanılmıştır ve bu da makine öğreniminin veriye dayalı içgörüler yoluyla klinik karar verme sürecini geliştirme becerisini ortaya koymaktadır (Escandell-Montero ve ark., 2014).

Öte yandan, denetimsiz öğrenme, etiketlenmemiş verilerdeki örüntüleri keşfetmeye odaklanır. Bu teknik, keşifsel veri analizi için gereklidir ve ağ yönetimi ve üretim süreçlerinde hata tespiti dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulamaları vardır. Optik ağlarda çok sayıda ayarlanabilir parametreden kaynaklanan karmaşıklığı yönetmek için denetimsiz öğrenme algoritmaları kullanılmış, böylece otomatik ağ kendi kendini yapılandırma ve hata yönetimi kolaylaştırılmıştır (Musumeci ve ark., 2019). Ayrıca, makine öğreniminin üretime entegrasyonu, aletle ilgili arızaları doğru bir şekilde tahmin edebilen ve böylece operasyonel verimliliği artıran öngörücü bakım sistemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır (Araghizad, 2023).

Paralel makine öğrenimi algoritmalarının yükselişi, büyük veri kümelerinin birden fazla işlemcide işlenmesine olanak tanıyarak veri analizi ortamını da dönüştürmüştür. Bu yetenek, kuruluşların kapsamlı veri koleksiyonlarından verimli bir şekilde değerli içgörüler elde etmeye çalıştığı günümüzün veri odaklı dünyasında çok önemlidir (Salman ve ark., 2023). Bulut bilişimin ortaya çıkışı, makine öğrenimi uygulamalarının ölçeklenebilirliğini daha da artırarak akıllı üretim ve enerji yönetimi de dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde gerçek zamanlı veri işleme ve analizine olanak sağlamıştır (Wu ve ark., 2018). Ayrıca, makine öğrenimi algoritmalarının sürekli ilerlemesi, model seçimi ve optimizasyon sürecini basitleştiren otomatik makine öğrenimi (AutoML) sistemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu sistemler, sınırlı teknik uzmanlığa sahip kullanıcıların tahmine dayalı modelleri etkili bir şekilde geliştirmesini ve kullanmasını sağlayarak makine öğrenimine erişimi demokratikleştirmektedir (Tjaden, 2023). Makine öğrenimi gelişmeye devam ettikçe, farklı uygulamalarda güvenilir ve doğru sonuçlar elde etmek için algoritma performansı ve veri kalitesiyle ilgili zorlukları ele almak çok önemlidir (Doulah & Islam, 2023).

Makine öğrenimi ve veri odaklı yaklaşımlar, tahmine dayalı analitik sağlayarak, süreçleri optimize ederek ve karar verme yeteneklerini geliştirerek çeşitli sektörleri dönüştürmektedir. Bu teknolojilerin entegrasyonunun, algoritmalar, hesaplama gücü ve veri kullanılabilirliğindeki ilerlemelere bağlı olarak büyümeye devam etmesi beklenmektedir.

5. SONUÇ

Sonuç olarak, simülasyon ve modelleme yöntemleri malzeme biliminin ayrılmaz bir parçasıdır ve araştırmacıların malzemelerin çeşitli koşullar altındaki davranışlarını keşfetmelerini ve tahmin etmelerini sağlar. MD, FEA, Monte Carlo simülasyonları ve DFT'nin bir kombinasyonunu kullanarak, bilim insanları malzeme özellikleri hakkında değerli bilgiler edinebilir ve sonuçta çok çeşitli uygulamalar için gelişmiş malzemelerin tasarlanmasına yol açabilir.

6. KAYNAKÇA

- Ahmad, M. (2018). Importance of modeling and simulation of materials in research. *J. Mod. Sim. Mater.*, 1(1), 1-2. <https://doi.org/10.21467/jmsm.1.1.1-2>
- Ahmad, S., Yeong, C., Su, E., & Tang, S. (2014). Improvement of automated guided vehicle design using finite element analysis. *Applied Mechanics and Materials*, 607, 317-320. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.607.317>
- Akarsu, M. and Özbaş, Ö. (2005). Monte carlo simulation for electron dynamics in semiconductor devices. *Mathematical and Computational Applications*, 10(1), 19-26. <https://doi.org/10.3390/mca10010019>
- Ammerman, L., Mertz, S., Park, C., & Wise, J. (2021). Transport dynamics of mtrd: an rnd multidrug efflux pump from neisseria gonorrhoeae. *Biochemistry*, 60(41), 3098-3113. <https://doi.org/10.1021/acs.biochem.1c00399>
- Araghizad, A. (2023). Smart tool-related faults monitoring system using process simulation-based machine learning algorithms. *Journal of Machine Engineering*, 23(4), 18-32. <https://doi.org/10.36897/jme/174018>
- Breunig, M., Borrmann, A., Rank, E., Hinz, S., Kolbe, T., Schilcher, M., ... & Mazroobsemani, N. (2017). Collaborative multi-scale 3d city and infrastructure modeling and simulation. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W4, 341-352. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-4-w4-341-2017>

- Bruzzese, A., Dalton, J., & Giraldo, J. (2020). Statistics for the analysis of molecular dynamics simulations: providing p values for agonist-dependent gpcr activation. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77072-4>
- Catte, A., White, G., Wilson, M., & Oganessian, V. (2018). Direct prediction of epr spectra from lipid bilayers: understanding structure and dynamics in biological membranes. *Chemphyschem*, 19(17), 2183-2193. <https://doi.org/10.1002/cphc.201800386>
- Chandran, R. (2021). Finite element analysis in nanotechnology research. In *Finite element methods and their applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94590>
- Chen, H. and Friesecke, G. (2015). Pair densities in density functional theory. *Multiscale Modeling and Simulation*, 13(4), 1259-1289. <https://doi.org/10.1137/15m1014024>
- Chopard, B., Borgdorff, J., & Hoekstra, A. (2014). A framework for multi-scale modelling. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 372(2021), 20130378. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0378>
- Dada, J. and Mendes, P. (2011). Multi-scale modelling and simulation in systems biology. *Integrative Biology*, 3(2), 86. <https://doi.org/10.1039/c0ib00075b>
- Díaz, M., Méndez, C., Olmo, C., Vila, C., & Delgado, F. (2022). Numerical and experimental evaluation of dielectric properties of thermally aged insulating paper used in power transformers. In *2022 IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD)* (pp. 809-812). IEEE.

- Ding, Q. and Li, P. (2009). Pricing of Multi-Asset Options Using Monte Carlo Method. In *2009 First International Conference on Information Science and Engineering* (pp. 4405-4408). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/icise.2009.849>
- Doulah, M. and Islam, M. (2023). Performance evaluation of machine learning algorithm in various datasets. *Journal of Artificial Intelligence Machine Learning and Neural Network*, (32), 14-32.
- Dufek, J. and Mickus, I. (2021). Optimisation of monte carlo burnup simulations. *Epj Web of Conferences*, 247, 04016. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124704016>
- Dutt, A. (2015). Effect of mesh size on finite element analysis of beam. *International Journal of Mechanical Engineering*, 2(12), 8-10. <https://doi.org/10.14445/23488360/ijme-v2i12p102>
- Emmerich, H. (2011). Open issues of interface computation at complementary time and length scales. *The European Physical Journal Plus*, 126(10). <https://doi.org/10.1140/epjp/i2011-11093-9>
- Emmerich, H. and Gemming, S. (2009). Advances in the Multi-scale Computational Design of Condensed Matter Interfaces: From the Atomistic to the Continuum Scale. *The European physical journal. Special topics*, 177. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2009-01164-9>
- Erdemir, A., Guess, T., Halloran, J., Tadepalli, S., & Morrison, T. (2012). Considerations for reporting finite element analysis studies in biomechanics. *Journal of Biomechanics*, 45(4), 625-633.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.11.038>

- Escandell-Montero, P., Chermisi, M., Martínez-Martínez, J., Gómez-Sanchís, J., Barbieri, C., Soria-Olivas, E., ... & Martín-Guerrero, J. (2014). Optimization of anemia treatment in hemodialysis patients via reinforcement learning. *Artificial Intelligence in Medicine*, 62(1), 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2014.07.004>
- Ge, T. (2023). Supercritical co2 mediated multi-scale structural engineering in pdcu/c for boosting electrocatalytic formic acid oxidation. *Chemcatchem*, 15(21). <https://doi.org/10.1002/cctc.202300936>
- Guo, Y., Zhu, J., & Zhong, J. (2006). Measurement and modelling of magnetic properties of soft magnetic composite material under 2d vector magnetisations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 302(1), 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.08.023>
- Halahla, A. (2018). Study the behavior of reinforced concrete beam using finite element analysis. In *Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*.
- Havrila, M., Réblová, K., Zirbel, C., Leontis, N., & Šponer, J. (2013). Isosteric and nonisosteric base pairs in rna motifs: molecular dynamics and bioinformatics study of the sarcin-ricin internal loop. *The Journal of Physical Chemistry B*, 117(46), 14302-14319. <https://doi.org/10.1021/jp408530w>
- Helgaker, T. and Teale, A. (2022). Lieb variation principle in density-functional theory. *arXiv preprint arXiv:2204.12216*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2204.12216>

- Hu, R., Thomas, J., & Fanning, T. (2013). *Strategy for Multi-Scale Single-Phase Flow Coupling* (No. ANL/NE-13/4). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States). <https://doi.org/10.2172/1079137>
- Hürkamp, A., Dér, A., Gellrich, S., Ossowski, T., Lorenz, R., Behrens, B., ... & Thiede, S. (2020). Integrated computational product and production engineering for multi-material lightweight structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(9-10), 2551-2571. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05895-6>
- Kairn, T., Crowe, S., Poole, C., & Fielding, A. (2009). Effects of collimator backscatter in an elekta linac by monte carlo simulation. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 32(3), 129-135. <https://doi.org/10.1007/bf03178640>
- Kanttikar, R., Kodli, B., & Chikmeti, R. (2014). Analysis on deformation process in deep drawing of sheet metal part by fem. *Iosr Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(4), 06-16. <https://doi.org/10.9790/1684-11440616>
- Kaufmann, K., Maryanovsky, D., Mellor, W., Zhu, C., Rosengarten, A., Harrington, T., ... & Vecchio, K. (2020). Discovery of high-entropy ceramics via machine learning. *NPJ Computational Materials*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41524-020-0317-6>
- Kayser, R. and Adnan, A. (2018). Grain boundary driven mechanical properties of zrb2 and zrc-zrb2 nanocomposite: a molecular simulation study. *Journal of the American Ceramic Society*, 101(7), 3105-3117. <https://doi.org/10.1111/jace.15443>

- Kholili, M., Rifianti, S., Latifah, E., & Nugraha, A. (2022). Monte carlo simulations for quantum harmonic and anharmonic oscillators within epistemically restricted phase-space representation. *Journal of Physics Conference Series*, 2243(1), 012084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012084>
- Kim, Y. (2019). Electromagnetic force calculation method in finite element analysis for programmers. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 6(2B), 62-67. <https://doi.org/10.13189/ujeee.2019.061406>
- Kreibich, T. and Gross, E. (2001). Multicomponent density-functional theory for electrons and nuclei. *Physical Review Letters*, 86(14), 2984-2987. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.86.2984>
- Krepl, M., Cléry, A., Blatter, M., Allain, F., & Šponer, J. (2016). Synergy between nmr measurements and md simulations of protein/rna complexes: application to the rrms, the most common rna recognition motifs. *Nucleic Acids Research*, 44(13), 6452-6470. <https://doi.org/10.1093/nar/gkw438>
- Lewin, M., Lieb, É., & Seiringer, R. (2020). The local density approximation in density functional theory. *Pure and Applied Analysis*, 2(1), 35-73. <https://doi.org/10.2140/paa.2020.2.35>
- Liu, Q. and Ramanujam, N. (2007) A scaling Monte Carlo method for diffuse reflectance computation from multi-layered media. In *Optical Interactions with Tissue and Cells XVIII* (Vol. 6435, pp. 47-58). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.708574>

- Lu, Q., Chen, J., Yang, Z., chao, Y., & Yue, Q. (2017). Numerical and experimental analysis of umbilical cables under tension. *Advanced Composites Letters*, 26(2). <https://doi.org/10.1177/096369351702600205>
- Lutsko, J. and Schoonen, C. (2020). Classical density-functional theory applied to the solid state. *Physical Review E*, 102(6). <https://doi.org/10.1103/physreve.102.062136>
- Magherini, R., Mussi, E., Volpe, Y., Furferi, R., & Servi, M. (2022). Machine learning for renal pathologies: an updated survey. *Sensors*, 22(13), 4989. <https://doi.org/10.3390/s22134989>
- Maigne, L., Hill, D., Calvat, P., Breton, V., Reuillon, R., Legré, Y., ... & Donnarieix, D. (2004). Parallelization of monte carlo simulations and submission to a grid environment. *Parallel Processing Letters*, 14(02), 177-196. <https://doi.org/10.1142/s0129626404001829>
- Maitra, N., Todorov, T., Woodward, C., & Burke, K. (2010). Density-potential mapping in time-dependent density-functional theory. *Physical Review A*, 81(4). <https://doi.org/10.1103/physreva.81.042525>
- Mazziotti, D. (2000). Geminal functional theory: a synthesis of density and density matrix methods. *The Journal of Chemical Physics*, 112(23), 10125-10130. <https://doi.org/10.1063/1.481653>
- Mehrdoust, F., Fathi, K., & Saber, N. (2014). Accelerated simulation scheme for solving financial problems. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 6(4), 43-48. <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2014.04.05>

- Miranda, D. and Bueno, P. (2016). Density functional theory and an experimentally-designed energy functional of electron density. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(37), 25984-25992. <https://doi.org/10.1039/c6cp01659f>
- Motojima, K., Shiratsuchi, R., Suzuki, K., Aizawa, M., & Kaneko, H. (2023). Machine learning model for predicting the material properties and bone formation rate and direct inverse analysis of the model for new synthesis conditions of bioceramics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(14), 5898-5906. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00332>
- Möller, J., Prakash, A., & Bitzek, E. (2013). Fe2at—finite element informed atomistic simulations. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 21(5), 055011. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/21/5/055011>
- Mustafee, N., Brailsford, S., Djanatljev, A., Eldabi, T., Kunc, M., & Tolk, A. (2017). Purpose and benefits of hybrid simulation: contributing to the convergence of its definition. In *2017 winter simulation conference (WSC)* (pp. 1631-1645). IEEE. <https://doi.org/10.1109/wsc.2017.8247903>
- Musumeci, F., Rottondi, C., Nag, A., Macaluso, I., Zibar, D., Ruffini, M., ... & Tornatore, M. (2019). An overview on application of machine learning techniques in optical networks. *Ieee Communications Surveys & Tutorials*, 21(2), 1383-1408. <https://doi.org/10.1109/comst.2018.2880039>
- Nair, P. and Miners, J. (2014). Molecular dynamics simulations: from structure function relationships to drug discovery. In *Silico Pharmacology*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s40203-014-0004-8>

- Oda, H., Kiyohara, S., & Mizoguchi, T. (2019). Machine learning for structure determination and investigating the structure-property relationships of interfaces. *Journal of Physics Materials*, 2(3), 034005. <https://doi.org/10.1088/2515-7639/ab15c8>
- Ozcan, F. and Ersoy, S. (2021). Analysis of the vehicle: applying finite element method of 3d data. *Mathematical Models in Engineering*, 7(4), 63-69. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22328>
- Özdemir, M. and Hartomacıoğlu, S. (2022). Finite element analysis of electromagnetic clutch. *The European Journal of Research and Development*, 2(2), 475-490. <https://doi.org/10.56038/ejrnd.v2i2.94>
- Palmer, G. and Ramanujam, N. (2006). Monte carlo-based inverse model for calculating tissue optical properties part i: theory and validation on synthetic phantoms. *Applied Optics*, 45(5), 1062. <https://doi.org/10.1364/ao.45.001062>
- Papenbrock, T. and Bhattacharyya, A. (2007). Density-functional theory for the pairing hamiltonian. *Physical Review C*, 75(1). <https://doi.org/10.1103/physrevc.75.014304>
- Park, H., Millis, A., & Marianetti, C. (2015). Density functional versus spin-density functional and the choice of correlated subspace in multivariable effective action theories of electronic structure. *Physical Review B*, 92(3). <https://doi.org/10.1103/physrevb.92.035146>
- Paulik, R., Horspool, N., Woods, R., Griffiths, N., Beale, T., Magill, C., ... & Garlick, R. (2022). Riskscape: a flexible multi-hazard risk modelling engine. *Natural Hazards*, 119(2), 1073-1090. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05593-4>

- Pearce, C. and Kaczmarczyk, Ł. (2011). Multi-scale modeling of heterogeneous materials and the validation challenge. *Applied Mechanics and Materials*, 70, 345-350. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.70.345>
- Popescu, I., Shaw, C., Zavgorodni, S., & Beckham, W. (2005). Absolute dose calculations for monte carlo simulations of radiotherapy beams. *Physics in Medicine and Biology*, 50(14), 3375-3392. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/14/013>
- Powell, J. and Mustafee, N. (2017). Widening requirements capture with soft methods: an investigation of hybrid m&s studies in health care. *Journal of the Operational Research Society*, 68(10), 1211-1222. <https://doi.org/10.1057/s41274-016-0147-6>
- Prakash, A., Jha, S., & Mohanty, R. (2012). Scenario planning for service quality: a monte carlo simulation study. *Journal of Strategy and Management*, 5(3), 331-352. <https://doi.org/10.1108/17554251211247599>
- Ramprasad, R., Batra, R., Pilania, G., Mannodi-Kanakkithodi, A., & Kim, C. (2017). Machine learning in materials informatics: recent applications and prospects. *NPJ Computational Materials*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41524-017-0056-5>
- Riniker, S., Wang, S., Bleiziffer, P., Bösel, L., & Esposito, C. (2019). Machine learning with and for molecular dynamics simulations. *Chimia International Journal for Chemistry*, 73(12), 1024. <https://doi.org/10.2533/chimia.2019.1024>
- Salman, S., Dheyab, S., Salih, Q., & Hammood, W. (2023). Parallel machine learning algorithm. *MJBD*, 12-15. <https://doi.org/10.58496/mjbd/2023/002>

- Selhorst, A., Meyer, R., Costa, T., & Isoldi, L. (2017). Finite element analysis using shell elements on reticulated structures. *Revista Mundi Engenharia Tecnologia E Gestão* (Issn 2525-4782), 2(2). <https://doi.org/10.21575/25254782rmetg2017vol2n2467>
- Shaw, A., Sameshima, G., & Vu, H. (2004). Mechanical stress generated by orthodontic forces on apical root cementum: a finite element model. *Orthodontics and Craniofacial Research*, 7(2), 98-107. <https://doi.org/10.1111/j.1601-6343.2004.00285.x>
- Shen, H. and Wang, G. (2010). A tetrahedron-based inhomogeneous monte carlo optical simulator. *Physics in Medicine and Biology*, 55(4), 947-962. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/55/4/003>
- Siesing, L., Frogner, K., Cedell, T., & Andersson, M. (2016). Investigation of thermal losses in a soft magnetic composite using multiphysics modelling and coupled material properties in an induction heating cell. *Journal of Electromagnetic Analysis and Application*, 08(09), 182-196. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2016.89018>
- Sodhani, D., Reese, S., Moreira, R., Jockenhoevel, S., Mela, P., & Stapleton, S. (2016). Multi-scale modelling of textile reinforced artificial tubular aortic heart valves. *Meccanica*, 52(3), 677-693. <https://doi.org/10.1007/s11012-016-0479-y>
- Šponer, J., Krepl, M., Banáš, P., Kührová, P., Zgarbová, M., Jurečka, P., ... & Otyepka, M. (2016). How to understand atomistic molecular dynamics simulations of RNA and protein–RNA complexes?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: RNA*, 8(3), e1405. <https://doi.org/10.1002/wrna.1405>

- Storchak, M., Stehle, T., & Möhring, H. (2021). Determination of thermal material properties for the numerical simulation of cutting processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(5-6), 1941-1956. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08021-2>
- Taheri, S., Shadman, M., Ahadi, Z., Asgari, F., & Mighani, H. (2014). A molecular dynamics simulation to investigate the thermal properties of swcnt/poly(phenylenesulfone) nanocomposites. *International Nano Letters*, 4(3). <https://doi.org/10.1007/s40089-014-0112-9>
- Tjaden, J. (2023). Mlpronto: a tool for democratizing machine learning. *Plos One*, 18(11), e0294924. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294924>
- Torrens-Fontanals, M., Stepniewski, T., Aranda-García, D., Morales-Pastor, A., Medel-Lacruz, B., & Selent, J. (2020). How do molecular dynamics data complement static structural data of gpcrs. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(16), 5933. <https://doi.org/10.3390/ijms21165933>
- Tsai, P. and Jeng, Y. (2022). A review on mechanical properties of deformation mechanism of tubular nanostructures: molecular dynamics simulations. *Solid State Phenomena*, 329, 79-86. <https://doi.org/10.4028/p-4mm443>
- Uehara, T. (2013). Molecular dynamics simulation of tensile properties of nano-layered materials. *Advanced Materials Research*, 741, 79-83. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.741.79>
- Wang, Z., Li, B., Lin, Q., & Hu, C. (2017). Molecular dynamics simulation on diffusion of five kinds of chemical additives in polypropylene. *Packaging Technology and Science*, 31(5), 277-295. <https://doi.org/10.1002/pts.2314>

- Wu, D., Jennings, C., Terpenney, J., Kumara, S., & Gao, R. (2018). Cloud-based parallel machine learning for tool wear prediction. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(4). <https://doi.org/10.1115/1.4038002>
- Wu, T. (2024). High throughput screening of thermal interface materials by machine learning. *Applied and Computational Engineering*, 61(1), 77-86. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/61/20240930>
- Xia, W., Adeeb, S., & Nadler, B. (2011). Ballistic performance study of fabric armor based on numerical simulations with multiscale material model. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 87(10), 1007-1024. <https://doi.org/10.1002/nme.3152>
- Yang, F., Liu, Y., Ou, L., Wang, X., & Chen, S. (2010). Density functional theory (dft)-based modified embedded atom method potentials: bridging the gap between nanoscale theoretical simulations and dft calculations. *Science China Chemistry*, 53(2), 411-418. <https://doi.org/10.1007/s11426-010-0069-0>
- Zhang, Y. (2023). An Improved Random Forest Magnesium Alloy Prediction Method Based on Particle Swarm Optimization. In *Materials Science Forum*, 1088, 13-18. <https://doi.org/10.4028/p-l251t7>
- Zhao, H., Liu, C., Jiang, S., & Ge, Y. (2019). Molecular dynamics simulation of water molecules absorption by different cations based montmorillonite. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 7(2), 675-679. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v07.103>
- Zhu, J. (2024). Decoding cell identity with multi-scale explainable deep learning. *bioRxiv*, 2024-02. <https://doi.org/10.1101/2024.02.05.578922>

- Zhu, Y., Li, H., Li, Z., Qian, H., Milano, G., & Lu, Z. (2013). Galamost: gpu-accelerated large-scale molecular simulation toolkit. *Journal of Computational Chemistry*, 34(25), 2197-2211. <https://doi.org/10.1002/jcc.23365>
- Zuo, W., Bai, J., & Cheng, F. (2014). Efests: educational finite element software for truss structure. part i: preprocess. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 42(4), 298-306. <https://doi.org/10.1177/0306419015574637>

ZİRKONYA MATRİSLİ HBN İÇEREN KOMPOZİTLER

Zuhal YILMAZ¹

1. GİRİŞ

Zirkonya (ZrO_2), mükemmel mukavemet, kırılma tokluğu, elastik modülü, aşınma direnci, yüksek kimyasal ve korozyon direnci ve ayrıca biyouyumluluk özellikleri nedeniyle işlevsel ve biyomedikal malzemeler olarak geniş kullanım alanına sahiptir (Xu ve diğerleri, 2012). 2000 MPa'lık çok yüksek basınç dayanımı nedeniyle, ZrO_2 farklı mekanik ortamlara dayanabilir (C. Gautam, Joyner, Gautam, Rao ve Vajtai, 2016). Diş, kalça ve diz implantları başta olmak üzere çeşitli biyomalzemeler, kesici uçlar, rulmanlar, zırh malzemeleri, enerji üretiminde, kimya endüstrisinde ve çeşitli makine bileşenleri gibi farklı ileri teknoloji seramik malzemesi olarak kullanım alanına sahiptir (Kulyk ve diğerleri, 2022; Yurdakul, 2023). Ancak, seramiklerin kırılabilirliği, yapısal malzemeler olarak geniş uygulamalarını büyük ölçüde kısıtlar. ZrO_2 'nin biyomedikal uygulamalarında yüksek kırılabilirliği nedeniyle, belirli bir sınırın üstünde yük uygulandığında dokularda büyük hasara neden olabilir. Bu nedenle, kemik implantı uygulamaları için dikkate değer biyolojik performanslarla nispeten yüksek mekanik özellikler ve düşük yoğunluk ortaya koyan bu tür ZrO_2 bazlı yeni kompozitlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar sürdürmektedir (A. Gautam ve diğerleri, 2019; Fei Zhang ve diğerleri, 2015).

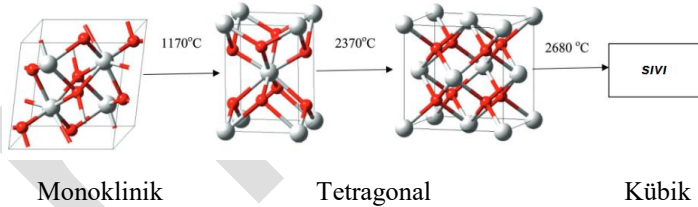
¹ Dr. Öğr. Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Söğüt Meslek Yüksekokulu, İç Mekan Tasarımı, zuhalguven@bilecik.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2280-6326.

Hekzagonal bor nitrür (hBN), yüksek ısıl şok direnci, ısıl iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık, düşük dielektrik sabiti, zehirsiz olması, kolay şekil alabilen, ergimiş metallere karşı ıslatmama özelliği olması, kimyasal kararlılık ve mükemmel yağlayıcılık gibi özellikleri nedeniyle endüstride geniş kullanım alanı bulan inorganik bir malzemedir (Antipina, Varlamova ve Sorokin, 2023; Ay, Göncü ve Ay, 2020; Shi, Wang, Yang, Duan ve Dong, 2008; Xue, Liu, Xie ve Zhang, 2011). hBN, kompozit malzemelerde katkı olarak malzemenin termal şok dayanıklılığını, işlenebilirliğini, elektriksel özelliklerini ve termal iletkenliğini iyileştirmek ve sürtünmeyi azaltmak amacıyla kullanılır. BN içeren kompozitler arasında; SiC/BN, TiB₂/BN, Si₃N₄/BN, AlN/BN, ZrO₂/BN, Al₂O₃/BN sayılabilir (Alkoy, 1994; Z. Yılmaz ve diğerleri., 2022; Z. Yılmaz ve Ay, 2020). Gautam ve arkadaşları ise nanoyapılı ultra yüksek yoğun birbirine bağlı morfolojiye sahip yüksek mukavemetli hBN-ZrO₂ kompozit geliştirmişlerdir. hBN'nin kırılma esnasında çatlakları köprüleyerek mukavemet ve tokluğun artmasını sağladığı bildirilmiştir. Bu kompozitlerin iyi mekanik ve tribolojik özelliklerle ilişkili iyi biyoyumluluk, termal ve kimyasal stabilite, sitotoksiste değerleri ile bu kompoziti kemik implantı uygulamaları için potansiyel bir malzeme haline getirebileceği belirtilmiştir (A. Gautam ve diğerleri, 2019; C. Gautam ve diğerleri, 2019). Literatürde ayrıca itriyum tetragonal zirkonya polikristalinin (3Y-TZP) tokluğunun iyileştirilmesi için bor nitrür nanotüp (BNNTs) kullanılmıştır. BNNT'ler, zirkonya tane sınırlarını güçlendirdiği bunda kırılma modunun inter-granülerden trans-granülere değişimine sebep olduğu bildirilmiştir. Ayrıca BNNT'lerin zirkonyanın dönüşüm sertleşmesini de desteklediği tespit edilmiştir. Mekanik mukavemet ve tokluk değerlerinde iyileştirildiği gözlenmiştir (Tatarko ve diğerleri, 2014; Xu ve diğerleri, 2012). Zirkonyanın kırılma davranışının bor nitrür nano tabakalar (BNNS) ile de geliştirilebileceği literatürde mevcuttur (Muñoz-Ferreiro ve

diğerleri, 2021). Çalışmada hBN içeren zirkonya matrisli kompozit malzemelerin özellikleri araştırılmıştır.

2. ZİRKONYA

Zirkonya (ZrO_2) polimorfik bir malzeme olduğundan sıcaklık ve basınç koşullarına bağlı olarak birden fazla kristal yapı sergileyebilir ve bu polimorfik değişimler malzemenin yoğunluğundaki ve diğer fiziksel özelliklerindeki değişikliklere neden olur. Saf zirkonya oda sıcaklığında monokliniktir (M) ve $1170^\circ C$ 'ye kadar stabildir, daha yüksek sıcaklıklarda tetragonal (T) ve daha sonra $2360-2370^\circ C$ 'de kübik faza (C) dönüşür (Bannunah, 2023; Cavalcanti ve diğerleri, 2009; Chevalier ve Gremillard, 2008). $2680^\circ C$ 'de ise sıvı faza dönüşmektedir. ZrO_2 'ye ait faz dönüşümleri Şekil 1.'de verilmiştir (C. Gautam ve diğerleri, 2016).

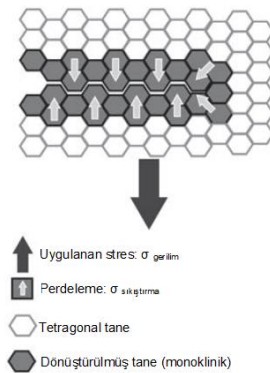


Şekil 1. ZrO_2 Fazının Sıcaklığa Bağlı Kristalografik Faz Değişimi

Kaynak: C. Gautam ve diğerleri, 2016.

Saf zirkonya $1500^\circ C$ ile $1700^\circ C$ arasında sinterlendikten sonra oda sıcaklığına soğutma sırasında meydana gelen faz dönüşümü sonucu hacimsel genişleme değişiminden dolayı üretilen gerilimler, parçalara ayrılabilen çatlaklar oluşturur. Bu genişleme sonucu oluşan çatlak oluşumu seramik sistemlerde saf zirkonya kullanımını engeller (Cavalcanti ve diğerleri, 2009). Zirkonyaya stabilize edici itriyum (Y), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), seryum (Ce) veya zirkonyumdan (Zr) daha

büyük iyonik yarıçapa sahip diğer iyonlarda katı bir şekilde çözündüğünde oda sıcaklığında tetragonal ve kübik faz sistemleri kararlı hale gelir (Ban, 2021; Eğilmez, Zeynep, Biçer ve Ergün, 2012; Liu ve diğerleri, 2023). Tetragonal ZrO_2 taneciklerinin düşük yüzey enerjisi ve matriksin baskısı ile monoklinik forma dönüşümü gerçekleşir. Bunun sonucunda da materyale özellikle çatlak durdurucu bir mekanizma sağlamaktadır. Stabilize zirkonyum oksit; gerilim stresleri, aşındırma, sinterleme sonrası soğuma ve dış kuvvetler gibi streslerin sebep olduğu bir çatlakın başlangıç aşamasında tetragonal fazdan monoklinik faza geçmekte ve faz değişimi hacminde %3-5'lik bir artışa yol açmaktadır. Dönüşüme bağlı olarak hacim genişlemeyle ilişkili gerilim alanı, çatlak ucundaki çekme uygulanan gerilim alanına karşı çıkan sıkıştırıcı stresler ortaya çıkarmakta ve dış streslerin nötralize edilmesini sağlamaktadır bunun sonucu olarak çatlakın daha fazla ilerleyebilmesi için ekstra enerji gerekmektedir (Chevalier ve Gremillard, 2008; B. Yılmaz, 2008). Dönüşüm kaynaklı sertlik mekanizması Y-TZP seramiklerin esas tercih nedenidir. TZP seramik için çatlak ucundaki stres kaynaklı tetragonal-monoklinik dönüşüm mekanizması Şekil 2.'de gösterilmiştir (Chevalier ve Gremillard, 2008).



Şekil 2. Zirkonyadaki Çatlak Ucundaki Stres Kaynaklı Tetragonal-Monoklinik Dönüşüm

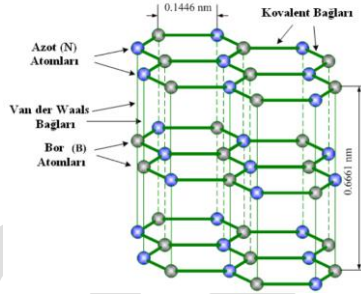
Kaynak: Chevalier ve Gremillard, 2008.

Oksit seramikler arasında tetragonal zirkonya polikristalleri, mükemmel mukavemet ve tokluk, aşınma direnci, yüksek kimyasal ve korozyon direnci, çeliğe benzer elastiklik modülü ve ayrıca biyouyumluluk özellikleri ile biyomalzeme olarak geniş kullanım alanına sahiptir (Galante, Figueiredo-Pina ve Serro, 2019; Reddy, Mukhopadhyay ve Basu, 2010). Biyouyumluluk herhangi bir zararlı etki olmaksızın bir materyalin canlı doku ile bir arada bulunma yeteneğidir. Zirkonyanın ağız boşluğundaki dokularla biyouyumlu ve alerjik reaksiyonlara, tat değişikliğine neden olmadığı bildirilmektedir (Galante ve diğerleri, 2019; Kazi ve Yamagiwa, 2020; Shin ve diğerleri, 2016; Yoshinari, 2020). Bu sebeple yaygın olarak diş hekimliğinde kullanılmaktadır.

3. HEGZAGONAL BOR NİTRÜR

hBN, grafit benzeri pullu yapısı gereği beyaz grafit olarak da adlandırılmaktadır. Kristal yapısı Şekil 3.'de verilmiştir. hBN çok güçlü düzlemsel bağlar ve zayıf düzlemler arası bağlardan dolayı yüksek anizotropiye sahiptir. Anizotropik yapısı nedeniyle düzlem içi yönde yüksek termal iletkenlik ve düzlemler arası yönde önemli ölçüde daha düşük termal iletkenlik sergiler (Z. Yılmaz ve Ay, 2023). Tabakalar arası bağlar zayıf olduğundan düzensiz tabakalaşma çok kolay olur. Gözenekli yapı, düşük elastik modülü, yüksek ısı iletkenliği ve ısı genleşme özellikleri ile sıcak preslenmiş hBN'ün ısı şok dayanımı çok iyidir. hBN yüksek sıcaklıklarda yarı iletken hale gelir (Ay ve diğerleri, 2020). hBN'nin yağlayıcılık özelliği, grafit gibi tabakalı hekzagonal kristal yapıya sahip olması ve anizotropik doğasıyla açıklanmaktadır. Kayma kuvvetleri c-yönünde paketlenmiş Van-der Walls bağlı hekzagonallerin kuvvetlerinden büyük olduğunda, tabakalar birbirini üzerinde kayar ve diğerlerinden ayrılırlar (Göncü, Geçgin, Bakan ve Ay, 2017). Yüksek ısı şok direnci, ısı iletkenlik, elektriksel

yalıtkanlık, düşük dielektrik sabiti, zehirsiz olması, kolay şekil alabilen, ergimiş metallere karşı ıslatmama özelliği olması, kimyasal kararlılık ve mükemmel yağlayıcılık gibi özellikleri nedeniyle BN kullanımı her geçen gün artmaktadır. Son yıllarda anibakteriyel malzeme olarak özellikleri ve biyouyumluluğu araştırılmakta ve bu etkisinden faydalanılarak farklı alanlarda kullanım olanakları geliştirilmektedir. Bu çalışmalarda toksit olmadığı bildirilmiştir (Kıvanç ve diğerleri, 2018; Merlo ve diğerleri, 2018; Mukheem ve diğerleri, 2019, Pandit ve diğerleri,2019).



Şekil 3. Hekzagonal Bor Nitrürün Kristal Yapısı (Öz, 2016)

4. ZİRKONYA MATRİSLİ HEGZAGONAL BOR NİTRÜR KOMPOZİTLER

4.1. ZrO_2 – hBN Kompozitler

Zirkonya yüksek eğme mukavemeti, üstün biyouyumluluğu ve yüksek kimyasal ve korozyon direnci nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. ZrO_2 , ilk olarak 1789'da Alman kimyager Martin Heinrich Klaproth tarafından bazı değerli taşların ısıtılmasını içeren belirli prosedürler üzerinde çalışırken tesadüfen keşfedilmiştir (Abd El-Ghany ve Sherief, 2016). ZrO_2 'nin biyomalzeme olarak kullanımıyla ilgili ilk araştırma makalesi 1969'da Helmer ve Driskel tarafından yayınlanmıştır (C. Gautam ve diğerleri, 2016). Zirkonya

seramiklerinin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı doğrudan kristalografleriyle bağlantılıdır. Hem zirkonya yüksek mekanik özelliklerinden sorumlu olan faz dönüşümü sertleştirme mekanizmasını hem de düşük sıcaklıktaki bozulmaya (yaşlanma) duyarlılığını açıklayan şey, bir metastabil polimorfтан (tetragonal faz) stabil olana (monoklinik faz) dönüşümdür. Kübik faz 2370 °C'nin üzerinde karardır ve orta mekanik özelliklere sahiptir, tetragonal faz 1170 °C ile 2370 °C arasında karardır ve iyileştirilmiş mekanik özelliklere sahiptir ve monoklinik faz oda sıcaklığında 1170 °C'ye kadar karardır, daha düşük mekanik özelliklere sahiptir (Abd El-Ghany ve Sherief, 2016; Chevalier ve Gremillard, 2008). Saf zirkonyanın yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımı dönüşüm sıcaklıkları göz önüne alındığında sınırlıdır.

Shweta ve arkadaşlarının (Shweta ve diğerleri, 2023) atık ZrO_2 ile güçlendirilmiş hBN katı hal reaksiyon yöntemi ile sentezledikleri çalışmada üretilen kompozitler iyi fiziksel, mekanik, kimyasal kararlılığa sahip ve toksit olmayan çok sayıda biyomedikal uygulama için biyouyumlu bir malzeme olarak potansiyel göstermiştir. Çalışmada %0, %2, %6 ve %10 ağırlık oranlarında 1µm boyutunda hBN içeren 255 nm boyutunda zirkonya kullanılmıştır. Kompozit peletler 1000 °C sıcaklıktaki hava atmosferinde 5 °C/dakika ısıtma hızında 3 saat boyunca sinterlenmiştir. %2 hBN içeren kompozit mekanik özellikleri en iyi sonuçları ortaya koymuştur. Saf ZrO_2 için basınç dayanımı, Young modülü, kırılma tokluğu ve nihai kuvvet değerleri belirlenmiş ve sırasıyla 224 ± 6.72 MPa, 1.806 ± 0.054 GPa, 13.165 ± 0.527 MPa m^{1/2} ve 176 ± 5.28 kN olarak bulunmuştur. Bu değerler ZrO_2 'ye %2 ağırlık oranında hBN eklenmesiyle sırasıyla 266 ± 7.98 MPa, 2.0 ± 0.060 GPa, 15.775 ± 0.631 MPa m^{1/2} ve 209 ± 6.27 kN'ye çıkmıştır. Bunun nedeninin, ZrO_2 tanelerinin iyi bir şekilde birbirine bağlı olması ve altıgen nano tabakaların rastgele yönlendirilmiş

olmasından kaynaklandığı bildirilmiştir. Bu kompozitte stotoksisite testlerinde herhangi bir canlılıkta azalma gözlenmemiştir. hBN oranının artması ile yoğunluk ve mekanik özelliklerde azalma gözlenmiştir.

