

Döküm Odaklı Ürün Tasarımı ve Konstrüksiyon İlkeleri 3

Tuğçe Tezel¹

Volkan Kovan²

Özet

Mühendislik malzemelerinin şekillendirilmesinde köklü bir geçmişe sahip olan döküm teknolojisi, karmaşık geometrilerin tek parça halinde ve yüksek mukavemet değerlerinde üretilmesine olanak tanıyan üstün bir imalat yöntemidir. Ancak endüstriyel pratikte, tasarım ve üretim süreçleri arasındaki kopukluk ve tasarımcıların metalürjik süreçlere dair farkındalık eksikliği, sıklıkla üretilebilirlik sorunlarına, maliyet artışlarına ve kalite kayıplarına neden olmaktadır. Bu kitap bölümü, tasarım mühendislerine ve üreticilere yönelik olarak, “Döküm İçin Tasarım” prensiplerini teorik altyapı ve pratik uygulamalar ışığında sistematik bir yaklaşımla ele almaktadır. Çalışmada öncelikle, sıvı metalin akışkanlığı, katılaşma büzülmesi, ısı transferi ve yönlendirilmiş katılaşma gibi temel fiziksel olayların, parça geometrisi üzerindeki belirleyici rolü irdelenmiştir. Özellikle Bilgisayar Destekli Tasarım ortamında oluşturulan idealize edilmiş modellerin, dökümhane zeminindeki termodinamik gerçeklerle nasıl uyumlu hale getirileceği üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda; et kalınlığı homojenliği, kesit geçişlerinde kama kuralı, birleşim noktalarındaki sıcak noktaların yönetimi, feder tasarımı, maça dayanımı, çıkma açıları ve işleme paylarının optimizasyonu gibi kritik konstrüksiyon kuralları, doğru-yanlış kıyaslamalarıyla detaylandırılmıştır. Ayrıca, döküm simülasyon teknolojilerinin tasarım sürecindeki rolü ve sürdürülebilir üretim perspektifi tartışılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma, tasarımcının sadece fonksiyonel gereksinimleri değil, aynı zamanda metalin kalıp içerisindeki katılaşma serüvenini de öngörerek; hatasız, ekonomik ve yüksek kaliteli döküm parçalar tasarlamasına rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.

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

Mühendislik malzemelerinin şekillendirilme serüveninde döküm teknolojisi, hammaddenin sıvı fazdan katı faza kontrollü bir şekilde dönüştürülmesi prensibine dayanan ve insanlık tarihinin bilinen en köklü imalat yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bronz Çağı'ndan günümüze uzanan bu süreç, basit alet yapımından başlayarak evrilmiş; günümüzde ise malzeme bilimi, termodinamik ve akışkanlar mekaniğinin kesişim noktasında yer alan yüksek teknolojlili bir üretim disiplinine dönüşmüştür (Campbell, 2015). Endüstriyel üretim yöntemleri genel bir perspektifle incelendiğinde; malzemeyi eksilterek şekillendiren talaşlı imalat veya parçaları birleştirerek bütünleştiren kaynaklı imalat) yöntemlerinin aksine döküm, malzemeyi “oluşturarak” şekillendirme yeteneği ile ayrılmaktadır.

Bu ayrım, özellikle geometrik karmaşıklık arttıkça döküm teknolojisinin lehine işleyen belirleyici bir faktördür. Talaşlı imalat yöntemleri, karmaşık bir parçayı elde etmek için kütsel bir hammadde bloğundan büyük oranda malzeme kaldırılmasını gerektirir ki bu durum, talaş kaldırma oranı yüksek parçalarda ciddi bir hammadde ve enerji israfına yol açmaktadır (Groover, 2020). Kaynaklı yapılar ise, çok sayıda alt parçanın birleştirilmesini gerektirdiği için montaj işçiliği maliyetlerini artırmakta ve birleşme bölgelerinde yorulma dayanımını düşüren gerilme yığılmalarına neden olabilmektedir. Buna karşın döküm teknolojisi, en karmaşık iç boşluklara, değişken kesitli feder yapılarına ve kavisli yüzeylere sahip parçaları tek bir operasyonla, monolitik (tek parça) bir bütün halinde üretebilme kabiliyetine sahiptir (Beeley, 2001). Mühendislik literatüründe “Net Şekle Yakın” üretim olarak tanımlanan bu kabiliyet, nihai ürünün boyutlarına ve formuna en kısa yoldan ulaşılmasını sağlayarak, ikincil işlemleri minimize etmekte ve üretim ekonomisine doğrudan katkı sağlamaktadır.

Döküm teknolojisinin sunduğu bu avantajlar, onu sadece geleneksel makine imalatının değil, modern yüksek teknoloji endüstrilerinin de vazgeçilmez bir unsuru haline getirmiştir. Örneğin havacılık endüstrisinde, yüksek sıcaklık ve mekanik zorlanmalar altında çalışan süper alaşım türbin kanatçıklarının, iç soğutma kanalları ile birlikte tek kristal yapıda üretilebilmesi, günümüz teknolojisinde sadece hassas döküm yöntemiyle mümkündür (Jolly, 2005). Benzer şekilde otomotiv sektöründe, emisyon standartlarını karşılamak ve yakıt verimliliğini artırmak amacıyla gidilen hafifletme çalışmalarında, alüminyum ve magnezyum alaşımlı karmaşık motor blokları ve yapısal şasi parçaları, yüksek basınçlı döküm teknolojileri sayesinde hayat bulmaktadır. Enerji sektöründe ise, rüzgâr türbinlerinin devasa gövde parçalarından nükleer santrallerin kritik vana gövdelerine

kadar, güvenlik katsayısının hayati önem taşıdığı pek çok bileşen, döküm teknolojisinin sağladığı izotropik malzeme özellikleri ve tasarım esnekliği sayesinde üretilmektedir (Ravi, 2005). Dolayısıyla döküm, sanılının aksine sadece ağır sanayinin bir parçası değil, mikron mertebesindeki hassas medikal implantlardan tonlarca ağırlıktaki gemi parçalarına kadar geniş bir spektrumda modern mühendisliğin çözüm ortağıdır.

