

Tasarım, Malzeme ve İmalat Odaklı Güncel Mühendislik Uygulamaları

Editörler: Furkan Korkmaz • Abdurrahman Çetin

Tasarım, Malzeme ve İmalat Odaklı Güncel Mühendislik Uygulamaları

Editörler:

Furkan Korkmaz

Abdurrahman Çetin



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şhitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozguryayinlari.com

✉ info@ozguryayinlari.com

Tasarım, Malzeme ve İmalat Odaklı Güncel Mühendislik Uygulamaları

Editörler: Furkan Korkmaz • Abdurrahman Çetin

Language: Turkish

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8562-02-6

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1077>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Korkmaz, F. (ed), Çetin, A. (ed) (2025). *Tasarım, Malzeme ve İmalat Odaklı Güncel Mühendislik Uygulamaları*.

Özgür Publications. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1077>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozguryayinlari.com/>



Mühendislik disiplinleri, tasarım, malzeme ve imalat alanlarındaki hızlı teknolojik gelişmelerle birlikte önemli bir dönüşüm yaşamaktadır. Dijitalleşen tasarım süreçleri, akıllı üretim sistemleri ve yeni nesil malzemeler, hem sanayi uygulamalarını hem de akademik araştırma gündemlerini yeniden şekillendirmektedir. Bu çerçevede hazırlanan “Tasarım, Malzeme ve İmalat Odaklı Güncel Mühendislik Uygulamaları” adlı bu kitap, güncel mühendislik yaklaşımlarını bütüncül bir bakış açısıyla ele almayı amaçlamaktadır.

Kitapta yer alan bölümler; imalatla Endüstri 4.0 ve akıllı üretim sistemleri ile başlayan, ileri imalat yöntemleri, sonlu elemanlar yöntemi ile tasarım ve analiz uygulamaları, mekanik sistemlerde yenilikçi malzeme kullanımı ve biyomalzemelere uzanan bir içerik doğrultusunda yapılandırılmıştır. Böylece kitap, hem üretim süreçlerindeki dijital dönüşümü hem de malzeme ve tasarım odaklı yenilikçi uygulamaları bir arada sunan dengeli bir kurguya sahiptir.

İlk bölümlerde, akıllı üretim sistemlerinin esneklik, verimlilik ve sürdürülebilirlik boyutları ele alınmakta; üretim hatlarının dijitalleşmesi ve veri temelli yönetimi tartışılmaktadır. Bunu, talaşlı imalat alanında ultrasonik destekli delik delme gibi ileri süreçlere odaklanan çalışmalar ile eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilen yapı elemanlarının sonlu elemanlar yöntemiyle analizine ilişkin uygulamalar izlemektedir. Bu sayede tasarım, malzeme seçimi ve imalat süreçleri arasındaki ilişki, sayısal ve deneysel temelde somut örneklerle ortaya konulmaktadır.

Devam eden bölümlerde, dişli çarklar gibi makine elemanlarında yenilikçi malzemelerin kullanımına yönelik değerlendirmeler yer almakta; mekanik performans, ağırlık, maliyet ve üretilebilirlik gibi ölçütlerin birlikte ele alındığı mühendislik karar süreçleri tartışılmaktadır. Son bölümde ise biyoaktif camlar üzerinden biyomalzeme alanındaki güncel gelişmeler ve geleceğe yönelik araştırma alanları ele alınmakta, böylece mühendislik uygulamalarının sağlık ve yaşam bilimleri ile kesişen çok disiplinli yönü vurgulanmaktadır.

Bu kitap; lisans ve lisansüstü düzeydeki öğrenciler, akademisyenler ve sanayi kuruluşlarında çalışan mühendisler için güncel, uygulama odaklı ve referans niteliğinde bir kaynak olmayı hedeflemektedir. Bölümlere katkı sunan tüm yazarlara ve destek veren kurumlara teşekkür eder; eserin, tasarım, malzeme ve imalat alanlarında yürütülecek çalışmalara katkı sağlamasını dileriz.

Furkan Korkmaz ve Abdurrahman Çetin

2025

İçindekiler

Önsöz

iii

Bölüm 1

İmalatta Endüstri 4.0 ve Akıllı Üretim Sistemleri 1

Emel Çelik

Bölüm 2

İleri İmalat Teknolojilerinde Yeni Yaklaşım: Ultrasonik Destekli Delik Delme 15

Abdurrahman Çetin

Sinan Serdar Özkan

Bölüm 3

3B PLA Esaslı Malzemelerin Sandalye Tasarımı için Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi 51

Nergizhan Anaç

Oğuz Koçar

Erhan Baysal

Furkan Parmaksız

Zeynep Hale Şimşir

Bilal Kaya

Bölüm 4

Dişli Çarklar İçin Yenilikçi Malzeme Kullanımı 77

Furkan Korkmaz

Bölüm 5

Biyoaktif Camlar: Gelişimi, Üretimi ve Gelecek Perspektifleri 93

Erhan İbrahimoglu

Fatih Çalışkan

Talaşlı İmalat Odaklı Tasarım: Konstrüksiyon İlkeleri ve Dijital Dönüşüm 111

Tuğçe Tezel

Volkan Kovan

İmalatta Endüstri 4.0 ve Akıllı Üretim Sistemleri 8

Emel Çelik¹

Özet

Endüstri 4.0, üretim süreçlerini geleneksel hatlardan akıllı, esnek ve kendi kendini organize edebilen sistemlere dönüştürerek verimlilik, şeffaflık ve sürdürülebilirlik kazançları sağlar. IoT tabanlı üretim izleme sistemleri, makineler, sensörler ve ağ teknolojileri arasında gerçek zamanlı veri akışı sağlayarak öngörücü bakım, enerji verimliliği ve tedarik zinciri yönetiminde avantaj sunar. Dijital ikizler, fiziksel sistemlerin sanal kopyaları aracılığıyla performans izleme, senaryo analizi ve operasyonel optimizasyon imkânı verir; bakım ve yaşam döngüsü yönetiminde proaktif yaklaşımları destekler. Yapay zekâ teknikleri, makine öğrenmesi, derin öğrenme ve evrimsel algoritmalar aracılığıyla hata tahmini, kalite kontrol, çizelgeleme ve süreç iyileştirme gibi alanlarda üretim esnekliğini ve doğruluğunu artırır. Bu teknolojilerin entegrasyonu, üretim maliyetlerinin düşürülmesi, duruş sürelerinin azaltılması ve operasyonel verimliliğin artırılmasını sağlar. Ancak veri güvenliği, sistem entegrasyonu ve altyapı gereksinimleri dijital dönüşümün önündeki temel zorluklar arasında yer alır. Etkin bir Endüstri 4.0 dönüşümü, yalnızca teknolojik yetkinliği değil, aynı zamanda organizasyonel kültür ve süreç yönetiminin dönüşümünü de gerektirir. IoT, dijital ikiz ve yapay zekâ, üretimde ileri düzey otomasyon, optimizasyon ve sürdürülebilirliği mümkün kılan stratejik araçlar olarak öne çıkmaktadır.

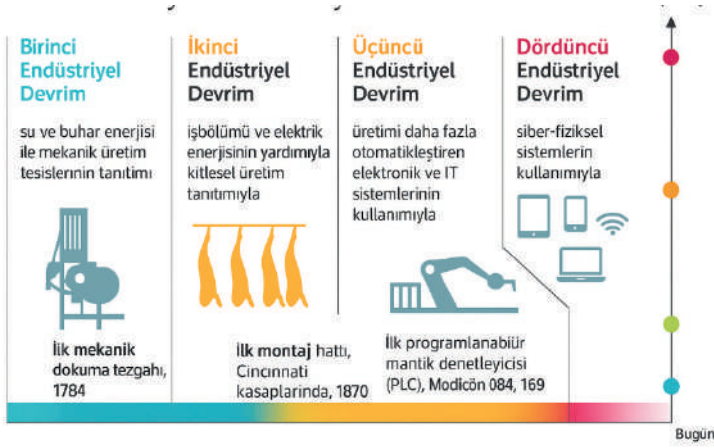
1 Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, emelcelik@subu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4165-8402>

1. Giriş

“Endüstri 4.0” terimi, 2011 yılında Alman Eğitim ve Araştırma Bakanlığı tarafından başlatılan, geleceğin bilgisayarlı üretimi üzerine bir projeye dayanmaktadır (Waibel vd., 2017). Endüstri 4.0 kavramı, Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ (AI), bulut bilişim ve büyük veri analitiği gibi dijital teknolojilerin üretim süreçlerine entegrasyonunu ifade eden dördüncü sanayi devrimini temsil etmektedir. Bu dönüşüm, üretim süreçlerinin yalnızca otomasyonla sınırlı kalmayıp, gerçek zamanlı veri toplama, analiz ve paylaşım yoluyla daha esnek, şeffaf ve verimli hale gelmesini sağlamaktadır (Fekrisari ve Kantola, 2024).

Sanayi, toplumun yüksek yaşam kalitesi talebini karşılamak için sürekli büyümekte ve gelişmektedir. Bu bağlamda, sanayinin sürdürülebilir üretim planlarına olan ihtiyacı giderek artmaktadır. Endüstri 4.0, sürdürülebilir üretimi sağlamak için uygulanabilir bir strateji olarak öne çıkmaktadır ve üretimde kalite, verimlilik ve operasyonel etkinlik üzerinde çeşitli olumlu etkiler yaratmaktadır (Waibel vd., 2017).

Endüstrinin tarihsel gelişimi, üretim süreçlerindeki büyük dönüşümleri kapsamaktadır. Birinci Sanayi Devrimi, 18. yüzyılın sonlarında su ve buhar gücünün üretimde kullanılmaya başlanmasıyla ortaya çıkmış ve mekanik dokuma tezgâhlarının icadıyla üretimde makineleşmenin önünü açmıştır. İkinci Sanayi Devrimi ise 19. yüzyılın sonlarına doğru elektrik enerjisinin üretimde kullanılmaya başlanmasıyla seri üretim kavramını geliştirmiştir. Üçüncü Sanayi Devrimi, 20. yüzyıl ortalarında elektronik sistemler ve bilgi teknolojilerinin üretime entegrasyonu ile üretimin otomasyonunu sağlamıştır. Günümüzde ise Dördüncü Sanayi Devrimi, yani Endüstri 4.0, siber-fiziksel sistemler, yapay zekâ ve nesnelerin interneti ile üretimde dijital dönüşüm çağını başlatmıştır (Demirel, 2018). Bu tarihsel süreç ve devrimlerin temel özellikleri Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Endüstri'nin Tarihsel Gelişimi

Geleneksel üretim hatları, tek tip ürün üreten tek bir hattan oluşur. Giriş ve çıkış uçları olan açık devre bir konveyör bandı bulunur ve makineler hat boyunca çalışır. Çoğu durumda üretim hattındaki makineler arasında iletişim yoktur. Öte yandan, akıllı fabrika üretim sisteminin amacı, birden fazla ürün türünü aynı anda işlemektir. Konveyör bandı, farklı üretim rotalarını destekleyen kapalı devre bir sistemdir. Akıllı üretim sistemlerinde, makineler, bilgi sistemleri, ürünler ve insanlar arasında yüksek hızlı bir ağ sistemi aracılığıyla bağlantı vardır. Büyük veri analitiği genellikle bakımı kolaylaştırır. Bireyler ve makineler bulut üzerinden iletişim kurabildiğinden, dünyanın her yerinden insanlar onarım işlerini gerçekleştirmek için birlikte çalışabilirler. Sistem dinamikleriyle başa çıkmak için kendilerini organize etme yeteneğine sahip akıllı varlıkların dağıtımından sorumlu kontrol fonksiyonları vardır. Geleneksel üretim sistemlerinde makinelerin yeniden yapılandırılması manuel olarak yapılır. Ancak, akıllı üretim sistemleri birden fazla ürün üretmek için otomatik olarak yeniden yapılandırılabilir (Wang vd., 2016).

Akıllı fabrikalar, fiziksel ve siber sistemlerin bütünleşmesiyle, gelişmiş sensörler ve IoT tabanlı uygulamalar sayesinde üretim süreçlerinde kalite, kontrol, yönetim ve verimlilikte önemli iyileştirmeler sunmaktadır (Kalsoom vd., 2020). Bu yaklaşım, rekabet gücünü artırırken sürdürülebilirlik ve inovasyon için de yeni fırsatlar yaratmaktadır (Sjodin vd., 2018). Bununla birlikte, Endüstri 4.0 uygulamaları çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Çok sayıda IoT cihazının yönetimi, büyük miktarda veri alışverişi ve güvenilir bulut altyapılarının kurulumu bu süreçte öne çıkan temel engeller arasındadır (Lee vd., 2017). Ayrıca, başarılı bir dönüşüm için yalnızca teknolojik gelişmeler

değil, aynı zamanda üst yönetimin desteği, çalışanların adaptasyonu ve organizasyonel kültürün de dönüşümü gerekmektedir (Jung vd., 2023).

Akıllı Üretim tarafından daha yoğun olarak kullanılan yöntemler ve sistemler, Nesnelerin İnterneti, bulut bilişim, (büyük) veri analitiği ile ilgilidir ve program planlama, teşhis ve değerlendirme, kestirimci bakım ve kalite dahil olmak üzere üretim operasyonlarının farklı kontrol süreçlerinde benimsenir. Akıllı Üretim sistemleri, büyük hacimli yapılandırılmamış verilerle başa çıkma ve dağıtık sistemlerin kullanımıyla merkeziyetsizliği teşvik etme yetenekleriyle de bilinir (Barari vd., 2021).

Sonuç olarak, Endüstri 4.0, geleneksel üretim sistemlerinden akıllı ve esnek üretim sistemlerine geçişi temsil etmektedir. Bu bölümde, özellikle IoT tabanlı üretim izleme sistemleri, dijital ikiz teknolojisi ve yapay zekâ destekli üretim optimizasyonu ele alınarak, akıllı üretim sistemlerinin sanayideki rolü ve geleceği tartışılacaktır.

1.1. IoT Tabanlı Üretim İzleme Sistemleri

Nesnelerin İnterneti (IoT), Endüstri 4.0'ın en kritik bileşenlerinden biri olup, üretim süreçlerinde gerçek zamanlı izleme, veri toplama ve analiz faaliyetlerini mümkün kılar (Khan ve Javaid, 2022). IoT tabanlı üretim izleme sistemleri, makineler, sensörler, robotlar ve yazılımlar arasında sürekli iletişim sağlayarak akıllı fabrikaların temelini oluşturur. Bu sistemler sayesinde, fiziksel varlıklar dijital ağlara bağlanır ve üretimin her adımı izlenebilir, kontrol edilebilir ve optimize edilebilir. IoT ile işletmeler yalnızca mevcut performansı takip etmekle kalmaz, aynı zamanda gelecekteki süreçleri tahmin etme yeteneğine de sahip olur.

IoT'nin akıllı fabrikalardaki rolü, üretim hattındaki ekipmanların birbirleriyle veri paylaşabilmesiyle belirginleşir. Makineler sensörler aracılığıyla üretim hızını, sıcaklığı, nemi, titreşimi, enerji tüketimini ve hataları algılar ve bu verileri merkezi platformlara iletir. Böylece üretim sistemindeki düğümler yalnızca veri toplamakla kalmaz, aynı zamanda kendi kendini koordine eden bir yapı oluşturur. Bu iletişim ağı, duruş sürelerini azaltır, bakım maliyetlerini düşürür ve enerji verimliliğini artırır (Fakhar Manesh vd., 2021).

IoT tabanlı izleme sistemlerinin sağladığı başlıca avantajlar şunlardır (Reyes Domínguez vd., 2024):

- Üretim verimliliğinin artırılması
- Maliyetlerin düşürülmesi

- Ürün kalitesinin iyileştirilmesi
- Şeffaflık ve süreç takibi
- Sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı.

Bu teknolojiler, üretim süreçlerinin yalnızca izlenmesini değil, aynı zamanda değer zincirinin tüm bileşenlerinde iyileştirme yapılmasını da destekler. Örneğin, tedarik zincirinde IoT tabanlı sistemler, hammadde akışını ve stok seviyelerini takip ederek lojistik süreçlerin daha etkin yönetilmesini sağlar. Benzer şekilde, üretim hattında kullanılan IoT sensörleri, enerji tüketim desenlerini analiz ederek enerji verimliliği açısından kritik bilgiler sunar. Bu bağlamda IoT, bakım faaliyetlerinde de önemli bir rol oynar; öngörücü bakım (predictive maintenance) uygulamaları sayesinde ekipman arızaları önceden tespit edilerek plansız üretim duruşlarının önüne geçilir (Lee vd., 2017).

Bununla birlikte, IoT tabanlı üretim izleme sistemlerinin uygulanmasında çeşitli zorluklar da bulunmaktadır. Öncelikle, çok sayıda farklı IoT cihazının entegre edilmesi teknik açıdan karmaşıklık yaratabilmektedir. Ayrıca, büyük miktarda verinin toplanması veri yönetimi, depolama ve güvenlik sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Özellikle siber güvenlik, akıllı fabrikaların sürdürülebilirliği açısından kritik bir risk faktörüdür. Veri gizliliği, yetkisiz erişimlerin engellenmesi ve güvenilir bulut platformlarının kurulması, IoT'nin endüstride başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için öncelikli koşullardan biridir (Sjödén vd., 2018).

Akademik çalışmalar, IoT tabanlı sistemlerin üretim süreçlerine sağladığı katkıları çeşitli açılardan ele almıştır. Örneğin, CNC makinelerinde sensör destekli izleme sistemleri, kesme parametrelerinin optimize edilmesini ve işleme hatalarının en aza indirilmesini sağlamıştır. Benzer şekilde, montaj hatlarında IoT tabanlı kalite kontrol sistemleri, ürün kusurlarını anında tespit ederek üretim kayıplarını azaltmıştır. Lojistikte ise IoT destekli takip sistemleri, taşıma süreçlerinde ürünlerin konumunun ve durumunun sürekli kontrol edilmesini mümkün kılmıştır (Escobar vd., 2021).

Sonuç olarak, IoT tabanlı üretim izleme sistemleri, Endüstri 4.0 ve akıllı üretim felsefesinin temel taşlarından biridir. Bu sistemler, yalnızca üretim süreçlerinin daha şeffaf ve verimli olmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilirlik, esneklik ve inovasyon açısından da işletmelere önemli katkılar sunar. Ancak, bu teknolojilerin sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesi için üst yönetimin desteği, çalışanların eğitimi, güçlü siber güvenlik önlemleri ve doğru teknolojik altyapı yatırımları büyük önem taşımaktadır. Gelecekte IoT'nin, yapay zekâ ve dijital ikiz teknolojileriyle entegre edilmesi, üretim

sektöründe daha da ileri düzeyde otomasyon ve optimizasyon imkânları sağlayacaktır (Mabkhot vd., 2018).

1.2. Dijital İkiz Teknolojisi

Günümüzde üretim sistemlerinin, üretilen ürünlerin kalitesini korurken aynı zamanda pazar taleplerindeki ve üretim ortamındaki dinamik değişimlere uyum sağlayabilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, üretim süreçlerinin daha çevik, esnek ve sürdürülebilir hale gelmesi gerekmektedir (Hussain ve Jahanzaib, 2018; Komoto ve Masui, 2018; Cioffi vd., 2020). Bu dönüşümü mümkün kılan yenilikçi teknolojiler arasında dijital ikiz (digital twin), fiziksel sistemlerin sanal ortamda dinamik bir kopyasını oluşturarak öne çıkan en önemli yaklaşımlardan biridir. Etkili bir dijital ikiz modeli, gerçek üretim sisteminin ve süreçlerinin temel özelliklerini aynı anda kapsayan basitleştirilmiş ama işlevsel bir temsildir. Böylece üretim sistemleri, sanal ortamda modellenebilir, test edilebilir ve optimize edilebilir hale gelir (Debevec vd., 2020).

Dijital ikiz kavramı ilk kez 2003 yılında gündeme gelmiş (Grieves ve Vickers, 2017; Vrabič vd., 2018) ve sonraki yıllarda literatürde farklı tanımlarla ele alınmıştır (Ojstersek vd., 2023; Iliuță vd., 2024; Wu vd., 2023). Tanımlardan biri, dijital ikizi bir sistemin yaşam döngüsü boyunca toplanan verilerle desteklenen, yüksek ölçekli ve ultra gerçekçi bir simülasyon modeli olarak açıklamaktadır (Rosen vd., 2015). NASA, 2010 yılında yayımladığı teknolojik yol haritasında bu kavrama resmi olarak yer vererek dijital ikizleri “sanal dijital filo” yaklaşımıyla tanıtmıştır (Demirel, 2018).

Dijital ikiz teknolojisi, ister bir makine, bina, üretim hattı ya da tüm bir endüstriyel tesis olsun, fiziksel sistemlerin sanal bir modelini oluşturarak onların davranışını ve performansını gerçek zamanlı olarak yansıtır (Demirel, 2018). Bu sayede yalnızca mevcut performansın izlenmesi değil, aynı zamanda gelecekteki senaryoların da test edilmesi mümkün olur. Örneğin, üretim hattında uygulanacak yeni bir operasyonel strateji önce dijital ikiz üzerinde denenebilir, böylece gerçek sistemde risk alınmadan optimizasyon yapılabilir.

Bu teknolojinin temel avantajlarından biri gerçek zamanlı izleme kapasitesidir. Fiziksel sistemlere entegre edilen sensörler aracılığıyla elde edilen sürekli veri akışı, dijital ikize aktarılır. Böylece, sistemin mevcut durumu anlık olarak gözlemlenebilir ve olası arızalar büyümeden önce tespit edilebilir. Bu özellik, bakım ve işletme süreçlerinde proaktif yaklaşımları destekleyerek plansız duruşları en aza indirir ve operasyonel verimliliği

artırır. Bunun yanı sıra, dijital ikizler sayesinde farklı işletim senaryoları sanal ortamda test edilerek performans artırıcı önlemler geliştirilebilir.

Dijital ikizlerin önemli katkılarından bir diğeri, sistemin tüm yaşam döngüsünü kapsamasıdır. Tasarım, geliştirme, işletme ve bakım aşamalarının her birinde kullanılan bu teknoloji, karar vericilere daha kapsamlı ve güvenilir bilgiler sunar. Ayrıca dijital ikizler, sürekli güncellenebilen yapıları sayesinde sistemin yaşam süresi boyunca doğruluğunu korur. Böylelikle hem mühendisler hem de operatörler için sürekli bir referans noktası haline gelir.

Dijital ikizler aynı zamanda iş birliği ve veri paylaşımını kolaylaştırır. Farklı disiplinlerden mühendisler, yöneticiler ve bakım personeli aynı sanal model üzerinde çalışarak sorunlara kolektif çözümler geliştirebilir. Bu durum, iletişimi güçlendirmenin yanı sıra daha hızlı ve etkili karar alma süreçlerini de destekler.

Sonuç olarak, dijital ikiz teknolojisi, üretim ve endüstriyel süreçlerde izleme, analiz ve optimizasyon açısından devrim niteliğinde bir yenilik sunmaktadır. Gerçek zamanlı veri entegrasyonu sayesinde proaktif bakım, simülasyona dayalı optimizasyon ve daha isabetli karar alma süreçleri mümkün hale gelir. Böylece, dijital ikizler yalnızca operasyonel verimliliği ve ürün kalitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda kesinti sürelerini azaltır, maliyetleri düşürür ve sürdürülebilir üretim hedeflerine önemli katkılar sağlar (Mondal vd., 2024).

1.3. Yapay Zekâ Destekli Üretim Optimizasyonu

Yapay Zeka (YZ), Dördüncü Sanayi Devrimi'nde inovasyonu yönlendiren ve üretim süreçlerini dönüştüren önemli bir teknolojidir (Kashpruk vd., 2023). YZ, genellikle insan zekası gerektiren problem çözme, karar verme, konuşma tanıma ve dil çevirisi gibi görevleri yerine getirebilen bilgisayar sistemlerinin geliştirilmesini ifade eder. Endüstri 4.0'ın diğer temel teknolojileri olan büyük veri ve analitik (Soori vd., 2023), Nesnelerin İnterneti (IoT) ve bulut bilişim ile entegrasyonu, YZ'nin endüstrideki dönüşüm potansiyelini artırmaktadır (Rupp vd., 2021). YZ, üretim optimizasyonu, maliyet düşürme, kalite kontrol ve enerji verimliliği gibi alanlarda kritik avantajlar sunmaktadır (Krupnik-Worek vd., 2025; Namboodri ve Felhö, 2025).

1.3.1. Makine Öğrenmesi (Machine Learning) Uygulamaları

Üretim Sürecinde Hataların Tahmini (Defect Prediction)

Makine öğrenmesi yöntemleri, üretim hattında hatalı ürünleri zamanında tahmin ederek kalite maliyetlerini azaltmak ve verimliliği artırmak için

kullanılmaktadır. Geleneksel istatistiksel kontrol yöntemleri yerine, makine öğrenmesi modelleri çoklu sensör verisi, proses değişkenleri ve geçmiş hata kayıtlarını kullanarak gelecekteki hata olasılıklarını tahmin edebilir.

Örnekler:

- Sidharth Kiran Sankhye, (2020) çalışmasında, makine öğrenmesi yöntemleriyle üretim hattında kalite tahmini yapılmış ve denetleme süreçleri iyileştirilmiştir (Sankhye, 2020).
- Grafik tabanlı modeller, Just-In-Time hata tahmininde başarı göstermektedir (Bryan ve Moriano, 2023).
- Nadir görülen hasar türleri, CTGAN gibi jeneratif modellerle desteklenen veri artırma stratejileri ile daha doğru tahmin edilmektedir (Khosravi vd., 2024).

Avantajlar:

- Hatalı ürün oranının düşürülmesi ve yeniden işleme maliyetlerinin azalması
- Kalite kontrol süreçlerinin hedef odaklı hale gelmesi
- Hata oluşmadan önce müdahale imkânı
- Süreç iyileştirme fırsatlarının belirlenmesi

Bakım İhtiyacının Öngörülmesi (Predictive Maintenance)

Bakım maliyetleri ve beklenmedik arızalar, üretim tesislerinde önemli operasyonel riskler ve mali yükler getirir. Öngörücü bakım (predictive maintenance), makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak ekipmanların sağlık durumunu izler ve arıza olasılığı yüksek zamanlarda bakım planlaması yapılmasını sağlar (Khosravi vd., 2024).

Bileşenler:

- Sensörlerden veri toplama (vibrasyon, sıcaklık, basınç, akım vb.)
- Veri ön işleme ve özellik çıkarımı
- Anomali tespiti ve arıza olasılığı tahmini
- Kalan faydalı ömrün (Remaining Useful Life, RUL) tahmini
- Bakım planlama ve kaynak optimizasyonu

Örnekler:

- Hosseinzadeh ve ark., (2023), üretim ortamında ML, DL ve hibrit yaklaşımların öngörücü bakım performanslarını karşılaştırmıştır (Hosseinzadeh vd., 2023).
- Transformer-Quantile Regression Neural Networks (TQRNN) ile makine arızaları bir saat öncesine kadar %70 doğrulukla tahmin edilebilmiştir (Poland vd., 2024).
- Hierarchical Temporal Memory (HTM) modeli, çevrim içi anomali tespiti ile sürekli öğrenme ve gürültüye dayanıklı tespit yetisi kazandırmıştır.

Avantajlar:

- Plansız duruş sürelerinin azalması
- Bakım maliyetlerinin düşmesi
- Ekipman ömrünün uzaması
- Bakım kaynaklarının etkin kullanımı
- Üretim hatlarında güvenilirlik artışı

Zorluklar: dengesiz veri setleri, sensör gürültüsü, veri eksikliği, modelin gerçek zamanlı entegrasyonu ve model aşınması (model degradation).

Derin Öğrenme (Deep Learning)

Derin öğrenme, çok katmanlı yapay sinir ağları kullanarak verilerden yüksek düzeyde soyutlamalar öğrenir ve özellikle büyük veri ve hesaplama gücü ile son yıllarda başarı kazanmıştır (Lanham, 2024).

Uygulama Alanları:

- Görüntü ve ses tanıma
- Doğal dil işleme
- Oyun ve robotik kontrol
- Sağlık, finans ve otomotiv sektörlerinde tahminleme

2. Sonuçlar

Endüstri 4.0'ın geniş kapsamlı bağlamında zaman serisi analizinin incelenmesi, teknolojik sinerjinin etkileyici bir anlatımını ortaya koymaktadır. Bu inceleme, Dördüncü Sanayi Devrimi'ni karakterize eden verimlilik ve inovasyonu hızlandırmada zaman serisi tahmininin temel

rolünü vurgulamıştır. Yapay zeka, nesnelerin interneti (IoT), bulut bilişim ve büyük veri analitiğinin zaman serisi analizi etrafında bir araya getirilmesi, endüstriyel otomasyon ve karar alma süreçlerinde öngörücü içgörülerin stratejik önemini vurgulamaktadır. COVID-19 pandemisinin başlangıcı, yalnızca dijital dönüşümü hızlandırmakla kalmamış, aynı zamanda karmaşık ve dinamik krizlerin yönetiminde öngörücü modellemenin kritik rolünü de vurgulamıştır. Endüstri 4.0 çağında, zaman serisi analizinin uygulanması, üretim iş akışlarını optimize etmekten öngörücü bakımı mümkün kılmaya kadar uzanmaktadır. Sıralı verilerin analiziyle ortaya çıkan yapay zekanın öngörü gücü, endüstriyel süreçlerin öngörüsünü geliştirmektedir. Bu arada, Nesnelerin İnterneti (IoT), analiz edildiğinde benzeri görülmemiş operasyonel içgörüler ve öngörüler sunan sürekli bir gerçek zamanlı veri akışı sağlar. Bulut bilişim, geniş zaman serisi veri kümelerini işlemek ve analiz etmek için gerekli hesaplama ve depolama kaynaklarını sağlayarak bu çabaları destekler ve endüstriyel sistemlerde ölçeklenebilirlik ve çeviklik sağlar. Dönüştürücü etkisine rağmen, zaman serisi analizinin Endüstri 4.0'a entegrasyonu zorluklardan muaf değildir. Karmaşık veri modellerini çözenin karmaşıklıkları gelişmiş analitik yetenekler gerektirirken, Nesnelerin İnterneti'nin entegrasyonu veri güvenliği ve sistem birlikte çalışabilirliğinde karmaşıklıklar yaratır. Bulut bilişim, zaman serisi analizlerinin bütünlüğünü ve yanıt verebilirliğini korumak için veri egemenliği ve gecikmeyle ilgili endişeleri gidermelidir. Geleceğe baktığımızda, Endüstri 4.0'ın gidişatı zaman serisi tahminindeki gelişmelerden önemli ölçüde etkilenecektir. Nesnelerin İnterneti (IoT) sistemlerinin giderek daha karmaşık hale gelmesi, daha zengin, daha ayrıntılı veriler sunarak daha ayrıntılı ve öngörücü analizlere olanak tanır. Yapay zeka alanındaki gelişmeler, zaman serisi tahminlerinin doğruluğunu artırarak endüstriyel sistemlerin öngörü yeteneklerini geliştirmeye hazırdır. Ancak, bu teknolojik ilerlemelerin yanı sıra, veri güvenliğini ve gizliliğini koruma zorunluluğu daha da belirgin hale gelmekte ve zaman serisi verilerinin bütünlüğünü korumak için güçlü stratejiler gerektirmektedir.

Kaynaklar

- Barari, A., de Sales Guerra Tsuzuki, M., Cohen, Y., & Macchi, M. (2021). Editorial: Intelligent manufacturing systems towards Industry 4.0 era. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(7), 1793–1796. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01769-0>
- Bryan, J., & Moriano, P. (2023). Graph-based machine learning improves just-In-Time defect prediction. *PLoS ONE*, 18(4), e0284077. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284077>
- Cioffi, R., Travaglioni, M., Piscitelli, G., Petrillo, A., & Parmentola, A. (2020). Smart manufacturing systems and applied industrial technologies for a sustainable industry: A systematic literature review. *Applied Sciences*, 10(8), 2897. <https://doi.org/10.3390/app10082897>
- Debevec, M., Simic, M., Jovanovic, V., & Herakovic, N. (2020). Virtual factory as a useful tool for improving production processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 57, 379–389. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.10.018>
- Demirel, E. (2018). Dijital Taylorizmin insan, üretim ve ekonomi üzerindeki etkisinin incelenmesi. *International Journal of Social Humanities Sciences Research*, 5(18), 430–438. <https://doi.org/10.26450/jshsr.382>
- Escobar, C. A., McGovern, M. E., & Morales-Menendez, R. (2021). Quality 4.0: A review of big data challenges in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(8), 2319–2334. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01765-4>
- Fakhar Manesh, M., Pellegrini, M. M., Marzi, G., & Dabic, M. (2021). Knowledge management in the Fourth Industrial Revolution: Mapping the literature and scoping future avenues. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 68(1), 289–300. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2963489>
- Fekrisari, M., & Kantola, J. (2024). Integrating Industry 4.0 In manufacturing: Overcoming challenges and optimizing processes (Case Studies). *TQM Journal*, 36(9), 347–370. <https://doi.org/10.1108/TQM-12-2023-0411>
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In W. G. Thor-meyer, F. G. Weyerer (Ed.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85–113). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Hossein-zadeh, A., Chen, F. F., Shahin, M., & Bouzary, H. (2023). A predictive maintenance approach in manufacturing systems via AI-Based early failure detection. *Manufacturing Letters*, 35, 1179–1186. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.125>
- Hussain, S., & Jahanzaib, M. (2018). Sustainable manufacturing – An overview and a conceptual framework for continuous transformation and compe-

- tiveness. *Advanced Production Engineering and Management*, 13(3), 237–253. <https://doi.org/10.14743/apem2018.3.287>
- Iliuță, M.-E., Moisescu, M.-A., Pop, E., Ionita, A.-D., Caramihai, S.-I., & Mitulescu, T.-C. (2024). Digital Twin—A review of the evolution from concept to technology and its analytical perspectives on applications in various fields. *Applied Sciences*, 14(13), 5454. <https://doi.org/10.3390/app14135454>
- Jung, S., Kim, D., & Shin, N. (2023). Success factors of the adoption of smart factory transformation: An examination of Korean manufacturing SMEs. *IEEE Access*, 11, 2239–2249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3233811>
- Kalsoom, T., Ramzan, N., Ahmed, S., & Ur-Rehman, M. (2020). Advances in sensor technologies in the era of smart factory and Industry 4.0. *Sensors*, 20(23), 6783. <https://doi.org/10.3390/s20236783>
- Kashpruk, N., Piskor-Ignatowicz, C., & Baranowski, J. (2023). Time series prediction in Industry 4.0: A comprehensive review and prospects for future advancements. *Applied Sciences*, 13(22), 12374. <https://doi.org/10.3390/app132212374>
- Khan, I. H., & Javaid, M. (2022). Role of Internet of Things (IoT) in adoption of Industry 4.0. *Journal of Industrial Integration and Management*, 07(04), 515–533. <https://doi.org/10.1142/S2424862221500068>
- Khosravi, I. A. H., Farhadpour, S., Grandhi, M., Raihan, A. S., & Das, S. (2024). Strategic data augmentation with CTGAN for smart manufacturing: Enhancing machine learning predictions of paper breaks in pulp-and-paper production. *Manufacturing Letters*, 41, 1312–1323.
- Komoto, H., & Masui, K. (2018). Model-based design and simulation of smart factory from usage and functional aspects. *CIRP Annals*, 67(1), 133–136. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.025>
- Krupnik-Worek, J., Skoczypiec, S., & Habel, J. (2025). Artificial Intelligence overview for optimizing production scheduling in a picture framing company. *Technical Transactions*, 1, 1–21. <https://doi.org/10.37705/TechTrans/e2025006>
- Lanham, M. (2024). *Evolutionary deep learning*. Manning Publications.
- Lee, C. K. M., Zhang, S. Z., & Ng, K. K. H. (2017). Development of an Industrial Internet of Things suite for smart factory towards re-Industrialization. *Advanced Manufacturing*, 5(4), 335–343. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0197-2>
- Mabkhot, M. M., Al-Ahmari, A. M., Salah, B., & Alkhalefah, H. (2018). Requirements of The Smart Factory system: A survey and perspective. *Machines*, 6(2), 23. <https://doi.org/10.3390/machines6020023>

- Mondal, K., Martinez, O., & Jain, P. (2024). Advanced manufacturing and Digital Twin technology for nuclear energy. *Frontiers in Energy Research*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1339836>
- Namboodri, T., & Felhö, C. (2025). AI for quality optimization in turning: A short review. *MM Science Journal*, 2025(2). https://doi.org/10.17973/MMSJ.2025_06_2025033
- Ojstersek, R., Javernik, A., & Buchmeister, B. (2023). Optimizing smart manufacturing systems using digital twin. *Advanced Production Engineering and Management*, 18(4), 475–485. <https://doi.org/10.14743/apem2023.4.486>
- Poland, D. J., Puglisi, L., & Ravi. (2024). Industrial machines health prognosis using a transformer-based framework. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2411.14443>
- Reyes Domínguez, D., Infante Abreu, M. B., & Parv, A. L. (2024). Main trend topics on Industry 4.0 in the manufacturing sector: A bibliometric review. *Applied Sciences*, 14(15), 6450. <https://doi.org/10.3390/app14156450>
- Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Rupp, M., Schneckenburger, M., Merkel, M., Börret, R., & Harrison, D. K. (2021). Industry 4.0: A technological-oriented definition based on bibliometric analysis and literature review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(1), 68. <https://doi.org/10.3390/joitmc7010068>
- Sankhye, S. K. (2020). Machine learning methods for quality prediction in manufacturing inspection. [Yüksek Lisans Tezi, Iowa State University]. Iowa State University.
- Sjödin, D. R., Parida, V., Leksell, M., & Petrovic, A. (2018). Smart factory implementation and process innovation. *Research-Technology Management*, 61(5), 22–31. <https://doi.org/10.1080/08956308.2018.1471277>
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Artificial Intelligence, machine learning and deep learning In advanced robotics, a review. *Cognitive Robotics*, 3, 54–70. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001>
- Vrabič, R., Erkoyuncu, J. A., Butala, P., & Roy, R. (2018). Digital twins: Understanding the added value of Integrated models for through-life engineering services. *Procedia Manufacturing*, 16, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.167>
- Waibel, M. W., Steenkamp, L. P., Moloko, N., & Oosthuizen, G. A. (2017). Investigating the effects of smart production systems on sustainability ele-

ments. *Procedia Manufacturing*, 8, 731–737. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.094>

Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 3159805. <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>

Wu, H., Ji, P., Ma, H., & Xing, L. (2023). A comprehensive review of Digital Twin from the perspective of total process: Data, models, networks and applications. *Sensors*, 23(19), 8306. <https://doi.org/10.3390/s23198306>

İleri İmalat Teknolojilerinde Yeni Yaklaşım: Ultrasonik Destekli Delik Delme¹

Abdurrahman Çetin²

Sinan Serdar Özkan³

Özet

Günümüzde ileri imalat teknolojilerinin gelişimi, yüksek mukavemet, düşük ısı iletkenliği ve değişken süneklik özelliklere sahip, işlenmesi zor malzemelerin üretiminde geleneksel talaş kaldırma yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda daha etkili çözümler için yeni işleme tekniklerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu malzemelerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan yüksek kesme kuvvetleri, takım aşınması, düşük yüzey pürüzlülüğü ve düşük delik kalitesi gibi sorunlar, üretim verimliliğini ve ürün performansını olumsuz etkilemektedir. Ultrasonik destekli işleme yöntemleri, delik delme ve diğer talaşlı işlemlerde yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Kesici takıma veya iş parçasına uygulanan ultrasonik titreşimlerin, kesme kuvvetlerini azalttığı, talaş kırılmasını kolaylaştırdığı, takım ömrünü uzattığı ve delik geometrisi ile yüzey kalitesinde önemli iyileşmeler sağladığı görülmektedir. Böylece işlenmesi zor malzemelerde yüksek kaliteli delikler elde edilirken üretim süresi ve maliyetler de optimize edilmektedir. Ultrasonik teknolojiler, talaşlı imalatın yanı sıra havacılık, savunma, enerji, otomotiv, gıda, tekstil, sağlık ve uzay araştırmaları gibi birçok alanda kesme, kaynak, temizleme, ölçme ve muayene işlemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Delik delme, frezeleme, tornalama, taşlama, honlama, raybalama ve diş çekme gibi işlemlerde ultrasonik destekli tekniklerin artan kullanımı, modern üretim sistemlerinde yüksek verimlilik, hassasiyet ve delik kalitesi sağlayan ileri bir yaklaşım olarak giderek önemini artırmaktadır.

- 1 Bu çalışma Prof. Dr. Sinan Serdar ÖZKAN danışmanlığında 22/01/2024 tarihinde tamamladığımız “Ultrasonik Delik Delme İşlemlerinde Proses Parametrelerinin İşleme Kalitesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı doktora tezi esas alınarak hazırlanmıştır (Doktora Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2024).
- 2 Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, abdurrahman@subu.edu.tr, 0000-0002-7776-8849
- 3 Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, sozkan@subu.edu.tr, 0000-0003-3509-2374

1. Delik Delme

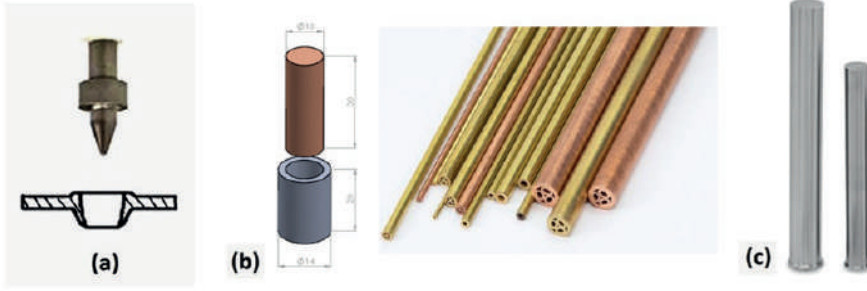
Delik delme işlemi, talaşlı imalatta yaklaşık %33 orana sahiptir (Seçgin & İ.Özsert, 2016). Özellikle havacılık gibi bazı alanlarda uçak gövdesini oluşturan parçaların %40 ile %60'ını oluşturan delme işlemi, en önemli talaş kaldırma yöntemlerinden biridir (Eltaggaz & Deiab, 2019). Delik delme için özel makina ve teçhizatlar olduğu gibi, torna ve freze tezgâhlarında da delik delme işlemleri yapılabilmektedir. Tek fark torna gibi tezgâhlarda iş parçasının dönmesiyle talaş kaldırılırken, freze ve matkap gibi tezgâhlarda kesici takımın dönmesiyle talaşın kaldırılmasıdır.

Delik delme, uygun takımlarla talaş kaldırarak ya da üretim yöntemine göre talaş kaldırmaksızın, iş parçası üzerinde genellikle dairesel açılan boşlukların genel adıdır. Talaşlı delik delme işlemlerinde malzemenin önemi olmaksızın Şekil 1.1'de görünen benzer takımlarla delik delme işlemleri kesici takımın ya da iş parçasının kendi eksenine etrafında dönmesiyle yapılabilmektedir. Talaşsız delik delme işlemlerinde ise sürtünmeli termal delik delme yöntemleri, sac-metal kalıp yöntemleri ve Elektro Erozyon İşleme (EEİ) yöntemleri geniş yer tutmaktadır. Talaşlı delik delme yöntemlerinde olduğu gibi, malzemenin önemi olmaksızın sürtünmeli termal delik delme işlemlerinde de dış formunda değiştirecek şekilde rahatlıkla Şekil 1.2a'daki takımlarla kalınlığı belli olan malzemeye delikler delinebilmektedir.



Şekil 1.1: Talaşlı delik delme kesici takımları

Fakat EEİ ile delik delme işleminde, delinmesi gereken malzemenin elektrik iletkenliği özelliğine sahip olması gerekmektedir. Diğer yöntemlere göre EEİ'de delik delme işlemi daha uzun sürmektedir. EEİ'de aslında esas gaye delik delme üzerine değildir. Bir başka deyişle esas amaç elektrotun şeklini iş parçasına aktarmaktır. EEİ'nin çalışma prensibine uygun bir diğer yöntem ise hızlı delik delme yöntemidir. Bu uygulama ile sertleştirilmiş kalınlığı çok fazla ve elektrik iletkenliği olan malzemelere diğer tüm yöntemlerden çok daha kısa sürede delme işlemi yapmak mümkündür.

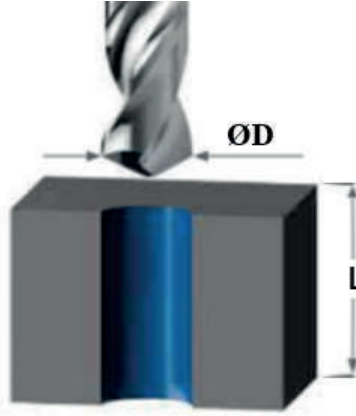


Şekil 1.2: Talaşsız delik delme takımları (a-Sürtünmeli Termal delik delme takımı, b-Elektrot, c- Kalıp delme zımbası)

Talaşlı delik delme işlemlerinde malzemenin sertliğin artması işleme esnasında çeşitli zorluklara sebep olurken EEİ yöntemlerinde ise delinmek istenen malzemenin sertliğinin önemi yoktur. EEİ yöntemlerinde kullanılan takımların temsili örnek elektrotları Şekil 1.2b’de görünmektedir. Şekil 1.2c’de de sac-levha şeklindeki seri imalat ile üretilmek istenen ve üzerinde delik vb boşluk bulunan şerit halindeki parçaların sac metal kalıpları ile üretiminde kullanılan delme-kesme zımbası gösterilmiştir.