Gautam ve arkadaşları ise nanoyapılı ultra yüksek yoğun birbirine bağlı morfolojiye sahip yüksek mukavemetli hBN-ZrO₂ kompozit geliştirmişlerdir. Bu kompozitlerin iyi mekanik ve tribolojik özellikleriyle ilişkili iyi biyouyumluluk, termal ve kimyasal stabilite, sitotoksisite değerleri ile bu kompoziti kemik implantı uygulamaları için potansiyel bir malzeme haline getirebileceği belirtilmiştir (A. Gautam ve diğerleri, 2019; C. Gautam ve diğerleri, 2019). C. Gautam ve arkadaşları (C. Gautam et al., 2019) %15-70 oranında hBN içeren kompozit çalışmasında hBN ve ZrO₂ fazlarının yanında zirkonyum oksinitrat ana fazı (ZrO(NO₃)₂) ile birlikte zirkonyum nitritin (Zr₂ON₂) ve zirkonyum borid (B₁₂Zr) fazlarında oluştuğunu göstermiştir. 1100°C'de yüksek sıcaklıkta sinterleme nedeniyle hBN ve ZrO₂'nin ana fazına indirgendiği bildirilmiştir. %70 hBN içeren kompozitin mekanik mukavemet olarak (174 MPa), ~ 2.54 g/cm³ yoğunluk ile kompakt kemiğin yoğunluğu (2.2 g/cm³) ile mükemmel uyumlu olduğunu gösterilmiştir. hBN'nin kırılma esnasında çatlakları köprüleyerek mukavemet ve tokluğun artmasını sağladığı bildirilmiştir. Ayrıca uygun hücre yapışması ve sıvı taşınmasına izin verebilecek yeterli gözenek boyutuna (211 nm) sahip olduğu, biyouyumlu olduğu, toksik olmadığı ve çeşitli kemik implantlarında potansiyel uygulamaya sahip olduğu bildirilmiştir.

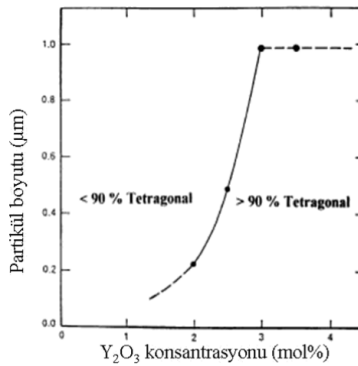
A. Gautam ve arkadaşlarının hBN ve ZrO₂ kompozitin biyolojik aktivitesini inceledikleri çalışmada (A. Gautam et al., 2019), 27 nm ZrO₂ ve ağırlıkça %10-80 aralığında hBN ilavesi yaparak kompozit elde etmişlerdir. Kompozitler 1000 °C sıcaklıkta 5 °C/dakika ısıtma hızında 3 saat boyunca sinterlenmiştir. % 10 hBN içeren kompozitte en yüksek basınç

mukavemetini ~227 MPa elde etmişlerdir. Bu kompozitin yoğunluğu $3,12 \text{ g cm}^{-3}$ olup, doğal dişlerin yoğunluğuna oldukça yakındır. Young modülü ve kırılma tokluğu değerleriyse sırasıyla 10.10 GPa ve 2.56 MJ m^{-3} olarak belirlenmiş ve yeterli olduğu bildirilmiştir. hBN miktarının artırılmasıyla mekanik mukavemetin, Young modülünün ve tokluğun azaldığı hBN'nin daha az yoğunluğu ve yüksek yağlayıcı yapısı nedeniyle, sentezlenen kompozitlere kırılabilirliği engelleyen esneklik sağladığı ifade edilmiştir. Ayrıca %10 hBN içeren numunenin canlı organizmalar üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı ve daha az toksisitesinden dolayı, çeşitli ilaç dağıtım sistemlerinin nano formülasyonunda kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Bu kompozitin yapay dişler ve diş implant malzemeleri için istenen özelliklerin yanı sıra en önemli mekanik, tribolojik ve biyolojik özelliklere sahip olduğunu bildirmişlerdir.

4.2. Stabilize Zirkonya ve hBN Kompozitler

Biyoseramik olarak zirkonya seramikleri üzerine yapılan çalışmalar itriya katkılı seramiklere odaklanmıştır. İtriya kafeste zirkonyanın yerini alır ve aynı anda zirkonyanın koordinasyonunu değiştiren ve tetragonal fazı stabilize eden oksijen boşluklarının oluşumuna yol açar (P. Li ve diğerleri, 1994). Zr^{4+} iyonlarının bir kısmının ($0,82 \text{ Å}$ iyon yarıçapı) kristal kafesinde daha büyük Y^{3+} iyonları ($0,96 \text{ Å}$ iyon yarıçapı) ikame edilerek, zirkonyumun kübik polimorfu elde edilebilir (Dharini, Kuppusami ve Kirubaharan, 2023). Y_2O_3 'ün ağırlıkça %3-8 eklenmesi, ısıtma ve soğutma sırasında polimorfik dönüşümü önleyebilir (Kulyk ve diğerleri, 2022; Roitero ve diğerleri, 2023). ZrO_2 - Y_2O_3 sisteminde itriya yaklaşık %3 mol olduğunda, oda sıcaklığında tetragonal fazlar %100'e yakındır ve buna sertleştirilmiş zirkonya olarak da adlandırılan tetragonal zirkonya polikristali (TZP) denir. %3 mol itriyum tetragonal zirkonya polikristal (3Y-TZP) seramiklerde gerilim kaynaklı

dönüşüm sertleşmesi sağlar ve diğer seramiklerle karşılaştırıldığında üstün mekanik özellikler kazandıran benzersiz bir özelliktir. Diş hekimliğine “beyaz metal” bazı yazarlar tarafından “seramik çelik” olarak adlandırılmıştır (Ban, 2021; Cavalcanti ve diğerleri, 2009). %3 mol üzerindeki oranlarda tetragonal faz miktarını azaltır aynı zamanda partikül boyutunu etkiler. 3Y-TZP’nin mekanik özellikleri kristal boyutundan önemli oranda etkilenir. Y_2O_3 konsantrasyonunun partikül boyutuna etkisi Şekil 4.’de verilmiştir. $1\mu m$ ’den daha büyük partikül boyutlarının kullanılması tetragonal-monoklinik faz değişimi hızlandırarak yapının stabilitesini etkiler ve tetragonal fazının oranını düşürür. Ayrıca tane boyutu $0,2\mu m$ ’nin altında olan zirkonya bu faz dönüşüm sertleşmesine uğramaz ve dolayısıyla kırılma tokluğu düşer (Bultan ve diğerleri, 2010; C. Gautam ve diğerleri, 2016).



Şekil 4. Y_2O_3 Konsantrasyonunun Partikül Boyutuna Etkisi

Kaynak: Bultan ve diğerleri, 2010.

Yapılan çalışmalarda ZrO_2 'nin biyoyumumluluğu kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş ve saf zirkonya kullanımı ile Y-TZP'nin biyoyumumluluğu hakkında herhangi bir lokal veya sistemik olumsuz reaksiyon bildirilmemiştir (C. Gautam ve diğerleri, 2016; Kazi ve Yamagiwa, 2020). Ticari olarak temin

edilebilen en güçlü dental seramikler zirkonya olarak kısaltılmış yüzde 3 mol itriya stabilize tetragonal zirkonya polikristalleridir. Bu malzeme, diş çekirdeği ve çoklu ünitelerin üretimi için en popüler seçim haline gelmiştir (C. Gautam ve diğerleri, 2016; Wang, Yu, Hao, Tang ve Dou, 2023). Bunun yanında fonksiyonel olarak farklı kullanım alanları da mevcuttur.

Zirkonyum mekanik stres altında tetragonal formdan monoklinik forma dönüşmesiyle oluşan dönüşüm sertleşmesi nedeniyle oldukça iyi bir kırılma tokluğuna sahiptir. Çatlak yayılma yolunda tanelerdeki tetragonal monoklinik faz geçişinin bir sonucu olarak, çatlak ucundaki enerji dağılır ve bu şekilde çatlağın durdurulma olasılığı yüksektir. Özellikle inşaat malzemesi olarak kullanılması amaçlanan zirkonyum seramikleri için daha da yüksek çatlak yayılma direnci gereklidir. Seramik malzemelerin kırılma tokluğunu artırmak için çeşitli yöntemler bilinmektedir. Bunlardan biride seramik matrise düşük modüllü malzemelerin ilave edilerek zayıf ara faz arayüzlerine sahip bir kompozit yapının elde edilmesidir. Bir çatlak ucunun nispeten zayıf bir sınırla teması, eğrilik yarıçapının artmasına ve ardından karşılık gelen bir çatlak enerjisi bölünmesiyle çatallanmasına yol açar. Cook-Gordon mekanizmasının uygulanması ve zayıf bir sınırın oluşması için gerekli koşul, matrisin Young modülü değerlerindeki farkın beş kattan fazla olmalıdır (J. Cook, 1964). hBN'nin Young modülü 30 GPa'dır ve YSZ seramiklerinin 200-220 GPa olan Young modülünden önemli ölçüde daha azdır bu sebeple hBN tokluğu artırmak için önemli katkı malzemelerinden biri olarak ortaya çıkmaktadır (A. S. Buyakov, Mirovoy ve Buyakova, 2019; Ales S. Buyakov, Mirovoy, Smolin ve Buyakova, 2021).

Stabilize zirkonya çalışmaları incelendiğinde hBN, bor nitrür nanotüp (BNNTs) ve bor nitrür nano tabakalar (BNNS) kullanılarak BN içeren zirkonya kompozitlerin üretildiği görülmektedir (A. S. Buyakov ve diğerleri, 2019; Ales S.

Buyakov ve diğerleri, 2021; Y. Li, Zhang, Qiao ve Jin, 2005; Muñoz-Ferreiro ve diğerleri, 2021; Tatarko ve diğerleri, 2014; Xu ve diğerleri, 2012; Fan Zhang ve diğerleri, 2022). hBN/3Y-ZrO₂ kompozitlerin spark plazma sinterlemesi ile düşük sıcaklıkta hızlı bir şekilde üretildiği çalışmada çelik üretiminde döküm yan sızdırmazlık plakası olarak kullanımı araştırılmıştır (Fan Zhang ve diğerleri, 2022). %30 zirkonya içeren hBN/3Y-ZrO₂ kompozitin en iyi özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Mukavemet değeri en yüksek olan kompozittir. hBN matrisinin tetragonal zirkonyadan monoklinik zirkonyaya faz dönüşümü engellenebilir ve matriste basınç dayanımının iyileştirilmesine elverişli olan çekme gerilimi oluşabileceği bildirilmiştir. Ancak, zirkonya içeriği çok fazla olduğunda, hBN matrisinin faz dönüşümü üzerindeki etkisinin kademeli olarak zayıfladığı belirlenmiştir. hBN/3Y-ZrO₂ kompozitlerinin erimiş çeliğe karşı aşınma dirençleri incelenmiş ve zirkonyanın erimiş çeliğin kompoziti aşındırmasını bir ölçüde önleyebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca kompozitteki ZrO₂ oranının belirli oranda kontrol edilmesinin yalnızca termal iletkenliği önemli ölçüde azaltmakla kalmayıp aynı zamanda termal genleşme katsayısının kararlılığını da koruyabileceği gösterilmiştir.

Farklı bir çalışmada zirkonyanın işlenebilirliğini artırmak amacıyla yapılmıştır (Y. Li ve diğerleri, 2005). İşlenebilirlik seramiklerin mühendislik uygulamaları için büyük önem arz etmektedir. Çünkü çoğu karmaşık şekilli olduğu için elmas takımlarla işlenmekte ve maliyet artmaktadır. Yapılan çalışmada hacimce %30'a kadar nano boyutlu hBN içeren 3Y-ZrO₂/BN nanokompozitleri kimyasal yöntemle yerinde sentezlenmiştir. Sinterleme sıcak presleme ile yapılmıştır. Nano ölçekli hBN parçacıklarının homojen olarak ZrO₂ tane sınırlarında dağıldığı belirlenmiştir. Çalışmada aynı zamanda hazır mikro boyutta hBN ilavesi yapılarak aynı koşullarda üretim yapılmıştır. hBN ilavesinin artması ile mukavemet, yoğunluk ve sertlik gibi

kompozitin özelliklerinde azalma gözlenmiştir. Fakat nanokompozitlerin hem kırılma dayanıklılığında hem de kırılma tokluğunda nano boyutlu BN dispersiyonları tarafından matris ZrO_2 tane büyümesinin engellenmesi nedeniyle mikro kompozitlerle karşılaştırıldığında önemli bir artış tespit edilmiştir. BN içeriği hacimce %20'den fazla olduğunda, 3Y- ZrO_2 /hBN nanokompozitlerinin tungsten karbür metal işleme aletleriyle şekillendirilebileceği bildirilmiştir.

Buyakov ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (A. S. Buyakov ve diğerleri, 2019), ortalama çapı 5 μm boyuta sahip 3Y-TZP ve pullarının ortalama çapı 5 μm ve ortalama kalınlığı 0,5 μm olan hBN kullanarak 1600°C'de sıcak presleme ile kompozit elde etmişlerdir. Kompozitlere %0,25-5 arasında hBN ilavesi yapılmıştır. En yüksek kırılma tokluğu ağırlıkça %0,5 hBN içeren kompozitte elde edilmiştir ($K_{IC} = 12 \pm 0,53 \text{ MPa m}^{1/2}$). Bunun sebebi olarak düşük modüllü inklüzyonların (yani, hBN) dahil edilmesiyle oluşan hasar viskozitesindeki artışın iki dağıtıcı mekanizmadan kaynaklandığı bildirilmiştir. Bunlardan birinin ZrO_2 matrisinin martenzit dönüşümü diğerinin ise matris ile hBN'nin düşük modüllü inklüzyonları arasındaki nispeten zayıf arayüzlerde çatlak durması olarak gösterilmiştir. hBN oranının artması ile tokluk değerleri ve mekanik özelliklerde azalmalar tespit edilmiştir. hBN oranının dahada artması ile tetragonal zirkonyumun tane boyutunun küçüldüğü ve bununda bu fazı daha kararlı hale getirerek martensit dönüşümünün kırılma tokluğuna katkısını azalttığı bildirilmektedir. Çatlak yüzeyindeki monoklinik faz miktarının yüzdesinin hBN ile azaldığı gösterilmiştir.

Buyakov ve arkadaşları yaptıkları farklı bir çalışmada (Ales S. Buyakov ve diğerleri, 2021), yukarıdaki çalışmadan farklı olarak nano boyutta 3Y-TZP tozu ve aynı boyutlu ve miktarlarda hBN kullanmışlardır. Sinterleme sıcaklıkları artan hBN oranına bağlı olarak artırılarak 1300-1400°C arasında

gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada YSZ seramikleri için K1C değeri $\approx 6,1 \text{ MPa m}^{1/2}$ iken, %5 ağırlıkça h BN içeren seramikler için K1C $\approx 9,2 \text{ MPa m}^{1/2}$ olarak tespit etmişlerdir. Elde edilen tüm kompozitler için, kapanım içeriğindeki artış, kırılma tokluğunda artışa yol açmıştır. Hekzagonal bor nitrür kapanımlarına sahip kompozitlerde, kırılma tokluğundaki artışın nispeten zayıf bir matris-kapanım sınırında (Cook-Gordon mekanizması) tamamen durma ve/veya çatlak çataallaşmasından kaynaklandığı bildirilmiştir. Tüm kompozitlerde zirkonyanın tetragonal fazdan monoklinik faza dönüşümün gerçekleştiği belirlenmiştir.

Literatürde ayrıca 3Y-TZP'nin tokluğunun iyileştirilmesi için bor nitrür nanotüp (BNNTs) kullanılmıştır (Tatarko ve diğerleri, 2014; Xu ve diğerleri, 2012). Tatarko ve arkadaşları (Tatarko ve diğerleri, 2014), 3Y-TZP zirkonyum seramiklerini güçlendirmek için farklı miktarlarda ağırlıkça % 0,5-5 içi boş "silindirik" (BNNT-C) ve "bambu benzeri" (BNNT-B) BNNT'ler kullanarak 1250 °C'de spark plazma sinterlemesi yoluyla kompozit üretmişlerdir. Kullanılan 3Y-TZP tozu ortalama 60 nm tane boyutundadır. 3Y-TZP'nin kırılma yüzeyinde yalnızca tetragonal faz tespit edilirken, BNNT'lerin eklenmesinden sonra monoklinik ZrO_2 ile ilgili pikin ortaya çıktığı ve hatta nanotüplerin artan miktarıyla arttığı tespit edilmiştir. Monoklinik zirkonya miktarı artan BNNT oranına bağlı olarak %5 içerikli numunede %49,76'ya ulaşmıştır. Her iki iç yapıda %2,5 ağırlık oranında BNNT içeren kompozitler en yüksek kırılma tokluğunu sergilediği bulunmuştur. BNNT'lerin dönüşüm toklaşması ve zirkonyum tane sınırlarının güçlendirilmesi üzerindeki etkisi de dahil olmak üzere diğer toklaşma mekanizmalarının (köprüleme, germe ve çekme) etkin olduğu gösterilmiştir. Ayrıca BNNT'ler, zirkonya tane sınırlarını güçlendirdiği için kırılma modunun inter-granülerden trans-granülere değişimine sebep olduğu bildirilmiştir.

Bir diğer çalışmada (Xu ve diğerleri, 2012), BNNT ile 750nm ortalama boyuta sahip 3Y-ZrO₂ tozu kullanılarak 1450 °C'de sıcak preslenerek kompozit üretilmiştir. BNNT'ler ağırlıkça %0,5-2 oranında ilave edilmiştir. BNNT'lerin ZrO₂ mukavemet, kırılma tokluğu ve yoğunluk üzerinde büyük etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Ağırlıkça %1 BNNT eklenmesi mukavemeti %27,7 ve kırılma tokluğunu %65,4 oranında artırmıştır. BNNT'ler tane sınırlarını güçlendirmek ve ZrO₂ tanelerinin kırılma modunu değiştirmek için faydalıdır. Yayılan çatlaklar BNNT'lerle karşılaştığında, BNNT'lerin kırılması bir miktar kırılma enerjisini dağıtır ve bu da kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yardımcı olur. Kırık yüzeylerde artan BNNT miktarı ile zirkonyanın monoklinik faz miktarında artış gözlenmiştir. BNNT'lerin ZrO₂ matrisine güçlü bir şekilde bağlanması nedeniyle BNNT-ZrO₂ kompozitlerinin güçlendirilmesine ve sertleştirilmesine de katkıda bulunduğu belirlenmiştir.

Zirkonyanın kırılma davranışının bor nitrür nano tabakalar (BNNS) ile de geliştirilebileceği literatürde mevcuttur (Muñoz-Ferreiro ve diğerleri, 2021). Bu çalışmada 3Y-TZP içerisine hacimce %1 ve 4 oranında BNNS ilavesi yapılarak 1250 °C'de spark plazma sinterleme yöntemiyle kompozitler elde edilmiştir. BNNS'nin kompozitte homojen bir dağılım ve presleme eksenine dik düzlemde tercihlili olarak yönlendiği belirlenmiştir. BNNS katılımının malzemenin Vickers sertliği veya Young modülü üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Zirkonyanın monoklinik dönüşümüne etki etmediği görülmektedir. %4 hacimce BNNS içeren kompozitte çatlak gelişiminde anizotropi ve yaygın mikro çatlak mekanizması bulunmuştur. Girinti kaynaklı kırılma yollarının yakından incelenmesiyle, çatlak sapması, çatlak köprülenmesi, çatlak dallanması, BNNS çekilmesi ve BNNS ayrılması gibi çatlak yayılımı sırasında çeşitli enerji emici mekanizmalar belirlenmiştir.

5. SONUÇ

Çalışmada, zirkonya ve stabilize zirkonya polikristali matrisli hBN, BNNT ve BNNS ilaveli kompozitler daha sonraki çalışmalara yol göstermesi için BN ilavesinin kompozite kattığı değerler ve özelliklerdeki değişimler açısından yapılan çalışmalar ile örneklendirilerek ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışmalardan yola çıkarak belirli bir orana kadar hBN ilavesinin mukavemet ve kırılma tokluğunu artırdığı belirlenmiştir. Burada etkin mekanizmalardan birinin zirkonya etrafında hBN kapanımları sebebiyle kırılma esnasında çatlak köprüleme ve çatlak sapması sebebiyle oluştuğu gözlenmiştir. Bir diğer mekanizmada ise, kırılma yüzeylerinde hBN ve BNNT ilavesi ile tetragonal fazdan monoklinik faza geçişin arttığı ve dönüşüm kaynaklı sertlik mekanizmasını desteklediği belirlenmiştir. Birkaç çalışmada ise faz dönüşümü gözlenmemiştir. hBN'nin daha az yoğunluğu ve yüksek yağlayıcı yapısı nedeniyle, sentezlenen kompozitlere kırılma engellenen esneklik sağladığı ve işlenebilirliğe katkı sağladığı tespit edilmiştir. BNNT'lerin ilavesi ile dönüşüm toklaşması ve zirkonyum tane sınırlarının güçlendirilmesi üzerindeki etkisi de dahil olmak üzere diğer toklaştırma mekanizmalarında (köprüleme, germe ve çekme) etkin olduğu gösterilmiştir. Ayrıca BNNT'lerin zirkonya tane sınırlarını güçlendirdiği için kırılma modunun inter-granülerden trans-granülere değişimine sebep olduğu tespiti yapılmıştır. BNNS ilavesi ile çatlak sapması, çatlak köprülenmesi, çatlak dallanması, BNNS çekilmesi ve BNNS ayrılması gibi çatlak yayılımı sırasında çeşitli enerji emici mekanizmalar belirlenmiş, dönüşüm sertleşmesine katkısı olmadığı görülmüştür. Yapılan bu çalışma zirkonya matrisli kompozitlerde hBN, BNNS ve BNNT ilavelerinin belirli oranlarda kullanımının kompozitin mukavemet ve toklaştırma mekanizmasına olumlu katkı sağladığını göstermiştir. İlave oranının aşırı artması ile mekanik özelliklerde azalmaların

olacağı tespit edilmiştir. Bunun yanında kompozitlerde stoksositeye rastlanmamış olması ve kırılmanın kontrol altına alınarak kırılma sebepli doku hasarlarına neden olmadan başta implant malzemeleri olmak üzere ileri teknoloji seramikleri olarak pek çok alanda kullanılabileceklerini göstermektedir. Bu kitap bölümünün zirkonya ve hBN'nin birlikte kullanıldığı farklı malzemelerde eklenmesiyle daha üstün özellikte seramik kompozitlerin geliştirilmesine katkı sağlayacağı ve öncü olacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKÇA

- Abd El-Ghany, O. S. ve Sherief, A. H. (2016). Zirconia based ceramics, some clinical and biological aspects: Review. *Future Dental Journal*, 2(2), 55–64. doi:10.1016/J.FDJ.2016.10.002
- Alkoy, S. (1994). *Turbostratik Bor Nitrürün Kristalizasyon Davranışı ve Karakterizasyonu*. İstanbul: İTÜ.
- Antipina, L. Y., Varlamova, L. A. ve Sorokin, P. B. (2023). The Temperature Dependence of the Hexagonal Boron Nitride Oxidation Resistance, Insights from First-Principle Computations. *Nanomaterials*, 13(6). doi:10.3390/nano13061041
- Ay, N., Göncü, Y. ve Ay, G. M. (2020). Bor Nitrür: Üretimi ve Uygulamalardaki Son Gelişmeler. *BorenYayınları* içinde (ss. 217–234).
- Ban, S. (2021). Classification and properties of dental zirconia as implant fixtures and superstructures. *Materials*. doi:10.3390/ma14174879
- Bannunah, A. M. (2023). Biomedical Applications of Zirconia-Based Nanomaterials: Challenges and Future Perspectives. *Molecules*, 28(14). doi:10.3390/molecules28145428
- Bultan, Ö., Öngül, D. ve Ürkoğlu, P. T. (2010). Zirkonyanın Mikroyapılarına ve Üretim Şekillerine Göre Sınıflandırılması. *Journal of Istanbul University Faculty of Dentistry*, 44(3), 197–204. doi:10.17096/jiufd.96172
- Buyakov, A. S., Mirovoy, Y. A. ve Buyakova, S. P. (2019). Effects of Low-Modulus BN Inclusions on Properties of Y-TZP Ceramic. *Inorganic Materials: Applied Research*, 10(5), 1159–1163. doi:10.1134/S2075113319050058

- Buyakov, Ales S., Mirovoy, Y. A., Smolin, A. Y. ve Buyakova, S. P. (2021). Increasing fracture toughness of zirconia-based composites as a synergistic effect of the introducing different inclusions. *Ceramics International*, 47(8), 10582–10589. doi:10.1016/j.ceramint.2020.12.170
- Cavalcanti, A. N., Foxton, R. M., Watson, T. F., Oliveira, M. T., Giannini, M. ve Marchi, G. M. (2009). Y-TZP ceramics: Key concepts for clinical application. *Operative Dentistry*, 34(3), 344–351. doi:10.2341/08-79
- Chevalier, J. ve Gremillard, L. (2008). Zirconia ceramics. T. Kokubo (Ed.), *Bioceramics and their clinical applications* içinde (ss. 243–263). Cambridge England: Woodhead publishing limited.
- Dharini, T., Kuppusami, P. ve Kirubaharan, A. M. K. (2023). Nanocomposite ceramic diffusion barrier coatings for nuclear vitrification furnace. *Advanced Ceramic Coatings: Fundamentals, Manufacturing, and Classification*, 357–380. doi:10.1016/B978-0-323-99659-4.00020-6
- Eğilmez, F., Zeynep, A., Biçer, Y. ve Ergün, G. (2012). Zirkonyumla Güçlendirilmi ş Seramikler ve Dental İ mplantolojide Kullan ı m ı Zirkonyumla Güçlendirilmiş Seramikler v e Dental İ mplantolojide Kullanımı Zirconia Ceramics and Their Use In Dental Implantology, (January 2011). doi:10.7126/cdj.2012.698
- Galante, R., Figueiredo-Pina, C. G. ve Serro, A. P. (2019). Additive manufacturing of ceramics for dental applications: A review. *Dental Materials*, 35(6), 825–846. doi:10.1016/j.dental.2019.02.026
- Gautam, A., Gautam, C., Mishra, M., Mishra, V. K., Hussain, A., Sahu, S., ... Gautam, R. K. (2019). Enhanced mechanical properties of hBN-ZrO₂ composites and their biological activities on: *Drosophila melanogaster*: Synthesis and characterization. *RSC Advances*, 9(70), 40977–40996. doi:10.1039/c9ra07835e

- Gautam, C., Gautam, A., Mishra, V. K., Ahmad, N., Trivedi, R. ve Biradar, S. (2019). 3D interconnected architecture of h-BN reinforced ZrO₂ composites: Structural evolution and enhanced mechanical properties for bone implant applications. *Ceramics International*, 45(1), 1037–1048. doi:10.1016/j.ceramint.2018.09.283
- Gautam, C., Joyner, J., Gautam, A., Rao, J. ve Vajtai, R. (2016). Zirconia based dental ceramics: structure, mechanical properties, biocompatibility and applications. *Dalton Transactions*, 45(48), 19194–19215. doi:10.1039/C6DT03484E
- Göncü, Y., Geçgin, M., Bakan, F. ve Ay, N. (2017). Electrophoretic deposition of hydroxyapatite-hexagonal boron nitride composite coatings on Ti substrate. *Materials Science and Engineering C*, 79, 343–353. doi:10.1016/j.msec.2017.05.023
- J. Cook, J. E. G. (1964). A mechanism for the control of crack propagation in all-brittle systems. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 282(1391), 508–520. doi:10.1098/rspa.1964.0248
- Kazi, G. A. S. ve Yamagiwa, R. (2020). Cytotoxicity and biocompatibility of high mol% yttria containing zirconia. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 45(4). doi:10.5395/RDE.2020.45.E52
- Kulyk, V., Duriagina, Z., Kostryzhev, A., Vasylyv, B., Vavrukh, V. ve Marenych, O. (2022). The Effect of Yttria Content on Microstructure, Strength, and Fracture Behavior of Yttria-Stabilized Zirconia. *Materials*, 15(15). doi:10.3390/ma15155212
- Li, P., Chen, I. -W ve Penner-Hahn, J. E. (1994). Effect of Dopants on Zirconia Stabilization—An X-ray Absorption Study: I, Trivalent Dopants. *Journal of the American Ceramic Society*, 77(1), 118–128. doi:10.1111/J.1151-2916.1994.TB06964.X

- Li, Y., Zhang, J., Qiao, G. ve Jin, Z. (2005). Fabrication and properties of machinable 3Y-ZrO₂/BN nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*, 397(1–2), 35–40. doi:10.1016/j.msea.2005.01.038
- Liu, H., Inokoshi, M., Xu, K., Tonprasong, W., Minakuchi, S., Van Meerbeek, B., ... Zhang, F. (2023). Does speed-sintering affect the optical and mechanical properties of yttria-stabilized zirconia? A systematic review and meta-analysis of in-vitro studies. *Japanese Dental Science Review*, 59, 312–328. doi:10.1016/J.JDSR.2023.08.007
- Muñoz-Ferreiro, C., Morales-Rodríguez, A., Gallardo-López, Á. ve Poyato, R. (2021). A first insight into the microstructure and crack propagation in novel boron nitride nanosheet/3YTZP composites. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 60(2), 128–136. doi:10.1016/j.bsecv.2020.02.003
- Öz, M. (2016). Hegzagonal bor nitrürün açık atmosferde termal davranışları. *Cumhuriyet Science Journal*, 37(1), 57. doi:10.17776/csj.38616
- Reddy, K. M., Mukhopadhyay, A. ve Basu, B. (2010). Innovative multi-stage spark plasma sintering to obtain strong and tough ultrafine-grained ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.08.005
- Roitero, E., Reveron, H., Gremillard, L., Garnier, V., Ritzberger, C. ve Chevalier, J. (2023). Ultra-fine Yttria-Stabilized Zirconia for dental applications: A step forward in the quest towards strong, translucent and aging resistant dental restorations. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(7), 2852–2863. doi:10.1016/J.JEURCERAMSOC.2022.11.048

- Shi, X., Wang, S., Yang, H., Duan, X. ve Dong, X. (2008). Fabrication and characterization of hexagonal boron nitride powder by spray drying and calcining-nitriding technology. *Journal of Solid State Chemistry*, 181(9), 2274–2278. doi:10.1016/J.JSSC.2008.05.029
- Shin, H., Ko, H. ve Kim, M. (2016). Cytotoxicity and biocompatibility of Zirconia (Y-TZP) posts with various dental cements. *Restorative dentistry & endodontics*, 41(3), 167. doi:10.5395/RDE.2016.41.3.167
- Shweta, Tahir, M., Avinashi, S. K., Parveen, S., Kumar, S., Fatima, Z., ... Gautam, C. (2023). Synergetic effects of boron nitride with waste zirconia: Evaluation of instantaneous fingerprint detection and mechanical properties for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 145(July), 106032. doi:10.1016/j.jmbbm.2023.106032
- Tatarko, P., Grasso, S., Chlup, Z., Porwal, H., Kašiarová, M., Dlouhý, I. ve Reece, M. J. (2014). Toughening effect of multi-walled boron nitride nanotubes and their influence on the sintering behaviour of 3Y-TZP zirconia ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 34(7), 1829–1843. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2013.12.046
- Wang, L., Yu, H., Hao, Z., Tang, W. ve Dou, R. (2023). Fabrication of highly translucent yttria-stabilized zirconia ceramics using stereolithography-based additive manufacturing. *Ceramics International*, 49(11), 17174–17184. doi:10.1016/J.CERAMINT.2023.02.081
- Xu, J. J., Bai, Y. J., Wang, W. L., Wang, S. R., Han, F. D., Qi, Y. X. ve Bi, J. Q. (2012). Toughening and reinforcing zirconia ceramics by introducing boron nitride nanotubes. *Materials Science and Engineering A*, 546, 301–306. doi:10.1016/j.msea.2012.03.077

- Xue, J. X., Liu, J. X., Xie, B. H. ve Zhang, G. J. (2011). Pressure-induced preferential grain growth, texture development and anisotropic properties of hot pressed hexagonal boron nitride ceramics. *Scripta Materialia*, 65(11), 966–969. doi:10.1016/J.SCRIPTAMAT.2011.08.025
- Yılmaz, B. (2008). *Beş Farklı Yöntemle Hazırlanan Zirkonyum Altyapılı Kuronların Marjinal Uyum Ve Kiril Dirençlerinin İnVitro Olarak Değerlendirilmesi*. Erzurum: Atatürk Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.
- Yılmaz, Z. ve Ay, N. (2023). The Investigation of Synthesis and Textured Properties of in Situ Formed Hbn with Spark Plasma Sintering. *SSRN*. doi:10.2139/ssrn.4663970
- Yılmaz, Zuhâl ve Ay, N. (2020). Production parameters affecting the synthesis and properties of hBN-SiC composites. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 56(1), 99–108. doi:10.1007/S41779-019-00398-4
- Yılmaz, Zuhâl, Savacı, U., Turan, S. ve Ay, N. (2022). The effect of in-situ formed layered hBN on the machinability and mechanical properties of SPS sintered SiC. *Ceramics International*, 48(1), 1047–1056. doi:10.1016/J.CERAMINT.2021.09.190
- Yoshinari, M. (2020). Future prospects of zirconia for oral implants —A review. *Dental Materials Journal*, 39(1), 37–45. doi:10.4012/DMJ.2019-151
- Yurdakul, A. (2023). Zirkonya Matrisli Seramik-Seramik Kompozitler. *Farklı Mühendislik Yaklaşımlarıyla Kompozit Malzemeler IV*, 0–2. doi:10.58830/ozgur.pub390.c1542

- Zhang, Fan, Mao chen, Wang, H., Shao, G., Qi, Y., Ma, C., ... Chen, Y. (2022). Effect of ZrO₂ on sintering behavior and properties of h-BN/ZrO₂ composites by spark plasma sintering. *Ceramics International*, 48(23), 34877–34884. doi:10.1016/j.ceramint.2022.08.077
- Zhang, Fei, Vanmeensel, K., Batuk, M., Hadermann, J., Inokoshi, M., Van Meerbeek, B., ... Vleugels, J. (2015). Highly-translucent, strong and aging-resistant 3Y-TZP ceramics for dental restoration by grain boundary segregation. *Acta Biomaterialia*, 16(1), 215–222. doi:10.1016/J.ACTBIO.2015.01.037

YERLİ HAMMADDE KULLANIMIYLA ELDE EDİLEN RENKLENDİRİCİLERİN SERAMİK SIRLARINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Hale YILDIZAY¹

1. GİRİŞ

Seramik sanayinde sırlara renk kazandırmak için kullanılan inorganik esaslı seramik pigmentler kullanılmaktadır. Seramik sırlarındaki rengi elde edebilmenin yolu sıran cam matris yapısının içerisinde belirli bir kristal yapıda bulunan pigmentlerin dağılmasını sağlamaktır. Böylelikle sıra renk özelliğini kazandırılmaktadır (Özel ve Turan, 2003).

Bu çalışmada seramik sektöründe kullanılan seramik sırlarındaki pigmentlere göre daha uygun maliyette üretilebilecek pigmentlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, ülkemizde çıkartılan kromit, manyetit ve mangan cevherlerinin birlikte kullanılmasıyla farklı renklerde pigment üretiminin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Üretilen pigmentler seramik sırında kullanılmış ve oluşan renklerin performansları incelenerek seramik endüstrisinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. GELENEKSEL SERAMİK PİGMENT ÜRETİM YÖNTEMİ

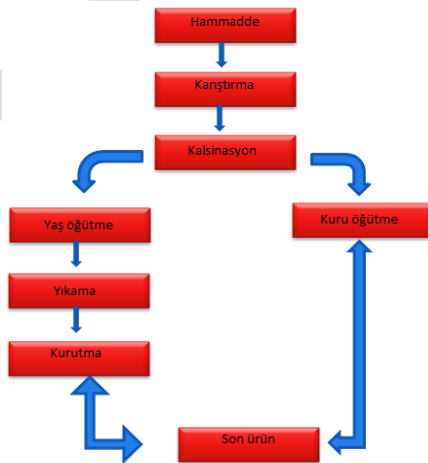
Geleneksel seramik pigment üretiminde başlangıçta kullanılan oksitler değirmenlerde homojen hale getirildikten

¹ Doç. Dr. Üyesi. Hale YILDIZAY, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Güzel Sanatlar Meslek Yüksek Okulu, Çini sanatı ve Tasarımı Bölümü, Germiyan Kampüsü, 43100 Kütahya, TÜRKİYE, hale.yildizay@dpu.edu.tr, Tel:05055276767, Orcid no: 0000-0002-3896-9912

sonra 1200°C’de kalsine edilmektedir. Seramik pigmentler genellikle çok bileşenli metal oksitlerinden oluşmaktadır. Seramik pigmentlerin üretimi genellikle magnezyum, kobalt, nikel, demir, bakır ve krom vb. oksitlerin karışımlarından oluşmaktadır.

Pigment üretiminde kullanılan hammaddelerinin seçimi son üründen istenen renk kararlılığı ve yüksek parlaklık gibi ürün kalitesini belirleyen önemli ölçütlerdendir. Hammaddelerin boyutları ve granülometrik dağılımı pigment oluşumunu önemli derecede etkilemektedir ve bu yüzden önemlidir. Hammaddelerin d50 değeri yani ortalama tane boyut aralığının 1–5 µm aralığında olması pigmentin oluşmasına olumlu etkide bulunduğu çalışmalarla tespit edilmiştir. Bu etkenlerin iyi bir şekilde saptanabilmesi için pigment hammaddelerine hem kimyasal hem de granülometrik analizi yapılmaktadır.

Çalışmada geleneksel bir yöntem olan katı hal reaksiyonuyla pigment üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle çalışma için kullanılan katı hal reaksiyonu ve çalışma prensibi Şekil 1’de kısaca tanımlanmıştır.



Şekil 1. Pigment üretim akış şeması

Hammaddelerin karıştırılmasındaki amaç, pigment üretiminde kullanılacak, başlangıç hammaddelerinin homojenizasyonunu sağlamaktır. Homojenizasyon kuru veya yaş karıştırma işlemiyle yapılabilmektedir. Yaş halde karıştırma genellikle su veya alkolle yapılmaktadır. Yaş karıştırma işlemi ve kuru karıştırma işlemine göre daha fazla homojenlik elde edilmesini sağlamaktadır. Kuru işlemle daha düşük homojenizasyon elde edildiğinden ürün kalitesi daha düşük olmaktadır (Tanışan 2008). Bu yüzden çalışmada başlangıç malzemelerinin boyut küçültmesi için kuru öğütme ve pigment homojenizasyonu için yaş öğütme tercih edilmiştir. Kalsinasyon işlemi pigment oluşumunda fazların oluştuğu aşama olarak açıklanmaktadır. Kalsinasyon pigment hammaddelerine ısı işlem uygulanmasını sağlar ve kimyasal difüzyon sonucunda pigmentleri oluşturan bileşenlerin reaksiyonları oluşmaktadır (Taykurt 2006).

Uygulanan sıcaklığın yetersiz olması veya uygulanan sürenin kısa olması renklerin kararsız bir şekilde oluşmasına yol açar ve renk oluşumunda ihtiyaç duyulan reaksiyonlar tamamlanamaz.

Kalsinasyon sonrası elde edilen ürünleri kullanabilmek için öğütme yaş veya kuru bir şekilde gereklidir. Pigment üretim aşamasında öğütme süreci önemlidir, çünkü pigmentlerden istenilen optik özellikler pigmentin tane boyutuna, kimyasal ve ısısal kararlılığına bağlı olmaktadır (Taykurt 2006).