Ancak, döküm yönteminin mühendislere sunduğu bu sınırsız topolojik esneklik ve her şekli üretebilme vaadi, doğru bir mühendislik yaklaşımıyla yönetilmediğinde sürecin en büyük handikapına dönüşme potansiyeli taşımaktadır. Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımlarının son çeyrek asırda gösterdiği gelişim, tasarımcılara yerçekimsiz, sürtünmesiz ve idealize edilmiş bir sanal uzayda çalışma imkanı tanımaktadır. Bu dijital ortamda oluşturulan geometriler, matematiksel olarak kusursuz ve estetik açıdan etkileyici görünebilir. Ancak ekran başındaki tasarımcının “fare” hareketiyle saniyeler içinde oluşturduğu keskin bir köşe veya ani bir kesit daralması, dökümhane zeminindeki fiziksel gerçeklikte termodinamik yasalara çarpmaktadır. Sanal dünyadaki katı model, gerçek dünyada viskozitesi, yüzey gerilimi ve katılaşma büzülmesi olan agresif bir sıvı metal davranışı sergilemektedir (Campbell, 2003). Dolayısıyla, CAD ekranındaki ideal geometri ile dökümhanedeki üretilbilir parça arasında, çoğu zaman derin bir uçurum bulunmaktadır.

Tasarım mühendisliğinde sıkça rastlanan ve bu uçurumu derinleştiren temel bir metodolojik hata, ürünün tasarım aşamasında sadece fonksiyonel gereksinimlere odaklanılmasıdır. Tasarımcı, haklı olarak parça üzerindeki gerilme dağılımını, montaj boşluklarını veya aerodinamik formu optimize etmeye çalışır. Ancak bu odaklanma sırasında, o fonksiyonel hacmin fiziksel olarak nasıl var edileceği sorusu, yani üretilbilirlik parametresi, genellikle sürecin sonuna ertelenmektedir (Boothroyd vd., 2010). Oysa bir döküm parçasının yapısal bütünlüğü, geometrisinin sıvı metal akışına ve katılaşma yönlenmesine ne kadar izin verdiğiyle doğrudan ilişkilidir. Örneğin, mekanik dayanım açısından rijitliği artırmak için eklenen rastgele bir feder, eğer besleme yollarını tıkayan bir bariyer görevi görüyorsa, o bölgede oluşacak porozite nedeniyle parçanın dayanımını artırmak bir yana, dramatik ölçüde düşürecektir.

Bu kopukluk, endüstriyel üretim kültürü literatüründe “Duvarın üzerinden atma” (Throw it over the wall) yaklaşımı olarak tanımlanmakta ve modern üretim felsefelerinde şiddetle eleştirilmektedir (Anderson, 2014). Bu geleneksel yaklaşımda tasarım departmanı, ürünü kendi ofisinde izole bir şekilde tamamlar ve teknik resimleri üretim departmanına veya

tedarikçi dökümhaneye “duvarın üzerinden atar” gibi iletir. Bu noktadan sonra tasarımcı için iş bitmiş, dökümcü için ise sorunlar başlamış demektir. Dökümhane mühendisleri, kalıptan çıkması imkânsız olan ters açılar, beslenmesi mümkün olmayan izole kütleleri veya türbülansa neden olacak keskin dönüşleri fark ettiklerinde, süreç çoktan tıkanmıştır.

Bu senaryoda ortaya çıkan tablo genellikle şöyledir: Ya pahalı ve karmaşık maça sistemleri kullanılarak zorlama bir üretim yapılmaya çalışılır ki bu maliyeti artırır; ya da tasarım revizyonuna gidilerek süreç başa döner ki bu da pazara sürme süresini uzatır (Swift & Booker, 2013). Daha vahim olan senaryo ise, tasarımın üretilebilir ama kalitesiz olmasıdır; yani parça dökülür ancak içinde gizli döküm hataları barındırır. Bu durum, ürünün servis ömrü sırasında beklenmedik hasarlara yol açarak, maliyetin çok ötesinde güvenlik riskleri doğurur. Dolayısıyla, tasarımcının “ben çizerim, onlar döker” anlayışından sıyrılarak, çizdiği her çizginin kalıp içerisindeki metalurjik karşılığını sorguladığı bir farkındalık düzeyine erişmesi gerekmektedir.

Tasarım ve üretim süreçleri arasındaki bu kopukluğun yarattığı teknik sorunlar, kaçınılmaz olarak projenin ekonomik sürdürülebilirliğini de tehdit etmektedir. Günümüz rekabetçi küresel pazarında, bir mühendislik ürününün başarısını belirleyen faktörler sadece teknik performans ve fonksiyonellikle sınırlı değildir; maliyet etkinliği ve pazara giriş hızı, mühendislik kararlarının merkezinde yer almak zorundadır. Literatürde yapılan kapsamlı araştırmalar, ürün maliyetlerinin oluşum sürecine dair çarpıcı bir gerçeği ortaya koymaktadır: Tasarım faaliyetleri, bir ürünün toplam bütçesinin genellikle %5 gibi küçük bir kısmını oluşturmaya rağmen, nihai ürün maliyetinin yaklaşık %70 ila %80’ini tasarım aşamasında alınan kararlar belirlemektedir (Ullman, 2010). Bu durum mühendislik ekonomisinde sabitlenen maliyet paradoksu olarak bilinir. Yani tasarımcı, henüz ortada fiziksel bir ürün yokken, seçtiği et kalınlıkları, belirlediği toleranslar ve öngördüğü malzeme ile maliyetin büyük kısmını geri döndürülemez bir şekilde kilitlemiş olur. Döküm teknolojisi özelinde bu, kalıp malzemesinden soğuma süresine, ısı işlem gereksiniminden işleme paylarına kadar tüm gider kalemlerinin, aslında dökümhanede değil, tasarım masasında karara bağlandığı anlamına gelir.

Tasarım aşamasında gözden kaçırılan hataların veya üretilebilirlik kusurlarının maliyeti ise, ürün yaşam döngüsü boyunca doğrusal değil, üstel bir artış gösterir. Kalite yönetimi literatüründe “1-10-100 Kuralı” olarak bilinen bu prensip, döküm endüstrisi için hayati bir önem taşır (Anderson, 2014). Tasarım aşamasında (kâğıt üzerinde veya CAD ortamında) tespit edilen bir döküm hatasının düzeltilmesi, sadece mühendisin harcayacağı birkaç saatlik bir zamanı ve sembolik bir 1 birimlik maliyeti temsil eder.