İş parçası üzerinden boydan boya ya da kör delik şekilde boşaltmalar olabilir. Bu delikler doğrudan delinebildiği gibi, punta matkabı vb. kesici takımlarla ön delik delinmesinin ardından gerçekleştirilebilir. İlk delik delme sonrasında, kademeli başka bir delik delme işlemi, raybalama, broşlama, havşa açma, parlatma hatta honlama imalat tekniğinin kullanıldığı yöntemlerle ikinci işlemlere tabi tutulabilir. Bütün bu işlemlerin ortak noktası, iş parçası (torna tezgâhında) ya da kesici takımdan (freze tezgâhında) birinin ana dönme hareketinin doğrusal bir ilerleme hareketiyle beraber yapılmasıdır. Delik delme işlemlerinde, proses parametrelerinin ve delme koşullarının yanında Şekil 1.3’de gösterilen delik çapı ($\varnothing D$) ve (L) delik derinliği de önemli bir husustur (Biermann ve diğ., 2018). $L/\varnothing D$ oranına göre delikler, kısa delik ($L/\varnothing D \leq 3$), normal delik ($3 < L/\varnothing D < 10$), derin delik ($10 \leq L/\varnothing D$) olarak sınıflandırılmaktadır. Bazı literatür çalışmalarında da ise $L/D \geq 5$ oranının üzerinde talaş tahliyesinin giderek zorlaştığı ve derin delik olarak tanımlandığı ifade edilmektedir.

Delik delme işlemi tormalama, taşlama ve frezeleme gibi diğer açık kesme işlemleriyle karşılaştırıldığında, kötü talaş tahliyesi ve talaş sıkışması gibi ciddi sorunlarla karşı karşıyadır ve bu nedenle en karmaşık ve zorlu metal kesme işlemleri olarak kabul edilir (Hoang ve diğ., 2022).

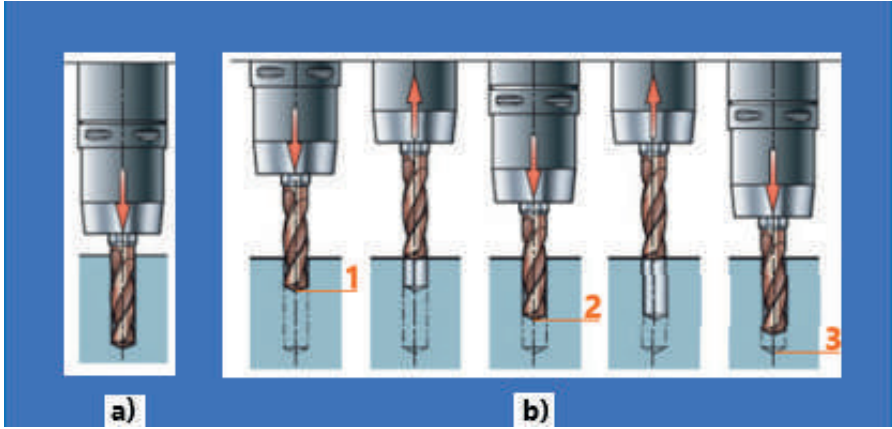


Şekil 1.3: Delik çapı ve delik derinliğinin şematik görünümü

Delme işlemi, talaş kaldırma işlemlerinin genel olarak yaklaşık %33, havacılık gibi bazı alanlarda ise %40 ile %60 arasında bir orana sahiptir (Bayraktar ve diğ., 2017; Eltaggaz & Deiab, 2019; Seçgin & İ.Özsert, 2016). İşleme zamanı olarak değerlendirildiğinde, talaş kaldırma operasyonları arasında delik delmenin, 1994'dan beridir birçok çalışmada toplam sürenin %25'ini oluşturduğu ısrarla belirtilmektedir.

Delme işleminde matkabın ağız sayısına göre her kesici kenar, kesim esnasında malzeme ile temas halindedir. Delme sırasında ortaya çıkan kuvvetler kesici takımın (matkap) aşınmasına ya da kırılmasına sebep olabilir. Delme operasyonlarında kesme derinliği arttıkça talaşın ortamdaki uzaklaştırılması ve tahliyesi zorlaşır. Bu problemleri azaltmak için endüstride gagalama ya da kademeli delik delme yöntemi kullanılabilir. Delik delme esnasında Şekil 1.4'de görünen direkt (doğrudan) delme ve gagalama (kademeli) delme olarak iki uygulanan yöntem bulunmaktadır.

Şekil 1.4'a da görüldüğü üzere doğrudan delmede, matkap iş parçasını tek adımda deler. Doğrudan delme, işleme süresini azaltır ancak doğrudan delmede talaş tahliyesi sorun olmaya başlar ve artan kesici takım ve talaş temas süresi daha fazla sürtünmeye ve takım aşınmasına sebep olabilir. İyi bir soğutma bu süreçte önem arz etmektedir. Aksi takdirde aşırı takım aşınması, düşük boyutsal hassasiyete, yüzey pürüzlülüğüne ve takımın kırılmasına neden olur. Bu nedenle doğrudan delme, genel delme için mükemmel bir çözüm değildir.



Şekil 1.4: Delme yöntemi a) Direkt delme b) Gagalama delme (Mihail, 2013)

Doğrudan delme ile ilgili sorunlardan kaçınmak için Şekil 1.4b’de gösterilen kademeli ya da gagalama delme yöntemi kullanılır. Gagalamalı delmede, matkap ucu iş parçasını birkaç adımda deler. Endüstride gagalı delme en yaygın yöntemdir. Delme derinliğine göre gagalama sayısı artmaktadır. Kademeli delme, talaşların açılan delikten çıkarılmasını doğrudan delmeye göre daha basit hale getirir. Kademeli delme, aynı zamanda delik işleme işlemi sırasında oluşan tork ve itme kuvvetini azaltmaktadır. Özellikle derin delik delme işlemlerinde, kesici takımın kırılmasını önlemek ve daha iyi yüzey kalitesi için gagalama delme tercih edilmektedir. Kademeli delik delme parametreleri uygun seçilmelidir aksi takdirde direkt derin delik delme işlemine göre daha olumsuz sonuçlara da neden olabilir (Enis, 2023).

1.1. Ultrasonik Delik Delme (UDD)

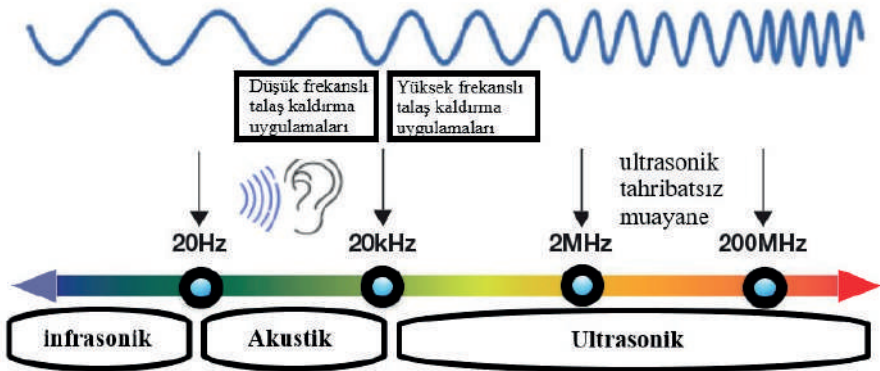
Kesme hızı ve ilerleme parametrelerine bağlı olan delme, tornalama, frezeleme vb. imalat yöntemlerine geleneksel talaş kaldırma yöntemleri denilmektedir. Ultrasonik delik delme işlemi, geleneksel delik delme yönteminde bulunan kesme hızı, ilerleme gibi işleme parametrelerine ilave olarak frekans ve genlik parametrelerinin de eklenmesi ile gerçekleşmektedir.

Şekil 1.5’de görüldüğü üzere insan işitme aralığı yaklaşık 20 Hz ila ~20 kHz arasındadır. “Ultrason” ise, bu frekans aralığının üzerindeki ses dalgaları anlamına gelmektedir (Tobergte & Curtis, 2011). Grafikte, ses dalgalarının frekans aralıklarına göre sınıflandırılması ve bu frekans aralıklarının endüstriyel uygulama alanları gösterilmektedir. Ses dalgaları, titreşim frekans aralıklarına göre infrasonik, akustik ve ultrasonik olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır.

İnfrasonik bölge, 20 Hz'in altında yer almakta olup insan kulağının duyma sınırının altındaki düşük frekanslı titreşimleri kapsamaktadır. Bu aralıkta yer alan titreşimler genellikle doğadaki büyük ölçekli olayların (örneğin deprem ya da volkanik hareketler) izlenmesinde, titreşim analizlerinde ve bazı özel endüstriyel proseslerde kullanılmaktadır.

Akustik bölge, yaklaşık 20 Hz ile 20 kHz arasındaki frekans aralığını kapsar ve insan kulağının duyabildiği sesleri içerir. Bu bölge, ses mühendisliği, akustik ölçümler ve müzik teknolojilerinin yanı sıra, düşük frekanslı titreşimlerle desteklenen talaş kaldırma işlemlerinde de uygulama alanı bulmaktadır.

Ultrasonik bölge ise 20 kHz'in üzerindeki frekans aralığını kapsar ve insan kulağının algılama sınırının ötesindedir. Bu bölgede titreşim genliği küçük ancak frekans yüksek olduğundan, enerji aktarımı oldukça hassas ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ultrasonik frekanslar, özellikle yüksek frekanslı talaş kaldırma uygulamalarında, ultrasonik kaynahta, temizleme işlemlerinde ve malzemelerin mikroyapısal muayenesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaklaşık 20 kHz – 2 MHz aralığı, ultrasonik destekli işleme teknikleri (örneğin ultrasonik delme, frezeleme veya taşlama) için tercih edilirken, 2 MHz ile 200 MHz arasındaki yüksek frekanslar tahribatsız muayene (NDT) uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda ultrasonik dalgalar, malzeme içinden geçerek yansımalar oluşturur ve bu yansımalar sayesinde iç kusurların, çatlakların veya boşlukların tespiti mümkün olur.



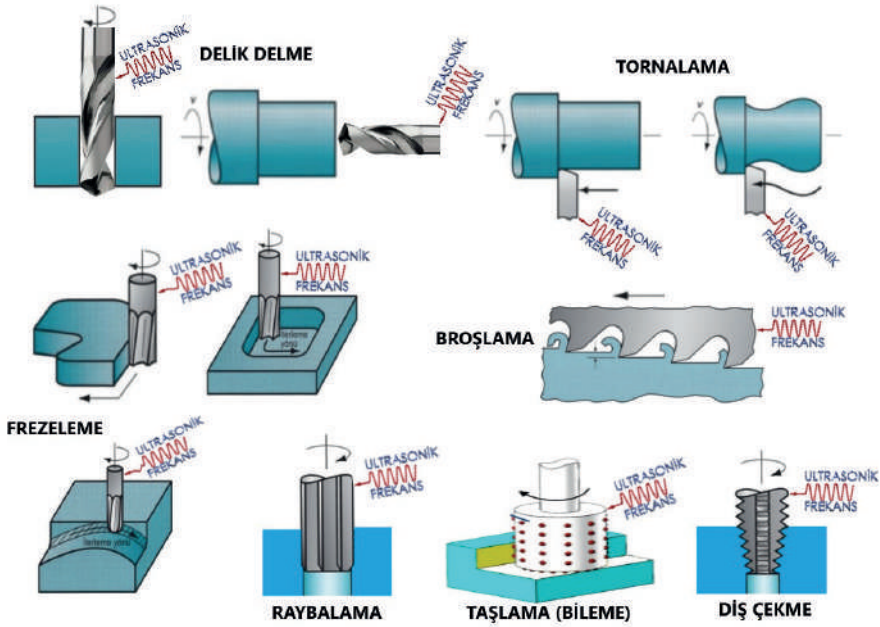
Şekil 1.5: Frekans aralıkları

Ultrason, insan duyma frekansının üzerinde olmasına rağmen, çok karmaşık menzil, konum bulma, hedef belirleme ve iletişim kurma

gibi amaçlar için bazı hayvanlar tarafından milyonlarca yıldır doğada uygulanmaktadır. 19. yüzyıldan önce, yüksek frekanslı uygulamalara örnek çalışmalar görülmüştür. 24 kHz'e kadar çalışan ilk ultrasonik jeneratör Savart çarkı, 1830'da Fransız fizikçi Felix Savart tarafından tasarlanmıştır. Ultrasonik yöntemin ortaya çıkmasını sağlayan en önemli keşiflerden biri piezoelektriktir. 1880'de Pierre ve Paul-Jacques Curie bir elektrik sinyali mekanik bir sinyale dönüştürmeyi başardılar fakat on yıllar içinde üzerine çok fazla çalışma yapılmadığı literatüre bakıldığında anlaşılmaktadır (Lucas ve diğ., 2008; MacBeath, 2006).

Piezoelektrikğin keşfinden sonra Jacques Curie'nun eşi olan Marie Curie öncülüğünde 1800'lü yılların son çeyreğinde cerrahi alanında çalışmalar yapılmıştır ve adına da piezocerrahi denilmiştir (Pavliková ve diğ., 2011). Markov çalışmalarında titreşimli takımlarla ilgili çalışmalarının 1910 yılına kadar uzanabileceğini belirtmektedir. İleri ki yıllarda Wood ve Loomis, 1927'de ultrasoniklerin delme-kesme etkisini keşfedecek konuma gelmiştir. Markov 1962 de, işlenebilirliği zor malzemelerin ultrasonik işlenmesi konulu çalışmasında, ve 1950'lerin sonlarında ve 1960'ların başlarında düşük frekanslı işleme üzerine bir dizi çalışmaların yapıldığına dikkat çeker. Ancak yine Markov'dan, literatüre sayısız katkı ile talaş kaldırma işleminde ultrasonik uygulama üzerine 1957 çalışmasına dikkat çekilmiştir (Short & Graff, 2015).

Ultrasonik delik delme yöntemi geleneksel delme ile karşılaştırıldığında, delme esnasında kesme kuvvetleri ve tork açısından bir azalmaya neden olduğu, kesici takım aşınmasının daha az olduğu ve takım ömrünün uzadığı ayrıca delik kalitesi yönünden daha fazla avantaj sağlamaktadır (Azarhoushang & Akbari, 2007; Dassow, 2018). Ultrasonik yönteminin tercih edilmesi sonrası elde edilen bu iyileşmeler, proses parametrelerinin doğru seçilmesine bağlıdır. Bu nedenle, parametreleri mümkün olduğunca optimum tutmak veya her malzemeye uygun parametrelerin seçimini gerçekleştirmek, delme koşullarını belirlemek GDD ve UDD'yi karşılaştırırken önemlidir. Talaşlı imalat alanında uygulanan ultrasonik yöntemler Şekil 1.6'da görülmektedir.



Şekil 1.6: Ultrasonik talaşlı imalat yöntemleri

Ultrasonik titreşim destekli kesme, günümüzde geleneksel olmayan üretim sürecidir. Kesici takımın, μm değerinde küçük bir genlikle ve kHz değerinde yüksek bir frekansta titreşmeye zorlandığında kesme işlemi yapar. UDD işlemi, delme koşullarını ve üretkenliği iyileştirmek için matkap ucuna veya iş parçasına besleme yönünde 2–20 μm genliklerde yüksek frekanslı titreşimler ($>20\text{kHz}$) uygulayan bir teknolojidir (M. A. Moghaddas, 2021).

Ultrasonik titreşim destekli kesme işleminin temel özelliği, kesici takım ile iş parçası arasında kesik aralıklarla temas sağlamak için kesici takım ucunda kHz cinsinden yüksek frekanslı titreşim oluşturmaktır (Gao, 2020).

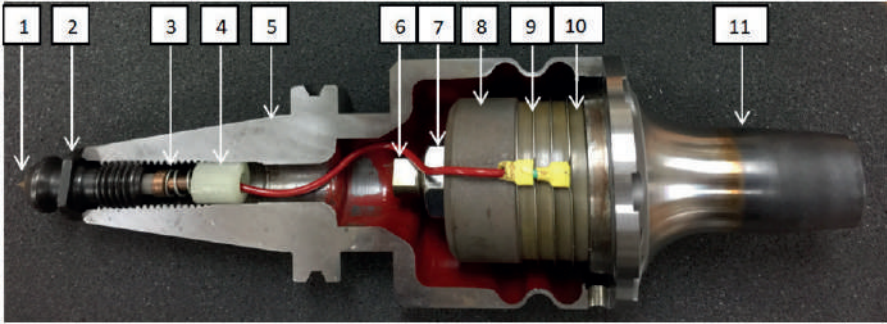
Ultrasonik titreşim destekli kesimde, istenen frekans ve genliklerde titreşimleri sağlamak için Şekil 1.7'deki gibi gösterilen benzer ultrasonik jeneratörlerden faydalanılmaktadır.



Şekil 1.7: Ultrasonik jeneratörler

Farklı işleme prosesleri için çeşitli ultrasonik titreşim destekli kesici takımlar geliştirilmiştir. Ultrasonik yöntem ile işleme, ilk önceleri tek eksenli titreşimli sonra iki boyutlu eliptik titreşim sistemleri ile geliştirilmiştir. Ultrasonik titreşim desteği, daha düşük karmaşıklığa sahip titreşimli takım tasarımları nedeniyle ilk olarak sabit bir kesici takım gerektiren tornalama operasyonlarında uygulanmıştır (Azarhoushang & Akbari, 2007; Babitsky ve diğ., 2004; Nath ve diğ., 2007). Daha sonra, iki boyutlu eliptik titreşimli işleme operasyonlarında da ultrasonik uygulamalar başlanmıştır. Ultrasonik alanındaki gelişmeler fener miline titreşim veren uygulamalara kadar ilerlemiştir. Fakat henüz yaygınlaşmamıştır. Tornalama işleminde kesici takıma titreşim uygulamak kolay bir süreçtir. Fakat frezeleme gibi özel delik delme tezgâhları gibi kesici takımın döndüğü uygulamalarda ultrasonik titreşim vermek biraz zordur.

Acoustech Systems tarafından geliştirilen tek eksen titreşim sunan kesici takım tutucusunun kesit görünümü Şekil 1.8'de verilmiştir.

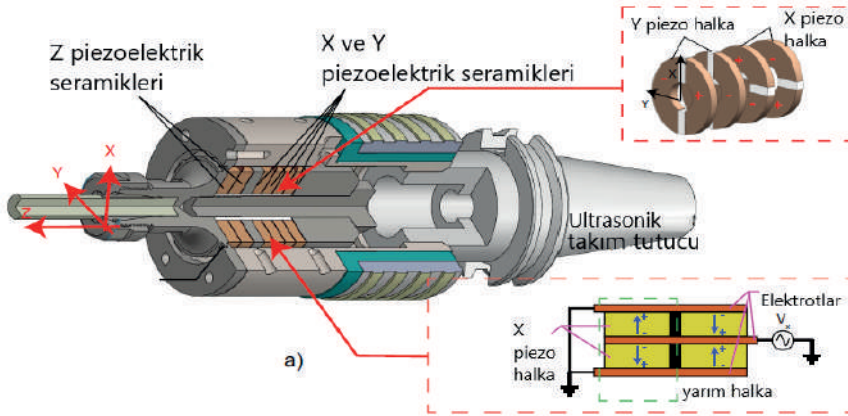


Şekil 1.8: Ultrasonik takım tutucusunun kesit görünümü(M. A. Moghaddas ve diğ., 2018a)

Şekil 1.8'e göre kesici takım, (11) horn kısmına bağlanır ve sistem çalıştığında titreşime uğrar. Sistemin çalışması için, yaylı elektrot düzeneği (3-4), bakır elektrot (1) ile tutma somunu (2) arasında bağlantı sağlanmalıdır. 5 numaralı olarak gösterilen çelik konik gövde, standart fener mili olan CNC dik işleme merkezlerinin BT, HSK ve CAT montaj sistemlerine uygun olarak tasarlanmıştır. Jeneratör ile bağlantının ardından Z eksen yönünde titreşim sağlanmış olmaktadır.

Gao tarafından, XYZ eksenlerinde titreşim oluşturan ve Şekil 1.9'da görülen ultrasonik takım tutucu geliştirilmiştir. Piezoelektrik malzemeler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebildikleri gibi, elektrik enerjisini de mekanik enerjiye çevirebilirler. X ve Y eksen yönünde titreşimi sağlamak

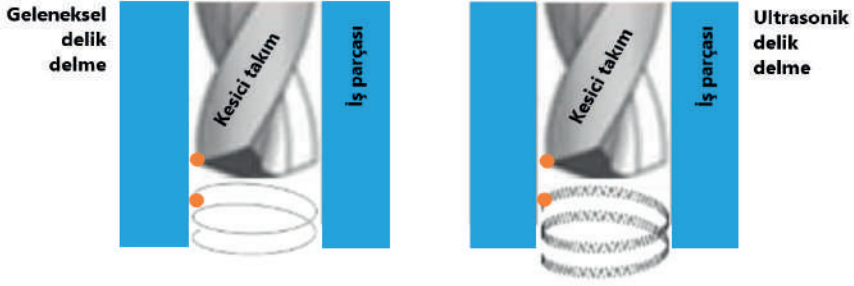
için 90 derece döndürülmüş yarım piezoelektrik seramik halkalardan faydalanılmıştır. Her bir yarım halka zıt kutuplara sahiptir ve birleştirilmiş halka seti, AC voltajı sağlamak için üst ve alt yüzeyde tam halkalı bir bakır elektrot ile kaplanmıştır. Her bir yarım halkanın polaritesi kalınlık yönü boyunca zıt olduğundan, üç elektrottan voltaj uygulandığında bir yarım halka seti genişler ve diğer halka seti daralır, böylece takım tutucunun X veya Y yönde titreşimi gerçekleşir. Her yönün titreşimi, eliptik titreşimler oluşturmak için aynı frekansta bağımsız olarak uyarılır.



Şekil 1.9: Üç eksenli ultrasonik takım tutucu (Gao, 2020)

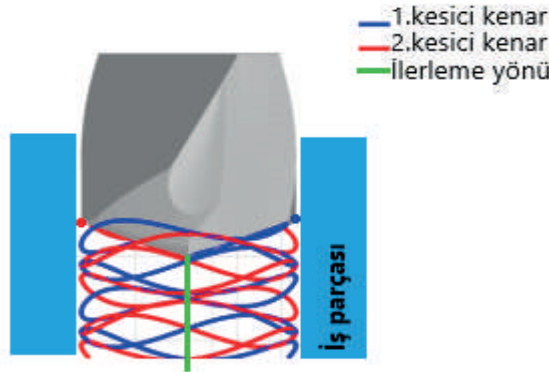
Geliştirilen ultrasonik takım tutucu ile, frezeleme uygulamaları için XY düzleminde titreşimler oluşturulurken, delme uygulamaları için de Z eksenli boyunca titreşimler oluşturabilir. Üç grup piezoelektrik halkaya sahip takım tutucu, üç eksen boyunca titreşim oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Ultrasonik titreşim jeneratörlerinin doğal frekansları, işleme sırasında kesme kuvveti bozukluklarından etkilenecek şekilde değişebilir. Bu da titreşim genlikleri üzerinde sapmalara yol açabilir (Gao, 2020).

Ultrasonik delik delme ile geleneksel delik delme yöntemlerinde takım yolları farklılık göstermektedir. Her ne kadar dışarıdan bakıldığında kesici takımın sadece Z yönünde hareket ettiği görünmüş olsa da kesici takımın üzerinde herhangi bir noktanın izlediği yol tamamen farklılık göstermektedir. Şekil 1.10'da geleneksel delik delme ile ultrasonik delik delme yönteminde kesici takım üzerindeki turuncu renk ile belirtilen noktanın gerçekleşen takım yolları gösterilmiştir.



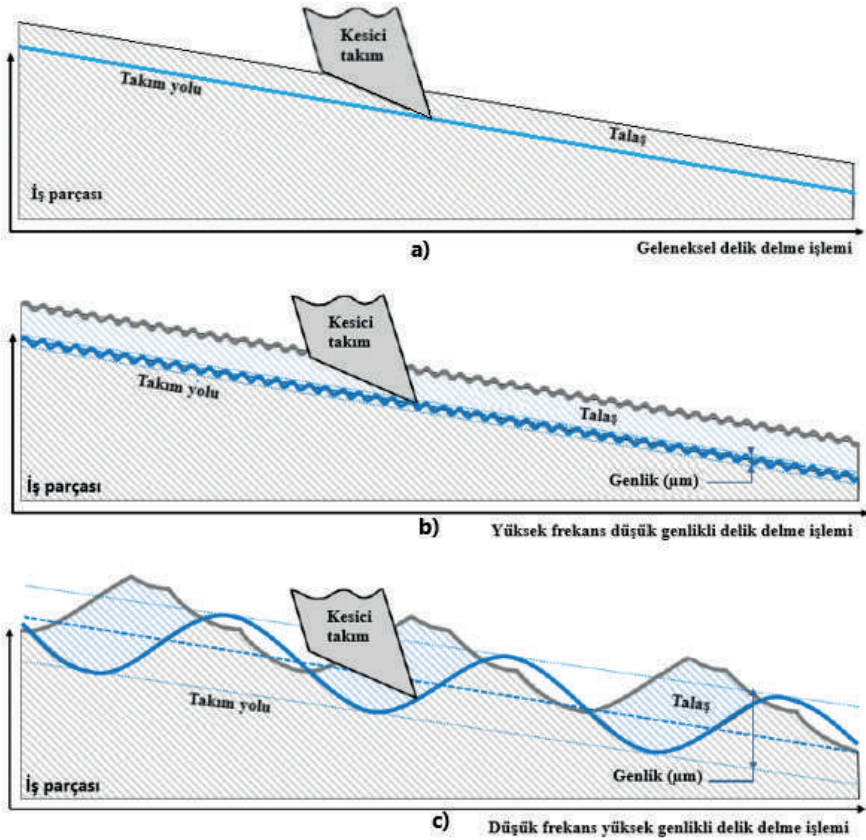
Şekil 1.10: Kesici takım üzerindeki bir noktanın delme sırasındaki takım yolu

Şekil 1.11’de mavi renkte 1 numaralı kesici kenarın dış ucunda bulunan noktanın üç boyutlu yörüngesini, kırmızı renkte 2 numaralı kesici kenarın ucunun yörüngesini ve yeşil renkte kesici takımın ekseninin ilerleme yönü görülmektedir. Kesme hızı, ilerleme, frekans ve genliğe bağlı kesici takımın talaş kaldırma esnasındaki boşluktaki hareketinin şeması büyütülerek şekilde daha açıklayıcı olarak gösterilmiştir. Ultrasonik delik delme ile kesici takıma yüksek frekans düşük genlik ile titreşim verilmektedir. Bir de düşük frekans ve yüksek genlik ile titreşimin verildiği delik delme uygulamaları da bulunmaktadır. Geleneksel delik delme Şekil 1.12a, yüksek frekanslı düşük genlikli delme işlemi Şekil 1.12b’de ve düşük frekanslı yüksek genlikli delik delme yöntemlerinde de kesici takımın izlediği yolun açılımını ise Şekil 1.12c’de verilmiştir.



Şekil 1.11: İki kesici kenar ucunun UDD’deki yörüngesi

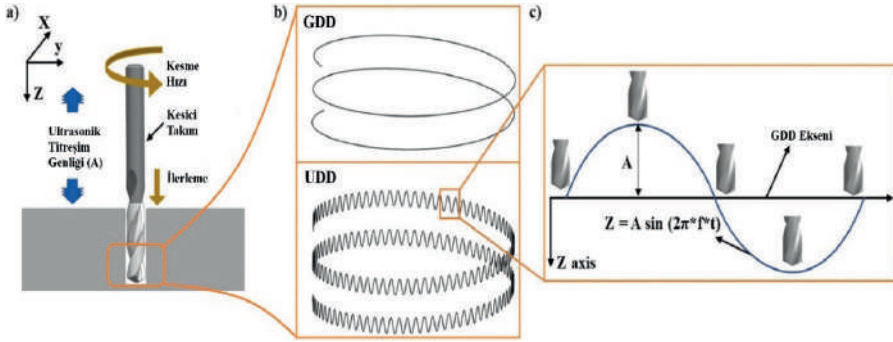
Buna göre GDD’de gagalama olmadığı sürece sürekli talaş kaldırma söz konusudur. Titreşim destekli delmeye iki şekilde yaklaşılabilir. Bu durumda düşük genlikli, yüksek frekanslı titreşimlerin olduğu delmede aralıklı temas nedeniyle talaş kırılmalar gerçekleşebilir. Düşük frekanslı yüksek genlikli titreşimli delmede ise, süreksiz bir delme işlemi görülür. Düşük frekanslı yüksek genlikli uygulamalarda titreşimi oluşturmak için dişliler veya kamların kullanıldığı mekanik çözümler de vardır (Nordenholm, 2020).



Şekil 1.12: Kesici takım üzerindeki bir noktanın delme sırasındaki takım yolunun açımını a) GDD, b)Yüksek frekans düşük genlik, c) Düşük frekans yüksek genlik (Ladonne, 2016)

Ultrasonik delik delme esnasında Z eksenı boyunca frekansa ve genliğe bağılı titreşim, kesme hızı ve ilerleme açısından üç hareket tipi Şekil 1.13a’da gösterilmektedir. Şekil 1.13b’de geleneksel delik delme ile ve ultrasonik delik delme arasındaki matkap ucunun kesme kenarındaki bir noktanın izlediği takım yolu arasındaki fark görülmektedir. GDD’de, kesici takım ve iş parçası

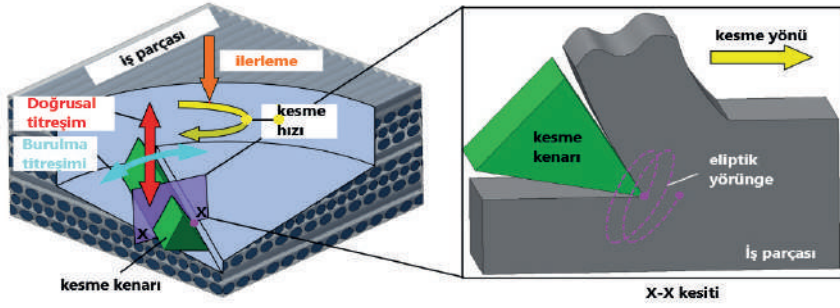
sürekli temas halinde olduğundan kesmeyi sürekli kılarken, ultrasonik delme sırasında, belirlenen işleme parametrelerine bağlı olarak, temas süreksiz olabilir ve takım titreşiminin bir sonucu olarak kesmeyi aralıklı hale getirir. Ayrıca kesici takımın kesme esnasında yörüngesi Şekil 1.13c'de verilmiştir. Burada A titreşim genliği, f titreşim frekansı ve Z takımın eksenel yönde yer değiştirmesi olarak ifade edebiliriz. İş parçasının sabit tutulduğu matkap ucuna ultrasonik titreşimin ve doğrusal ilerlemenin verildiği ultrasonik delik delme işleminin yanı sıra geleneksel yöntemlere sadece delinecek malzemelere titreşimin verildiği ultrasonik yöntemlerde bulunmaktadır. Fakat iş parçasının ultrasonik titreşim verildiği durumların uygulaması kolay verimi düşüktür.



Şekil 1.13: (a) Ultrasonik delme işlemi; (b) Geleneksel ve ultrasonik delme sırasındaki kesme yolları; (c) Delme yörüngesi (Tamil Alagan ve diğ., 2023)

UDD'de ayrıca delme yönündeki titreşime ilave olarak dönme yönünde de burulma titreşiminin uygulandığı yöntemlerde bulunmaktadır. Bu uygulamalarda kesici takımın kesme kenarındaki bir nokta Şekil 1.14'de görüldüğü gibi eliptik yörüngede hareket etmektedir. Ana kesme kenarının herhangi bir noktasındaki burulma hızı, matkap ucunun merkezine olan uzaklığıyla orantılıdır. Matkap ucunun dış köşesi, ana kesici kenar ile küçük kesici kenarın kesişimi olarak tanımlanır. Matkap ucunun merkezine olan mesafesi, matkap ucunun yarıçapına eşittir, dolayısıyla maksimum burulma hızına sahiptir (Ma ve diğ., 2022).

UDD, matkap ile iş parçası arasındaki hareket modunu değiştirdiğinden, GDD'nin sürekli kesimi, aralıklı kesmeye dönüşür. Gerçek kesme hızı ve gerçek kesme açısı periyodik olarak değiştirilir. Takım ile talaş arasındaki sürtünme faktörü azalır ve ardından sürtünme önleyici etki oluşur; Titreşimin neden olduğu dinamik kesme kuvveti bileşeni, talaş kaldırma konusunda kesici takıma avantaj sağlar. Sonuç olarak ortalama itme kuvveti ve tork azalır; Matkap ucundaki titreşim, delme performansını artırmada önemli bir faktör olarak ortaya çıkar (Wang ve diğ., 2023).



Şekil 1.14: Ultrasonik delik delmede dönme ve ilerleme yönündeki titreşim (Ma ve diğ., 2022).

1.2. Delik kalitesi

Günümüzün yoğun rekabet ortamında kâr elde ederek işletmelerin varlığını devam ettirmesi her alandaki üretim ve imalat faaliyetleri için önem arz etmektedir. Bu durumun sağlanması kalite kontrol süreçlerinin doğru işletilmesiyle birlikte istenen kaliteye tek seferde ulaşarak maliyetleri düşürmek ile mümkündür. Talaşlı imalatta istenilen delik kalitesine ulaşmak için uygun işleme yöntemini, kesici takımı, proses parametrelerini, işleme koşullarını ve kalite kontrol süreçlerini belirlemek önemlidir. Bu tezde delik kalitesinin özellikleri, Şekil 1.15’de görüldüğü gibi delik boyutu, dairesellik, silindiriklik, yüzey pürüzlülüğü, delik giriş ve çıkışlarında görülen çapak miktarını kapsamaktadır.



Şekil 1.15: Delik kalitesinin özellikleri

İşlenen deliklerin büyük oranda kalite kontrolden geçmemesinin sebeplerinin başında kabul edilebilir sınırlar içerisinde olmayan boyutsal ölçüler, şekil-konum toleransları ve yüzey pürüzlülüğünün istenen kalitede olmamasıdır. Tekrar tekrar işlemeye gerek duymadan ilk defa da istenen delik kalitesini yakalamak hem ekonomik, hem zaman, hem de seri üretim açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle delik kalitesi; delik boyutu, dairesellik, silindiriklik ya da eksenel kaçıklık, yüzey pürüzlülüğü ve çapak şeklinde başlıklara ayrılabiliriz.

1.2.1. Delik Boyutu

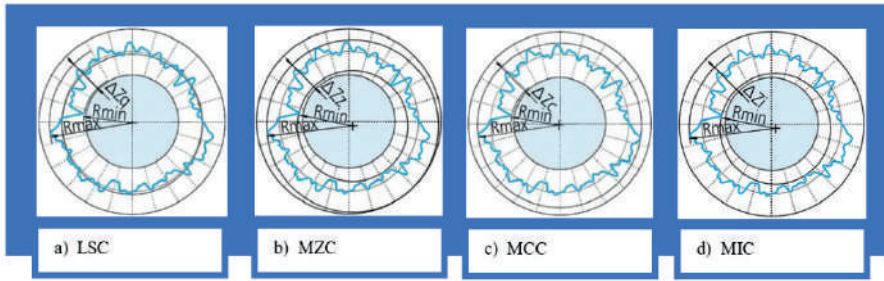
Bu tezde işlenen malzemelerde (AL7075 ve Ti6Al4V) boydan boya delik delindiği için delik boyutu kavramı, delik çapı üzerinden açıklanacaktır. Delik çapı, delik kalitesini tanımlayan en önemli konu başlığıdır. Kesici takımın, serbest yüzey aşınması, krater aşınması, çentik aşınması, talaş yığılması, plastik deformasyon, termal çatlaklar ve kenar tanecik kırılması gibi aşınma tiplerinden herhangi birine sahip olması kesme performansını etkilemektedir. Bu sebeplerle kesici takım aşınması delik çapını doğrudan etkilemektedir. Delik çapını etkileyen diğer sebep ise; delme esnasında ortaya çıkan kesme sıcaklığıdır. Kuru ya da ıslak delme koşulları ve buna bağlı olarak soğutma yöntemleri de etkilidir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün ölçülen değerleri ve delik yüzeyinde oluşan hasarlarda delik çapını doğrudan etkilemektedir. Delik çapında hata ve sapma, delme sırasında kesici takımın kayması, artan takım aşınması, kesici kenarlara yapışan malzeme ve yanlış parametre seçimleri ile oluşabilir (Dahnel, 2017). Delinen malzemeye bağlı olarak bazı durumlarda kesici takım çaplarından daha küçük delik çapı ya da daha büyük delik çapı ile karşılaşılabilir. Delik çapının kesici takım çapından küçük olduğu durumlar genellikle ısıl genleşme katsayılarının farkında dolayı kompozit malzemelerin delinmesinde yaygın olarak görülmektedir. Delik çapının küçük çıkması kesici takımın aşınması ile açıklanabilirken delik çapının büyük çıkmasının birden fazla sebebi bulunmaktadır. Bunların başında kesme hızının yüksek seçilmesi gelmektedir. Küçük delik çaplarının bir başka delik delme işlemiyle ya da raybalama işlemiyle istenen delik çapını yakalaması mümkünken, büyük delik çaplarında bu mümkün değildir. Ancak tolerans dahilinde ise kabul edilebilir olarak görülmektedir. Birbiri ile çalışan parçalar üzerindeki delikler standartlarda belirtilen istenen delik-mil toleransları tablolarındaki değerlere uygun olmalıdır.

1.2.2. Dairesellik

Delme uygulamalarında delik çapındaki değişimler kadar önemli bir diğer delik kalitesi göstergesi dairesellik değerleridir. Deliklerin istenen boyut

ölçülerinden sapması, dairesellik en az yüzey pürüzlülüğü kadar önemlidir. Delğin kalitesi açısından tüm değerlerinin tolerans dahilinde olması birbiri ile çalışan çoklu montaj uygulamaları için ayrıca önem taşımaktadır. Genel olarak delikler boyutsal ölçü tamlığı ve dairesellik açısından ikinci bir işlem olan raybalamaya ihtiyaç duymaktadır. Matkap ile delik açma işlemlerinde iki ağızlı kesici takımlar kullanılmaktadır. Raybalama işleminde ise, çok sayıda kesici ağız sayesinde, düşük miktardaki talaş yükü birçok ağız tarafından kaldırılmaktadır. Bu durum, ağız başına düşen yüklerin çok daha az olması ile birlikte istenen çap ölçüsü ve dairesellik toleranslarının elde edilmesine neden olmaktadır (Aamir ve diğ., 2020; Yılmaz, 2022).

Dairesellikten sapmanın uluslararası kabul görmüş en küçük kareler çember metodu (LSC), minimum aralıklı çemberler metodu (MZC), minimum dış çember metodu (MCC), maksimum iç çember metodu (MIC) ve olmak üzere bu dört yöntem Şekil 1.16'da gösterilmiştir.



Şekil 1.16: Dairesellikten sapma yöntemleri (<https://www.machinemfg.com/roundness/>, 2023)

En küçük kareler çember metodu (LSC) en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde göre, radyal yöndeki sapmaların kareler toplamı minimum olacak şekilde delik profilini içten ve dıştan saran iki çember kullanılmaktadır. İki çember arasındaki ΔZ_q sapma ise yuvarlıktan sapma değerini vermektedir. İkinci olarak, minimum aralıklı çemberler metodu (MZC) ile delik profiline çizilen minimum yarıçaplı iki eş merkezli çember arasındaki ΔZ_z ile sapma değeri bulunmaktadır. Diğer yöntem olan minimum dış çember metodu (MCC) ise delik profiline çizilen en küçük yarıçaplı çember ile yine delik profiline en büyük yarıçaplı çizilen çemberin arasındaki ΔZ_c mesafesi ile ölçülebilir. Son olarak, maksimum iç çember metodu (MIC) ile de delik profiline en az iki noktadan değebilecek mümkün olan en büyük çemberin çizilmesi ile ΔZ_i olarak gösterilen maksimum mesafe esasına dayanmaktadır (Sui & Zhang, 2012). Son olarak önerilen yüksek değerli ürünlerin ve

bileşenlerin kalite kontrolünde çok önemli bir rol oynayacak çok sayıda ölçüm noktasındaki silindiriklik sapmasının değerlendirilmesi için Yinelemeli Minimum Bölge Algoritması (IMZA) adı verilen yeni bir hızlı yöntem tasarlanmıştır. Bu yeni yöntem daha gelişim aşamasındadır (Liu ve diğ., 2023).

1.2.3. Silindiriklik (Eksenel Kaçıklık)

Silindiriklik ya da eksenel kaçıklık delik kalitesini etkileyen bir başka sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Delik delme uygulamaları genellikle Z eksenine doğrultusunda yapılmış olsa da hem X hem Y eksenine doğrultusunda da olabilir. Hatta 3 ekseninde aynı anda açılı bir şekilde de delik delinebilir. Bu deliklerin farklı yüksekliklerinden en az iki ve daha fazla dairesel ölçüsünün tespiti ile silindiriklik ölçülmüş olmaktadır. Silindiriklikten sapma tolerans bölgesi içerisinde olmalıdır. Silindiriklik tolerans bölgesi sınırları içerisindeki her delik, kabul edilebilir delik kalitesi anlamına gelmektedir. Delik kalitesi yönünden silindiriklikten sapma, kesici takım özellikleri, proses parametreleri, delme şartları, makinanın hassasiyeti, işlenen malzemenin cinsi delik delme esnasında oluşan sıcaklık ve takım aşınmasından doğrudan etkilenmektedir.

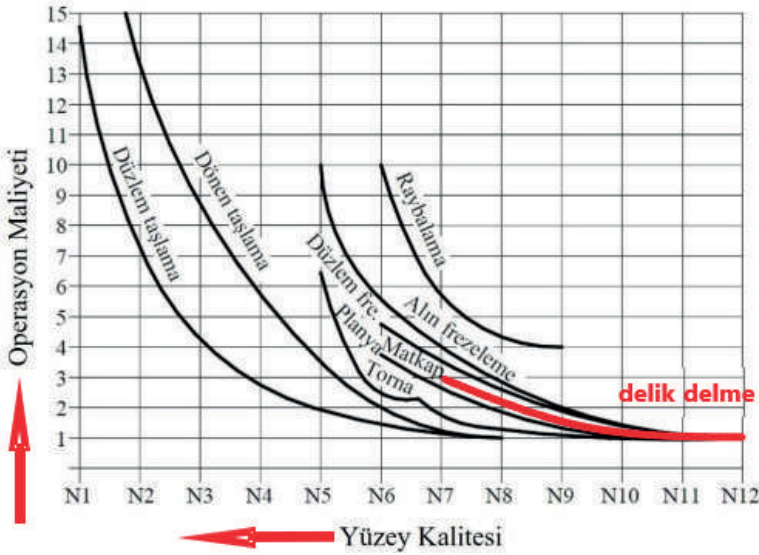
Özellikle derin delik uygulamalarında, delik boyu ile delik çapı arasındaki oranın (L/D) yüksek olması önem taşır. Eksenel kuvvetin artması, ana mildeki sehimi arttırarak eksenel kaçıklığın büyümesine sebep olmaktadır. Kesici takımın pens içinde kalan kısmı ile birlikte kesici takımın bağlantı boyu da önemlidir. Ayrıca delme işlemlerinde oluşan talaşın tahliyesi ve sıcaklıkla oluşan termal genleşmeler, delik kalitesini etkileyen faktörler arasındadır (Şirin, 2021).

1.2.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Delik kalitesinin en önemli özelliklerinden biri de yüzey pürüzlülüğüdür. Malzemenin sahip olduğu yüksek yüzey kalitesi, üstün tribolojik özellikler ve yorulma dayanımı sağlamaktadır. Bu gibi nedenlerle özellikle birbiri ile çalışan montajlı parçaların verimi yüzey kalitesi tarafından doğrudan etkilenmektedir. Parçaların çalışma özelliklerine ve istenen performansa göre belirli toleranslar verilmelidir. Düşük-dar toleranslarda istenen yüzey pürüzlülüğü işleme maliyetlerini artırmaktadır. Yüzey kalitesinin operasyon maliyetlerine etkisi Şekil 1.17'de gösterilmiştir (Yılmaz, 2022). Buna göre bir delik delme işleminde sağlanabilecek yüzey kalitesinin yüksekliği işleme maliyetlerini 3-4 kata kadar artırdığı görülmektedir.