Uygun tane boyutu elde edilmezse pigmentin sır içerisinde dağılımı iyi olmaz. Aşırı öğütme sır üzerinde atma ve toplama gibi hatalara sebep olmaktadır. Bazı sıcaklıklarda özellikle sıran ulaştığı yüksek sıcaklıklarda kimyasal etkiyle birlikte pigment sırda çözünebilir. Bu etkinin olmaması içinde, sırda kullanılan pigmentin 2 μ m'den daha az tane boyutunun

olmaması istenmektedir. En iyi ve nitelikli renk gücü sağlamak için pigment partiküllerinin tane boyutunun iyi bir şekilde ayarlanması istenmektedir (Özel 2004).

Pigmentlerin yapısında kimyasal olarak bağlanamayan tuz ve iyonların atılması için öğütme sonucunda pigmentlerin bazılarının suyla yıkanarak temizlenmesi gerekmektedir. Pigmentin uygulanacağı sistem gerekliliklerine göre yıkamanın kalitesine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yıkama işlemi doğru bir şekilde yapılmazsa üretilen sırlarda kabarcık, kabuk ve iğne başı vb. hatalar ortaya çıkabilmektedir (Tanışan 2008).

Yıkama işleminden sonra pigmentin içerisinde kullanılan sudan düşük sıcaklıkta kurtulmak amacıyla yapılan işlem kurutma işlemidir. Kurutma numunenin miktarına göre değişen sürelerde yaklaşık 100 °C’ta yapılan bir işlemdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışmada Kullanılan Hammaddeler

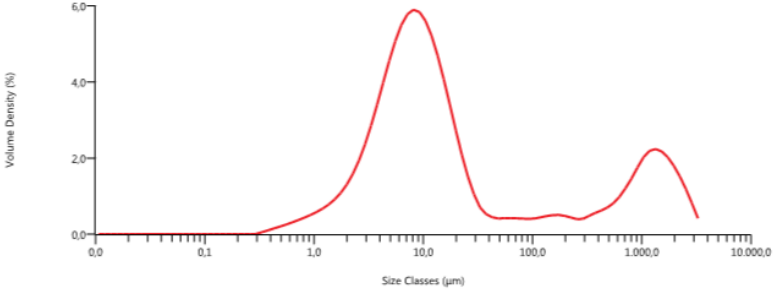
Çalışmada kullanılan hammaddeler, manyetit minerali Kütahya Emet ilçesinde Ferromat madencilik A.Ş., Kromit minerali Bursa Harmancık ilçesinde bulunan Hayri Ögelman madencilik A.Ş’den temin edilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan mangan minerali Kütahya Altıntaş İlçesi Alibey köyündeki mangan yatağından sağlanmıştır. Kullanılan hammaddelere çalışmaya başlamadan önce kimyasal analiz (XRF) ve tane boyut analizi yapılmıştır. Örneklerin XRF için eritışı Panalytical marka Eagon 2 model cihazında, kimyasal analizi Panalytical marka Axios MAX model cihazında yapılmıştır. Pigment üretiminde kullanılan hammaddelerin kimyasal analizi Tablo 1’de verilmiştir. Manyetit, Kromit ve Mangan minerallerinin tane boyut analizleri Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4’te verilmiştir. Ayrıca Manyetit, Kromit ve Mangan

minerallerinin 1200°C'ta ısıtılması sonucu oluşan renk ve değişimlerinin görseli Şekil 5'te verilmektedir.

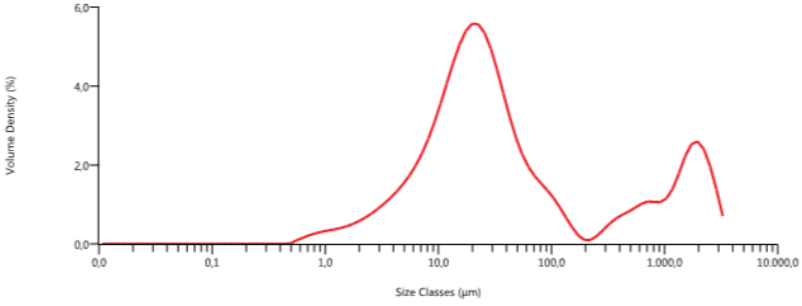
Tablo 1. Pigment üretiminde kullanılan hammaddelerin kimyasal analizi

<i>Oksitler</i>	<i>Kromit</i>	<i>Mangan</i>	<i>Manyetit</i>
SiO ₂	10.61	1.98	2.98
Al ₂ O ₃	5.22	0.27	0.95
Fe ₂ O ₃	20.57	17.45	89.93
CaO	0.23	15.44	1.51
MgO	20.64	0.28	3.91
BaO	-	0.49	-
TiO ₂	0.14	0.02	0.03
Cr ₂ O ₃	39.56	0.04	-
As ₂ O ₃	-	-	0.43
V ₂ O ₅	-	-	0.27
P ₂ O ₅	-	-	0.09
ZnO	0.12	-	-
MnO	0.26	19.46	-
NiO	0.17	0.07	-
SO ₃	0.02	0.13	0.11
L.o.I*	0.98	43.6	0.57

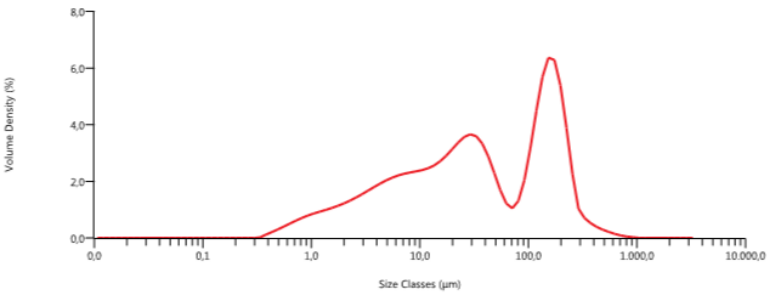
*L.o.I: Kızdırma kaybı



Şekil 2. Manyetitin başlangıç tane boyutu dağılımı



Şekil 3. Kromitin başlangıç tane boyutu dağılımı



Şekil 4. Manganın başlangıç tane boyutu dağılımı



Şekil 5. Manyetit, Kromit ve Mangan minerallerinin 1200°C'ta ısı karşısındaki renk ve değişimlerinin görseli

3.2. Pigment Sentezi ve Karakterizasyonu

Bu çalışmada manyetit, kromit ve mangan hammaddeleri değişen miktarlarda karıştırılarak pigment sentezleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan pigmentlerin karışım oranları Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Hazırlanan pigmentlerin karışım oranları

Numune	Manyetit	Kromit	Mangan
S1	50	25	25
S2	50	30	20
S3	50	35	15
S4	50	20	30
S5	50	15	35

Bu karışımlar homojen olarak karıştırıldıktan sonra 1 saat porselen krozeler içerisinde 1200°C'ta kalsine edilmiştir (Şekil 6). Daha sonra elde edilen ürünler yaklaşık 1 saat jet değirmende sulu olarak homojen bir şekilde öğütülmüş, filtrelenmiş (Şekil 7), kurutulmuş ve elenmiştir. Toz halindeki numuneler sıra ilave edilmiştir. Ayrıca küçük peletler basılarak görsel renk karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 8).



Şekil 6. Porselen krozeler içerisinde 1200°C'ta kalsine edilerek hazırlanmış pigmentler

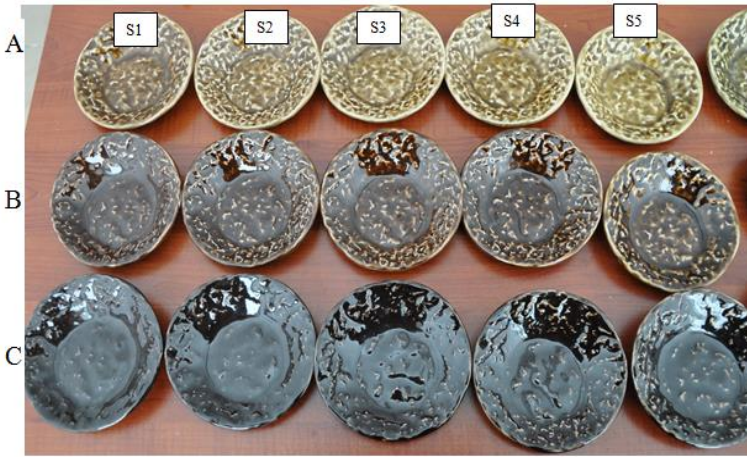


Şekil 7. Hazırlanan kalsine edilmiş pigmentlerin filtrelenerek suyunun ayrılması



Şekil 8. Pigment tozların üretilen küçük peletler

Üretilen toz haldeki ürünler pigment olarak 1150 °C pişen şeffaf seramik sıra ağırlıkça % 5, 10 ve 15 oranında değişen miktarlarda sır içerisine ilave edilmiş ve sırla birlikte 15 dak. sulu bir ortamda karıştırılarak homojen hale getirilmiştir. Hazırlanan sırların viskozitesi 15 sn, ford cup viskozimetresi kullanılarak ölçülmüş ve litre ağırlığı 1450 g/l'ye ayarlanmıştır. Daha sonra sırlar daldırma yöntemiyle seramik bünye üzerine uygulanmış ve 1150 °C' de 6 saat süreyle pişirilmiştir. Pişirilen sırlı bünyelerin renk ölçümleri yapılmıştır. Şekil 9'da pigment tozlarının şeffaf sır içerisine ağırlıkça % 5, 10 ve 15 oranında ilavesi sonrasında A, B ve C şekilde değerlendirilmiş numunelere ait fotoğraflar bulunmaktadır.



Şekil 9. Pigment tozlarının şeffaf sır içerisine ağırlıkça % 5, 10 ve 15 oranında ilavesi sonrasında numunelere ait fotoğraflar

Renklerin karakterizasyonunda çeşitli renk sistemleri geliştirilip kullanılmasına rağmen CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) sistemleri yaygın olarak daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Bu sistem, renk algılama teorisinden daha fazla deneysel gözlemler içermektedir. Renklerin ölçümünde, kullanılan yüzey, ışık kaynağı ve gözlemci daima

göz önünde bulundurulmalıdır. Renk ölçümü Şekil 'de görüldüğü gibi $L^*=100$ beyazdan $L^*=0$ siyaha, (-a) yeşilden (+a) kırmızıya ve (-b) maviden (+b) sarıya değişim göstermektedir (Eppler 2000). Bu değerlerin ölçümleri sonucunda L^* değeri artarsa beyazlığa, L^* değeri azalırsa siyaha doğru, $-a^*$; yeşillik, $+a^*$; kırmızılık, $-b^*$; mavilik $+b^*$; sarılık, renk değerlerini ifade etmektedir.

Farklı oranlardaki bu katkıların son ürüne olan etkisini görmek amacıyla farklı oranlarda pigment içeren sırların pişirim sonrası $L^*a^*b^*$ değerleri ölçülmüş ve Tablo 5'te verilmiştir. Bu test için Konica Minolta-Spectrophotometer CM-700 d cihazı kullanılmıştır.

Tablo 5. % 5, 10 ve 15 gibi farklı oranlarda pigment bulunduran sırların pişirim sonrası $L^*a^*b^*$ değerleri

S_1	A	B	C
L	45,79	32,47	26,79
a	7,95	4,54	2,19
b	17,96	5,02	1,39

S_2	A	B	C
L	51,50	34,66	27,55
a	7,35	5,31	1,90
b	20,6	7,40	1,49

S_3	A	B	C
L	42,91	32,08	29,31
a	7,37	5,32	1,75
b	19,69	6,70	1,00

S ₄	A	B	C
L	49,17	29,36	29,02
a	6,30	3,76	2,18
b	22,6	4,39	2,35

S ₅	A	B	C
L	51,39	39,78	28,24
a	5,28	5,46	1,30
b	25,16	10,58	1,20

4. SONUÇ

Bu çalışmada kullanılan manyetit, kromit ve mangan minerallerinin kimyasal olarak yapılarında farklı oksitleri bulunmaktadır. Manyetit, kromit ve manganın yapısında bulunan bu oksitler seramik sırlarının renklendirilmesinde kullanılan pigmentlerde kullanılan oksitlerdir. Bu hammaddeler içerisinde bulunan bu elementlerden dolayı seramik sektöründe özellikle renk etkileşimi açısından bünye ve sır reçetelerinin içerisinde renklendirici olarak değerlendirilebileceği düşünülmüştür. Bu çalışmada da özellikle pigment olarak sır reçetesi içerisinde davranışları ve renk etkileri incelenmiştir.

Sırda kullanılan pigmentler reçetede homojen dağılım göstermeli, oluşturulan sır kompozisyonuyla uyum sağlayarak sırnın camsı tabakası içerisinde renk verme etkisini korumalıdır. Ayrıca sırnın yüzey kalitesini değiştirmeden ve hatalara sebebiyet vermeden pişirme sonunda oluşan camsı yapının içerisindeki kristal yapısını korumalıdır.

Yapılan bu çalışmada kullanılan manyetit, kromit ve mangan mineralleri değişen miktarlarda karıştırılıp kalsine edilerek şeffaf seramik sır reçeteleri içerisine değişen oranlarda eklenerek seramik bünyeye uygulanmıştır. Daha sonra renk değişimleri ve sır yüzeyindeki değişim etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmalarda karıştırılan manyetit, kromit ve mangan minerallerinden sağlanan farklı $L^*a^*b^*$ renk parametreleri incelendiğinde; L^* , a^* ve b^* değerlerinin artan renklendirici oranlarına göre azaldığı tespit edilmiştir. Bu da L^* değerinin azalmasıyla renklendiricilerin koyulaştığı ve siyaha yaklaştığını, a^* değerinin azalmasıyla yeşile yaklaştığını, b^* değerinin azalmasıyla sarıya doğru değişim gösterdiği ifade edilebilir.

Bu çalışma sonucunda seramik bünyelerin yüzeyine uygulanan manyetit, kromit ve mangan minerallerinin karışımıyla renklendirilmiş şeffaf sırlarda açık kahverengiden koyu kahverengiye değişen renk tonlarının elde edilebileceği görülmektedir. Manyetit, kromit ve mangan minerallerinin karıştırılıp kalsine edilmesiyle birlikte bu hammaddelerden renklendirici olarak yararlanılabileceği ve şeffaf seramik sırlarının özellikleri değişmeksizin sırası renklendirmek amacıyla kullanılabileceği görülmüştür.

5. KAYNAKÇA

- Eppler, R.A., (2000), Glazes and Glass Coatings, Am. Ceram. Soc., Westerville, 130-135.
- Özel, E. & Turan, S. (2003). Production and characterisation of iron-chromium pigments and their interactions with transparent glazes, Journal of the European Ceramic Society, Volume 23, Issue 12, P. 2097-2104, [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00036-0)
- Özel, E. (2004), Seramik pigmentlerin üretimi, karakterizasyonu ve uygulaması, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Tanişan, B. (2008), Kamaralı ve döner fırınlarda siyah seramik pigment üretimi ve karakterizasyonu, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Taykurt, M., Geleneksel Yöntemle Pigment Üretimi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Rapor (Yayınlanmamış), 2006.

SÜPERİLETKEN SİSTEMLER, TEMEL ÖZELLİKLERİ VE TEKNOLOJİDEKİ ÖNEMİ¹

Kübra YAKINCI²

M. Eyyuphan YAKINCI³

1. GİRİŞ

Süperiletkenlik olgusu, Hollandalı fizikçi Heike Kamerling Onnes' in 1911 yılında metalik cıva'nın 4.2K' de sıfır direnç göstermesi ile ilk kez ortaya çıkmış bir kavramdır. Bu sıra dışı faz geçişi bilim insanları tarafından oldukça ilgiyle karşılanmış ve o tarihten günümüze kadar çok sayıda elementel, metalik ve alaşım gibi farklı form ve özellikte yeni süperiletken malzemelerin keşfini de beraberinde getirmiştir. Süperiletkenlik olgusu günümüzde de güncelliğini korumakta olup dünya çapında birçok grup tarafından çalışılmakta ve daha çok ileri teknolojik ürünlerin ortaya konulmasına yönelik çalışmalar literatürde yerini almaktadır.

2. SÜPERİLETKEN SİSTEMLER

Süperiletkenlik olgusunun keşfedildiği günden itibaren yüzlerce süperiletken malzeme ortaya çıkarılmıştır.

¹ “FeSe-Tabanlı Yeni Nesil Süperiletken Alaşımların Tek Kristal Formda Üretimi, Karakterizasyonu ve Mühendislik Uygulamaları” başlıklı Doktora Tezinden Türetilmiştir.”

² Dr. Öğr. Üyesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Hatay, İskenderun/Türkiye. kubra.yakinci@iste.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1257-1532.

³ Prof. Dr., İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Hatay, İskenderun/Türkiye, meyyuphan.yakinci@iste.edu.tr, ORCID:0000-0002-3244-6432

Süperiletkenlik olgusu 1980' li yıllara kadar “konvensiyonel” ve “konvensiyonel olmayan” terimleri ile ifade edilmiştir. Cooper çiftinin toplam spin “S” ve toplam açısal momentum “L” değerleri süperiletkenlerin konvensiyonel olup olmadıkları hakkında bilgi vermektedir.

Konvensiyonel süperiletkenlerde elektronlar örgü titreşimleri aracılığı ile birbirleriyle etkileşirler. Bir Cooper çiftinin iki elektronu, çiftin toplam açısal momentum değeri “L” ile toplam spin açısal momentumu “S” değerinin sıfırlandığı bir durumu oluştururlar. Bu olayı, bir s dalgası olarak $L = 0$ değerine sahip olan çift durumu şeklinde ifade edebiliriz ve bu durum izotropiktir. Konvensiyonel süperiletkenlerin bir diğer kriteri de manyetik olmamalarıdır. Genellikle, manyetik düzen ve süperiletkenlik, Ru-bazlı süperiletkenlerin keşfine kadar birbirine zıt iki kutbu temsil eden kavramlar olarak ele alınmıştır (Onar, 2017; Flouquet vd.,2002). Ancak, 2001 yılından itibaren her iki durumun bir arada bulunduğu sistemler keşfedilmeye başlanmıştır. Süperiletken malzemeler daha sonra kristal yapılarına ve sergiledikleri süperiletkenlik mekanizmalarına göre elementel süperiletkenler, süperiletken alaşım/metalik bileşikler ve yüksek sıcaklık (HTS) süperiletken sistemler (oksit bazlı) olmak üzere üç farklı grupta sınıflandırılmıştır (Mourachkine, 2004). Aşağıda bunlar detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

2.1. Elementel Süperiletkenler

Süperiletkenlik olgusunun ilk kez ortaya çıkarıldığı ve süperiletkenlik mekanizmalarının BCS teorisi ile açıklanabildiği grup elementel süperiletkenlerdir. Kritik sıcaklıkları genel olarak 10 K' in altında olup I. tip süperiletkenler olarak bilinirler. Elementel süperiletkenlerin kritik sıcaklık ve kritik manyetik alan değerlerinin düşük olması teknolojik uygulamalar açısından uygun olamayacaklarını ortaya koymaktadır. Yapılan

araştırmalar periyodik tablodaki kimyasal elementlerin büyük çoğunluğunun metalik formda çok düşük sıcaklıklarda süperiletken faza geçebildiklerini göstermiştir. Bu süperiletkenlerin bazıları Tablo 1’ de verilmektedir. Bununla birlikte, oda sıcaklığında elektriği mükemmel ileten Cu, Ag ve Au gibi soy metallerin süperiletken faza geçemedikleri de bilinmektedir.

Tablo 1. Bazı elementel süperiletkenler için önemli süperiletkenlik parametreleri

Element	$T_c(K)$	$\xi(0) (\text{\AA})$	$\xi_c(0) (\text{\AA})$	$H_c(T)$
Al	1.1	500	16000	0.01
Pb	7.2	390	830	0.08
Sn	3.7	510	2300	0.03
In	3.4	640	4400	0.03
Tl	2.4	920	-	0.02
Cd	0.56	1300	7600	0.003

Kaynak: Mourachkine, 2004.

Elementel süperiletkenler katı hallerinde süperiletken özelliktedirler, ayrıca bazı elementel süperiletkenler normal basınçta süperiletkenlik sergilemezken uygulanan belirli bir basınç değerinde süperiletken durum ortaya çıkabilmektedir. Bu duruma verilebilecek en iyi örnekler; Fe, Si ve Ge gibi yarıiletken özellik sergileyen elementler olup, bunlar yüksek basınç altında süperiletken davranış göstermektedirler. Bu şekilde basınç altında süperiletkenlik gösteren elementlerin bilinen özellikleri de Tablo 2’ de özetlenmektedir.

Tablo 2. Sadece yüksek basınç altında süperiletken özellik sergileyen elementel süperiletkenler

<i>Element</i>	<i>T_c (K)</i>	<i>Basınç (kbar)</i>	<i>Element</i>	<i>T_c (K)</i>	<i>Basınç (kbar)</i>
As	0.5	120	Li	20	500
B	6	1750	Lu	0.02-1.1	45-180
Ba	5.1	>140	O	0.6	1000
Bi II	3.9	>26	P	4.6-6.1	>100
Bi III	7.2	>27			
Bi V	8.5	>78			
Ce	1.7	>50	S	17	1600
Cs	1.5	100	Sb	3.6	>85
Fe	2	150-300	Se	6.9	>130
Ge	5.4	>110	Si	6.7	>120
			Te	4.5	>43

Kaynak: Buckel vd., 2004.

2.2. Süperiletken Alaşım ve Metalik Bileşikler

Süperiletken alaşım ve bileşikler sınıfında, genellikle düşük boyutlu ve manyetik/manyetik olmayan çok sayıda farklı sistem yer almaktadır (Robert vd., 1964). Bu gruptaki süperiletken sistemlerin kritik sıcaklıkları genellikle 40 K' den daha az olup kritik alan değerleri 15-20 T değerinin üzerinde olabilmektedir. Alaşım ve bileşik formundaki süperiletkenler II. tip süperiletkenlik davranışı göstermektedirler. Bu grubun en iyi bilinen süperiletken sistemleri Tablo 3' te verilmektedir.

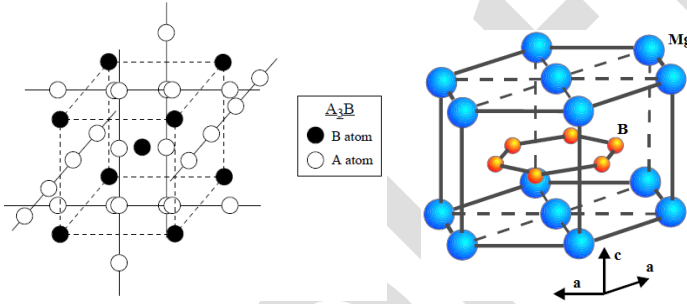
Tablo 3. A15 yapısına sahip süperiletkenler ve özellikleri

Element	$T_c(K)$	$\lambda(0) (nm)$	$\lambda_c(0) (nm)$	$H_{c2}(T)$
V₃Ge	6	65	-	-
V₃Ga	14.2-14.6	65	4	23
V₃Si	17.1	70	4	23
Nb₃Sn	18.3	80	4	24
Nb₃Ge	23.2	80	3	38

Kaynak: Buckel vd., 2004; Robert vd., 1964; Soukoulis vd., 1982.

Tablo 3'te verilen süperiletkenlik parametreleri bu gruptaki süperiletkenlerin teknolojik uygulamalara uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte bu grupta en çok çalışılan malzemeler A15 (A_3B) tipi süperiletkenler ile MgB_2 sistemidir. Bu grubun en eski üyeleri ise Nb_3Ge ve Nb_3Sn sistemleri olup, bunlar geleneksel (konvensiyonel) olarak ta bilinmektedirler. Ayrıca magnet yapımı için önemli malzemelerdir. A15 süperiletken sistemine ait genel kristal yapı şekil 1a' da verilmiştir. A atomları bir boyutlu ortagonal üç zinciri oluşturan küpün yüzeylerinde konumlanırken, B atomları hacim merkezli kübik alt örgüyü oluşturur. Ortagonal zincirler kesişmez ve zincirdeki A atomları arasındaki mesafe zincirler arasındaki mesafeden yaklaşık % 20-25 oranında daha kısadır (Mourachkine, 2004). Aynı grupta Nb_3Os sistemi 1 K' de süperiletkenlik sergileyen ya da Nb_3Sb sistemi gibi hiç süperiletkenlik özelliği göstermeyen farklı alaşımlar da mevcut olmasına rağmen A15 sistemi oldukça önem taşımaktadır (Roberts, 1964; Clogston vd., 1961). Şöyle ki, sistemde yer alan bir boyutlu zincirler elektronik durum yoğunluğunda keskin pikler vermektedirler. BCS teorisine göre, bu durum süperiletkenlik mekanizması açısından önemli olup Fermi enerjisi durum yoğunluğu böyle bir pik bölgesinde

konumlandırılırsa iki etki beklenebilir: Birincisi, elektron-fonon etkileşmesinin çok güçlü olması, diğeri ise Fermi enerjisindeki durum yoğunluklarının sıcaklığa güçlü şekilde bağlı olmasıdır. Bu düşünceler Nb₃Sn ve V₃Si gibi malzemelerin elastik yapıları ile doğrulanmıştır (Buckel vd., 2004).



**Şekil 1. a) A₃B bileşiklerinin kristal yapısı (Mourachkine, 2004),
b) MgB₂'nin kristal yapısı**

Kaynak: Buzea vd., 2001.

2001 yılında Akimitsu ve grubu tarafından keşfedilen MgB₂ sisteminde ~39 K' de süperiletkenliğin ortaya çıkarılması bu malzemelere olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır (Nagamatsu vd., 2001). MgB₂ sistemi çok basit krsital yapıya sahip olup, c-ekseni boyunca sıralanan Mg ve B tabakalarından oluşmaktadır, Şekil 1b. Mg tabakaları üçgen örgü düzlemlerinden oluşurken, B tabakaları grafitte benzer şekilde hegzagonal bal peteği örgü düzlemlerinden oluşur. Bu düzlemler iki boyutlu yapıya sahip olup dolayısıyla iki boyutta süperiletkenlik sergilemektedirler. B tabakalarındaki komşu B atomları arasındaki mesafe yaklaşık olarak 0.178 nm ve Mg tabakalarındaki komşu Mg atomları arasındaki mesafe yaklaşık olarak 0.3086 nm' dir. Mg atomları, hegzagonal köşegenlerin merkezine yerleştirilirken, B atomları 60° döndürülen iç hegzagonda konumlanmıştır. Bu yapı, aynı zamanda AlB₂-tipi olarak da tanımlanmaktadır (Nagamatsu vd., 2001). II. tip süperiletke grubunda yer alan MgB₂' de

süperiletkenlik B tabakalarında meydana gelir ve elektron-fonon etkileşimlerinin önemli rol oynadığı bulunmuştur (Mourachkine, 2004). MgB_2 'nin önemli süperiletkenlik parametreleri Tablo 4'te özetlenmiştir. Bakır-tabanlı süperiletkenler ile karşılaştırıldığında MgB_2 sistemi düşük anizotropiye, büyük uyum uzunluğuna ve tanecik sınırlarında saydamlığa sahiptir. Bu özellikler de MgB_2 'yi teknolojik uygulamalar açısından yüksek sıcaklık süperiletken sistemler kadar avantajlı hale getirmektedir.

Tablo 4. MgB_2 sistemine ait süperiletkenlik parametreleri

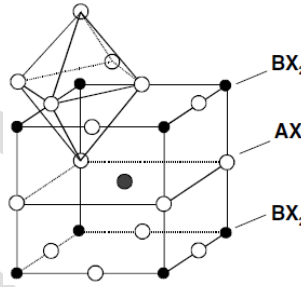
Parametreler	Değerleri
$T_c(K)$	$T_c \approx 39 K$
Örgü Parametreleri	$a = 0.3086 nm$ $c = 0.3524 nm$
Taşıyıcı Yük Yoğunluğu	$n_s = 1.7-2.8 \times 10^{23} holes/cm^3$
α_T	$\alpha_T = \alpha_B + \alpha_{Mg} = 0.3 + 0.02$
$H_{c2}(T)$	$H_{c2} // ab(0) = 14-39 T$ $H_{c2} // c(0) = 2-24 T$
$H_{c1}(T)$	$H_{c1}(0) = 27-48 mT$
$H_{irr}(T)$	$H_{irr}(0) = 6-35 T$
J_c	$J_c = (4.2 K, 0 T) > 10^7 A/cm^2$
$\xi_c(0) (nm)$	$\xi_{ab} = 3.7-12 nm$ $\xi_c(0) = 1.6-3.6 nm$
$\lambda(0) (nm)$	$\lambda(0) = 85-180 nm$
$\Delta(0)$	$\Delta(0) = 1.8-7.5 meV$

Kaynak: Nagamatsu vd., 2001.

2.3. Yüksek Sıcaklık (HTS) Süperiletkenler

Bir ya da daha fazla CuO_2 düzlemine sahip olan sistemler yüksek sıcaklık (HTS) süperiletkenler olarak

tanımlanmaktadır. Aslında oksitler, elektriksel olarak yalıtkan malzemeler olmasına rağmen CuO_2 düzlemlerine sahip HTS süperiletkenler bilinen en yüksek süperiletkenlik geçiş sıcaklıklarına sahip malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. HTS süperiletkenlerin kristal yapısı genel olarak ABX_3 ideal perovskite yapıya dayanmaktadır ve .Şekil 2' de görülmektedir. Burada A ve B atomları pozitif yüklü katyonları ve X atomları ise negatif yüke sahip metal olmayan anyonları temsil etmektedirler. B atomları oktahedral şeklindeki X atomları ile çevrelenmiş durumdadır (Ford vd., 2005). Yüksek derecede anizotropik özellik gösteren perovskite yapı, HTS malzemelerin fiziksel özellikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir (Mourachkine, 2004).



Şekil 2. Perovskite bileşiklerin genel kristal yapısı

Kaynak: Buckel vd., 2004.

HTS süperiletken sistemlerde süperiletkenliğin CuO_2 düzlemlerinde ortaya çıkmasından dolayı süperiletkenlik geçiş sıcaklıkları, birim hücre başına sahip oldukları CuO_2 düzlemlerinin sayısı ile ilişkili olup CuO_2 düzlemlerinin sayısı arttıkça artış göstermektedirler. Tablo 5' te HTS ailesine mensup üyeler ve bunların sahip oldukları CuO_2 düzlemlerinin sayısı ile geçiş sıcaklıkları verilmektedir (Mourachkine, 2004).

CuO_2 düzlemleri basit tetragonal yapıda olup her bir Cu iyonu dört O iyonuna bağlıdır. CuO_2 düzlemleri, bu düzlemlere yük taşınmasını sağlayan Bi, O, Y, Ba, La,... tabakaları ile

birbirlerinden ayrılırlar ve bu tabakalar genellikle yük rezervuarı olarak da bilinirler. Aşağıda HTS sistemlere ait genel özellikler kısaca açıklanmaktadır.

Tablo 5. HTS sistemlere ait genel özellikler

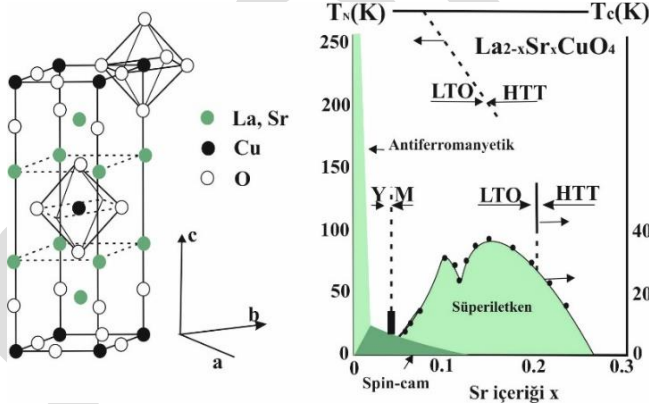
HTS aileler	CuO ₂ düzlemleri sayısı	T _c (K)	Kısaltmalar
La _{2-x} Sr _x CuO ₄	1	38	LSCO
Nd _{2-x} Ce _x CuO ₄	1	24	NSCO
YBa ₂ Cu ₃ O _{6+x}	2	93	YBCO
Bi ₂ Sr ₂ CuO ₆	1	10-15	Bi2201
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	2	90	Bi2212
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	3	110	Bi2223
Tl ₂ Ba ₂ CuO ₆	1	95	Tl2201
Tl ₂ Ba ₂ CaCu ₂ O ₈	2	105	Tl2212
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	3	125	Tl2223
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₄ O ₁₁	3	128	Tl1224
HgBa ₂ CuO ₄	1	98	Hg1201
HgBa ₂ CaCu ₂ O ₈	2	128	Hg1212
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	3	134	Hg1223

Kaynak: Fossheim vd., 2004

2.3.1. LSCO Süperiletken Sistemi

Keşfedilen ilk HTS sistem olup ~38 K' de süperiletken faz geçişine sahiptir. Genel kristal yapısı şekil 3a' da verildiği gibi tetragonal birim hücre yapısında olup ve iki adet La (Sr), bir Cu ve dört O atomu içerdiği için 214 yapısı olarak da bilinir. LSCO sisteminde CuO₂ düzlemleri yük rezervuarı olarak görev yapan iki adet LaO düzlemi ile ayrılmıştır. Sistemde O²⁻, La³⁺ valans durumundayken Cu atomu yük nötralliğini sağlamak amacıyla bir 4s ve bir de d elektronunu kaybederek Cu²⁺ durumuna geçiş yapar. Böylece d kabuğunda bir boşluk ortaya

çıkart ve Cu^{2+} sistemde 1/2 net spine sahip olur. Bununla birlikte c-ekseni boyunca iletkenlik düzlemindeki her bir Cu atomu alt ve üstünde birer O atomuna sahiptir, şekil 3a. Bunlar “tepe elektronları” olarak tanımlanmakta olup Cu iyonları O atomları ile çevrelenen oktahedral yapıdadır. Şekil 3b’ de LSCO sistemine ait faz diyagramı verilmiştir. Yüksek Sr katkısı için, $0.02 \leq x \leq 0.08$, uzun menzilli bir antiferromanyetik düzenden söz edilemez. Ancak, çok düşük sıcaklıklarda spin-cam fazı bulunmaktadır. $\sim 0.04-0.05$ ’ te yalıtkan-metal geçişi meydana gelmekte ve La ile Sr’ un yer değişimi sonucunda yüksek sıcaklık tetragonal fazdan (HTT) düşük sıcaklık ortagonal faza (LTO) ya da tam tersi olacak şekilde faz dönüşümü mümkündür (Mourachkine, 2004).



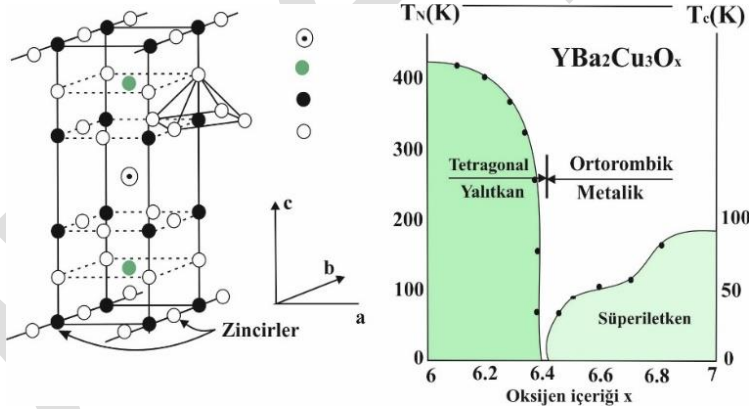
Şekil 3 a) LSCO süperiletken sisteminin kristal yapısı, b) Faz diyagramı

Kaynak: Mourachkine, 2004; Keimer vd., 1992; Onar, 2017).

2.3.2. YBCO Süperiletken Sistemi

YBCO, 77 K’ in üzerinde süperiletkenlik geçiş gösteren ilk sistem olması sebebiyle bu HTS sistemin keşfi süperiletkenlik tarihinde bir dönüm noktası niteliğindedir. Şekil 4 a ve b’ de sırasıyla kristal yapısı ve faz diyagramı görülmektedir. Buna göre, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ sistemi ortorombik

birim hücreye sahiptir. Sistemde CuO_2 düzlemleri $\text{CuO}_2\text{-Y-CuO}_2$ şeklinde tek bir Y atomu ile ayrılmış olup düzlemdeki her Cu iyonu beş O iyonunun oluşturduğu piramit ile çevrelenmektedir. Bununla birlikte BaO düzlemlerini ve HTS sistemlerin sadece birkaçında görülen bir yapı bir boyutta CuO zincirlerini de içermektedir. YBCO sistemine ait faz diyagramı, düşük sıcaklıklarda YBCO sisteminin tetragonal fazda olduğunu ve oksijen içeriği 6.4 değerine geldiğinde artık antiferromanyetik düzenin ortadan kaybolarak süperiletken fazın oluşmaya başladığı bilgisini vermektedir. Bununla birlikte O içeriği 6.95 değerine ulaştığında maksimum geçiş sıcaklığı ortaya çıkmaktadır. tetragonal birim hücre yapısına sahip $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ sisteminde O içeriği artırıldığında ortagonal yapı ortaya çıkmaktadır (Mourachkine, 2004).

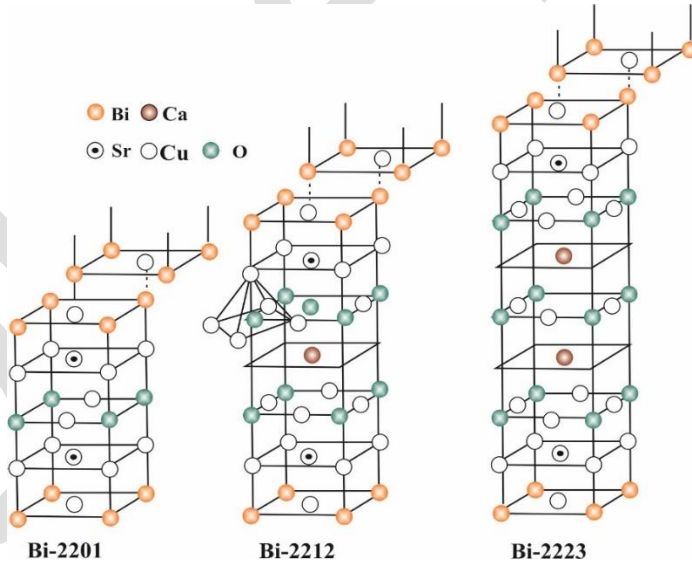


Şekil 4 a) YBCO süperiletken sisteminin kristal yapısı (Mourachkine, 2004), b) faz diyagramı (Mourachkine, 2004; Tranquada vd., 1988; Onar, 2017).

2.3.3. BSCCO Süperiletken Sistemi

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{4+2n+y}$ ($n = 1,2,3$) genel formülü ile üç farklı faza sahip olan BSCCO sistemi YBCO' nun ardından keşfedilmiş olup Bi-2201, Bi-2212 ve Bi-2223 şeklinde ifade edilen bu üç faz sırasıyla ~10, ~90 ve ~110 K de süperiletken

geçiş sıcaklıklarına sahiptirler [79, 80]. Şekil 5' te üç ayrı faza ait kristal yapı verilmekte olup, bu üç fazın iki birim hücreyi paylaşan tetragonal yapıda olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu üç faza ait birim hücreler, $(1/2, 1/2, z)$ kayması ile dizilen çift Bi-O düzlemlerini içerirler. Sonuçta, bir düzlemdeki Bi atomu, diğer ardışık düzlemdeki O atomunun altına konumlanır. Bi-2201 fazı Ca tabakası içermezken, Bi2212 ve Bi-2223 fazlarında CuO_2 düzlemlerinin içerisinde Ca tabakası bulunmaktadır. Bu fazlar arasındaki bir diğer farklılık, içerdikleri CuO_2 düzlemlerinin sayısı ve düzlemler içerisindeki Cu atomlarının koordinasyonudur. Buna göre Bi-2201, Bi-2212 ve Bi-2223 fazları c-ekseni boyunca sırasıyla 1, 2 ve 3 tane CuO_2 düzlemine sahiptirler buna bağlı olarak c-ekseni uzunlukları $\sim 24\text{-}37 \text{ \AA}$ arasında değişmektedir.