Ancak bu hata fark edilmeyip kalıp üretimine geçildiğinde, hatanın telafisi için kalıbın revize edilmesi veya yeniden işlenmesi 10 birimlik bir maliyet ve ciddi bir zaman kaybı doğurur. En kötü senaryoda ise, hatalı parça dökülüp, işlenip müşteriye teslim edildikten sonra (örneğin araç üzerindeyken veya makine çalışırken) ortaya çıkacak bir hasar, 100 birimlik maliyetin de ötesinde, garanti kapsamındaki cezai yaptırımlara ve telafisi güç prestij kayıplarına yol açmaktadır. Dolayısıyla, döküm odaklı tasarım prensiplerinin uygulanması, sadece teknik bir mükemmeliyet arayışı değil, aynı zamanda stratejik bir risk ve maliyet yönetimi aracıdır.

Ekonomik denklemin bir diğer kritik değişkeni ise pazara sürme süresidir. Özellikle otomotiv ve tüketici elektroniği gibi dinamik sektörlerde, ürün yaşam döngüleri kısalmakta ve yeni bir ürünü rakiplerden önce piyasaya sunmak büyük bir rekabet avantajı sağlamaktadır (Clark & Fujimoto, 1991). Döküm, doğası gereği model ve kalıp hazırlığı gibi uzun hazırlık süreleri gerektiren bir yöntemdir. Tasarım kaynaklı bir hatanın döküm denemeleri sırasında fark edilmesi, haftalarca sürecektir yeni bir kalıp imalat döngüsünü tetikleyebilir. Bu gecikme, ürünün pazar payını kaybetmesine neden olabilir. Bu bağlamda, ilk seferde doğru üretim hedefi, ancak tasarımcının döküm prosesinin kısıtlarını ve gerekliliklerini tasarımın ilk aşamalarında (konsept safhasında) dikkate almasıyla, yani eş zamanlı mühendislik prensiplerini işletmesiyle mümkün olabilmektedir.

Geleneksel üretim paradigmasının yarattığı bu maliyet ve zaman darboğazlarını aşmak, sadece daha hızlı bilgisayarlar veya daha gelişmiş döküm makineleri kullanmakla değil, mühendislik sürecinin kendisini yeniden kurgulamakla mümkündür. Bu bağlamda, endüstriyel tasarım ve üretim literatüründe son otuz yıla damgasını vuran en köklü değişim, doğrusal süreç yönetiminden eş zamanlı mühendislik yaklaşımına geçiştir (Prasad, 1996). “Design for X” (DfX) şemsiyesi altında yer alan ve çalışmamızın odak noktasını oluşturan “Döküm İçin Tasarım” (Design for Casting - DfC), bu yaklaşımın döküm teknolojisine uyarlanmış halidir. Geleneksel yöntemde tasarım, analiz, prototip ve üretim planlama aşamaları birbirini izleyen ve birbirinden yalıtılmış vagonlar gibi ilerlerken; eş zamanlı mühendislikte bu süreçler iç içe geçmiş, döngüsel ve iteratif bir yapı sergiler. Bu modelde dökümhane uzmanı, henüz tasarım konsept aşamasındayken masada yerini alır ve parçanın geometrisi kesinleşmeden önce kalıplama stratejisine dair geri bildirimlerini sunar. Böylece, üretim kısıtları bir engel olarak değil, tasarımın sınır şartlarından biri olarak sürecin en başında tanımlanmış olur.

Bu metodolojik dönüşüm, tasarım mühendisinin yetkinlik setinde de köklü bir değişikliği zorunlu kılar. Tasarımcının sadece mukavemet

hesaplarına veya kinematik analizlere odaklanan mekanik bakış açısının yanına, metalürjik öngörü yeteneğini de eklemesi gerekmektedir. Metalürjik öngörü; bir parçayı tasarlarken onun sadece bitmiş halini değil, sıvı halden katı hale geçerken yaşayacağı termodinamik serüveni zihinde canlandırabilme yetisidir (Campbell, 2003). Tasarımcı, oluşturduğu her bir kesit değişiminin, eklediği her bir federin veya açtığı her bir boşluğun, kalıp içerisindeki ısı transferini ve katılma cephesinin ilerleyişini nasıl değiştireceğini sezgisel olarak kavrayabilmelidir. Örneğin, “L” tipi bir köşe birleşimini çizerken, o köşenin iç kısmında ısının hapsolacağını ve bu durumun yerel bir sıcak nokta yaratarak çekinti boşluğuna neden olacağını öngörebilmek, bu yetinin bir sonucudur. Bu öngörüye sahip bir tasarımcı, hatayı dökümden sonra röntgen filminde görmek yerine, tasarım aşamasında o köşeye bir radyus vererek veya et kalınlığını azaltarak bertaraf eder.

DfC prensiplerinin bir diğer kritik fonksiyonu ise, tasarım ofisi ile dökümhane zemini arasında köprü kuran “Ortak Dil” işlevini görmesidir. Mühendislik pratiğinde tasarımcılar ve dökümcüler genellikle farklı jargonlara sahiptir; biri gerilme yığılması, atalet moment, tolerans dilini konuşurken, diğeri yolluk sistemi, cüruf kapalı, kum yanması dilini konuşur. Bu iletişim kopukluğu, teknik resimlerin yanlış yorumlanmasına ve üretilemeyecek taleplerin ortaya çıkmasına neden olur. Döküm odaklı tasarım kuralları, bu iki dünya arasındaki gri alanları netleştiren evrensel bir gramer niteliğindedir (Czerwinski, 2011). Minimum et kalınlığı, çıkma açısı veya besleme mesafesi gibi kavramlar, bu ortak dilin kelimeleridir. Tasarımcının bu kurallara sadık kalarak oluşturduğu bir geometri, dökümcüye sadece ne istendiğini değil, aynı zamanda bunun fiziksel olarak mümkün olduğunu da söyler. Dolayısıyla bu bölümde ele alınacak olan kurallar bütünü, sadece teknik bir kılavuz değil, aynı zamanda disiplinler arası bir iletişim protokolüdür.

