

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 çizebiliyorsa, 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).

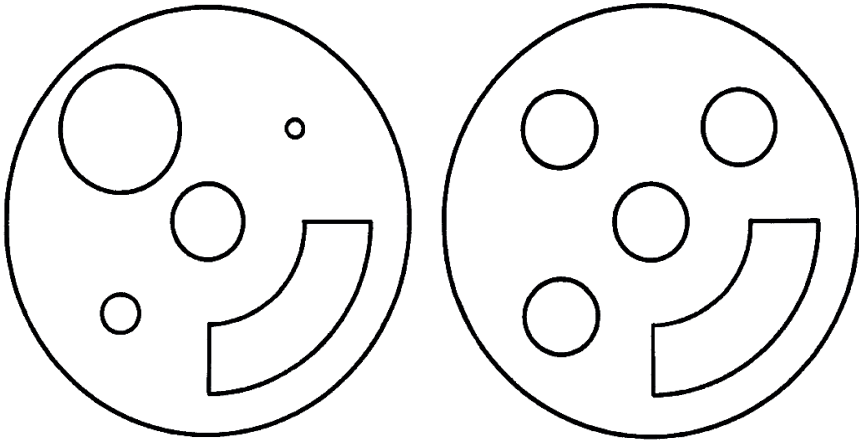
Sonuç olarak; tasarım süreci tamamlanıp teknik resimler üretim planlamaya devredildiğinde, maliyet yapısı artık donmuştur. Dünyanın en yetenekli imalat mühendisi veya en verimli CNC tezgâhı bile, kötü tasarlanmış bir parçanın maliyetini ancak marjinal düzeyde (%5-%10) iyileştirebilir. Ana

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.

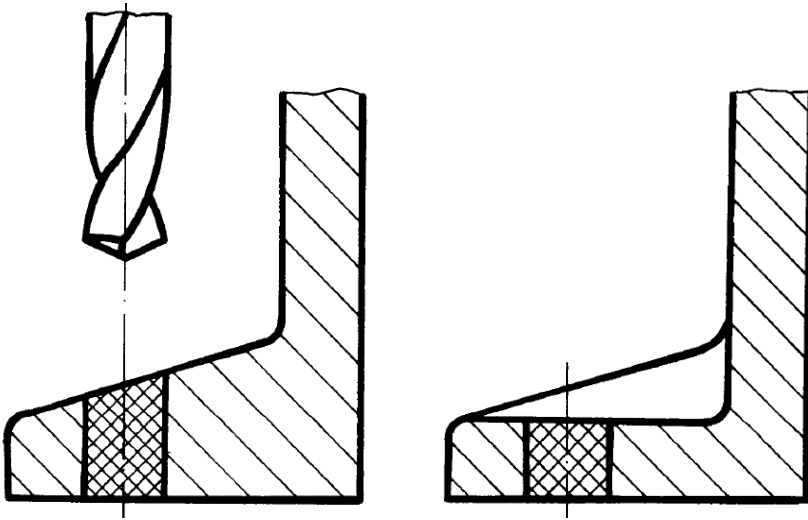
Bu bölüm, talaşlı imalat operasyonlarının en yaygın üç temel süreci olan delik delme, frezeleme ve tornalama işlemleri için en temel konstrüksiyon kurallarını ele almaktadır. Aşağıda sunulan prensipler; endüstriyel tecrübeyle doğrulanmış doğru/yanlış kıyaslamalarına dayanmaktadır.

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.

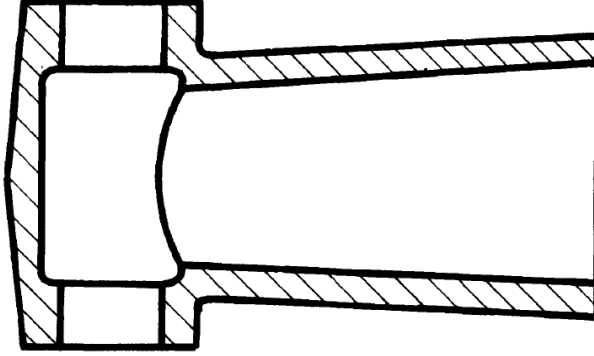
Tasarımcı, eğimli bir yüzeye delik delmek zorundaysa, matkap eksenine dik olacak şekilde bir kертik veya döküm parçalar için bir kabartı tasarlamalıdır. Bu geometrik düzenleme, matkabın sapmasını engeller ve işlemin güvenliğini garanti altına alır.