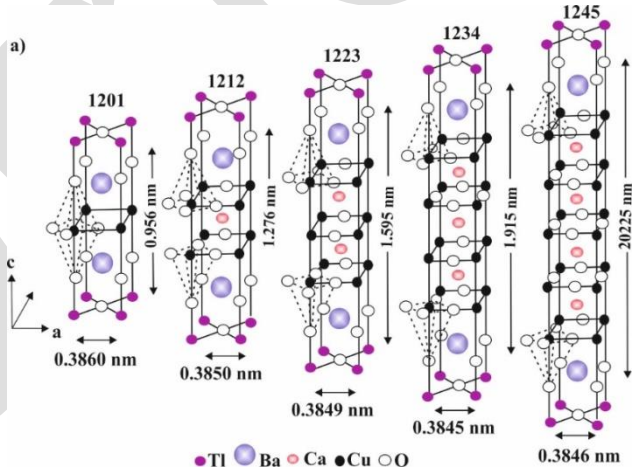
Şekil 5. BSCCO sistemindeki üç faza ait tetragonal kristal yapı

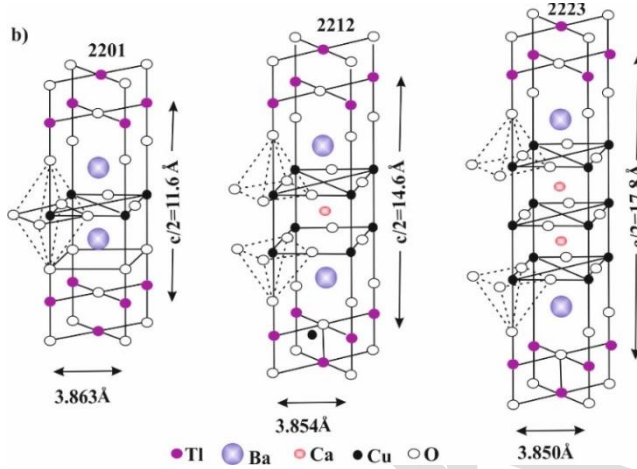
Kaynak: Saxena vd., 2010; Onar, 2017.

2.3.4. Tl-bazlı Süperiletken Sistem

BSCCO sisteminde Bi' un Tl ile ve Sr' un da Ba ile yer değiştirmesi sonucu Tl-bazlı HTS sistemler elde edilmiştir (Parkin vd., 1988). Şekil 6' da görüldüğü gibi TL-bazlı HTS süperiletkenler iki farklı seri halinde 10 farklı faza sahiptirler. Buna göre, ilk seri bir Tl-O tabakası içeren ve $TlBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+3}$ ($n=1-5$) genel formülü ile ifade edilen sistemlerdir. İkincisi ise, iki tane Tl-O içeren $Tl_2Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ ($n=1-3$) sistemidir.

Tl-bazlı HTS süperiletkenlere ait tüm fazlar tetragonal yapıdadırlar. Tl-bazlı HTS sistemin süperiletkenlik geçiş sıcaklığı Ca içermeyen fazlarda 80 K' in altında olduğu, Ca ilavesi ile 100 K' in üzerine artış gösterdiği ve son olarak süperiletkenlik geçiş sıcaklığının CuO_2 tabakalarındaki artış ile $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ sisteminde 125 K' e ulaştığı tespit edilmiştir (Parkin vd., 1988).

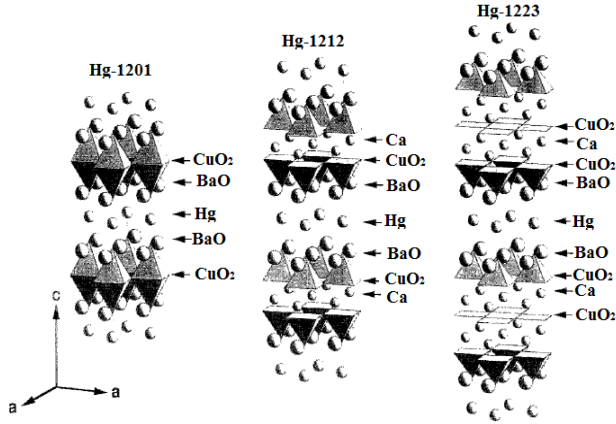




Şekil 6 Tl-bazlı HTS kristal yapıları a) $TlBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+3}$ genel formülü ile verilen seri, b) $Tl_2Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ genel formülü ile verilen seri (Schrieffer vd., 2007; Onar,2017).

2.3.5. Hg-bazlı Süperiletken Sistem

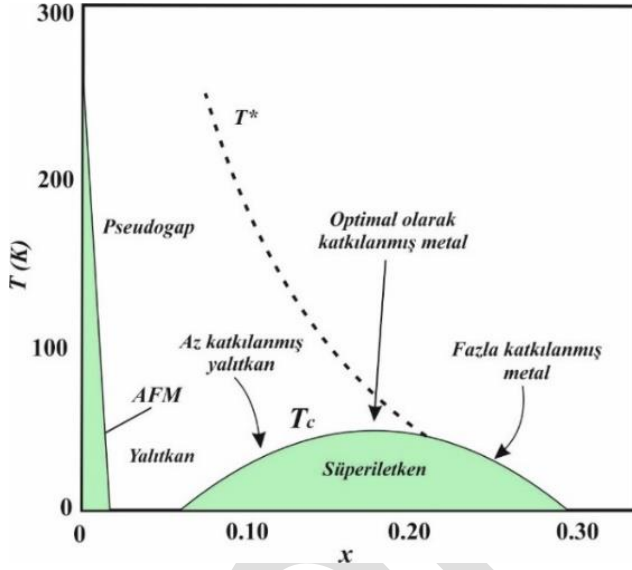
Hg-bazlı HTS sistemler, Tl-bazlı HTS sistemler ile büyük benzerlikler göstermekte olup Tl ile Hg' nin yer değiştirmesi sonucu elde edilmiştir. $HgBa_2CuO_4$ (Hg-1201), $HgBa_2CaCu_2O_6$ (Hg-1212) ve $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ (Hg-1223) sistemlerine ait kristal yapıları şekil 7' de verilmekte olup tetragonal birim hücreye sahip olan bu sistemlerinin süperiletkenlik geçiş sıcaklıkları sırasıyla 94 K, 128 K ve 134 K' dir (putlin vd., 1993). Bununla birlikte yüksek basınç altında Hg-1223 sisteminin süperiletkenlik geçiş sıcaklığının 164 K' e kadar yükseldiği görülmüştür. Bu durum Hg-bazlı sistemlerde T_c ' nin kristal yapıdaki çok küçük değişimlere dahi duyarlı olduğunu doğrulamaktadır (Chu vd., 1993). HTS sistemler arasında en yüksek geçiş sıcaklığına sahip olmalarına rağmen Tl- ve Hg-bazlı sistemlerin toksik özellikleri ve yüksek anizotropiye sahip olmaları teknolojik olarak uygulanabilirliklerini sınırlandırmaktadır.



Şekil 7. Hg- bazlı HTS sistemin üç fazına ait kristal yapılar

Kaynak: Poole vd., 1995; Onar, 2017.

Bi/Tl/Hg-bazlı HTS sistemlerde süperiletkenlik özellikleri yapılan katkılama ve katkılama oranlarına duyarlıdır. Bu durum şekil 8’ de katkılama parametresine göre faz diyagramında açıkça ortaya konulmaktadır. Bi/Tl/Hg-bazlı HTS sistemleri sıfır katkılama civarında antiferromanyetik bir faz sergilerler ve bunu yalıtkan faz takip eder. Belirli bir katkılama aralığında metalik fazın hemen altında süperiletken faz ortaya çıkarken artan katkılama oranlarında T_c ‘nin tekrar sıfıra düştüğü gözlemlenir (Mourachkine, 2004). Süperiletkenlik ise en yüksek T_c ‘ye karşılık gelen optimal katkılama seviyesinde oluşur. Diyagramda tümsek şeklindeki eğrinin üst tarafı konvensiyonel olmayan metalik bölgeyi temsil eden normal durumdur. Kesikli çizginin sağ tarafı daha çok normal metalik özelliklere sahipken sol tarafındaki bölge metalik özellikler sergileyen “*pseudogap bölgesi*” olarak tanımlanır (Anderson vd., 1987).

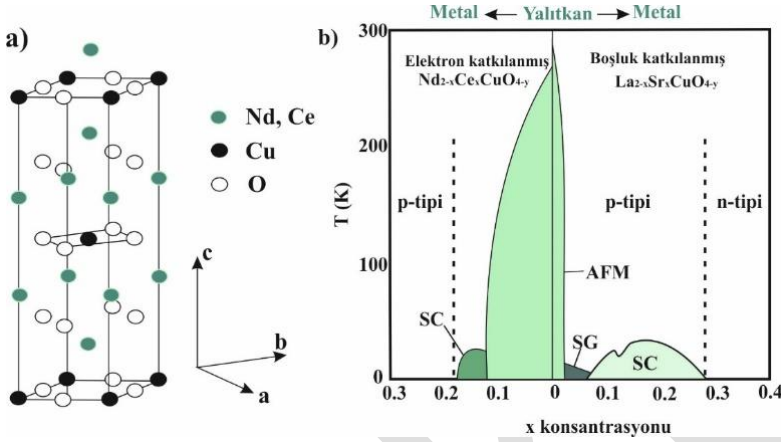


Şekil 8. Tl/Bi/Hg-tabanlı yüksek sıcaklık süperiletkenlerin katkılama oranına bağlı genel faz diyagramı

Kaynak: Fossheim vd., 2004; Onar, 2017

2.3.6. NCCO Süperiletken Sistemi

NCCO olarak ifade edilen ve ~ 24 K' de geçiş gösteren $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ sistemi HTS ailesinin bir diğer üyesidir. Elektron katkılanmış olan NCCO' nun kristal yapısı LSCO sistemine benzer olup, tetragonal birim hücre yapısı şekil 9a'da verilmektedir. Ayrıca NCCO HTS sistemine ait faz diyagramı, LSCO sisteminin faz diyagramı ile karşılaştırmalı olarak şekil 9b' de verilmektedir.



Şekil 9 a) NCCO süperiletken sisteminin kristal yapısı, b) faz diyagramı

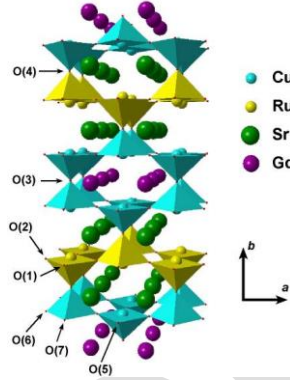
Kaynak: Mourachkine, 2004; Onar, 2017.

İki faz diyagramının da çok benzer olduğu, Neel sıcaklığında antiferromanyetik bir davranış sergiledikleri ve x konsantrasyonunun artmasıyla süperiletken fazın antiferromanyetik faza daha yakın olarak ortaya çıktığı görülmektedir (Mourachkine, 2004).

2.3.7. Ruthenocuprate Süperiletken Sistemi

Süperiletkenlik ve manyetizmanın bir arada bulunabileceği fikrinin ilk kez ortaya atılmasına sebep olan malzeme Ruthenyum bazlı bir sistem olan ve 1997’ de keşfedilen $\text{RuSr}_2(\text{Gd}, \text{Sm}, \text{Eu})_2\text{Cu}_2\text{O}_{10-\delta}$ (Ru-1222) sistemi ile (Felner vd., 1997; Felner vd., 1998) bunu takiben 1999’ da keşfedilen $\text{RuSr}_2\text{GdCu}_2\text{O}_8$ (Ru-1212) sistemidir (Bernhard vd., 1999; Tallon vd., 1999; Pingle vd., 1999). Bu yapılar *Ruthenocuprate* olarak tanınırlar. HTS sistemlerin en köklü ailesi olan Cuprate süperiletkenler ile benze özellikleri olduğu gibi birçok farklılıklara da sahiptirler. Ruthenocuprate sistem şekil 10’ da gösterildiği gibi, tetragonal birim hücreye sahiptir. RuO_2 tabakaları CuO_2 tabakaları için yük rezervuarı rolünü

üstlenmektedirler. En belirgin özellikleri ise $T_M \sim 130\text{ K}$ ’ de manyetik olarak düzenlenmeleri ve $T_c \sim 40\text{ K}$ ’ de süperiletken faza geçmeleridir.



Şekil 10. Ruthenocuprate sisteminin kristal yapısı

Kaynak: <http://yclept.ucdavis.edu/pics/Ru1212.jpg>; Onar, 2017.

Sonuç olarak, bu sistemler oda sıcaklığından itibaren manyetik özellik göstermekte ve $T_M \sim 130\text{ K}$ civarlarından itibaren klasik metalik özellik göstermeye başlamaktadır. $\text{RuSr}_2\text{GdCu}_2\text{O}_8$ (Ru-1212) sistemi için $T_M \sim 130 - 150\text{ K}$ ve $T_c \sim 30 - 45\text{ K}$ iken $\text{RuSr}_2(\text{Gd,Sm,Eu})_{1.6}\text{Ce}_{0.4}\text{Cu}_2\text{O}_{10-\delta}$ (Ru-1222) sistemi için $T_M \sim 90 - 180\text{ K}$ ve $T_c \sim 30 - 40\text{ K}$ ’ dir. Yapıdaki manyetik düzenin RuO_2 tabakalarındaki Ru iyonlarının düzenlenişinden kaynaklandığı düşünülmektedir ve bununla birlikte süperiletkenlik ile manyetik düzenin homojen olarak bulunduğu hem manyetik ölçümlerden hem de NMR ölçümlerinde kesin olarak doğrulanmıştır (Mourachkine, 2004). HTS sistemlerin süperiletkenlik parametreleri tablo 6’ da özetlenmektedir.

Tablo 6. Yüksek sıcaklık süperiletken (HTS) sistemlerin genel karakteristik özellikleri

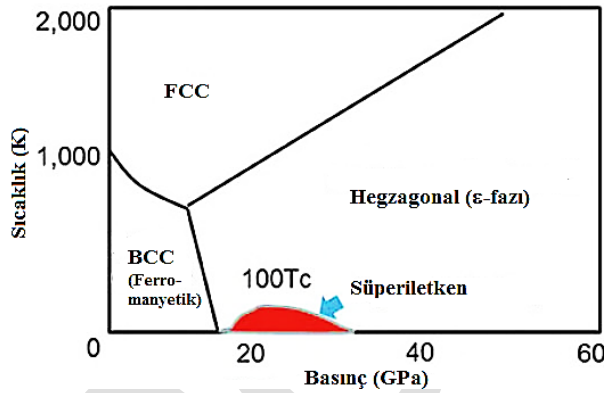
Bileşik	$T_c(K)$	$\lambda_c(nm)$	$\lambda_c(nm)$	$\xi_{ab}(nm)$	$\xi_c(nm)$	$H_{c2\perp}(T)$	$H_{c2\parallel}(T)$	Ref
$La_{1.83}Sr_{0.17}CuO_4$	38	100	2-5	2-3	0.3	60		[96]
$Yb_{a_2}Cu_3O_{7-x}$	93	150	0.8	1.6	0.3	110	240	[97,98]
$Bi_2Sr_2CuO_{6+x}$	13	310	0.8	3.5	1.5	16-27	43	[99]
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8-x}$	94	200-300	15-150	2	0.1	>60	>250	[96]
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$	107	150	>1	2.9	0.1	40	>25	[100]
$Tl_2Ba_2Cu_3O_{6+x}$	82	80	2	3	0.2	21	300	[101,102]
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8-x}$	97	200	>25	3	0.7	27	120	[101,103]
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$	125	200	>20	3	0.5	28	200	[104,105]
$HgBa_2CuO_{4+x}$	95	120-200	0.2-0.45	2	1.2	72	125	[106]
$HgBa_2CaCu_2O_{6+x}$	127	205	0.8	1.7	0.4	113	450	[106]
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$	135	130-200	0.7	1.5	0.19	108		[106-108]
$HgBa_2Ca_3Cu_4O_{10+x}$	125	160	7	1.3-1.8		100	>200	[109,110]
$Sm_{1.85}Ce_{0.15}CuO_{4-y}$	11.5			8	1.5			[111]
$Nd_{1.84}Ce_{0.16}CuO_{4-y}$	25	72-100		7-8	0.2-0.3	5-6	>100	[112,113]
$RuSr_2R_2Cu_2O_{10}$ (R=Gd, Eu, Y)	30-40		0.03-0.05	6-7.5	1	>44		[38,94]

Kaynak: Buckel vd., 2004.

2.3.8. Demir-Tabanlı Süperiletken Sistemler

HTS süperiletken sistemlerden sonra en yüksek süperiletkenlik geçiş sıcaklıklarının gözlendiği sistemler Fe-bazlı süperiletkenler ailesinin üyeleri arasındadır. Fe-bazlı süperiletkenler konusunda ilk ciddi çalışma 2008 yılında H. Hosono' nun $LaFeAsO_{0.9}F_{0.1}$ sisteminin 26 K' de süperiletkenlik faz geçişini bulmasıyla başlamış ve beraberinde bir çok araştırma grubu tarafından çok sayıda çalışma literatüre kazandırılmıştır. Günümüzde de süperiletkenlik çalışmaları açısından güncelliğini koruyan bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır

Fe-bazlı süperiletken sistemler, Fe-kare örgüsüne sahiptirler. Bu süperiletkenlerin ana fazlarında Fermi seviyesinin ilk olarak Fe' in 3d orbitallerinden oluştuğu düşünülmekte olup uzun menzilli bir spin düzenine sahip olmadıkları kabul edilmektedir. Saf Fe'e ait faz diyagramı şekil 11'de verilmektedir (Johnson vd., 2015).

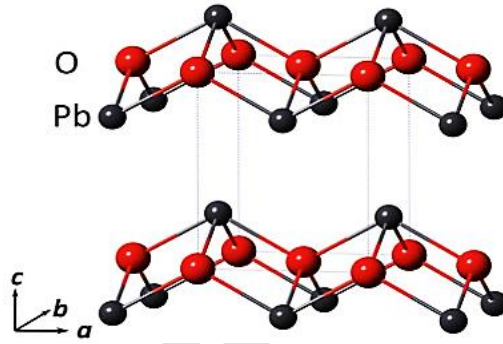


Şekil 11. Saf Fe' e ait faz diyagramı

Kaynak: Johnson vd., 2015; Onar, 2017.

Fe-bazlı süperiletken sistemlerde elektron katkılamaıyla yüksek simetrlili tetragonal fazın antiferromanyetik spin düzenini dengeleyen düşük simetrlili faza kristal dönüşümünü baskılayarak süperiletkenliği meydana getirdiği bulunmuştur (Shimizu vd., 2001). Yapılan çalışmalar sonucunda Fe-bazlı süperiletken sistemlerin FeAs-bazlı ve FeCh-bazlı iki ayrı grupta farklı fazlara sahip olduğu bulunmuştur. Genel olarak, Fe-bazlı süperiletken sistemler, anti-PbO-tipi atom düzenlenişine sahip Fe_2X_2 ($X=As$ ve Se) tabakalı birim hücre yapısını paylaşırlar. PbO' in kristal yapısı Şekil 12' de gösterildiği gibi $P4/nmm$ uzay grubunda tetragonal örgü simetrisine sahiptir (Leciejewicz vd., 1961). Burada, siyah küreler Pb(II)' u ve kırmızı küreler O atomlarını temsil etmektedirler. Pb konumlarında tek elektron çiftleri mevcuttur. Böyle yapılarda hareketsiz çiftlerin varlığı

kovelent bağlanmayı göstermektedir. Dolayısıyla, PbO 'daki kimyasal bağlanma tamamen kovelenttir. Pb(II) 'un kimyasal olarak üç boyutlu belirgin çiftlerin gücü piramit şeklindeki tetragonal yapılanmaya ve basık tetrahedron oluşumuna uyar. Atomlar O ile tetragonal olarak birbirlerine bağlandıklarında, oluşan PbO yapısı iki boyutlu bir tabaka biçimini almaktadır.



Şekil 12. PbO 'in kristal yapısı

Kaynak: Johnson vd., 2015; Onar, 2017

FeAs-bazlı süperiletken sistemler, 1111-fazı, 122-fazı ve 11-fazını kapsamaktadırlar ve bunlar Fe-pniktojenler olarak bilinmektedirler.

Tablo 7. Farklı Fe-tabanlı süperiletken sistemler için normal şartlarda maksimum süperiletkenlik geçiş sıcaklıkları

Malzeme	Maksimum T_c (K)	Malzeme	Maksimum T_c (K)
LaFeAsO_{1-x}F_x	26	Ba _{1-x} K _x Fe ₂ As ₂	38
NdFeAsO_{1-x}F_x	52	Ba _{1-x} Rb _x Fe ₂ As ₂	23
PrFeAsO_{1-x}F_x	52	K _{1-x} Sr _x Fe ₂ As ₂	36
SmFeAsO_{1-x}F_x	55	Cs _{1-x} Sr _x Fe ₂ As ₂	37
CeFeAsO_{1-x}F_x	41	Ca _{1-x} Na _x Fe ₂ As ₂	20
GdFeAsO_{1-x}F_x	50	Eu _{1-x} K _x Fe ₂ As ₂	32
TbFeAsO_{1-x}F_x	46	Eu _{1-x} Na _x Fe ₂ As ₂	35
DyFeAsO_{1-x}F_x	45	Ba(Fe _{1-x} Co _x) ₂ As ₂	22
Gd_{1-x}Th_xFeAsO	56	Ba(Fe _{1-x} Ni _x) ₂ As ₂	20
LaFeAsO_{1-y}	28	Sr(Fe _{1-x} Ni _x) ₂ As ₂	10
NdFeAsO_{1-y}	53	Ca(Fe _{1-x} Co _x) ₂ As ₂	17
PrFeAsO_{1-y}	48	Ba(Fe _{1-x} Rh _x) ₂ As ₂	24
SmFeAsO_{1-y}	55	Ba(Fe _{1-x} Pd _x) ₂ As ₂	19
GdFeAsO_{1-y}	53	Sr(Fe _{1-x} Rh _x) ₂ As ₂	22
TbFeAsO_{1-y}	52	Sr(Fe _{1-x} Ir _x) ₂ As ₂	22
DyFeAsO_{1-y}	52	Sr(Fe _{1-x} Pd _x) ₂ As ₂	9
LaFe_{1-x}Co_xAsO	14	Ba(Fe _{1-x} Ru _x) ₂ As ₂	21
SmFe_{1-x}Ni_xAsO	10	Sr(Fe _{1-x} Ru _x) ₂ As ₂	13
SmFe_{1-x}Co_xAsO	15	LiFeAs	18
LaFe_{1-x}Ir_xAsO	12	NaFeAs	25
		Fe _{1+y} Se _x Te _{1-x}	15

Kaynak: Johnson vd., 2015; Lumsden vd., 2010.

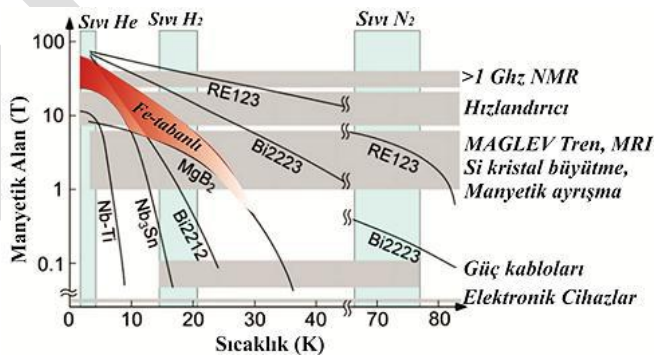
Fe-pniktojenlerin cuprate sistemlerle kıyaslanabilir boyutta süperiletkenlik parametrelerine sahip olmalarına rağmen toksik bir element olan As elementini içermeleri bu konudaki çalışmaları sınırlandırmaktadır. Bununla birlikte FeCh-bazlı gruplar Fe-kalkojenitler olarak adlandırılmaktadır ve bilinen kalkojenler S, Se ve Te elementleri olup bunlar 11-fazının üyeleri olan FeSe, FeTe, FeTe(Se) ve FeTe(S) sistemlerini oluşturmaktadırlar. Tablo 7’ de farklı Fe-bazlı süperiletken sistemler ve süperiletkenlik geçiş sıcaklıkları verilmektedir.

3. SÜPERİLETKEN SİSTEMLERİN TEKNOLOJİDEKİ ÖNEMİ

Süperiletken sistemlerin aktif olarak kullanılmaları beraberinde bir de soğutucu sistemlerini gerektirmektedir. Bu da maliyeti önemli ölçüde artırdığı için teknolojik olarak kullanılmaları sınırlı kalmaktadır. Buna rağmen farklı alanlarda kullanımları da mevcuttur. Özellikle tıbbi teşhis sistemlerinde süperiletkenler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alandaki uygulamalarını iki kategoride inceleyebilmekteyiz Iqbal vd., (2014). Bunlar; süperiletken magnetlere dayalı sistemler olan Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) ve Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) cihazlarıdır. MRI sisteminde magnet cihazın en önemli ana elemanıdır. Süperiletken magnetlerin ürettiği alan yüksek ve homojen olması bakımından diğerlerine göre avantajlı sağlamaktadır. Süperiletken magnetler, bir soğutma tankı içerisine süperiletken bobinlerin yerleştirilmesi ile oluşturulur ve sıvı He kullanılarak mutlak sıfır sıcaklığında kalması sağlanır. Bobinlere 1.5 T’ lık manyetik alan üretmesi için 600 A’ lik akım verildiğinde direnç sıfıra çok yakın olur. Sonuçta bobinden geçen akım uzun süre azalmadan bobin üzerinden geçerek magnetin ortasında güçlü ve homojen bir manyetik alan oluşturur (Asyalı, vd., 2014). İkinci kategori ise biyomanyetik teşhise dayalı olan SQUID-tabanlı sistemlerdir.

Manyetoensefalografi (MEG) ve manyetokardiyografi (MKG) bu kategoride yer alan sistemlerdir. Bu medikal sistemlerde genellikle düşük sıcaklık süperiletkenlerden yapılan SQUID' ler tercih edilmektedir. Manyetoensefalografi, beyin aktivitesinin izlenmesini sağlayan bir tekniktir. Elektrik akımında olduğu gibi beyne gönderilen elektrik sinyalleri manyetik alan oluşturur ve bu alan SQUID sensör tarafından algılanır (İqbal vd., 2014). SQUID sensörler ile manyetik alandaki çok küçük değişimleri algılamak için süperiletken döngüler kullanılır. Manyetik akı, döngülerden birinden geçerken devreye giren elektrik akımında değişikliğe neden olur. SQUID sensörü, 50000 gibi çok sayıda nörondan gelen elektrik sinyallerinin oluşturduğu manyetik alanı tespit edebilmektedir. Magnetokardiyografi ise kalbin kasılıp gevşemesi sırasında oluşan çok küçük mertebedeki elektrik akımı ve buna bağlı oluşan manyetik alanı ölçülmektedir.

Genel olarak, teknolojik uygulamalarda gerekli olan akım yoğunluğu değerinin $J_c > 10^4 \text{ Acm}^{-2}$ olması ve bununla birlikte yüksek alanlar altında yüksek akım taşımaya beklenir (Pallecchi vd., 2015). Şekil 13' te farklı s süperiletken sistemlerin yüksek alan magnetlerinin akım limitlerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 13. Süperiletkenlerin $J_c > 10^4 \text{ Acm}^{-2}$ olan gerekli uygulamalar için çalışma koşulları

Kaynak: Pallecchi vd., 2015; Onar, 2017.

4. SONUÇ

Bu çalışmada süperiletken sistemlerin temel özellikleri detaylı bir şekilde açıklanmış ve teknolojik açıdan önemli malzemeler olduğu vurgulanmıştır. Süperiletken sistemler keşfedildikleri günden beri araştırmacıların ilgi odağında olmuş ve halen güncelliğini koruyan bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Temel özellikleri göz önüne alındığında teknolojik uygulamalarda HTS sistemler avantaj sağlamaktadır. Her geçen gün gelişen teknoloji ile birlikte soğutma teknolojilerinin de iyileştirileceği düşüncesiyle süperiletken sistemlerin birçok alanda karşımıza çıkması şaşırtıcı olmayacaktır.

5. KAYNAKÇA

- Anderson, P.W. (1987). Science, 235, 1196,
- Asyalı, M.H., Kara, S., Yılmaz, B. (2014). Biyomedikal Mühendisliğinin Temelleri. Nobel Akademik Yayıncılık, 782p.
- Bernhard, C., Tallon, J. L., Niedermayer, C.h., Blasius, T.h., Golnik, A., Brücher, E., Kremer, R.K., Noakes, D.R., Stronack, C.E. and Asnaldo, E.J. (1999) Phys. Rev. B. 59, 14099.
- Buckel, W., Kleiner, R. (2004). Superconductivity; Fundamentals and Applications. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 464p.
- Buzea, C., Yamashita T. (2001). Supercond. Sci. Technol. 14, R115; Canfield, P.C., Bud'ko, S.L., Finnemore D.K. (2003). Physica C 385, 1; Canfield, C., Crabtree, G.W., (2003) Physics Today.
- Chu, C.W., Gao, L., Chen, F., Huang, Z.J., Meng, R.L., Xue. Y.Y. Superconductivity above 150 K in $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ at high pressure. (1993). Nature 365, 323–325.
- Clogston, A.M., Jaccarino, V. (1961). Phys. Rev. 121, 1357; Weger M. (1964). Rev. Mod. Phys. 36, 175; Labbe, J., Friedel, J. (1966). J. Phys. 27, 153, 303.
- Felner, I. and Asaf, U. (1998) Int. J. Mod. Phys. B 12, 3220.
- Felner, I., Asaf, U., Levi, Y. and Millo, O. (1997). Phys. Rev. B. 55, R3374.
- Flouquet, J., Buzdin A. (2002). Ferromagnetic Superconductors. Physics World.

- Ford,P.J., Saunders,G.A. (2005). The Rise of Superconductivity. CRC PRESS, Boca Raton London New York Washington, D.C., 224p.
- Fossheim, K. and Sudbø, A. (2004). Superconductivity; Physics and Applications. John Wiley & Sons Ltd. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, England, 430p.
- <http://yclept.ucdavis.edu/pics/Ru1212.jpg>
- Iqbal,S.M. and Saleem, S. A.(2014). Perspective on Medical Applications of High Temperature Superconductors. J. Bioeng Biomed Sci. 4, 1.
- Johnson P.D., Xu, G., Yin, W.-G. (2015). Iron-Based Superconductors. Springer International Publishing Switzerland, 436p.
- Keimer, B., Belk, N., Birgeneau, R. J., Cassanho, A., Chen, C. Y., Greven, M., Kastner, M. A., Aharony, A., Endoh, Y., Erwin, R.W., ShiraneG. (1992).Phys. Rev. B46, 14034.
- Leciejewicz, J. (1961). On the crystal structure of tetragonal (red) PbO. Acta Crystallogr.14, 1304.
- Lumsden, M.D., Christianson, A.D. (2010). Magnetism in Fe-based superconductors. J. Phys. Con dens. Matter.22, 203203.
- Matthias, B.T., OlsenJ.L. (1964).Phys. Lett.13, 202.
- Mourachkine, A. (2004). Room-Temperature Superconductivity. Cambridge International Science Publishing, 7 Meadow Walk, Great Abington, Cambridge CB1 6AZ, UK, 327p.
- Nagamatsu, J.,Nakagawa, N., Muranaka, T., Zenitani, Y., AkimitsuJ. (2001).Nature 410, 63.

- Onar, K. (2017). FeSe-Tabanlı Yeni Nesil Süperiletken Alaşımların Tek Kristal Formda Üretimi, Karakterizasyonu ve Mühendislik Uygulamaları. Doktora Tezi. İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Pallecchi, I., Eisterer, M., Malagoli, A. and Putti, M. (2015). Application potential of Fe-based superconductors. *Supercond. Sci. Technol.* 28, 114005 (12pp).
- Parkin, S.S.P., Lee, V.Y., Nazzari, A.I., Savoy, R., Beyers, R., LaPlaca, S.J. (1988). $Tl_1Ca_n-1Ba_2Cu_nO_{2n-3}$ ($n=1,2,3$): A new class of crystal structures exhibiting volume superconductivity at up to 110 K. *Phys Rev Lett.* 61, 750–753.
- Pingle, D.J., Tallon, J.L., Walker, B.G. and Tordahl, H.J. (1999) *Phys. Rev. B.* 59, R11679.
- Poole, C.P., Farach, H.A., Creswick, R.J., Prozorov, R. (1995). Superconductivity. Academic Press is an imprint of Elsevier, 84 Theobald's Road, London WC1X 8RR, UK, 671p.
- Puttill, S.N., Antipov, E.V., Marezio, M. (1993). Superconductivity above 120 K in $HgBa_2CaCu_2O_6$. *Physica C.* 212, 266–270.
- Roberts, B.W. (1964). Superconducting Materials and Some of Their Properties. IV Progress in Cryogenics. 160–231 and National Bureau of Standards, Technical Note 482.
- Saxena, A.K. (2010). High-Temperature Superconductors. Springer-Verlag Heidelberg Dordrecht, New York, 123–210.
- Schrieffer, J. R., Brooks, J.S. (2007). Handbook of High-Temperature Superconductivity. Springer Science + Business Media, LLC. 655p.

- Shimizu, K., Kimura, T., Furomoto, S., Takeda, K., Kontani, K., Onuki, Y., Amaya, K. (2001). *Nature*.412, 316.
- Soukoulis, C.M., Papaconstantopoulos,D.A. (1982).*Phys. Rev. B*26, 3673.
- Tallon, J.L., Bernhard, C., Bowden, M.E., Soto, T.M., Walker, B., Gilberd, P.W., Preseland, M.R., Attfield, J.P.,McLaughlin, A.C. and Fitch, A.N.(1999)*IEEE J. Appl. Supercond.* 9,1696.
- Tranquada, J.M., Moudden, A.H., Goldman, A.I., Zolliker, P., Cox, D.E., Shirane, G., Sinha, S.K., Vaknin, D., Johnston, D.C., Alvarez, M.S., Jacobson, A.J., Lewandowski, J.T., NewsamJ.M. (1988).*Phys. Rev. B*38, 2477.

KAYNAKLARIN TAHRİBATSIZ MUAYENESİ VE HATA KAREKTERLERİNE GÖRE DOĞRU YÖNTEMİN SEÇİMİ

Levent Cenk KUMRUOĞLU¹

Cihan ÇELİK²

1. GİRİŞ

1.1. Tahribatsız Muayenenin Kullanım Alanları

Endüstride gerçekleştirilen kalite kontrol uygulamaları tahribatlı ve tahribatsız testler olmak üzere 2 ana gruba ayrılmaktadır. Tahribatsız ve tahribatlı testler arasındaki farklar ve avantaj/dezavantajlarının anlaşılması doğru kontrol yönteminin seçiminde çok önemlidir.

Tahribatsız muayene (NDT: Non-Destructive Testing veya NDE: Non-Destructive Examination), adından da anlaşılacağı üzere malzemeye herhangi bir zarar vermeden hata tespiti için uygulanan kontrollere verilen genel isimdir. NDT İmalat öncesinde, sırasında ve sonrasında uygulanabilmektedir. Örneğin bir çelik yapı imal edeceksek kullanacağımız ana malzemede imalat öncesinde; ultrasonik muayene ile laminasyon kontrolü, kaynak ağzının görsel muayenesi ile kaynak ağzı uygunluğunun kontrolü, kaynak ağzının sıvı penetrant testi veya manyetik parçacık testi ile yüzeyinde gözle görülemeyen yüzey kusurlarının tespiti, imalat sırasında; kaynak pasoları arasında manyetik parçacık veya sıvı penetrant testi ile pasolar arasında hata tespiti ve imalat sonrasında; kaynaklı

¹ Prof. Dr., Yük. Metalurji ve Malzeme Mühendisi, ORCID: 0000-0001-6420-3761.

² ORCID: 0009-0000-1242-1345.

birleştirmenin tamamı ve ITAB3'ün kontrollerinin malzemeye hasar vermeden yapılmasına imkan sağlamaktadır.

Mekanik yani tahribatlı testler kaynaklı imalat öncesi yöntem onayında (WPQR: Welding Procedure Qualification Record) ve/veya belirli aralıklar ile imalat ara kontrollerinde gerçekleştirilir. İmalat öncesi yöntem onayında uygulanan tahribatlı testlerde amaç ürünün ilgili standartlara göre yeterli mekanik özellikleri sağlayıp sağlamadığından imalata başlamadan emin olmaktır. Örneğin Teknik şartnamede kaynaklı imalat sonrası S355 malzemenin çekme dayancının 470-630MPa aralığında olması gerekliliği belirtilmiş ise imalat onayı testleri sırasında çekme testinde, kaynak ve ana malzemenin çekme dayancının bu aralık içerisinde olduğunun garanti altına alınması gerekir. Tahribatlı testlerin temel amacı imalatın ilgili standart ve teknik şartnamelerde istenilen mekanik gereklilikleri sağladığını garantiye almaktır. Tahribatlı testler ürüne bölgesel olarak uygulanabilir ve imalat onayı testleri sırasında tahribatsız testler ile desteklenmelidir. Keza alınan test numunesi hatasız bir yerden alınmış fakat imalat onayı numunesi diğer bölgelerde hatalar içeriyor olabilir.

İlk ürünün/numunenin imalatı ile aynı şartlarda (malzeme, sarf malzemesi ve proses değişmeden) devam eden üretimin sonucunda aynı mekanik özelliklerin devam etmesi beklenir. Fakat tahribatlı testlerde kullanılan ürün/numune kullanılamaz hale geldiği için imalat sırasında bu kontrol yöntemi uygulanabilir değildir. Bu nedenle imalat onayı testlerinde uygunluk onayı alındıktan sonra imalatın devamında kalite kontrol uygulamaları olarak tahribatsız muayene yöntemleri uygulanır. NDT sayesinde proses, ana malzeme veya kaynak sarf malzemelerinden kaynaklı oluşabilecek hataları malzemeye hasar vermeden hızlı bir şekilde tespit etmek

³ 1. ITAB: Isı tesiri altında ki bölge (HAZ: Heat affected zone).

mümkündür. Tahribatsız muayenenin bir diğer avantajı da aynı şartlarda tekrar tekrar kontrol edildiğinde aynı bulgunun malzemeye hasar vermeden tespit edilmesine imkan sağlamasıdır.

Tahribatsız muayenenin tahribatlı muayeneye göre avantajları;

- Test sırasında numuneye/ürüne hiçbir hasar verilmez
 - Çok hızlı uygulanabilir
 - Prosesin tamamının kontrolüne imkan verir.
 - Düşük maliyetlidir
 - Çalışan sistemlerde kontrol imkanı sağlar (Periyodik kontrol)
- Tahribatsız muayenenin tahribatlı muayeneye göre dezavantajları
- Mekanik özellikler hakkında kesin sonuçlar almak mümkün değildir. Belirli yaklaşımlar yapılsa da tahribatlı testler kadar doğru sonuçlar almak mevcut NDT yöntemlerinde mümkün değildir.
 - Malzemenin yük altındaki davranışı hakkında fikir vermez

1.2. Tahribatsız Muayene İle İlgili Temel Tanımlar

Süreksizlik: Malzeme yüzeyinde veya iç kısmında ki homojen yapıyı bozan düzensizliklerin genel adıdır.

Kabul seviyesi: Kontrol standardında veya teknik şartnamede ilgili süreksizlik tipi için belirtilen kabul edilebilir maksimum süreksizlik ebadıdır.

Kayıt seviyesi: Tespit edilen süreksizliklerin kayıt altına alınması için gerekli minimum kriterleri tanımlar.

Hata: Kabul seviyesini aşan ve reddedilmesi gereken süreksizlikleri tanımlar. Hatalar raporda ilgili tahribatsız muayene yöntemi ile tekrar kontrol edilebilir bir şekilde kontrol detayları ve konumları ile birlikte belirtilmelidir.