Tasarımcının döküm süreciyle kurması gereken bu entelektüel ilişkinin temelinde, döküm fiziksel realitesi yatmaktadır. Bilgisayar ekranındaki statik geometrinin aksine, dökümhane ortamında süreç, yüksek enerjili ve kaotik bir akışkanlar mekaniği problemiyle başlar. Erimiş metal, kalıp boşluğuna döküldüğü andan itibaren yerçekimi, viskozite ve yüzey gerilimi kuvvetlerinin etkisi altındadır. Burada tasarımcıyı ilgilendiren en kritik parametre, sıvı metalin akış rejimidir. İdeal bir döküm için laminar bir akış arzulanırken, hatalı tasarlanmış kesit geçişleri, ani yön değiştirmeler veya kontrolsüz döküş yükseklikleri, akışı türbülanslı hale getirir. Literatürde kritik hız kavramıyla açıklanan bu durum, erimiş metalin yüzeyindeki oksit filmlerinin yırtılarak metalin içine karışmasına ve hava kabarcıklarının yapı içinde hapsolmesine neden olur (Campbell, 2003). Örneğin, tasarımcının estetik kaygılarla oluşturduğu dar bir boyun veya keskin bir köşe, sıvı metalin o bölgeden

geçerken hızlanmasına (Venturi etkisi) ve jet etkisi yaratarak kalıp duvarlarını erozyona uğratmasına yol açabilir. Dolayısıyla, bir parçanın geometrisi, aslında sıvı metalin izleyeceği hidrodinamik yol haritasıdır ve bu harita ne kadar pürüzsüzse, iç yapı kalitesi o kadar yüksek olacaktır.

Sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurmasının ardından, sürecin ikinci ve belki de daha karmaşık olan evresi, yani katılaşma fiziği devreye girer. Metaller (bizmut ve galyum gibi istisnalar hariç) sıvı fazdan katı faza geçerken hacimsel olarak küçülürler. Bu katılaşma büzülmesi, termodinamik bir yasa olup tasarımcının pazarlık edemeyeceği bir gerçektir (Flemings, 1974). Eğer tasarım, metalin soğuma yönünü (termal gradyanı) dikkate almadan kurgulanmışsa, yani ince kesitlerin arkasında beslenemeyen kalın kütleler bırakılmışsa, bu hacimsel kayıp parça içinde boşluk (çekinti porozitesi) olarak kalacaktır. Döküm odaklı tasarımın altın kuralı olan yönlendirilmiş katılaşma ilkesi tam da bu noktada devreye girer: Katılaşma, parçanın en uç noktasından başlayıp besleyiciye doğru ilerlemelidir. Tasarımcının görevi, geometriyi bu termal patikayı destekleyecek şekilde, yani besleyiciye doğru giderek genişleyen (veya en azından daralmayan) bir formda kurgulamaktır.

Ancak fiziksel realite sadece boşluk oluşumuyla sınırlı değildir; katılaşma sırasındaki ve sonrasındaki soğuma rejimi, parça üzerinde ciddi termal gerilmeler indükler. Farklı et kalınlıklarına sahip bölgeler farklı hızlarda soğur; ince kısımlar hızla katılaşp büzülürken, kalın kısımlar hala plastik veya sıvı haldedir. Bu durum, parça içinde çekme ve basma gerilmelerinin savaşına neden olur. Eğer geometri, bu doğal büzölmeye izin vermeyecek kadar rijitse (örneğin, büyük bir çemberin içindeki ince kollar gibi), malzeme kendi iç gerilmesine yenik düşer veya kalıcı deformasyona (çarpılma) uğrar ya da sıcak yırtılma adı verilen çatlaklarla parçalanır (Hatton et al., 2006).

İşte bu nedenle, “Neden her geometri dökülemez?” sorusunun cevabı, imalat yeteneksizliğinde değil, fizik kurallarında saklıdır. Herhangi bir geometriyi kalıbın içine dökmek mümkündür, ancak o geometrinin sağlam bir metalurjik yapıyla katılaşmasını sağlamak, fiziksel kısıtlara saygı duymayı gerektirir. İzole edilmiş kütleler, birleşme noktalarındaki aşırı sıcaklık yığılmaları ve büzölmeyi engelleyen kapalı geometriler, döküm teknolojisinin doğasına aykırıdır. Bu bölümde sunulacak konstrüksiyon kuralları, esasen bu fiziksel yasaların geometrik dile tercüme edilmiş halidir; amaç, termodinamiğe meydan okuyan değil, onunla uyum içinde çalışan tasarımlar ortaya koymaktır.

Fiziksel fenomenlerin karmaşıklığı ve deneme-yanılma süreçlerinin maliyeti, mühendislik dünyasını dijital bir dönüşüme zorlamış ve bu dönüşümün merkezine Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) araçlarını

yerleştirmiştir. Döküm endüstrisinde son çeyrek asırda yaşanan en büyük devrim, hiç şüphesiz döküm simülasyon yazılımlarının tasarım süreçlerine entegrasyonudur. Eskiden dökümhane zemininde, usta-çırak tecrübesiyle ve pahalı fiziksel denemelerle optimize edilmeye çalışılan yolluk tasarımları ve besleyici hesapları, artık sanal ortamda mikron hassasiyetinde analiz edilebilmektedir. Bu yazılımlar, Sonlu Elemanlar (FEM) veya Sonlu Hacimler (FVM) yöntemlerini kullanarak, sıvı metalin kalıp boşluğuna doluşunu, sıcaklık dağılımını, katılaşma cephesinin ilerleyişini ve mikroyapısal faz dönüşümlerini görselleştirebilmektedir (Jolly, 2005). Tasarımcı, bu araçlar sayesinde parça içerisindeki görünmeyeni görme yetisine kavuşur; henüz kalıp kumu karıştırılmadan, parçanın neresinde hava hapsolacağını veya hangi bölgesinde çekinti boşluğu (porozite) oluşacağını dijital ikiz üzerinde tespit edebilir.

Ancak, simülasyon teknolojilerinin sunduğu bu büyütücü yetenekler, mühendislik camiasında tehlikeli bir yanılgıyı da beraberinde getirmiştir. Sektörde sıklıkla karşılaşılan bu yanılgı, simülasyon programlarının hatalı bir tasarımı düzeltebilecek sihirli bir değnek olarak görülmesidir. Oysa simülasyon yazılımları, tasarımcı tarafından girilen geometrik veriyi ve sınır şartlarını fizik kurallarına göre işleyen güçlü birer hesap makinesinden ibarettir. Bilgisayar bilimlerindeki meşhur “Çöp girer, çöp çıkar” (Garbage in, garbage out) ilkesi, döküm simülasyonları için de geçerlidir. Eğer tasarımcı, döküm prensiplerine aykırı, termal merkezi dengesiz veya beslenmesi imkânsız bir geometriyi simülasyona sokarsa; yazılımın vereceği çıktı, mükemmel bir parça değil, sadece o parçanın neden ve nasıl hatalı döküleceğinin renkli bir haritası olacaktır (Ravi, 2008). Simülasyon, burada bir hata var diyebilir; ancak bu hatayı şuraya bir feder ekleyerek veya şu kesiti incelterek çözebilirsin demez; bu çözüm, mühendisin konstrüksiyon bilgisine muhtaçtır.