İşlenmiş parçaların yüzey kalitesi, parçaların montajında da çok önemlidir. Üretim maliyeti ile birlikte işlenmiş parçaların performansı, elde edilen

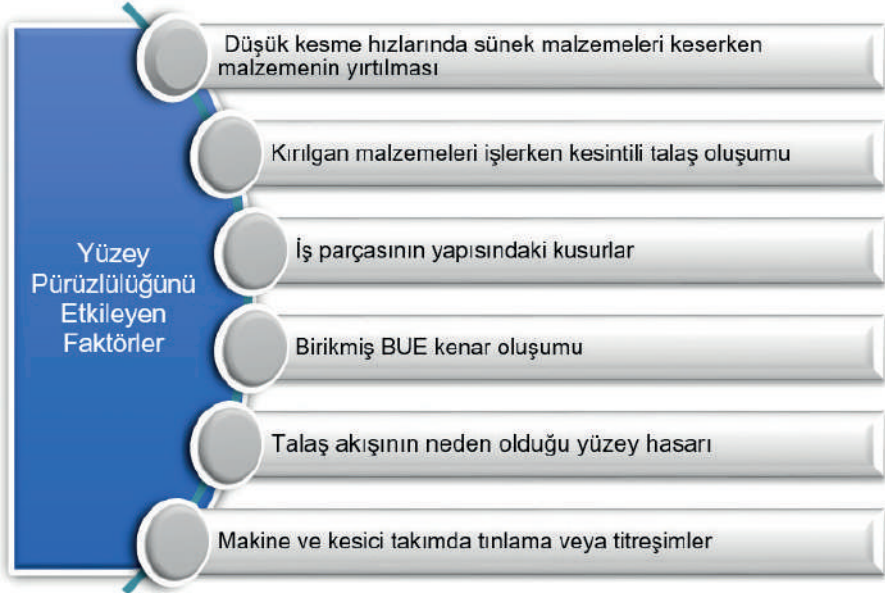
yüzey pürüzlülüğünden önemli ölçüde etkilenir. Delinen deliklerdeki yüzey pürüzlülüğü, sürünme, aşınma, yorulma ve korozyon mekanizmaları buna bağlı olduğundan çok önemli bir delik kalitesidir. İyi yüzey kalitesi yalnızca ürün kalitesini sağlamakla kalmaz, parça bazında maliyetleri artırırken, birbiriyle çalışan parçaların veriminin artması neticesinde toplam maliyeti düşürebilir (Lotfi, 2020).



Şekil 1.17: Talaşlı imalat proseslerinde yüzey kalitesi- operasyon maliyeti grafiği (Yılmaz, 2022)

Genellikle ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) olarak değerlendirilen yüzey pürüzlülüğü, herhangi bir işleme operasyonundan kaynaklanan bir iş parçasının yüzey düzensizliklerini değerlendirmek için kalite açısından ölçülebilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, deliklerdeki yüksek yüzey pürüzlülüğünün, üretim sürecini ve nihayetinde üretim maliyetini doğrudan etkileyen malzemede aşırı aşınma ve yorulmaya neden olduğu delik kalitesinin en önemli özelliklerinden biridir. Delme işleminde iş parçası malzemesinin özellikleri, işleme yöntemi, işleme parametreleri ve işleme koşulları dışında yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler Şekil 1.18’de verilmiştir (Aamir ve diğ., 2020; Zhang & Chen, 2009). İşlenebilirlik çalışmalarında yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi ve değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Delik yüzeylerinde yüzey pürüzlülüğünün ölçümü sırasında diğer durumlara göre bir takım zorluklar ile karşılaşılmaktadır. Delik çapı küçüldükçe deliklerin yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi basit cihazlarla yapılması mümkün değildir.

Dolayısıyla bu durumun önüne geçmek için özel uç ve aparatlar gereklidir (Kivak ve diğ., 2010).



Şekil 1.18: Yüzey pürüzlülüğüne etkileyen faktörler (Aamir ve diğ., 2020)

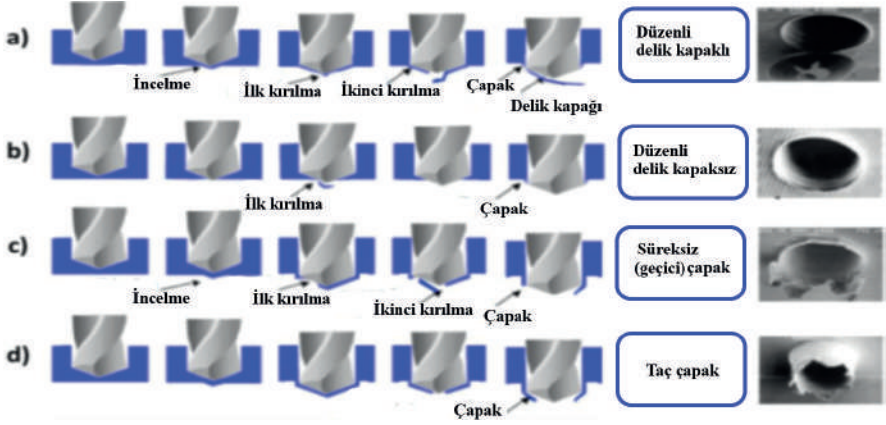
Delik işlemleri genellikle son işlem olarak görülmeyebilir. Çok hassas kullanımlar için delik delme işleminin en iyi sonuç verdiği durumlarda bile parçanın kullanılacağı yer itibarı ile yeterli olmadığından başka bir üretim yöntemleri ile işleme yapılabileceği (bazı durumlar için) unutulmamalıdır. Yüzey pürüzlülüğü genellikle R_a (ortalama pürüzlülük), R_z (tepeler ile çukurlar arasındaki ortalama mesafe) ve R_t (en yüksek tepe ile en derin çukur arasındaki mesafe) cinsinden ölçülür. İşlenmiş yüzeylerin kalitesini incelerken R_a , R_z ve R_t değerlerinin yüksek olması yüzeyin daha pürüzlü olduğunu gösterir. Alüminyum ve Titanyum alaşımlarının yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki malzeme yapışması, besleme işaretleri, oluklar veya oyuklar gibi düzensizliklerin miktarından etkilenir. Yüzey pürüzlülük parametreleri arasında R_a ölçümünün yaygın olarak kabul edildiği bilinmektedir (Dahnel, 2017).

1.2.5. Çapak

Delme sırasında çapak oluşumu olasılığı vardır. Bu çapaklar, malzemeden talaş kaldırma sırasında oluşan küçük parçalar olarak ifade edilir. Delik delme işleminde çapak boyutunu azaltmak için çapak oluşum mekanizmasının

anlaşılması önemlidir. Delik kenarlarının etrafındaki deliklerin hem girişinde hem de çıkışında oluşurlar ve bu da boyutsal doğruluğu etkiler. Girişteki çapaklar genellikle küçüktür ve sonrasında pah işlemi yapılarak çapağın alınma işlemi oldukça kolaydır. Ancak deliklerin çıkışında gerçekleşen çapağın alınması ise zordur. Kesici takım deliğin çıkışına yaklaştıkça malzeme plastik olarak deformasyona uğrar ve eğer malzeme deformasyonu sürdürmezse, o zaman deliğin kenarlarında bir çatlağın başlaması beklenir. Ayrıca deliğin ortasında veya kalan kısmında kırılma olasılığı vardır. Ayrıca, kesici matkap ucu bir deliğin çıkış tarafına ulaştığında, malzemenin bir kısmı kesilmeden itme kuvveti tarafından dışarı itilir, böylece delik çıkışında çapaklar oluşmuş olur. Talaşın ve çapağın oluşma mekanizması malzemeye göre farklılık gösterir. Kırılgan malzemelerde plastik deformasyona uğramadan talaşın kırılma ve kopma işlemi gerçekleşebilir. Bu malzemelerde çapak daha az olabilir. Çapak delik kalitesini etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Oluşan çapağın alınması için ikinci bir işleme ihtiyaç duyulmaktadır. Bu işlemde, toplam imalat maliyetinin % 30'una kadar ilave maliyet oluşturabilir. Çapak alma işlemleri genellikle manuel olarak yapılır. Bu yüzden işleme süresi artar ve üretim verimliliği azalır. Çapak, boyutu yükseklik, kalınlık, genişlik olarak değerlendirilir. Çapaklar normalde iş parçası malzemesi özelliklerine, delme parametrelerine, kesme kuvvetlerine ve talaş oluşumuna bağlı olarak Şekil 1.19'da da görüldüğü üzere düzenli, süreksiz ve taç şekillerinde oluşmaktadır.

Düzenli çapaklar, kesici takımın kesme kenarı tarafından malzemeye sıkıştırma gerilimi uygulandığında deliğin merkezindeki ilk kırılmayla oluşturulur. Takımın ilerlemesiyle plastik deformasyon bölgesi deliğin merkezinden matkabın kenarlarına doğru uzandığından delik çevresinde ikinci bir kırılma meydana gelir. Süreksiz çapaklanmada kırılma, deliğin merkezinde ve çıkışta deliğin çevresinde aynı anda meydana gelir. Taç çapakları çıkış deliğinin çevresinde büyük boyutlardadır ve düzensiz şekillidir. Yüksek ilerleme hızı sonucunda itme kuvvetinin artması nedeniyle deliğin merkezindeki yüksek plastik deformasyonun meydana gelmesiyle bu sonuca ulaşılmaktadır. Talaşlı imalatın her alanında kesici takımda aşınma söz konusudur. Delik delme işleminde kesici takımın aşınması itme kuvvetini artıracığından çapak oluşumunu artırmaktadır. Delme sırasında iş parçası üzerinde kesici takımın itme kuvveti azaltılabilirse, ortaya çıkan çapak boyutu azaltılabilir (Aamir ve diğ., 2020; Chang, 2010).



Şekil 1.19: Delme sırasında çapak oluşum mekanizmalarının şeması (Dabnel, 2017)

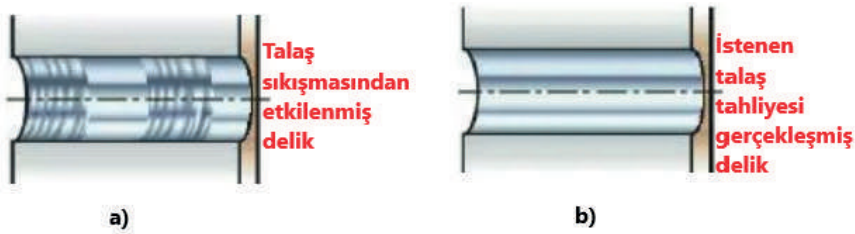
1.2.6. Delik Delme Esnasında Oluşan Talaş

Talaşlı imalat açısından delik delme işlemi Şekil 1.20’de verildiği gibi matkap, takma uçlu takımlar ve U-driller ile gerçekleşir. Genellikle iki ağızlı olan delme kesici takımları üç ve daha fazla ağızlı da olabilir. Talaş oluşumu, delik kalitesini doğrudan etkilemektedir. Talaş oluşumu ve sonrasında talaşın tahliyesi delik delmenin en önemli aşamasıdır. Talaşların tahliyesi kesici takım üzerindeki helisel boşluklar sayesinde gerçekleşmektedir. Talaş oluşumu GDD’de iş parçası malzemesi, kesici takımın geometrisi, proses parametreleri (V_c , f_n) ve soğutma yönteminin seçiminden etkilenir. UDD ise, tüm bu değişkenlere genlik ve frekans da eklenmektedir. Talaşın kesici takım iş parçası arasından problemsiz uzaklaştırılması, elde edilen talaşın kabul edilebilir bir uzunlukta olduğu anlamına gelmektedir. Literatürde de bu durum ispatlanmıştır (Kıvak, 2012; www.sandvik.coromant.com., 2022).



Şekil 1.20: Delme kesici takımları (<https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/drilling>, 2022)

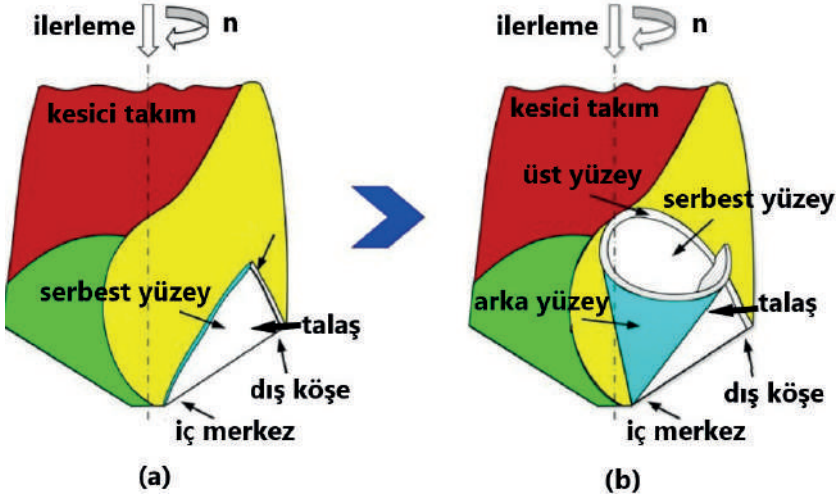
Delme esnasında talaş tahliyesinin istenen ve istenmeyen şekilde gerçekleştiği takdirde ortaya çıkabilecek muhtemel delik yüzeyi Şekil 1.21’de verilmiştir. Talaş sıkışmasının yüzey üzerinde olumsuz etkisinin olması kesici takım aşınması/kırılması hatta enerji maliyetlerinin artması ve tezgâhın aşırı zorlanmasına kadar gidebilmektedir.



Şekil 1.21: Talaş tahliyesine bağlı delik yüzeyi: a) İstenmeyen b) İstenen (<https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/drilling>, 2022)

Tornalama ve frezeleme (ortogonal kesme) işlemlerinde, talaşların kesici kenardan çıkmasıyla talaş oluşumu tamamlanır. Ancak delme işleminde talaş, kesici kenardan çıktıktan sonra spiral kanal boyunca dışarı akmaya devam eder. Talaş oluşumu sırasında kesici takım ve iş parçası arasındaki etkileşimler

karmaşıktır. Şekil 1.22’de delme işleminde talaş oluşumu gösterilmiştir. Şekil 1.22a, kesme kenarı boyunca talaşın düzgün bir şekilde oluşmadığını göstermektedir. Şekil 1.22b’de spiral talaş başlangıcı görülmektedir.



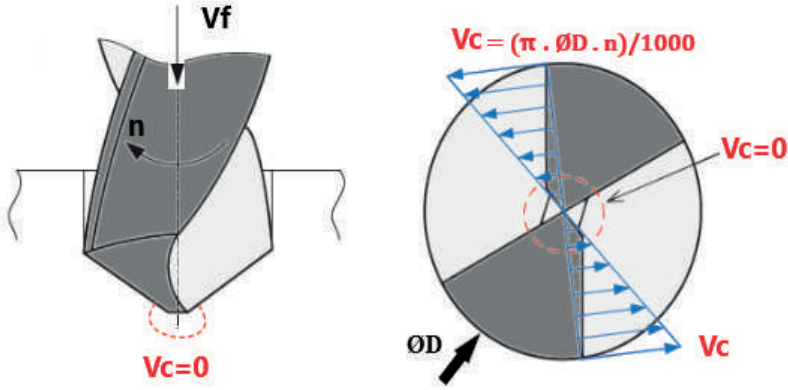
Şekil 1.22: Delme işleminde talaş oluşumu; (a) ilk oluşum; (b) spiral hal alışı

Kesici takımın uç açısı, kesme kenarı ve matkapların özel formlarından dolayı talaşın oluşumu düzgün değildir. Kesme kenarı boyunca talaş açısı ve kesme hızı matkap merkezinden dış köşeye değişir. Kesici takımın merkezinde kesme hızı sıfır kabul edilmektedir. Bu durum Şekil 1.23’de gösterilmiştir. Ayrıca matkap merkezinde talaş açısı negatiftir ve kesme hızı sıfıra yakın iken en dış kesici kenarda maksimum değerine ulaşır. Ayrıca talaş oluşumu sırasında takımın kesici kenarlar üzerindeki noktaların kesiti de Şekil 1.24’de verilmiştir. İç kesici kenar, dış kesici kenardan daha yavaş hareket eder. Bu nedenle, talaş başlangıçta oluşturulduğunda, dış köşeye yakın talaş doğası gereği delme merkezine yakın olandan daha uzundur. Bu sebep, dış talaşın matkap merkezine akmasına neden olabilir. Delme ilerledikçe, talaş Şekil 1.23b’de görüldüğü gibi spiral helisel kanal boyunca akmaya devam eder. Daha sonra spiral bir şekil oluşturur (Zhu ve diğ., 2018).

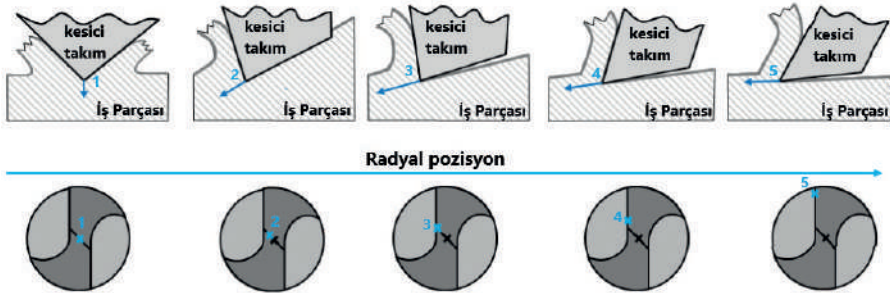
Talaşlı imalattaki delme işlemlerinde kesme hızının azalması ve ilerleme hızının artmasına bağlı olarak genellikle kısa talaş oluşumu gözlenir. Ayrıca Şekil 1.25’de delme parametrelerindeki (V_c , f_n) değişime göre talaş şekillerindeki değişim görülmektedir.

Düşük kesme hızı ve ilerleme hızlarında talaşın daha kapalı aynı zamanda yumuşak, yüksek kesme hızı ve ilerleme hızlarında ise daha açık ve sert

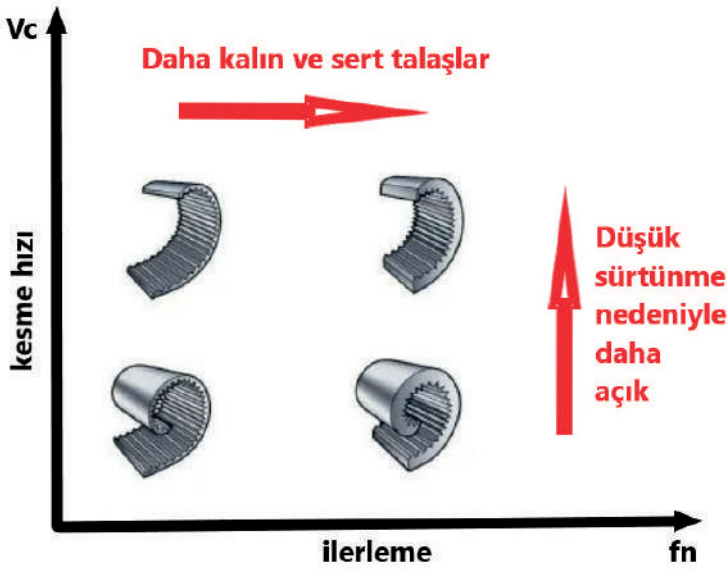
talaşlar oluşmaktadır. Kesme hızının artışı talaşın incelmesine, ilerleme hızının artması ise de talaşın kalınlaşmasına sebep olmaktadır (Kıvak, 2012) (<https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/drilling>, 2022).



Şekil 1.23: Kesme hızı şematik gösterimi (Ladonne, 2016)



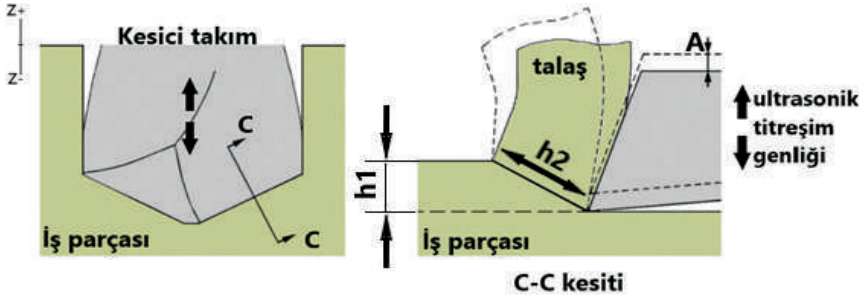
Şekil 1.24: Talaş oluşumu esnasında kesici kenarlar üzerindeki noktaların kesiti (Ladonne, 2016)



Şekil 1.25: Talaş oluşumunun delme parametrelerine göre değişimi (<https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/drilling>, 2022)

Şekil 1.26'da gösterildiği gibi, UDD (Ultrasonik Destekli Delme) işlemi sırasında, kesici takımın A noktasındaki genlik değerinde Z yönünde aralıklı hareketi, iş parçası ile matkap ucu arasındaki toplam ısı transfer süresini azaltabilir ve geleneksel delme yöntemine kıyasla aralıklı talaş oluşumuna neden olabilir. Ayrıca, kesici takımın ilerleme yönündeki doğrusal hareketi, talaş gerilmesinin artmasına ve sonuç olarak kırık (sürekli) talaşların oluşmasına yol açabilir (M. Lotfi & Amini, 2017). UDD'de iş parçası malzemesinin özelliğine, frekans ve genliğe bağlı olarak her zaman sürekli talaş oluşturur beklentisi de olmamalıdır.

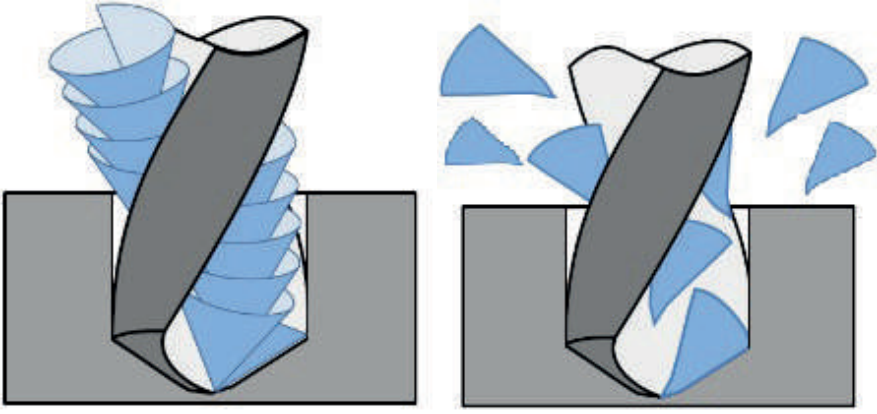
Kesici takımın (matkap) çevresinden merkeze doğru yaklaştıkça kesme hızı azalır. GDD'de kesme hızının azalması BUE (yığılma kenara aşınması) oluşumu riskini ortaya çıkarmaktadır. Matkapın merkezine yakın bir yerde oluşacak BUE oluşumu kabul edilebilir bir durumdur. Ancak kesme hızının düşürülmesi BUE oluşumunun çevreye daha yakın bir bölgede oluşmasına neden olacaktır, dolayısıyla sakıncalıdır. GDD işlemi esnasında talaşın plastik deformasyona uğraması nedeniyle, deformasyona uğramış talaş kalınlığı (h_2) teorik talaş kalınlığından (h_1) farklı olabilir (Kıvak, 2012). UDD, BUE oluşumunu erteleyerek takımın ömrünü artırmaktadır.



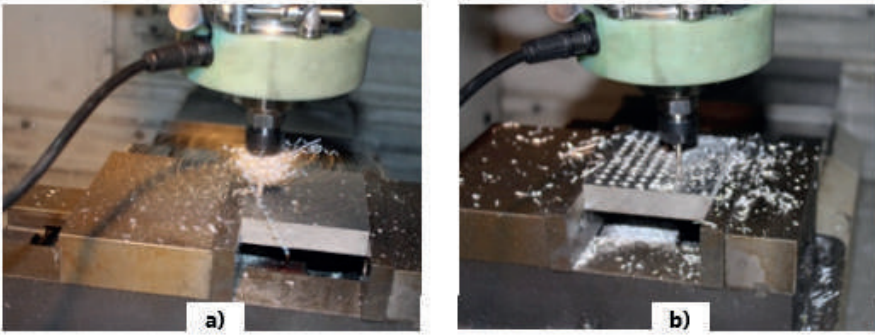
Şekil 1.26: Ultrasonik delik delme esnasındaki talaş oluşumu (M. Lotfi & Amini, 2017)

Sünek malzemelerin düşük ilerleme hızına bağlı talaş derinliğinin az olması ve yüksek kesme hızları kullanılarak işlenmesi ile ince, açık ve sürekli talaş oluşabilir. İş parçasının sünek yapısı talaşın kırılmadan (istenen şekilde) akması ve talaş sıkışmasına neden olmayan durumlarda, yüksek yüzey kalitesi ile delik delme işlemi gerçekleştirilebilir. Şekil 1.27a'daki gibi sürekli talaşın çok fazla olumsuzluğunuun olduğu da unutulmamalıdır. Ayrıca sünek malzemelerin uygun olmayan (düşük ya da orta) kesme hızları ile işlendiği veya kesici takımın aşınma sürecine girdiği durumlarda ise yığıntı talaş oluşabilir. Yığıntı talaş kesici takım üzerinde oluşur, yapışma oranı arttıkça takım üzerindeki yığıntı talaş da büyür. Yığıntı talaşın kesme bölgesinden koparak uzaklaşması sırasında kesici takımdan malzeme koparak takımın zarara uğramasına ve takım ömrünün azalmasına neden olur. Şekil 1.27b'deki gibi sürekli (kırık) talaş, genellikle gevrek malzemelerin işlenmesi sırasında oluşur.

GDD'de talaşın kendiliğinden kırılmasının yanında, talaşın iş parçasına çarparak ve talaşın kesici takıma çarparak kırılması gibi üç ayrı sebep ile talaş kırılabilir (Yılmaz, 2022). UDD yöntemi ile kesici takımın kesici kenarının belirli genlik değeri kadar iş parçasından ayrılması ve bu işlemin saniyede yaklaşık 20.000 defa gerçekleşmesi doğrudan kesik talaş oluşmasına sebep olmaktadır.



Şekil 1.27: Delik delme esnasında çıkan talaş (a) Sürekli talaş; (b) Süreksiz talaş (Ladonne ve diğ., 2015)



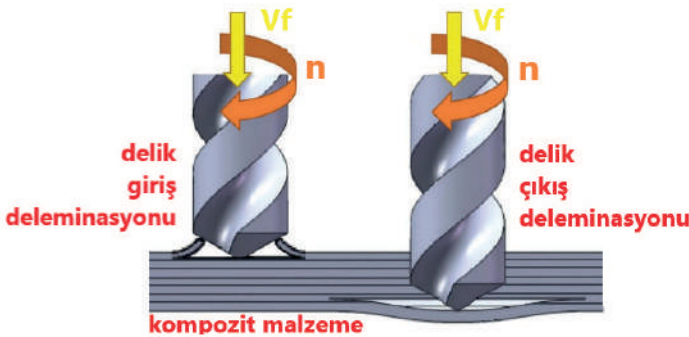
Şekil 1.28: Delik delme uygulaması; a) GDD ile, b) UDD ile

Şekil 1.28a'da, GDD yöntemi ile gerçekleşen delme işlemi sonucunda kesici takıma sarılan sürekli bir talaş oluşmakta ve bu durum talaş sıkışmasına sebep olabilir ve delik kalitesini olumsuz etkileyebilir. Öte yandan, Şekil 1.28b'de UDD yöntemi ile gerçekleştirilen delik delme uygulamasında, talaşın kırık talaş halini aldığı gözlemlenmektedir.

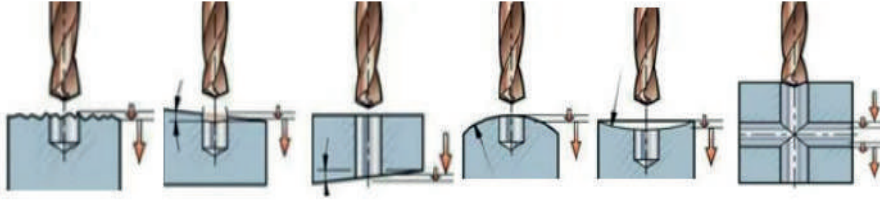
Günümüzde pek çok araştırma, parçaların mukavemetinin artırılması ve ağırlıklarının azaltılması veya benzersiz özellikler elde edilmesi üzerine odaklanmıştır. Kompozit malzemeler bu araştırmaların sonuçlarından biridir. Bununla birlikte, matris ve takviye malzemesinin farklı malzeme özellikleri, geleneksel işleme sırasında genellikle hızlı takım aşınması ve kompozitin tabakalara ayrılması gibi bazı zorluklara neden olur (Kuruc ve diğ., 2017). Tüm işleme operasyonları arasında delme, farklı parçaların bir araya gelerek montajının gerçekleşmesi için delik oluşturmak gereklidir. Delaminasyon,

iş parçasının alt yüzeyinde (matkap çıkışı) kompozit malzemelerde delik delinmesi esnasında ciddi sorunlardan biridir. Fiber takviyeli plastiklerin ya da katmanlı kompozitlerin delinmesinde delik kalitesini olumsuz etkileyecek şekilde özellikle giriş ve çıkışlarda delaminasyon kusurları Şekil 1.29'daki gibi görülmektedir. Bunlara karşı koymak için proses parametreleri, kesici takımın özellikleri, vb. ya da destek plakası konulmak suretiyle çeşitli çözümler aranmaktadır (Tsao & Hocheng, 2005). Bununla da kalmayıp, delaminasyonu azaltmak için gagalama delme tekniği ve ardından önceden delinmiş pilot delikler ile de çözüm aranmıştır. Daha düşük iş mili hızı ve ilerleme hızı değerleri kullanılırsa, geleneksel açılan deliklerin yüzey kalitesi iyileşir. Gagalama delme ile delme en düşük pürüzlülük değerlerini verir sonucuna da ulaşılmıştır (Phapale ve diğ., 2020). Gagalama işlemi gerek kalmadan, UDD tekniği doğru parametrelerde çalışıldığında delaminasyon sorunun çözümüne katkı sunmaktadır. Delaminasyon, delme işleminde ultrasonik titreşim uygulanmasıyla azaltılır. Bu delaminasyon azalması, iş mili hızı azaldığında daha belirgindir. İlerlemedeki artış delaminasyonu hem UDD'de hem de GDD'de olumsuz etkiler (Sanda ve diğ., 2016).

Bazı iş parçalarının delik delinmesi gereken yüzeyleri Şekil 1.30'da görüldüğü gibi olabilir. Şekil incelendiğinde bir grup düzensiz yüzeyin olduğu ve her birini delik delinmesi zorunda kalınabileceği durumlar olabilecektir. Bu gibi durumlarda yüzeylere delik delinirken talaş akışı ve oluşumunda farklılıklar görülür ayrıca kesici takımın kesme kenarlarında aşırı zorlanmalar gerçekleşir. Bu sebeple kesici takımın beklenenden daha erken şekilde aşınmasına ya da takımın kırılmasına sebep olabilir. İş parçasının düzensiz yüzeylerine delik delme mecburiyeti olduğunda UDD yöntemi delik kalitesini iyileştirme ve kesici takım ömrü açısından katkı sağlayabileceği de düşünülmektedir.



Şekil 1.29: Delme esnasında oluşan delaminasyonu (A. H. Lotfi, 2020)



Şekil 1.30: Bir iş parçasının düzensiz yüzeylerine delik delinmesi (www.sandvik.coromant.com, 2022)

1.3. Proses Parametreleri

İşlenecek olan iş parçasının üretimini gerçekleştirirken uygun imalat yönteminin belirlenmesi önemlidir. Belirlenen her imalat yöntemlerinin kendine özgü proses parametreleri bulunmaktadır. Proses parametrelerinin uygun seçilmesi ya da belirlenmesi iş parçasının minimum maliyetle maksimum kalitede üretilmesi anlamına gelmektedir. Ultrasonik delik delme yöntemi ile birlikte delme işleminde ana proses parametreleri kesme hızı (V_c), ilerleme hızı (V_f), frekans (f) ve genlik (A) olarak değerlendirebiliriz. Bu veriler ışığında bilgi edinilmek istenen talaşlı imalat ile ilgili tüm değerler formüllerle hesaplanabilmektedir. Günümüzde çoğu delik delme işlemi, CNC kontrollü takım tezgâhlarında yapılmaktadır. Takım tezgâhlarına belirlenen bazı proses parametrelerinin girilmesi ile delik delme işleminin gerçekleşmesi mümkündür. Bu parametrelerinin eldeki veriler neticesinde kolaylıkla hesaplanarak bulunur. Delik delme işleminde kullanılan formüller aşağıda sıralanmıştır.

1.3.1. Kesme Hızı

Talaş kaldırma işlemlerinin temelinde bir dakikada kesicinin metre cinsinden aldığı yol olarak ifade edilen kesme hızı Şekil 1.31’de görüldüğü üzere V_c olarak gösterilir. Delme işlemlerinde çevresel hız olarak da bilinmektedir. Kesici takım kataloğunun tavsiye edilen verilerinden veya tecrübelerden faydalanılarak, kullanılacak kesici takım çapına göre takım tezgâhına girilecek devir sayısı (n) da aynı formülden çekilerek bulunabilir.

$$V_c = (\pi \times \text{ØD} \times n) / 1000 \text{ [m/dak]} \quad (3.1)$$

Yüksek kesme hızları, kesici takımın aşınmasına sebep olabilmektedir. Böylece düşük takım ömrü, düşük delik kalitesi ve boyutsal toleransların dışına çıkılmasına gibi sonuçlarla karşılaşılabilir. Düşük kesme hızları ise yığıntı talaş oluşumuna buna bağlı yine düşük takım ömrüne,

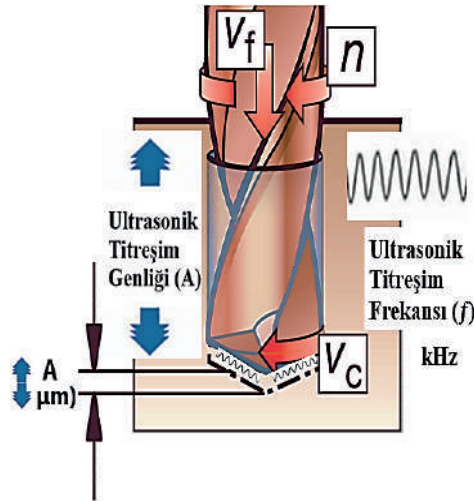
talaşın tahliyesinde bir takım zorluklara ve uzun işleme zamanları ile artan maliyetlere yol açmaktadır (Yılmaz, 2022).

1.3.2. İlerleme Hızı

Şekil 1.31’de görüldüğü üzere V_f ile gösterilen ilerleme hızı, mm/dak cinsinden birim zamanda alınan yol olarak ifade edilmektedir. Başka biş deyişle, kesici takımın iş parçasına göre veya iş parçasının takıma göre doğrusal ilerlemesidir. Bu aynı zamanda tezgâhın veya tablanın ilerleme hızı olarak da bilinir. Devir başına ilerleme (f - mm/dev) ilerleme hızını hesaplamak için kullanılan bir tanımlama olup, takım veya iş parçasının bir devirdeki ilerlemesi anlamına gelmektedir (Kıvak, 2012).

$$V_f = f \times n \text{ [mm/dak]} \quad (3.2)$$

Delme işleminde, tornalama işleminde olduğu gibi genellikle devir başına yapılan ilerleme oranı kullanılmaktadır. Ancak bir devirde kaldırılan talaş kalınlığı (talaş yükü) tornalama ve delme operasyonlarında farklılık gösterir. Tornalama işleminde bir devirde ilerleme oranı kadar talaş kaldırılırken, delme işleminde takımın genellikle iki ağızlı olması nedeni ile kaldırılan talaş kalınlığı ilerleme oranının yarısı kadardır. İlerleme hızı matkap çapı ile orantılıdır. Matkap çapının büyük seçildiği operasyonlarda yüksek ilerleme oranları kullanılabilir. Artan takım çapının matkap mukavemetini artırması ve matkabin daha yüksek ilerleme kuvvetlerine dayanabilmesi bu durumda etkilidir (Yılmaz, 2022).

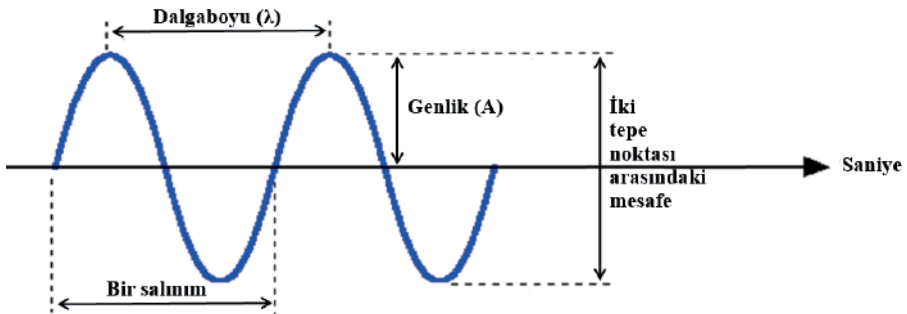


Şekil 1.31: UDD/GDD proses parametreleri

1.3.3. Ultrasonik Titreşim Frekansı ve Genlik

Geleneksel delik delme yönteminde kesici takımın kesici kenarı, kesim esnasında iş parçası ile sürekli bir temas halindedir (Enis, 2023). Delik delinmesi sürecinde talaş oluşumunun kapalı bir bölgede gerçekleşmesi diğer talaş kaldırma yöntemlerine göre talaş kontrolüne dışarıdan müdahaleyi imkânsız kılmaktadır. Talaş tahliyesi delme işlemlerinde kesici takımın helisel kanalları ile gerçekleşmektedir. Bu durum kesici takım, talaş ve iş parçası arasında oluşan temasın ve sürtünmelerin artmasına neden olmaktadır (Yılmaz, 2022). Tüm olumsuzlukları ortadan kaldırmak için yeni bir teknoloji olarak önümüze çıkan ultrasonik delik delme, delik delinmesi sürecinde kesici takımın iş parçası ile temasını istenen bir titreşim sayesinde talaşın spiral şekilde değil, parçalanmış olarak çıkmasına olanak sağlamaktadır. UDD’de kesici takım iş parçası ile sürekli temas etmemesine rağmen, her zaman süreksiz talaşın çıkacağı anlamını taşımamaktadır. İş parçası malzemesinin özellikleri, talaşın şeklini değiştirebilmektedir. Kesici takıma ya da iş parçasına titreşim frekans sayesinde verilmektedir. Ultrasonik yöntemlerde takım tutucu ya da mengene tablasına yerleştirilen piezoelektrik seramik plakalar ve jeneratör yardımı ile titreşim verilmektedir. UDD proses parametrelerinde frekans ve genlik birlikte değerlendirilmelidir. Ultrasonik titreşimin frekans ve genlik grafiği Şekil 1.32’de verilmiştir. Frekans, bir saniyelik birim zamandaki salınım sayısı demektir ve f ile gösterilmektedir.

Bir salınımda iki tepe noktası arasındaki yataydaki mesafeye dalga boyu (λ) denir. Genlik ise, tepe noktasından dikey uzaklık olarak bilinmektedir. Genlik, (A) ile gösterilirken birimi μm ’dir. Ultrasonik uygulamalarda genlik parametresi μm cinsinden verilebildiği gibi ultrasonik jeneratörün güç yüzdesi (%) olarak da verilmektedir. Böylece genlik üzerinde ölçülebilir bir etkiye sahip olan parametrenin ultrasonik güç yüzdesi olduğunu sonucuna varılabilir.



Şekil 1.32: Ultrasonik titreşimin frekans ve genlik grafiği (Dahnel, 2017)

Genel olarak, ultrasonik titreşimleri karakterize etmek için iki parametre kullanılmaktadır. Bu parametreler titreşimin genliği ve frekansıdır. Delik delinmesi sırasında bir UDD sisteminin frekansı üzerinde bir kontrol yoktur ve bu parametre ultrasonik takım tutucu sisteminin tasarım aşamasında belirlenir. Ultrasonik takım tutucularda, çalışma prensibi ile birlikte tasarım tamamlandıktan sonra, rezonansı korumak için gerçek zamanlı küçük değişiklikler dışında, sistemin temel çalışma frekansı değiştirilemez. Bu nedenle, ultrasonik titreşimlerin etkilerini kontrol etmek için ayarlanabilen tek parametre titreşim genliğidir. Araştırmalar, UDD'nin bildirilen faydalarının çoğunun doğrudan ultrasonik titreşimlerin genliği ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Genel olarak, ultrasonik destekli uygulamalarda titreşim genliğini ölçmek için dört yöntem vardır. Komperatörler gibi temaslı yöntemlerle ölçülebilir. Temassız olarak da optik titreşim sensörleri ile ya da değişken bir manyetik alan sonucu iletkenlerde oluşan Eddy (girdap) akım sensörleri sayesinde ultrasonik genlik ölçümleri yapılabilir. Örnek olarak, temassız yöntem olarak sınıflandırılan lazer vibrometreden okunan mv cinsinden voltaj(V) ve bilinen diğer değerler sayesinde genlik (A) aşağıdaki formülden çıkarılabilir (M. A. Moghaddas & Graff, 2020).

$$A = \frac{5 \times 10^3 \times V}{2 \times \pi \times f} \quad [\mu m] \quad (3.3)$$

Son olarak da mikroskop sayesinde görüntü alınarak yapılabilir. Fakat temassız olarak belirtilen yöntemler diğer yöntemlere kıyasla daha hassas ölçüm sonuçları verebileceği bilinmelidir. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise, talaşlı imalat sırasında titreşimli bir takımın genliğinin temas yöntemleri kullanılarak ölçülmesinin neredeyse imkânsız olmasıdır. Ultrasonik delik delme sırasında kesici takımın yük altındayken matkap ucunun genliğinin azalabileceği düşünülmelidir. Ultrasonik güç kaynağı delme işlemi sırasında sabit genliği koruyacak şekilde ayarlandığından, kesici takım delme işlemi yaparken bir frekans kayması görülebilir (Moghaddas & Graff, 2020).