1.3. Kaynakların Tahribatsız Muayene Standartları

Ülkemizde kaynakların NDT uygulamaları Amerikan tasarımlarına göre imalat yapıldığında ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Bölüm V'e göre, Avrupa normlarına göre imalat yapıldığında ise EN ve ISO standartlarına göre yapılmaktadır. İlgili NDT standartları Kaynakça başlığı altında toplanmıştır.

1.4. Tahribatsız Muayene Uygulaması Öncesi Hazırlık

Kaynak ve ITAB bölgesi kontrol öncesinde altındaki süreksizliği gizleyebilecek veya muayene sırasında değerlendirmeyi etkileyebilecek cüruf kalıntısı, sıçrıntı vb. metalik kalıntılar, boya, ve yağ gibi her türlü kirlilikten temizlenmelidir. Ön temizlik işlemi ne kadar doğru yapılır ise değerlendirmenin de o kadar sağlıklı olacağı unutulmamalıdır. Örneğin kenarlarında sıçrıntı bulunan bir kaynağın ultrasonik muayenesi yapılır iken prob sıçrıntılar nedeniyle yüzeye düzgün oturmayacağı için ses dalgasının malzeme içerisine geçişi kısmen veya tamamen engellenmiş olur ve bu durumda süreksizlikler tespit edilemez ya da olduğundan daha küçük bir süreksizlik olarak tespit edildiği için reddedilmesi gereken bir süreksizlik ön hazırlığın yetersiz yapılması nedeniyle kabul olarak değerlendirilebilir. Bir NDT yönteminin uygulanmasından önce ilk olarak yüzey durumunun uygunluğu değerlendirilmeli ve eğer yüzey o yöntemin uygulanması için uygunsuz ise uygun hale getirilmesi sağlanmalıdır.

2. ÇALIŞMA İÇERİĞİ

2.1. Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Tahribatsız muayene yöntemleri geleneksel tahribatsız muayene yöntemleri ve ileri tahribatsız muayene yöntemleri olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadır. Bu bölüm kapsamında kaynaklı imalatlarda uygulanan geleneksel tahribatsız muayene yöntemleri değerlendirilmiştir.

Geleneksel tahribatsız muayene yöntemleri;

- Görsel muayene (VT),
- Sıvı penetrant testi (PT),
- Manyetik parçacık testi (MT),
- Ultrasonik muayene (UT),
- Radyografik muayene (RT) olmak üzere 5 gruba ayrılır.

Bu yöntemlerden radyografik ve ultrasonik muayenenin teknolojik gelişmeler ile ileri tahribatsız muayene uygulamaları içerisine giren yöntemleri de mevcuttur. İleri tahribatsız muayene yöntemleri teknolojik gelişmeler ile fizik kurallarının malzemede ki farklılıkların tespiti için kullanıldığı yöntemlerdir. En yaygın olarak kullanılan ileri tahribatsız muayene yöntemleri;

- Gelişmiş ultrasonik muayene yöntemleri; phased array ultrasonik muayene (PAUT), time of flight diffraction (TOFD), otomatik ultrasonik muayene,
- Gelişmiş radyografik muayene yöntemleri; dijital radyografik muayene, radyoskopik muayene, floroskopik muayene ve bilgisayarlı tomografi (CT)
- Girdap akımları (eddy current) ile muayene

- Intelligent pigging yöntemleri ile boruların içeriden kontrolleri
- Manyetik akı kaçağı (MFL) yöntemleri
- Akustik emisyon (AE)

2.1.1. Görsel Muayene (VT)

Görsel muayene, direkt ve endirek görsel muayene olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Direkt görsel muayene, göz ile muayene yüzeyi arasında kesintisiz bir optik yolun bulunduğu muayenedir ve genelde kaynakların kontrolünde direkt görsel muayene yöntemi uygulanır. Direkt görsel muayene yapılamadığı durumlarda yardımcı optik araç gereç (ayna, boroskop, endoskop, videoskop, kamera) kullanılarak yapılan görsel muayeneye endirekt görsel muayene denir.

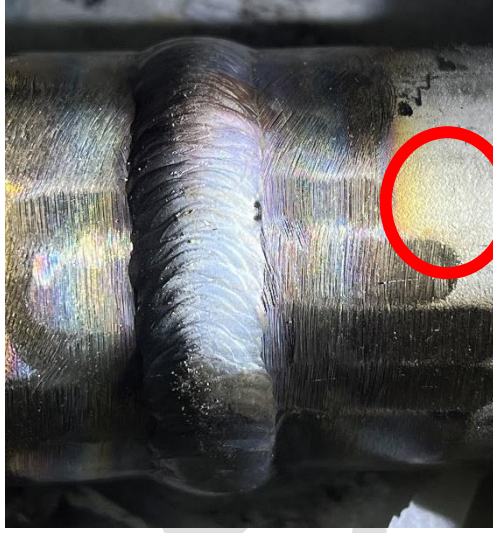
Görsel muayene ilk tahribatsız muayene aşamasıdır. Görsel muayene kaynaklı imalat sürecinde 3 aşamada uygulanır.

- İmalat öncesi gelen ara mamul ve hammaddenin kontrolü
- Kaynaklı imalat öncesi kaynak ağzı ve birleştirme (fit-up) kontrolü
- Kaynak sonrası kaynak ve ITAB bölgesinin kontrolü

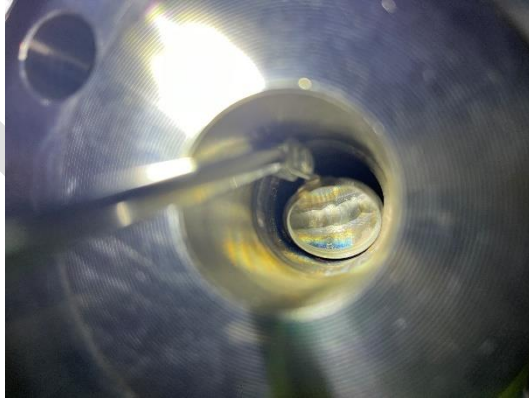
Görsel muayenede gözle görülebilen yani yüzeye açık süreksizlikler tespit edilebilir. Bu nedenle yüzey hazırlığı ne kadar iyi yapılırsa ise kontrolün hassasiyeti o kadar iyi olacak ve dolayısıyla süreksizliklerin tespitine imkan sağlanmış olacaktır.

Genel olarak görsel muayene uygulaması sırasında göz ile muayene bölgesi arasında ki mesafenin en fazla 600mm, göz ile muayene yüzeyi arasındaki mesafenin en az 150mm olması ve bakış doğrultusu ile muayene yüzeyi arasındaki açının 30° den az olmaması istenir. Görme açısını iyileştirmek için ayna

veya detaylı inceleme için büyütmeli merceklerin kullanılmasına izin verilebilir.



Şekil 1. Görsel muayene sırasında tespit edilen çok küçük yüzeye açık gözenekler.



Şekil 2. Boru kök kaynağının ayna yardımı ile yapılan görsel kontrolü



Şekil 3. Görsel muayene sırasında tespit edilen kök kaynağında ki ergime noksanlığı.

2.1.2. Sıvı Penetrant Testi (PT)

Sıvı penetrant testi, özellikle metalik ve seramik malzemelerin yüzey hatalarının tespiti için uygulanan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu yöntem ile yüzeyi gözenekli olan malzemeler ve teflon haricinde ki tüm malzemelerin yüzey süreksizlikleri tespit edilebilir. Bu yöntemin kısıtı sadece yüzeye açık süreksizliklerin tespit edilebiliyor, yüzey altı süreksizliklerinin ise tespit edilemiyor olmasıdır. Yüzeye açık olan süreksizlikleri kirlilikler tıkaması durumunda süreksizlik içerisine penetrant sıvısı giremeyeceği için süreksizlik tespit edilemez. Bu nedenle test öncesi yapılan ön temizliğin düzgünlüğü, yöntemin hassasiyeti ve süreksizliğin tespiti için elzemdir.

Testin uygulanışı;

- **Ön temizlik;** malzeme yüzeyi fırça veya taşlama ile önce mekanik yöntemlerle temizlenir. Bu aşamada

taşılama ile temizlik yapılacak ise süreksizliğin yüzeyini sıvamayacak iri taneli spiral taş kullanılmalı ve tek yönlü olarak taşılama yapılmalıdır. Akabinde yüzey temizleme kimyasalı (cleaner) spreyi veya yönteme bağlı olarak su yüzeye uygulanır ve tüylenmeyen bir bez ile yüzey temizlenir. Yüzeye uygulanan temizleyici spreyin/suyun kuruması için bir süre beklenir.

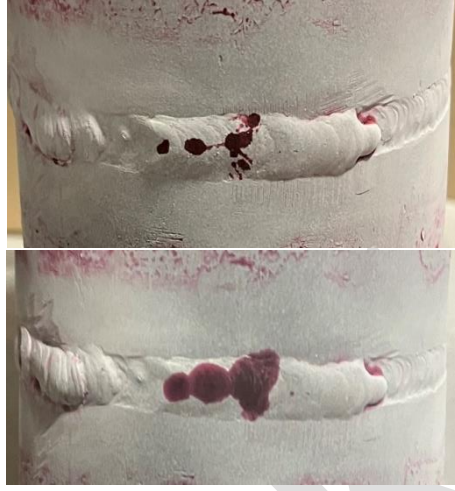
- **Penetrant uygulaması;** girici özelliği (kapiler etki) olan penetrant yüzeye spreyleme, fırça ile sürme veya bazı yöntemlerde parçayı penetrant havuzuna daldırma ile uygulanır ve penetrantın yüzey süreksizliklerinin içerisine nüfuz etmesi için yeteri kadar süre beklenir.
- **Fazla penetrantın temizliği;** yeterli penetrasyon süresi beklendikten sonra yüzeyde kalan artık penetrant tüylenmeyen bir bez yardımı ile temizlenir. Bu temizleme işlemi sırasında temizleme spreyi tüylenmeyen bir beze uygulanır ve nemlendirilen bez ile yüzey temizlenir. Temizleyici sprey yüzeye direkt olarak uygulanması süreksizliğin içerisinde ki penetrantın da çıkmasına neden olacağı için yapılmamalıdır. Yönteme bağlı olarak fazla penetrantın giderilmesi işlemi su ile yıkama şeklinde de yapılabilir. Su ile yıkama sırasında suyun basıncı ve yıkama süresi doğru ayarlanmaz ise çatlak içerisinde ki penetrantın da giderilmesi neticesinde süreksizliğin tespit edilememesine neden olabileceği için yıkama işlemi ilgili standartların/prosedürlerin belirttiği kriterlere uyularak yapılmalıdır.
- **Geliştirici uygulaması;** artık penetrant yüzeyden giderildikten sonra yüzeye uygulanan geliştirici sprey ile süreksizlik içerisinde kalan penetrantın

dışarı çıkması sağlanır. Görünür penetrant yöntemi uygulanıyor ise geliştirici beyaz bir fon oluşturur ve penetrantın rengi kırmızı olduğu için bu fon üzerinde kolaylıkla tespit edilir ve penetrantın geri çıktığı (kusma diye de tabir edilir) kısımlarda yüzey süreksizliğinin olduğu anlamına gelmektedir. Florışıl penetrant uygulaması yapılıyor ise penetrant sıvısı florışık altında kontrast oluşturarak kendini belli eder ve süreksizliğin tespiti bu şekilde sağlanır. Penetrant zaman içerisinde süreksizliğin içerisinde geliştiricinin etkisi ile dışarı çıkartılırken süreksizliğin belirtisi değişmektedir. Bu nedenle değerlendirme geliştiricinin uygulandığı andan itibaren başlar. Lineer olan bir süreksizlik zaman geçtikçe lineer olmayacak şekilde görünebilmektedir.

- **Son temizlik;** kullanılan sıvılar kimyasal olduğu için korozyona neden olabileceği unutulmamalı ve test sonrası kontrol yüzeyleri temizlenmelidir. Ayrıca kalan sıvılar, kimyasala bulanmış bezler veya tüpler uygun mevzuatlara göre bertaraf edilmelidir.

Sıvı penetrant testinde görünür ve florışık altında değerlendirme yapılabilmektedir. Florışık altında değerlendirme yapılan methodun hassasiyeti görünür metoda göre daha yüksektir. Her iki metod içinde kullanılan ürün ailesi (temizleyici, penetrant ve geliştirici) aynı markaya ait olmalı ve ilgili metoda uygun olarak seçilmelidir.

Sıvı penetrant testi kaynak dikişlerinin, dökümlerin ve dövme parçaların yüzeye açık süreksizliklerinin tespitinde basit, hızlı ve ekonomik olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Sıvı penetrant testi boyalı, kaplamalı veya çok pürüzlü yüzeylerde uygulanamaz.



Şekil 4. Görünür penetrant testi. Solda geliştirici uygulamasından 10dk beklendikten sonra görülen çatlakların belirtisi, sağda geliştirici uygulamasından 60dk beklendikten sonra aynı bölgede görülen çatlakların belirtisi.

Yukarıda ki şekilde de açıkça görülebildiği gibi geliştirici uygulandıktan bir süre geçtikten sonra lineer (doğrusal) olan süreksizliklerin şekli değişmektedir.

2.1.3. Manyetik Parçacık Testi (MT)

Manyetik parçacık testi, ferromayetik malzemelerde yüzey ve hemen yüzeyin altında ki süreksizliklerin tespitine imkan sağlayan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu yöntemde kaynak dikişlerin ve ITAB'ın yüzey ve hemen yüzey altı kusurları hızlı, kolay ve ekonomik olarak tespit edilebilir. Yöntemin temeli malzeme yüzeyinde manyetik alan çizgileri oluşturulması ve bu manyetik alan çizgilerine dik olan süreksizliklerin manyetik parçacıklar vasıtasıyla tespitine dayanır. Kaynak dikişlerinin MT kontrolünde, muayene yüzeyinde manyetik alan oluşturmak amacıyla manyetik yoke (boyunduruk) yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken husus süreksizliğin yönünün manyetik alan çizgilerine dik veya dike yakın bir açıda olması gerektiğidir.

Kaynakların manyetik paracak testinde 3 metod yaygın olarak kullanılmaktadır

- Beyaz fon boyası ile kontrast oluřturularak uygulanan görünür manyetik paracak testi
- Florişıl altında görünür manyetik paracak testi
- Toz manyetik paracak testi



Şekil 5. Manyetik yoke ayakları arasına serpilmiş manyetik parçacıkların manyetik alan çizgileri üzerinde yönlenmeleri



Şekil 6. Görünür manyetik paracak testi sırasında tespit edilen bir pasolar arası çatlak.

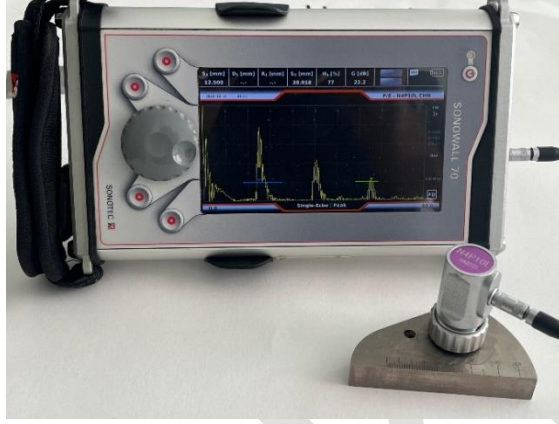
Manyetik parçacık testinde kullanılan manyetik yoke AC (alternatif akım) ve DC (doğru akım) olmak üzere 2 tiptedir. AC yoke ile yüzey kusurları daha iyi tespit edilebilir iken DC yoke ile hem yüzey hemde hemen yüzeyin altında (2-3mm altında) ki kusurlarda rahatlıkla tespit edilebilmektedir. DC yoke ile manyetik parçacık testi, test sonrası kalıntı mıknatıslık çok olduğu ve bu durumun kaynak yapmayı zorlaştırması nedeniyle genellikle tercih edilmez.

2.1.4. Ultrasonik Muayene

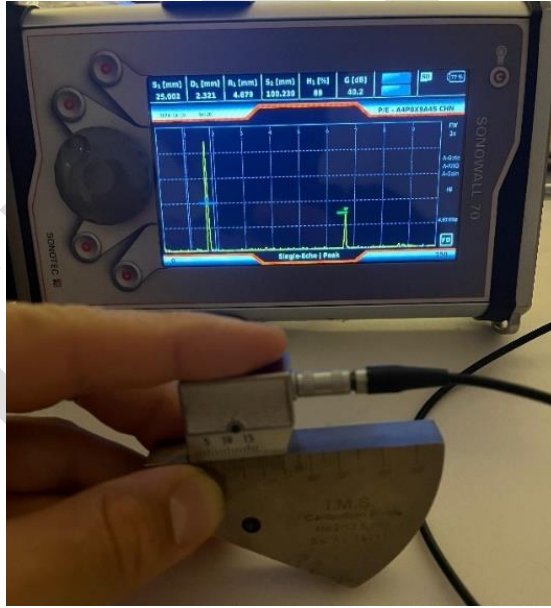
Ultrasonik muayene, malzeme içerisine yüksek frekanslı ses dalgası gönderilerek yapılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Malzeme içerisinde herhangi bir süreksizlik veya segregasyon var ise ses dalgasının bir kısmı veya tamamı geri yansır. Geri yansıyan ses dalgası cihaz tarafından algılanır ve sesin malzeme içerisinde ki hareketinin aldığı zaman, cihaz tarafından sesin malzeme içerisinde ki hızı ile çarpılarak sesin aldığı yoldan yansıdığı konumu tespit edilebilmektedir.

Kaynaklı imalatla ana malzemenin kaynak ağzına yakın bölgesinde laminasyon ya da segregasyon olması durumunda kaynak sırasında bu bölgenin ITAB'ta kalması ve ısı girdisi nedeniyle çatlak veya mukavemet düşüşüne neden olan faz dönüşümleri veya iç gerilmeler meydana getirebilmesi nedeniyle istenilmez. Bu nedenle ITAB olarak kalacak bölgenin kaynak öncesi düz veya TR prob ile laminasyon / segregasyon kontrolünün yapılması kaynağın istenilen gereksinimleri sağlaması adına çok önemlidir.

Malzemeler içerisinde ilerleyen ses hızı bir malzeme sabitidir ve kontrol edilecek malzemenin ses hızı bilindiği takdirde malzeme içerisinde bulunan süreksizliğin konumu, boyutu ve referans yansıtıcılara göre boyutları yaklaşık olarak saptanabilmektedir. Bu nedenle öncelikle ultrasonik muayene cihazında ses yolu kalibrasyonu yapılır.



Şekil 7. K2 blok üzerinde arka duvar referans yansıtıcı olarak kullanılarak düz prob ile yapılan bir ses hızı kalibrasyonu

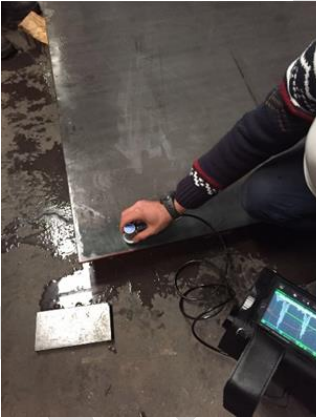


Şekil 8. K2 blok üzerinde arka duvar referans yansıtıcı olarak kullanılarak açılı prob ile yapılan bir ses hızı kalibrasyonu

Ses yolu kalibrasyonu yapıldıktan sonra muayenenin yapılacağı parametrelerin belirlenmesi ve değerlendirme için referans olarak kullanılacak süreksizlikler üzerinden elde

edilecek referans eğrilerin çizilmesi aşamasına geçilir. Konvansiyonel ultrasonik muayene yönteminde referans yansıtıcı olarak yandan açılmış delik veya disk şekilli yansıtıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı çok ince et kalınlığında ki malzemelerin kaynaklarının kontrolü için kaynağın kepine ve köküne açılan çentikler referans yantıcı olarak kullanılarak çizilen eğriler de kullanılabilir.

Boyuna ses dalgası üreten probalar; düz probalar ve TR problemlerdir. Bu problemlerde üretilen ses dalgaları malzemenin kesitine dik yönde ilerler ve boyuna dalgaının ses hızı enine dalgaının ses hızının yaklaşık olarak 2 katıdır. Çeliklerde boyuna dalgaının ses hızı genel olarak 5920m/s olarak kabul edilirken enine dalgaının ses hızı 3255 m/s olarak kabul edilir.



Şekil 9. Disk şekilli yansıtıcı referans alınarak çizilmiş olan DGS eğrisine göre çelik sac üzerinde laminasyon ve segregasyon kontrolü.

Kaynakaların kontrolünde açılı problemler kullanılır. En yaygın kullanılan açılı problemlerin açıları 45°, 60° ve 70° dir. Bunların dışında özel açılı problemler de kullanılabilir. Açılı prob ile yapılan konvansiyonel ultrasonik muayene sırasında malzeme içerisine enine ses dalgası girer ve prob çıkış açısına

göre malzeme içerisinde ilerler. Prob çıkış açısına dik yönde olan bir süreksizlik var ise tarama sırasında ses dalgasının tamamı ya da bir kısmı bu süreksizlikten geri yansır. Ses dalgasının malzeme içerisinde ki hızı malzeme sabiti olduğu, ses dalgasının üreteçten çıkış anından ne kadar süre sonra alıcıya geldiği de bilindiği için ses dalgasının malzeme içerisinde ki izlediği yol trigonometri vasıtasıyla hesaplanabilmektedir. Prob çıkış açısına bağlı olarak trigonometri yardımı ile hem süreksizliğin derinliği hemde prob ucundan konumu tespit edilebilir. Prob hareketi ile de süreksizliğin yaklaşık olarak boyu da saptanabilmektedir.

Kaynakların ultrasonik muayenesinde yaygın olarak kullanılan referans yansıtıcılar yandan açılmış deliklerdir. Malzeme kesitine dik yönlü ve farklı derinliklerde aynı çapta açılan deliklerden yansıyan ses dalgaları vasıtası ile çizilen referans eğrisi (DAC eğrisi) kullanılarak kaynak kontrolü sırasında tespit edilen süreksizliğin değerlendirmesi yapılmaktadır.

2.1.5. Radyografik Muayene

Kaynakların hacimsel kontrol yöntemlerinden birisi de endüstriyel radyografi yöntemidir. Bu yöntemde radyasyon yayan bir ışınım kaynağından çıkan ışınlar kaynak ve ana malzeme üzerinden geçerek kaynağın arka tarafında bulunan film üzerine düşer. Işın kaynak ve ana malzemeden geçtiği sırada soğurulur. Bu sırada kaynak ve ITAB da herhangi bir hacimsel süreksizlik veya radyasyonu metalik malzemeden farklı soğuran bir kalıntı veya boşluk (cüruf, tungsten kalıntısı, gaz boşluğu, çatlak, ergime noksanlığı ve nüfuziyetsizlik gibi) var ise bu kısımların görüntüsü film üzerine farklı kontrastta düşer ve görüntü üzerinden ayırım yapılarak süreksizliğin değerlendirilmesi yapılır. Endüstriyel radyografide gama ışınları ve x ışınları yaygın olarak kullanılan radyasyon kaynaklarıdır.

Endüstride bir kaynağın filmi çekildiği zaman, hataların film üzerinde mutlaka görülebileceği gibi yaygın bir yanlış anlaşılma mevcuttur. Radyografi birçok değişkenden etkilenebilen bir tahribatsız muayene yöntemi olduğu için filmi değerlendirmeden önce ilk olarak yapılması gereken filmin değerlendirilebilir olup olmadığının incelenmesidir. Radyograflar kayıt altına alınır ve aradan yıllar da geçse de tekrar film incelenerek tekrar değerlendirme yapılabilir.

2.1.5.1. Radyografik Muayenede Temel Kavramlar

- X ve γ (Gama) ışınları bir atomun dış yörüngesine çarptığında atomun 1 elektronunu koparırlar ve atomu pozitif yüklü iyon haline getirirler. Bu etkiye Radyasyonun iyonlaştırıcı etkisi denir. İyonlaşma miktarı ışının şiddeti arttıkça artar. Bu nedenle ışınım şiddeti ile filmin pozlama süresi ters orantılıdır.
- Fotografik emülsiyonların ışınım altında renk değiştirmesi ile elde edilen fotografik görüntüler radyografların oluşumunu sağlar. Bu etkiye Işınımın fotokimyasal etkisi denir.
- Dalga boyu (λ) düşük olan ışınımın enerjisi yani nüfuziyet kabiliyeti yüksektir.
- Muayene parçasının kalınlığı arttıkça ve/veya yoğunluğu arttıkça ışınımın zayıflaması artacağından nüfuziyet azalır. Işınım mesafe ile de zayıflar bu nedenle ışınım kaynağı ile film arası mesafe arttıkça radyografik muayene için film çekim süresi artar.
- Radyograflarda renk değişimi ile hatalı kısımların ayırt edilebilirliğini sağlayan etkiye ışınımın fotokimyasal etkisi denir. Malzeme içerisindeki süreksizliklerin ana malzemeden farklı yoğunlukta

olması nedeniyle ışıınımı farklı miktarda zayıflatması ve radyograf üzerinde kontrast oluşumunu sağlayan ise ışıınının zayıflamasıdır. Bu durum bize kaynakların endüstriyel radyografi metodu ile hacimsel kontrolünün yapılabilmesine imkan sağlamaktadır.



Şekil 10. İridyum radyoaktif izotopu ile sahada film çekiminden bir görünüm.



Şekil 11. Xray cihazında 200Kv 5mA değrinde 16 saniye olarak yapılan pozlamanın kontrol ekranında görüntüsü.

2.1.5.2. Radyasyonun Özellikleri

- Doğrusal iler
- Nüfuz eder
- Saçılma ve Soğruluma sonucu zayıflar
- İyonlaştırma etkisi vardı. (örn. Fotokimyasal etki)

2.1.5.2.1. Radyasyonun Saçılma Özelliği

Filmini çektiğimiz yüzeyden ve/veya geometriden kaynaklı etraftaki farklı yüzeylerden ve malzeme içerisinden geçen ışının yön değiştirmesi sonucu istenilmeyen zayıflamış ve yönü değişmiş ışınımın oluşmasıdır. Film çekilirken tüm hesaplamalarınız doğru ve kullandığınız filmde iyi kalitede olsa dahi saçılmayı hesaba katılmadıysa ve ortamda ışının saçılması durumu söz konusu ise çekilen film değerlendirilebilir olmayacaktır. Çünkü saçılan ışınım nedeniyle film üzerine istenilmeyen zayıflamış ışınım düşecek ve filmde gölgelenme, yoğunluğunda istenilmeyen değişiklikler, yeterli penetrametre telinin görülememesi ve ilgisiz görüntüler gibi olumsuzluklar oluşturacaktır. Işınım kaynağının enerjisinin yüksek olması, malzemenin kalınlığının fazla olması, malzemenin düşük yoğunluklu olması (örn. Alüminyum) saçılmayı artırır. Bu nedenle değerlendirilebilir bir film olması için film çekimi sırasında saçılma riski varsa gerekli önlemler alınarak saçılmanın oluşturacağı olumsuzluklar ortadan kaldırılmalıdır.

Yukarıda bahsedilen temel bilgilerin dışında ışınım kaynağının seçimi, çekim tekniği seçimi, film sınıfı seçiminde değerlendirilebilir bir film oluşturmak için oldukça önemlidir.

➤ Filmin Değerlendirilebilirliği

Radyografi bir çok değişkenden etkilenen bir tahribatsız muayene yöntemidir ve hataların ayırt edilebilirliğinin sağlandığından emin olmak için filmi değerlendirmeye başlamadan önce filmin değerlendirilebilirliğinin incelenmesi

gerekir. Değerlendirilebilirlik açısından uygunsuz olan film kesinlikle tekrar çekilmelidir.

➤ *Film Yeterli Yoğunluğu Sağlıyor mu?*

Filmde hataların ayırt edilebilir olması için yeterli kontrast oluşumu gerekmektedir. Bu kontrast oluşumu ilgili standardın belirttiği yoğunluk aralığını oluşturarak sağlanır. Yoğunluk uygunsuz ise film tekrar çekilmelidir.

- ASME Sec V Article 2'ye göre x ışınları ile çekim yapıldığında minimum yoğunluk 1,8 iken gama ışınları ile çekim yapıldığında 2,0 olmalıdır. Maksimum yoğunluk ise 4,0 ile sınırlandırılmıştır.
 - EN ISO 17636-1 standardına göre test sınıfı A için minimum film yoğunluğu 2,0 iken test sınıfı B için minimum film yoğunluğu 2,3 olması gerekir.
- *Yeterli Görüntü Kalite Belirteci Teli (Penetrametre, IQI) Görülebiliyor mu?*

Radyograf üzerinde belirlenebilecek en küçük hata çapının çekilen film üzerinde ayırdedilebilir olduğunu garanti altına almak yani filmin hassasiyetini belirlemek için Penetrametre (IQI: Image Quality Indicator) kullanılır. Filmin çekim sınıfına göre ilgili standardın belirttiği yeterli küçüklükteki penetrametre telinin film üzerinde görülebilmesi gerekir ki filmin değerlendirme hassasiyeti ilgili standardın gerektirdiği minimum kriteri karşılayabilsin. Yeterli incelikte ki IQI teli görülemediği takdirde film yeniden çekilmelidir. Penetrametreler çekilen malzeme ile aynı malzemeden olmalıdır. Alüminyum malzemenin filmi çekilecekse Alüminyum tellerden oluşan penetrametre kullanılmalıdır. Ayrıca kaynağın kepi nedeniyle oluşabilecek kalınlık farkı gerekli minimum penetrametre telinin belirlenmesinde göz önünde bulundurulmalıdır.

➤ *Pozlar Arasındaki Bindirme Mesafeleri Uygun mu?*

Pozlar arasında yeterli bindirme sağlandığından emin olunmalıdır. Eğer bindirmeler uygunsuz ise değerlendirilemeyen bölgenin filminin çekilmesi gerekir.

➤ *Film Değerlendirilecek Olan Bölgeyi Hatasız İçeriyor mu?*

Bir kaynağın filminde; kaynak ve kaynak işlemi sırasında ısıdan etkilenen bölgenin film üzerinde değerlendirilebilir bir şekilde görüntüsünün oluşması gerekmektedir. Isıdan etkilenen bölge (ITAB) ve kaynağın film üzerindeki görüntüsünde film hatası, penetrametrenin harflerinin veya mezuranın kurşun harflerinin değerlendirilen bölgeye gelmesi gibi durumlarda film tekrar çekilmelidir. Bunların dışında şüphe uyandırıcı bir görüntü mevcut ise filmi çekilen bölge mutlaka görsel olarak incelenmelidir. Bazı durumlarda çizikler ve darbeler gibi şekilsel bozukluklar operatörün yanılarak oluşan görüntüyü radyografi açısından hata gibi değerlendirmesine ve yanlış karar vermesine neden olabilmektedir.

➤ *Film Ebatı Değerlendirilebilirlik Açısından Uygun mu?*

Radyasyon doğrusal ilerler ve zayıflar. Bu iki durum düşünüldüğünde film üzerine düşen ışınım miktarı her yerde aynı olmayacaktır. Işınım kaynağına yakın bölgeye yeteri kadar radyasyon düşerken kaynaktan uzak kısımlara yeterli miktarda radyasyon gelmeyebilir. Bu nedenle çekilen filmin ebatlarının çekim ve malzeme şartlarına göre ilgili standardın belirttiği değerlendirilebilir film mesafesini sağlaması gerekmektedir (Özellikle boru çekimlerinde kavisten dolayı bu mesafe oldukça küçülmektedir). Aksi taktirde film yeniden çekilmelidir.



Şekil 12. Kaynakta bulunan kökte nüfuziyetsizlik hatasının radyograf üzerinde görüntüsü.

3. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında geleneksel tahribatsız muayenelerinin avantajları, dezavantajları ve yöntem seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar değerlendirilmiştir.

Tahribatsız muayene yöntemleri muayene edilen parçaya hasar vermeden yapılabilir olduğu için birden çok yöntem peşi sıra uygulanabilmektedir. Yapılan detaylı değerlendirme ve karşılaştırma sonucunda tahribatsız muayene yöntemlerinin birbirinin muadili olmadığı, aksine birbirini tamamlayan yöntemler olduğu açıkça görülmektedir.

Bir yöntem ile tespit edilen bir süreksizliğin başka bir yöntem ile tespit edilememesi olasıdır. Bu nedenle bir yöntem ile tespit edilen bir süreksizlik tamir yapılır ise tamir sonrası tekrar aynı yöntem ile kontrol edilmesi gerekmektedir. Tamir sonrası kalite gereksinimlerinin belirttiği tüm NDT yöntemleri tekrar ilk sefer ki kaynağa uygulandığı gibi uygulanmalıdır.

Yapılan değerlendirmeler neticesinde tahribatsız muayene uygulamalarında hata tespit hassasiyetinin muayene öncesi temizliğe, doğru yöntem seçimine ve uygulama şartlarına bağlı olduğu görülmektedir.

4. KAYNAKÇA

TS EN ISO 17635	Kaynakların tahribatsız muayenesi- Metalik malzemeler için genel kurallar
TS EN ISO 6520-1	Kaynak ve ilgili işlemler - Metalik malzemelerde geometrik kusurların sınıflandırılması - Bölüm 1: Ergitme kaynağı
TS EN ISO 5817	Kaynak - Çelik, nikel, titanyum ve bunların alaşımlarında ergitme kaynaklı (demet kaynağı hariç) birleştirmeler - Kusurlar için kalite seviyeleri
TS EN ISO 17637	Ergitme kaynaklarının tahribatsız muayenesi- Ergitme kaynaklı birleştirmelerin gözle muayene
TS EN ISO 3452-1	Tahribatsız muayene - Penetrant muayenesi - Bölüm 1: Genel kurallar
TS EN ISO 23277	Kaynakların tahribatsız muayenesi - Kaynakların penetrant muayenesi - Kabul seviyeleri
TS EN ISO 3059	Tahribatsız muayene - Penetrantla muayene ve manyetik parçacıkla muayene - İnceleme şartları
TS EN ISO 9934-1	Tahribatsız muayene - Manyetik parçacık muayenesi - Bölüm 1: Genel ilkeler
TS EN ISO 17638	Kaynakların tahribatsız muayenesi- Manyetik parçacık muayenesi
TS EN ISO 23278	Kaynakların tahribatsız muayenesi- Kaynakların manyetik parçacıkla muayenesi- Kabul seviyeleri
TS EN 10160	Kalınlığı 6 mm'ye eşit veya daha fazla olan yassı çelik mamulün ultrasonik muayenesi (yansıma tekniği)

TS EN ISO 16810	Tahribatsız muayene - Ultrasonik muayene - Genel prensipler
TS EN ISO 16811	Tahribatsız muayene - Ultrasonik muayene- Hassasiyet ve aralık ayarı
TS EN ISO 17640	Kaynakların tahribatsız muayenesi - Ultrasonik muayenesi-Teknikler, deney sınırları ve değerlendirme
TS EN ISO 11666	Kaynakların tahribatsız muayenesi - Ultrasonik muayene- Kabul seviyeleri
TS EN ISO 23279	Kaynakların tahribatsız muayenesi - Ultrasonik muayene - Kaynaklardaki belirtilerin karakterizasyonu
TS EN ISO 17636-1	Kaynak dikişlerinin tahribatsız muayenesi - Radyografik muayene - Bölüm 1: Filmlili X ve gama ışını teknikleri
TS EN ISO 5579	Tahribatsız muayene - Metalik malzemelerin x ve gama ışınlarıyla radyografik muayenesi - Genel kurallar
TS EN ISO 19232-1	Tahribatsız muayene-Radyografların görüntü kalitesi-Kısım 1: Görüntü kalite göstergeleri (tel tipi)-Görüntü kalite değerinin tespiti
TS EN ISO 19232-3	Tahribatsız muayene - Radyografların görüntü kalitesi - bölüm 3:Görüntü kalite sınıfları
TS EN ISO 10675-1	Kaynakların tahribatsız muayenesi - Radyografik muayene için kabul seviyeleri - Bölüm 1: Çelik, nikel, titanyum ve bunların alaşımları
TS EN ISO 10675-2	Kaynakların tahribatsız muayenesi - Radyografik muayene için kabul seviyeleri - Bölüm 2: Alüminyum ve alaşımları
ASME Sec V	The American Society of Mechanical Engineers - Boiler and Pressure Vessel Code – Non-Destructive Examination

AISI 1010 ÇELİK BORULARIN SOĞUK ÇEKİMİNDE KALIP AÇISININ PROSESE ETKİSİNİN FEA ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

Mutlu Çağrı YİĞİT¹

Funda Gül KOÇ²

Memduh GÜRBÜZ³

1. GİRİŞ

Farklı kesitlere sahip ince et kalınlığına sahip borular, nükleer güç bileşenleri, tıbbi cihazlar, ısı eşanjörleri vb. gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. İnce et kalınlığına sahip boru üretimi için ekstrüzyon, soğuk çekme, haddeleme vb. gibi birçok yöntem bulunmaktadır. Yüksek şekillendirme hassasiyeti, düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek üretim verimliliği avantajı nedeniyle, soğuk çekme işlemi karmaşık kesitlere sahip yüksek hassasiyetli, küçük çaplı ve ince et kalınlığına sahip borular üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Boru çekme, çubuk çekmede kullanılanlara benzer çekme tezgahlarında, benzer kalıp geometrileri kullanılarak gerçekleştirilir. İç çapın doğru bir şekilde kontrol edilmesi için çekme sırasında borunun içine yerleştirilmiş silindirik veya konik bir mandrel veya tapa kullanılması gerekmektedir. Temel olarak, borunun dış ve iç çapını azaltmak için dört tip boru çekme işlemi düşünülebilir. Tüm tipler için,

¹ Ar-Ge Mühendisi, Kalibre Boru San. Tic. A.Ş., myigit@kalibreboru.com ORCID: 0009-0003-6938-3986.

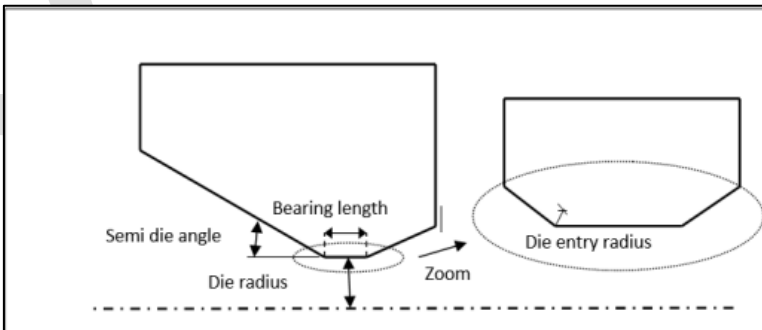
² Dr. Öğr. Üyesi, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, fundagulkoc@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6517-1239.

³ Mekanik İşlem Müdürü, Kalibre Alüminyum, MGurbuz@kalibreboru.com, ORCID: 0009-0008-5140-1580.

dış çapı kalibre etmek için kalıp çapı kullanılırken, soğuk çekilmiş borunun iç çapını kalibre etmek için çeşitli başka teknikler de geliştirilmiştir. Boru çekme işlemi, mandrel olmadan çekme (boru batması), sabit bir mandrel üzerinden çekme, yüzen bir mandrel üzerinden çekme, tapa ve hareketli bir mandrel üzerinden çekme olmak üzere dörde ayrılmaktadır [1, 2].