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.

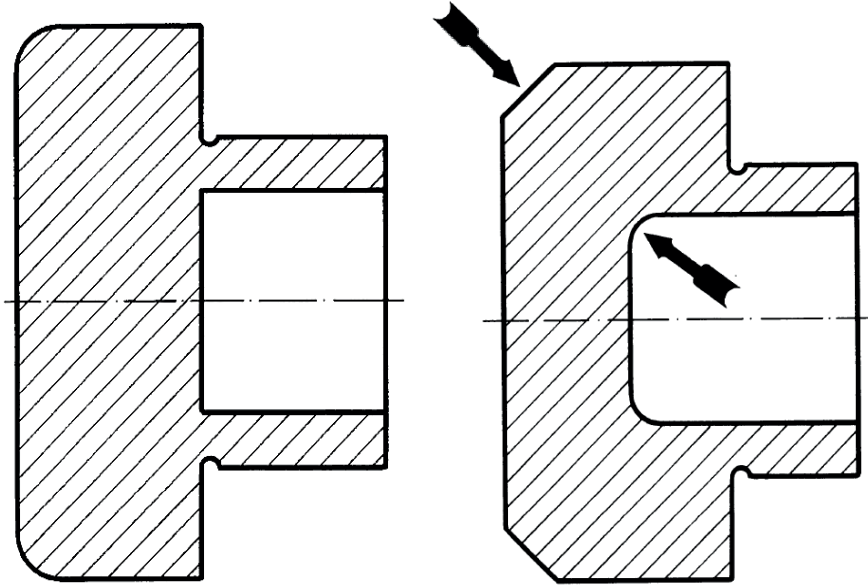
Frezeleme tasarımında en sık karşılaşılan darboğazlar, genellikle iç köşe radyusları ve derin cep geometrileri etrafında şekillenir.

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.



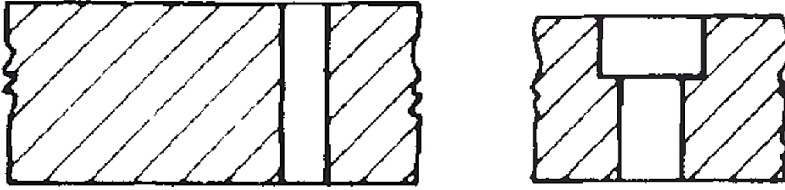
Şekil 4: Frezeleme için köşe tasarımı optimizasyonu. Sol: Üretilmesi zor ve pahalı tasarım (Keskin iç köşeler; radyuslu dış köşeler). Sağ: Ekonomik tasarım (Radyuslu iç köşeler; pah kırılmış dış köşeler) (Bode, 1996).

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.

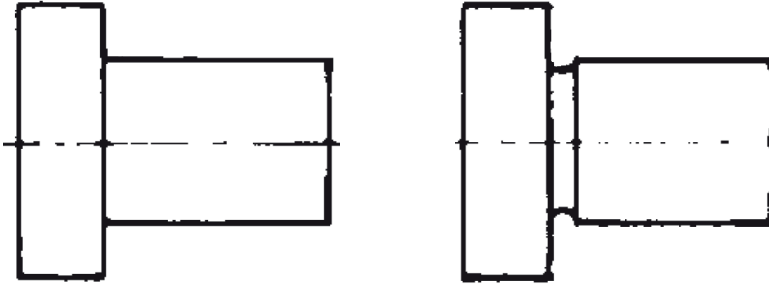
3.3. Tornalama ve Parça Bağlama Stratejileri

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.