Genlik ve frekansın çarpımı titreşim hızını verir. Titreşim hızı V_v (mm/s), ultrasonik titreşimin genliği A (μm), ve titreşim frekansı f (kHz) ile gösterilmektedir. Delme sırasında matkabın dönmesi nedeniyle, titreşim hızının hesaplanmasında açısal frekans dikkate alınmalıdır. Kesici takımın bir devrinin 2π radyana eşit olduğundan dolayı frekansın 2π radyan ile çarpılması gerekir (Dahnel, 2017).

$$V_v = 2\pi \cdot f \cdot A \quad [mm/s] \quad (3)$$

Kaynaklar

- Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., & Vafadar, A. (2020). A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 12484–12500. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.003>
- Azarhoushang, B., & Akbari, J. (2007). Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(7–8), 1027–1033. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.007>
- Babitsky, V. ., Mitrofanov, A. ., & Silberschmidt, V. . (2004). Ultrasonically assisted turning of aviation materials: simulations and experimental study. *Ultrasonics*, 42(1–9), 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.02.001>
- Bayraktar, Ş., Siyambaş, Y., & Turgut, Y. (2017). Delik delme prosesi: bir araştırma. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 124–124. <https://doi.org/10.16984/taufenbilder.296833>
- Biermann, D., Bleicher, F., Heisel, U., Klocke, F., Möhring, H.-C., & Shih, A. (2018). Deep hole drilling. *CIRP Annals*, 67(2), 673–694. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.007>
- Chang, S. S. F. (2010). *Vibration Assisted Drilling of Aluminum 6061-T6*. In McMaster University. McMaster University.
- Dahnel, A. N. (2017). *Conventional and ultrasonic assisted drilling of carbon fibre reinforced polymer/Titanium alloy stacks*. University of Warwick.
- Dassow, J. M. I. (2018). Sensing and Understanding the Resilience of Sandstone [University of Göttingen]. In *School of Geographical and Earth Sciences*. <http://theses.gla.ac.uk/41087/>
- Eltaggaz, A., & Deiab, I. (2019). Comparison of between direct and peck drilling for large aspect ratio in Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9–12), 2797–2805. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03314-z>
- Enis, M. B. (2023). *Ultrasonic Assisted Drilling Of Precipitation Hardened Martensitic Stainless Steel*. The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Atılım University.
- Gao, J. (2020). *Design , Control and Cutting Process for a Three-Degree-of-Freedom Ultrasonic Vibration Tool Holder* (Issue March). The University of British Columbia.
- Hoang, T. D., Ngo, Q. H., Chu, N. H., Mai, T. H., Nguyen, T., Ho, K. T., & Nguyen, D. (2022). Ultrasonic assisted nano-fluid MQL in deep drilling of hard-to-cut materials. *Materials and Manufacturing Processes*, 37(6). <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1981936>
- Kivak, T., Habali, K., & Şeker, U. (2010). Inconel 718'in Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Ve Talaş Oluşumu Üzerindeki Etki-

- sinin Araştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25(2), 293–298.
- Kıvak, T. (2012). *Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Ti-6Al-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması*. Gazi Üniversitesi.
- Kuruc, M., Vopat, T., Simna, V., & Necpal, M. (2017). Influence of Ultrasonic Assistance on Delamination During Machining of Different Composite Materials. In *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium* (Issue February 2018, pp. 0392–0399). <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.055>
- Ladonne, M. (2016). *Modélisation du procédé de perçage assisté par vibrations forcées : prise en compte de l'environnement Pièce-Outil-Machine*. [Université de Bordeaux]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-02612216>
- Ladonne, M., Cahuc, O., Yves K'nevez, J., Landon, Y., & Cherif, M. (2015). Dynamic Modelling of Vibrations Assisted Drilling. *Conference Proceedings of the Academy of Romanian Scientists - PRODUCTICA Scientific Session*, 7(1), 2018–2022.
- Liu, F., Cao, Y., Li, T., Ren, L., Zhi, J., Yang, J., & Jiang, X. (2023). An Iterative Minimum Zone Algorithm for assessing cylindricity deviation. *Measurement*, 213(March), 112738. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112738>
- Lotfi, A. H. (2020). *Study on the Machinability of Natural Fiber Reinforced Composite Materials* [Griffith University]. <https://doi.org/https://doi.org/10.25904/1912/3902>
- Lotfi, M., & Amini, S. (2017). Experimental and numerical study of ultrasonically-assisted drilling. *Ultrasonics*, 75, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.11.009>
- Lucas, M., Cardoni, A., McCulloch, E., Hunter, G., & MacBeath, A. (2008). Applications of power ultrasonics in engineering. *Applied Mechanics and Materials*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.13-14.11>
- Ma, G., Kang, R., Yin, S., Wang, Y., & Dong, Z. (2022). Effect of amplitude ratios on hole quality in longitudinal-torsional coupled ultrasonic-assisted drilling of CFRP composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(7–8), 2911–2926. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10080-y>
- MacBeath, A. (2006). *ULTRASONIC BONE CUTTING*. University of Glasgow.
- Moghaddas, M. A. (2021). Modeling and optimization of thrust force, torque, and surface roughness in ultrasonic-assisted drilling using surface response methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(9–10), 2909–2923. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06380-w>

- Moghaddas, M. A., & Graff, K. F. (2020). On the effect of load on vibration amplitude in ultrasonic-assisted drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(7–8), 3081–3094. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04777-w>
- Nath, C., Rahman, M., & Andrew, S. S. K. (2007). A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.047>
- Nordenholm, J. (2020). *Research and Testing of an Electromechanical solution for Vibration Assisted Drilling of Aerospace Materials for Vibration Assisted Drilling of Aerospace Materials*. Uppsala University.
- Pavlíková, G., Foltán, R., Horká, M., Hanzelka, T., Borunská, H., & Šedý, J. (2011). Piezosurgery in oral and maxillofacial surgery. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 40(5), 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2010.11.013>
- Phapale, K., Singh, R., & Singh, R. K. P. (2020). Comparative assessment of delamination control techniques in conventional drilling of CFRP. *Procedia Manufacturing*, 48(2019), 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.028>
- Sanda, A., Arriola, I., Garcia Navas, V., Bengoetxea, I., & Gonzalo, O. (2016). Ultrasonically assisted drilling of carbon fibre reinforced plastics and Ti-6Al4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.003>
- Seçgin, Ö., & İ.Özsert. (2016). *İçi boşluklu parçaların delme operasyonunda verimliliği artıran parametrik program*. 3-5 November, 432–442. <https://www.researchgate.net/publication/309741825%0AİÇİ>
- Short, M., & Graff, K. F. (2015). Using power ultrasonics in machine tools. In *Power Ultrasonics* (pp. 439–507). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-028-6.00016-8>
- Sirin, E. (2021). *Hastelloy x süper alaşımının delinmesinde nano partikül katkılı kesme yağlarının işleme performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi*. Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sui, W., & Zhang, D. (2012). Four Methods for Roundness Evaluation. *Physics Procedia*, 24, 2159–2164. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.317>
- Tamil Alagan, N., Sajja, N. T., Gustafsson, A., Savio, E., Ghiotti, A., Bruschi, S., & Bertolini, R. (2023). Investigation of the quality of Al-CFRP stacks when drilled using innovative approaches. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 43, 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.04.011>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2011). *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing* (H. Feng, G. Barbosa-Canovas, & J. Weiss (eds.); Vol. 53, Issue 9). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3>

- Tsao, C. C., & Hocheng, H. (2005). Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(11), 1261–1270. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.015>
- Wang, D., Li, Z., Tian, S., & Li, T. (2023). Study on dynamic drilling forces of CFRP/Ti stacks during longitudinal-torsional ultrasonic vibration drilling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(7–8), 2989–3004. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11304-5>
- Yılmaz, B. (2022). *Ti6Al4V Malzemesinin Delinmesinde Farklı Soğutma Yöntemlerinin Etkileri Ve YSA İle Modellenmesi*. (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, Ankara.
- Zhang, J. Z., & Chen, J. C. (2009). Surface roughness optimization in a drilling operation using the taguchi design method. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(4). <https://doi.org/10.1080/10426910802714399>
- Zhu, Z., Guo, K., Sun, J., Li, J., Liu, Y., Chen, L., & Zheng, Y. (2018). Evolution of 3D chip morphology and phase transformation in dry drilling Ti-6Al4V alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 34(August), 531–539. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.07.001>

3B PLA Esaslı Malzemelerin Sandalye Tasarımı için Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi

Nergizhan Anaç¹

Oğuz Koçar²

Erhan Baysal³

Furkan Parmaksız⁴

Zeynep Hale Şimşir⁵

Bilal Kaya⁶

Özet

Bu çalışmada, ilk olarak eriyik yığılma modelleme (EYM) tekniğiyle farklı nozul çapları (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve 1.0 mm) kullanılarak üretilen PLA Wood ve PLA Plus (PLA +, polilaktik asit) parçaların özellikleri (sertlik, çekme ve eğme mukavemetleri, renk, yüzey pürüzlülüğü) incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, 3B yazdırılmış sandalye üretiminde kullanılacak bu malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra 3B üretilen malzemelerin verileri kullanılarak bir sandalye tasarımı üzerinde sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında, nozul çaplarının 3B yazdırma ile üretilen parça özelliklerine etkisi ve sandalye malzemesi olarak kullanılabilirliğine ilişkin çeşitli öneriler sunulmuştur. Sonuçlar,

- 1 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye
- 2 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye
- 3 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Zonguldak
- 4 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye
- 5 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye
- 6 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

nozul çaplarına göre numune renklerinin değişmediğini fakat PLA Plus malzemesinin PLA Wood'a kıyasla daha yüksek sertlik, çekme ve eğme dayanımı sağladığını göstermiştir. PLA Wood parçaların yüzey pürüzlülüğü, PLA Plus numunelerden yüksek bulunmuştur. Sonlu elemanlar ile yapılan analizlerde malzeme türüne (PLA Plus / PLA Wood) bağlı olarak, eşdeğer gerilme değerleri kayda değer farklılıklar göstermemiştir. Her iki malzemede nozul çapına bağlı olarak deformasyon büyüklüklerinde belirli varyasyonlar gözlemlenirken en az deformasyon miktarı 1 mm nozul çapında basılan PLA Plus malzemede meydana gelmiştir.

Giriş

Katmanlı imalat olarak da bilinen eklemeli imalat, son yıllarda imalat sektöründe öne çıkan en yenilikçi yöntemlerden biri olmuş ve kısa sürede yerini sağlamlaştırmıştır. Temel olarak süreç, 3B model verilerine dayanarak malzemenin katman katman üst üste yerleştirilmesiyle nesnelerin oluşturulmasıyla gerçekleşir. Yöntem, talaş kaldırmadan parça üretme esasına dayandığından, talaşlı imalat teknolojisinden oldukça farklıdır. Geleneksel işlemler kullanılarak inşa edilmesi çok zor veya maliyetli olan daha hafif ve karmaşık tasarımların oluşturulmasına imkân tanır. Eklemeli imalatla kullanılabilen çeşitli malzeme grupları (plastik, seramik, metal) ve üretim teknikleri (eriyik yığma modelleme, **stereolitografi**, **seçici lazer sinterleme**, **toz yatak füzyonu vb.**) vardır. Bununla birlikte eklemeli imalat tekniğinde yaygın olarak 3B yazıcılar ile eriyik yığma modelleme tekniği kullanılırken [1], en fazla tercih edilen malzeme polilaktik asit (PLA) olmuştur [2, 3]. PLA; mısır, patates, şeker kamışı, cassava kökleri ve şeker pancarları gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi, baskı kolaylığı sağlaması ve çevre dostu olması sebebiyle sevilen bir termoplastik polimerdir. Buna rağmen, darbe dayanımı ve termal etkilere karşı sınırlamalarının bulunması bazı uygulamalarda kullanımını kısıtlamaktadır [4]. Bu nedenle son birkaç yıldır polimer harmanlama benzeri teknikler kullanarak PLA'nın özelliklerinin değiştirilmesi için çaba sarf edilmektedir [5]. Kırpılmış karbon, bazalt veya cam elyafı gibi kısa liflerin takviye olarak kullanıldığı PLA karışımları olduğu gibi [6]; bambu, ahşap lifleri, odun unu, zeytin ağacı, soya kabukları ve soya proteini, mantar, kakao çekirdeği kabuğu ve kenevir lifi gibi doğal dolgu maddelerinin olduğu PLA karışımları da vardır [7].

3B yazdırma tekniğinin; birden fazla malzeme içeren, farklı doluluk oranlarına ve desenli içyapılara sahip kompleks parçaların imal edilebilmesine olanak sağlayan özel yetenekleri sayesinde üretim potansiyeli çok yüksektir. Yöntem; havacılık ve uzay, otomotiv, denizcilik, inşaat, gıda, sağlık, mimari ve ev dekorasyon sektörleri olmak üzere birçok alanda kullanılabilmektedir

[8]. Bununla birlikte, 3B yazıcılar ile üretimi yapılan parçaların mekanik özelliklerini ve yüzey özelliklerini etkileyen birçok parametre vardır. Parça yazdırma parametreleri [9, 10]; yazdırılacak malzeme çeşidine, markasına, ortam şartlarına ve baskı alınacak 3B yazıcı cihazının özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca katman kalınlığı, nozul çapı, baskı hızı dolgu oranı ve dolgu deseni gibi parametreler ürün kalitesi üzerinde etkili olan diğer işlem parametrelerinden bazılarıdır [11, 12]. Bunların dışında, parça basımıyla ilgili ayarlar dilimleme programları üzerinde yapılarak ürün kalitesi değiştirilebilmektedir [13].

3 boyutlu yazıcı kullanımının artışına bağlı olarak 3B yazdırma; karmaşık geometrilere tasarım özgünlüğü, kişiselleştirilebilir üretim, düşük maliyet ve üretim hızındaki avantajları sayesinde mobilya sektöründe sürdürülebilir yeni bir üretim teknolojisi olarak dikkat çekmiştir [14]. Fakat 3B yazıcı teknolojisinin bu alandaki en büyük kısıtlamalarından biri, polimerlerin filament formunda beslenmesi gerekliliğidir [15]. Mobilya endüstrisinde polimer (matris) ve ahşap (dolgu) kullanılarak oluşturulan geleneksel ahşap-polimer kompozitlerin alternatifi olarak, 3B baskı teknolojisi için içeriğinde gerçek ahşap takviye malzemeleri bulunan filamentler geliştirilmiştir [16]. Filament üreticilerinin ürün bileşimleri % 20-40 ahşap (huş, sedir, bambu, mantar, abanoz, çam, zeytin ve hindistan cevizi vb.) ve % 60-80 oranında polimerden oluşmak üzere içerik farklılıkları göstermektedir [17]. Yakın zamanda biyoplastik granül hammadde kullanımına uygun 3B yazıcıların geliştirilmesiyle 1/1 boyutlarda sandalye, koltuk, tabure, masa gibi mobilya ürünlerinin tasarımı ve üretilmesi mümkün olmuştur [18-21].

3B mobilyalar, dijital ve robotik sistemlere sahip daha büyük ölçekli yazıcılarla basılmaktadır. Oysaki geleneksel mobilya yapımında işçilik önemlidir ve imalat sonrası bol miktarda malzeme atığı ortaya çıkar. 3B yazıcılarla üretimde farklı olarak modüler, sürdürülebilir ve malzeme israfının azaltıldığı bir süreç vardır. 3B tasarım mobilyalarının üretiminde kullanılan yazıcıların büyüklüğü ve nozul çapları, genel kullanıcıların tercih ettiği standart 3B yazıcı boyutları ve nozul çaplarından oldukça fazladır.

Yapılan literatür incelemesi sonucunda, 3B yazıcı teknolojisi hakkında çok sayıda araştırma bulunmasına rağmen 3B yazıcı ile üretilmiş tasarım mobilyalarla ilgili çalışmaların [22] sınırlı olduğu anlaşılmıştır. Gündelik hayatta konfor için sıklıkla kullandığımız eşyalardan biri, ev ve ofis tipi mobilyalar arasında yer alan sandalyelerdir. 1960'larda plastik malzeme üretim maliyetinin düşmesi ile birlikte seri üretim plastik sandalyeler mobilya sektörüne girmiştir. Piyasada çok fazla çeşidi olan sandalye gibi bir ürünün yıllardır yapılan geleneksel üretiminde dahi mühendislik hesaplamalarının

eksik olduğu düşünüldüğünde [23], 3B teknolojisi ile üretilmiş sandalyelerin dayanıklılığı konusunda üreticiye ve tüketiciye yol göstermeye ihtiyaç bulunmaktadır. Bu doğrultuda sonlu elemanlar analizleri de kullanılmaktadır. Bilindiği üzere, tasarlanan modeller, değişken kuvvetlere bağlı olarak farklı davranışlar göstermektedir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak üretimden önce oluşabilecek riskler belirlenmektedir. Üretici oluşabilecek risklere karşı tasarımı ya da malzemede değişiklik yapabilmektedir. Song ve arkadaşları sonlu elemanlar metodu (SEM) ile dayanım, yorulma ve darbe analizi yaparak prototip bir sandalye üretmiştir. Çalışmaya göre, üretilen model üzerinde yapılan gerçek testlerde yapısal hasara uğramayan sandalye, SEM yazılımlarının yeni ve konforlu eğimli mobilyalarda tasarım verimliliğini artırarak fazla malzeme kullanılmasını engellediğini ifade etmektedir [24]. Ağaç ve ağaç esaslı beş farklı malzemenin (sarıçam, doğu kayını, yonga levha, okume kontrplak ve orta yoğunlukta lif levha) kullanıldığı bir çalışmada araştırmacılar üç farklı tipte olacak şekilde koltukları üretmeden önce iskeletlerini SEM ile analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda kritik birleştirmelerin yerleri belirlenmiş ve kuvvet taşıma kapasiteleri tartışılmıştır. Gerçek testlerde elde edilen bulgular en iyi değerlerin Doğu kayını odununda tespit edilmesine rağmen üretim aşamasında stabilite, kolaylık ve ekonomik nedenlere bağlı olarak okume kontrplak ve orta yoğunlukta lif levha'nın Doğu kayınına tercih edilebileceği sonucuna varmışlardır [25].

Bu çalışmanın amacı 3B malzemelerin mobilya üretiminde kullanılabilirliğini değerlendirmek ve bu malzemelerden üretilen sandalye çerçevelerinin sonlu elemanlar analizini yaparak standartlarda belirtilen yüklemeler altında sandalye çerçevelerinin davranışını önceden tahmin edebilmektir.

MATERYAL VE METOT

Filament Özellikleri

Çalışmada, Esun (Shenzhen, Çin) marka kırmızı renkli PLA + ve Filameon (Kayseri, Türkiye) marka açık kahverengi renkli PLA Wood filamentler kullanılmıştır. Tablo 1'de filament malzemelerin mekanik özellikleri sunulmuştur. Üreticisi tarafından geliştirilmiş bir polilaktik asit (PLA) türü olarak tanımlanan PLA Plus filament, %2 kalsiyum karbonat içeriği sayesinde yüksek çekme mukavemeti ve yüzey kalitesi sağlamaktadır [26, 27]. Bu filament, geleneksel PLA'nın nem emilimi, katman yapışması ve kırılgnalık gibi zayıflıklarını gidermek amacıyla geliştirilmiştir.

PLA Wood [28] ise %30 oranında ahşap tozu takviyesiyle üretilmiş, estetik bir görünüme sahip ancak mekanik dayanımı nispeten daha düşük

olan bir kompozit PLA'dır. Ahşap benzeri dokusu ve görünümü nedeniyle genellikle eğitim, tasarım ve hobi projelerinde tercih edilmektedir.

Tablo 1. Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri [28, 29]

Mekanik Özellikler	PLA +	PLA Wood
Yoğunluk (g/cm ³)	1,24	1,13
Çekme Dayanımı (MPa)	50	47
Çekme Uzaması (%)	20	-
Çapı (mm)	1.75	1.75

Kullanılan Nozuller

Piyasada farklı uç çaplarında ve çeşitli malzemelerden üretilmiş nozul tipleri bulunmaktadır. 3B baskı sürecinde nozul seçimi, kullanılan filament malzemesine ve üretilcek parçanın hassasiyetine göre yapılmaktadır. Bu çalışmada, pirinç malzemeden üretilmiş CSATech (Kocaeli, Türkiye) markalı, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve 1.0 mm çaplarında nozuller kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Deneylerde Kullanılan Nozuller a) Kullanılan nozullerin şematik gösterimi b) Baskı işleminden sonra nozullerin görünümü

Literatürdeki çalışmalar, küçük nozul çaplarının daha yüksek yüzey kalitesi ve detay hassasiyeti sağladığını ancak dezavantaj olarak baskı süresini uzattığını göstermektedir. [30, 31]. Nozul çapı, aynı zamanda katmanlar arası

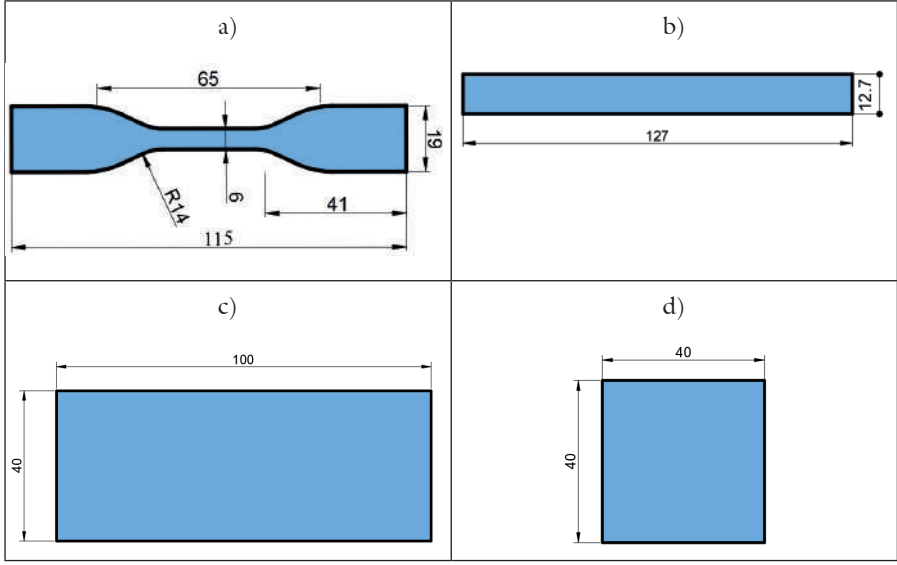
yapışma kalitesini ve parçanın mekanik dayanımını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir [32]. Bu parametrenin mekanik özellikler, gözeneklilik, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal kalite ve yoğunluk üzerindeki etkileri, güncel araştırmaların odak noktası olmaya devam etmektedir [32, 33].

Numune Üretim Süreci

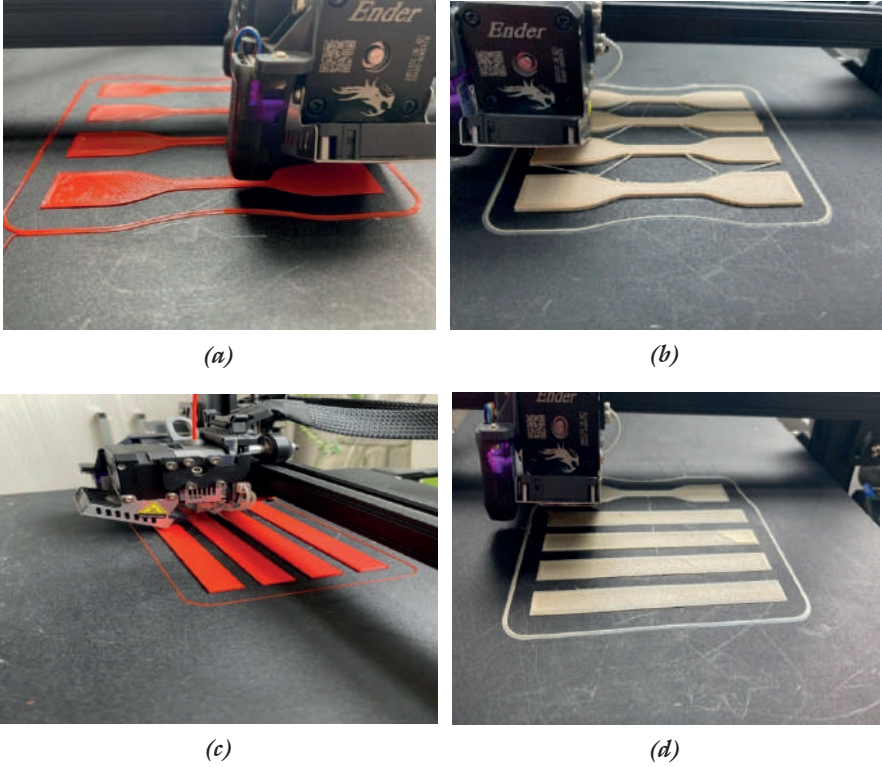
Numunelerin üretimi için EYM prensibiyle çalışan Crealty Ender 3 S1 3B yazıcı kullanılmıştır. Üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla ASTM D790 standartına uygun üç nokta eğme testi [34] ve ASTM D638 Tip IV standartında çekme testi [35] numuneleri üretilmiştir. Bu testlere ek olarak; renk, yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerlerinin tespiti amacıyla 100x40x4 mm boyutlarında dikdörtgen plakalar üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen tüm numunelerin katı modelleri Solidworks 2024 programında hazırlanmış ve “stl” formatına çevrilerek Ultimaker Cura 5.9.0 programı kullanılarak, Tablo 2’de verilen baskı parametreleri kullanılarak dilimlenerek baskıya uygun hale getirilmiştir. Şekil 2’de çekme (a), eğme (b), renk/yüzey pürüzlülüğü (c) ve sertlik (d) ölçüm numunelerinin (yüzey pürüzlülüğü nerede) boyutları gösterilmiştir. Çalışmada, farklı nozul çaplarının (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve 1.0 mm) etkilerini incelemek amacıyla, her bir çap için ayrı numune setleri basılmıştır. Her baskı seti öncesinde, yazıcıya uygun nozul çapı takılmıştır ve nozul değişim işleminin ardından yazıcının tabla ve nozul kalibrasyonu dikkatle yapılmıştır. Bu sayede nozul değişimi ardından, tabla ile nozul arasında oluşabilecek mesafe farkının önüne geçilerek ilk katman yapışma probleminin önüne geçilmiş, buna bağlı olarak da baskı kalitesi korunmuştur. Şekil 3’te 3B yazıcıda basılan çekme ve eğme numuneleri görülmektedir.

Tablo 2. Baskı Parametreleri

Özellikler	PLA Plus	PLA Wood
Katman Kalınlığı (mm)	0.2	0.2
Doluluk Oranı (%)	100	100
Nozul Sıcaklığı (°C)	207	215
Tabla Sıcaklığı (°C)	60	65
Baskı Hızı (mm/s)	60	50
Duvar Sayısı	3	3



Şekil 2. Çekme (a), eğme (b), renk (c) ve sertlik (d) ölçüm numunelerinin teknik resmi (ölçüler mm'dir)

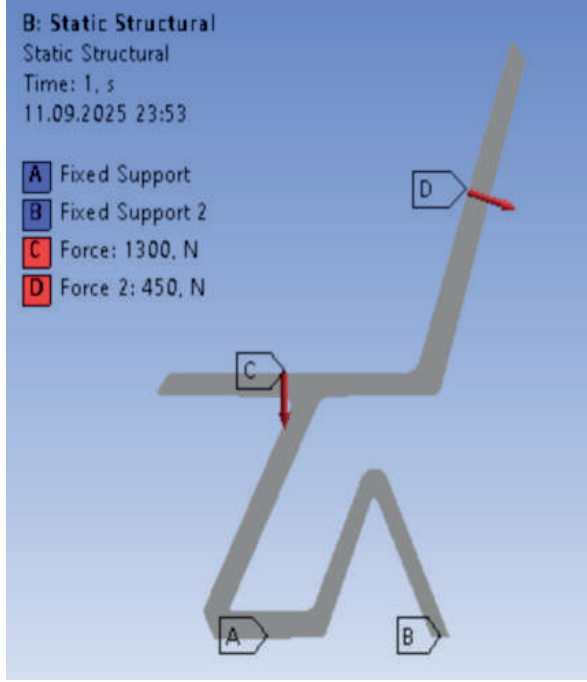


Şekil 3. Çekme numuneleri a) PLA Plus, b) PLA Wood ve eğme numuneleri c) PLA Plus, d) PLA Wood

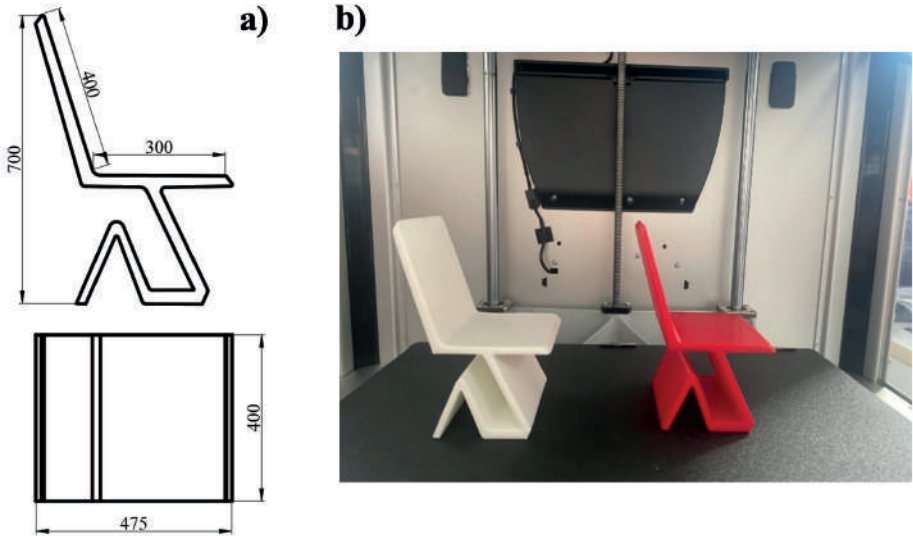
Çalışmada, PLA Wood numunelerin 0.2 mm nozul çapı ile basımı başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Bunun sebebi, filamentin %30 oranında ahşap tozu içermesi ve bu partiküllerin küçük nozul çaplarının kullanıldığı ekstrüzyon işleminde clogging adı verilen yazdırma problemine yol açıp nozülü tıkamasıdır. Küçük nozul çapları, ince detaylı uygulamalar için kritik olan daha yüksek detay ve hassasiyeti sağlamasına rağmen, genellikle daha uzun üretim sürelerine ve tıkanma riskinin artmasına neden olabilmektedirler [31]. Bu nedenle belirli malzeme gruplarının ve uygulama alanlarının gereksinimlerine göre nozul çapının optimize edilmesi, üretim performansını iyileştirecektir.

Sonlu Elemanlar Modeli

Sandalye çerçevesinin yapısal analizi, ticari sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS 2021 R2 Workbench programında yapılmıştır. Sandalye tasarımı Grabcad3B model paylaşım sitesinden alınmıştır [36]. Çizimler Autodesk Fusion programında yapılmış ve parasolid olarak Ansys programına aktarılmıştır. Ansys Workbench malzeme kütüphanesinde çekme testleri sonuçlarına göre her bir nozul çapı için deneysel çalışmalardan elde edilen PLA Plus ve PLA Wood özellikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. PLA Wood için 0.2 mm nozul çapında baskı alınamadığı için analizlere dahil edilmemiştir. Bölüntüleme sıklığı çözüm sonuçlarını etkilemektedir ve bu nedenle bölüntüleme sıklığı optimizasyonu yapılmıştır. Analizler için 5 mm'den sonra sonuçların pek fazla değişmemesi ve 2 mm'den sonra analiz süresinin çok fazla uzaması nedeniyle bölüntüleme sıklığı 2 mm alınmıştır [37]. Şekil 4'te sandalye tasarımına ait sınır şartları verilmiştir. Şekil 5'te sandalye ölçüleri ve 3B yazıcıda basılmış sandalyenin görseli verilmiştir.



Şekil 4. Sandalye tasarımına ait sınır şartları



Şekil 5. a) Sandalyenin teknik resmi b) Sandalyenin ölçekli prototipi

İlk olarak sandalye, zemine temas eden yüzeylerden sabitlenmiştir. TS 9215 [38] standardına göre referans alınan kuvvet değerleri yaslanma yüzeyine 450

N ve oturma yüzeyine 1300 N olarak uygulanmıştır. Diğer yandan eklemeli imalat ile üretilen parçaların sonlu elemanlar ile incelenmesinde bazı sınırlar bulunmaktadır. Eklemeli imalat, baskı yönüne göre malzemelerin mekanik özellikleri değişkenlik gösterir [39, 40]. Ayrıca eklemeli imalat ile üretilen parçalarda gözenek, çatlak ya da bağlanma gibi kusurlar sonlu elemanlar analizinde hesaba katılmamakla birlikte modellenmesi de zordur. Sayısal modelleme üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlı sayıdadır [41]. Bu çalışmada Sonlu elemanlar analizi yapılacak obje olarak sandalye tercih edilmiştir. Çünkü kullanıcı konforunun artmasına yardımcı olacak insan vücudunun şekline uyum sağlayabilen farklı tasarımda sandalyeleri 3B baskı ile üretmek mümkündür [42].

Mekanik ve Optik Özelliklerin Belirlenmesi için Yapılan Testler

Mekanik Testler

3B baskı ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme, üç nokta eğme testleri ve sertlik ölçümü gibi mekanik testler uygulanmıştır. Çekme ve üç nokta eğme testleri WDW-5 model 5 kN kapasiteli universal çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ASTM D638 (Tip IV) standardına göre imal edilen numunelerle çekme, ASTM D790 standardına uygun üretilen numunelerle ise üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Her iki test de oda sıcaklığında dört tekrar olarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri 1 mm/dak, eğme testleri ise 5 mm/dak hızında uygulanmıştır.

Sertlik ölçümü

Numunelerin sertlik değerleri, Loyka (İstanbul, Türkiye) LX-D-2 model Shore D durometresi ile ölçülmüştür. Her bir numunenin sertliği, rastgele seçilen beş farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamasıyla belirlenmiştir.

Renk ve yüzey pürüzlülüğü analizi

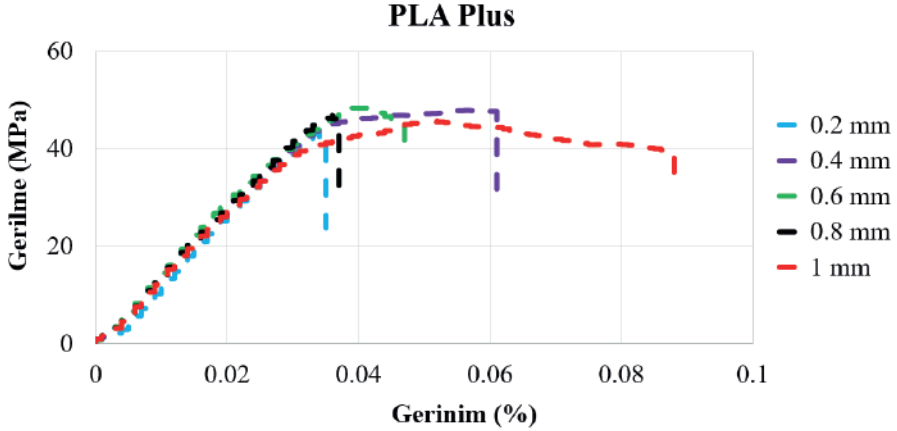
Renk değerlerinin belirlenmesi için CHNSpec (Hangzhou, Çin) marka CS410 model spektrokolorimetre kullanılmıştır. Numunelerin CIELAB skalasında L^* , a^* ve b^* değerleri alınarak renk ölçümü yapılmıştır. Bu sisteme göre L^* (açıklık-koyuluk beyaz için $L^* = 100$, siyah için $L^* = 0$), a^* (yeşil-kırmızı, $+a^*$ kırmızılığı, $-a^*$ yeşili) ve b^* (açık mavi-sarı, $+b^*$ sarılığı, $-b^*$ maviyi) temsil edilen parametrelerdir. CIELAB skalasında bir renk tonunu, $L^*a^*b^*$ koordinatları tanımlar. Çalışmada her bir numune üzerinden dört ölçüm alınmış, farklı renkteki numunelerin renk değerleri bu ölçümlerin ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Numunelerin aritmetik ortalama yüzey

pürüzlülüğü (Ra) değeri, Mitutoyo (Kawasaki, Japonya) marka SJ301 model portatif yüzey pürüzlülüğü cihazıyla ölçülmüştür. Değerler her numuneden beş tekrarlı olarak okunmuş ve ortalamaları alınmış ve bu değer üzerinden belirlenmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

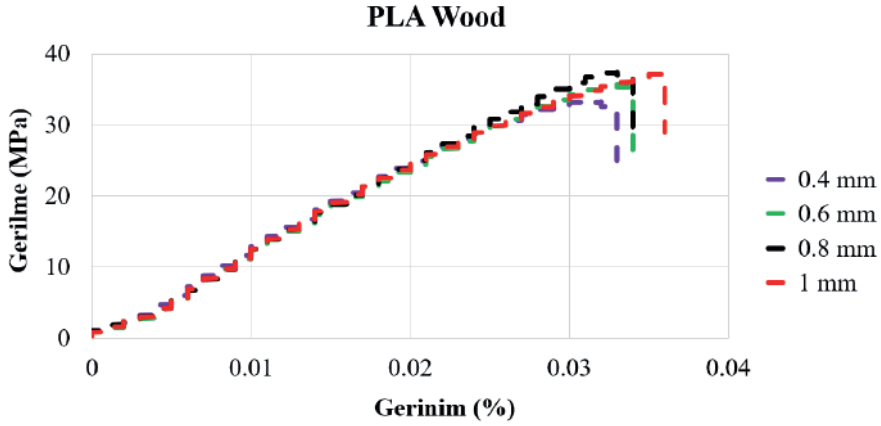
Çekme Test Sonuçları

Şekil 6'da farklı nozul çapları kullanılarak hazırlanan PLA Plus çekme numunelerinin gerilme-gerinim grafikleri verilmiştir. Nozul çapı arttıkça parçalar daha sünek bir performans göstermişlerdir. Nozul çapı 0,6 mm olduğunda en yüksek çekme dayanımı (48.6 MPa) elde edilirken, en fazla şekil değişim miktarı 1 mm nozul çapında meydana gelmiştir.



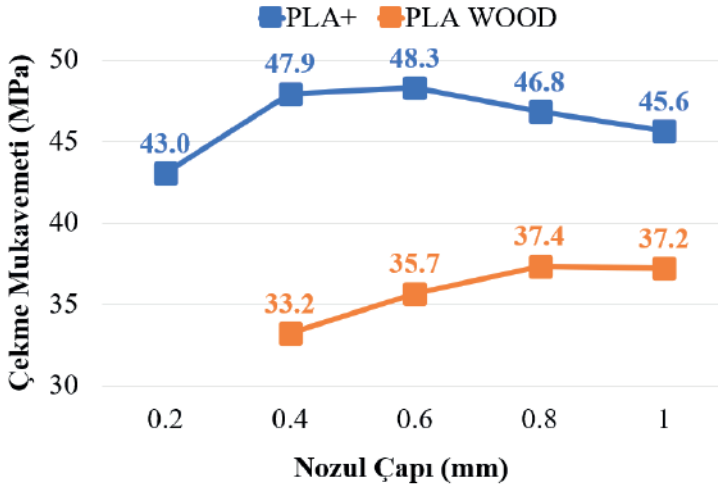
Şekil 6. PLA Plus gerilme-gerinim grafiği

Şekil 7'de farklı nozul çapları kullanılarak hazırlanan PLA Wood çekme numunelerinin gerilme-gerinim grafikleri verilmiştir. PLA Wood malzemelerde 0.8 mm nozul çapına kadar hem çekme dayanımı hem de şekil değiştirme miktarı artmaktadır. Nozul çapı 0.8 mm'de en yüksek çekme dayanımı (37,4 MPa) elde edilirken 1 mm nozul çapı için çekme dayanımı (37,2 MPa) çok az miktarda düşme eğilimi göstermektedir.



Şekil 7. PLA Wood gerilme-gerinim grafiği

Şekil 8’de nozul çapına bağlı olarak PLA Plus ve PLA Wood malzemelerinin çekme mukavemetleri karşılaştırılmaktadır. PLA Plus numunelerde çekme dayanımı 0.2 mm nozul çapında 43 MPa iken 0.6 mm’de 48.3 MPa ile en yüksek değere ulaşmıştır. 1.0 mm çapında dayanımda hafif bir düşüş (45.6 MPa) gözlenmektedir. PLA Wood numunelerde ise çekme dayanımı nozul çapı arttıkça düzenli olarak yükselmiş ve 0.8 mm’de 37.4 MPa ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır.



Şekil 8. PLA Plus ile PLA Wood çekme mukavemeti karşılaştırılması

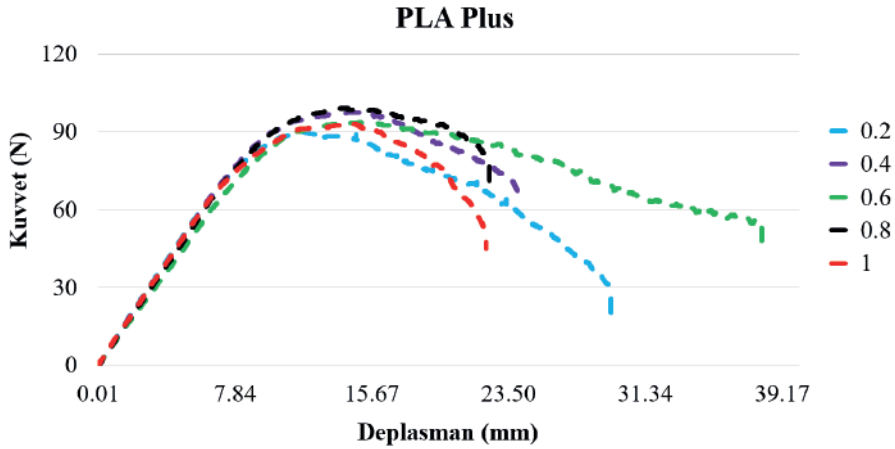
Czyżewski ve çalışma arkadaşları, PLA ürünlerinde farklı nozul çapları (0.2, 0.4, 0.8 ve 1.2 mm) kullanarak gerçekleştirdikleri testlerde, en yüksek çekme dayanımının 0.8 mm nozul çapında, en düşük çekme dayanımının ise 0.2 mm nozul çapında elde edildiğini bildirmiştir. Ayrıca, çalışmada nozul çapının 0.8 mm'den 1.2 mm'ye çıkarılmasıyla PLA'nın çekme dayanımının azaldığı belirtilmiştir [43]. Benzer şekilde, bu çalışmada da PLA Plus için 0.6 mm, PLA Wood için ise 0.8 mm nozul çapından itibaren mekanik özelliklerde bir düşüş gözlenmiştir. Her iki çalışma da belirli bir nozul çapının aşılmasının mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkilere yol açtığını ortaya koymaktadır. Çekme testinde ölçülen gerilme ve gerinim değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. PLA Plus ile PLA Wood gerilme ve gerinim değerleri

Nozul Çapları	PLA Plus		PLA Wood	
	Gerilme (MPa)	Gerinim (%)	Gerilme (MPa)	Gerinim (%)
0.2 mm	43.0 ± 1.1	2.8	-	-
0.4 mm	47.9±1.9	6.1	33.2±0.9	3.3
0.6 mm	48.3±1.8	4.7	35.7±0.7	3.4
0.8 mm	46.8±0.8	3.7	37.4±0.3	3.4
1 mm	45.6±1.2	8.8	37.2±1.5	3.6

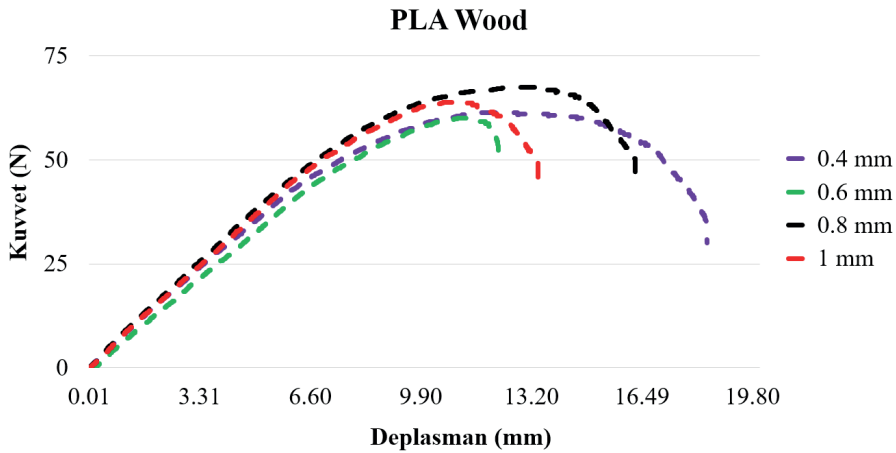
Eğme Test Sonuçları

Şekil 9'da PLA Plus numunelerinin nozul çapına göre karşılaştırılmış eğme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. PLA Plus'ta eğme kuvveti 0.8 mm çapında nozul için 99.1 N olarak en yüksek değerdedir. Diğer kuvvet değerleri yüksekte düşüğe doğru sırasıyla 0.4 mm nozul çapında 97.4 N, 1 mm nozul çapında 93 N, 0.6 mm nozul çapında 92.8 N ve 0.2 nozul çapında 89.9 N olarak tespit edilmiştir.



Şekil 9. PLA Plus kuvvet- deplasman grafiği

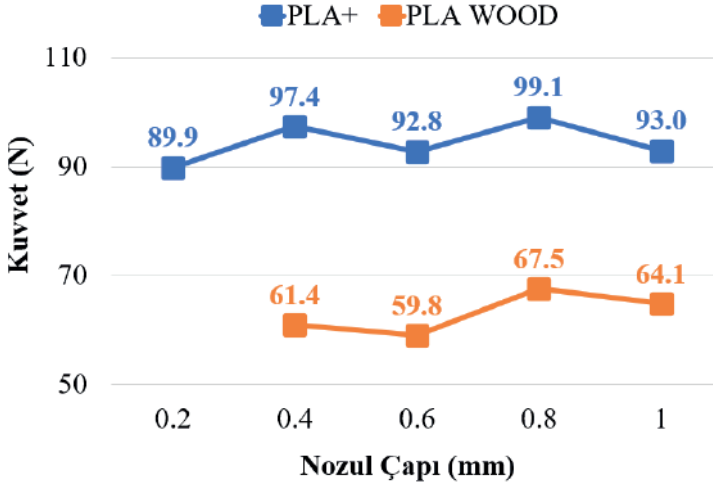
Şekil 10'da ise PLA Wood eğme testlerine ait kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. PLA Wood malzemelerde 0.8 mm nozul çapında en yüksek eğme kuvveti 67.5 N olarak belirlenmiştir. En düşük kuvvet 0.6 mm nozul çapında 59.8 N olmaktadır. Nozul çapının 0.4 mm'den 0.6 mm'ye artışı eğme kuvvetinde azalmaya neden olmaktadır. Yine nozul çapının 0.8 mm'den 1 mm'ye artırılması eğme kuvvetinde azalmaya sebep olmuştur.



Şekil 10. PLA Wood kuvvet- deplasman grafiği

Şekil 11'de nozul çapına bağlı olarak PLA Plus ve PLA Wood malzemelerinin eğme kuvvet değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Hem PLA Plus hem de PLA Wood için 0,8 mm nozul çapı en yüksek mekanik

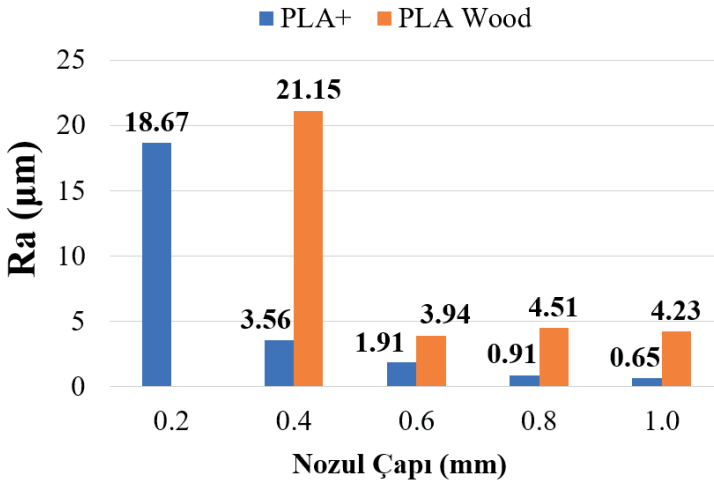
performansı vermiştir. Küçük nozul çapında (0.2 mm) katman hatalarının artması, büyük nozul çapında (1.0 mm) ise katman yapışmasının zayıflaması nedeniyle dayanımın düştüğü düşünülmektedir. Orta çapların (0.4-0.6-0.8 mm) optimum performansı sağladığı anlaşılmıştır.