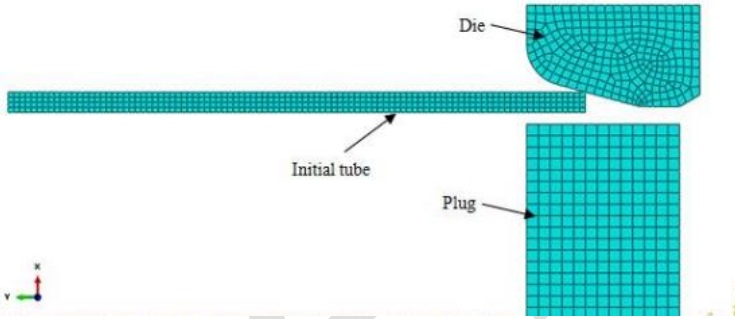
Boru boyutuna bağlı olarak, genellikle birden fazla çekme işlemi gerekebilmektedir. Kalıplar ve mandreller, daha küçük boru boyutları çekmek için işlenebilen krom kaplı takım çeliği veya tungsten karbür malzemelerden yapılmaktadır. Liu ve ark., tek geçişli boru çekme işleminde boru çapı ve et kalınlığı ile etkili gerilim, gerinim ve temas kuvvetinin arttığını görmüşlerdir [3, 4].

Şekil 1’de verilen kalıp geometrisi yarı kalıp açısı, yatak uzunluğu ve giriş yarıçapından oluşmaktadır. Yarı kalıp açısı, kalıp duvarının çekme yönüne doğru eğimi olarak tanımlanmaktadır. Farahani ve ark., ince et kalınlığına sahip boru çekme işlemi sırasında çekme gerilimini analiz etmişler ve çekme kalıbı şeklini optimize etmişlerdir. Kalıbın optimize edilmiş şekli çekme gerilimini azaltabildiğini ve ayrıca optimum kalıp şeklinin malzeme özellikleri, alan küçültme, mandrel açısı ve sürtünme katsayısından etkilendiğini belirtmişlerdir [5, 6].



Şekil 1. Soğuk çekme kalıp geometrisi [6]

Gattmah ve ark. Şekil 2’de şematik olarak gösterildiği gibi AISI 1010 çeliğinde soğuk çekimde yarı kalıp ve yarı mandrel açısının etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda 12 °’lik yarı kalıp açısının boru soğuk çekiminde minimum çekme stresine sahip olduğu ve yarı mandrel açısının çok bir etkisinin olmadığı görülmüştür [6].



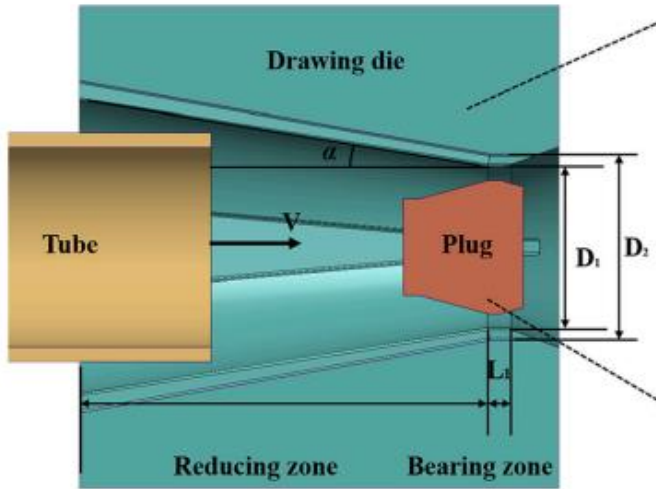
Şekil 2. Boru soğuk çekim prosesi [6]

Boutenel ve ark., yüksek doğruluktaki boruların son boyutlarını tahmin edebilen bir model sunmuşlar ve kalıp açısının, göreceli kalınlığın borunun geometrisi üzerindeki etkisini ve boru çekme işlemi sırasında borunun mekanik davranışını incelemişler. Boru çekme işleminde kalıntı gerilimin araştırılması için Kuboki, boru çekme işlemi sırasında kalıntı gerilimin dağılımını analiz etmiştir. Et kalınlığı işleme oranı %6 olduğunda, en iyi gerinim dağılım seviyesine sahip boru olduğunu bulmuşlardır [7,8].

Bu çalışmada farklı kalıp açılarında soğuk çekim prosesinin MARC programı üzerinden Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) analizi ile simülasyonu gerçekleştirilerek uygun kalıp açısı tasarımı için çalışma gerçekleştirilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında dış çap 35mm, et kalınlığı 1,40 mm olan, AISI 1010 malzemeden üretilen çelik borunun soğuk çekim prosesi Şekil 3'te verilen kalıp örneğine bağlı olarak Bearing Zone bölgesi 6 mm, α sırasıyla 6, 8, 10, 12, 14° ve soğuk çekim hızı 26 m/dk olacak şekilde MARC programı üzerinde Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) gerçekleştirilmiştir. Çalışmada soğuk çekme proses parametreleri arasında yer alan sürtünme katsayısı ve mandrel açıları sabit tutulmuştur.

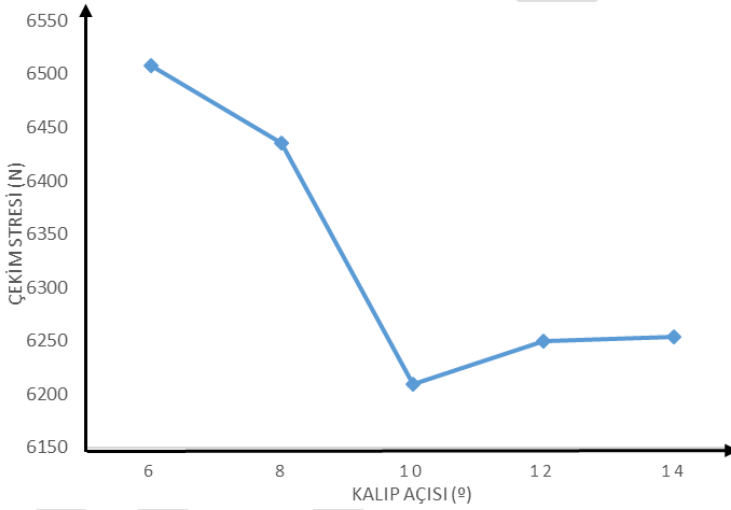


Şekil 3. Soğuk çekim kalıp tasarımı [9]

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

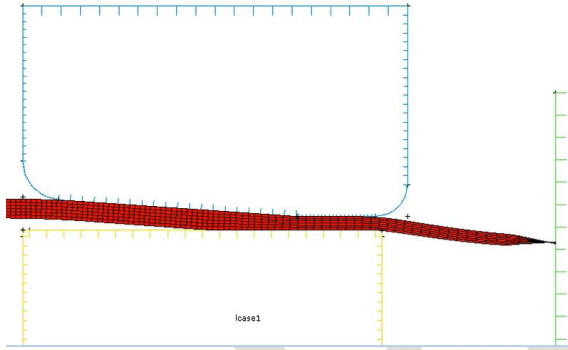
AISI 1010 borunun soğuk çekim FEA analizi MARC programı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'de FEA analizi ile farklı kalıp açılarının soğuk çekim işlemi sırasında çekim stresine etkisi verilmiştir. Bu sonuçlara göre soğuk çekme işleminde en yüksek çekim stresinin 6° kalıp açısında en düşük çekim stresinin ise 10° kalıp açısında olduğu görülmüştür. 6°'lik yarı kalıp açısına karşılık gelen çekme geriliminin,

dislokasyon yoğunluğundaki artış nedeniyle diğer yarı kalıp açılardan daha büyük kaydedildiğini göstermektedir. Aguilar ve ark., soğuk çekim kalıp tasarım modellemesi sonucu yarı kalıp açısının sürtünmede farklılıklar ürettiğini ve hem sürtünme hem de kesme deformasyonu etkisine sahip olduğunu belirlemişlerdir [10].

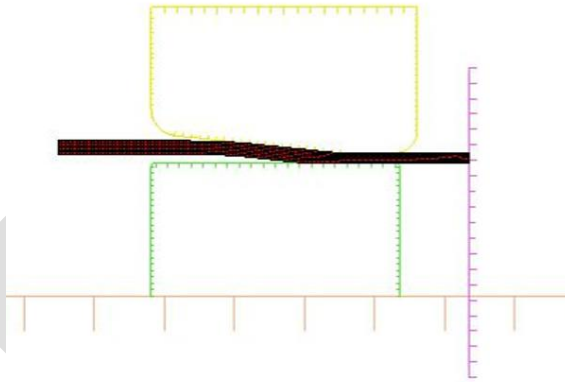


Şekil 4. FEA analizinde kalıp açısı/çekim stresi ilişkisi

Şekil 5’te verilen 6°’lik kalıp açısının FEA analizinin şematik görüntüsü incelendiğinde soğuk çekme işlemi sırasında boruda kopmanın meydana geldiği görülmüştür. Kopmanın gerçekleşmesinin nedeni yüksek oranda oluşan çekme stresidir. Şekil 6’da ise 10°’lik kalıp açısının FEA analizinin şematik görüntüsü verilmiştir. 10°’lik kalıp açısında düşük miktarda çekme stresi olduğu için borunun soğuk çekme işlemi sırasında kopma gerçekleşmediği görülmüştür.



Şekil 5. 6° kalıp açısının MARC FEA analizinin şematik gösterimi



Şekil 6. 10° kalıp açısının MARC FEA analizinin şematik gösterimi

4. SONUÇ

Sabit mandrel açısı ve sabit sürtünme katsayısına sahip kalıp açılarında düşük çekim stresi borunun kalitesini korumaya ve düşük enerji tüketiminde üretim yapmaya olanak sağlamaktadır. MARC yazılımı ile gerçekleştirilen FEA analizi sonucunda boruların soğuk çekiminde en düşük çekim stresinin

10° kalıp açısında meydana geldiği ve çekim işlemi sırasında boruda herhangi bir kopma meydana gelmeyerek daha yüksek kalitede bir soğuk çekme prosesinin gerçekleştirilebildiği belirlenmiştir. En yüksek çekim stresine sahip 6° kalıp açısında ise üretim kalitesinin yüksek deformasyon miktarından kaynaklı düşük olduğu ve çekim stresinden kaynaklı çatlak oluşumları veya kopmanın meydana gelebildiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen analiz sonuçlarına göre AISI 1010 çelik boruların soğuk çekme prosesi için kalıp üretiminde optimum kalıp açısı 10° olarak belirlenmiştir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Halaczek, D. (2016). Analysis of manufacturing bimetallic tubes by the cold drawing process. Archives of Metallurgy and Materials, 61(1), 241-248.
- [2] Orhan, S., Öztürk, F., & Gattmah, J. (2017). Effects of the semi die/plug angles on cold tube drawing with a fixed plug by FEM for AISI 1010 steel tube. Sakarya University Journal of Science, 21(5), 886-892.
- [3] Bella, P., Buček, P., Ridzon, M., Mojžiš, M., & Parilák, L. (2016). Influence of die geometry on drawing force in cold drawing of steel tubes using numerical simulation. Key Engineering Materials, 716, 708-712.
- [4] Kumar, P., & Agnihotri, G. (2013). Cold drawing process—A review. metal forming, 3(3).
- [5] Karnezis, P., & Farrugia, D. C. J. (1998). Study of cold tube drawing by finite-element modelling. Journal of materials processing technology, 80, 690-694.
- [6] Jabbar, J. K. (2010). Calculation of Relative Extrusion Pressure for Circular Section by Local Coordinates System by Using Finite Element Method FEM. Diyala Journal of Engineering Sciences, 3(2), 80-96.
- [7] Boutenel, F., Delhomme, M., Velay, V., & Boman, R. (2018). Finite element modelling of cold drawing for high-precision tubes. Comptes Rendus. Mécanique, 346(8), 665-677.
- [8] Kuboki, T., Nishida, K., Sakaki, T., & Murata, M. (2008). Effect of plug on levelling of residual stress in tube drawing. Journal of materials processing technology, 204(1-3), 162-168.

- [9] Li, W., Wang, B., Liu, S., Zhang, C., Huang, Y., & Chen, J. (2024). Cold precision forming and microstructure evolution of ribbed tube for nuclear fuel cladding by multi-pass drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 326, 118310.
- [10] Aguilar, M. T. P., Correa, E. C. S., Silva, R. F., & Cetlin, P. R. (2002). The evaluation of redundant deformation factors in axi-symmetric bar drawing of austenitic stainless steel. *Journal of materials processing technology*, 125, 323-325.

DÜŞÜK KARBONLU ÇELİKTE KAYNAK UYGULAMASI SONRASI ISIL İŞLEMİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Mutlu Çağrı YİĞİT¹

Özge ARARAT²

Abdullah ÖTER³

1. GİRİŞ

Yüksek frekanslı elektriksel direnç kaynağı (HF-ERW), özellikle çelik boruların üretiminde yaygın olarak kullanılan ve yüksek kaliteli kaynak dikişi sağlayan bir yöntemdir. Otomotiv ve beyaz eşya sektörü başta olmak üzere birçok endüstriyel uygulamada tercih edilen bu kaynak yöntemi, boruların uzunlamasına dikişlerinin oluşturulmasında kullanılır. HF-ERW, yüksek frekanslı elektrik akımının kullanılmasıyla kaynak işleminin gerçekleştirildiği bir yöntemdir. Geleneksel kaynak yöntemlerinden farklı olarak HF-ERW yöntemi, yüksek frekanslı elektrik akımı geçirilerek ısıtılan parçaya ani basınç uygulanması ile gerçekleştirilir [1,2].

Sıcak haddelenmiş bir çelik levha, önce rulo şekillendirme makineleri ile kademeli olarak yuvarlak forma dönüştürülmektedir. Rulo şekillendirme makineleri aracılığıyla sürekli olarak yuvarlaklaştırılan levha boru haline getirilmektedir.

¹ Ar-Ge Mühendisi, Kalibre Boru San. Tic. A.Ş., myigit@kalibreboru.com ORCID: 0009-0003-6938-3986.

² Araştırma Görevlisi, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, ozge.ararat@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2921-6510.

³ Ar-Ge Müdürü, Kalibre Boru San. Tic. A.Ş., aoter@kalibreboru.com, ORCID: 0009-0009-2428-3192.

Boru formuna getirilen levhanın kenarlarına yüksek frekanslı elektrik akımı uygulanır. Yüksek frekanslı elektrik akımı "skin etkisi" ve "proximity etkisi" gibi fiziksel olgular sayesinde, levhanın kenar yüzeyinde yoğunlaşarak ısının birikmesine yol açmaktadır. Böylece kenarların ısı etkisiyle ergimesi sağlanmaktadır. Levhanın iki kenar yüzeyinin ergimesi sonrası, ani dövme basıncı altında birleşmesi sağlanır. HF-ERW işlemi esnasında levhanın kenar yüzeyinde oluşan çapaklar ve oksit katmanı, kaynak sıyırma silindirleri arasında sıkıştırılarak dışarıya doğru atılır. Böylece, kaynak bölgesinin çapak ve oksit tabakasından temizlenmesi sağlanır. Sonuç olarak, ek metal olmaksızın, ısı ve basınç etkisiyle oluşturulmuş bir kaynak dikişi elde edilmektedir [3-5].

HF-ERW yöntemiyle birçok çelik grubunda dikişli boru üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu çelik gruplarından biri de düşük karbonlu çeliklerdir. Düşük karbonlu çelik borular, %0,05 ile %0,25 arasında karbon içeriğine sahip olup iyi şekillendirilebilirlik, iyi kaynaklanabilirlik ve yüksek dövme özellikleri sergilerler. Bu özellikler ile düşük karbonlu çeliklerin inşaat, otomotiv, makine imalatı gibi farklı endüstriyel uygulamalarda kullanımı mevcuttur [5].

Çeliklerde kaynak işlemi sonrası faz dönüşümü ve mekanik davranış üzerine etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Bayraktar ve diğ., IF (Interstitial Free) çeliklerinin kaynağı esnasında tane kabalaşma mekanizmasını incelemişlerdir. Kaynak bölgesindeki incelemeler, ergime çizgisi yakınında çok büyük tanelerin varlığını ve bunların ısı akış yönleri boyunca yönlendiğini göstermiştir. Düşük karbonlu çeliklerin kaynağında, tane kabalaşma bölgesinin (GCZ) ve ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) çok kritik olduğu, çünkü gevrekleşmenin bu bölgelerde yoğunlaştığı saptanmıştır. Kaynaklanmış metalde çeliğin karbon içeriğine ve soğuma hızına bağlı olarak, tane sınırı ferriti (GBF), Widmanstatten ferrit (WF),

asiküler ferrit (AF) ve martenzit ile birlikte az miktarda kalıntı östenit ve perlit fazları oluşabilmektedir. Mikroyapıda zaman zaman beynit oluşumu da raporlanmıştır. Öte yandan çeliğin mukavemetini ve tokluğunu arttıran AF'nin genellikle metalik olmayan inklüzyonlar üzerinde çekirdeklendiği tespit edilmiştir. Diğer yandan, GBF'nin kırılma tokluğunu olumsuz yönde etkilediği ve kaynak metalinde meydana gelen gevrek kırılmanın WF miktarı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir [10-12].

Düşük karbonlu çeliklerde, ısıdan etkilenen GCZ'deki (AC_3 'ün üzerindeki en yüksek sıcaklıklarda) gevrekleşme, kaynak sonrası oluşabilen ve mikroyapıda istenmeyen kaba tane yapılı GBF ve WF'nin varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, GCZ'de meydana gelebilen gevrek kırılmanın, önceki östenit tane boyutuna ve hızlı soğutma sonrasında temperlenmemiş martenzit oluşumuna bağlı olarak gerçekleştiği bildirilmiştir [10-12].

Bu çalışmada, düşük karbonlu bir çelik, rulo şekillendirme makineleri aracılığıyla yuvarlaklaştırıldıktan sonra HF-ERW yöntemiyle kaynak işlemine tabi tutulmuş ve boru haline getirilmiştir. Kaynak işleminin ardından hızlı soğutma sonrası martenzit fazı oluşmaktadır. Buna bağlı olarak HAZ bölgesinde meydana gelebilecek gevrek kırılmanın önüne geçmek amacıyla farklı sıcaklıklarda ısıtma işlemleri uygulanmıştır. Isıtma işlemi sıcaklıkları Thermo-Calc yazılımı ile belirlenmiştir. Isıtma işlemlerinin ardından ışık mikroskobu ile mikroyapısal incelemeler yapılmıştır. Kaynak sonrası ısıtma işlem uygulamasının mekanik özellikler üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla çekme testleri gerçekleştirilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Deneyisel çalışmada kullanılan düşük karbonlu çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir. HF-ERW yöntemiyle üretilen düşük karbonlu çelik borulara 800, 850 ve 900 °C sıcaklıklarda 15 dakikalık süre ile tavlama işlemi

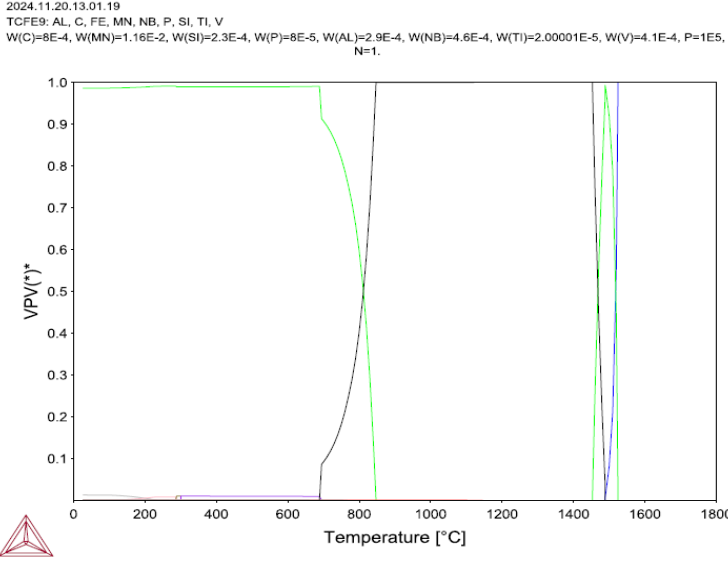
uygulanmıştır. Tavlama işlemi sonrası çelik borular havada soğutulmuştur. Isıl işlemlerin ardından çelik borulardan kesilen numuneler sıcak kalıplama ile bakalite alınmış ve metalografi işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Metalografi işlemleri 120, 320, 600 ve 1000’lik zımparalama ve 3 mikronluk elmas solüsyon ile parlatma kademeleri uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Metalografi işlemlerinin tamamlanmasının ardından mikroyapısal incelemeler için numuneler %3’lük Nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Kaynak bölgesi ve kaynak karşı bölgesine ait mikroyapısal incelemeler Leica-DM400 model ışık mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri, mikrosertlik testleri ve ISO 6892 standardına göre gerçekleştirilen çekme testleri ile belirlenmiştir.

Tablo 1. Deneysel çeliğin kimyasal kompozisyonu (kütlece % değerleri)

C	Mn	Si	Al	Fe
0,09	1,16	0,02	0,03	Kalan

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Isıl işlemler öncesinde Thermo-Calc yazılımı kullanılarak deneysel çeliğin hesaplanmış faz oranları belirlenmiştir. Şekil 1’de deneysel çeliğin hesaplanmış denge diyagramı verilmiştir. Denge diyagramı üzerinden kritik dönüşüm sıcaklıkları belirlenmiştir. Buna göre, A_1 sıcaklığının yaklaşık 700 °C, A_3 sıcaklığının ise yaklaşık olarak 850 °C olduğu tespit edilmiştir. Isıl işlemler ferrit ve östenit fazlarının bir arada bulunduğu 800 °C (A_1 - A_3), A_3 sıcaklığı olan 850 °C ve tam östenit bölgesi olan 900 °C ($>A_3$) sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.



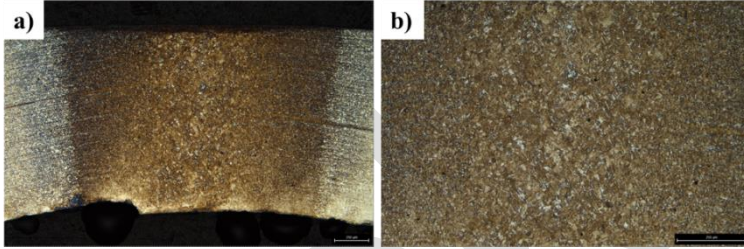
Şekil 1. Düşük karbonlu çeliğin hesaplanmış denge diyagramı

Yapılan çalışmalarda düşük karbonlu bir çeliği farklı sıcaklıklarda tavlayıp havada soğutarak tokluk özelliğini incelemişlerdir. Çalışmaların sonucunda elde edilen ferrit ve perlit mikroyapısından oluşan çelikte, daha az iç gerilme olduğu ve tokluk değerinin yükseldiği bildirilmiştir [6-9].

Bu çalışmada % 0,09C içeren deneysel çeliğe 800-900 °C sıcaklık aralığında 15 dakika süre ile uygulanan ısıtma işlemler sonrasında havada soğutma yapılarak yavaş soğuması sağlanmıştır. Düşük karbon içeriğine sahip olan deneysel çeliğin, yavaş soğuma sonrasında ferrit ve perlit fazlarından oluşması beklenmektedir. Böylece, kaynak işlemi sonrası martenzit fazına sahip HAZ bölgesinin de ferrit ve perlit fazlarına dönüşmesi ile numunelerde hem homojen bir mikroyapı elde edilmiş hem de gevrek kırılmanın önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

HF-ERW yöntemiyle üretilen dikişli çelik boruların kaynak bölgeleri, ısıtma işlem öncesinde ve sonrasında ışık

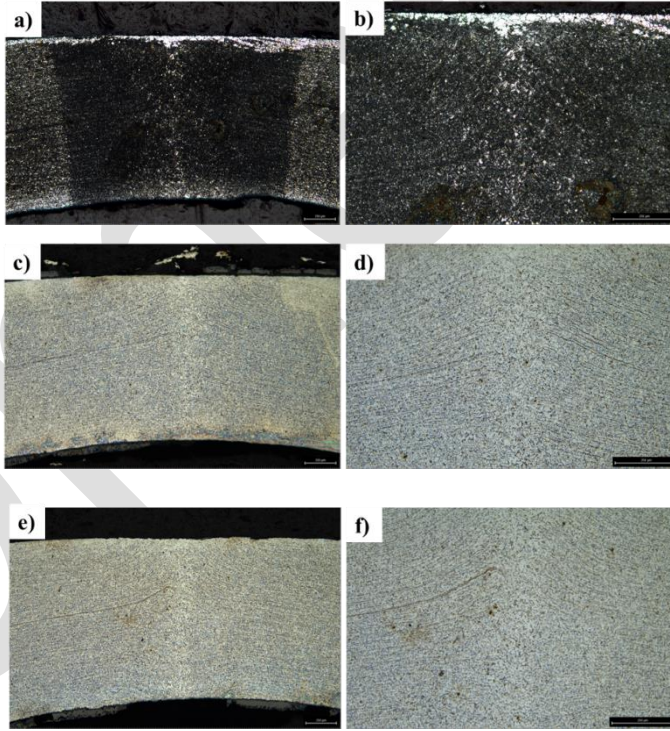
mikroskobu ile incelenmiştir. Şekil 2’de kaynak sonrası tavsız (ısıl işlem uygulanmamış) numuneye ait ışık mikroskobu görüntüleri sunulmuştur. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, kaynak sonrasında su verme işlemi ile hızlı soğutma yapılmasına bağlı olarak HAZ bölgesinde martenzit fazının oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. Düşük karbonlu çelik borunun kaynak bölgesine ait mikroyapı görüntüsü a) 5x büyütme b) 10x büyütme

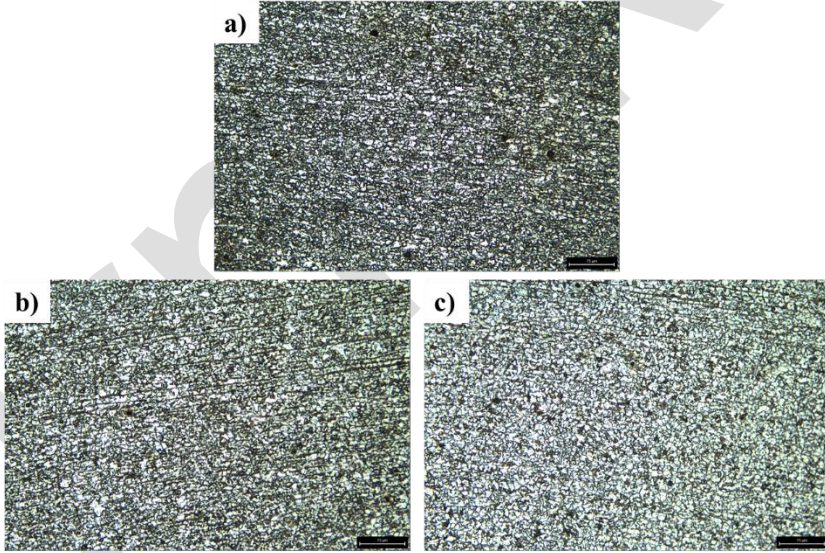
Şekil 3’te kaynak işlemi sonrası 800, 850 ve 900 °C sıcaklıklarda ısıl işlem uygulanmış numunelerin kaynak bölgelerine ait ışık mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Isıl işlemler sonrasında tüm numuneler havada soğutulmuştur. Bu nedenle, yavaş soğumanın etkisiyle numunelerin nihai mikroyapılarının ferrit ve perlitik yapıdan oluştuğu belirlenmiştir. HF-ERW yöntemiyle üretilen dikişli çelik borulara kaynak esnasında ani basınçların uygulanması nedeniyle kaynak bölgelerinde deformasyon yönünde yönelmenin meydana geldiği görülmektedir. 800 °C’de ısıl işlem uygulanmış numunenin kaynak bölgesi incelendiğinde dekarbürizasyon meydana geldiği tespit edilmiştir. 800 °C’de uygulanan ısıl işlem A_1 - A_3 sıcaklık aralığında interkritik bölgeye tekabül etmektedir. Bu bölgede ferrit ve östenit fazları bulunmaktadır. Karbon difüzyon katsayısı ferrit fazında östenit fazından çok daha yüksektir. Ancak ferrit fazının karbon çözünürlüğü östenit fazına göre çok düşüktür. Bu nedenle, 800 °C’de östenitin içerdiği karbon miktarı çeliğin genel kimyasal kompozisyonundaki

karbon miktarından daha yüksektir. Bu durum, HAZ bölgesinde dekarbürizasyona neden olmuştur [13]. A_3 ve üstü sıcaklıklar olan 850 ve 900 °C’de gerçekleştirilen ısıt işlemlerde ise mikroyapı östenit tek fazlı bölgesinden oluşmaktadır. Tam östenit bölgesinden yavaş soğutma yapılmasıyla östenit ferrit ve perlit fazlarına dönüşmüştür. 850 ve 900 °C’de uygulanan ısıt işlemler sonrasında kaynak bölgesine ait ışık mikroskobu görüntüleri incelendiğinde, HAZ bölgesindeki martenzitik bölgenin ferrit ve perlite dönüştüğü tespit edilmiştir. Dolayısıyla, kaynak bölgesinin ana metal ile benzer yapıda olduğu ve homojen bir mikroyapının elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 3. Kaynak işlemi sonrası farklı sıcaklıklarda ısıt işlem uygulanmış numunelerin kaynak bölgelerine ait ışık mikroskobu görüntüleri a) 800 °C 5x büyütme, b) 800 °C 10x büyütme, c) 850 °C 5x büyütme, d) 850 °C 10x büyütme, e) 900 °C 5x büyütme, f) 900 °C 10x büyütme

Şekil 4'te kaynak işlemi sonrası 800, 850, 900 °C sıcaklıklarda ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin kaynak karşı bölgelerinin ışık mikroskobu görüntüsü sunulmuştur. Buna göre, tüm numunelerde ana metalin nihai mikroyapısının ferrit ve perlitik yapıdan oluştuğu görülmektedir. Koyu bölgeler perlit, açık bölgeler ise ferrit fazına aittir. Işıtıl işlem sıcaklığının artmasına bağılı olarak önceki östenit tane boyutu büyümektedir. Bu nedenle, ısıtıl işlem süresinin artmasıyla eş eksenli ferrit tanelerinin de kabalaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ısıtıl işlem sıcaklığının 800 °C'den 900 °C'ye yükselmesi ile mikroyapıdaki perlit faz oranının da azaldığı belirlenmiştir [14].



Şekil 4. Kaynak sonrası farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin karşı bölgelerine ait ışık mikroskobu görüntüleri a) 800 °C, b) 850 °C, c) 900 °C

HF-ERW yöntemiyle üretilen düşük karbonlu çelik borulara uygulanan ısıtıl işlemlerin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'de çekme testi sonuçları verilmiştir. Buna göre, kaynak

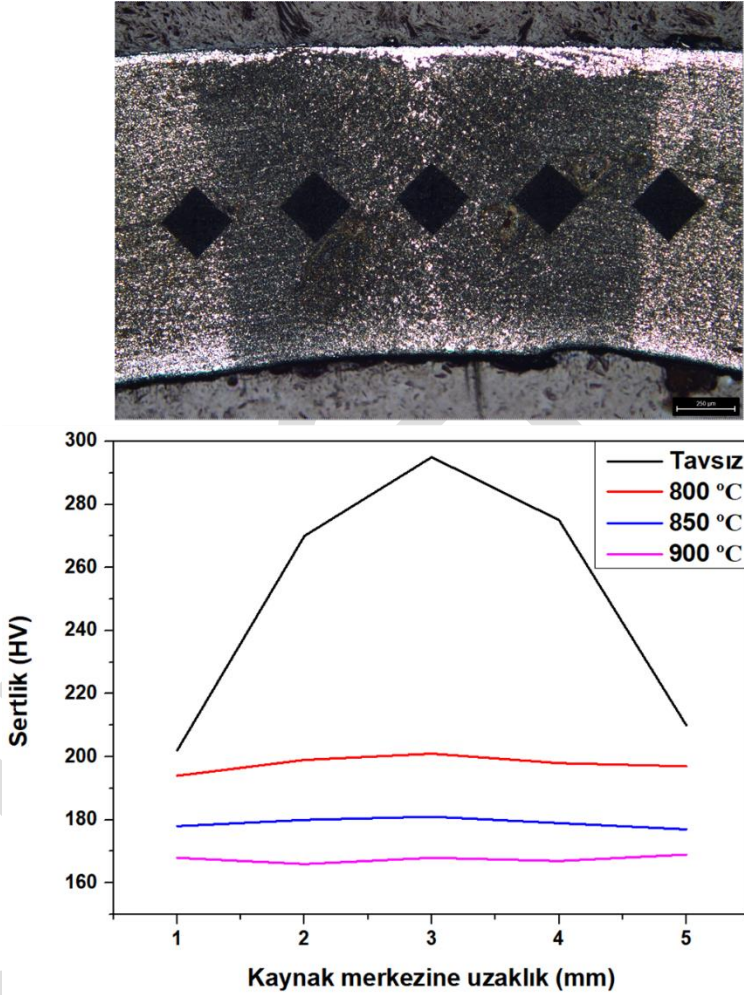
sonrası ısıtıl işlem uygulanmamış numunenin 638 MPa çekme mukavemeti ve %18,87 kopma uzamasına sahip olduğu görülmektedir. Farklı sıcaklıklarda uygulanan ısıtıl işlemler sonrasında mikroyapısal değişime bağlı olarak uzama değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. 800 °C’de ısıtıl işlem uygulanmış numunede dekarbürizasyon meydana gelmesi nedeniyle uzama değerindeki artış diğer iki numuneye göre daha düşüktür. 850 ve 900 °C’de ısıtıl işlem uygulanmış numunelerde ise uzama değerlerinin oldukça yükseldiği belirlenmiştir. HAZ bölgesindeki martenzit fazının ferrit ve perlit fazlarına dönüştürülmesi gevrek kırılmanın önüne geçilmesini sağlamıştır. 900 °C’de artan ısıtıl işlem süresine bağlı olarak tane kabalaşmasının meydana gelmesi uzama değerinde ve mukavemette azalmaya yol açmıştır.

Tablo 2. ısıtıl işlem öncesi ve sonrasına ait çekme test sonuçları

Numune	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Tavsız (ısıtıl işlem uygulanmamış)	638	18,87
800 °C’de ısıtıl işlem sonrası	613	22,74
850 °C’de ısıtıl işlem sonrası	583	31,05
900 °C’de ısıtıl işlem sonrası	573	29,08

Şekil 5’te kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmamış ve farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin kaynak bölgelerine ait sertlik profili verilmiştir. Sertlik profili ana metal-kaynak bölgesi-ana metal şeklinde oluşturulmuştur. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmamış numunede ana metalden ergime çizgisine doğru gidildikçe sertliğin arttığı görülmektedir. Kaynak bölgesi martenzitik yapıdan oluşmaktadır. Bu nedenle, sertlik değeri ana metale göre oldukça yüksektir. ısıtıl işlem görmüş numunelerde ise ferrit ve

perlit fazlarından oluşan homojen mikroyapının etkisiyle ana metal ile kaynak bölgesinde benzer sertlik değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 5. Kaynak bölgesine ait sertlik profili

4. SONUÇ

Bu çalışmada, HF-ERW yöntemi uygulanarak kaynaklanmış ve boru haline getirilmiş düşük karbonlu bir çeliğe ısıl işlem uygulanmasının, mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Kaynak işlemi esnasında ısıtma ve ardından hızlı soğutma yapılması kaynak bölgesinde martenzitik yapının oluşmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, kaynak işlemi uygulanmış çeliğe 800, 850 ve 900 °C sıcaklıklarda 15 dakikalık süre ile ısıl işlem uygulanmış ve havada soğutma yapılmıştır. Isıl işlemler sonrasında ışık mikroskobu ile mikroyapısal incelemeler yapılmıştır. Buna göre, tüm numunelerde nihai mikroyapının ferrit ve perlit fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. 800 °C’de gerçekleştirilen işlemde kaynak bölgesinde dekarbürizasyon meydana gelmiştir. 850 ve 900 °C sıcaklıklarda ana metal ile benzer mikroyapıya sahip bir kaynak bölgesi elde edilmiştir.

Isıl işlemlerin kaynak bölgesindeki mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme test sonuçlarına göre kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmamış numunede kopma uzaması % 18,87 olarak tespit edilmiştir. 800, 850 ve 900 °C sıcaklıklarda uygulanan ısıl işlemler sonrasında kopma uzamalarının sırasıyla %22,74, %31,05 ve %29,08 olduğu belirlenmiştir. 800 °C’de uygulanan ısıl işlemde dekarbürizasyon nedeniyle daha düşük uzama değerlerine ulaşıldığı düşünülmektedir. 850 ve 900 °C’de uygulanan ısıl işlemler sonrasında ise ana metal ile benzer mikroyapıya ulaşılması, kopma uzama değerlerinde ciddi bir artış sağlamıştır.

Isıl işlemler öncesinde ve sonrasında numunelerin ana metal ile kaynak bölgelerinden sertlik ölçümleri yapılmış ve sertlik profili elde edilmiştir. Buna göre, ana metalden kaynak

bölgesine doğru martenzit fazının etkisiyle sertlik artmıştır. Ancak ana metal ile kaynak bölgesi arasındaki mikroyapısal farklılık gevrek kırılmaya neden olmaktadır. Isıl işlemler sonrasında yapılan sertlik ölçümlerinde ise ana metal ile kaynak bölgesinin benzer sertlik değerlerinde olduğu saptanmıştır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Joo, M. S., Noh, K. M., Kim, W. K., Bae, J. H., & Lee, C. S. (2015). A study of metallurgical factors for defect formation in electric resistance welded API steel pipes. *Metallurgical and Materials Transactions E*, 2(2), 119-130.
- [2] Maksuti, R., Mehmeti, H., & Oettel, H. (2007, September). The Influence of the plastic deformation on the metal flow during high frequency electric resistance welding of longitudinally welded pipes. In *3rd International Conference, Deformation Processing and Structure of Materials, Belgrade, Serbia* (pp. 20-22).
- [3] Ravikiran, K., Xu, P., & Li, L. (2024). A critical review on high-frequency electric-resistance welding of steel linepipe. *Journal of Manufacturing Processes*, 124, 753-777.
- [4] Rr, M. (2016). Effect of plastic deformation on the microstructure and plasticity of high frequency electric resistance welding. *Machines. Technologies. Materials.*, 10(8), 45-48.
- [5] Simion, P., Dia, V., Istrate, B., Hrituleac, G., Hrituleac, I., & Munteanu, C. (2016, August). Study of fatigue behavior of longitudinal welded pipes. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 145, No. 2, p. 022032). IOP Publishing.
- [6] Zhao, J., Lee, J. H., Kim, Y. W., Jiang, Z., & Lee, C. S. (2013). Enhancing mechanical properties of a low-carbon microalloyed cast steel by controlled heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 559, 427-435.
- [7] Adamczyk, J., & Grajcar, A. (2007). Heat treatment and mechanical properties of low-carbon steel with dual-phase microstructure. *Journal of Achievements in materials and manufacturing engineering*, 22(1), 13-20.

- [8] Rosado, D. B., De Waele, W., Vanderschueren, D., & Hertelé, S. (2013). Latest developments in mechanical properties and metallurgical features of high strength line pipe steels. *International Journal of Sustainable construction and design*, 4(1).
- [9] Matrosov, M. Y., Lyasotskii, I. V., Kichkina, A. A., D'yakonov, D. L., & Efimov, A. A. (2012). Microstructure in low-carbon low-alloy high-strength pipe steel. *Steel in Translation*, 42, 84-93.
- [10] Güral, A., Bostan, B., & Özdemir, A. T. (2007). Heat treatment in two phase region and its effect on microstructure and mechanical strength after welding of a low carbon steel. *Materials & design*, 28(3), 897-903.
- [11] Boumerzoug, Z., Derfouf, C., & Baudin, T. (2010). Effect of welding on microstructure and mechanical properties of an industrial low carbon steel. *Engineering*, 2(7), 502.
- [12] Makhdoom, M. A., Ahmed, F., Channa, I. A., Inam, A., Riaz, F., Siyal, S. H., ... & Alhazaa, A. (2022). Effect of Multiple Thermal Cycles on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 1045 Weldments. *ACS omega*, 7(46), 42313-42319.
- [13] Nimko, M. O. (2021). Influence of welding parameters on decarburization in heat affected zone of dissimilar weldments after post weld heat treatment. *Archives of Materials Science and Engineering*, 112(1).
- [14] Wu, G. H., Wu, K. M., Isayev, O., Hress, O., Yershov, S., & Tsepelev, V. (2019). Effect of austenitizing temperature on pearlite transformation of a medium-carbon steel. *Metallurgist*, 62, 1073-1080.