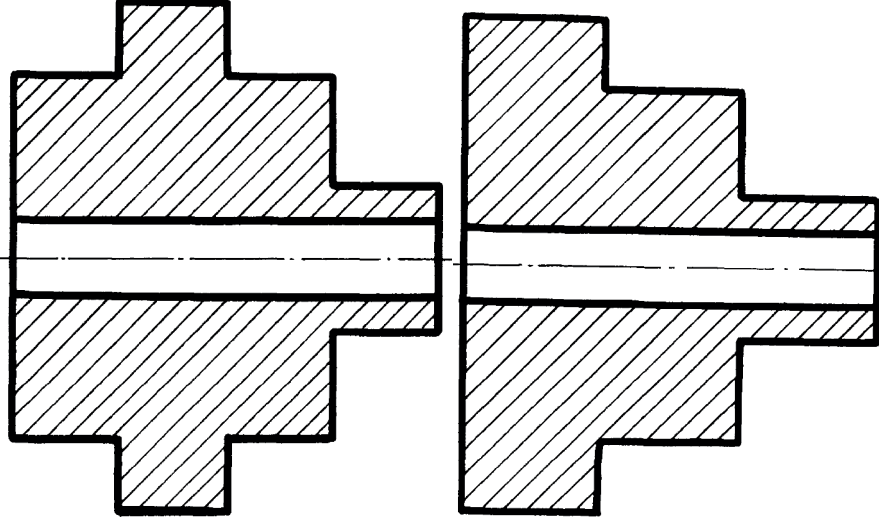
Tornalama işlemlerinde ilk dikkat edilmesi gereken husus, köşe geometrileri ve montaj ilişkisidir. Tornada kullanılan kesici uçlar, kırılma direncini artırmak amacıyla mutlak sivri bir köşeye sahip değildir; uçlarda her zaman standart bir yarıçap bulunur. Bu fiziksel gerçeklik, tasarımcının teknik resimde 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 mengene 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 ulaşip 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.

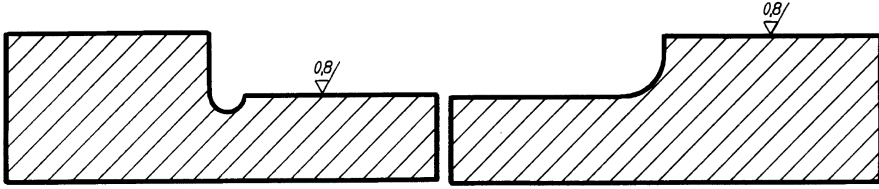
Talaşlı imalatın son aşaması genellikle taşlamadır. Isıl işlem görmüş, sertliği 60 HRC seviyelerine çıkmış bir parçanın yüzey pürüzlülüğünü $Ra < 0,8 \mu m$ seviyesine indirmek ve boyutsal hassasiyeti mikron mertebesinde tutmak için taşlama zorunludur. Ancak taşlama taşları, matkap veya parmak freze 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.

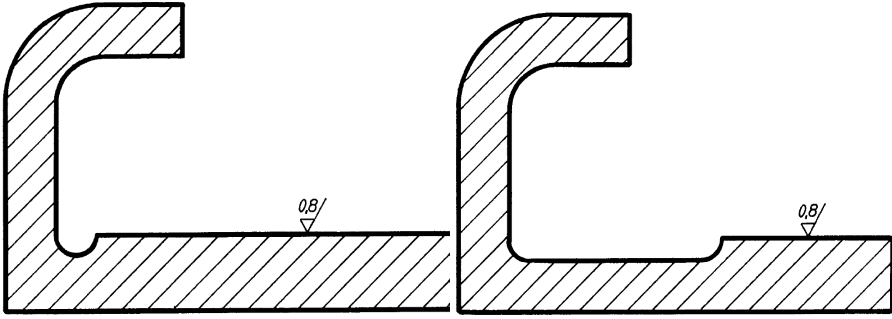


Şekil 8. Taşlama operasyonları için doğru yüzey tasarımı. (a) Yanlış: Yüzeyler aynı seviyede, taş yan duvara çarpıyor. (b) Doğru: Taşlanacak yüzey yükseltilerek takım için çıkış payı bırakılmış (Bode, 1996).

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 savaşıp 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 paradigmasını 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 koşuturulur. 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 uyarak 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.