Şekil 11. PLA Plus ile PLA Wood eğme kuvvetlerinin karşılaştırılması

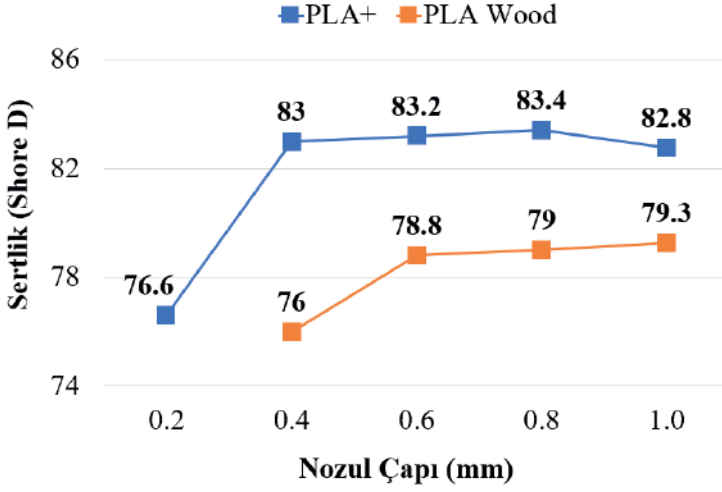
Yüzey Pürüzlülüğü ve Sertlik

Şekil 12’de PLA Plus ve PLA Wood için nozul çapına bağlı aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) verilmektedir. Nozul çapının yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelendiğinde, PLA Plus numunelerinde nozul çapı arttıkça R_a değerlerinin belirgin biçimde azaldığı gözlenmiştir. 0.2 mm nozul çapında elde edilen $18.67 \mu\text{m}$ ’lik yüksek pürüzlülük değeri, küçük çaplı nozullerle baskı sırasında oluşan katman hatalarının ve yüzey dalgalanmalarının artmasına bağlanabilir. Nozullerde çap arttıkça (0.6–1.0 mm) R_a değerleri $1.91\text{--}0.65 \mu\text{m}$ aralığına kadar düşmüştür. Bu durum, artan nozul çapının ekstrüde edilen filamentin daha homojen yayılmasını sağlayarak yüzey kalitesini iyileştirmesinden kaynaklanmış olabilir. PLA Wood numunelerinde ise 0.4 mm nozul çapında yüzey pürüzlülük değeri $21.15 \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, ahşap katkılı malzemenin 0.4 mm gibi orta çaplı nozulden geçerken lifli heterojen yapısı nedeniyle düzgün ekstrüde olamaması ve yüzeyde birikmeler oluşturması ile açıklanabilir. Daha büyük nozul çaplarında (0.6–1.0 mm) ise pürüzlülük değerleri düşerek $3.94\text{--}4.23 \mu\text{m}$ aralığında sabitlenmıştır. Bu da nozul çapı arttıkça malzemenin akışkanlığının iyileştiğini ve yüzey kalitesinin arttığını göstermektedir.



Şekil 12. PLA Plus ile PLA Wood yüzey pürüzlülük değerleri

Şekil 13'te PLA Plus ve PLA Wood için nozul çapına bağlı değişen Shore D sertlik değerleri verilmektedir. PLA Plus numunelerinde ölçülen sertlik değerleri, 0.2 mm nozul çapında en düşük seviyede (76.6 Shore D) gerçekleşmiştir. Nozul çapının 0.4 mm'ye çıkarılmasıyla birlikte sertlik değerleri 83 seviyesine yükselmiş ve 1.0 mm nozul çapına kadar sertlik değeri pek değişmemiştir. Bu eğilim, küçük nozul çaplarında yetersiz katmanlar arası birleşimde mikro gözenek oluşumunun sertliği düşürmesi; buna karşılık, daha büyük nozul çaplarında katmanlar arası kaynaşmanın iyileşmesiyle malzeme yoğunluğunun ve dolayısıyla sertliğin artmasıyla açıklanabilir. PLA Wood numunelerinde ise sertlik değerlerinin genel olarak PLA Plus'a kıyasla daha düşük seviyelerde seyrettiği görülmektedir. 0.4 mm nozul çapında 76 olarak ölçülen sertlik, nozul çapı 0.6–1.0 mm'de hafif bir artış göstererek 78.8–79.3 aralığında sabitlenmiştir. Bu durum, ahşap katkısının polimer matrisin bütünlüğünü kısmen zayıflatarak sertlik değerlerini sınırlamasının yanı sıra, daha büyük nozul çaplarında liflerin daha homojen dağılmasıyla katman bütünlüğünün artmasına ve dolayısıyla sertliğin kısmen yükselmesine bağlanabilir.



Şekil 13. PLA Plus ile PLA Wood Shore D sertlik değerleri

Renk Ölçümü

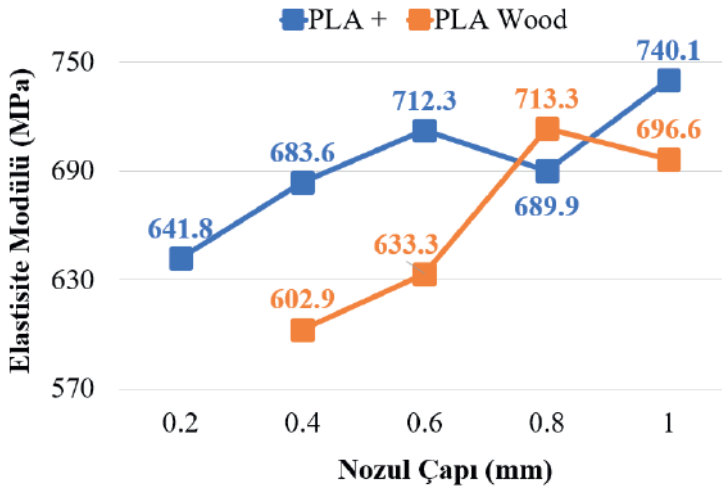
Deneylerde kırmızı renkli PLA Plus ve açık kahverengi renkli PLA Wood olmak üzere iki farklı renkte malzeme kullanılmıştır. Tablo 4'te numunelerin renk ölçümleri verilmiştir. Ölçüm sonuçları, bu malzemelerde nozul çapının değişmesinin parça rengini etkilemediğini göstermiştir.

Tablo 4. PLA Plus ve PLA Wood Renk Ölçüm Sonuçları

Nozul Çapı (mm)		PLA Plus	PLA Wood
0.4	L*	46.93	69.05
	a*	48.06	4.86
	b*	29.16	15.55
0.6	L*	46.69	69.97
	a*	48.43	4.52
	b*	29.93	15.13
0.8	L*	46.63	69.91
	a*	47.92	4.71
	b*	29.45	15.17
1.0	L*	46.68	69.83
	a*	48.07	4.83
	b*	29.59	15.15

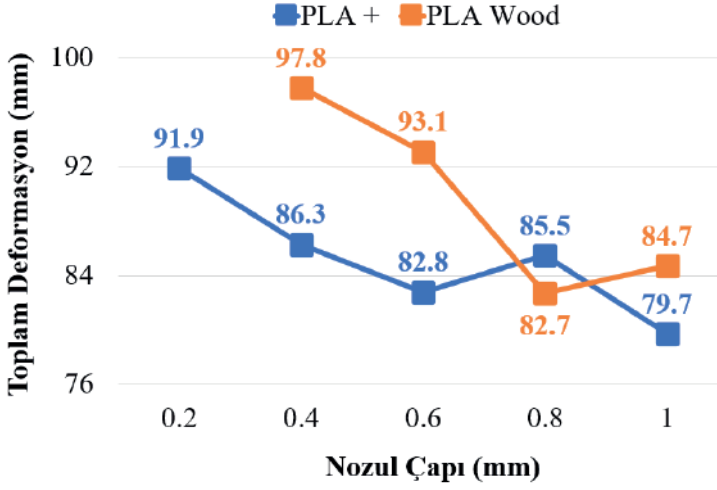
Sonlu Elemanlar Çözümü

Şekil 14'te nozul çapına bağlı olarak değişen elastisite modülleri verilmektedir. PLA Plus için en yüksek elastisite modülü 1 mm nozul çapında 740.1 MPa, en düşük elastisite modülü 0.2 mm nozul çapı için 641.8 MPa olarak belirlenmiştir. Elastisite modülü 0.6 mm nozul çapına kadar artış gösterirken 0.8 mm nozul çapında düşme eğilimi göstermektedir. PLA Wood için en yüksek elastisite modülü 0.8 mm nozul çapında 713.3 MPa ve en az elastisite modülü 0.4 mm nozul çapında 602.9 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 14. PLA Plus ile PLA Wood malzemelerine ait elastisite modülü değerleri

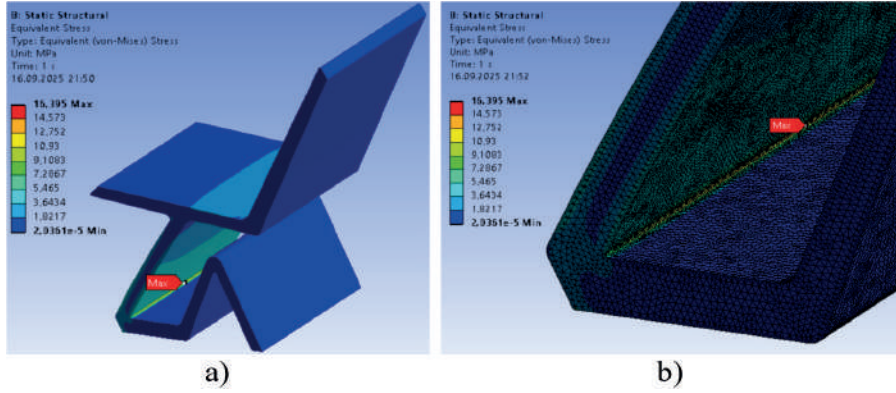
Şekil 15'de ise nozul çapına bağlı olarak değişen toplam deformasyon miktarları verilmektedir. Sonlu elemanlar analizine göre PLA Plus için en fazla deformasyon 91.9 mm olarak 0.2 mm nozul çapında ve en az deformasyon 1 mm nozul çapında 79.7 mm olarak belirlenmiştir. Toplam deformasyon 0.6 mm nozul çapına kadar azalırken 0.8 mm nozul çapında deformasyon miktarı artma eğilimindedir. PLA Wood için en fazla deformasyon 97.8 mm olarak 0.4 mm nozul çapında ve en az deformasyon 0.8 mm nozul çapında belirlenmiştir.



Şekil 15. PLA Plus ile PLA Wood için toplam deformasyon değerleri

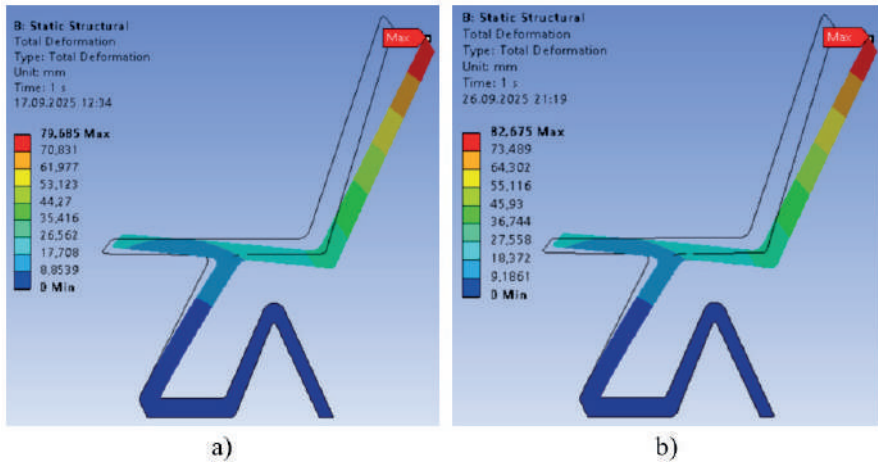
PLA Plus ve PLA Wood için sonlu elemanlar ile yapılan analiz sonuçlarında (Şekil 14 ile Şekil 15 karşılaştırıldığında) 0.8 mm nozul çapı dikkat çekmektedir. PLA Plus 0.8 mm nozul çapında elastisite modülü azalma eğilimine girerken toplam deformasyon miktarı da artma eğilimindedir. PLA Wood için elastisite modülü 0.8 mm nozul çapında en yüksek seviyedeysen toplam deformasyon miktarı en az seviyede kalmaktadır.

Şekil 16'da ise kritik kesitte meydana gelen maksimum eşdeğer gerilme sandalye üzerinde işaretlenmiş (Şekil 16(a)) ve yakınlaştırılmış görüntüsüyle (Şekil 16(b)) birlikte verilmektedir. Kuvvet etkisiyle bütün nozul çaplarında iki malzeme için oluşan eşdeğer gerilme maksimum 16.39 MPa olmaktadır. Sonlu elemanlar analizinde aynı yük ve geometri şartlarında malzeme değişimi genellikle gerilme dağılımını etkilemez fakat toplam yer değiştirmeyi etkiler. Bu durum nozul çapına bağlı olarak değişen toplam deformasyon miktarının değişmesini açıklar.



Şekil 16. Sandalyede meydana gelen a) Maksimum gerilme bölgesi ve b) Bölgenin yakın hali

Şekil 17’de her iki malzemenin yapısal analizlerde en az deformasyona uğradıkları sonlu elemanlar görüntüleri verilmektedir. PLA Plus’a ait en az deformasyon 1 mm nozul çapında 79.7 mm olmaktadır (Şekil 17 a). PLA Wood için ise en az deformasyon 0.8 mm nozul çapında 82.7 mm olmaktadır (Şekil 17 b). Her iki malzeme için de maksimum deformasyonun sandalyenin sırt kısmında ve en üst noktada olduğu görülmektedir. Ceylan ve arkadaşları, ahşap sandalyelerin yapısal analizini SEM yöntemiyle incelemiş; bağlantı bölgelerinde gerilme yoğunlaşmaları olduğunu rapor etmişlerdir. Çalışmada ayrıca serbest uçlardaki deformasyon eğilimleri SEM analizinde gözlenmiştir [44]. Bir başka çalışmada, farklı SEM araştırmaları incelenmiş ve destek noktalarından uzak serbest alanlarda yer değiştirme değerlerinin daha yüksek olabileceği ifade edilmiştir [45].



Şekil 17. Nozul çapı a) 1 mm olan PLA Plus ve b) 0.8 mm olan PLA Wood için toplam deformasyon görüntüsü

Sonlu elemanlar sonuçları doğrultusunda belirlenen sandalye tasarımı ve sınır şartları 1 mm nozul çapında PLA malzemesinin tercih edilebilir olduğunu göstermektedir. Sandalye malzemesi olarak PLA Wood kullanılması istendiği takdirde nozul çapının 0.8 mm seçilmesi öngörülmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

PLA Wood gibi katkılı filament malzemelerinin standart nozul çapından (0.4 mm) daha küçük nozul çapıyla basılması zordur. 3B yazıcı üreticileri ve ürün tasarımcıları, mobilya sektöründe bu tekniğin olasılıklarını ve sınırlamalarını değerlendirmek, tasarımı ve üretimi araştırarak test etmek için işbirliği içinde çalışmalıdır. Gelecekte 3B baskı mobilya endüstrisini daha fazla değiştirerek, yenilikçi ve özelleştirilmiş tasarımlara olanak sağlayacaktır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sandalye çerçevesi analizleri, elastik bölgedeki mekanik davranışlara ilişkin güvenilir ve anlamlı veriler sunmaktadır. Zaman tasarrufu sağlaması, tekrarlanabilir testlere olanak tanınması, düşük maliyetli olması ve gerçek yapılara yakın modeller oluşturabilmesi gibi avantajlarının yanı sıra, gelişen bilgisayar teknolojileriyle birlikte değerlendirildiğinde; sonlu elemanlar yönteminin, mobilya sistemlerinin üretim öncesinde analiz edilerek tasarımcılara kapsamlı ön bilgiler sunması bakımından mobilya mühendisliği tasarımlarında etkin bir araç olarak kullanılması önerilmektedir. Yapılan çalışma örneğinde eş değer gerilme değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Analiz sonuçları deformasyona göre değerlendirildiğinde 3B baskıda PLA Plus için 1 mm nozul, PLA Wood için 0.8 mm nozul kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.

Referanslar

1. Cicek, Y., A. Altinkaynak, and E. Balta, *Numerical and experimental analysis of infill rate on the mechanical properties of fused deposition modelling polylactic acid parts*. Proceedings of the SPE ANTEC®, Anaheim, 2017.
2. Gdr, C., T. Trkoglu, and İ. Eren, *Effect of lattice design and process parameters on the properties of PLA, ABS AND PETG polymers produced by fused deposition modelling*. Journal of Materials and Mechatronics: A, 2023. 4(2): p. 561-570.
3. Çelebi, A. and M.M. İmanç, *Evaluation of Mechanical Properties of PLA Auxetic Structures Produced by Additive Manufacturing*. Journal of Materials and Mechatronics: A, 2023. 4(2): p. 384-396.
4. Hedayati, R., M. Alavi, and M. Sadighi, *Effect of degradation of polylactic acid (PLA) on dynamic mechanical response of 3D printed lattice structures*. Materials, 2024. 17(15): p. 3674.
5. Andrzejewski, J., et al., *The development of poly (lactic acid) (PLA)-based blends and modification strategies: methods of improving key properties towards technical applications*. Materials, 2024. 17(18): p. 4556.
6. Barreto, G., et al., *Rice husk with PLA: 3D filament making and additive manufacturing of samples for potential structural applications*. Polymers, 2024. 16(2): p. 245.
7. Machado, A.C., et al., *Waste Coffee Silver Skin as a Natural Filler in PLA-Based Filaments for Fused Filament Fabrication (FFF) Printing*. Polymers, 2025. 17(13): p. 1766.
8. Shahrubudin, N., T.C. Lee, and R. Ramlan, *An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications*. Procedia manufacturing, 2019. 35: p. 1286-1296.
9. Bekar, K., U. Çıfci, and A. Özkan, *Çok boyutlu yazıcılardan baskısı farklı parametrelerle alınan numunelerin malzeme seçiminin deneysel analizi*. Gmhane niversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2021. 11(3): p. 663-674.
10. Harris, M., et al., *Effect of material and process specific factors on the strength of printed parts in fused filament fabrication: A review of recent developments*. Materials, 2019. 12(10): p. 1664.
11. Solomon, I.J., P. Sevel, and J. Gunasekaran, *A review on the various processing parameters in FDM*. Materials Today: Proceedings, 2021. 37: p. 509-514.
12. Sevlı, O., *3 BOYUTLU BASKIDA KULLANILACAK MALZEMENİN MAKİNE RENMEİ TEKNİKLERİ İLE TAHMİNLENMESİ*. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 2021. 5(3): p. 596-605.

13. Şahin, K. and B.O. Turan, *ÜÇ BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİLERİ-NİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ*. Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2018. 2(2): p. 97-116.
14. Yıldıztepe, B. and B.C. Arabacıoğlu, *Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi ile İç Mekanlarda Özgün Tasarımlar*. Kırklareli Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2024. 3(1): p. 1-11.
15. Shaukat, U., E. Rossegger, and S. Schlögl, *A review of multi-material 3D printing of functional materials via vat photopolymerization*. Polymers, 2022. 14(12): p. 2449.
16. Narlıoğlu, N., *3B yazıcı kullanılarak odun-PLA kompozit filamentinden mobilya bağlantı elemanlarının yazdırılması ve katman kalınlıklarının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi*. Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi, 2021. 4(2): p. 183-192.
17. McClements, D. *All About Wood 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition*. 11 November 2022; Available from: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/wood-3d-printing-filament/>.
18. Duran, P., *New 3D Printed Chair Developed by Dassault Systèmes and Patrick Jouin*. June 27 2025.
19. Caracol. *Cloud Chair: shaping sustainable living with 3D Printing*. April 01 2025; Available from: <https://caracol-am.com/resources/case-studies/cloud-chair-sustainable-living-3d-printing>.
20. Furniture, P. *A collaborative course with large scale 3D printer manufacturer BLB Industries* 01 January 2021; Available from: <https://materiability.com/portfolio/printing-furniture/>.
21. Us, F.o. *3D Baskı ile Üretilen Ürünlerimiz*. 23.08.2025; Available from: <https://factoryofus.com/tr/urunler>.
22. Eke, T.E., *Mobilya tasarım Ve üretiminde üç Boyutlu yazıcı Teknolojisi*. 2019, Marmara Üniversitesi (Turkey).
23. Küreli, İ., M. Altunok, and E. Uysal, *Endüstriyel sandalye tasarımında estetiklik ve dayanıklılık optimizasyonu*. Politeknik Dergisi, 2020. 23(4): p. 1413-1421.
24. Song, L., Yu, M., & Sun, D. (2024). Structural design and experimental verification of a thin-walled plastic chairs based on the finite element method. *Scientific Reports*, 14(1), 22285.
25. Kasal, A., Efe, H., & Erdil, Y. Z. (2007). Montaja hazır koltuk iskeletlerinin mukavemetinin sonlu elemanlar analizi ile belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 10(4), 411-422.
26. Polygenis, T. *PLA vs PLA+: A Comprehensive Comparison*. 31 Oct 2023; Available from: <https://www.wevolver.com/article/pla-vs-pla-plus>.

27. eSUN. *Material Safety data sheet* 23 August 2025; Available from: <https://www.esun3d.com/uploads/PLA%EF%BC%8B-MSDS.pdf>.
28. Filameon. *PLA Wood Filament*. 23 August 2025; Available from: <https://www.filameon.com/urun/pla-wood?srsId=AfmBOop-tfp9ld-jGfX-t6U7AeIfCMGSgLcEXTB5mMWF8D6yUBoAwbyhC>.
29. eSUN. *PLA+*. 01 Nov 2021; Available from: https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PLA+-Filament_TDS_V4.0.pdf.
30. Hikmat, M., S. Rostam, and Y.M. Ahmed, *Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology*. Results in Engineering, 2021. 11: p. 100264.
31. ELDeeb, I., et al., *Optimization of Nozzle Diameter and Printing Speed for Enhanced Tensile Performance of FFF 3D-Printed ABS and PLA*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2025. 9(7): p. 221.
32. Triyono, J., et al., *The effect of nozzle hole diameter of 3D printing on porosity and tensile strength parts using polylactic acid material*. Open Engineering, 2020. 10(1): p. 762-768.
33. Melo, J.T., et al., *Effects of nozzle material and its lifespan on the quality of PLA parts manufactured by FFF 3D Printing*. Engineering Manufacturing Letters, 2022. 1(1): p. 20-27.
34. International, A. *ASTM D790*. 24 July 2017; Available from: <https://store.astm.org/d0790-17.html>.
35. International, A. *ASTM D638*. 21 July 2022; Available from: <https://store.astm.org/d0638-14.html>.
36. GrabCAD. *Tahta Sandalye*. 3 August 2022; Available from: <https://grabcad.com/library/wooden-chair-tahta-sandalye-1>.
37. Baysal, E., Koçar, O., Anaç, N., & Darıcı, F. (2023). Eşit Kanallı Açısall Presleme Yönteminde Kanal Açılarının ve İç Köşe Kavisinin Deformasyona Etkisinin Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 859-873.
38. KALAYCIOĞLU, H., Hasan, A. K. S. U., & Uğur, A. R. A. S. (2015). MOBİLYALARDA UYGULANAN STANDARTLAR (EMNİYET, MUKAVEMET VE GÜVENLİK GEREKLERİ). *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 14(2), 834-853.
39. Vanaei, S., Rastak, M., El Magri, A., Vanaei, H. R., Raissi, K., & Tcharkhtchi, A. *Orientation-Dependent Mechanical Behavior of 3D Printed Polylactic Acid Parts: An Experimental–Numerical Study*. *Machines* 2023, 11(12):1086.
40. Travieso-Rodriguez, J. A., Jerez-Mesa, R., Llumà, J., Traver-Ramos, O., Gomez-Gras, G., & Roa Rovira, J. J. (2019). Mechanical properties of

- 3D-printing polylactic acid parts subjected to bending stress and fatigue testing. *Materials*, 12(23), 3859.
41. Texh3D, R. *3D Printing in The Furniture Industry*. 23 August 2025; Available from: <https://www.rapidtech-3d.de/en/c/3d-printing-in-the-furniture-industry.58183>.
 42. Ezzaraa, I., Ayrilmis, N., Abouelmajd, M., Kuzman, M. K., Bahlaoui, A., Arroub, I., ... & Belhouideg, S. (2023). Numerical modeling based on finite element analysis of 3D-printed wood-polylactic acid composites: a comparison with experimental data. *Forests*, 14(1), 95.
 43. Czyżewski, P., Marciniak, D., Nowinka, B., Borowiak, M., & Bieliński, M. (2022). Influence of extruder's nozzle diameter on the improvement of functional properties of 3D-printed PLA products. *Polymers*, 14(2), 356.
 44. Ceylan, E., Güray, E., & Kasal, A. (2021). Structural analyses of wooden chairs by finite element method (FEM) and assessment of the cyclic loading performance in comparison with allowable design loads. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 23.
 45. Nguyen, M. T., & Hirao, A. (2025). Finite Element Modeling of Human–Seat Interaction and the Integration of 3D-Printed Foam in Enhancing Sitting Comfort: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 15(18), 10193.

Dişli Çarklar İçin Yenilikçi Malzeme Kullanımı

Furkan Korkmaz¹

Özet

Dişli çarklar mekanik performans, ağırlık ve özellikle aşınma direnci yönünden üzerinde çalışmaların devam ettiği güç ve hareket iletim mekanizmalarıdır. Tasarım yöntemlerinde optimizasyon çalışmaları, imalat olarak yüksek yüzey kalitesi ve yüzey aşınması değerini arttırmak için kaplama yöntemleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmeye devam edilmektedir. Fonksiyonel kademeli malzemeler (FGM) üzerine yapılan çalışmaların artması ve imalat yöntemlerinin bu malzeme türüne uygun üretiminin mümkün kılınması ile birlikte dişli çarklar özelinde de FGM kullanımı ile ilgili araştırmalar artış göstermektedir. Özellikle yüksek aşınma direnci ile yüksek tokluk değerlerini aynı anda sunabilmeleri sebebi ile çelik malzemelere göre tercih edilmektedir. Bu çalışmada, FGM dişli çarkların tasarımında kullanılan matematiksel yöntemlere ve imalat tekniklerine yer verilmiştir. İmalat yöntemlerinin dişli çarklar için avantajları ve uygulama zorlukları gibi dezavantajlarına değinilmiştir.

1. Giriş

Dişli çarklar, mekanik sistemlerde güç ve hareket iletiminde kritik bir rol oynayan temel elemanlardır. Geleneksel olarak çelik ve diğer metal alaşımlarından üretilen dişliler, yüksek dayanım ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, malzeme teknolojisindeki ilerlemeler, kompozit malzemeler, polimerler ve seramikler gibi malzemelerin kullanımı ile yenilikçi çalışmaları mümkün kılmaktadır.

Dişli çarklardaki malzeme seçimi, mekanik sistemlerin genel verimliliğini ve uzun ömürlülüğünü doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Yanlış malzeme seçimi, aşınma, deformasyon ve hatta sistem arızalarına yol açabilirken, uygun malzeme kullanımı dişlilerin ömrünü uzatmakta ve verimliliğini artırmaktadır. Malzeme seçimi yapılırken, dişli çarkın

1 Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, fkorkmaz@subu.edu.tr, 0000-0002-9125-8386

maruz kaldığı mekanik yükler, çalışma ortamı koşulları, ağırlığı, sıcaklık değişimleri ve kimyasal etkileşimler gibi çok sayıda faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, yüksek hızlı ve ağır yük altında çalışan dişliler için yüksek mukavemetli çelik alaşımları tercih edilirken, düşük sürtünme ve sessiz çalışma gerektiren sistemlerde polimer bazlı dişliler daha avantajlı olabilmektedir. Diğer bir yandan yağlama ve ağırlık durumuna göre de kısıtlar belirlenmektedir. Belirlenen kısıtlar ve istemlere bağlı olarak birçok optimizasyon tekniği dişli çarklar için denenmiş ve uygulanmıştır. Bu çalışmalar günümüzde dişli çark çalışmalarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Son yıllarda özellikle malzeme mühendisliği alanında kaydedilen ilerlemeler, dişli çark üretiminde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin önemli ölçüde geliştirilmesine olanak tanımıştır. Isıl işlem teknikleri, yüzey kaplamaları ve nanoteknoloji destekli malzeme güçlendirme yöntemleri, dişlilerin aşınma direncini artırarak daha uzun ömürlü ve dayanıklı bileşenler elde edilmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, sürdürülebilir mühendislik yaklaşımları doğrultusunda, geri dönüştürülebilir ve çevre dostu malzemelerin kullanımına yönelik çalışmalar da artış göstermektedir. Ancak bunların dışında en önemli geliştirme çalışmaları eklemeli imalat yönteminin üretim alanındaki birçok kısıtı da ortadan kaldırması ile birlikte fonksiyonel gradyanlı malzemelerin (FGM – Functionally Graded Materials) dişli çarklarda kullanımı söz konusu hale gelmektedir.

Kullanım alanlarına, çalışma koşullarına ve istenen performans kriterlerine göre farklı malzemelerden üretilirler. Yaygın olarak; çelik, dökme demir, plastik ve toz metajurisi (sinter) yöntemi ile üretilmiş dişliler tercih edilmektedir. Malzeme seçiminde aşağıdaki kriterler dikkate alınmaktadır;

- Mekanik Dayanım ve Yük Kapasitesi
- Aşınma Direnci
- Sürtünme Katsayısı ve Kayma Davranışı
- Isıl Direnç
- Korozyon Direnci
- Hafiflik ve Ağırlık Tasarrufu
- Titreşim ve Gürültü Düzeyi
- İşlenebilirlik ve Üretim Kolaylığı
- Ekonomik Maliyet
- Bakım ve Servis Kolaylığı

2. FONKSİYONEL KADEMELİ MALZEMELER

FGM, tek bir bileşen içerisinde özel olarak uyarlanmış özellikler elde etmek amacıyla konumsal olarak değişen bileşimlere ve mikro yapıya sahip gelişmiş malzemelerdir. Başlangıçta 1980'lerde Japonya'da uzay mekiklerinin maruz kaldığı aşırı sıcaklık değişimlerine (1000°C 'ye kadar) dayanabilen malzemeler geliştirme ihtiyacından doğmuştur. Daha sonra uzay, otomotiv ve enerji gibi endüstrilerde karmaşık yüklemelere ve aşırı çevresel koşullara dayanması gereken bileşenler için dönüştürücü çözümler haline gelmiştir. Bu malzemelerin benzersiz özellikleri, geleneksel kompozitlerde görülen ani malzeme özelliği geçişlerinden kaynaklanan arayüzey gerilmeleri sorununu ortadan kaldırmıştır.

2.1. FGM'lerin Temel Faydaları

FGM'ler, geleneksel malzemelere kıyasla çeşitli önemli avantajlar sunar:

- **Geliştirilmiş Mekanik ve Termal Özellikler:** Fonksiyonel gradyanlı malzemeler, bileşim ve mikro yapının uzamsal olarak kademeli değişimi sayesinde yüksek mukavemet, tokluk, aşınma direnci ve termal kararlılığı tek bir yapıda bütünleştirebilir. Bu gradyanlı yapı, farklı fazlar arasında ani malzeme geçişlerini ortadan kaldırarak hem mekanik dayanıklılığı hem de sıcaklık dayanımını artırır. Örneğin, türbin kanatlarında kullanılan FGM yapılar, yüksek sıcaklıkta oksidasyona karşı direnç sağlarken, aynı zamanda mekanik yük altında deformasyon direncini koruyabilir (Kawasaki ve Watanabe, 2002; Takagi vd., 2007).
- **Delaminasyon Arızasının Azaltılması:** Geleneksel kompozit veya metalik laminat malzemelerde, ara yüzeylerde meydana gelen gerilme yığılmaları patlama, darbe veya balistik yükler altında delaminasyon arızalarına neden olabilir. FGM yapılar, malzeme özelliklerinin konum boyunca sürekli değişmesini sağlayarak bu tür arayüzey gerilmelerini ortadan kaldırır. Böylece, gerilme geçişleri yumuşatılmış, delaminasyon eğilimi önemli ölçüde azaltılmış olur.
- **Yapısal Bütünlük ve Güvenilirliğin Artması:** Optimize edilmiş malzeme bileşimi ve kademeli mikro yapısı sayesinde FGM'ler, daha homojen gerilme dağılımı, gelişmiş aşınma ve korozyon direnci, yüksek çatlak ilerleme direnci ve daha iyi yorulma performansı sergiler. Bu özellikler, geleneksel ve kompozit malzemelere kıyasla daha uzun servis ömrü, düşük bakım maliyeti ve yüksek yapısal güvenilirlik sağlar.

- Uygulama Alanlarına Uyum Yeteneği: Doğal malzemelerde gözlenen fonksiyonel gradyan prensiplerinden (örneğin kemik, diş, bambu yapıları) esinlenen FGM'ler, yüksek sıcaklık, yüksek basınç veya korozyon ortamları gibi özel koşullara uyarlanabilir. Bu yönüyle, termal bariyer kaplamalar, motor bileşenleri, roket nozulları ve dişli sistemleri gibi mühendislik uygulamalarında önemli avantajlar sunar.

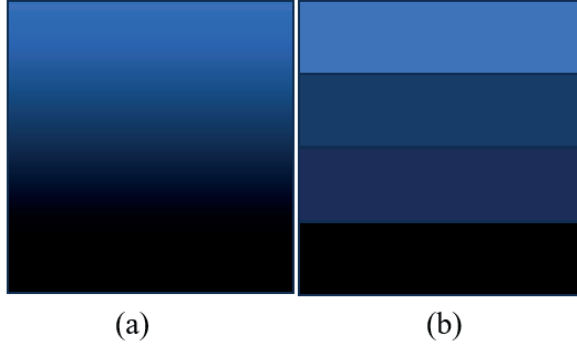
2.2. FGM'lerin Sınıflandırmaları

FGM'ler, bileşim, özellik gradyanı, üretim süreci ve uygulama dahil olmak üzere çeşitli faktörlere göre sınıflandırılabilir. Birçok FGM birden fazla kategoriye sığabilir ve sınıflandırma kriterleri araştırmacının koşullarına veya hedeflerine göre değişebilir. Aşağıda, kaynaklarda bahsedilen başlıca sınıflandırma kriterleri ve türleri detaylandırılmıştır:

Bileşim Bazlı Sınıflandırmalar: FGM'ler, içerdikleri bileşenlerin türüne göre sınıflandırılabilir. Paslanmaz çelik ile inconel 625 kombinasyonları gibi Metal – metal, özellikle dişli çarklar için yaygın kullanıma sahip olan çelik ile SiC kombinasyonlu metal – seramik ve polimer – seramik gibi bileşimler ile FGM dişli imalatı söz konusudur.

Gradyan Türüne Bağlı Sınıflandırmalar: Malzeme özelliklerinin değişim şekline göre FGM'ler iki ana kategoriye ayrılır:

- **Sürekli Gradyanlı Yapılar:** Bileşimin veya mikro yapının konumla sürekli olarak değiştiği FGM'lerdir (Şekil 1(a)). Bu tür yapılar genellikle santrifüj döküm gibi yöntemlerle üretilir. Sürekli FGM'ler, geleneksel malzemelere göre yüksek sertlik, aşınma direnci ve çekme mukavemeti gibi iyileştirilmiş özelliklere sahip olup biyomedikal, havacılık ve otomotiv uygulamaları için idealdir.
- **Kademeli Gradyanlı Yapılar:** Gradyan değişiminin belirli adımlarla gerçekleştiği FGM'lerdir (Şekil 1(b)). Bu tür yapılar, toz metalurjisi gibi yöntemlerle üretilir ve ayrık katmanlar arasında arayüzler bulunur.



Şekil 1. (a) Sürekli gradyanlı FGM, (b) Kademeli FGM

Üretim Süreci Bazlı Sınıflandırmalar: FGM'ler, üretim yöntemlerine göre de çeşitli gruplara ayrılır. Üretim süreci, FGM'lerin nihai özelliklerini ve uygulama alanlarını doğrudan etkiler.

- Katmanlı İmalat
- Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme
- Seçici Lazer Ergitme
- Tel ve Ark Katmanlı Üretim
- Erimiş Yığılma Modelleme
- Döküm FGM'ler
- Toz Metalurjisi
- Buhar Biriktirme Yöntemleri
- Elektrolitik Biriktirme Yöntemleri
- Sürtünme Karıştırma Yöntemleri

Uygulama Bazlı Sınıflandırmalar: FGM'ler, kullanıldığı sektöre veya özel fonksiyonlarına göre sınıflandırılabilir.

- Biyomedikal Uygulamalar: Yapay kemikler, diş implantları ve protez cihazları gibi biyo-uyumluluk ve mekanik özelliklerin kritik olduğu alanlarda.
- Havacılık ve Uzay Uygulamaları: Yüksek sıcaklıklara ve karmaşık yüklemelere dayanıklı hafif ve sağlam bileşenler.

- Otomotiv Endüstrisi: Yakıt verimli, dayanıklı parçalar ve darbe dayanımı yüksek yapılar için. Özellikle dişliler gibi güç aktarım elemanlarında.
- Savunma Uygulamaları: Balistik darbe direncini artıran zırh plakaları.
- Termal Bariyer Kaplamaları: Yüksek sıcaklık gradyanlarına dayanmak için.
- Dişliler: Dişli çarkların diş kökü mukavemetini ve ömrünü artırmak, temas yüzeyindeki gerilme konsantrasyonunu azaltmak, aşınma direncini ve termal yüklenme yeteneğini artırmak için FGM kullanımı önerilmektedir.

FGM kavramı, saf metallerden alaşımlara ve ardından hafif kompozit malzemelere geçişin ardından, yapıların işlevselliğini artırmak için kullanılmasıyla malzemelerin evriminde önemli bir adımı temsil eder.

FGM'ler geniş bir yelpazede değerlendirme, özel uygulamalar için yeni malzeme bileşimleri araştırma ve üretim yöntemleri ile ilişkilendirme imkanını sunar. Her FGM türünün kendine özgü özellikleri ve sınırlamaları vardır. İstenen performansa ve mukavemete bağlı olarak uygun bir FGM seçilir. Örneğin, dişlilerde metal/seramik FGM'ler, dişin iç yüzeyinde metalin mukavemetini, dış yüzeyinde ise seramiğin aşınma ve ısı direncini sağlamak için idealdir. Ancak, FGM üretiminde yüksek maliyetler ve üretim karmaşıklığı gibi zorluklar devam etmektedir. Büyük bileşenlerde tutarlı bir malzeme gradyanı sağlamak zor olabilir ve bu da üretim maliyetini artırır. Buna rağmen, FGM'lerin sürekli gelişimi, teknolojik ilerlemelerle birlikte yeni bileşimlerin, optimize edilmiş üretim süreçlerinin ve yapay zeka/makine öğrenimi gibi yaklaşımların entegrasyonu ile gelecekteki uygulamalar için umut vaat etmektedir.

Sonuç olarak, FGM'lerin çeşitli sınıflandırmaları, bu malzemelerin çok yönlülüğünü ve geniş uygulama potansiyelini vurgular. Malzeme bilimindeki sürekli araştırmalar, FGM'lerin tasarımını, üretimini ve performansını daha da geliştirmeye devam etmektedir.

3. DIŞLI ÇARK UYGULAMALARI

Dişli çarklarda arayüzey gerilmelerini azaltmak ve temas yüzeylerindeki olası süreksizliklerin önüne geçmek için FGM kullanımı önemli bir çözüm olarak sunulmaktadır. Metal bazlı malzemelerin yüksek mukavemet ve tokluk sağlaması, seramik bazlı yüzey kısmının ise yüksek sıcaklık ve aşınma direnci sağlanması nedeniyle metal/seramik kombinasyon FGM'ler dişli çarklarda sıklıkla tercih edilmektedir. Dişli çarkların FGM yöntemi ile üretilmesi ile mikro

yapısında ve mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapılması sağlanmaktadır. FGM dişliler ile ilgili yapılan çalışmalardan bazılarına şu şekilde örnekler verilebilir;

- **İyileştirilmiş İletim Verimliliği:** Cam elyafı dolgulu HDPE FGM dişlilerin, homojen ve dolgusuz HDPE dişlilere göre daha yüksek iletim verimliliğine sahip olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Özellikle 600 dev/dak ve 2 Nm torkta FGM dişliler, homojen dişlilere göre %7, dolgusuz dişlilere göre %18 daha yüksek verimlilik sunmuştur (Kumar Singha vd., 2019).
- **Geliştirilmiş Mekanik Davranış:** FGM olarak üretilmiş olan dişlilerde eğilme ve kalıcı şekil değişimi metal bazlı malzemelere nazaran azalır ve mekanik davranışı iyileşir. FGM dişlilerdeki Young modülü, poisson oranı ve yoğunluk gibi özellikler malzeme hacim oranlarına bağlı olarak değişerek ihtiyaca bağlı değişiklik sağlanabilir (Al-Qrimli vd., 2015).
- **Çatlak Direnci ve Yorulma Ömrü:** FGM plakalar üzerinde yapılan çalışmada FGM plakaların kırılma davranışları ve çatlak ilerlemelerinin malzeme dağılımlarının kontrolü ile iyileştirilebilir olduğu gözlemlenmiştir (Kaya vd., 2023). Üstel fonksiyondan faydalanarak FGM yapıya sahip dişlilerde mekanik davranışı iyileştirilebilir, çatlak oluşumu ve ilerlemesi geciktirilebilir olduğu belirlenmiştir. Böylece malzemelerin kullanım ömürleri artırılabilir (Asl vd., 2024).

3.1. Dişlilerin Uygulamaları ve Malzemeleri

Dişli teknolojisi, performans artırmak, dayanıklılık, hafiflik, gürültünün azaltılması ve titreşim gibi durumlara karşı talepleri karşılamak için gelişmektedir.

- **Performans İyileştirmeleri:** Dişlilerin arıza sebepleri; diş dibi kesilmesi, temas gerilmelerinden kaynaklanan yüzey yorulması (pitting) ve yüksek kaymadan kaynaklı kaynama aşınmasıdır. FGM'ler bu durumlara karşı direnci arttırmak imkanı sunar. Örneğin, FGM kullanımıyla diş temas yüzeyindeki gerilme yoğunluğu azaltılabilir ve dişli ömrü uzatılabilir.
- **Hafifletme ve Alan Kısıtlamaları:** Havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde, ağırlık azaltma ve kompakt tasarım büyük önem taşır. Hibrid dişliler (çelik/karbon takviyeli kompozit plastik (CFRP) gibi) ve FGM'ler, bu ihtiyaçları karşılamak için geliştirilmiştir. Planet dişliler

de yüksek güç yoğunluğu ve kompakt yapıları nedeniyle bu alanlarda tercih edilir (Jing, 2015).

- **Gürültü ve Titreşim Azaltma:** Dişlilerde gürültü ve titreşim, yorulma ömrünü azaltırken çalışma ortamını da yüksek oranda etkiler. Helisel dişliler, düz dişlilere göre daha sessiz çalışır. CFRP gibi malzemelerin sönümleme özellikleri ve optimize edilmiş profilleri, bu sorunları azaltmada etkili olmuştur. İmalat ve montaj hataları da dinamik özellikleri ve gürültüyü önemli ölçüde etkiler, bu nedenle hassas ölçüm ve analiz yöntemleri hayati öneme sahiptir. FGM'ler ile birlikte taleplerin karşılanması kolaylaşmaktadır.
- **Tasarım ve Analiz Araçları:** Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi (FEM), peridinamik teori ve çoklu serbestlik dereceli dinamik modeller gibi gelişmiş hesaplama araçları, dişlilerin gerilme dağılımı, dinamik davranışı ve çatlak ilerlemesi gibi karmaşık sorunlarını analiz etmek için kullanılır. Bu araçlar, dişlilerin imalat toleranslarının ve çalışma koşullarındaki değişkenlerin performans üzerindeki etkilerini değerlendirmeye olanak tanır.
- **İmalat Teknolojileri:** Geleneksel frezeleme ve azdırma yöntemlerinin yanı sıra, enjeksiyon kalıplama (özellikle polimer ve FGM dişliler için) ve eklemeli imalat (3D baskı) gibi modern teknikler, karmaşık geometri ve özel malzeme özelliklerine sahip dişlilerin üretilmesine imkan sağlamıştır.

Sonuç olarak, malzeme bilimindeki ilerlemeler, özellikle FGM ve kompozitler, geleneksel dişlilerin sınırlamalarını aşarak, daha yüksek performanslı, dayanıklı ve özel uygulamalara yönelik çözümler sunmaktadır. Bu yenilikler, dişli tasarımını ve uygulamasını sürekli olarak dönüştürmekte, daha verimli ve güvenilir güç aktarım sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

3.2. Dişli Çarklarda FGM Tanımlaması

Dişli çarkların FGM tanımlamalarında farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin tercihinde matematiksel tanımlamalar dikkate alınmaktadır. Bu yöntemler Tablo 1'de verilmiştir (Aravind vd., 2021).

Tablo 1. FGM tanımlama yöntemleri

Yöntem	Young Modülü (N/mm ²)
Üstel	$E(r) = E_2 e^{\alpha r}$
Lineer	$E(r) = E_2 (\alpha r)$
Güç	$E(r) = E_2 r^2$
Eliptik	$E^2(r) + E_2 r_2^2 = \alpha$

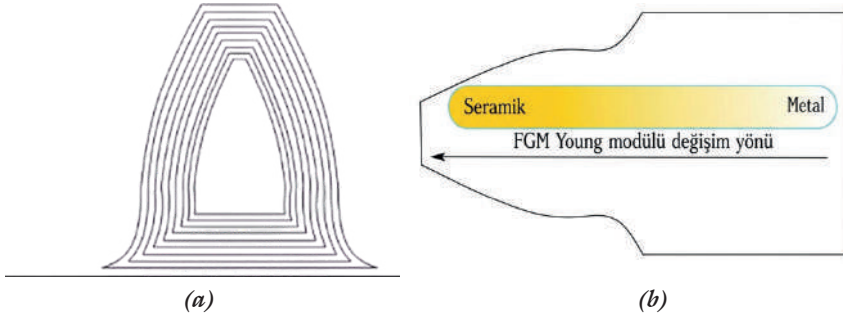
$E(r)$: Malzemenin herhangi bir bölgesindeki Young modülü

E_2 : Referans bölge Young modülü

α : Kademe (Derece) katsayısı

r : Konum yarıçapı

Aşağıdaki şekilde farklı formlarda uygulanan tanımlamalar verilmiştir. Şekil 2’de belirtilen FGM dişli çark tanımlamaları üstel fonksiyon ile yapılan tanımlama örnekleridir. Şekil 2(a)’da verilen tanımlama dişin merkezinden yüzeye doğru FGM tanımlaması içerirken Şekil 2(b)’de dişli çarkın merkezinden yüzey doğrultusunda bir FGM tanımlaması bulunmaktadır (Asl vd., 2024).