GIYİLEBİLİR TEKNOLOJİLERDE SENSÖRLERİN ÜRETİMİ VE KULLANIM ALANLARI

Enes NAYMAN¹

1. GİRİŞ

Son yıllarda, giyilebilir teknoloji alanı hem akademik hem de endüstriyel araştırmaların önemli bir odağı haline gelmiştir. Bu teknolojiler, bireylerin sağlık durumunu izleme, günlük aktivitelerini takip etme ve çevresel faktörlere duyarlılık sağlama gibi çeşitli alanlarda çözümler sunmaktadır. Giyilebilir cihazların bu çok yönlülüğü, özellikle yarıiletken sensör teknolojileri ile desteklendiğinde, çok daha geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Bu bölümde, giyilebilir yarıiletken sensörlerin gelişim süreci, mevcut teknolojik çözümler ve bu sensörlerin teknik detayları üzerine derinlemesine bir analiz sunulacaktır.

Giyilebilir cihazlar, sağlık, dış ortam sporları ve askeri uygulamalar gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu cihazlar, bireylerin fizyolojik verilerini gerçek zamanlı olarak kaydedebilmekte ve analiz edebilmektedir. Geleneksel sensör teknolojilerinin mekanik katılığı ve sınırlı performansı, modern uygulamalardaki gereksinimleri tam anlamıyla karşılayamamaktadır. Bu noktada, esnek, hafif ve düşük enerji tüketimine sahip yarıiletken sensörler, geleneksel yaklaşımlara kıyasla çok daha etkili bir çözüm sunmaktadır. Aynı zamanda, bu sensörlerin özelleştirilebilir yapısı, farklı uygulama alanlarına

¹ Öğr. Gör. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Söğüt Meslek Yüksekokulu, Moda Tasarımı Bölümü, enes.nayman@bilecik.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3656-3126.

kolayca adapte edilebilmesine olanak tanımaktadır. Teknolojik anlamda yapılan çalışmalar incelendiğinde yarıiletken malzemelerin rijit ve esnek yapılı birçok malzeme ile birlikte kullanıldığı görülmektedir (Yuan vd., 2023), (J. H. Lin vd., 2023).

Yarıiletken sensör teknolojilerinin temelinde, fiziksel ve kimyasal olayları algılama yeteneği yatmaktadır. Metal oksit yarıiletkenler, gaz algılama gibi çevresel parametrelerin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, genellikle hızlı tepki süreleri ve yüksek hassasiyet gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, organik yarıiletkenler, mekanik esneklik ve biyouyumlu yapısıyla öne çıkmaktadır. Bu iki malzeme grubunun birleştirilmesiyle hibrit yapılar geliştirilerek, sensörlerin performansı ve uygulama alanları genişletilmektedir. Perovskit malzemeler ise hem elektriksel hem de optik performanslarıyla yeni nesil sensör uygulamaları için umut vaat etmektedir (Tanaka, 2024), (Korde vd., 2024), (Xuan vd., 2024).

Giyilebilir yarıiletken sensörlerin gelişiminde önemli teknik zorluklar bulunmaktadır. Bunlar arasında esneklik, dayanıklılık ve enerji verimliliği gibi faktörler öne çıkmaktadır. Esnek bir yapı sunmak için nanoteknoloji tabanlı çözümler geliştirilmekte ve bu sayede sensörlerin hem mekanik hem de elektriksel dayanımı artırılmaktadır. Bunun yanı sıra, düşük enerji tüketimine sahip elektronik devre tasarımları, sensörlerin uzun ömürlülük ve taşınabilirlik gereksinimlerini karşılaması için kritik bir rol oynamaktadır. Çalışma ortamındaki gürültü ve parazit gibi dış faktörlerin etkisini azaltmak için çok katmanlı malzeme yapıları ve sistemle uyumlu devre tasarımları tercih edilmektedir (Z. Lin vd., 2024), (Kulkarni vd., 2024), (Barman vd., 2022), .

Gelecekte, giyilebilir yariletken sensörlerin daha da geliştirilerek çok yönlü bir yapıya kavuşması beklenmektedir. Bu çerçevede, biyoyumlu malzemelerle entegre edilen ve enerji ihtiyacını kendiliğinden karşılayabilen sensör tasarımları hem bireysel kullanım hem de endüstriyel uygulamalar için yeni olanaklar sunacaktır. Sensörlerin çevresel etkilerden korunması için geliştirilecek nano kaplama teknolojileri ve yapay zekâ destekli veri işleme sistemleri, bu alandaki gelişimin önemli bir parçası olacaktır. Tüm bu gelişmeler, giyilebilir teknolojiler alanında yeni bir döneme işaret etmektedir (Kashyap vd., 2023), (Xiao vd., 2024).

2. GİYİLEBİLİR TEKNOLOJİLERE GENEL BAKIŞ

Giyilebilir teknolojiler, modern hayatın birçok alanında kendine geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bu teknolojiler, kullanıcı ile cihaz arasındaki etkileşimi artırarak daha kişiselleştirilmiş bir deneyim sunmaktadır. Yalnızca fiziksel verileri ölçmekle kalmayıp, kullanıcıların fiziksel aktivitelerini planlamalarına ve hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olan yazılımlarla da entegre çalışmaktadır. Teknolojik özellikler ile bütünleşik olan bu giysilerin aynı zamanda büyük ölçü de kullanım esnekliği sağlamaları da büyük bir avantaj sunmaktadır.

Giderek yaygınlaşan bu teknolojiler, farklı alanlarda sundukları yenilikçi çözümlerle yaşam kalitesini artırmayı hedeflemektedir. Kullanıcı ihtiyaçlarına göre şekillenen bu cihazlar, günümüzün hızlı ve teknoloji odaklı yaşam biçimine önemli katkılar sağlamaktadır. Gelişim sürecindeki bu dinamik yapı, teknolojinin gelecekteki potansiyel kullanım alanlarını daha da genişleteceğini göstermektedir. Giyilebilir teknolojilerin diğer teknolojilerle kıyaslandığında en önemli fark veya

avantajları esnek ve kolay taşınabilir olmalarıdır (Wei vd., 2024).

2.1. Sensörlerin Temel İşlevleri

Sensörlerin temel işlevi, çevresindeki fiziksel, kimyasal veya biyolojik değişimleri algılayarak bu verileri sayısal veya elektriksel bir sinyale dönüştürmektir. Bu dönüşüm, cihazın işlevsel hale gelmesi için gereklidir ve toplanan veriler, kullanıcının veya sistemin anlamlı bir şekilde tepki vermesine olanak sağlar. Giyilebilir teknolojilerde kullanılan sensörler, genellikle vücuttaki belirli parametreleri izlerken, çevresel koşulları da ölçebilir (Zeyuan Zheng vd., 2024), (Chaudhary vd., 2024).

Birçok sensör, belirli bir parametrenin miktarını ölçme işlevine sahiptir. Bu, fiziksel değişimlerin izlenmesiyle ilgili temel bir özelliktir. Örneğin, sıcaklık sensörleri, çevresel sıcaklığı ölçerek dış ortamda değişimlere karşı kullanıcıları uyarır (Wang vd., 2023), (Venkataramanan vd., 2023). Benzer şekilde, oksijen satürasyonu ölçen sensörler, kan oksijen seviyelerini izler (Nwibor vd., 2023). Bu sensörler, doğrudan insan sağlığını etkileyen verileri toplarken, aynı zamanda cihazın işlevselliğini artırarak kullanıcıya önemli bilgiler sağlar.

Bir diğer önemli işlev, sensörlerin gerçek zamanlı veri iletimi ve uzaktan erişim sağlamasıdır. Giyilebilir cihazlarda kullanılan sensörler, topladıkları verileri kablosuz olarak iletebilir, bu da kullanıcıların verilerine her an ulaşabilmelerini sağlar. Bluetooth, Wi-Fi veya daha gelişmiş iletişim protokolleriyle cihazlar, toplanan verileri akıllı telefonlar veya bulut tabanlı platformlarla entegre ederek, kullanıcıların uzaktan izleme yapmalarına olanak tanır (Tijus vd., 2024).

Sensörlerin sahip olması gereken özelliklerden biri de düşük enerji tüketimidir. Giyilebilir cihazların uzun süre boyunca çalışabilmesi için sensörlerin enerji verimliliği büyük

önem taşır. Modern sensörler, düşük güç tüketimi ile yüksek hassasiyetli ölçümler yapabilmektedir. Bu sensörler, genellikle batarya ömrünü uzatmak için düşük güçte çalışacak şekilde tasarlanır ve kullanıcıların cihazlarını uzun süre kesintisiz kullanabilmesini sağlar (Yan vd., 2024), (Yi vd., 2023), (J. Li vd., 2023).

2.2. Giyilebilir Teknolojilerin Tanımı

Giyilebilir teknolojiler, kullanıcıların doğrudan üzerinde taşıyabileceği ve genellikle vücuda entegre edilen elektronik sistemleri ifade etmektedir. Bu cihazlar, sensörler, işlemciler, güç kaynakları ve iletişim modülleri gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Ayrıca veri toplama, işleme ve iletim işlevlerini bir arada sunmaktadır. Giyilebilir cihazların temel özelliklerinden biri, taşınabilirlik ve sürekli kullanım için tasarlanmış olmalarıdır. Bir diğer önemli bileşen, enerji tüketimini azaltan yenilikçi devre tasarımları ve düşük güçlü iletişim teknolojileri, bu cihazların performansını artırmaktadır. Bunun yanı sıra, bazı cihazlarda güneş enerjisi panelleri veya kinetik enerji dönüştürücüler gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmaktadır (Zhou vd., 2024).

Giyilebilir teknolojilerin bir diğer önemli yönü, kullanıcı deneyimine yönelik tasarımlarıdır. Cihazların, yalnızca teknik açıdan işlevsel olması değil, aynı zamanda estetik ve ergonomik olması da büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, cihazların tasarımında hafif malzemeler ve esnek bileşenler tercih edilmektedir. Böylece hem kullanıcıların konforu sağlanmakta hem de cihazların uzun süreli kullanımı teşvik edilmektedir (Jabari vd., 2024), (Sabino vd., 2024), (Kim, 2024).

2.3. Sensörlerin Giyilebilir Teknolojilerdeki Rolü ve Giyilebilir Cihazlarla Entegrasyonu

Sensör teknolojileri, giyilebilir cihazların işlevselliğini ve etkinliğini belirleyen en kritik unsurlardan biridir. Sensörlerin

en önemli özelliklerinden biri, gerçek zamanlı veri sağlama kabiliyetidir. Bu durum, yalnızca kullanıcıların ihtiyaçlarını hızlı bir şekilde karşılamakla kalmaz, aynı zamanda onların bilinçli kararlar almasına da yardımcı olur. Sensörlerden elde edilen doğru ve güvenilir bilgiler, cihazların çeşitli koşullarda yüksek performans göstermesini sağlar. Enerji verimliliği ve dayanıklılık gibi faktörler ise bu teknolojilerin sürekli gelişmesini ve kullanıcı dostu bir yapıya sahip olmasını destekler.

Giyilebilir cihazlarda kullanılan sensörlerin önemi, yalnızca bireysel düzeyde değil, toplumsal fayda açısından da değerlidir. Sensörler sayesinde elde edilen büyük veri havuzları, farklı alanlarda analiz edilebilir ve bu analizler yoluyla daha geniş kitlelere hizmet edebilecek çözümler sunulabilir. Sensör teknolojilerinin sürekli gelişimi, giyilebilir cihazların hem mevcut kullanım alanlarında daha etkin hale gelmesine hem de yeni uygulama alanlarına kapı açmasına olanak tanımaktadır.

Giyilebilir teknolojilerde sensörlerin rolü sadece biyometrik verilerle sınırlı değildir; çevresel faktörlerin izlenmesinde de kritik bir işlevi vardır. Çevresel sensörler, kullanıcının çevresindeki hava kirliliği, UV ışını seviyeleri, sıcaklık ve nem gibi faktörleri ölçer. Bu sensörler, özellikle açık hava aktivitelerinde yer alan bireylerin sağlık ve güvenliklerini sağlamak adına önemli veriler sunar. Örneğin, UV ışını sensörleri, aşırı güneşe maruz kalmayı engelleyerek cilt sağlığını koruma adına kullanılabilirken, sıcaklık ve nem sensörleri, aşırı ısınma veya hipotermi gibi durumları önlemek amacıyla kullanıcıları uyabilir (Zou vd., 2020).

Sonuç olarak, sensörler, giyilebilir teknolojilerin temel işlevselliğini şekillendiren ve kullanıcı deneyimini özelleştiren en önemli unsurlardır. Bu sensörler, yalnızca veri toplamakla kalmaz, aynı zamanda toplanan verilerin anlamlı bir şekilde

analiz edilmesine olanak sağlar. Sensörlerin teknolojik gelişimi, giyilebilir cihazların sağlık, spor ve güvenlik gibi alanlardaki uygulamalarını daha verimli ve etkili hale getirmektedir.

3. GİYİLEBİLİR SENSÖR TÜRLERİ VE ÖZELLİKLERİ

Kullanıcıların vücudu veya kıyafetleri üzerine entegre edilen giyilebilir sensörler, genellikle vücut üzerine takılabilen mikro-elektromekanik sistemler (MEMS) olarak tanımlanır. Ayrıca bundan farklı olarak belirli yöntemler ile giyilebilir ürün ya da malzemelere bütünleştirilerek te elde edilebilirler. Bu cihazların minyatürize edilmesi yani mümkün olabildiğinde küçük ve taşınabilir boyutlara indirgenebilmesi, kullanıcıların günlük yaşamlarını etkilemeden sensörleri kolayca taşıyabilmelerini sağlamaktadır. Esneklik ve ergonomi, özellikle giyilebilir elektroniklerin kumaşlarla entegre edilebilmesi veya vücut hatlarına uyum sağlayabilmesi açısından önemli avantajlar sunar (W. Li vd., 2022), (Nag vd., 2017).

Giyilebilir sensörlerin üretimi ve giysilere entegre edilme sürecinin daha iyi anlaşılabilmesi için tekstil üretim proseslerinin farklı aşamalarında yer alan iplik ve kumaş süreçlerinin bilinmesi de büyük bir önem arz etmektedir çünkü sensörler sadece nihai ürünler üzerine değil aynı zamanda iplik ve kumaş aşamalarında da giysilere dahil edilebilmektedir. Bu sebeple kullanım alanlarına göre de hangi sensörün daha uygun olacağı, sensörlerin kullanılacağı potansiyel uygulamalar açısından değerlendirilmelidir. Bu bölümde iplik, kumaş ve nihai ürünlerle bütünleştirilen sensörler ve bunları literatürdeki elde edilme ve kullanılma süreçleri incelenecektir.

3.1. İplik Sensörler

İplik sensörleri, tekstil alanında çeşitli aşamalardan geçerek üretilen doğal, rejenere ya da sentetik liflerin sensör özellikleri kazandırılmasıyla elde edilmektedir. Bu kısımda en sık kullanılan sensörlerin başında yarıiletken nanomalzemeler ile üretilen sensörler yer almaktadır. Yarı iletken iplik sensörleri, yarı iletken teknolojisinin prensiplerini tekstil mühendisliğinin esnekliği ve işlevselliğiyle birleştirerek, giyilebilir, esnek ve son derece hassas algılama çözümlerinin oluşturulmasını sağlar. Elektronik tekstillerle bütünleştirilerek, tekstil ürünlerinin konforunu ve esnekliğini korurken mekanik gerginlik, sıcaklık ve gazlar gibi çeşitli uyarıların algılanmasına olanak tanır. İpliklere sensör özelliği kazandırmak için birbirinden farklı yöntemler kullanılmaktadır. Burada yine yarıiletken ince filmler ile iplikler üzerine biriktirilen malzemeler ipliklere sensör kabiliyeti kazandırmaktadır (Gozukizil vd., 2024a).

İnce film teknolojisi, ipliklere kaplama yoluyla fonksiyonel özellikler kazandırmak için kullanılan yenilikçi bir yöntemdir. Bu süreçte, polimer, metal, seramik veya kompozit malzemeler gibi ince film tabakaları iplik yüzeyine homojen bir şekilde uygulanır. Kaplama işlemi, buhar biriktirme, sol-jel daldırarak kaplama, döndürerek kaplama yöntemi veya kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi tekniklerle gerçekleştirilir. İnce film kaplamalar, ipliklerin mekanik dayanımını artırabilir, su iticilik, elektriksel iletkenlik veya antibakteriyel özellikler kazandırabilir. Aynı yöntemler farklı değişkenler kullanılarak sensör özellikleri de değiştirilebilmektedir. Sensör üretimi kadar sensör çeşitleri de kullanım alanları açısından büyük önem ihtiva etmektedir (Nayman vd., 2024), (Rungruangkitkrai vd., 2024), (Chen vd., 2022), (İslam vd., 2020), (Peng vd., 2020), (Karaman vd., 2024).

Gerinim sensörleri, gerilme veya bükülme gibi mekanik deformasyonları algılamak için tasarlanmış, öne çıkan bir yarı iletken iplik sensörü türüdür. Bu sensörler genellikle mekanik strese maruz kaldığında elektrik direncinde değişiklikler yaşayan grafen veya karbon nanotüpler gibi iletken malzemelerle ipliklere yerleştirilir ya da kaplanır. Son gelişmeler, bükülebilir ve yıkanabilir e-tekstil gaz sensörleri üretmek için indirgenmiş grafen oksit kullanımını sergileyerek, tekstil uygulamalarında grafen bazlı malzemelerin çok yönlülüğünü ve dayanıklılığını göstermiştir (Xie vd., 2020), (Zhang vd., 2021), (Xiang vd., 2020).

İpliklere entegre edilen sıcaklık sensörleri, direnci sıcaklığa göre değişen malzemeler olan termistörler kullanılarak geliştirilmiştir. Termistör çiplerini ipliklere yerleştirerek ya da ince filmler olarak kaplayarak elde edilen iplik sensörler hassas sıcaklık ölçümleri gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (Lugoda vd., 2019).

Gaz sensörleri, yarı iletken iplik teknolojisi içerisinde üzerinde yenilikçi çalışmalar yapılan bir diğer sensör türüdür. Bu sensörler, zehirli, boğucu ve patlayıcı gazlar olmak üzere insan hayatına olumsuz yönde etki eden birçok farklı gaz türünün tespitini sağlamaktadırlar. Farklı ortam koşullarında, farklı sıcaklıklarda çalışan bu sensörler tekstil tabanlı platformların geliştirilmesini ve çok işlevli algılama potansiyelini göstermektedir. Yarıiletken ipliklerin çeşitli gazlarla tepkimeye giren metal oksitler ile kaplanarak ta iplik sensörler üretilmektedir (Gozukizil vd., 2024b), (Nayman vd., 2024).

Yarı iletken iplik sensörlerinde kullanılan malzemeler arasında iletken polimerler, karbon bazlı malzemeler ve metal oksitler bulunur. Polianilin ve polipirol gibi iletken polimerler, esneklikleri ve elektriksel iletkenlikleri nedeniyle yaygın olarak

kullanılır. Grafen ve karbon nanotüpler dâhil olmak üzere karbon bazlı malzemeler, hassasiyetleri ve mekanik dayanıklılıkları nedeniyle tercih edilir. Çinko oksit ve titanyum dioksit gibi yarı iletken metal oksitler, çeşitli gazlara karşı yüksek hassasiyetleri nedeniyle gaz sensörlerinde yaygın olarak kullanılır (Bhattacharya ve De, 1996), (Zichen Zheng ve Wang, 2024).

Potansiyellerine rağmen, yarı iletken iplik sensörleri dayanıklılık, yıkanabilirlik ve ölçeklenebilirlikle ilgili zorluklarla karşı karşıyadır. Tekrarlanan kullanım ve çevresel faktörlere maruz kalma sonrasında tutarlı performans sağlamak kritik bir engel olmaya devam etmektedir. Araştırmacılar bu sensörlerin sağlamlığını artırmak ve günlük kullanım için daha pratik hale getirmek için uygun maliyetli üretim yöntemleri geliştirmek için aktif olarak çalışmaktadır.

Yarı iletken iplik sensörlerinin hafif olmaları, istenirse dokuma veya örgü yoluyla büyük tekstil yüzeylerine de uygulanarak farklı yerlerde kullanımına olanak sağlamaktadır. Yarı iletkenlerin işlevlerini tekstillerin çok yönlülüğüyle birleştirerek, bu sensörler gelişmeye devam etmektedir. Malzeme bilimi ve üretim tekniklerindeki ilerlemelerin gelecekte bunların yeteneklerini ve pratik uygulamalarını daha da genişletmesi muhtemeldir.

3.2. Kumaş Sensörler

Kumaş sensörler, tekstil endüstrisinde kullanılan kumaşların çeşitli parametreleri algılamasına olanak tanıyan, yenilikçi teknoloji ürünleridir. Kumaşlara sensör özelliklerinin kazandırılması, genellikle kumaşın iç yapısına entegre edilen malzemelerle ya da yine ipliklerde uygulanan kaplama yöntemleri sayesinde uygulanmaktadır. Bu süreç, özel iletken veya yarıiletken kumaşların veya sensör elemanlarının kumaş

lifleriyle birleşmesini sağlayan birbirinden farklı üretim tekniklerini içerir.

Kumaşlara sensör özelliklerinin kazandırılmasında ilk adım, genellikle tekstil liflerinin iletkenlik kazanmasıdır. Bu bölümün ilk kısmında belirtmiş olduğumuz ipliklere sensör özellikleri kazandırıldıktan sonra örme veya dokuma yoluyla kumaşlar elde edilebilmektedir. İkinci olarak kumaşlara direk kimyasal yarıiletken ya da iletken çözeltiler ile sensör özellikleri kazandırılabilir. Son olarak ta yine dikim olarak sensör mekanizmasının kumaşın üzerine dikim yoluyla birleştirmeleri ile yapılabilmektedir.

Kumaş yüzeyine uygulanan ince yarıiletken filmler veya nanomalzemeler, tekstilin üzerinde esnek ve hafif sensör ağırları oluşturur. Bu sensör ağırları, sıcaklık, nem, basınç gibi çevresel faktörlerin yanı sıra, kimyasal, biyolojik ve elektriksel değişimleri de algılayabilir. Kumaş üzerindeki sensör elemanları, belirli bir uyaran ile karşılaştığında elektriksel iletkenliklerinde değişiklikler meydana getirir, bu da algılama işlevi görür (Somkuwar vd., 2024).

Kumaş sensörlerinin tasarımında kullanılan bir diğer önemli bileşen, mikroçiplerin veya sensör devrelerinin kumaş liflerine entegre edilmesidir. Bu, giyilebilir teknolojilerin temelini oluşturan bir süreçtir. Kumaşların işlevsel sensör özellikleri kazanabilmesi için, her bir fiberin üzerine ya da arasına yerleştirilen mikroçipler, çok hassas algılama yapabilen yapılar oluşturur. Özellikle sıcaklık, nem, basınç, pH değeri ve kimyasal madde tespiti gibi parametreler, kumaşın üzerinde bulunan sensörler aracılığıyla algılanabilir. Bu sensörler, giyilebilir cihazlar, tıbbi uygulamalar, spor kıyafetleri ve güvenlik ekipmanlarında kullanılabilir (Simegnaw vd., 2021).

Geliştirilen kumaş sensörleri, hem esneklik hem de dayanıklılık açısından geleneksel tekstil materyallerinden

farklıdır. Bu sensörler, deformasyon, yıkama ve aşınma gibi zorluklara karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Aynı zamanda kumaşın doğal özelliklerini kaybetmeden, yalnızca ihtiyaç duyulan bölgelerde işlevsel özellikler gösterirler. Kumaşların üzerinde kullanılan iletken malzemeler, çoğunlukla hafif, esnek ve yıkanabilir özelliklere sahiptir, bu da günlük kullanımda pratiklik sağlar fakat kullanım alanlarına bağlı olarak tek kullanımlık olarak ta üretilebilmektedirler (Simegnaw vd., 2021).

Kumaş sensörlerinin ticari ve endüstriyel uygulamaları hızla yayılmaktadır. Bu sensörler, hem sağlık sektöründe hem de spor giyimde potansiyel taşıyan giyilebilir teknolojilerde kullanılmaktadır. Kumaş sensörleri, aynı zamanda çevresel izleme, akıllı tekstil ürünleri ve kişisel güvenlik gibi alanlarda önemli rol oynar. Kumaşlara sensör yerleştirme işlemi, tekstil mühendisliği ve elektronik mühendisliğinin birleşiminden doğan inovatif bir alandır ve gelecekteki gelişmelerle daha geniş kullanım alanları bulması beklenmektedir.

3.3. Nihai Ürün Sensörleri

Nihai ürün sensörleri, giysi ve tekstil ürünlerine entegre edilen sensör teknolojilerinin bir diğer önemli uygulama alanıdır. Bu sensörler, doğrudan giyilebilir ürünler üzerine monte edilen elektronik bileşenler sayesinde, kullanıcının çevresel faktörlere tepki verme yeteneğini izler ve bu verileri toplar. İplik ve kumaş üretim süreçlerinin ötesinde, nihai ürünlere sensörlerin yerleştirilmesi genellikle montaj yöntemiyle yapılır. Bu işlemde, giysilere çeşitli aksesuarlar, kalın dokulu kumaşlar veya özel kesimlerle elektronik devreler, sensörler ve mikrokontrolör kartları entegre edilir.

Özellikle kalın dokulu kumaşlar, elektronik devrelerin sağlam bir şekilde yerleştirilebilmesi için elverişli bir zemin sağlar. Bu tür kumaşlar, sensörlerin zarar görmeden giysi

üzerine montajının yapılabilmesine olanak tanır. Aksesuarlar ve özel yapılar da, sensörlerin giysi üzerine güvenli bir şekilde sabitlenmesini sağlayan önemli bir rol oynar. Elektronik devreler ve mikrokontrolörler, genellikle kumaş yüzeylerine yerleştirilen ince kablolar veya bağlantı elemanları aracılığıyla birbirine bağlanır ve sensörler doğru şekilde çalışacak şekilde konumlandırılır.

Bu sensörler, giysilere monte edildikten sonra, vücut sıcaklığı, hareket, basınç, nem gibi parametreleri izlemeye başlar. Sensörler aracılığıyla elde edilen veriler, genellikle mikrokontrolörler aracılığıyla işlenir ve kullanıcıya gerçek zamanlı bilgiler sunulur. Böylece, hem sağlık takibi hem de güvenlik amaçlı giyilebilir teknolojilerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynar. Nihai ürün sensörleri, özellikle spor giyim, medikal giyim ve akıllı tekstil ürünlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tür sensörlerin entegre edildiği giysiler, hem fonksiyonel hem de konforlu bir kullanım deneyimi sunarak, gelecekteki giyilebilir teknoloji uygulamalarının temelini oluşturur.

4. SONUÇ

Giyilebilir teknolojiler içerisinde önemli bir yer edinen sensörler, esneklik, hafiflik, düşük enerji tüketimi ve hassasiyet gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır. Yarıiletken malzemelerin kullanımı, sensörlerin performansını artırırken aynı zamanda çok yönlü uygulama imkânları sunmaktadır. Metal oksitler, organik yarıiletkenler ve perovskit malzemeler gibi farklı malzeme türleri, sensörlerin çevresel parametreleri algılama, biyolojik verileri izleme ve gerçek zamanlı veri iletimi gibi işlevlerini desteklemektedir.

Bu çalışmada ele alınan iplik, kumaş ve nihai ürün sensörleri, giyilebilir teknolojilerin farklı seviyelerdeki

entegrasyon süreçlerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. İplik seviyesinde yarıiletken malzemelerin kullanımı, gerilim, sıcaklık ve gaz algılama gibi spesifik işlevleri mümkün kılarken, kumaş seviyesinde yapılan çalışmalar, sensörlerin geniş yüzeylerde kullanımını kolaylaştırmaktadır. Nihai ürün seviyesinde ise bu teknolojiler, kullanıcıların günlük yaşamına daha doğrudan entegre edilerek kişisel sağlık takibi ve güvenlik gibi alanlarda önemli katkılar sağlamaktadır. Sensörlerin esnek yapısı, ergonomik tasarımı ve kablosuz iletişim özellikleri, kullanıcıların bu cihazlardan maksimum verim almasını sağlamaktadır.

Giyilebilir sensör teknolojileri, yalnızca bireysel kullanımlarla sınırlı kalmayarak, büyük veri analizleri ve yapay zekâ destekli sistemler ile toplum genelinde fayda sağlayabilecek çözümler sunmaktadır. Gelecekte bu alanda yapılacak çalışmaların, biyouyumlu ve enerji verimli malzemelerle daha sürdürülebilir tasarımlar geliştirilmesini hedefleyeceği öngörülmektedir. Ayrıca, nanokaplama teknolojileri ve makine öğrenimi tabanlı veri işleme sistemlerinin entegrasyonu, sensörlerin çevresel etkilerden korunmasını ve performanslarının artırılmasını sağlayacaktır. Tüm bu yenilikler, giyilebilir teknolojilerdeki gelişimin hızla devam edeceğini ve bu alandaki potansiyelin daha geniş bir yelpazede değerlendirileceğini göstermektedir.

5. KAYNAKÇA

- Barman, J., Tirkey, A., Batra, S., Paul, A. A., Panda, K., Deka, R., Babu, P. J. 2022. "The role of nanotechnology based wearable electronic textiles in biomedical and healthcare applications". *Materials Today Communications*, 32, 104055.
- Bhattacharya, A., De, A. 1996. "Conducting composites of polypyrrole and polyaniline a review". *Progress in Solid State Chemistry*, 24(3), 141–181.
- Chaudhary, V., Gaur, P., Rustagi, S. 2024. "Sensors, society, and sustainability". *Sustainable Materials and Technologies*, 40, e00952.
- Chen, F., Huang, Q., Zheng, Z. 2022. "Permeable Conductors for Wearable and On-Skin Electronics". *Small Structures*, 3(1), 2100135.
- Gozukizil, M. F., Nayman, E., Temel, S., Gokmen, F. O. 2024a. "Comparison of gas sensing performances in various yarn types coated with polyaniline". *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(7), 1–22.
- Gozukizil, M. F., Nayman, E., Temel, S., Gokmen, F. O. 2024b. "Comparison of gas sensing performances in various yarn types coated with polyaniline". *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(7), 1–22.
- Islam, G. M. N., Ali, A., Collie, S. 2020. "Textile sensors for wearable applications: a comprehensive review". *Cellulose* 2020 27:11, 27(11), 6103–6131.
- Jabari, S., Shaikh, A., Genç, Ç., Buruk, O., Virkki, J., Hamari, J. 2024. "A Systematic Literature Review on Computational Fashion Wearables". *International Journal of Human–Computer Interaction*, 40, 6913–6940.

- Karaman, M., Cam, S. M., Çelen, O., Özbakış, M., Yılmaz, K. 2024. "Reel-to-Reel Coating of a Conductive Polymer on Synthetic Textile Yarns in a Semi-closed Batch Oxidative CVD System". *Fibers and Polymers*, 25(7), 2597–2603.
- Kashyap, V., Yin, J., Xiao, X., Chen, J. 2023. "Bioinspired nanomaterials for wearable sensing and human-machine interfacing". *Nano Research* 2023 17:2, 17(2), 445–461.
- Kim, Y. J. 2024. "A Comprehensive Approach to Intelligent Garment for Posture Correction: A Preliminary Study for Integrating Aesthetics and Sensor Interaction". *Authorea Preprints*.
- Korde, V. B., Khot, S., Kamble, D. B., Amalraj, S. 2024. "Review: Perovskite nanostructures materials versatile platform for advance biosensor applications". *Sensors and Actuators Reports*, 7, 100201.
- Kulkarni, M. B., Rajagopal, S., Prieto-Simón, B., Pogue, B. W. 2024. "Recent advances in smart wearable sensors for continuous human health monitoring". *Talanta*, 272, 125817.
- Li, J., Yang, L., Chen, D., Zhang, Z., Zhang, Q., Ning, N., Yu, Q. 2023. "Ultra-low-power and High-accuracy CMOS Temperature Sensor". *Proceedings of International Conference on ASIC*.
- Li, W., Lu, W., Sha, X., Xing, H., Lou, J., Sun, H., Zhao, Y. 2022. "Wearable Gait Recognition Systems Based on MEMS Pressure and Inertial Sensors: A Review". *IEEE Sensors Journal*, 22(2), 1092–1104.

- Lin, J. H., Yang, T., Zhang, X., Shiu, B. C., Lou, C. W., Li, T. T. 2023. "Mn-doped ZnO/SnO₂-based yarn sensor for ammonia detection". *Ceramics International*, 49(22), 34431–34439.
- Lin, Z., Duan, S., Liu, M., Dang, C., Qian, S., Zhang, L., ... Zhu, M. 2024. "Insights into Materials, Physics, and Applications in Flexible and Wearable Acoustic Sensing Technology". *Advanced Materials*, 36(9), 2306880.
- Lugoda, P., Costa, J. C., Oliveira, C., Garcia-Garcia, L. A., Wickramasinghe, S. D., Pouryazdan, A., ... Münzenrieder, N. 2019. "Flexible Temperature Sensor Integration into E-Textiles Using Different Industrial Yarn Fabrication Processes". *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 73, 20(1), 73.
- Nag, A., Mukhopadhyay, S. C., Kosel, J. 2017. "Wearable Flexible Sensors: A Review". *IEEE Sensors Journal*, 17(13), 3949–3960.
- Nayman, E., Gözükcızıl, M. F., Usta, İ. 2024. "Deposition of CdO Semiconductors on yarns by Dip Coating Method and Gas Sensor Applications". *Textile and Apparel*, 34(2), 117–126.
- Nwibor, C., Haxha, S., Ali, M. M., Sakel, M., Haxha, A. R., Saunders, K., Nabakooza, S. 2023. "Remote Health Monitoring System for the Estimation of Blood Pressure, Heart Rate, and Blood Oxygen Saturation Level". *IEEE Sensors Journal*, 23(5), 5401–5411.
- Peng, L. E., Yao, Z., Yang, Z., Guo, H., Tang, C. Y. 2020. "Dissecting the Role of Substrate on the Morphology and Separation Properties of Thin Film Composite Polyamide Membranes: Seeing Is Believing". *Environmental Science and Technology*, 54(11), 6978–6986.

- Rungruangkitkrai, N., Phromphen, P., Chartvivatpornchai, N., Srisa, A., Laorenza, Y., Wongphan, P., Harnkarnsujarit, N. 2024. "Water Repellent Coating in Textile, Paper and Bioplastic Polymers: A Comprehensive Review". *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 2790, 16(19), 2790.
- Sabino, I., Fernandes, M. do C., Cepeda, C., Quaresma, C., Gamboa, H., Nunes, I. L., Gabriel, A. T. 2024. "Application of wearable technology for the ergonomic risk assessment of healthcare professionals: A systematic literature review". *International Journal of Industrial Ergonomics*, 100, 103570.
- Simegnaw, A. A., Malengier, B., Rotich, G., Tadesse, M. G., Van Langenhove, L. 2021. "Review on the Integration of Microelectronics for E-Textile". *Materials* 2021, Vol. 14, Page 5113, 14(17), 5113.
- Somkuwar, V. U., Garg, H., Maurya, S. K., Kumar, B. 2024. "Influence of Relative Humidity and Temperature on the Performance of Knitted Textile Triboelectric Nanogenerator". *ACS Applied Electronic Materials*, 6(2), 931–939.
- Tanaka, Y. 2024. "Recent advancements in physical and chemical MEMS sensors". *Analyst*, 149(13), 3498–3512.
- Tijus, C., Lee, P.-L., Yang, C.-F., Chang, C.-Y., Uddin, R., Koo, I. 2024. "Real-Time Remote Patient Monitoring: A Review of Biosensors Integrated with Multi-Hop IoT Systems via Cloud Connectivity". *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 1876, 14(5), 1876.
- Venkataramanan, V., Kavitha, G., Joel, M. R., Lenin, J. 2023. "Forest Fire Detection and Temperature Monitoring Alert using IoT and Machine Learning Algorithm". *Proceedings - 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology, ICSSIT 2023*, 1150–1156.

- Wang, Z., Matsushashi, R., Onodera, H. 2023. "Intrusive and non-intrusive early warning systems for thermal discomfort by analysis of body surface temperature". *Applied Energy*, 329, 120283.
- Wei, Z., Li, X., Cai, X., Zhuang, X. 2024. "A water-resistance and breathable fabric-based sensor with high sensitivity for air and underwater applications". *Chemical Engineering Journal*, 487, 150034.
- Xiang, D., Zhang, X., Han, Z., Zhang, Z., Zhou, Z., Harkin-Jones, E., ... Li, Y. 2020. "3D printed high-performance flexible strain sensors based on carbon nanotube and graphene nanoplatelet filled polymer composites". *Journal of Materials Science*, 55(33), 15769–15786.
- Xiao, X., Yin, J., Xu, J., Tat, T., Chen, J. 2024. "Advances in Machine Learning for Wearable Sensors". *ACS Nano*, 18(34), 22734–22751.
- Xie, X., Huang, H., Zhu, J., Yu, J., Wang, Y., Hu, Z. 2020. "A spirally layered carbon nanotube-graphene/polyurethane composite yarn for highly sensitive and stretchable strain sensor". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 135, 105932.
- Xuan, W., Fang, Y., Teng, S., Huang, S., Zou, L., Gao, S. S., ... Zheng, L. 2024. "In situ fabrication of porous polymer films embedded with perovskite nanocrystals for flexible superhydrophobic piezoresistive sensors". *Journal of Colloid and Interface Science*, 669, 358–365.
- Yan, Y., Xu, J., Peng, Z., Ji, Z., Gao, Y., Jia, L., Xu, Q. 2024. "Design Strategies of Integrated Metal-Oxide Semiconductor-Based Resistive Sensor Systems for Ammonia Detection". *Electronics* 2024, Vol. 13, Page 4800, 13(23), 4800.

- Yi, Z., Chen, Z., Yin, K., Wang, L., Wang, K. 2023. "Sensing as the key to the safety and sustainability of new energy storage devices". *Protection and Control of Modern Power Systems*, 8(1).
- Yuan, Z., Guo, Z., Meng, F. 2023. "Thin Film Prepared by Gas–Liquid Interfacial Self-Assembly Method and its Applications in Semiconductor Gas Sensors". *Advanced Materials Technologies*, 8(21), 2300494.
- Zhang, X., Xiang, D., Wu, Y., Harkin-Jones, E., Shen, J., Ye, Y., ... Li, Y. 2021. "High-performance flexible strain sensors based on biaxially stretched conductive polymer composites with carbon nanotubes immobilized on reduced graphene oxide". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 151, 106665.
- Zheng, Zeyuan, Zhu, R., Peng, I., Xu, Z., Jiang, Y. 2024. "Wearable and implantable biosensors: mechanisms and applications in closed-loop therapeutic systems". *Journal of Materials Chemistry B*, 12(35), 8577–8604.
- Zheng, Zichen, Wang, J. 2024. "Design and strain sensing performance of spiral-wrapped composite conductive yarn based on graphene/carbon nanotubes". *IEEE Sensors Journal*.
- Zhou, Z., Bai, Y., Niu, L., Lv, C., Li, Y., Niu, L. 2024. "Versatile ionogels with tailoring performance for strain sensors, temperature alarm and self-powered wearable devices". *Chemical Engineering Journal*, 488, 150982.
- Zou, W., Sastry, M., Gooding, J. J., Ramanathan, R., Bansal, V. 2020. "Recent Advances and a Roadmap to Wearable UV Sensor Technologies". *Advanced Materials Technologies*, 5(4), 1901036.