Bu noktada, mühendislik sezgisi ve temel tasarım kurallarının vazgeçilmezliği bir kez daha ortaya çıkmaktadır. En gelişmiş analiz araçları dahi, deneyimli bir tasarımcının kesit geçişlerinde radyus kullanma veya yönlenmiş katılaşmayı sağlama gibi temel reflekslerinin yerini tutamaz. Aksine, simülasyon araçlarının verimli kullanımı, ancak bu temel kurallara sadık kalınarak oluşturulmuş bir başlangıç tasarımı ile mümkündür. Temel döküm kurallarına uygun olarak tasarlanmış bir parça, simülasyon sürecinde sadece ufak optimizasyonlara (örneğin besleyici boyutunun %10 küçültülmesi gibi) ihtiyaç duyarken; kurallardan bihaber yapılmış bir tasarım, onlarca simülasyon iterasyonu gerektirecek ve muhtemelen yine de istenen kalite seviyesine ulaşamayacaktır (Sutcliffe vd., 2012). Dolayısıyla, bu bölümde ele alacağımız konstrüksiyon ilkeleri, simülasyon çağında önemini yitirmemiş,

bilakis simülasyonun bir doğrulama aracı olarak doğru kullanılabilmesi için zorunlu birer ön koşul haline gelmiştir. Mühendisin görevi, simülasyona nasıl olsa bilgisayar çözer mantığıyla yaklaşmak değil, simülasyona dökülebilirliği yüksek bir geometri sunarak süreci hızlandırmaktır.

21. yüzyıl mühendislik paradigması, sadece maliyet ve performans ekseninde değil, artan çevresel kaygılar ve yasal düzenlemeler (örneğin Avrupa Yeşil Mutabakatı) ışığında sürdürülebilirlik ekseninde de yeniden şekillenmektedir. Bu bağlamda, “Eko-Tasarım” kavramı, döküm teknolojisinin geleceğini belirleyen temel parametrelerden biri haline gelmiştir. Döküm, doğası gereği geri dönüştürülmüş metalleri hammadde olarak kullanabilmesi (hurda metalin yeniden ekonomiye kazandırılması) açısından döngüsel ekonominin merkezinde yer alır. Ancak tasarımcı açısından sürdürülebilirlik, malzeme seçiminin ötesinde, geometrik verimlilik ve hafifletme çalışmalarıyla başlar. Özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, araç ağırlığındaki her 100 kg’lık azalmanın yakıt tüketiminde ve karbon emisyonunda sağladığı düşüş, döküm parçalarının et kalınlıklarının optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır (Ashby, 2012).

Bu noktada, son yılların popüler mühendislik akımı olan topoloji optimizasyonu, döküm teknolojisi ile mükemmel bir sinerji oluşturmaktadır. Topoloji optimizasyonu algoritmaları, parçanın maruz kalacağı yükleri analiz ederek, gerilmenin düşük olduğu bölgelerdeki malzemeyi sanal olarak çıkarır ve geriye sadece yük taşıyan, genellikle organik ve kemiksi bir yapı bırakır. Bu, doğadaki prensiplere benzer bir yaklaşımdır. Talaşlı imalat ile üretilmesi neredeyse imkânsız olan bu karmaşık ve organik boşluklu yapılar, sıvı metalin akışkanlığı sayesinde döküm yöntemiyle kolaylıkla üretilebilir. Ancak burada kritik bir tasarım filtresi gereklidir: Algoritmanın önerdiği optimize edilmiş şekil, döküm kurallarına (çekinti, besleme, çıkma açısı) göre revize edilmezse üretilemez. Dolayısıyla, sürdürülebilir bir hafifletme, ancak optimizasyon çıktılarının döküm konstrüksiyon kuralları ile harmanlanmasıyla mümkündür (Allwood vd., 2011).

Sürdürülebilirliğin üretim aşamasındaki karşılığı ise enerji verimliliğidir. Dökümhaneler, metalin eritilmesi için çok yüksek miktarda enerji tüketen tesislerdir. Tasarımcının belirlediği geometri, doğrudan harcanan enerjiyi dikte eder. Eğer tasarımcı, gereğinden kalın kesitler veya yanlış besleme gerektiren izole kütleler tasarlırsa, döküm verimi düşer. Döküm verimi, kalıba dökülen toplam metal ağırlığı ile müşteriye sevk edilen net parça ağırlığı arasındaki orandır. Düşük verimli bir tasarımda, örneğin 1 kg’lık bir parça için 2 kg metal eritmek gerekebilir; aradaki fark yolluk ve besleyici olarak kesilip tekrar ergitilmek üzere fırına döner. Bu geri dönüş hurdasının

tekrar tekrar eritilmesi, muazzam bir enerji israfı ve gereksiz karbon salınımı demektir (Giurco vd., 2014). İyi bir döküm tasarımı, minimum besleyici ihtiyacı ile maksimum sağlamlığı hedefleyerek, ilk seferde, en az metalle üretimi mümkün kılar.

Sonuç olarak, bu bölümde ele alınacak olan tasarım kuralları, sadece parçanın hatasız çıkmasını sağlamakla kalmaz; aynı zamanda daha az malzeme kullanılmasını, daha az enerji harcanmasını ve daha hafif ürünler elde edilmesini garanti eder. Mühendisin doğru tasarımı, gezegenin kaynaklarına duyulan saygının teknik bir ifadesidir.

Tüm bu teorik, ekonomik ve ekolojik çerçeve ışığında, elinizdeki bu bölümün temel amacı; döküm teknolojisine dair literatürde dağınık halde bulunan ve genellikle ustalık bilgisi (know-how) olarak kabul edilip yazılı kaynaklara yeterince yansımayan pratik tasarım kurallarını, sistematik bir akademik disiplinle bir araya getirmektir. Döküm odaklı tasarım, sadece bir çizim tekniği değil, geometrik kararların metalürjik sonuçlarını yönetme sanatıdır. Bu çalışmada, bir döküm parçasının kalitesini belirleyen temel parametreler; teorik soyutlamalardan ziyade, doğrudan uygulamaya dönük “Konstrüksiyon Kuralları” başlıkları altında ele alınacaktır. Amacımız, tasarımcı ile üretici arasındaki gri alanları netleştirmek; bir parçanın kâğıt üzerindeki (veya ekrandaki) geometrisinin, dökümhane zeminindeki fiziksel gerçeklikle nasıl örtüşmesi gerektiğini somut örneklerle ortaya koymaktır (Boothroyd, 2002).