Şekil 2. Form tanımlama örnekleri

3.3. Üretim Yöntemleri

FGM’lerin üretim yöntemleri, malzeme bilimindeki ilerlemeleri yansıtan geniş bir teknoloji yelpazesine sahiptir ve her biri farklı avantajlar ve sınırlılıklar sunmaktadır. Bu yöntemler, geleneksel malzemelerde veya homojen kompozitlerde mümkün olmayan özellik kombinasyonlarını tek bir bileşende birleştirmeyi hedefler. Dişliler gibi uygulamalarda, yüzeyde aşınma

ve ısı direnci için seramik, iç kısımda ise mukavemet için metal dağılımı enjeksiyon kalıplama veya toz metalurjisi ile elde edilebilir. Biyomedikal implantlarda biyo-uyumluluğu ve mekanik özellikleri iyileştirmek için SLM veya toz metalurjisi yöntemleri kullanılarak Ti/HA gibi FGM'ler üretilir.

FGM üretim yöntemleri avantaj sağlamaları ile birlikte bir dizi zorlukla karşı karşıyadır. Yüksek üretim maliyetleri, süreç karmaşıklığı ve büyük bileşenlerde tutarlı gradyan elde etme zorluğu önemli engellerdir. Malzeme dağılımındaki kusurlar ve artık gerilmeler, parçanın performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, proses parametrelerinin optimizasyonu, tahmin edici modellerin geliştirilmesi ve artık gerilme analizleri büyük önem taşır. Gelecekte, yapay zeka ve makine öğrenimi gibi yaklaşımların entegrasyonu, FGM üretimini daha verimli ve hassas hale getirebilir. Ayrıca, Peridinamik (PD) teorisi gibi ileri hesaplama araçları, FGM plakaların çatlak oluşumu ve ilerlemesi gibi karmaşık kırılma davranışlarını daha doğru bir şekilde analiz etmeye olanak tanır, bu da yeni FGM tasarımlarının optimize edilmesine yardımcı olur. Bu gelişmeler, FGM'lerin potansiyelini tam olarak gerçekleştirmesi ve daha geniş endüstriyel uygulamalara yayılması için kritik öneme sahiptir.

Fonksiyonel Kademelendirilmiş Malzemelerin (FGM) dişli çarkların imalatında kullanılan veya kullanılabilecek yöntemler, malzemenin türüne (metal, seramik, polimer) ve istenen gradyan yapısına (sürekli veya adım adım) bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Kaynaklarınız, özellikle Eklemeli İmalat, Santrifüj Döküm ve Toz Metalurjisi yöntemlerinin bu alanda aktif olarak kullanıldığını veya araştırıldığını göstermektedir.

3.3.1. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, katmanlı olarak malzemelerin biriktirilmesi ile geometrilerin oluşturulmasını sağlar. Bu sayede şekillendirme ile eş zamanlı olarak FGM için ideal olan malzeme dağılımı da sağlanabilir. Bu nedenle eklemeli imalatın gelişimi ile FGM ürünlerin üretimi paralel olarak ilerleme katetmektedir (Patel, 2025). Silindirik bir yüzeye sahip olmamaları nedeni ile de dişli çarklar gradyan kontrolü ile eklemeli imalat ile oldukça verimli bir şekilde üretilebilir. Ancak tüm eklemeli imalat yöntemleri FGM dişli çark üretimi için uygun değildir. FGM dişli çark için önerilen eklemeli imalat yöntemleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Shikai vd., 2015; Chen vd., 2020);

- Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme: WAAM (Tel ve Ark Katmanlı İmalat) gibi ark tabanlı DED yöntemleri, FGM üretimi için uygun ve özellikle metalik FGM parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır. DED sürecinde, artık gerilmelerin anlaşılması ve kontrolü, ayrıca

erime havuzu sıcaklığının tahmin edilmesi için makine öğrenimi gibi yöntemler geliştirilmektedir. Proses parametrelerinin, özellikle lazer gücü ve tarama hızının, malzeme bileşimi değişikçe ayarlanması ve aynı biriktirme yüksekliğini sağlamak için optimize edilmesi önemlidir (Khan vd., 2024).

- **Toz Yataklı Füzyon:** Seçici Lazer Ergitme (SLM/LPBF) ve Seçici Lazer Sinterleme (SLS) gibi toz yatağı füzyon yöntemleri, yüksek hassasiyetli ince mikro yapılar elde etmeye olanak tanır. Dişlilerin ve havacılık motoru aktarma dişlilerinin (SLS/DMLS ile) üretimi bu yöntemlerle gerçekleştirilmiştir (Madan ve Bhowmick, 2023).
- **Füzyon ile Biriktirme Modeli:** Bu yöntem, polimer esaslı FGM dişliler üretmek için sıklıkla araştırılmıştır. ABS, PLA ve naylon gibi malzemelerden üretilen dişliler, bu teknikle (MEX/FDM) üretilmiş ve test edilmiştir.

3.3.2. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi, metal/seramik bazlı FGM'lerin imalatı için yaygın ve sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Hem ayrık gradyanlı hem de sürekli gradyanlı FGM'ler üretme esnekliği sunar. Al-Çelik, Cu/SiC, Al/SiC, Ni/Ti₃AlC₂ gibi çeşitli FGM sistemleri toz metalurjisi ile üretilmiştir. Sıcak presleme ve sıcak basınç destekli sinterleme gibi varyantlar, tokluk ve mikro sertliği iyileştirmek için de kullanılmıştır (Kumar ve Kumari, 2022).

Bu yöntem, dişli çarkla için oldukça önemli olan aşınma direnci ve çekme mukavemeti gibi özelliklere sahip sürekli FGM'ler üretmek için uygundur. Özellikle aksel olarak derecelendirilmiş numuneler için, daha az kompakt kalınlık nedeniyle daha kolay üretim sağladığı belirtilmiştir. Ancak proses parametrelerini ayarlamak ve kalıp tasarımı yönünden zorluklara sahiptir.

3.3.3. Santrifüj Döküm

Santrifüj döküm, farklı yoğunluktaki fazların merkezkaç kuvvetiyle ayrıştırılması esasına dayanır ve özellikle metal/seramik FGM üretiminde tercih edilir. Bu yöntem FGM dişli üretimi için kanıtlanmış bir yöntem olarak uygulanmaktadır. Yöntem, yüzeyde yüksek aşınma direnci, iç kısımlarda ise tokluk sağlayarak dişliler gibi parçalar için ideal çözümler sunarken tüm kesitte sürekli gradyan oluşturmak her zaman mümkün olmayabilir (Radhika ve Raghu, 2016; Abdelfattah vd., 2023).

Santrifüj döküm, yoğunluk farklılıklarını kullanarak ergimiş metalin veya takviye partiküllerinin radyal yönde kademeli bir dağılım oluşturmasını sağlar.

Bu nedenle simetrik bir parça olan dişli çarklar için uygun bir yöntemdir. Alüminyum alaşımı olan Al_2O_{24} matrisi ve Al_2O_3 takviye partikülleri içeren FGM düz dişliler, Dikey Santrifüj Döküm (VCC) yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. Ayrıca enjeksiyon kalıplama tekniği ile birleştirilerek FGM polimer dişlilerin (örneğin cam elyaf takviyeli HDPE ve PBT) üretiminde de kullanılmıştır. Bu üretimde, gradyanı oluşturmak için enjeksiyon kalıbının içindeki punch döndürülür (Pradeep ve Rameshkumar, 2021).

3.3.4. Enjeksiyon Kalıplama

Polimer bazlı dişliler güç aktarım sistemlerinde gürültü ve yağlama ihtiyacının az olması sebebi ile yoğun şekilde tercih edilmektedir. Enjeksiyon kalıplama yöntemi polimer bazlı FGM dişlilerin üretiminde kullanılmaktadır. Polimer Cam elyafı dolgulu yüksek yoğunluklu polietilen katkı FGM dişliler enjeksiyon kalıplama ile başarıyla üretilmiştir. Elde edilen ürünler üzerinde yapılan testler ürünün diş uçlarında lif yönelimi sayesinde gürültü miktarının azaltılması ve yük altındaki çalışmaları yönünden performanslarını iyileştirilmiştir (Singh, 2019).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dişli çarklarda FGM kullanımının mekanik performansa etkileri, tasarım avantajları ve üretim potansiyeli incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, FGM'lerin geleneksel plastik ya da çelik malzemelere göre önemli mühendislik üstünlükleri sunduğunu ortaya koymuştur.

FGM dişlilerde, elastisite modülünün konuma bağlı olarak lineer, üstel ya da logaritmik biçimde değiştiği yapı sayesinde diş yüzeyinde yüksek sertlik ve aşınma direnci, dişli merkezinde ise yüksek tokluk elde edilmiştir. Bu özellik, gerilme yığılmalarını azaltarak yorulma ömrünü uzatmakta ve deformasyon miktarını düşürmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile yapılan sayısal incelemeler, malzeme gradyanının gerilme ve deformasyon dağılımına etkisini doğrulamış, FGM dişlilerin klasik metal bazlı dişlilere göre daha homojen gerilme dağılımı ve daha düşük maksimum gerilme değerleri sunduğunu göstermiştir.

Üretim yöntemleri açısından değerlendirildiğinde, eklemeli imalat, toz metalurjisi ve döküm teknikleri, FGM yapılar için en uygun alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemler, mikro yapısal gradyanların genellikle kontrollü biçimde oluşturulmasına olanak tanırken, istenen mekanik özelliklerin belirli bölgelerde optimize edilmesini mümkün kılmaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir:

1. Yapay zeka ve makine öğrenmesi tabanlı optimizasyon algoritmaları, FGM dişlilerde gradyan katsayısının belirlenmesinde kullanılabilir.
2. Sonlu elemanlar analizleri ve deneysel doğrulama çalışmalarının birlikte yürütülmesi, sayısal modellerin güvenilirliğini artıracaktır.
3. Sürdürülebilir malzeme seçimi ve geri dönüştürülebilir FGM sistemlerinin geliştirilmesi, çevresel etkiyi azaltacaktır.
4. Termal ve dinamik yük etkilerinin FGM dişliler üzerindeki davranışı, çok ölçekli analizlerle daha kapsamlı şekilde incelenmelidir.
5. Endüstriyel uygulama ölçeğinde üretim testleri, laboratuvar düzeyindeki olumlu sonuçların gerçek çalışma koşullarına uyarlanabilirliğini gösterecektir.

Sonuç olarak, FGM dişliler; hafiflik, dayanıklılık, termal kararlılık ve enerji verimliliği gibi üstün özellikleriyle makine mühendisliğinde yeni bir dönemi temsil etmektedir. Özellikle eklemeli imalatta gerçekleşen gelişmeler ve erişilebilirliğinin artması ile bu dönem imalat sanayisindeki yerini hızla almaya başlamıştır. Bu yaklaşım, malzeme ve tasarım arasındaki sınırları ortadan kaldırarak mikro ölçekte kontrol edilen malzeme yapısının makro ölçekte yüksek performansa dönüştürülebileceğini göstermektedir.

Referanslar

- Abdelfattah, S., Ghattas, M., & Tawakol, A. (2023). Mechanical and Tribological Properties of Al2024/ Al2O3 Functionally Graded Spur Gears Synthesized by Centrifugal Casting Process. *Mansoura Engineering Journal*, 48(3), 1-9.
- Al-Qrimli, H., Oshkour, A., Ismail, F., & Mahdi, F. (2015). Material design consideration for gear component using functional graded materials. *Int. J. Materials Engineering Innovation*, 6(4).
- Aravind, V., Adharsh, S., Prakash, D., & Martin Vino, S. (2021). Contact Stress Analysis on a Functionally Graded Spur Gear Using Finite Element Analysis. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 309-318.
- Armology*. (2025, Ağustos 07). <https://armology.com/metal-failure-modes/fretting-wear/> adresinden alındı
- Asl, M., Akbar, A., & Danishmend, S. (2024). Creep Analysis in Two Functionally Graded Rotating Gears. *Journal of Engineering Manufacture*, 2(16), 83-92.
- Chen, B., Tan, C., Song, X., & Feng, J. (2020). Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316L/ Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 283.
- Gupta, K., Jain, N., & Laubscher, R. (2017). *Advanced Gear Manufacturing and Finishing*. Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804460-5.00004-3>
- Jing, S. Z. (2015). Optimum weight design of functionally graded material gears. *Chin. J. Mech. Eng.*, 28, 1186–1193.
- Kawasaki, A., & Watanabe, R. (2002). Thermal fracture behavior of metal/ceramic functionally graded materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(14-16), 1713-1728.
- Kaya, K., Olmuş, İ., & Dördüncü, M. (2023). Investigation of fracture behaviour of one-dimensional functionally graded plates by using peridynamic theory. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38, 319-329.
- Khan, A. U., Sadhya, S., Bharath Kumar, A., & Chatterjee, S. (2024). Investigation on dual wire TIG Arc additive manufacturing of IN625 and SS316L FGM for continuous gradient and sandwich structures. *Thin-Walled Structures*, 200.
- Kumar Singha, A., Siddharthab, Yadav, S., & Kumar Singha, P. (2019). Transmission Efficiency of Functionally Graded Material Based HDPE Spur Gears. *Materials Today: Proceedings*, 18, 4893–4900.

- Kumar, V., & Kumari, P. (2022). Fabrication and Characterization of Cu/Si-C-Based Axially Functionally Graded Beam. *Adv. Eng. Mater.* 2022, 24, 2101239, 24, 1-9.
- Madan, R., & Bhowmick, S. (2023). Fabrication and microstructural characterization of Al-SiC based functionally graded disk. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 95(2).
- Patel, M. (2025). A comprehensive review of functionally graded materials and their ballistic impact performance: Current status and future challenges. *Next Materials*, 8.
- Shikai, J., Zhang, H., Jingtao, Z., & Guohua, S. (2015). Optimum Weight Design of Functionally Graded Material Gears. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28(6), 1186-1193.
- Singh, A. (2019). Development and investigation on transmission efficiency of functionally graded material-based polybutylene terephthalate spur gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 234(4), 473-489.
- Takagi, K., Kawasaki, A., Itoh, Y., Harada, Y., & Ono, F. (2007). Testing Method for Heat Resistance Under Temperature Gradient. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(5-6), 974-977.

Biyoaktif Camlar: Gelişimi, Üretimi ve Gelecek Perspektifleri

Erhan İbrahimoglu¹

Fatih Çalışkan²

Özet

Biyomalzemeler, canlı dokuyla etkileşim kurmak üzere tasarlanmış malzemelerdir ve biyoaktif camlar da bu malzemelerin alt grubunu oluşturmaktadır. Biyomalzemelerden beklenen en önemli özelliklerin başında implante edildikleri doku ile biyolojik açıdan uyumluluğu gelmektedir. Biyoaktif camlar da, özellikle yüksek biyoaktivite ve biyouyumlulukları sayesinde doku-implant arayüzeyinde hidroksiapatit (HAp) benzeri bir tabaka meydana getirerek yumuşak ve sert dokuya bağlanabilmektedir. Bu nedenle bu malzemeler doku mühendisliği alanında önemli bir rol oynamaktadır. Bu alanlar arasında doku cerrahisi, hücre çalışmaları ve materyallerin birleştirilmesiyle doku tamiri veya yeniden oluşturulması başta gelmektedir. Özellikle kemik doku mühendisliğinde biyoaktif camların klinik kullanımı, gelecekte önemli gelişmeler vadetmektedir. Bu bağlamda kitap bölümünde, biyoaktif camlar, geniş bir açıdan ele alınmıştır. Biyoaktif cam ve cam seramiklerin çeşitleri, özellikleri, biyoaktivite mekanizmaları, kimyasal yapıları, üretimi ve klinik uygulamaları detaylıca incelenmiştir. Gelecek perspektifleri ve ileriye dönük uygulamaları hakkında bir vizyon oluşturulmaya çalışılmıştır.

1. Giriş

Biyomalzemeler, en genel tanımıyla canlı dokuları desteklemek veya tedavi etmek için kullanılan doğal veya sentetik malzemeler olarak bilinmektedir (Kuhn, 2012). Biyoaktif malzemeler de biyomalzemelerin bir türü olarak tanımlanabilir ve biyouyumlu özellikler göstererek çeşitli

1 Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, erhanibrahimoglu@subu.edu.tr, 0000-0002-8073-5570

2 Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, fcaliskan@subu.edu.tr, 0000-0002-9568-7049

biyomedikal alanlarda yüksek kullanım potansiyelleriyle öne çıkmaktadır. Biyoaktif camlar, ileri teknolojik malzemeler olup, yapısal özelliklerinden dolayı özellikle kemik doku yenilenmesi alanında önemli bir yere sahiptir (Rahaman vd., 2011). Bu malzemeler, biyomedikal uygulamalar için yeni bir yol sunmakta ve diğer biyomalzemelere göre iyi mekanik özellikler sunmasının yanında, kemik doku ile uyumlu olması ve kemiğe benzer özellikler göstermesi, tercih edilebilirliğini arttırmaktadır (Best vd., 2008). Biyoaktif camlar, yüksek biyoaktivite ve biyoyumlulukları sayesinde yüzeyinde hidroksiapatit (HAp) benzeri bir tabaka meydana getirerek yumuşak ve sert dokuya bağlanabilmektedir (Rahaman vd., 2011). Özellikle kemik doku mühendisliği, biyoaktif camların klinik kullanımı için gelecekte önemli gelişmelere ışık tutmaktadır. Bu gelişmeler arasında doku cerrahisi, hücre çalışmaları ve malzemelerin birleştirilmesiyle doku tamiri veya yeniden oluşturulması yer almaktadır (Cannio vd., 2021). Bu camlar, uygun biyokimyasal ve fiziko-kimyasal faktörlerle birleştirilerek kemik dokusunun tamiri veya yeniden oluşturulmasına yardımcı olabilir.

Bu bağlamda biyoaktif camların potansiyelinin ortaya koyulması ve biyocamlar hakkında detaylı bir çerçeve sunmak amacıyla, bu bölümde biyoaktif camlar ile ilgili kapsamlı bir derleme yapılmıştır. Bölümde, biyoaktif camların türleri kapsamlı olarak ele alınmış ve kritik malzeme özellikleri (biyoyumluluk, mekanik özellikler vb.) ayrıntılı biçimde incelenmeye çalışılmıştır. Bu malzemelerin tarihsel olarak ortaya çıkışından bahsedilmiş ve biyomalzeme alanındaki yeri tartışılmıştır. Bu camların, farklı kimyasal kompozisyonları ve bu kompozisyonların özellikleri ile biyolojik performanslarına etkileri değerlendirilmiştir. Doku-implant arayüzeyinde gerçekleşen reaksiyonlar ve biyoaktivite mekanizmaları detaylandırılmıştır. Bunun yanında, çeşitli iyon modifikasyonlarının biyoaktivite, antibakteriyellik vb. özellikler üzerinde durulmuştur. Cam-seramik dönüşümü ve dayanımı artırmak amacıyla yapılan çalışmalar incelenmiştir. Farklı üretim yöntemlerinin avantajları ve sınırlılıkları karşılaştırılmıştır ve uygulama alanları değerlendirilmiştir. Son olarak, biyoaktif camlar hakkında gelecek perspektifleri sunulmuş, bu malzemelerin akıllı biyomalzemelere dönüşme potansiyeli, kişiye özel implant olarak kullanılabilirliği gibi ileri biyomedikal uygulamalara yönelik vizyon ortaya konulmuştur.

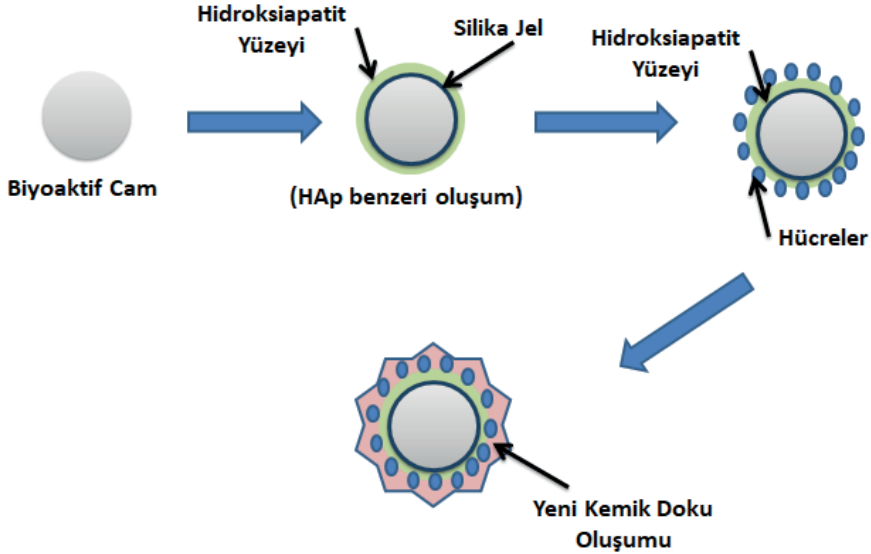
2. Biyoaktif Camların Gelişimi: Ortaya Çıkışı, Yapıları ve Biyoaktivite Mekanizmaları

Biyomalzemelerin ilk uygulamalarına bakıldığında, bilimsel bir disiplinden ziyade, yapay göz, burun gibi bakır ve brozdan yapılmış basit uygulamalar mevcuttur. Ancak, modern anlamda biyomalzeme biliminin temelleri 20.

yüzyılın başlarında metal implantlarla atılmıştır. İlerleyen yıllarda metallerde görülen korozyon ve biyouyumluluk sorunları nedeniyle inert seramik malzemeler ön plana çıkmıştır (İbrahimioğlu vd., 2019). Bununla birlikte inert seramikler, kemik gibi dokularla kimyasal bağ kuramadıkları için, biyouyumlulukları sınırlı kalmıştır (Best vd., 2008), (Hench, 2006).

Larry Hench ve arkadaşları tarafından geliştirilen Bioglass® 45S5, canlı dokularla kimyasal bağ oluşturabilen ilk biyoaktif materyal olarak literatüre girmiştir (Hench and Paschal, 1973). Bioglass® 45S5'in bileşimi %45 SiO₂, %24,5 Na₂O, %24,5 CaO ve %6 P₂O₅ olup, bu oranlar hidroksiapatit (HAp) oluşumunu sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Bu camların vücut sıvılarıyla temas ettiğinde yüzeyinde HAp benzeri tabaka oluşumu biyoaktivitenin temelini oluşturan son derece önemli bir reaksiyondur. Bu sayede malzeme kemik dokusuna kimyasal bağlanmakta ve biyoinert seramikler gibi kemiğe mekanik olarak tutturulma zorunluluğu ve gevşeme problemleri ortadan kaldırılmaktadır. Bu özelliği sayesinde biyoaktif camlar, kemik defektlerinde onarım için ideal bir malzeme haline gelmektedir. Hench ve ekibi bu camı geliştirirken, pasif implant materyallerinin kemikle kimyasal bütünleşme sağlayamaması sorununa çözüm aramışlar ve biyoaktif camın kemik ile doğrudan bağ kurabileceğini ortaya koymuşlardır (Hench and Paschal, 1973; Hench LL., 1998).

Bu bağlanma süreci, biyocamın yüzeyindeki Na⁺ ve Ca²⁺ gibi alkali iyonların fizyolojik sıvıdaki H⁺ iyonları ile değişimi; Si-O-Si bağlarının hidroliziyle Si-OH (silanol) gruplarının oluşması; bu silanol gruplarının kondenzasyon reaksiyonları sonucu silika jel tabakası meydana getirmesi; çözünme sırasında serbestleşen Ca²⁺ ve PO₄³⁻ iyonlarının bu jel tabakasında birikerek amorf kalsiyum fosfat tabakası oluşturmaları ve son olarak bu amorf yapının kristalleşerek hidroksiapatit haline dönüşmesi adımlarıyla oluşmaktadır. Bu hidroksiapatit tabakası, kemik dokusuyla biyolojik ve kimyasal uyumu sağlayan temel yapı olarak görev yapar (Hench ve Paschal, 1973), (Hench LL., 1998). Bu mekanizmaya dair şematik bir gösterim Şekil 1'de paylaşılmıştır.



Şekil 1. Biyoaktif camlarda biyoaktivite ve HAp benzeri yapı oluşum mekanizması (Zakrewski vd., 2021; Kılınç ve Toplan, 2023).

Bioglass® 45S5'in keşfi sonrasında, biyoaktif camların farklı bileşimlerde geliştirilmesi için yoğun çalışmalar yapılmıştır. Silikat esaslı biyocamlar en yaygın kullanılan türdür, ancak borat ve fosfat camlar gibi alternatif kompozisyonlar da biyomedikal uygulamalar için geliştirilmiştir (Huang vd., 2006). Borat camlar, hızlı çözünme özellikleri sayesinde yumuşak doku mühendisliğinde dikkat çekerken, fosfat camlar biyobozunur özellikleri sayesinde geçici implant uygulamalarında kullanılmaktadır (Day vd., 2003).

Borat esaslı biyoaktif camlarda arayüzeyde HAp benzeri yapı oluşumu ve dönüşüm mekanizmaları Hench ve ekibi tarafından geliştirilen 45S5 camına benzerdir, ancak dönüşüm sonucunda SiO_2 zengin tabaka oluşumuna rastlanmamaktadır (Day vd., 2003). Birçok çalışmada borat esaslı biyoaktif bir camın silikat, borosilikat ve boratla bozulduğu ve HAp benzeri bir materyale dönüştürdüğü mekanizmalar araştırılmıştır. Bu camın bozunması ile ilgili endişeler ise Liu ve arkadaşları tarafından bildirilmiştir. Liu ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada borat biyoaktif camları kemik enfeksiyonunun tedavisinde ilaç salınımı için bir altlık olarak kullanmışlardır ve yüksek konsantrasyonlarda BO_3^{3-} iyonlarından in vitro çözeltiye salınan B'nin toksik etkisi olabileceğini raporlamışlardır (Liu vd., 2010). Zhang ve arkadaşları ise bu çalışmaya alternatif olarak, tavşan tibialarına implante

ettikleri borat camının, kanda toksik seviyenin çok altında B konsantrasyonu ürettiğini göstermişlerdir (Zhang vd., 2010).

Öte yandan biyoaktif camların diğer bir türü ise fosfat esaslı camlardır. P_2O_5 camı oluşturan ana oksittir ve bu ağa bağlı CaO , Na_2O gibi oksit esaslı modifiye edicileri camın kimyasal yapısını oluşturmaktadır. Camın ana bileşenleri, kemiğin organik yapısına çok benzediğinden, kemik ile kimyasal bir bağ oluşturma olasılıkları yüksektir. Bu camlardan en yaygın olanları hidroksiapatit (HAp) ve Tıkalsiyum fosfat ($Ca_3(PO_4)_2$) (TCP) olarak bilinen camlardır (Ahmed vd., 2004) (De Maeyer vd., 1993) (Best vd., 2008). Ayrıca, Kokubo ve ekibi tarafından takip eden yıllarda apatit-vollastonit (AW) camları da geliştirilmiştir (Kokubo vd., 1982).

Tüm bu çalışmalar dikkate alındığında biyoaktif camlarda arayüzeyde HAp benzeri bileşimlerin oluşum mekanizması, camın bileşimine oldukça bağlıdır. In vitro olarak, bu dönüşüm süreci camın (üretilen numunelerin) 37 °C'de "Simüle Vücut Sıvısı (SBF)" gibi sulu fosfat çözeltilerine daldırılmasıyla incelenmektedir. Yüzeyde oluşan ürünler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınım analizi (XRD) gibi yöntemlerle karakterize edilmektedir. Camın bozunması sırasında Na^+ , $(BO_3)^{3-}$ gibi iyonların çözünmesiyle ortamın pH'ı ve iyonik konsantrasyonları zamanla değişir. Bu süreç cam bileşimine bağlı olarak farklılık göstermekte ve reaksiyon cam yüzeyinden başlayarak iç kısımlara doğru ilerlemektedir (Jung ve Day, 2009). Yıllar boyunca yapılan araştırmalar, biyoaktif davranışı tanımlarken kritik unsurun yüzeyde oluşan HAp benzeri oluşumlar olduğunu ileri sürmüştür. Ancak son araştırmalar bu tabakanın zorunlu değil ancak faydalı bir aşama olduğunu, esas etkinin iyon çözünme ürünlerinin (özellikle Si ve Ca iyonlarının) kontrol edilen salınım hızlarından kaynaklandığını göstermektedir (Hench, 2006).

Kemik doku yenilenme mekanizmalarının açıklanmasında biyoaktif camların yüzeyinde oluşan bu etkinlikler hücre büyümesini açıklamada yeterli değildir. Doku yenilenmesi yalnızca materyalin yüzeyinde oluşan reaksiyonla değil, dokunun bu süreçlere verdiği biyolojik yanıtla da doğrudan ilgilidir. Dokuda meydana gelen temel mekanizma, öncül kemik hücrelerinin uygun kimyasal uyarılar ile hücre döngüsüne girerek mitoz bölünme gerçekleştirmesidir. Hücrelerin DNA sentezi ve mitoz bölünme aşamasına geçebilmesi için uygun uyarıların oluşması gerekmektedir. İmplant uygulamasından sonra ortamda gerekli iyonik salınımlar gerçekleşir ve biyokimyasal uyarılar sağlanırsa, hücreler DNA replikasyonu ve onarımı süreçlerini başlatarak, yeni kemik dokusunun oluşumuna desteklemektedir.

Gerekli uyaranlar sağlanmadığı takdirde ise, hücreler programlanmış hücre ölümüne yönelmektedir (Hench, 2006).

3. İyon İkamesi ve Kimyasal Modifikasyonlar

Biyoaktif camlar, yapısından dolayı kırılğan olduklarından büyük ve tek parça olarak metaller gibi vücutta kullanımı oldukça zordur. Bu nedenle cam ve cam-seramik malzemelerin çeşitli bileşimlerini oluşturmak için sürekli olarak çalışmalar devam etmektedir. Biyoaktif bir camın mekanik ve diğer bazı özelliklerini (antibakteriyellik, biyouyumluluk vb.) iyileştirmek için çeşitli yöntemler vardır. Bunlardan en önemli ve etkili olanı, cam yapısına farklı iyonların dahil edilmesi veya ikame edilmesidir (Shatkoski vd., 2021).

Örneğin, stronsiyum (Sr), magnezyum (Mg) ve çinko (Zn) gibi iyonlar çok fazla tercih edilmektedir ve gelişmiş osteogenez de dahil olmak üzere avantajlı özellikler sunmaktadır (Silva vd., 2023). Bunlara ek olarak, bakır (Cu), lityum (Li) ve gümüş (Ag) gibi iyonlar, biyoaktif camın implantasyonu ve terapötik kullanımı için çok önemli olan anjiyogenez ve antibakteriyel özellikler sağlamaktadır. İyon salımı osteoblast farklılaşmasıyla ilişkili genlerin aktivasyonunu başlatmakta ve destekleyebilmektedir. Dahası, spesifik inorganik iyonların salınması, gen ekspresyonunu ve büyüme faktörü üretimini etkileyerek anjiyogenez uyatabilmektedir (Taye, 2022).

Wei ve ekibi, borat biyoaktif camlar üzerine yaptığı araştırmada, B ve Sr katkılarının osteoblast hücre davranışlarına etkileri incelenmiş, düşük bor konsantrasyonlarında hücre proliferasyonunun arttığı, yüksek konsantrasyonlarda ise hücre apoptozunun tetiklendiği tespit edilmiştir (Wei vd., 2014). Saranti ve arkadaşları çalışmalarında B katkısının kalsiyum fosfat camlarının biyoaktivitesini artırdığı gösterilmiştir ve B oranı arttıkça hidroksiapatit oluşum hızının da yükseldiği rapor edilmiştir (Saranti vd., 2006). Ayrıca Sr katkısının ise osteoblast proliferasyonu, protein sentezi ve hücresel farklılaşmayı desteklediği rapor edilmiştir (Pan vd., 2010). Bu aktif iyonlar, kristal oluşumu, yapısal şekillendirme, kristalinite, çözelti çözünürlüğü, sıcaklık değişimi direnci ve en önemlisi çözünme davranışı dahil olmak üzere malzemenin çeşitli yönlerini önemli ölçüde etkilemektedir. İyon ikamesinin avantajları çok sayıda olmakla birlikte, ani salınım ve yüksek konsantrasyonlarda toksisite gibi potansiyel dezavantajları da bulunmaktadır. Ancak bu dezavantajlar, cam yapısına takviye edilen elemente, biyoaktif camın uygulama amacına bağlı olarak, mekanik, kimyasal ve termal özellikleri göz önünde bulundurularak optimize edilebilmektedir (Moghanian vd., 2025).

4. Mekanik Özelliklerin İyileştirilmesi: Cam-Seramik Dönüşümü

Bir biyoaktif camda mekanik özelliklerin iyileştirilebilmesi için iyon modifikasyonunun alternatif olarak, kimyasal bileşim değiştirilmeden, kontrollü kristalizasyonla mukavemetin artırılması da mümkündür. Bunun için biyoaktif camların cam-seramik forma dönüştürülmesi kritik öneme sahiptir. Cam-seramik dönüşümü cam matrisinde kontrollü kristal fazların oluşumunu sağlayarak kırılma tokluğunu artırmakta, bu sayede yük taşıyan ortopedik implantlarda kullanım potansiyeli artmaktadır (Chen vd., 2006) (Kırkbinar vd., 2020)

Temel olarak biyocamların cam-seramiklere dönüşüm süreci, cam dönüşümü sağlanmasını takiben ısı işlem (termal işlem) adı verilen kontrollü bir ısıtma süreciyle gerçekleşmektedir. Bu süreç, biyoaktif camın amorf yapısının kısmen kristalleşmesine neden olmakta ve ana camdan daha güçlü bir malzeme ortaya çıkarmaktadır (Madival ve Rajiv, 2025).

Dönüşümün temelini oluşturan bu ısı işlem sırasında, biyoaktif cam belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmakta ve bu sıcaklıkta, camın yapısındaki atomlar hareketlenerek düzenli kristal fazları oluşmaktadır. Isıtma sonucunda, biyoaktif camın mikroyapısında amorf (camsı) yapı ve kristalin fazlar adı verilen düzenli ve tekrarlayan atom dizilimlerine sahip bölgeler oluşmaktadır. Bu kristal fazlar, kalan amorf matris adı verilen camın düzensiz yapısının içine gömülüdür (Madival ve Rajiv, 2025).

Bir biyocamı cam-seramiğe dönüştürmenin en önemli avantajı, malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen belirgin iyileşmedir. Kristalin fazlar, cam seramiğe ana camdan daha yüksek dayanım katmaktadırlar. Bu da, malzemenin kırılma veya deformasyona karşı daha dirençli hale gelmesi anlamına gelir (Dash vd., 2023). Cam-seramik dönüşümü, malzemenin kırılma tokluğunu da önemli ölçüde artırmaktadır (Çalışkan vd., 2018). Kırılma tokluğu, bir malzemenin çatlak oluşumuna karşı direncini ifade etmektedir ve kemik yenilenmesi gibi yüksek mekanik strese maruz kalan uygulamalar için kritik bir özelliktir.

Dönüşümün bir diğer avantajı da biyoaktif özelliklerin korunmasıdır. Sonuç olarak, biyocamın cam-seramiğe dönüşümü, temel olarak malzemenin mekanik özelliklerini iyileştiren bir mühendislik sürecidir. Bu sayede, daha dayanıklı ve güçlü biyoaktif malzemeler elde edilmektedir. Bu malzemeler, doku mühendisliği ve rejeneratif tıp alanlarında daha geniş uygulama potansiyeline sahiptir (Madival ve Rajiv, 2025) (Dash vd., 2023).

5. Üretim Teknikleri ve Yeni Yöntemler

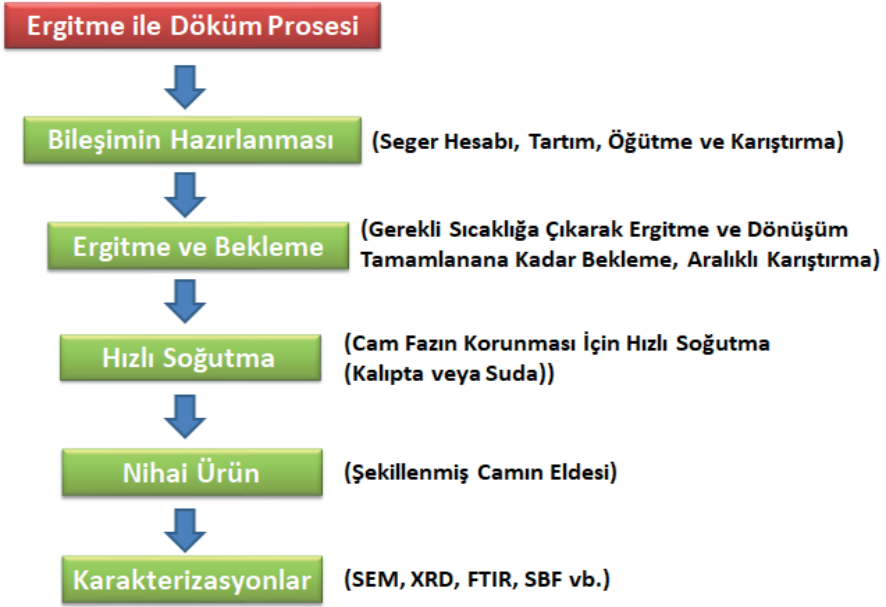
Biyoaktif camların üretimi için birçok teknik bulunmaktadır. Bu tekniklerin en yaygın olanları ise ergitme metodu ve sol-jel prosesidir (Boccaccini vd., 2021). Hangi yöntemin uygulanacağı, biyomedikal uygulamanın türüne ve amacına göre seçilmektedir. Bulk bir malzeme üretilecekse genellikle ergitme ile döküm metodu tercih edilirken, biyomalzeme iskele görevinde kullanılacak cam partikülleri ya da cam fiberler oluşturularak dokunun içerisinde büyüyebileceği bir gözenekli yapı isteniyorsa sol-jel yöntemi daha tercih sebebidir. Yine benzer şekilde iskelelerin üretimi için daha ileri teknikler olan 3D baskı yöntemleri ve kaplama amaçlı elektrosponing vb. yöntemler de kullanılmaktadır (Lynn vd., 2005). İki yaygın yöntemi detaylı incelemek olursak:

5.1. Ergitme ile Döküm Metodu (Melt-Quenching)

Ergitme ile döküm yöntemi, özellikle biyoaktif camlar için cam sentezinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Erken dönem araştırmalarda kullanılan biyoaktif cam ve cam seramikler, bileşimin yüksek sıcaklıklarda ergimesiyle amorf fazın elde edilmesini takiben implantların toplu olarak kalıplara dökülmesini ve hızla soğutularak amorf fazın oda sıcaklığında da korunmasını esas almaktadır.

Bu yöntemde, ham maddelerin eriyik hale gelene kadar eritilmesi ve ardından camsı bir yapı oluşturmak için hızla soğutulması aşamaları mevcuttur. Camların bileşimi, bileşenlerin sitokiyometrik ayarlanmasıyla hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir (Cannio vd., 2021).

Ergitme ile döküm yönteminde camın hazırlanışı birkaç aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki üretilecek camın son kompozisyonuna uygun şekilde Seger formülasyonunun çıkarılması ve gerekli hammaddelerin dikkatlice seçilerek tartılıp, uygun sitokiyometrik oranlarda karıştırılmasıdır. Homojen olarak karıştırılan cam bileşimi uygun bir potada ergime sıcaklığının üzerine çıkılarak ergitilir. İstenilen sıcaklığa ulaşıldığında, ergimiş cam uygun bir kalıba dökülerek iç gerilimleri gidermek için tavlanmaktadır. Tavlama işleminden sonra, elde edilen camın istenen şekil ve boyuta getirilmesi için kesme, taşlama ve parlatma gibi ileri işlemler yapılabilir. Son olarak, hazırlanan camlar yapısal, fiziksel ve biyoaktif özelliklerini değerlendirmek için çeşitli analitik teknikler kullanılarak karakterize edilmektedir (Kırkbınar vd., 2020). Şekil 2’de ergitme ile döküm işleminin adımları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Ergitme ile döküm (melt-quenching) işleminin adımları (Madival and Rajiv, 2025).

Bir biyoaktif camın temel bileşenleri arasında SiO_2 , CaO , P_2O_5 , Na_2O gibi inorganik komponentler bulunmaktadır. Bunlara ek olarak; cam ağı modifiye edici, çekirdekleştirici, biyouyumluluğu ve antibakteriyelliği arttıran farklı oksitler de kullanılmaktadır (ZnO , MgO , TiO_2 , B_2O_3 , Ag_2O (Babu vd., 2021; Ebrahim vd., 2023)).

Bir biyoaktif camın amorf yapısı biyolojik dokularla etkili etkileşimler sağlamak için gerekli olan yüksek yüzey alanını sağladığından oldukça önemlidir. İşlemin bir diğer aşaması olan tavlama adımı ise, malzemenin yüksek termal genleşmesinin neden olduğu iç gerilimleri gidermek için gerekli olduğu gibi, tavlama uçucu alkali metal oksitlerin konsantrasyonunu azaltabilir ve cam matrisi içindeki apatit kristallerinin çökmesine katkıda bulunabilmektedir (Madival ve Rajiv, 2025).

5.2. Sol-jel prosesi

Sol-jel prosesi, adından da anlaşılacağı üzere solüsyona alma ve jelleştirme ana aşamalarından oluşan bir yöntemdir. Geleneksel olarak kullanılan ergitme ile döküm tekniğine kıyasla önemli ölçüde daha düşük sıcaklıklarda işlemler yapılmaktadır (Li vd., 1991).

Bu yöntemin diğer önemli avantajlarından biri de, geleneksel ergitme ile döküm tekniklerine kıyasla elde edilen ürünün bileşimi ve homojenliği üzerinde çok daha hassas kontrol sağlamasıdır (Furlan vd., 2018). Şekil 3'te, sol-jel tekniği kullanılarak cam hazırlamada yer alan adımların şematik bir gösterimini verilmiştir.



Şekil 3. Sol-jel prosesinin adımları (Madival ve Rajiv, 2025).

İşlem temelde alkoksitlerin (camın yapısında bulunan ana oksitleri ihtiva eden ve kimyasal kompozisyonunda nitratl, asetatlı ve hidratlı vb. gruplara sahip öncül hammaddeler), çözücünün, suyun ve katalizörlerin seçilmesi, hesaplanması, karıştırılmasıyla başlar. Devamında hidroliz ve polikondensasyon reaksiyonlarıyla, jel benzeri bir ağ oluşumu için çapraz bağlama ve polimerizasyona uğrayan bir sol oluşumu sağlanmaktadır. Elde edilen ıslak jeldir ve çözücüler ile suyun uzaklaştırılması için kurutulmaktadır. Kurutulmuş jel sinterlendikten sonra nihai cam yapısını elde edilmektedir (Madival ve Rajiv, 2025).

Li, Clark ve Hench, sol jel işlemeyle stabil bir biyoaktif jel-camın yapılabileceğini göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmada büyük çoğunluğu SiO_2 'den oluşan jel-cam bileşimler için bir dizi kompozisyon çalışılmış ve in vitro biyoaktivitesi rapor edilmiştir. HAp benzeri oluşum ürünlerinin, daha

önce üretmiş oldukları geleneksel ergitme ile döküm yöntemiyle elde edilmiş 45S5 camından daha hızlı olduğunu gözlemlemişlerdir (Hench, 2006).

Başka bir çalışmada ise sol-jel yöntemiyle üretilen jel camların, ergitme yöntemiyle üretilen camlara göre 2-4 kat daha fazla yüzey alanına sahip olduğunu ve kontrollü kristalizasyon ile hidroksiapatit oluşumunu hızlandırdığını rapor etmiştir (Kılınç ve Toplan, 2023).

Bunların yanında, sol-jel işlemleriyle üretilen biyoaktif camlar, mezogözenekli olarak da üretilmektedir. Biyoaktif camlarda mezogözeneklilik, daha yüksek bir yüzey alanı ve daha büyük gözenek hacmi anlamına gelmektedir. Bu mezogözenekli camlar, çevreleyen biyolojik ortamla daha etkin bir etkileşim göstererek, hızlandırılmış bozunma oranları da dahil olmak üzere daha verimli biyoaktivite sağlamaktadırlar. Sonuç olarak, sol-jelden türetilen biyoaktif camların doku yenilenmesini desteklemede daha etkili olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, yüksek kaliteli mezogözenekli biyoaktif camlar elde etmek, ileri araştırma ve geliştirme uygulamalarında zorlu bir görev olmaya devam etmektedir (Pirayesh ve Nychka, 2013; Zheng ve Boccaccini, 2017).

5.3. Diğer Yöntemler

Son yıllarda biyocam üretim teknolojileri, özellikle gözenekli biyoaktif camların üretimi konusunda daha ileri ve umut verici yöntemleri kapsamaktadır. Bu üretim teknolojileri, karmaşık geometrilere ve hasta özgü tasarımlara sahip implantların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Seçici lazer sinterleme, mürekkep püskürtmeli baskı, mürekkep püskürtmeli çizim ve robocasting gibi 3D baskı yöntemleri gelecekte bu alanda öne çıkan yöntemler olarak göze çarpmaktadır (Kılınç ve Toplan, 2023) (Madival and Rajiv, 2025).