TRIBOLOGICAL PERFORMANCE UNDER ABRASIVE WEAR CONDITIONS OF 3D PRINTED PET-G, PLA, AND WOOD SPECIMENS BY FUSED FILAMENT FABRICATION (FFF)

Rüçhan YILDIZ¹

Bayram YILDIZ²

Hilal CAN³

Engin TAN⁴

İsmail OVALI⁵

1. INTRODUCTION

Fused Filament Fabrication (FFF) is an innovative manufacturing method that involves melting and layered deposition stages using a thermoplastic raw material and aims to create a three-dimensional (3D) part in the process (Sedlak et al., 2023; Maguluri et al., 2023; Doshi et al., 2022). FFF has

¹ M. Sc. Metallurgical and Materials Engineer, Pamukkale University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Metallurgical and Materials Engineering, ryildiz151@posta.pau.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5973-5496.

² Res. Asst. Dr., Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, bayramyildiz@pau.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9447-8133.

³ Asst. Prof. Dr., Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, hilalcan@pau.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2511-3565.

⁴ Assoc. Prof. Dr., Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, etan@pau.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4441-3678.

⁵ Prof. Dr., Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, iovali@pau.edu.tr, ORCID: 00-0002-8193-0060.

been a preferred method in recent years to obtain prototypes and final products in different industries due to the affordable cost of fabrication equipment and raw materials (Tan, 2023; Jin et al., 2024; Srinivasan et al., 2020). With the FFF method, layered structures can be produced with high precision and efficiency, high dimensional stability, narrow tolerances, and rapid prototyping using polymer-based engineering materials (Pandim et al., 2023; Boparai & Singh, 2024; Phogat et al., 2022; Wang et al., 2024). Generally, high strength, wear resistance, thermal stability, and good surface quality properties are required for engineering polymers used in the FFF method. Polymer materials that combine these properties are limited (Tomec et al., 2022; Hanon & Zsidai, 2021; Antić et al., 2023). For this reason, very different polymers are used depending on the service conditions. Today, as an alternative to conventional ABS and PLA polymers, new-generation thermoplastics such as PET-G, PEEK, PEI, and PC have begun to be preferred in the FFF method to provide these superior properties (He et al., 2023; Mohamed et al., 2018; Ding et al., 2019). However, in applications where lightness is important, PLA-containing but PLA alternative wood-looking and low-density WOOD filaments produced with active foam technology have also become popular material options. With various additives added to thermoplastic materials, hybrid and nanocomposite materials that offer high wear resistance under humidity conditions continue to be developed (Tyagi et al., 2024; Panin et al., 2024; Kumar et al., 2022).

Using the FFF method, this study investigated the wear behaviors of 3D printed samples produced from commercially available PET-G, PLA, and WOOD filaments. The abrasive wear performances of the samples were analyzed at different sliding speeds, sliding distances, and load parameters. The wear behaviors of the samples were compared with hardness, volume

loss, coefficient of friction (CoF), and surface roughness parameters. In addition, the deformations that occurred on the worn surfaces after wear were interpreted.

2. MATERIAL AND METHODS

In this study, PLA, PET-G, and WOOD filament materials commercially supplied by the ESUN company in Turkey were used. Table 1 gives the general properties of the filaments.

Table 1. General properties of PLA, PET-G and WOOD filaments

	PET-G	PLA	WOOD
Heat Distortion Temp. (°C, 0.45MPa)	64	53	45
Flexural Strength (MPa)	58	90	64
Density (g/cm³)	1.27	1.2	0.7
Melt Flow Index (g/10min)	20	3.5	17
Tensile Strength (MPa)	52	72	38
Elongation at Break (%)	83	11.8	6.5
Izod Impact Strength (kJ/m²)	4.47	5.4	4.4
Extruder Temperature (°C)	230 – 250	190 – 230	210 – 230
Bed Temperature (°C)	75 – 90	45 – 60	45 – 60
Printing Speed (mm/s)	40 – 100	40 – 100	30 – 100

Wear samples of PLA, PET-G, and WOOD materials were produced using the FFF method on an Ender 3 Pro 3D printer with dimensions of Ø10x20 mm. Figure 1 shows the 3D printer where the wear samples were produced, the wear samples, and the nozzle and table temperatures.

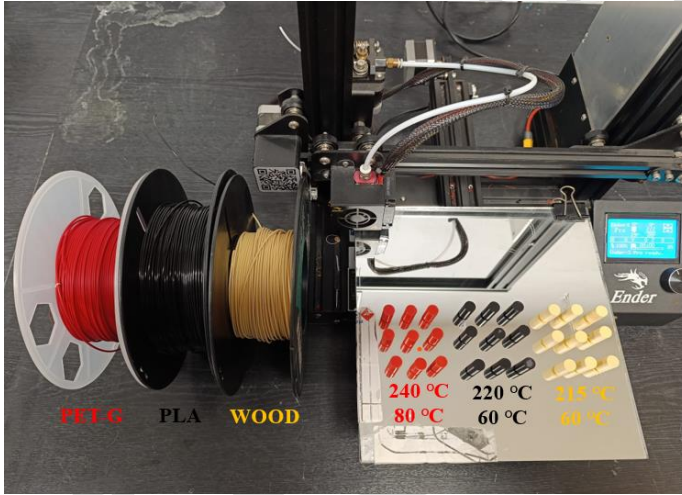


Figure 1. Fabrication process of 3D printed samples by FFF

Table 2 shows the fabrication parameters of 3D PLA, PET-G and WOOD wear samples.

Table 2. Selected fabrication parameters of PLA, PET-G and WOOD samples

Parameter	PLA	PET-G	WOOD
Platform Temperature (°C)	80	60	60
Nozzle Diameter (mm)	0.4	0.4	0.4
Layer Thickness (mm)	0.20	0.20	0.20
Infill Rate (%)	100	100	100
Print Speed (mm/s)	50	50	30
Raster angle (°)	+45/-45	+45/-45	+45/-45

Hardness tests were performed using the Shore D method according to TS ISO 868 standards. This method provides a reliable approach, especially in evaluating the mechanical properties of polymer materials. Measurements were performed with a Durotronic 1000 Model Shore D-type durometer. Hardness measurement with the specified device is shown in Figure 2. In order to obtain homogeneous hardness values, measurements were taken from six different points of the samples, and the average of these measurements was evaluated with standard deviations. This method minimizes local hardness differences on the surface, allowing more consistent and accurate results. This way, the hardness profile of materials exposed to wear could be analyzed more comprehensively.



Figure 2. Hardness measurement with durometer

The fabricated samples were subjected to wear tests under 5 N, 10 N, and 15 N loads at 180 m, 360 m, and 540 m sliding distances under 1.5 m/s, 3.0 m/s, and 4.5 m/s sliding speeds in a pin-on-disc wear tester according to ASTM G99

standard. The pin-on-disc wear device used is shown in Figure 3. The wear tests were carried out at room temperature (25 ± 2 °C) using 600 mesh sandpaper, and the sandpaper was changed for each sample. The volume loss-sliding distance graph was drawn using the weight loss values measured after the experiment, and the CoF graph was drawn using the friction values measured by the load cell during sliding. The volume loss values were found for each force value (5-10-15 N) and each sliding distance (180-360-540 m). The CoF graph was created with the data obtained from 15 N and 540m sliding distance for each speed.

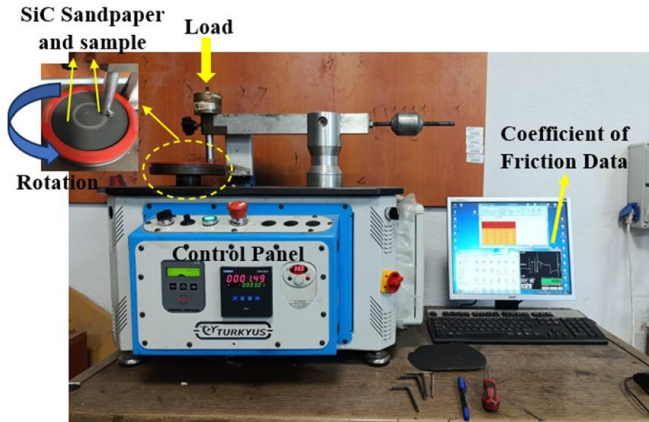


Figure 3. Pin-on disc wear device

The necessary calculations were made according to the following formulas:

$$\text{Volume loss} = [\text{Weight loss (g)} / \text{density (g/cm}^3\text{)}] \times 1000$$

$$\text{CoF } (\mu) = F/P$$

F is the friction force measured by the load cell, and P is the normal load applied to the samples.

After the wear test, surface roughness measurements were performed on the samples applied at 1.5 m/s, 3.0 m/s, and

4.5 m/s sliding speeds and 15 N loads. The Hardway 462 model roughness tester was used to analyze the structural condition of the worn areas. This method provides a better understanding of the deformation and damage level on the surface as a result of wear. Figure 4 shows the surface roughness measurement.

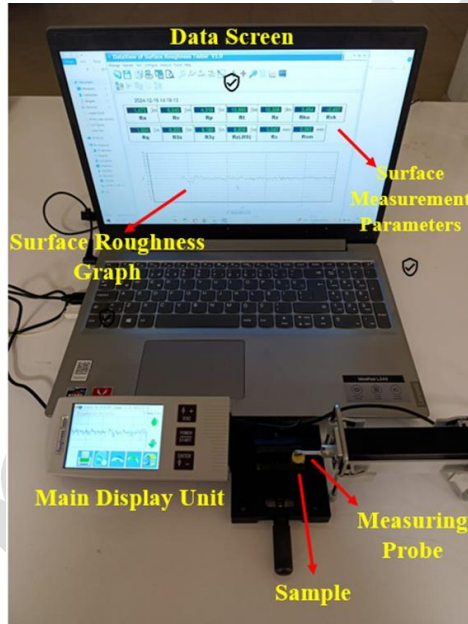


Figure 4. Surface roughness measurement

3. RESULTS AND DISCUSSION

The hardness values provide valuable insight into their suitability for use in products requiring varying degrees of strength, durability, and flexibility. Shore D hardness measurements were conducted on 3D printed samples of PLA, PET-G, and WOOD materials to evaluate their stiffness and resistance to surface indentation. Figure 5 illustrates the comparison of the hardness values for the PLA, PET-G, and WOOD samples. The PLA sample showed the highest hardness, measuring 80.5 Shore D with a standard deviation of 0.6,

indicating its relatively high rigidity and structural integrity. PET-G, a commonly used thermoplastic, showed a slightly lower hardness value of 75.5 with an average standard deviation of 1.2, reflecting its more flexible nature in comparison to PLA. The WOOD sample displayed the lowest hardness value compared to the other materials, measuring 70.3 with an average standard deviation of 0.4. Accordingly, it can be said that the WOOD material possesses the greatest susceptibility to deformation under applied pressure. The results highlight the distinct mechanical properties of each material, which can impact their performance in different 3D printing applications (Ko et al., 2025; Vălean et al., 2024).

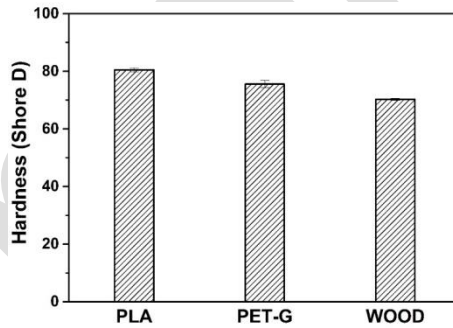


Figure 5. Shore D hardness values of 3D printed PLA, PET-G, and WOOD specimens

In the analysis of wear behavior, volume loss serves as a key parameter for assessing the material's resistance to wear. Figure 6 presents the relationship between volume loss (mm^3) and sliding distance (m) for PET-G, PLA, and WOOD materials, subjected to different sliding speeds, loads, and sliding distances. The volume loss of PET-G material under 5, 10, and 15 N loads and sliding distances of 180, 360, and 540 m is presented in Figure 6 (a-b-c) for sliding speeds of 1.5 m/s, 3.0 m/s, and 4.5 m/s, respectively. It is observed that the PET-G material exhibited a volume loss of 1.26 mm^3 under a 5 N load,

1.42 mm³ under a 10 N load, and 2.20 mm³ under a 15 N load at a sliding distance of 180 m. Accordingly, the volume loss exhibited almost a linear increase with the sliding distance. Under a 5 N load, the volume loss rose from 1.26 mm³ to 2.68 mm³ as the sliding distance increased from 180 m to 540 m. The sliding speed was also recognized as influential on the volume loss of PET-G material. For instance, when examining the volume losses over 180 m at sliding speeds of 3 m/s and 4.5 m/s under a 5 N load, it is noted that the losses increased to 1.73 mm³ and 2.52 mm³, respectively. Additionally, the linear increase in the volume loss of PET-G material with increasing sliding distance became more pronounced at higher speed and load combinations (Subramaniyan et al., 2022; Abdulla et al., 2024).

Figure 6 (d-e-f) demonstrates the volume loss of PLA material under 5, 10, and 15 N loads and sliding distances of 180, 360, and 540 m, at sliding speeds of 1.5 m/s, 3.0 m/s, and 4.5 m/s, respectively. Sliding speed, sliding distance, and load parameters were found to have similar impacts on the wear behavior of PLA material as in PET-G material. However, compared to PET-G material, it is evident that the volume losses in PLA material were higher under all conditions. For example, when examining the volume loss of the PLA at a sliding speed of 1.5 m/s (at sliding distances of 180 m), it was measured as 3.5, 5.2, and 8.8 mm³ under a load of 5 N, 10 N, and 15 N, respectively. It can be said that these values are more than 2 times higher compared to PET-G material under similar conditions.

The volume loss results of WOOD material under 5, 10, and 15 N loads and sliding distances of 180, 360, and 540 m, at sliding speeds of 1.5 m/s, 3.0 m/s, and 4.5 m/s are given in Figure 6 (g-h-i), respectively. It is clear, under similar working conditions, WOOD sample exhibited the greatest volume loss

among the others. For example, when comparing the volume losses measured over 180 m with a 5 N load and 1.5 m/s sliding speed, the volume loss for the WOOD material is measured as 8.04 mm³, while the values for PET-G and PLA are 1.26 mm³ and 3.5 mm³, respectively. The same material experienced nearly 17 mm³ volume loss when the applied loading was increased to 15 N. The effect of sliding speed and the applied load on the volume loss of WOOD material is quite evident. The volume loss, initially measured as 8.04 mm³ at a speed of 1.5 m/s over 180 m under a 5 N load, increased to 9.86 mm³ at 3 m/s and 12.00 mm³ at 4.5 m/s. The highest volume loss was encountered in WOOD material and recorded as 72.03 mm³ at a sliding speed of 4.5 m/s under a 15 N load over a distance of 540 m.

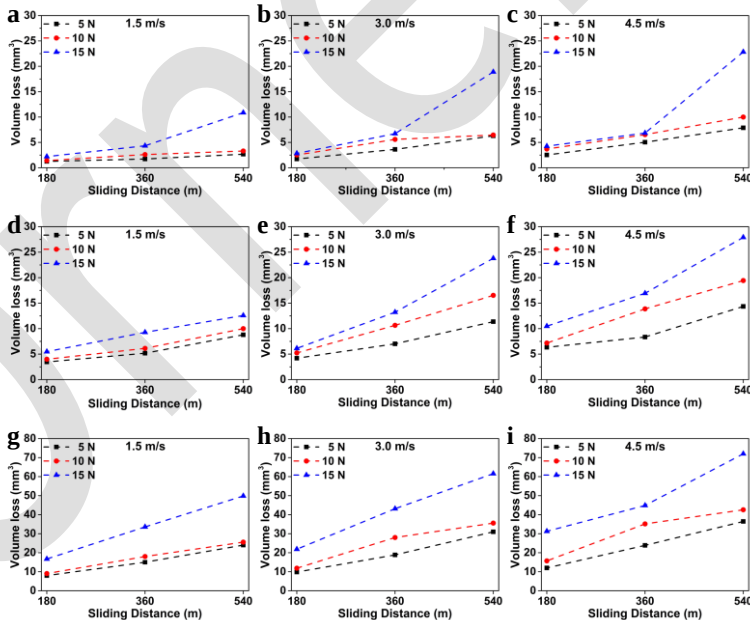


Figure 6. Volume loss versus sliding distance results of 3D printed (a – c) PET-G, (d – f) PLA, and (g – i) WOOD specimens at different sliding speeds (1.5, 3.0, and 4.5 m/s) and loads (5, 10, and 15 N).

To draw a general wear performance for all materials tested here, PLA demonstrated a good performance at low speeds (1.5 m/s) and loads (5 N), with minimal volume loss. However, due to the material's sensitivity to temperature, its mechanical strength significantly decreased as speed and load increased. This resulted in a rapid volume loss, particularly at a speed of 4.5 m/s and a load of 15 N. PET-G exhibited better wear resistance at medium (3.0 m/s) and high speeds (4.5 m/s) due to its superior temperature resistance compared to PLA. Additionally, PET-G showed lower volume loss values than PLA, particularly at 10 N and 15 N loads, making it a more suitable material for high-speed and high-load applications. WOOD filament demonstrated the worst wear performance which may be attributed to its structural heterogeneity. While it showed acceptable resistance at low speeds, the volume loss increased significantly as the speed (3.0 and 4.5 m/s) and load increased. This reveals that WOOD filament is more prone to surface deformation and rupture under loading. As the sliding speed increases, the frictional temperature on the material surface rises, accelerating the plastic deformation and material transfer processes, which in turn increases wear. Experimental results indicated that PET-G outperforms the other materials, even under high speeds and loads. However, PLA offers a cost-effective and practical option for low-speed and low-load conditions, while WOOD filament has limited applicability in such scenarios. These findings highlight the importance of selecting filament materials based on their mechanical wear performance and provide a detailed understanding of how materials perform under different operating conditions (Srinivasan et al., 2020; Bedi & Mallesh, 2024).

The CoF is a commonly used property for examining the tribological behaviors of materials. The CoF values obtained from wear tests performed on PET-G, PLA, and WOOD

samples under 15 N load and at different sliding speeds are given in Figure 7.

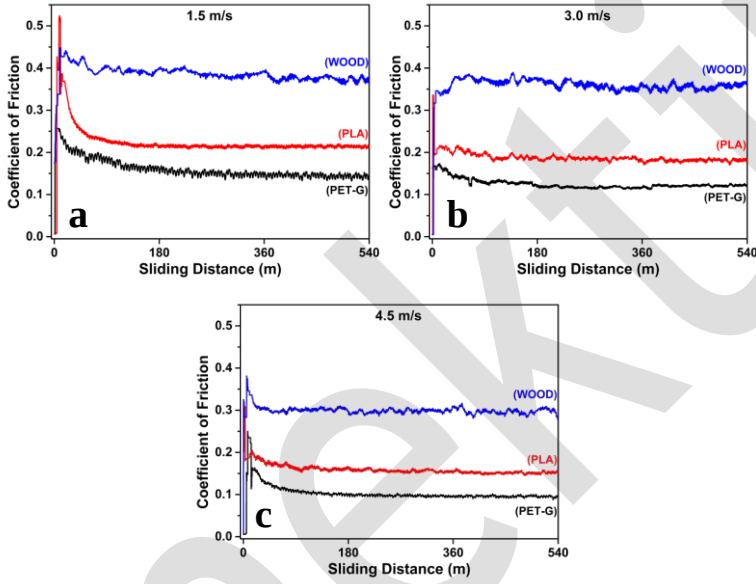


Figure 7. CoF versus sliding distance results of 3D printed PLA, PET-G, and WOOD specimens conducted at a loading of 15 N at different sliding speeds (a) 1.5 m/s, (b) 3.0 m/s, and (c) 4.5 m/s.

Figure 7-a compares the CoF values for three specimens at a sliding speed of 1.5 m/s, where the average CoF values are recorded as 0.15, 0.22, and 0.38 for PET-G, PLA, and WOOD materials, respectively. The CoF at a sliding speed of 3 and 4.5 m/s was recorded as 0.12 and 0.09 for PET-G, whereas it was 0.18 and 0.15 for PLA, and 0.35 and 0.30 for WOOD material, as shown in Figure 7b and 7c. At higher sliding speeds, a slight reduction in the CoF is observed, which may suggest that increased speed leads to thermal degradation of the surface or a decrease in deformations occurring during contact. As can be recognized, the PET-G specimen demonstrated the lowest CoF under all circumstances, indicating minimal energy loss during surface contact and enhanced wear resistance. The material's

stability against sliding speed can be attributed to its low surface energy and thermal stability. PLA initially experienced a sudden drop in the CoF, but soon reached a stabilized level. This may be due to the surface wear of PLA or the reduction of the surface roughness during sliding and demonstrates the thermal stability and homogeneous wear behavior of the material. The WOOD specimen, on the other hand, has the highest CoF, indicating strong contact with the surface and greater energy loss. Additionally, the contact mechanisms with the surface can vary for each material depending on the sliding speed. For instance, PET-G demonstrated stable behavior across all speeds, while both PLA and WOOD experienced a sudden fluctuation at the beginning. While PLA's fluctuation stabilized at lower values, WOOD stabilized at higher values (Ertane et al., 2018; Prabhu & Devaraju, 2021).

Surface roughness (Ra) values obtained as a result of wear tests applied to PLA, PET-G, and WOOD filaments at different speeds (1.5 m/s, 3.0 m/s, and 4.5 m/s) were examined in detail (Figures 8-10). Surface roughness for PLA filament decreased significantly with increasing speed; it was measured as 1.209 μm at 1.5 m/s, 1.007 μm at 3.0 m/s, and 0.933 μm at 4.5 m/s. At low speeds, wear occurred more irregularly. This situation can be associated with PLA not softening sufficiently due to insufficient friction temperature at low speeds and the material creating protruding, local plastic deformations. Particles broken off during wear created microvoids and irregular areas on the surface and increased roughness. At high speeds, the increase in surface temperature due to the friction effect contributed to the local softening of the polymer material and, thus, to a more homogeneous progress of wear (Gobena & Woldeyohannes, 2024). This situation caused the surface roughness values to decrease as the speed increased. In PET-G filament, the roughness values were lower compared to PLA and

showed a regular decreasing trend with the increase in speed; It was determined as $0.873\text{ }\mu\text{m}$ at 1.5 m/s speed, $0.808\text{ }\mu\text{m}$ at 3.0 m/s speed and $0.705\text{ }\mu\text{m}$ at 4.5 m/s speed. The lower roughness of PET-G during wear can be associated with its amorphous structure, high thermal stability, and low viscosity. PET-G provided a more controlled material loss under the friction effect and ensured the surface remained smooth. In addition, the friction temperature formed with increased speed minimized thermal deterioration in PET-G and contributed to its smooth wear behavior.

On the other hand, the surface roughness values for WOOD filament remained relatively high compared to the other two materials, measured as $1.473\text{ }\mu\text{m}$ at 1.5 m/s speed, $1.430\text{ }\mu\text{m}$ at 3.0 m/s speed, and $1.332\text{ }\mu\text{m}$ at 4.5 m/s speed. The structural heterogeneity of the WOOD filament caused the surface roughness to remain high due to the fragmentation and separation of wood dust from the surface during wear and the irregular deformations on the surface. In addition, although a slight decrease in roughness was observed with the increase in speed, this effect was more limited compared to PLA and PET-G. The increase in speed in WOOD filament could not fully improve the effect of wear because the internal structural irregularities of the material caused local ruptures and negatively affected the surface quality. In general, PET-G stood out as the material that exhibited the most homogeneous wear behavior with the lowest surface roughness values and increased speed. While PLA showed a moderate surface quality, WOOD filament gave the highest surface roughness values due to structural heterogeneity. These results reveal that the tribological behavior of polymer filaments varies depending on parameters such as material structure, viscosity, thermal resistance, and wear mechanism (Hiremath et al., 2024; Dangnan et al., 2020).

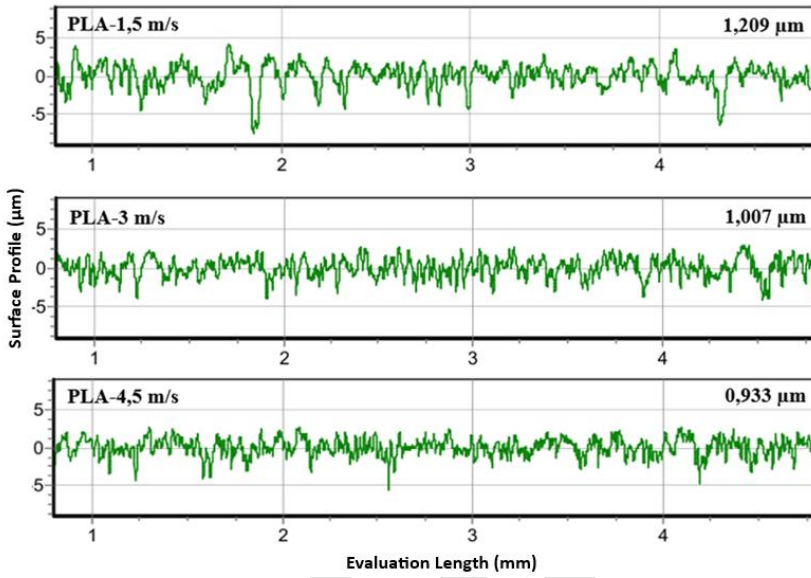


Figure 8. Surface roughness measurement results for PLA

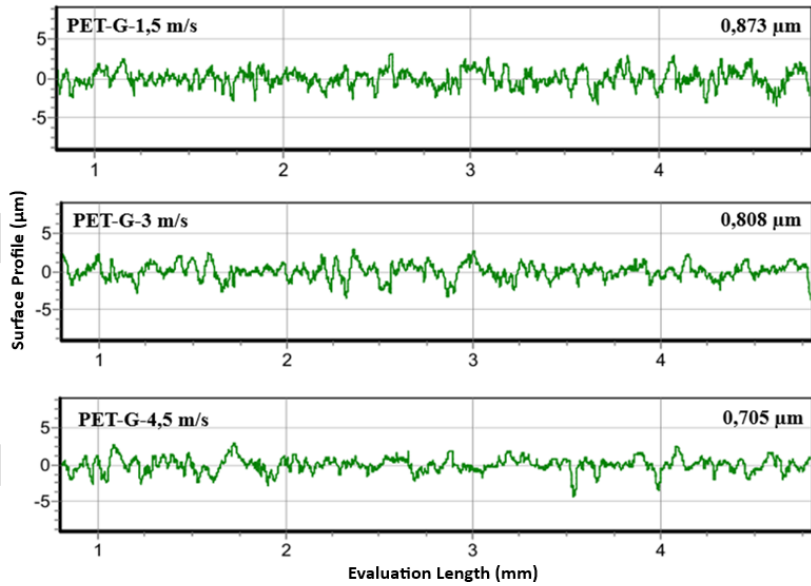


Figure 9. Surface roughness measurement results for PET-G

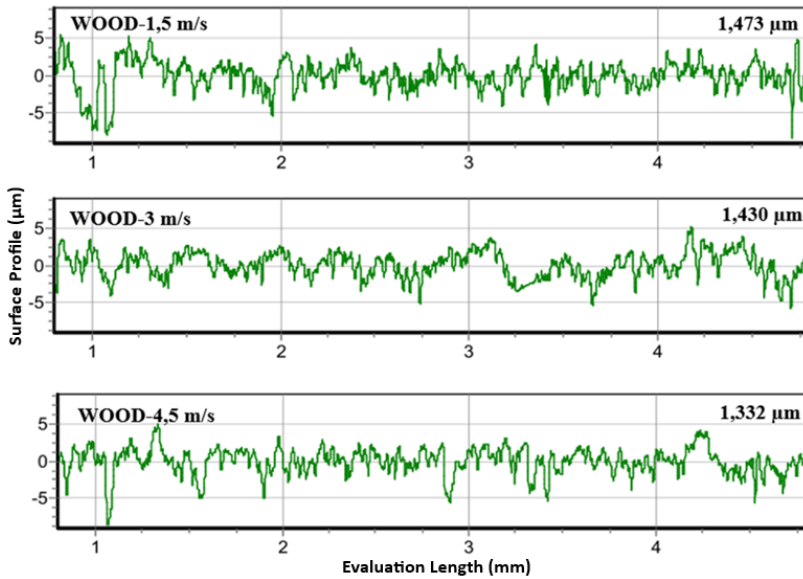


Figure 10. Surface roughness measurement results for WOOD

After the wear tests, the wear deformation behaviors of different filament materials were analyzed in detail depending on the speed and load combinations (Figure 11). According to the wear test results, the wear resistances of the materials were determined as PET-G, PLA, and WOOD, respectively. PET-G exhibited the best performance by showing limited wear marks on the surface at both low and medium loads (5 N and 10 N). Although significant wear occurred on the material even under high load (15 N) and speed (4.5 m/s), it generally exhibited a more resistant structure than other materials thanks to its mechanical strength. PLA showed good wear resistance at medium loads (10 N), and deformation marks remained at a minimum level on the surface. However, more pronounced wear marks were observed on the surface under 15 N load and 4.5 m/s speed, indicating that PLA's wear resistance is not as strong as PET-G. WOOD material exhibited the weakest performance in terms of wear resistance, undergoing severe deformation at both low and high load and speed combinations. Especially under

high speed (4.5 m/s) and load (15 N), the surface experienced significant deterioration and shape changes. These results clearly show that PET-G is the material that provides the highest resistance to wear, PLA has an intermediate performance, and WOOD is the weakest in terms of wear resistance. This performance ranking of the materials reveals the responses of their mechanical properties and surface strengths to wear conditions (Kumar et al., 2021; Vaught & Polycarpou, 2023).

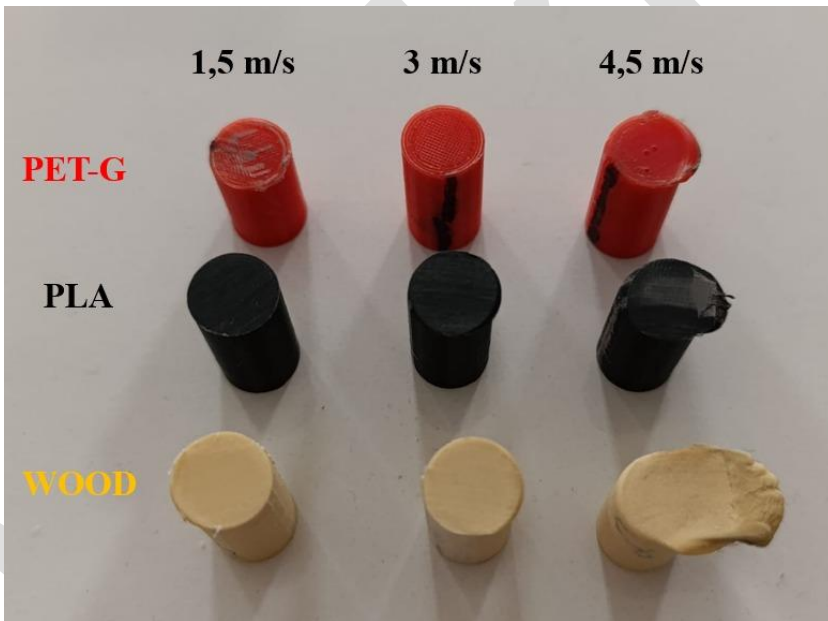


Figure 11. Deformation behaviors of wear test samples

4. CONCLUSIONS

In this study, 3D printed samples were fabricated by the FFF method using three different polymer-based filament materials, and the abrasive wear behaviors of the samples were investigated. The results of the study are summarized below:

- PLA, PET-G, and WOOD samples showed Shore D hardness values of 80.5, 75.5, and 70.3, respectively. These results symbolize the variable mechanical behavior of the materials, which can affect their performance in different 3D printing applications.
- The highest volume loss occurred in WOOD material. Compared to PET-G material, volume losses in PLA material were higher under all conditions.
- PET-G showed better wear performance than other materials under high speeds and loads. PLA may be a suitable option for low speeds and low loads. WOOD filament has minimal wear performance. Thus, selecting filament materials based on their mechanical wear performance is important. The results provide a detailed analysis of the materials' performance under different operating conditions.
- The PET-G sample had the lowest CoF under all conditions, while the WOOD sample showed the highest CoF value. In addition, the shear rate affected the surface contact mechanisms. While the PLA and WOOD samples initially showed sudden fluctuations, PET-G showed stable behavior at all speeds. The fluctuations in the WOOD sample continued until high CoF values. In the PLA sample, the fluctuations stabilized at lower values.

- PET-G stood out with the lowest surface roughness values. PLA showed a medium level of surface quality, while WOOD filament, due to structural heterogeneity, gave the highest surface roughness values.
- The results showed that PET-G provided the highest resistance to wear, PLA had intermediate performance, and WOOD was the weakest material in wear resistance.

5. REFERENCES

- Abdulla, M., Onkar, P. S., Haragopal, V. V., Akhil, S., Bagal, D. K. & Sharma, R. M. (2024). ANN-based dry sliding wear behavior prediction for test samples made of 3D printed PLA. *Materials Today: Proceedings*, In Press, Corrected Proof. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.03.012>
- Antić, J., Mišković, Z., Mitrović, R., Stamenić, Z. & Antelj, J. (2023). The Risk assessment of 3D printing FDM technology. *Procedia Structural Integrity*, 48, 274-279. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.132>
- Boparai, K. S. & Singh, R. (2024). 13.29 - Wear analysis of LDPE composite parts fabricated by FDM. *Comprehensive Materials Processing (Second Edition)*, 13, 628-640. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00068-6>
- Dangnan, F., Espejo, C., Liskiewicz, T., Gester, M. & Neville, A. (2020). Friction and wear of additive manufactured polymers in dry contact. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 238-247. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.051>
- Ding, S., Zou, B., Wang, P. & Ding, H. (2019). Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM. *Polymer Testing*, 78, 105948. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105948>
- Doshi, M., Mahale, A., Singh, S. K. & Deshmukh, S. (2022). Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*, 50(5), 2269-2275. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.003>

- Gobena, S. T. & Woldeyohannes, A. D. (2024). Assessments and investigation of process parameter impacts on surface roughness, microstructure, tensile strength, and porosity of 3D printed polyetherether ketone (PEEK) materials. *Results in Engineering*, 24, 103317. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103317>
- Hanon, M. M. & Zsidai, L. (2021). Comprehending the role of process parameters and filament color on the structure and tribological performance of 3D printed PLA. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 647-660. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.061>
- He, Y., Shen, M., Wang, Q., Wang, T. & Pei, X. (2023). Effects of FDM parameters and annealing on the mechanical and tribological properties of PEEK. *Composite Structures*, 313, 116901. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116901>
- Hiremath, S., Dsouza, J. F., Chiniwar, D. S., Vishwanatha, H. M. & Mallikarjuna, B. (2024). Exploring the impact of epoxy coated 3D-Printed polymers on surface roughness and mechanical behavior: An experimental and numerical study. *Results in Engineering*, 23, 102779. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102779>
- Jin, X., He, T., To, S., Guo, F., Rong, L., Kong, X., Rehan, M., Wu, J., Wu, D., Yip, W. S. & Zhang, S. (2024). Investigation and formulation of cobalt content of ultra-thin diamond blades and dicing performance manufactured by fused deposition modeling and sintering (FDMS). *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 121, 106663. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.106663>

- Ko, M., Kim, Y. S. & Jeon, E. S. (2025). Enhancing the mechanical properties of FDM 3D printed PETG parts with high pressure cold isostatic pressing. *Journal of Manufacturing Processes*, 133, 682-691. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.11.094>
- Kumar, A., Choudhary, A., Tiwari, A., James, C., Kumar, H., Arora, P. K. & Khan, S. A. (2021). An investigation on wear characteristics of additive manufacturing materials. *Materials Today: Proceedings*, 47(13), 3654-3660. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.263>
- Kumar, S., Singh, R., Singh, T. P. & Batish, A. (2022). On Wear of Multi Material 3D Printed PLA Composites. *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*, 1, 413-425. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00043-2>
- Maguluri, N., Srinivar, Ch. L. & Surech, G. (2023). Assessing the wear performance of 3D printed polylactic acid polymer parts. *Materials Today: Proceedings*, In Press, Corrected Proof. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.565>
- Mohamed, O. A., Masood, S. H. & Bhowmik, J. L. (2018). Analysis of wear behavior of additively manufactured PC-ABS parts. *Materials Letters*, 230, 261-265. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.07.139>
- Pandim, T., Oliveira, K. S., Araújo, J. A., Pires, F. M. A. & Doca, T. (2023). Indentation, creep and axial-torsional fretting wear analysis of PC/ABS blends. *Tribology International*, 188, 108763. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108763>

- Panin, S. V., Shil'ko, S. V., Alexenko, V. O., Buslovich, D. G., Dontsov, Y. V., Bochkareva, S. A., Chernous, D. A. & Kornienko, L. A. (2024). 8 - Design of bionically adequate “soft-soft” joint endoprosthesis. FDM fabricated UHMWPE and PEEK-based composites. *Medical Additive Manufacturing: Concepts and Fundamentals- Additive Manufacturing Materials and Technologies*, 2024, 209-249. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95383-2.00008-1>
- Phogat, A., Chhabra, D., Sindhu, V. & Ahlawat, A. (2022). Analysis of wear assessment of FDM printed specimens with PLA, multi-material and ABS via hybrid algorithms. *Materials Today: Proceedings*, 62(1), 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.429>
- Prabhu, R. & Devaraju, A. (2021). Recent review of tribology, rheology of biodegradable and FDM compatible polymers. *Materials Today: Proceedings*, 39(1), 781-788. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.509>
- Sedlak, J., Joska, Z., Jansky, J., Zouhar, J., Kolomy, S., Slany, M., Svasta, A. & Jirousek, J. (2023). Analysis of the mechanical properties of 3D-printed plastic samples subjected to selected degradation effects. *Materials*, 16(8), 3268. <https://doi.org/10.3390/ma16083268>
- Srinivasan, R., Aravindkumar, N., Krishna, S. A., Aadhishwaran, S. & George, J. (2020). Influence of fused deposition modelling process parameters on wear strength of carbon fibre PLA. *Materials Today: Proceedings*, 27(2), 1794-1800. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.738>

- Srinivasan, R., Babu, B. S., Rani, V. U., Suganthi, M. & Dheenasagar, R. (2020). Comparision of tribological behaviour for parts fabricated through fused deposition modelling (FDM) process on abs and 20% carbon fibre PLA. *Materials Today: Proceedings*, 27(2), 1780-1786. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.689>
- Subramaniyan, M., Karuppan, S., Radhakrishnan, K., Kumar, R. R. & Kumar, K. S. (2022). Investigation of wear properties of 3D-printed PLA components using sandwich structure – A review. *Materials Today: Proceedings*, 66(3),1112-1119. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.913>
- Tan, E. (2023). Experimentally assessing the wear characteristics of 3D-printed PLA and Tough PLA materials based on fused deposition modeling. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 9(2), 213-226. doi:10.30855/gmbd.0705065
- Tomec, D. K., Balzano, A., Žigon, J., Šernek, M. & Kariž, M. (2022). The effect of printing parameters and wood surface preparation on the adhesion of directly 3D-printed PLA on wood. *Journal of Renewable Materials*, 10(7), 1787-1796. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.019760>
- Tyagi, R., Tripathi, A., Kumar, R., Jain, A. & Pillai, P. (2024). On FFF-based 3D printing of wear resistive ABS-Graphene nanocomposites for rapid tooling in wet condition. *Diamond and Related Materials*, 142, 110794. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.110794>
- Vălean, C., Stoia, D. I., Opriș, C. & Linul, E. (2024). Effect of Fillers on Mechanical Properties of FDM printed PLA Components. *Procedia Structural Integrity*, 56, 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.043>

- Vaught, L. O. & Polycarpou, A. A. (2023). Investigating the effect of fused deposition modelling on the tribology of PETG thermoplastic. *Wear*, 524-525, 204736. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204736>
- Wang, C., He, Y., Lin, Z., Zhao, X., Sun, C., Guo, R., Wang, X. & Zhou, F. (2024). Mechanical and tribological properties of FDM-printed polyamide. *Tribology International*, 191, 109198. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109198>

MALZEME VE METALURJİ MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ
ARAŞTIRMALAR

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