Bu kapsamda, izleyen bölümlerde; sıvı metalin akışını ve katılaşmasını doğrudan etkileyen et kalınlığı homojenliği, L, T, V, X ve Y tipi kesit birleşimlerinde sıcak nokta oluşumunun engellenmesi, feder (kaburga) tasarımı, delik ve yuvaların konumu, işleme paylarının optimizasyonu ve toleranslandırma gibi kritik konular detaylandırılacaktır. Anlatım metodolojisi olarak, her bir kural için “Doğru Tasarım - Yanlış Tasarım” kıyaslamaları kullanılacak ve neden-sonuç ilişkileri termodinamik temellere dayandırılarak açıklanacaktır. Örneğin, bir köşenin neden radyuslu olması gerektiği, sadece gerilme azaltma ile değil, aynı zamanda ısı transferini kolaylaştırma ve kum yanmasını önleme perspektifinden de irdelenecektir.

Sonuç olarak, bu kılavuzun okuyucuya vaat ettiği temel kazanım; tasarım sürecinde metalürjik farkındalık yetkinliğinin geliştirilmesidir. Bu bölümü tamamlayan bir tasarım mühendisinin, parçayı modellerken zihninde sadece bitmiş ürünü değil, onun kalıp içindeki oluşum sürecini de canlandırabilmesi hedeflenmektedir. Bu yetkinlik, tasarımcının üretilebilir ve sürdürülebilir ürünler ortaya koymasını sağlarken; üretim mühendislerinin de tasarımcılarla aynı teknik dili konuşarak süreç verimliliğini artırmasına olanak tanıyacaktır

(Swift & Booker, 2013). Böylece, tasarım masasında oturan mühendis için bir başucu kaynağı, üretim sahasındaki mühendis için ise teknik iletişimde güçlü bir argüman seti oluşturulmuş olacaktır.

2. Döküm Teknolojisinin Temel Prensipleri ve Tasarıma Etkileri

2.1. Sıvı Metal Akışkanlığı ve Kalıp Doldurma

Bir döküm parçasının başarılı bir şekilde üretilbilmesinin ilk ve en temel koşulu, sıvı metalin kalıp boşluğunu, donmadan ve yapısal bütünlüğünü bozmadan tamamen doldurabilmesidir. Bu süreç, termodinamik bir faz dönüşümü öncesinde, hidrodinamik bir akış problemidir. Tasarımcı açısından bu problemin en kritik değişkeni, malzemenin akışkanlığı ve bu akışkanlığın geometrik sınırlar (et kalınlığı ve akış mesafesi) ile olan etkileşimidir.

Metallurjik anlamda akışkanlık, sanılanın aksine sadece sıvı metalin viskozitesi (iç sürtünmesi) ile tanımlanan bir fiziksel özellik değildir; daha ziyade metalin kalıp içerisinde ne kadar yol alabildiğinin bir ölçüsüdür. Bu kabiliyet; döküm sıcaklığı (aşırı ısıtma derecesi), metalin kimyasal bileşimi, kalıp malzemesinin ısı transfer katsayısı ve yüzey gerilimi gibi karmaşık parametrelerin bir bileşkesidir. Örneğin, ötektik bileşime sahip bir alüminyum-silisyum alaşımı (Al-Si12), dar aralıkta katılaştığı için mükemmel bir akışkanlık sergilerken; geniş katılma aralığına sahip bazı bronz alaşımları “lapa” şeklinde katılaştığı için akışkanlıkları düşüktür. Tasarımcı, seçtiği malzemenin bu karakteristiğini bilmek ve tasarımı buna göre şekillendirmek zorundadır.

Tasarım geometrisinin akışkanlık üzerindeki en belirleyici kısıtı minimum et kalınlığı kavramıdır. Sıvı metal, kalıp kanalları boyunca ilerlerken sürekli olarak kalıp duvarlarına ısı kaybeder. Eğer kesit çok inceyse, yüzey alanı/hacim oranı artar ve ısı kaybı hızlanır. Metal, henüz kalıbın en uç noktasına ulaşmadan likidus sıcaklığının altına düşer ve akış durur. Bu durum, literatürde “Yarım Döküm” (Misrun) veya metalin iki farklı koldan gelip soğuduğu için birleşmemesi sonucu oluşan “Soğuk Birleşme” (Cold Shut) hatasına yol açar. Soğuk birleşme, parça üzerinde belirgin bir çatlak veya çizgi şeklinde görülür ve parçanın sızdırmazlık özelliğini ve mekanik dayanımını yok eder. Bu nedenle tasarımcı, örneğin kum kalıba dökülecek bir çelik parça için 6 mm’nin altına, hassas döküm bir parça için ise 1,5 mm’nin altına inmemesi gerektiğini bilmelidir.

Ancak akışkanlık, sadece ince kesitleri doldurmak demek değildir; aynı zamanda nasıl doldurulduğu ile de ilgilidir. İdeal bir döküm dolumu, türbülanssız ve laminar bir rejimde gerçekleşmelidir. Campbell (2003)

tarafından ortaya konan ve döküm literatüründe mihenk taşı kabul edilen kurala göre, sıvı metalin kalıp içindeki hızı kritik hız (genellikle 0,5 m/s) değerini aşmamalıdır. Eğer tasarımcı, parça üzerinde ani kesit daralmaları, keskin köşeli “Z” dönüşleri veya şelale gibi dökülmeye neden olacak geometriler oluşturursa, metalin hızı yerel olarak artar ve akış türbülansa girer. Türbülanslı akış, metalin yüzeyindeki oksit filminin yırtılarak temiz metalin içine karışmasına ve hava kabarcıklarının hapsolmesine neden olur.