Bu üretim metodlarında kritik özellikler olarak kullanılan tozların ve nihai biyocamın boyutları, baskı sırasında akan akışkanın viskozitesi, porozite miktarı, şekli ve boyutları parametreler yöntemin optimize edilmesi önemli bir role sahiptir (Gmeiner vd., 2015). Özellikle 3D-robocasting yöntemi, biyocam/polimer kompozit iskelelerin kişiselleştirilmiş kemik greftleri şeklinde üretimine imkân tanıyan önemli yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Wei ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda, robocasting ile üretilen biyocam kompozit iskelelerinin osteoblast hücre göçü, proliferasyonu ve matris mineralizasyonunu olumlu yönde etkilediğini rapor etmişlerdir (Wei vd., 2014). Bu tür gelişmeler ve yeni nesil üretim tekniklerinin yardımıyla, biyocamların doku mühendisliğinde kişiye özel tedavilere adapte edilmesi mümkün olmakta ve klinik uygulamalardaki potansiyellerini artırmaktadır.

6. Klinik Uygulamalar ve Gelecek Perspektifleri

Biyoaktif camlar, günümüzde farklı klinik uygulamalarda kullanılmaktadır. Diş hekimliği bu alanlardan biridir ve özellikle dentin hassasiyetinin tedavisinde, remineralizasyon süreçlerinde kullanılan ürünler ön plana çıkmaktadır. Novamin® gibi biyoaktif cam bazlı ticari ürünler, diş macunları ve ağız bakım ürünlerinde yaygın olarak kullanılmakta ve dentin tübüllerinin tıkanması yoluyla hassasiyetin azaltılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, periodontal defektlerin tedavisinde ve kemik greft materyali olarak da klinik uygulamalara girmiştir. Ortopedi alanında ise, kemik iskelesi olarak, zarar gören kısımların doldurulmasında, kemik rejenerasyonunun desteklenmesinde ve özellikle metalik implant yüzeylerinin kaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle travma ve dejeneratif kemik hastalıklarında, biyoaktif cam katkılı granüller ve toz formülasyonları kemik iyileşmesini hızlandırıcı rol oynamaktadır (Cannio vd., 2021).

Biyoaktif camların bir diğer klinik uygulama alanı ise yumuşak doku onarımı ve yara iyileşmesidir. Antibakteriyel özellikleri ve iyon salınımı yoluyla anjiyogenezi destekleyerek kronik yaraların tedavisinde potansiyel göstermektedir. Sonuç olarak, biyoaktif camlar halihazırda diş hekimliği, ortopedi ve yara iyileşmesi gibi farklı klinik alanlarda kullanılmakta olup, osteokonduktif, antibakteriyel ve biyoyumlu özellikleri sayesinde hem sert hem de yumuşak doku uygulamalarında önemli bir yere sahiptir (Cannio vd., 2021).

Son yıllarda üzerinde çokça durulan enjekte edilebilir biyoaktif cam formülasyonları, düzensiz geometrili kemik boşluklarının doldurulmasında önemli bir adımdır ancak mekanik özellikler ve çözünme sırasında iyon salınımının kontrolü bu sistemleri sınırlayıcı faktörler olmaya devam etmektedir. Kullanılan iyon modifikasyonlu biyoaktif camların biyolojik etkileri doza bağımlı oldukça olup, aşırı salınım durumunda toksisite veya yetersiz biyoyumluluk gibi sorunlara yol açabilmektedir (Moghanian vd., 2025) (Mirt vd., 2024).

Klinik uygulamalara geçişte ve uygulamaların yaygınlaştırılmasında günümüzde halen devam eden çeşitli sınırlılıklar mevcuttur. En önemli sınırlılıklar arasında kontrollü çözünme ve iyon salınımının sağlanamaması, yük taşıyan bölgelerde mekanik yetersizlik, uzun dönem in vivo veri eksikliği ve düzenleyici onay süreçleri yer almaktadır. Bu sınırlılıkların üstesinden gelebilmek için hibrit kompozitler geliştirilmekte ve 3D baskı teknikleriyle kişiye özel implantların üretimine yönelik çalışmalar sürdürülmektedir (Moghanian vd., 2025).

Gelecek perspektifleri açısından, biyoaktif cam araştırmalarının odak noktasını kişiselleştirilmiş biyomalzemeler, akıllı kontrollü salınım sistemleri, biyolojik moleküllerle hibritleştirilmiş kompozitler ve ileri üretim teknikleri oluşturmaktadır. Üretim teknolojilerindeki ilerlemeler, özellikle 3D baskı ve kişiselleştirilmiş implant tasarımı, gelecekte klinik uygulamaları dönüştürme potansiyeline sahiptir. Bu yöntemlerle hasta-özgü porozite, iyon dağılımı ve mekanik özellikler kontrol edilebilmekte, implantların hem biyolojik hem de mekanik olarak uyumlu olması sağlanabilmektedir (Mirt vd., 2024).

Bir diğer önemli araştırma yönelimi, hibrit biyomalzemelerin geliştirilmesidir. Ayrıca, biyoaktif camların gelecekteki klinik çevirisinin hızlandırılabilmesi için uzun dönem in vivo çalışmaları da büyük önem taşımaktadır (Moghanian vd., 2025).

Sonuç olarak, biyoaktif camların gelecekteki araştırma ve klinik yönelimlerinin, kontrollü salınım sistemleri, hibrit biyomalzemeler, 3D baskı teknolojileri ve kişiselleştirilmiş uygulamalar ekseninde ilerlemesi ön görülmektedir.

7. Sonuçlar

Bu çalışmada, biyoaktif camların gelişimi, türleri, bileşimleri, biyoaktivite mekanizmaları ile ilgili bir derleme yapılmış ve bu camların klinik olarak güncel ve potansiyel uygulamalarını ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Biyoaktif camlar, iyon salınımı yoluyla yüzeylerinde hidroksiapatit benzeri oluşturmaktadırlar. Biyoaktivite olarak tanımlanan bu yetenekleri sayesinde kemik dokusu ile güçlü bir kimyasal ve biyolojik bağ kurarak yeni kemik hücrelerinin oluşumuna ve büyümesine uygun ortam hazırlamaktadırlar. Yapısında bulunan Ca, Si, P gibi iyonların yanısıra biyoaktif camların özellikleri farklı iyon ikameleri desteklenerek, bu biyoaktivite ve diğer özelliklerin geliştirilebileceği birçok çalışmada gösterilmiştir. Özellikle Sr, Zn, Cu, Mg, Ag ve B gibi elementlerin ikamesi ile osteogenez, anjiyogenez ve antibakteriyel etkinliğin ve mekanik dayanımın artırılması yapılan çalışmaların ana hedefleri olmuştur. Bu iyonların en büyük handikapının ise, yüksek konsantrasyonlara ulaştığında toksik etkisinin olabileceği belirtilmiştir ve kontrollü kullanımı önerilmiştir.

Klinik uygulamalarına bakıldığında diş hassasiyetinin giderilmesi, periodontal hasarların onarımı, kemik rejenerasyonu, implant kaplamaları ve yara iyileştirme uygulamalarında oldukça önemli bir potansiyele sahiptirler.

Gelecek uygulamalarında ise, polimerler ve biyocam hibrit kompozit sistemleri, akıllı biyomalzemeler, enjekte edilebilir biyomalzemeler gibi alanlara yönelinmiştir. Üretimleri için temel yaklaşım ergitme ile döküm ve sol-jel gibi yöntemler olsa da, 3D biyobaskı ve robocasting gibi ileri

üretim yöntemleriyle desteklendiğinde kişiye özel implant tasarımlarının geliştirilmesine olanak sağlayabilmektedir. Bu da gelecekte, klinik uygulamalarda kişiselleştirilmiş tedavi yaklaşımlarına olanak sağlamaktadır. Multidisipliner yaklaşımların artmasıyla, biyocamların daha geniş ölçekte ve daha karmaşık klinik uygulamalarda başarıyla kullanılacağı öngörülmektedir.

Kaynakça

- Ahmed, I., Lewis, M., Olsen, I., Knowles, J.C., (2004), Phosphate glasses for tissue engineering. Part 2. Processing and characterization of a ternary-based P_2O_5 -CaO-Na₂O glass fiber system. *Biomaterials*, 25:501-7.
- Babu, M.M., Rao, P.V., Singh, R.K., Kim, H.-W., Veeraiah, N., Özcan, M., Prasad, P.S., (2021), ZnO incorporated high phosphate bioactive glasses for guided bone regeneration implants: Enhancement of in vitro bioactivity and antibacterial activity, *J. Mark. Res.* 15, 633-646. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.020>
- Best, S.M., Porter, A.E., Thian, E.S., Huang, J., (2008), Bioceramics: Past, present and for the future, *Journal of the European Ceramic Society* 28, pp. 1319-1327.
- Boccaccini, D., Cannio, M., Bernardo, E., Boccaccini, A.R., (2021), Glass and glass-ceramic matrix composites for advanced applications: part I: properties and manufacturing technologies, in *Encyclopedia of materials: technical ceramics and glasses*, Elsevier, Amsterdam.
- Cannio, M., Bellucci, D., Roether, J.A., Boccaccini, D.N., Cannillo, V., (2021), Bioactive Glass Applications: A Literature Review of Human Clinical Trials. *Materials*, 14, 5440. <https://doi.org/10.3390/ma14185440>
- Chen, Z.Q., Thompson, I.D., Boccaccini, A.R., (2006), 45S5 Bioglass-derived glass-ceramic scaffold for bone tissue engineering. *Biomaterials*, 27:2414-25.
- Çalışkan, F., Tatlı, Z., İbrahimioğlu, E., Demir, A., (2018), Apatit – Wollastonit Cam Üretimi ve Temperlemenin Sertlik Üzerine Etkisi, 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 09-11 November, (ISITES2018 Alanya – Antalya - Turkey).
- Dash, P.A., Mohanty, S., Nayak, S.K., (2023), A review on bioactive glass, its modifications and applications in healthcare sectors, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 614, 122404.
- Day, D.E., White, J.E., Brown, R.F., McMenamin, K.D., (2003), Transformation of borate glasses into biologically useful materials, *Glass Technol. Part A*, 44:75-81.
- De Maeyer, E. A. P. and Verbeeck, R. M. H., (1993), Possible substitution mechanisms for sodium and carbonate in calciumhydroxyapatite, *Bull. Soc. Chim. Belg.*, 102, 601-609.
- Ebrahimi, M., Manafi, S., Sharifianjazi, F., (2023), The effect of Ag₂O and MgO dopants on the bioactivity, biocompatibility, and antibacterial properties of 58S bioactive glass synthesized by the sol-gel method, *J. Non Cryst. Solids*, 606, 122189. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2023.122189>

- Furlan, R.G., Correr, W.R., Russi, A.E.C., Iemma, M.R.D.C., Trovatti, E., Pecoraro, E., (2018), Preparation and characterization of boronbased bioglass by sol–gel process, *J. Sol. Gel Sci. Technol.*, 88, 181–191.
- Gmeiner, R., Deisinger, U., Schönherr, J., Lechner, B., Detsch, R., Boccaccini, A.R., Stampfl, J., (2015), Additive manufacturing of bioactive glasses and silicate bioceramics, *J. Ceram. Sci. Technol.* 6, 75–86.
- Hench, L.L. and Paschall, H.A., (1973), Direct chemical bonding of bioactive glass-ceramic materials and bone, *J. Biomed. Mater. Res. Symp.*, 4, 25–42.
- Hench, L.L., (1998), Bioceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, 81:1705–28.
- Hench, L.L., (2006), The story of Bioglass, *J. Mater. Sci: Mater. Med.*, 17:967–978.
- Huang, W., Day D.E., Kittiratanapiboon, K., Rahaman, M.N., (2006), Kinetics and mechanisms of the conversion of silicate (45S5), borate, and borosilicate glasses to hydroxyapatite in dilute phosphate solution, *J. Mater. Sci: Mater. Med.*, 17:583–96.
- İbrahimoglu, E., Tatlı, Z., Çalışkan, F., (2019), Apatit–Wollastonit Biyoaktif Cam Seramiklerde Kristalizasyonun Kırılma Tokluğu Üzerine Etkisi, 7th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 22-24 November, (ISITES2019 SanliUrfa - Turkey). <https://doi.org/10.33793/acperpro.02.03.146>
- Jung, S.B. and Day, D.E., (2009), Conversion kinetics of silicate, borosilicate, and borate bioactive glasses to hydroxyapatite, *Physics and Chemistry of Glasses: European Journal of Glass Science and Technology Part B*, 50:85–8.
- Kılınç, Ö. and Toplan, N., (2023), Biyoaktif Cam ve Cam Seramikler, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6 (2), 89-110. <https://doi.org/10.53410/koufbd.1311845>
- Kırkbınar, M., İbrahimoglu, E., Çalışkan, F., (2020), Sinterleme Yöntemiyle Apatit – Wollastonit Cam Seramik Üretimi, Academic Platform - Journal of Engineering and Science, Volume: 8, Issue: 2, 217.
- Kokubo, T., Shigematzu, M., Nagashima, Y., Tashiro, M., Nakamura, T., Yamamuro, T., Higashi, T., (1982), Apatite and Wollstonite Containing Glass Ceramics for Prosthetic Application, *Bull. Inst. Chem. Res.*, Vol. 60, No: 3-4.
- Kuhn, T.L., (2012), Biomaterials, Introduction to Biomedical Engineering, Chapter 5, Third Edition, Elsevier Press.
- Li, R., Clark, A.E., Hench, L.L., (1991), An investigation of bioactive glass powders by sol-gel processing, *J. Appl. Biomater.* 2, 231–239.
- Liu, X., Xie, Z., Zhang, C., Pan, H., Rahaman, M.N., Zhang, X, et al (2010), Bioactive borate glass scaffolds: in vitro and in vivo evaluation for use as

- a drug delivery system in the treatment of bone infection, *J. Mater. Sci: Mater. Med.*, 21:575–82.
- Lynn, A.K., Nakamura, T., Patel, N., Porter, A.E., Renouf, A.C., Laity, P.R., Best, S.M., Cameron, R.E., Shimizu, Y., Bonfield, W., (2005), Composition-controlled nanocomposites of apatite and collagen incorporating silicon as an osseopromotive agent, *J. Biomed. Mater. Res. A*, 74, 447–453.
- Madival, H. and Rajiv, A.A., (2025), Comprehensive Review of Bioactive Glasses: Synthesis, Characterization, and Applications in Regenerative Medicine, *Biomedical Materials & Devices*. <https://doi.org/10.1007/s44174-025-00310-8>
- Mirt, A.L., Fikai, D., Oprea, O.C., Vasilievici, G., Fikai, A., (2024), Current and Future Perspectives of Bioactive Glasses as Injectable Material, *Nanomaterials*, 14, 1196. <https://doi.org/10.3390/nano14141196>
- Moghanian, A., Mehrjardi, L.D., Safae, S., (2025), Ion substitution in bioactive glass: A comprehensive review of structural modifications and functional effects, *Next Materials*, 8, 100598.
- Pirayesh, H., Nychka, J.A., (2013), Sol-Gel synthesis of bioactive glass-ceramic 45S5 and its in vitro dissolution and mineralization behavior, *J. Am. Ceram. Soc.*, 96, 1643–1650.
- Rahaman, M.N., Day, D.E., Bal, S.B., Fu, Q., Jung, S.B., Bonewald, L.F., Tomsia, A.P., (2011), Bioactive glass in tissue engineering, *Acta Biomaterialia*, 7 (6), pp. 2355–2373. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.03.016>
- Saranti, A., Koutselas, I., Karakassides, M.A., (2006), Bioactive Glasses in the System $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$: Preparation, Structural Study and In Vitro Evaluation, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352, 390–398.
- Schatkoski, V.M., do Amaral Montanheiro, T.L., de Menezes, B.R.C., Pereira, R.M., Rodrigues, K.F., Ribas, R.G., da Silva, D.M., Thim, G.P., (2021), Current advances concerning the most cited metal ions doped bioceramics and silicate-based bioactive glasses for bone tissue engineering, *Ceramics International*, 47 (3), 2999–3012. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.213>
- Silva, A. V., dos Santos Gomes, D., de Sousa Victor, R., de Lima Santana, L. N., Neves, G. A., Menezes, R. R., (2023), Influence of strontium on the biological behavior of bioactive glasses for bone regeneration, *Materials*, 16 (24), p. 7654.
- Taye, M.B., (2022), Biomedical applications of ion-doped bioactive glass: a review, *Appl. Nanosci.*, 12(12), pp. 3797–3812 <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02672-7>
- Wei, X., Xi, T., Zheng, Y., Zhang, C., Huang, W., (2014), In Vitro Comparative Effect of Three Novel Borate Bioglasses on the Behaviors of Osteoblastic

MC3T3-E1 Cells, *Journal of Materials Science & Technology*, 30 (10), 979-983. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.07.007>

Zakrzewski, W., Dobrzyński, M., Zawadzka-Knefel, A., Lubojański, A., Dobrzyński, W., Janecki, M., Rybak, Z., (2021), Nanomaterials Application in Endodontics, *Materials*, 14(18), 5296.

Zhang, X., Jia, W., Gu, Y., Liu, X., Wang, D., Zhang, C., Huang, W., Rahaman, M.N., Day, D.E., Zhou, N., (2010), Teicoplanin-Loaded Borate Bioactive Glass Implants for Treating Chronic Bone Infection in A Rabbit Tibia Osteomyelitis Model. *Biomaterials*, 31:5865–74.

Zheng, K. and Boccaccini, A.R., (2017), Sol-gel processing of bioactive glass nanoparticles: A review, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 249, 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.03.008>

Talaşlı İmalat Odaklı Tasarım: Konstrüksiyon İlkeleri ve Dijital Dönüşüm 8

Tuğçe Tezel¹

Volkan Kovan²

Özet

Modern imalat endüstrisinde, ürün maliyetinin yaklaşık %70'i tasarım aşamasında belirlenmektedir. Bu durum, tasarımcıların sadece fonksiyonel gereksinimleri değil, aynı zamanda üretim kısıtlarını ve maliyet dinamiklerini de yönetmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma, talaşlı imalat süreçleri için geçerli olan klasik konstrüksiyon kuralları ile Endüstri 4.0'ın getirdiği dijital yetenekleri bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Çalışmanın ilk bölümünde, maliyet kilitlenmesi paradoksu ve standartlaşmanın ekonomik etkileri incelenmiş; tasarımcının kaleminin ucundaki kararların işletme kârlılığına olan etkisi ortaya konulmuştur. İkinci bölümde, literatürde kabul görmüş temel imalat odaklı tasarım metodolojilerine dayalı olarak; delik delme, frezeleme, tornalama ve taşlama operasyonları için geometrik tasarım kuralları detaylandırılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise, klasik fiziksel kısıtların modern teknolojilerle nasıl aşıldığı tartışılmıştır. Özellikle 5 eksenli işleme kinematiği, Bi-LSTM algoritmalarıyla yapay zekâ destekli maliyet tahmini ve hataları sanal ortamda önleyen dijital ikiz uygulamaları, modern tasarımcının yeni yetkinlik alanları olarak sunulmuştur. Sonuç olarak bu kitap bölümü; tasarımcıyı sadece geometri çizen bir teknik ressam olmaktan çıkarıp, malzeme, takım ve tezgâh arasındaki fiziksel ve dijital etkileşimi yöneten bir üretim mimarına dönüştürmeyi hedefleyen hibrit bir rehber niteliğindedir.

- 1 Doç. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, tugcetezel@akdeniz.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0139-442X
- 2 Prof. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, kovan@akdeniz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0599-525X

1. Giriş

Modern imalat endüstrisinin tarihsel serüvenine bakıldığında, üretim teknolojilerinin sürekli bir değişim içinde olduğu, ancak bazı temel doğruların her devirde geçerliliğini koruduğu görülür. Günümüzde endüstriyel üretim paradigması, hammaddeyi en verimli şekilde kullanarak nihai ürüne dönüştürme arayışındadır. Bu arayışın bir sonucu olarak, döküm, dövme ve son yıllarda büyük bir ivme kazanan eklemeli imalat gibi “Net Şekle Yakın” üretim yöntemleri, malzeme israfını azaltmaları ve karmaşık geometrileri üretebilmeleri nedeniyle popülerite kazanmıştır (Groover, 2021). Ancak, bu teknolojilerin sunduğu tüm avantajlara rağmen, mühendislik tasarımının en kritik beklentileri olan yüksek boyutsal hassasiyet ve üstün yüzey kalitesi söz konusu olduğunda, talaşlı imalat vazgeçilmez bir tamamlayıcı süreç olarak karşımıza çıkmaktadır.

Endüstriyel literatürde sıklıkla dile getirilen “Talaşlı imalat ölüyor mu?” sorusu, aslında üretim süreçlerinin doğasını tam olarak kavrayamamaktan kaynaklanan bir yanılgıdır. Nitekim, havacılık ve otomotiv gibi güvenlik kritik sektörlerde kullanılan bileşenlerin birçoğu, döküm veya 3B yazıcı teknolojileri ile üretilse dahi, fonksiyonel yüzeylerinin tolerans gereksinimlerini karşılamak için nihai bir talaşlı işlem operasyonuna ihtiyaç duyar. Örneğin, bir içten yanmalı motor bloğu döküm yöntemiyle şekillendirilmiş olsa da silindir gömleklerinin piston ile kusursuz çalışabilmesi için gereken IT6-IT7 tolerans aralığına ve $Ra < 0,8 \mu m$ yüzey pürüzlülüğüne ancak honlama veya hassas tornalama gibi talaşlı işlemlerle ulaşılabilir (Altintas, 2012). Benzer şekilde, eklemeli imalat ile üretilen titanyum bir biyo-implantın, kemik dokusuyla uyum sağlayacak bağlantı yüzeyleri, katmanlı yapının getirdiği merdiven etkisini gidermek adına frezeleme işlemine tabi tutulmak zorundadır (Gao vd., 2015).

Dolayısıyla talaşlı imalatı, sadece malzemeden talaş kaldırarak şekil verme işlemi olarak değil; diğer üretim yöntemlerinin bıraktığı kabayı, mükemmele dönüştüren bir kalite güvence süreci olarak okumak daha doğrudur. Özellikle Seid Ahmed ve Amorim’in (2025) üretim teknolojilerindeki entegrasyona dikkat çeken çalışmaları ve hibrit tezgâhların (aynı gövdede hem lazer sinterleme hem de frezeleme yapabilen makineler) yükselişi de bu tezi doğrulamaktadır; üretim dünyası, talaşlı imalatı terk etmek yerine, onu diğer teknolojilerle entegre ederek hassasiyet yeteneğinden faydalanmaya devam etmektedir.

Özetle, tasarımcı açısından talaşlı imalat; bir zorunluluktan öte, parçanın fonksiyonel ömrünü ve performansını garanti altına alan stratejik bir araçtır. Parçaların birbirleriyle olan montaj ilişkileri, sızdırmazlık yüzeyleri ve

dinamik yük altındaki yorulma dirençleri, büyük ölçüde bu süreçteki yüzey bütünlüğü ile belirlenir. Bu kitapta ele alacağımız konstrüksiyon ilkeleri, işte bu hassas dengenin; yani maliyet ile kalite arasındaki o ince çizginin, tasarım masasında nasıl yönetileceğine dair bir rehber niteliğindedir.

Talaşlı imalatın evrimi, insan kas gücünden dijital zekâya uzanan heyecan verici bir yolculuktur. 20. yüzyılın başlarında üretim, büyük ölçüde operatörün el becerisine ve tecrübesine dayalı bir zanaat faaliyetiydi. Konvansiyonel tornalarda veya frezelerde çalışan bir usta, parça üzerindeki her bir talaş eliyle hissederek kaldırır; titreşimi tezgâhın sesinden, ısınmayı ise çıkan talaşın renginden anlardı. Bu dönemde tasarımcı için sınırlar oldukça netti: Bir parça, operatörün iki elini koordineli kullanarak (el çarklarını çevirerek) işleyebileceği geometrik basitlikte olmalıydı. Dolayısıyla tasarımlar genellikle prizmatik, silindirik ve 2,5 eksenli geometrilerle sınırlı kalırdı (Koren, 2010).

1950'lerin başında MIT laboratuvarlarında John Parsons öncülüğünde geliştirilen ilk Sayısal Kontrol (NC) sistemi, bu paradigmayı kökünden değiştirdi. Tezgâh eksenlerinin delikli kartlar üzerindeki kodlarla hareket ettirilmesi, kavisli yüzeylerin (örneğin helikopter pervanelerinin) insan hatasından bağımsız ve tekrarlanabilir hassasiyette üretilmesini mümkün kıldı. 1970'lerde mikroişlemcilerin devreye girmesiyle NC sistemleri, yerini Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (CNC) teknolojisine bıraktı. Artık tezgâhlar sadece verilen komutu uygulayan mekanik aygıtlar değil, aynı zamanda takım yarıçap telafisi yapabilen, basit döngüleri hesaplayabilen akıllı sistemlere dönüşmüştü (Altintas, 2012).

Ancak asıl devrim, 1990'ların sonundan itibaren Yüksek Hızlı İşleme (High Speed Machining - HSM) ve 5 Eksenli İşleme teknolojilerinin ticarileşmesiyle yaşandı. Geleneksel CNC tezgâhlarında dakikada 3.000-4.000 devirle dönen iş milleri, HSM teknolojisiyle 20.000, hatta 40.000 devirlere ulaştı. Bu hız, kesme kuvvetlerini dramatik şekilde düşürerek ince cidarlı havacılık parçalarının veya karmaşık kalıp yüzeylerinin deforme olmadan işlenmesine olanak sağladı (Byrne vd., 2003). Beş eksenli tezgâhlar ise, kesici takımın parçaya her açıdan yaklaşabilmesini sağlayarak, eskiden üretilemez denilen ters açılar ve serbest formlu yüzeyleri standart birer imalat operasyonuna dönüştürdü.

Bugün gelineen noktada, modern işleme merkezleri sadece çok fonksiyonlu yeteneklere sahip olmakla kalmayıp; tezgâh üzeri ölçüm sistemleri ve yapay zekâ entegrasyonu sayesinde, geometrik hataları anlık olarak telafi edebilen otonom üretim üslerine evrilmektedir (Seid Ahmed & Amorim, 2025). Bu muazzam yetenek artışı, tasarımcı üzerindeki geometrik kelepçeleri çözmüştür.

Geleneksel üretim yönetiminde, ürün maliyetinin atölye sahasında; yani tezgâh başında harcanan işçilik, enerji ve hammadde ile oluştuğuna dair yaygın bir yanlış vardır. Ancak modern mühendislik ekonomisi, gerçekleşen maliyet ile taahhüt edilen maliyet arasında keskin bir ayrım yapar. Bir ürünün yaşam döngüsü incelendiğinde, tasarım faaliyetleri toplam bütçenin kabaca %5'ini oluşturmasına rağmen, nihai ürün maliyetinin %70 ila %80'ini belirleyen -bir diğer deyişle kilitleyen- aşamadır (Boothroyd vd., 2010).

Bu maliyetin kilitlenmesi fenomeni, tasarımcının omuzlarına ağır bir sorumluluk yükler. Tasarımcı, CAD ekranında bir yüzeye 0,01 mm tolerans atadığında veya standart dışı bir köşe radyusu belirlediğinde, aslında aylar sonra üretim hattında kullanılacak tezgâhın tipini, kesici takımın kalitesini ve operasyon süresini o an, henüz tek bir talaş dahi kalkmadan belirlemiş olur. Örneğin, gereğinden fazla sıkı tutulmuş bir tolerans, parçanın sadece tornalanıp bitirilmesi yerine, ek bir taşlama operasyonuna girmesine neden olabilir. Bu karar, kâğıt üzerinde (veya ekranda) sadece bir rakam değişikliği gibi görünse de üretim sahasında %300'e varan maliyet artışlarına yol açabilmektedir (Ulrich & Eppinger, 2015).

Dolayısıyla tasarımcı, üretim sürecinin ilk adımını atan kişidir. Ürün tasarımı tamamlanıp teknik resimler imalat planlamaya (CAM departmanına) gönderildiğinde, maliyetin büyük kısmı artık geri döndürülemez bir şekilde kilitlenmiştir. Bu aşamadan sonra üretim mühendislerinin yapabileceği iyileştirmeler (daha hızlı takım yolları, daha iyi soğutma sıvıları vb.), maliyeti sadece marjinal düzeyde etkileyebilir. Anderson'un (2020) belirttiği gibi; kötü bir tasarımı atölyede verimli bir şekilde üretmeye çalışmak, batmakta olan bir gemideki mobilyaları cilalamaya benzer.

Bu bağlamda, talaşlı imalat odaklı tasarım (DfM), sadece parçanın üretilebilirliğini garanti altına almakla kalmaz; aynı zamanda gizli maliyetlerin eliminasyonunu hedefler. Özel takım gereksinimi, karmaşık bağlama fiktürleri, standart dışı malzeme ebatları ve aşırı kalite gibi unsurlar, tasarımcının kalemin ucundaki -çoğu zaman farkında olmadığı- gider kalemleridir. Bu kitabın ilerleyen bölümlerinde detaylandırılacak olan konstrüksiyon kuralları, tasarımcıya bu ekonomik farkındalığı kazandırmayı ve fonksiyonel gereklilikler ile üretim gerçekleri arasında optimum dengeyi kurdurmayı amaçlamaktadır.

Geleneksel tasarım eğitiminde ve klasik ürün geliştirme süreçlerinde, odak noktası genellikle nominal geometridir. Tasarımcı, güçlü CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımları kullanarak parçayı modellerken, ideal bir evrende çalıştığı varsayımıyla hareket eder. Bu sanal ortamda malzemeler sonsuz rijitliğe sahiptir, kesici takımlar asla esnemez, tezgâhlar titreşmez ve

sıcaklık değişimleri boyutları etkilemez. Ancak teknik resim “yayınlandı” statüsüne geçip üretim sahasına indiğinde, fizik kuralları acımasızca devreye girer. Klasik yaklaşımın en büyük yetersizliği, tasarımın sadece geometrik bir doğrulama süreci olarak görülmesi; imalatın dinamik ve termal karakteristiğinin göz ardı edilmesidir (Altintas, 2012).

Bu kopukluğun ilk tezahürü, takım-parça etkileşimi sırasında ortaya çıkar. Bir tasarımcı, derin bir cebin köşesine R2 gibi küçük bir radyus koyduğunda, geometrik olarak hiçbir hata yapmamış olabilir. Ancak talaşlı imalat fiziğinde bu durum, çapı 4 mm olan ince ve uzun bir parmak frezenin o köşeye girmesini zorunlu kılar. Kesme kuvvetleri altında bir konsol giriş gibi davranan bu narin takım, kaçınılmaz olarak esneyecek, yüzeyde “tırlama” izleri bırakacak veya kırılacaktır. Klasik yaklaşım, o radyusu oraya çezebiliyorsam, üretilebilirdir yanılışına düşerken; modern DfM yaklaşımı, o radyusun maliyetini ve yüzey kalitesine etkisini sorgular (Tlustý, 2000). Nitekim güncel araştırmalar, özellikle yüzey eğriliği yüksek karmaşık geometrilerin, takım yolu uzunluğunu ve takım aşınmasını artırarak işleme maliyetlerini doğrusal olmayan bir şekilde yükselttiğini ortaya koymaktadır (Hao vd., 2023).

İkinci temel sorun, erişilebilirlik ve bağlama kısıtlarının tasarım aşamasında düşünülmemesidir. Özellikle 5 eksenli olmayan konvansiyonel tezgâhlarda, parçanın her bir yüzeyini işlemek için sökölüp tekrar bağlanması gerekir. Tasarımcı, parçanın tezgâh tablasına nasıl sabitleneceğini, sıkma pabuçlarının nereye basacağını veya mengenenin sıkma kuvvetinin ince cidarlı bir parçayı nasıl deforme edeceğini hesaplamadığında, üretim hattında ciddi darboğazlar oluşur. Sıklıkla karşılaşılan bağlanamayan parça sendromu, genellikle maliyetli özel fikstür tasarımlarını gerektirir ki bu da projenin bütçesini ve takvimini öngörülemez şekilde saptırır (Bi & Zhang, 2001).

Son olarak, iletişim kopukluğu klasik sürecin verimini düşüren en büyük faktördür. Tasarımcının işini bitirip dosyaları üretim departmanına duvarın üzerinden fırlatırcasına devretmesi, ardışık bir iş akışı yaratır. İmalat mühendisi bir sorun tespit ettiğinde (örneğin; bu delik bu açıyla delinemez), dosya tasarımcıya geri döner, revize edilir ve tekrar gönderilir. Bu “Tasarla-Dene-Düzel” döngüsü, günümüzün rekabetçi piyasasında kabul edilemez bir zaman kaybıdır.

Özetle; klasik tasarım yaklaşımı “Ne üretilecek?” sorusuna mükemmel cevaplar verirken, “Nasıl üretilecek?” ve “Hangi fiziksel bedelle üretilecek?” sorularını yanıtsız bırakmaktadır. Bu kitapta sunulan yöntemler, tasarımcıyı sadece statik bir şekil çizen kişi olmaktan çıkarıp, imalat sürecinin fizikini yöneten bir mühendis konumuna yükseltmeyi hedeflemektedir.

Mevcut akademik literatür ve endüstriyel uygulama kılavuzları incelendiğinde, tasarım ve imalat disiplinlerinin genellikle birbirinden yalıtılmış silolar halinde ele alındığı görülmektedir. Bir yanda geometri ve mukavemet odaklı klasik tasarım kitapları, diğer yanda takım yolları ve kesme parametrelerine odaklanan CAM (Bilgisayar Destekli İmalat) kaynakları bulunmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, söz konusu iki disiplin arasındaki gri alanı ortadan kaldırmak ve talaşlı imalat odaklı tasarımı, statik kurallar bütünü olmaktan çıkarıp dinamik bir süreç yönetimi formuna dönüştürmektir. Çalışmanın iskeleti dört ana faz üzerine inşa edilmiştir:

1. Ekonomik Farkındalık (Bölüm 2): Her teknik kararın finansal bir karşılığı olduğu gerçeğinden hareketle, tasarımcının maliyet üzerindeki belirleyiciliği irdelenecektir. Burada, standartlaşmanın ve malzeme seçiminin, bir işletmenin kârlılığına olan etkisi somut örneklerle ortaya konulacaktır (Boothroyd, 2010).
2. Konstrüksiyonun Kuralları (Bölüm 3): Çalışmanın teknik omurgasını oluşturan bu kısımda, talaşlı imalatın değişmez fiziksel kuralları ele alınacaktır. Bode (1996) ve Bralla (1999) gibi duayenlerin prensipleri referans alınarak; delik delme, frezeleme ve tornalama işlemlerinde yapılan tipik tasarım hataları ve bunların üretilebilir doğruları, karşılaştırmalı görseller eşliğinde sunulacaktır. Bu bölüm, “Ne yapmalıyım?” sorusuna net ve pratik cevaplar veren bir el kitabı niteliğindedir.
3. Dijital Dönüşüm Vizyonu (Bölüm 4): Fiziksel kuralların dijital dünyadaki yansımaları bu bölümde tartışılacaktır. Endüstri 4.0’ın getirdiği; 5 eksenli işleme stratejileri, yapay zeka destekli maliyet tahmini ve tezgâh davranışını öngören dijital ikiz uygulamaları, modern tasarımcının yeni silahları olarak tanıtılacaktır. Özellikle derin öğrenme algoritmalarıyla yapılan döngü süresi tahminlerinin, tasarım aşamasında maliyetin milimetrik hassasiyetle öngörülmesine nasıl olanak tanıdığı tartışılacaktır (Chien & Sencer, 2024).
4. Bütüncül Sentez (Sonuç): Son tahlilde, klasik geometrik DfM kuralları ile modern sanal imalat yeteneklerinin nasıl birleştirileceği özetlenecek ve geleceğin tasarımcı profili çizilecektir.

Bu çalışmanın nihai hedefi; tasarımcıya sadece parça çizmeyi değil, o parçanın talaşa dönüşme serüvenini zihninde canlandırma (simüle etme) yetkinliğini kazandırmaktır. Zira mükemmel tasarım; kâğıt üzerinde en şık duran değil, tezgâhtan en hızlı, en ucuz ve en kaliteli şekilde çıkan tasarımıdır.

2. Tasarım ve Maliyet İlişkisi

Mühendislik projelerinde başarı genellikle fonksiyonel performans (hız, dayanım, verim) üzerinden ölçülse de ticari başarının nihai belirleyicisi birim maliyettir. Tasarımcılar genellikle parçanın çalışıp çalışmayacağına odaklanırken, üretim mühendisleri kaç mal olacağına odaklanır. Ancak modern imalat odaklı tasarım (DfM) felsefesi, bu iki sorunun birbirinden bağımsız olmadığını, aksine maliyetin bir mühendislik parametresi olarak tasarımın tam merkezinde yer aldığını savunur.

2.1. Maliyetin Kilitlenmesi

Geleneksel maliyet muhasebesi, bir ürünün maliyetini malzeme, işçilik, tezgâh amortismanı ve genel giderlerin toplamı olarak hesaplar. Bir talaşlı imalat atölyesinde tipik bir maliyet dağılımı incelendiğinde; hammadde maliyetinin %30-%40, işleme ve genel giderlerin ise %60-%70 bandında olduğu görülür. Ancak bu muhasebeleşmiş rakamlar, maliyetin nerede harcandığını gösterse de nerede belirlendiğini gizleyen yanıltıcı bir tablodur.

Mühendislik ekonomisindeki temel paradoks şudur: Tasarım faaliyetleri, toplam ürün geliştirme bütçesinin (Ar-Ge giderlerinin) genellikle %5’inden daha azını oluşturur. Ancak bu %5’lik dilimde alınan kararlar, ürünün nihai birim maliyetinin %70 ila %80’ini geri döndürülemez bir şekilde belirler -literatürdeki tabiriyle kilitler- (Boothroyd vd., 2010).

Bu duruma maliyet kilitlenmesi paradoksu adı verilir. Tasarımcı bilgisayar ekranında bir çizgi çizdiğinde veya teknik resme bir tolerans değeri yazdığında, aslında aylar sonra atölyede gerçekleşecek nakit akışını o an taahhüt etmiş olur. Örneğin, bir mil çapı için 0,1 mm yerine 0,01 mm tolerans seçildiğinde, kâğıt üzerinde sadece bir “sıfır” rakamı değişmiş gibi görünür. Ancak imalat fiziğinde bu değişim; kaba tornalama ile bitirilebilecek bir işin, hassas taşlama operasyonuna evrilmesine, tezgâh saatinin üç katına çıkmasına ve hurda riskinin artmasına neden olur.

Maliyet ile tolerans arasındaki bu ilişki doğrusal değil, üsseldir. İstenen hassasiyet arttıkça, maliyet parabolik bir eğriyle yükselir. Tasarımcının, fonksiyonel bir zorunluluk (örneğin rulman geçmesi) olmadığı halde daha kaliteli olsun düşüncesiyle dar toleranslar vermesi, işletme kârlılığını baltalayan en yaygın mühendislik hatasıdır (Ulrich & Eppinger, 2011).

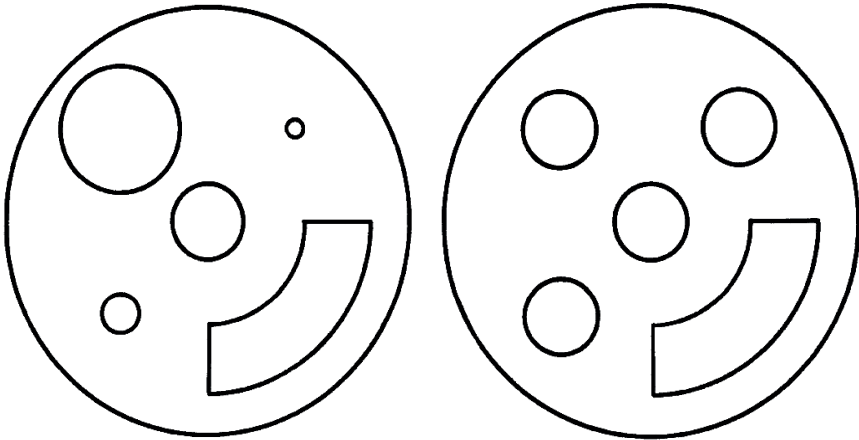
Sonuç olarak; tasarım süreci tamamlanıp teknik resimler üretim planlamaya devredildiğinde, maliyet yapısı artık donmuştur. Dünyanın en yetenekli imalat mühendisi veya en verimli CNC tezgâhı bile, kötü tasarlanmış bir parçanın maliyetini ancak marjinal düzeyde (%5-%10) iyileştirebilir. Ana

maliyet gövdesi, tasarımcının masasında çoktan şekillenmiştir. Bu nedenle maliyet düşürme çalışmaları atölyede değil, tasarım ofisinde başlamalıdır.

2.2. Standartlaşma ve Gizli Maliyetler

Talaşlı imalat maliyet analizi yapılırken genellikle sadece talaş kaldırma süresi dikkate alınır. Oysa toplam çevrim süresini ve birim maliyeti belirleyen en kritik faktörlerden biri, kesici takımın iş miline takılması ve sökülmesi sırasında geçen ölü zamandır. Endüstriyel literatürde talaştan-talaşa geçiş süresi olarak adlandırılan bu süre, modern işleme merkezlerinde 3 ila 10 saniye arasında değişmektedir. Tasarımcının parça üzerindeki geometrik unsurları (delik çapları, köşe radyusları, dış formları) gereksiz yere çeşitlendirmesi, tezgâhın sürekli takım değiştirmesine ve üretim veriminin düşmesine neden olur.

Bu durumu somut bir örnekle açıklamak gerekirse; bir gövde parçası üzerinde mukavemet açısından kritik bir fark yaratmayacak şekilde M4, M5 ve M8 olmak üzere üç farklı vida deliği tasarlandığını varsayalım. Bu tasarımın üretilebilmesi için tezgâhın magazininden sırasıyla üç farklı matkap ve üç farklı kılavuz çağırması gerekecektir. Toplamda 6 kez takım değişimi anlamına gelen bu senaryo, sadece takım değiştirme hareketleri için yaklaşık 40-50 saniyelik bir kayıp zaman yaratır. Oysa tasarımcı, bu deliklerin tamamını tek bir standart ölçüye (örneğin M6) sabitleseydi, tezgâh tek bir matkap ve tek bir kılavuzla tüm operasyonu kesintisiz tamamlayabilecekti.



Şekil 1. Tasarımda delik çaplarının standartlaştırılmasının işlem süresine etkisi. Sol: Gereksiz çeşitlilik - 3 farklı takım değişimi, Sağ: Optimize edilmiş standart yapı - tek takım kullanımı (Bode, 1996).

Standartlaşma eksikliğinin yarattığı maliyet yükü sadece tezgâh süresiyle sınırlı değildir; aynı zamanda stok ve envanter maliyeti üzerinde de çarpan

etkisi yaratır. Fabrika sahasında kullanılan her farklı özel takım, satın alma departmanı için yeni bir tedarik kalemi, depo sorumlusu için ayrılması gereken yeni bir raf ve kalite kontrol birimi için doğrulanması gereken yeni bir master demektir. Özellikle matkap ucu, parmak freze gibi sarf malzemelerinde çeşitliliğin artması, işletmenin bağlanan sermayesini gereksiz yere şişirir ve üretim hattında yanlış takımın yanlış deliğe uygulanması gibi hata risklerini artırır.

Bu bağlamda DfM disiplini, tasarımcıya şu altın kuralı önerir: fonksiyonel bir zorunluluk olmadıkça, asla yeni bir takım çapı icat etme. İşletmenin hâlihazırda kullandığı standart takım kütüphanesine sadık kalarak yapılan bir tasarım, sadece üretim hızını artırmakla kalmaz; aynı zamanda operasyonel karmaşıklığı minimize ederek yalın üretim hedeflerine hizmet eder.

2.3. Malzeme Seçimi ve İşlenebilirlik

Tasarım mühendisleri malzeme seçimi yaparken genellikle akma dayanımı, yorulma ömrü ve korozyon direnci gibi fonksiyonel özelliklere odaklanırlar. Ancak üretim mühendisliği perspektifinden bakıldığında, bir malzemenin en belirleyici özelliği işlenebilirlik derecesidir. İşlenebilirlik; bir malzemenin kesici takım tarafından ne kadar kolay kesilebildiğini, yüzey kalitesinin ne kadar temiz çıktığını ve takım ömrünü ne kadar kısalttığını ifade eden, maliyetle doğrudan ilişkili bir parametredir.

Literatürde işlenebilirlik genellikle AISI B1112 (otomat çeliği) referans alınarak (işlenebilirlik indeksi %100) tanımlanır. Tasarımcının bu indeksi göz ardı ederek yaptığı seçimler, üretim maliyetlerini dramatik şekilde artırabilir. Örneğin, bir makine parçası için korozyon direnci gerekmediği halde, sırf daha kaliteli görünmesi veya stokta bulunması nedeniyle AISI 1040 ıslah çeliği yerine AISI 304 paslanmaz çelik seçilmesi, işleme maliyetini yaklaşık 3 ila 4 kat artırır. Çünkü paslanmaz çelik, yüksek deformasyon sertleşmesi eğilimi nedeniyle kesme hızlarının düşürülmesini zorunlu kılar. Düşük kesme hızı, doğrudan artan tezgâh Saati maliyeti demektir.

Bralla (1999) bu konuda tasarımcılara şu prensibi hatırlatır: parçanın fonksiyonunu riske atmadan, her zaman işlenebilirliği en yüksek malzemeyi seçin. Özellikle seri üretimde, malzemenin birim fiyatından ziyade, o malzemenin talaşa dönüşürken harcadığı enerji ve takım maliyeti belirleyicidir. Titanyum veya Inconel gibi egzotik malzemeler, sadece havacılık gibi zorunlu alanlarda kullanılmalı; genel makine imalatında ise kükürt veya kurşun ilaveli otomat çelikleri tercih edilmelidir.

3. Konstrüksiyon Kuralları

İmalat odaklı tasarımın özü, sadece parça geometrisini oluşturmak değil; o geometriyi oluşturacak kesici takımın fiziksel sınırlarına ve hareket kabiliyetine saygı duymaktır. Tasarımcı, CAD ekranındaki sanal uzayda çalışırken yerçekimsiz, sürtünmesiz ve sonsuz rijitliğe sahip bir ortamdadır. Ancak teknik resim üretim sahasına indiğinde; kesme kuvvetleri, takım esnemesi, titreşim ve talaş sıkışması gibi fiziksel gerçekler devreye girer.

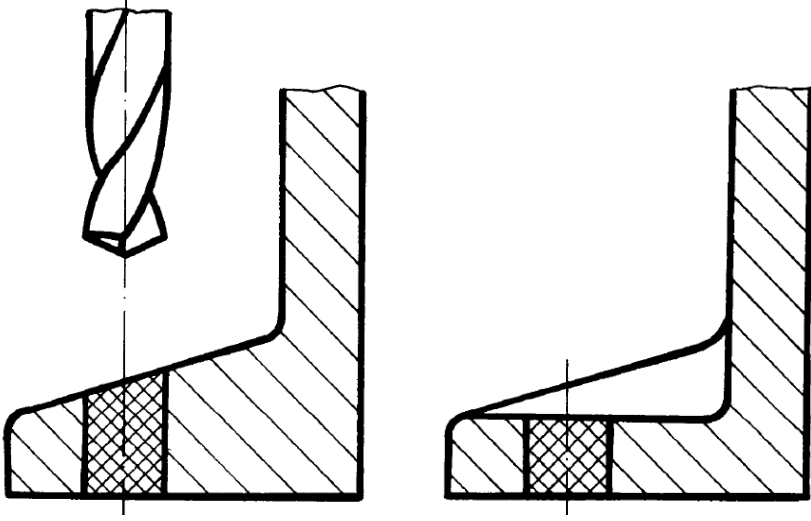
Bu bölüm, talaşlı imalat operasyonlarının en yaygın üç temel süreci olan delik delme, frezeleme ve tornalama işlemleri için en temel konstrüksiyon kurallarını ele almaktadır. Aşağıda sunulan prensipler; endüstriyel tecrübeyle doğrulanmış doğru/yanlış kıyaslamalarına dayanmaktadır.

3.1. Delik Delme İşlemleri

Talaşlı imalatla üretilen parçaların istatistiksel analizi yapıldığında, operasyonların yaklaşık %40'ının delik delme ve ilgili süreçlerden oluştuğu görülmektedir. Takımın kapalı bir hacim içinde çalışması ve kesme bölgesini görmenin imkânsızlığı, bu süreci tasarım hatalarına karşı hassas hale getirir. Bu kapsamda, giriş yüzeyi geometrisi ve derinlik yönetimi olmak üzere iki temel kritik faktör öne çıkmaktadır.

Bir delik tasarımında dikkat edilmesi gereken ilk kural, matkap ucunun parça yüzeyiyle temas ettiği anın kinematiğidir. Standart helisel matkaplar, düz ve eksenlerine dik (90°) bir yüzeye temas ettiklerinde kararlı çalışırlar. Ancak matkap, eğimli veya kavisli bir yüzeye giriş yapmaya zorlandığında fiziksel problemler başlar. Matkap ucu yüzeye asimetrik temas ettiğinde oluşan radyal kuvvetler, takımın merkezden saparak yüzeyde gezinmesine neden olur. Bu durum, deliğin konum toleransını bozar ve ince çaplı matkapların esneyerek kırılmasına yol açar. Ayrıca matkabın parçadan çıktığı arka yüzeyin eğimli olması da takımın aniden boşa çıkmasına ve çıkışta çapak oluşumuna sebebiyet verir.

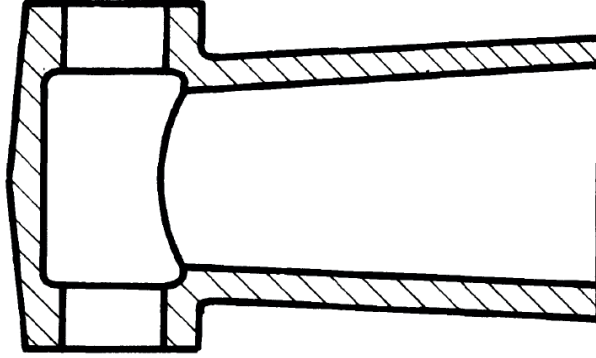
Tasarımcı, eğimli bir yüzeye delik delmek zorundaysa, matkap eksenine dik olacak şekilde bir kертik veya döküm parçalar için bir kabartı tasarlamalıdır. Bu geometrik düzenleme, matkabın sapmasını engeller ve işlemin güvenliğini garanti altına alır.



Şekil 2. Eğimli yüzeylerde delik delme için hatalı ve doğru tasarım prensipleri (Bode, 1996).

Delik delme işlemlerindeki ikinci kritik konu ise derin delik yönetimidir. Mühendislikte derinlik/çap oranı ($L/D > 5$) arttıkça, talaşın helis kanallarından tahliyesi zorlaşır ve sürtünme yüzeyi artar. Bu durum, ısınmaya ve takımın eksenden sapmasına neden olur. İmalatta bu sorunu aşmak için kullanılan gagalamalı delik delme yöntemi ise işlem süresini ciddi oranda uzatır.

Bu noktada tasarımcılar için en etkili çözüm boşaltma tekniğidir. Eğer uzun bir parçanın boydan boya delinmesi gerekiyorsa ve orta kısımda hassas bir yataklama görevi yoksa, o bölgenin dolu bırakılmasına gerek yoktur. Orta kısım, döküm veya dövme aşamasında delik çapından daha geniş bırakılarak matkabın o bölgede “boşa çıkması” sağlanır. Böylece matkap, sadece giriş ve çıkıştaki kısa kılavuz bölgeleri işler. Bu yöntem, sürtünmeyi azalttığı gibi takımın sapma riskini de minimize eder.



Şekil 3. Derin deliklerde sürtünmeyi azaltan orta boşaltma tekniği (Bode, 1996).

Özetle; delik delme işlemlerinde matkabın yüzeye dik girmesini sağlamak ve gereksiz talaş kaldırma hacminden kaçınmak, parça maliyetini ve hurda oranını doğrudan düşüren temel tasarım kurallarıdır.

3.2. Frezeleme İşlemleri ve Takım Rijitliği

Talaşlı imalatın en çok yönlü operasyonu olan frezeleme, dönen bir kesici takımın sabit veya hareketli iş parçası üzerinden talaş kaldırması prensibine dayanır. Delik delme işleminin aksine, frezeleme operasyonunda kesici takım yanıl kuvvetlere maruz kalır. Bu durum, freze çakısının fiziksel olarak bir konsol giriş gibi davranmasına neden olur. Tasarımcı için frezeleme odaklı tasarımın altın kuralı, işte bu konsol girişin, yani kesici takımın rijitliğini korumaktır. Çünkü takım ne kadar esnerse, yüzey kalitesi o kadar bozulur, ölçü tamlığı kaybolur ve maliyetli tırlama titreşimleri oluşur.

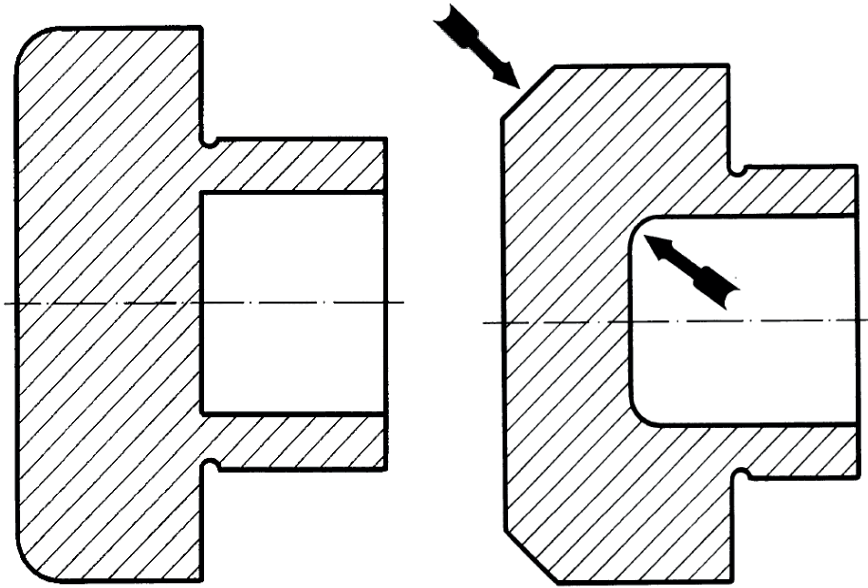
Frezeleme tasarımında en sık karşılaşılan darboğazlar, genellikle iç köşe radyusları ve derin cep geometrileri etrafında şekillenir.

Mühendislik tasarımlarında, özellikle birbiri içine geçen parçaların montajı için dik köşeli (90°) cepler veya havuzlar çizilmesi yaygındır. Ancak dönen bir takımın, doğası gereği keskin bir iç köşe oluşturması fiziksel olarak imkânsızdır. Bir freze çakısı ancak kendi yarıçapı kadar bir kavis bırakabilir. Tasarımcı teknik resimde bir iç köşeyi keskin olarak belirttiğinde, imalatçı bu formu elde etmek için frezeleme sonrası pahalı bir işlem olan elektro-erozyon (EDM) veya broşlama yöntemine başvurmak zorunda kalır. Bu, gereksiz bir maliyet artışıdır.

Daha yaygın bir hata ise, iç köşe radyusunun, kullanılacak takımın yarıçapına birebir eşit tasarlanmasıdır. Teorik olarak mantıklı görünen bu yaklaşım, imalat dinamiği açısından felakettir. Freze takımı köşeye tam

çapıyla girdiğinde, takımın parça ile temas açısı aniden artar. Takım, köşede adeta boğulur, talaşı atamaz ve yüksek bir radyal kuvvet darbesi yer. Bu durum, takımın duraksamasına, köşede iz bırakmasına ve şiddetli titreşime yol açar. Her zaman kullanılacak standart takımın yarıçapından biraz büyük olmalıdır. Örneğin, 10 mm çapında (R5) bir parmak freze kullanılacaksa, iç köşe yarıçapı R5 yerine R6 veya R5,5 olarak tasarlanmalıdır. Bu fazladan boşluk, takımın köşeyi dönmesi için bir hareket alanı yaratır. Takım köşede durmak zorunda kalmaz, yumuşak bir yay çizerek hareketine devam eder. Bu sayede kesme kuvvetleri sabit kalır ve yüzey kalitesi mükemmelleşir.

Buna ek olarak DfM disiplini iki temel geometrik kural önerir: içte yarıçap, dışta pah. Freze takımı doğası gereği silindirik olduğu için iç köşelerde mutlaka bir kavis (yarıçap) bırakılmalıdır; keskin bir iç köşe ancak pahalı ek işlemlerle (EDM) üretilebilir. Buna karşın, parçanın dış köşelerinde yarıçap yerine pah tercih edilmelidir. Çünkü dış köşeye yarıçap vermek, frezenin enterpolasyon yapmasını gerektirirken; pah kırmak, standart bir pah çakısıyla tek geçişte ve çok daha hızlı yapılabilir.



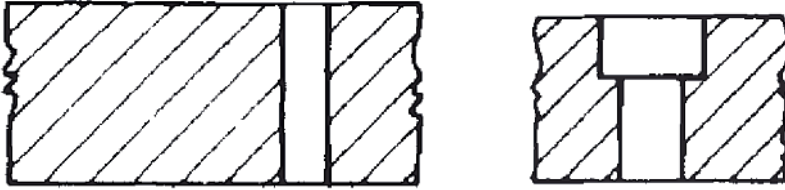
Şekil 4: Frezeleme için köşe tasarımı optimizasyonu. Sol: Üretilmesi zor ve pahalı tasarım (Keskin iç köşeler; radyuslu dış köşeler). Sağ: Ekonomik tasarım (Radyuslu iç köşeler; pah kırılmış dış köşeler) (Bode, 1996).

İkinci kritik konu, derin cep tasarımlarıdır. Havacılık ve kalıpcılık sektörlerinde sıkça rastlanan derin boşaltmalar, takım rijitliğinin en büyük düşmanıdır. Bir parmak frezenin esneme miktarı, uzunluğunun küpü (L^3)

ile doğru orantılıdır. Yani tasarımcı, 50 mm derinliğindeki bir cep yerine 100 mm derinliğinde bir cep çizdiğinde, derinliği sadece 2 kat artırmış olur; ancak takımın esneme eğilimini (veya rijitlik kaybını) matematiksel olarak 8 kat artırır.

Derin ceplerde çalışmak zorunda kalan uzun ve ince takımlar, kesme kuvvetleri altında kamçı etkisi göstererek titreşir. İmalatçı bu titreşimi önlemek için kesme hızını ve ilerlemeyi dramatik şekilde düşürmek zorunda kalır. Sonuç; saatlerce süren pahalı bir operasyon ve dalgalı bir yüzeydir.

Tasarımcılar için bu konudaki çözüm stratejisi, L/D (Boy/Çap) oranını kontrol altında tutmaktır. Genel makine imalatında L/D oranın 3:1 veya en fazla 4:1 olması idealdir. Eğer daha derin bir cep gerekliyse, tasarımcı duvarlara koniklik vermelidir. Duvarlara verilecek 1° veya 2° ’lik bir eğim bile, imalatçının konik ve çok daha rijit bir takım kullanmasına olanak tanır. Ayrıca, cebin taban yarıyslarının büyük tutulması, küresel uçlu takımların kullanımına izin vererek takım ömrünü artırır. Şekil 5, takım boyunun esnemeye olan etkisini ve doğru cep tasarımını özetlemektedir:



Şekil 5: Takım boyunun rijitliğe etkisi. Uzun takımlarda esneme ile artar; derin ceplerde geniş yarıyslar veya konik duvarlar tercih edilmelidir (Bralla, 1999).

Özetle, frezeleme operasyonları için yapılan tasarımlarda keskin köşelerden kaçınmak ve derinlikleri takım çapına oranla makul seviyelerde tutmak, parçanın sadece üretilebilirliğini değil, aynı zamanda boyutsal hassasiyetini de garanti altına alır. Unutulmamalıdır ki, rijit bir takım, hassas bir parça demektir.

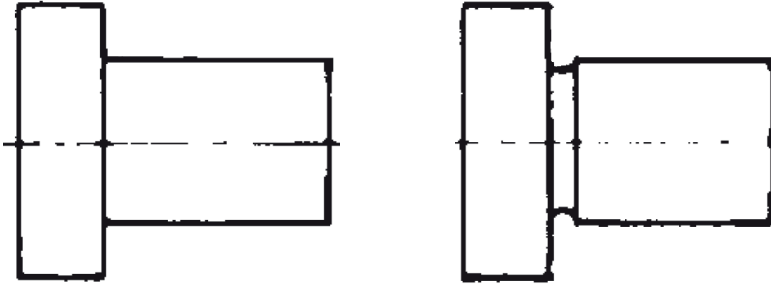
3.3. Tornalama ve Parça Bağlama Stratejileri

Talaşlı imalatın en yaygın yöntemi olan tornalama, iş parçasının döndüğü ve kesici takımın sabit durarak doğrusal hareket ettiği, doğası gereği yüksek merkezkaç kuvvetlerinin ve dinamik yüklerin olduğu bir süreçtir. Bu operasyonlarda tasarımcının yönetmesi gereken kritik süreç, sadece dış profilin oluşturulması değil, aynı zamanda parçanın tezgâha nasıl sabitleneceğinin ve montaj yüzeylerinin nasıl birleşeceğinin kurgulanmasıdır. Özellikle

kademeli millerin tasarımında yapılan geometrik hatalar ve parça bağlama referanslarının eksikliği, üretim sahasında en sık karşılaşılan darboğazlardır.

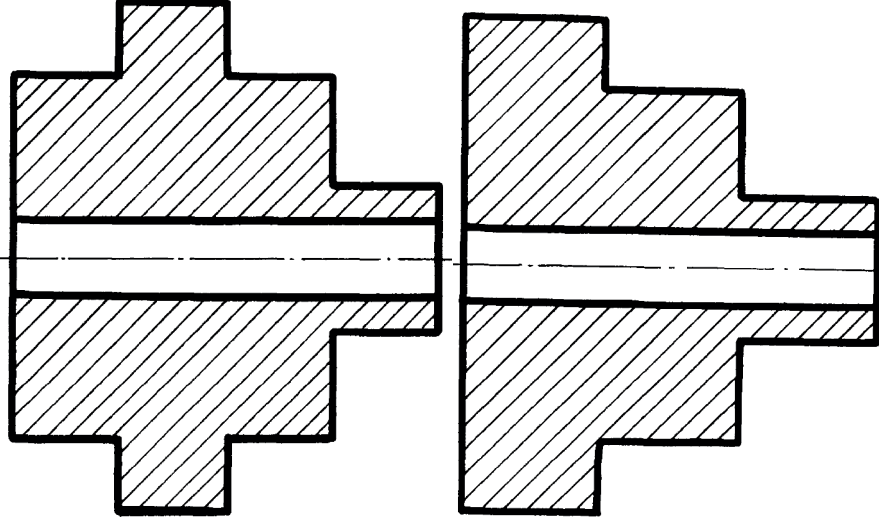
Tornalama işlemlerinde ilk dikkat edilmesi gereken husus, köşe geometrileri ve montaj ilişkisidir. Tornada kullanılan kesici uçlar, kırılma direncini artırmak amacıyla mutlak sivri bir köşeye sahip değildir; uçlarda her zaman standart bir yarıçap bulunur. Bu fiziksel gerçeklik, tasarımcının teknik resimde çizdiği keskin 90° köşelerin, pratikte asla elde edilemeyeceği anlamına gelir. Tasarımcı, bir mil faturasını dik köşe olarak tasarlayıp, buraya keskin köşeli bir rulman veya dişli monte etmeyi planladığında, ciddi bir montaj sorunu ortaya çıkar. Takımın bıraktığı yarıçap, karşı parçanın köşesine çarparak tam oturmayı engeller.

Bu sorunu çözmek için uygulanan DfM kuralı kanal açma tekniğidir. Montaj yüzeylerinin birleştiği köşelerde, takım ucunun rahatlaması için standartlara uygun bir kanal açılmalıdır. Bu kanal, montaj yapılacak parçanın köşesi ne kadar keskin olursa olsun faturaya tam ve dik oturmasını garanti eder. Ayrıca mil ısıtıl işleminden sonra taşlanacaksa, taşlama taşının köşeye çarpmasını engelleyerek takım ömrünü uzatır.



Şekil 6. Tornada köşe birleşimleri için kanal açma prensibi (Bralla, 1999).

Montaj uyumu kadar önemli bir diğer husus da Kademelerin Yönelimidir. Tornalama işlemi sırasında kesici takımın (kater) sürekli parça üzerinde kalması ve boşa çıkma hareketlerinin minimize edilmesi istenir. Şekil 7’de görüldüğü üzere, çapların karışık bir sırayla büyüyüp küçüldüğü tasarımlar, takımın defalarca geri çekilmesini ve yeniden pozisyon almasını gerektirir. Oysa çapların tek bir yönde (genellikle ayna tarafına doğru) kademeli olarak arttığı tasarımlar, takımın tek bir kesintisiz pasoda tüm profili işlemesine olanak tanır. Bode (1996), bu tek yönlü tasarım kuralının işlem süresini %20 -%30 oranında kısalttığını belirtmektedir.



Şekil 7: Tornalama parçalarında kademe yönü optimizasyonu. Sol: Çift yönlü kademeler nedeniyle karmaşık takım yolu ve artan maliyet. Sağ: Tek yönde artan kademeler sayesinde kesintisiz işleme ve düşük maliyet (Bode, 1996).

İmalat sürecinin bir diğer kritik ayağı ise parçanın tezgâha bağlanmasıdır. Mühendislikte sıkça tekrarlanan bir parçayı ancak tutabildiğiniz kadar hassas işleyebilirsiniz ilkesi, tasarım aşamasında genellikle göz ardı edilir. Oysa işleme kuvvetleri, parçayı yerinden sökmeye veya esnetmeye çalışır. Yetersiz bağlama, parçanın fırlaması gibi güvenlik risklerine veya tolerans dışı üretime yol açar.

Tasarımcı, parçanın ham kütük halindeyken tezgâha nasıl sabitleneceğini düşünerek bağlama dostu tasarım yapmalıdır. Özellikle döküm veya dövme gövdelerde, mengenelerin parçayı kavrayabilmesi için karşılıklı en az iki paralel yüzey tasarlanmalıdır. Eğer parça tamamen amorf bir yapıya sahipse, tasarım aşamasında parçaya geçici bağlama kulakları eklenmesi, pahalı özel fikstür ihtiyacını ortadan kaldırır. Ayrıca, parçanın sıkılacağı bölgelerin ince cidarlı olmamasına dikkat edilmelidir; aksi takdirde mengine baskısı altında elastik deformasyona uğrayan parça, söküldüğünde eski formuna dönerek dairesellik hatası yaratır.

Parçanın uzaydaki serbestlik derecesinin doğru kısıtlanması için net ve işlenmiş referans yüzeylerin belirlenmesi şarttır. Ham yüzeyden referans almak, döküm hatalarını nihai ürüne taşıyacağından, tasarımcı rijit destek noktalarını teknik resimde açıkça belirtmelidir.

Özetle; tasarımcı sadece kesici takımın ne yapacağını değil, parçanın tezgâhta nasıl duracağını da hayal etmelidir. Kanal açarak takımın rahatlatılması ve rijit bağlama yüzeylerinin tasarlanması, hurda oranını minimize eden en temel konstrüksiyon önlemleridir.

3.4. Taşlama ve Takım Erişimi

Talaşlı imalat süreçlerinin başarısı, kesici takımın iş parçasına sadece temas etmesine değil, aynı zamanda o bölgeye güvenli bir şekilde ulaşıp görevini tamamladıktan sonra serbestçe uzaklaşabilmesine bağlıdır. Tasarımcılar genellikle parçanın nihai geometrisine odaklanırken, o geometriyi oluşturacak takımın fiziksel hacmini, takım tutucunun kapladığı alanı ve tezgâhın eksen limitlerini göz ardı etme eğilimindedir. Özellikle dar toleranslı yüzeylerin elde edilmesi için zorunlu olan taşlama operasyonları ve karmaşık parçalardaki kör noktalar, imalat mühendisliğinin en temel kısıtı olan erişilebilirlik problemini doğurur.

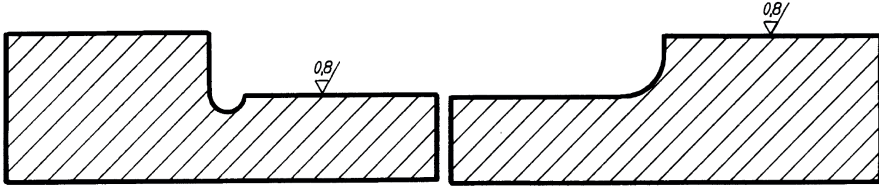
Talaşlı imalatın son aşaması genellikle taşlamadır. Isıl işlem görmüş, sertliği 60 HRC seviyelerine çıkmış bir parçanın yüzey pürüzlülüğünü $Ra < 0,8 \mu m$ seviyesine indirmek ve boyutsal hassasiyeti mikron mertebesinde tutmak için taşlama zorunludur. Ancak taşlama taşları, matkap veya parmak freze gibi ince ve uzun takımlar değildir; genellikle geniş çaplı diskler veya çanak formunda kütsel takımlardır. Bu durum, taşın dar alanlara girmesini veya bir duvara sıfır yanaşmasını imkânsız kılar.

Tasarımda yapılan en yaygın hata, taşlanması gereken hassas bir yüzeyin, taşlanmayacak yüksek bir duvarla veya çıkıntıyla aynı düzlemde bitirilmesidir. Örneğin, bir döküm gövdenin sadece vida bağlantı yüzeylerinin taşlanması gerekiyorsa ve bu yüzeyler gövdenin genel seviyesiyle aynı kotta tasarlanmışsa, taşlama taşı kaçınılmaz olarak yan duvarlara çarpacaktır. Ayrıca, taşlama taşının köşeleri zamanla aşınır ve yarıçap yapar. Bu nedenle, taşın girdiği köşede her zaman bir yarıçap kalır; dik bir köşe elde edilemez.

Bu fiziksel kısıtı aşmak için uygulanan DfM kuralı yüzey yükseltme prensibidir. Taşlanacak yüzeyler, parçanın genel formundan daha yüksekte, adeta birer adacık (boss veya pad) şeklinde tasarlanmalıdır. Bu tasarımın sağladığı kritik avantajlar şunlardır:

1. **Takım Çıkış Payı (Over-run):** Taşlama taşı, yüzeyin bitiminden sonra bir miktar daha ilerleyerek tam düzlemselliği sağlar. Yükseltilmiş yüzey, taş bu boşluğu verir.
2. **Maliyet Düşüşü:** Parçanın tamamını taşlamak yerine sadece temas yüzeylerini (boss) taşlamak, işlem süresini %80 oranında kısaltır.

3. Köşe Koruması: Taşlama taşı yan duvarlara temas etmediği için, köşedeki radyus sorunu ortadan kalkar.

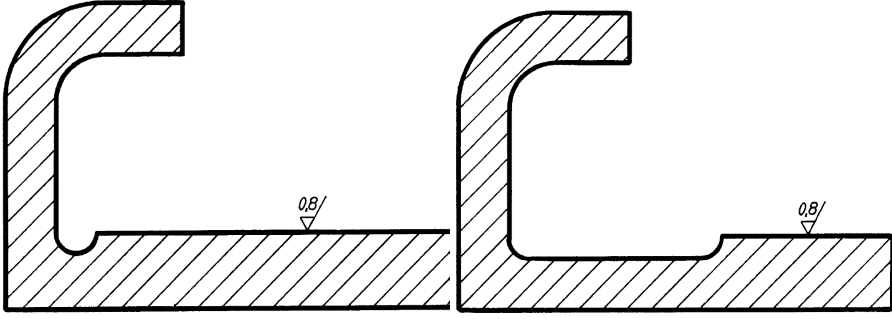


Şekil 8. Taşlama operasyonları için doğru yüzey tasarımı. (a) Yanlış: Yüzeyler aynı seviyede, taş yan duvara çarpıyor. (b) Doğru: Taşlanacak yüzey yükseltilerek takım için çıkış payı bırakılmış (Bode, 1996).

Erişilebilirlik sorunu sadece taşlamada değil, frezeleme ve delik delme işlemlerinde de tasarımcının karşısına çıkar. Temel kural, görüş hattı prensibidir: eğer kesici takım, işlenecek yüzeyi yukarıdan (Z ekseninden) doğrudan göremiyorsa, o yüzeyi standart takımlarla işleyemez.

Tasarımcıların sıklıkla çizdiği ters açılar, bu kuralın en sık ihlal edildiği geometrilere. Bir parçanın yan duvarının altına doğru giren bir kanal veya cep, standart 3 eksenli bir tezgâh için görünmez bölgededir. Bu formu işlemek için ya pahalı T-kanal frezeleri ve lolipop takımlar kullanılmalı ya da parça 5 eksenli bir tezgâhta işlenmelidir. Her iki çözüm de maliyeti dramatik şekilde artırır.

Daha da kritiği, takımın erişimi kadar, takım tutucunun erişimidir. Derin bir cebin dibindeki küçük bir detayı işlemek için kullanılan takım ne kadar uzun olursa olsun, tutucunun çapı genellikle takımdan büyüktür. Tasarımcı, takımın ucunun oraya değdiğini CAD ekranında görebilir, ancak gerçek hayatta takım tutucu, parçanın üst kenarına çarpar. Bu nedenle DfM yaklaşımı, derin bölgelerde geniş açılı girişler bırakılmasını veya parçanın montajlı tasarlanmasını önerir.



Şekil 9: Takım erişim analizi ve ters açısı sorunu. (a) Yanlış: Standart takımın ulaşamayacağı ters açısı (undercut) ve takım tutucu çarpışma riski. (b) Doğru: Ters açılarının kaldırılması veya takım erişimine uygun genişletilmiş geometri (Bode, 1996).

Sonuç burada ele alınan delik delme, frezeleme, tornalama ve taşlama kuralları, fiziksel dünyanın değişmez gerçeklerine dayanmaktadır. Takımlar esner, titrer, aşınır ve hacim kaplar. Başarılı bir konstrüksiyon, bu fiziksel limitlerle savaşıyor değil, onlarla uyum içinde olan tasarımıdır.

4. İleri İmalat Teknolojileri ve Endüstri 4.0

Önceki bölümlerde ele alınan konstrüksiyon kuralları, büyük ölçüde Kartezyen sistemin (X, Y, Z eksenleri) fiziksel sınırlarına dayanmaktadır. Klasik 3 eksenli tezgâhlarda, kesici takımın parçaya yaklaşma vektörü sabit (Z eksenine paralel) olduğundan, tasarımcılar ters açılardan kaçınmak ve derin ceplerde uzun takımlar kullanmak zorunda kalmıştır. Ancak Endüstri 4.0 çağında talaşlı imalat, mekanik bir süreç olmaktan çıkıp, dijital algoritmalarla yönetilen kinematik bir sanata dönüşmüştür. Bu dönüşümün ilk ve en somut adımı, 5 eksenli işleme teknolojisi.

4.1. 5-Eksenli İşleme ve Kinematik Özgürlük

5 eksenli işleme teknolojisi, standart doğrusal hareketlere (X, Y, Z) ek olarak iki rotasyonel eksenin (A, B veya C) sürece dahil edilmesiyle karakterize edilir. Bu teknoloji, tasarımcıya sunduğu kinematik özgürlük sayesinde, önceki bölümlerde üretilemez veya pahalı olarak nitelendirilen birçok geometriyi standart birer operasyona dönüştürmektedir.

Bu teknolojinin sağladığı en kritik avantaj, küresel uçlu takımların verimsizliği sorununu ortadan kaldırmasıdır. Bilindiği üzere, küresel bir takımın tam merkez noktası, teorik olarak sıfır kesme hızına sahiptir. 3 eksenli bir tezgâhta kavisli bir yüzey işlenirken, takım yüzeye dik durmak zorunda olduğu için kesme işlemi bu ölü nokta ile yapılır. Bu durum, malzemenin

kesilmek yerine ezilmesine, yüzey kalitesinin bozulmasına ve takım ömrünün kısılmasına neden olur.

5 eksenli stratejilerde tanımlanan lead (ilerleme) ve tilt (yatırma) açıları, bu fiziksel problemi zekice bir yöntemle çözer. Takım, yüzey normaline göre belirli bir açıda (genellikle $10^\circ - 15^\circ$) yatırılarak, kesme işleminin takımın ucunda (ölü nokta) değil, çevresel hızı yüksek olan yanal kesici kenarlarda gerçekleşmesi sağlanır. Bu kinematik manevra, talaş kaldırma verimini artırırken yüzey pürüzlülüğünü dramatik şekilde düşürür.

Ayrıca, 5 eksen teknolojisi erişilebilirlik sorununa getirdiği çözümle de tasarım paradigmalarını değiştirmiştir. Derin bir cebin işlenmesi sırasında 3 eksenli tezgâhta mecburen kullanılan uzun ve narin takımlar (yüksek L/D oranı), yerini parça geometrisine göre kendini konumlandırabilen kısa ve rijit takımlara bırakır. Takım tutucunun parçaya çarpmasını önlemek için yapılan bu oryantasyon, takım esnemesini minimize ederek tarak yüksekliği (scallop height) olarak bilinen yüzey dalgalanmalarını kontrol altına alır.

Sonuç olarak; 5 eksenli işleme, sadece karmaşık parçaların üretilmesini sağlayan bir yöntem değil, aynı zamanda kesme fizliğini optimize eden bir süreçtir. Güncel literatürde Seid Ahmed ve Amorim (2025), bu kinematik özgürlüğün yapay zeka destekli geometrik hata telafisi ile birleştiğinde, ultra-hassas üretimde mikron altı seviyelere ulaşılmasını mümkün kıldığını ve tasarımcıya neredeyse sınırsız bir form serbestisi sunduğunu vurgulamaktadır.

4.2. Yapay Zekâ Destekli Süreç Planlama

Bu çalışmanın önceki bölümlerinde detaylandırılan maliyet kilitlenmesi paradoksu, tasarımcının en büyük handikaplarından birisidir. Geleneksel süreçte tasarımcı, çizdiği geometrinin kaç dakikada işleneceğini veya ne kadara mal olacağını ancak teknik resim CAM departmanına ulaştığında öğrenebilir. Bu gecikmeli geri bildirim, maliyetin düşürülmesi için yapılacak revizyonları imkânsız veya çok pahalı hale getirir. Ancak yapay zekâ (AI) ve derin öğrenme algoritmalarının sürece entegre edilmesiyle, klasik Bilgisayar Destekli Süreç Planlama (CAPP) sistemleri, yerini öngörücü ve otonom planlama (AI-CAPP) sistemlerine bırakmaktadır.

Bu dönüşümün temelinde otomatik unsur tanıma teknolojisi yatmaktadır. Klasik CAD yazılımları, bir katı modeli sadece noktalar, çizgiler ve yüzeyler kümesi olarak görür. Oysa yapay zekâ destekli yeni nesil algoritmalar, modelin topolojisini tarayarak; bu silindirik boşluk bir kör deliktir, bu dikdörtgen boşluk bir cep unsurudur veya bu yüzey bir kanal yapısıdır şeklinde anlamsal çıkarımlar yapabilmektedir. Tasarımcı henüz çizgiyi çizerken, arka planda çalışan AI motoru, o geometrinin hangi takımlarla işlenebileceğini ve hangi

stratejinin (örneğin trokoidal frezeleme) uygun olduğunu otonom olarak belirler.

Sürecin asıl devrim niteliğindeki boyutu ise derin öğrenme modellerinin maliyet ve süre tahmininde kullanılmasıdır. Geleneksel yöntemlerde işleme süresini hesaplamak için tam teşekküllü bir NC kodu türetmek ve simülasyon yapmak gerekirken; modern yapay zekâ modelleri, geçmiş üretim verilerinden öğrendiği örüntüleri kullanarak saniyeler içinde yüksek doğrulukta tahminler yapabilmektedir.

Özellikle ardışık verilerin analizinde üstün başarı gösteren Bi-LSTM (Bidirectional Long Short-Term Memory) algoritmaları, bu alanda çığır açmıştır. Chien & Sencer (2024) tarafından yapılan güncel bir çalışma, Bi-LSTM tabanlı modellerin, sadece parça geometrisinden ve malzeme verisinden yola çıkarak, işleme döngü süresini %90'ın üzerinde bir doğrulukla tahmin edebildiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, karmaşık matematiksel formüllere veya G-kodu simülasyonuna ihtiyaç duymadan, yapay zekanın tasarımcıya anlık bir fiyat etiketi sunabileceğini kanıtlamaktadır.

Bu teknoloji sayesinde tasarımcı, parça üzerindeki bir cebin derinliğini 10 mm artırdığında veya köşe radiusunu R5'ten R2'ye düşürdüğünde; ekranın köşesinde bu değişiklik üretim maliyetini %15 artıracaktır uyarısını görebilmektedir. Böylece maliyet kilitlenmesi sorunu, daha kilit vurulmadan, tasarım aşamasında çözülmüş olur. Yapay zekâ, tasarımcıyı sadece geometri çizen bir teknik ressam olmaktan çıkarıp, maliyet ve performans optimizasyonu yapan bir karar vericiye dönüştürür.

4.3. Dijital İkiz ve Hata Telafisi

İleri imalat teknolojilerinin ulaştığı son nokta, fiziksel dünya ile sanal dünya arasındaki sınırların tamamen kalktığı dijital ikiz kavramıdır. Önceki bölümlerde detaylandırılan takım esnemesi, titreşim ve erişim kısıtları, geleneksel yöntemlerde genellikle deneme-yanılma yoluyla atölye sahasında çözülmeye çalışılırdı. Bu yaklaşım, ilk parçanın hurdaya ayrılmasını ve pahalı tezgâh saatlerinin israf edilmesini göze almayı gerektirirdi. Ancak sanal imalat (Virtual Manufacturing) paradigması, üretim sürecini ilk seferde doğru ilkesine dayandırarak bu israfı kökünden engellemektedir.

Dijital ikiz teknolojisinin tasarımcıya sunduğu ilk güvence, sanal doğrulama ve çarpışma önleme yeteneğidir. Modern CAM yazılımları, sadece takım yollarını değil, tezgâhın tüm kinematik yapısını (tabla, iş mili, fiktürler ve mengene grubu) sanal ortamda birebir modeller. Fiziksel talaş kalkmadan önce, üretilen NC kodları bu dijital ikiz üzerinde koşturulur. Sistem, takım tutucunun parçaya çarpma ihtimalini veya tezgâh eksenlerinin

limit dışına çıkma riskini %100 doğrulukla tespit eder. Özellikle karmaşık 5 eksenli operasyonlarda, insan gözünün takip edemeyeceği kadar karmaşık takım hareketleri, sanal ortamda doğrulanarak karanlık fabrikalarda bile güvenli üretim garanti edilir.

Sürecin daha derin boyutu ise fiziksel simülasyon yeteneğidir. Dijital ikiz, sadece geometrik bir doğrulama yapmakla kalmaz; aynı zamanda kesme kuvvetlerini ve takım esnemesini de simüle eder. Tasarımcının çizdiği derin bir cepte takımın ne kadar esneyeceği, henüz tasarım aşamasındayken hesaplanır. Eğer hesaplanan esneme miktarı tolerans sınırlarını aşıyorsa, sistem tasarımcıyı uyararak ya geometrinin değiştirilmesini ya da kesme parametrelerinin revize edilmesini önerir. Bu sayede, atölyede yaşanacak tırlama sorunu, daha oluşmadan sanal dünyada önlenmiş olur.

Ancak fiziksel dünyada değişkenler sabittir; tezgâhlar çalışırken ısınır ve takımlar aşınır. İşte bu noktada gerçek zamanlı hata telafisi devreye girer. Tezgâh gövdesine yerleştirilen hassas sensörler, iş milindeki termal genişmeyi veya takımdaki aşınmayı mikron seviyesinde algılar. Bu veriler, kontrol ünitesindeki dijital ikize anlık olarak iletilir. Yapay zekâ destekli kontrolcü, genişleme miktarı kadar takım yolunu otomatik olarak ofsetler (kaydırır).

Sonuç olarak; dijital ikiz teknolojisi, tasarımcı ve imalatçı arasındaki duvarları yıkan nihai araçtır. Tasarımcı, oluşturduğu geometrinin sadece şeklinden değil, o şeklin üretim sırasındaki fiziksel davranışından da haberdar hale gelir. Böylece talaşlı imalat odaklı tasarım, statik bir resim çizme işi olmaktan çıkıp, dinamik bir süreç yönetimine dönüşür.

5. Sonuç ve Değerlendirme

Endüstriyel üretim tarihinde, tasarım ve imalat disiplinleri uzun yıllar boyunca birbirinden yalıtılmış silolar halinde faaliyet göstermiştir. Klasik yaklaşımda tasarımcı, parçanın sadece nihai geometrisini ve fonksiyonunu tanımlayan kişi olarak görülmüş; bu geometrinin nasıl fiziksel bir varlığa dönüşeceği sorunu ise imalat mühendislerinin sorumluluğuna bırakılmıştır. Ancak bu kitap bölümünde detaylandırılan teknik ve ekonomik analizler, söz konusu duvarın üzerinden atma yaklaşımının, modern rekabet koşullarında sürdürülemez olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın en temel çıktısı, tasarımcının rolünün geometri çizeri olmaktan çıkıp, üretim süreçlerinin orkestra şefi konumuna evrildiği gerçeğidir. İncelediğimiz başlıklar ışığında, geleceğin başarılı tasarımcısı için üç temel yetkinlik alanı belirginleşmektedir:

Birincisi, Ekonomik Farkındalık yetkinliğidir. Bölüm 2’de irdelenen maliyet kilitlenmesi paradoksu, bir mühendisin sadece teknik doğruları değil, ticari gerçekleri de yönetmesi gerektiğini kanıtlamaktadır. Bir delik çapını standartlaştırmak veya bir toleransı optimize etmek, kâğıt üzerinde basit bir revizyon gibi görünse de işletme bilançosunda kaldırıcı etkisi yaratmaktadır. Dolayısıyla tasarımcı, kaleminin ucundaki her çizginin, atölyede bir takım değiştirme süresi veya stok maliyeti karşılığı olduğunu içselleştirmelidir.

İkincisi, fiziksel kısıtlara saygı yetkinliğidir. Bölüm 3’te Bode (1996) ve Bralla (1999) referanslarıyla sunulan konstrüksiyon kuralları, talaşlı imalatın en temel kurallarıdır. Sanal CAD ortamının yerçekimsiz ve kusursuz dünyasının aksine; gerçek dünyada takımlar esner, malzemeler titreşir ve tezgâhların erişim sınırları vardır. Başarılı bir tasarım, bu fiziksel sınırlarla savaşıyor değil, onlarla uyum içinde dans eden tasarımdır. Derin bir cep için geniş radyuslar bırakmak, matkap için giriş yüzeyini düzlemek veya taşıma taşı için çıkış payı vermek; tasarımcının tezgâhın dilinden anladığının en somut göstergesidir.

Üçüncüsü ve en günceli ise dijital simülasyon yetkinliğidir. Bölüm 4’te ele alınan Endüstri 4.0 vizyonu, fiziksel kuralların dijital araçlarla nasıl esnetilebileceğini göstermiştir. 5 eksenli işleme stratejileriyle erişilemez denilen yüzeylere ulaşmak, yapay zekâ algoritmalarıyla maliyeti anlık olarak tahmin etmek ve dijital ikiz teknolojisiyle hataları sanal dünyada sıfırlamak artık mümkündür. Ancak bu ileri teknolojiler, temel mühendislik bilgisini gereksiz kılmaz; aksine, bu araçları doğru kullanmak için daha derin bir kinematik ve fizik bilgisine ihtiyaç duyulur.

Sonuç olarak; talaşlı imalat odaklı tasarım (DfM), statik bir kurallar listesi değil, dinamik bir optimizasyon sürecidir. Bu süreçte mükemmellik; en karmaşık geometriyi çizmekle değil, geometri, takım ve tezgâh arasındaki hassas dengeyi kurmakla elde edilir.

Geleceğin hibrit mühendisleri; malzemeyi tanıyan, tezgâhın sesini duyan, takımın davranışını bilen ve tüm bu fiziksel süreci yapay zekâ destekli dijital ikizlerde simüle edebilen profesyoneller olacaktır. Bu çalışma, söz konusu çok disiplinli yetkinliğe ulaşma yolunda, akademik teori ile endüstriyel pratiği birleştiren bir rehber olarak literatürdeki yerini almayı hedeflemektedir. Mükemmel tasarım, sadece ne üretileceğini bilmek değil, nasıl üretileceğini hissetmektir.

6. Kaynakça

- Altintas, Y. (2012). *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design* (2. Baskı). Cambridge University Press.
- Anderson, D. M. (2020). *Design for manufacturability: How to use concurrent engineering to rapidly develop low-cost, high-quality products for lean production*. Productivity Press.
- Bi, Z. M., & Zhang, W. J. (2001). Modularity technology in manufacturing equipment for mass customization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(2), 138-143.
- Bode, E. (1996). *Konstruktionsatlas: Methodisches konstruieren* (6. Baskı). Springer Vieweg.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. A. (2010). *Product design for manufacture and assembly* (3. Baskı). CRC Press.
- Bralla, J. G. (1999). *Design for manufacturability handbook* (2. Baskı). McGraw-Hill Professional.
- Byrne, G., Dornfeld, D., & Denkena, B. (2003). Advancing cutting technology. *CIRP Annals*, 52(2), 483-507.
- Chien, A., & Sencer, B. (2024). Accurate prediction of five-axis machining cycle times with deep neural networks using Bi-LSTM. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 48, 28-41.
- DIN 509. (2006). *Technical drawings – Undercuts – Types and dimensions*. Deutsches Institut für Normung.
- Groover, M. P. (2021). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems* (7. Baskı). John Wiley & Sons.
- Koren, Y. (2010). *The global manufacturing revolution: Product-process-business integration and reconfigurable systems*. John Wiley & Sons.
- Pahl, G., & Beitz, W. (2021). *Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl.). Berlin, Almanya: Springer Vieweg.
- Seid Ahmed, Y., & Amorim, F. L. (2025). Advances in computer numerical control geometric error compensation: Integrating AI and on-machine technologies for ultra-precision manufacturing. *Machines*, 13(2), 140.
- Thursty, J. (2000). *Manufacturing processes and mechanics*. Prentice Hall.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2015). *Product design and development* (6. Baskı). McGraw-Hill Education.

Tasarım, Malzeme ve İmalat Odaklı Güncel Mühendislik Uygulamaları

Editörler:

Furkan Korkmaz

Abdurrahman Çetin