Sonuç olarak, tasarımcının oluşturduğu geometri, sıvı metal için bir otoban niteliğinde olmalıdır. Akış yolları, metalin hızını ve sıcaklığını koruyacak şekilde optimize edilmeli; geniş düzlemlerden ince kesitlere ani geçişlerden kaçınılmalı ve mümkünse akış yönünde yumuşak yarıçaplar tercih edilmelidir. Unutulmamalıdır ki, dökümhane mühendisi döküm sıcaklığını artırarak akışkanlığı yapay olarak yükseltebilir; ancak bu çözüm, gaz çözünürlüğünü artırmak ve kalıp ömrünü kısaltmak gibi başka sorunlara yol açar. En doğru çözüm, akışkanlık prensiplerine saygı duyan bir geometrik tasarımıdır.

2.2. Katılaşma Mekanizması ve Chvorinov Kuralı

Sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurması sürecin hidrodinamik yüzü ise, dolum sonrası başlayan katılaşma evresi termodinamik yüzüdür ve döküm parçasının nihai kalitesini belirleyen asıl sınav burada verilir. Tasarımcı için katılaşma, sadece metalin donması değil, zamanla yarışan bir ısı transfer problemidir. Bu problemin temel aksiyomu, bir döküm parçasının soğuma süresinin, o parçanın geometrik özelliklerine, yani hacmine ve yüzey alanına bağlı olduğudur. Döküm literatüründe bu ilişki, 1940 yılında Çek mühendisi Nicolas Chvorinov tarafından formüle edilen ve kendi adıyla anılan Chvorinov Kuralı ile açıklanır (Campbell, 2003):

$$t = B \times (V / A)^n$$

Bu denklemde t katılaşma süresini, V parçanın (veya ilgili kesitin) hacmini, A ise ısıнын transfer edildiği soğuma yüzey alanını temsil eder. B kalıp sabiti, n ise genellikle 2 olarak kabul edilen bir üs değeridir. Tasarımcı perspektifinden bakıldığında, bu denklemin en kritik bileşeni (V / A) oranıdır. Döküm mühendisliğinde bu orana modül adı verilir. Modül, bir geometrinin ısı tutma kapasitesinin (Hacim), ısı kaybetme kapasitesine (Yüzey Alanı) oranıdır. Fiziksel olarak; modülü büyük olan bir geometri, ısını dışarı atacak yeterli yüzey alanına sahip olmadığı için geç soğur; modülü küçük olan (ince ve geniş) bir geometri ise hızla enerji kaybederek erken katılaşır.

Tasarımcının masasında bu fizik kuralı, hayati bir tasarım kısıtına dönüşür: Bir döküm parçası nadiren tek bir basit geometriden oluşur; genellikle plakalar, çubuklar, küpler ve silindirlerin karmaşık bir bileşimidir. Bu da parçanın farklı bölgelerinin farklı modüllere, dolayısıyla farklı soğuma sürelerine sahip olacağı anlamına gelir. Eğer tasarımcı, yüksek modüllü (kalın/kütlesel) bir bölgeyi, düşük modüllü (ince) bir bölgenin arkasına hapsedecek bir geometri oluşturursa, döküm hatası kaçınılmazdır.

Bu durumu somutlaştırmak gerekirse; ince bir kesit (düşük modül) hızla katılaşarak sıvı metal akış yolunu tıkar. Arkasında kalan kalın kütle (yüksek modül) ise hala sıvıdır ve ısı merkezi olarak adlandırılan izole bir havuz oluşturur. Bu izole sıvı kütle, faz değişimi sırasında hacimsel olarak büzüldüğünde, kendini besleyecek taze metal bulamaz (çünkü yol donmuştur) ve sonuçta parçanın tam kalbinde, dışarıdan görülemeyen büyük bir çekinti boşluğu meydana gelir.

Bu nedenle, döküm odaklı tasarımın (DfC) temel hedefi, parça üzerindeki modül dağılımını kontrol etmektir. Tasarımcı, parçayı modüllerine ayırarak (Heuvers Çemberi Yöntemi gibi tekniklerle) incelemelidir. İdeal senaryo, katılaşmanın en düşük modüllü bölgeden (uç noktalardan) başlayıp, kademeli olarak artan modül değerleriyle besleyiciye doğru ilerlemesidir. Eğer tasarım gereği kalın bir kesit, ince bir kesitle çevrelenmek zorundaysa, tasarımcı ya o kalın kesiti boşaltarak modülünü düşürmeli ya da besleme pedleri ekleyerek ince kesitin modülünü yapay olarak artırmalıdır. Chvorinov kuralına meydan okuyan bir tasarım, dökümhanede ancak pahalı soğutucular veya egzotermik besleyiciler kullanılarak kurtarılabilir; bu da kötü tasarımın maliyetini üretimde ödemek demektir.

2.3. Hacimsel Değişimler: Büzülme

Döküm teknolojisinde tasarım kurallarının büyük bir çoğunluğu, tek bir fiziksel gerçeği yönetmek üzerine kuruludur: Metaller (bizmut, galyum ve bazı dökme demir türleri hariç) soğudukça büzülürler. Ancak mühendislik perspektifinden büzülme kavramı, tekil bir olay değil, sıcaklık düşüşüne bağlı olarak üç farklı fazda gerçekleşen karmaşık bir hacimsel değişim sürecidir. Tasarımcının bu üç aşamayı ayırt edebilmesi hayati önem taşır; çünkü her aşamanın yol açtığı hata türü ve tasarımcıdan beklediği önlem farklıdır (Beeley, 2001).

Sürecin ilk aşaması sıvı büzülmesidir. Erimiş metal potadan kalıba döküldüğünde, döküm sıcaklığından (örneğin 1600°C) katılaşmanın başlayacağı likidus sıcaklığına (örneğin 1450°C) kadar soğur. Bu aralıkta metal henüz sıvıdır ancak hacmi azalır. Bu hacim kaybı, genellikle

dökümünün sorumluluğundadır ve besleyicilerdeki rezerv sıvı metal ile kolayca telafi edilir. Tasarımcıyı doğrudan etkileyen bir parametre değildir, ancak besleyici boyutunu etkiler.

İkinci ve en kritik aşama katılaşma büzülmesidir. Metalin sıvı fazdan katı faza geçtiği bu faz dönüşümü sırasında, atomlar düzensiz sıvı yapıdan düzenli kristal kafes yapısına geçerler ve daha sıkı paketlenirler. Bu durum, dramatik bir yoğunluk artışına ve dolayısıyla hacim azalmasına neden olur. Çeliklerde %5-7, alüminyum alaşımlarında %6-8 civarında gerçekleşen bu kayıp, döküm parçasının içinde boşluk oluşumunun ana kaynağıdır. Eğer tasarımcı, parçanın geometrisini, bu hacim kaybını telafi edecek taze metalin (besleyiciden) sürekli akabileceği şekilde kurgulamamışsa, parça katılaşırken kendi içinden malzeme çeker. Sonuç, dışarıdan bakıldığında kusursuz görünen ancak içi süngerimsi boşluklarla dolu (makro veya mikro porozite) bir parçadır. Bu aşamadaki büzülme, yönlendirilmiş katılaşma tasarımı ile yönetilmek zorundadır.

Üçüncü aşama ise katı büzülmesidir. Parça tamamen katılaştıktan (Solidus sıcaklığından) oda sıcaklığına inene kadar geçen sürede gerçekleşir. Bu aşamada artık döküm hatası (boşluk) oluşmaz, ancak parçanın boyutları küçülür. Tasarımcıların teknik resimlerde verdikleri boyutsal toleranslar ve modelcilerin kalıp üzerine ekledikleri çekme payı, işte bu lineer kısalmayı karşılamak içindir. Ancak katı büzülmesi, sadece boyutsal bir sorun değildir; aynı zamanda bir gerilme problemidir.

Eğer döküm parçasının geometrisi, metalin doğal olarak büzülmesine izin vermeyecek kadar rijitse (örneğin; iki güçlü flanş arasına hapsedilmiş ince bir çubuk veya jant kolu gibi), soğuyan metal kısalma isterken kalıp tarafından engellenir. Bu durum, parça üzerinde muazzam iç gerilmeler yaratır. Metal henüz sıcak ve mukavemeti düşükken bu gerilme malzemenin çekme dayanımını aşarsa, sıcak yırtılma adı verilen ve parçayı kullanılmaz hale getiren çatlaklar oluşur. Metal soğuduktan sonra bu gerilmeler devam ederse, parça kalıptan çıkarıldıktan sonra veya işleme sırasında çarpılma meydana gelir. Dolayısıyla tasarımcı, parçanın serbestçe büzülebilmeye olanak tanıyan esnek geometriler tasarlamalı veya gerilmeyi dağıtacak geniş radyuslar kullanmalıdır.

2.4. Isı Transferi ve Yönlendirilmiş Katılaşma

Döküm hatalarını önlemeye yönelik tüm çabaların nihai amacı, parça içerisinde kusursuz bir metalurjik bütünlük sağlamaktır. Bu bütünlüğün sağlanması, ergimiş metalin kalıp içerisindeki soğuma rejiminin kontrol altına alınmasına, yani termodinamik bir disipline bağlıdır. Döküm literatüründe

bu disiplinin adı yönlenmiş katılaşmadır (Directional Solidification). Bu prensip, döküm parçasının en uzak ve en ince noktasından (soğuk bölge) başlayıp, kademeli olarak daha kalın kesitlere doğru ilerleyen ve en sonunda sıvı metal kaynağı olan besleyici içinde son bulan bir katılaşma cephesi oluşturmayı hedefler.

Tasarımcı açısından bakıldığında, bir döküm parçası aslında üç boyutlu bir ısı haritasıdır. Parça üzerindeki her geometrik unsur, ısı transferi açısından farklı bir rol üstlenir: İnce federler, köşeler ve geniş yüzey alanına sahip bölgeler, ısıyı hızla kalıp kumuna ileterek ısı yutucu gibi davranırken; kalın kütleler, göbekler ve birleşim noktaları ısıyı bünyesinde tutarak ısı merkezi gibi davranır. Yönlenmiş katılaşmanın temel kuralı, bu ısı merkezlerini besleyiciye giden yol üzerinde birbirine bağlamaktır. Eğer tasarımcı, besleyiciye ulaşan yol üzerinde, arkasındaki kütleden daha ince bir kesit (dar boğaz) bırakırsa, bu ince kesit erken donarak besleme yolunu keser. Arkada izole kalan sıvı bölge, katılaşma büzülmesi sırasında ihtiyaç duyduğu taze metali çekemez ve çekinti boşluğu oluşturur.

Bu fiziksel zorunluluk, tasarımcıyı kama kuralı adı verilen geometrik bir stratejiyi uygulamaya zorlar. İdeal bir döküm tasarımı, tıpkı bir kama gibi, uç noktadan besleyiciye doğru giderek genişleyen bir kesit profiline sahip olmalıdır. Bu genişleme, katılaşma cephesinin asla tıkanmamasını ve sıvı metalin en son donacak noktaya kadar sürekli akabilmesini garanti eder. Eğer parçanın fonksiyonel gereksinimleri (örneğin düz bir plaka olması gerekliliği) bu doğal eğime izin vermiyorsa, tasarımcı bu kez yapay yöntemlere başvurmak zorunda kalır. Örneğin, parçanın üzerine sonradan talaşlı imalatla kaldırılacak olan besleme pedleri eklenerek geçici bir kalınlık artışı sağlanır.

Ancak, her geometri yönlenmiş katılaşmaya doğal olarak izin vermez. Özellikle tekerlek jantları, volanlar veya ızgara yapılarında olduğu gibi, çevresel bir çember ile merkezi bir göbeği bağlayan kollar, klasik bir termal çatışma alanıdır. Kollar ince olduğu için çabuk soğur, göbek ve çember kalın olduğu için geç soğur. Bu durumda tasarımcı, kolların birleşim yerlerinde geniş radyuslar kullanarak ısı geçişini yumuşatmalı veya kesit değişimlerini kademeli hale getirmelidir. Aksi takdirde, dökümhane mühendisi bu termal dengesizliği çözmek için parça üzerine metal soğutucular yerleştirmek veya izolasyon gömlekleri kullanmak zorunda kalır.

Sonuç olarak; iyi tasarım, dökümhanede ek önlemlere (soğutucu, ped, karmaşık yolluk) ihtiyaç duymadan, kendi geometrisiyle doğal olarak yönlenmiş katılaşmayı sağlayan tasarımdır. Tasarımcı, oluşturduğu geometriyi zihninde canlandırırken şu soruyu sormalıdır: Sıvı metal, en uzak

noktadan besleyiciye kadar kesintisiz bir sıvı koridoru bulabiliyor mu? Eğer cevap evet ise, o tasarım üretilebilir, ekonomik ve sağlamdır.

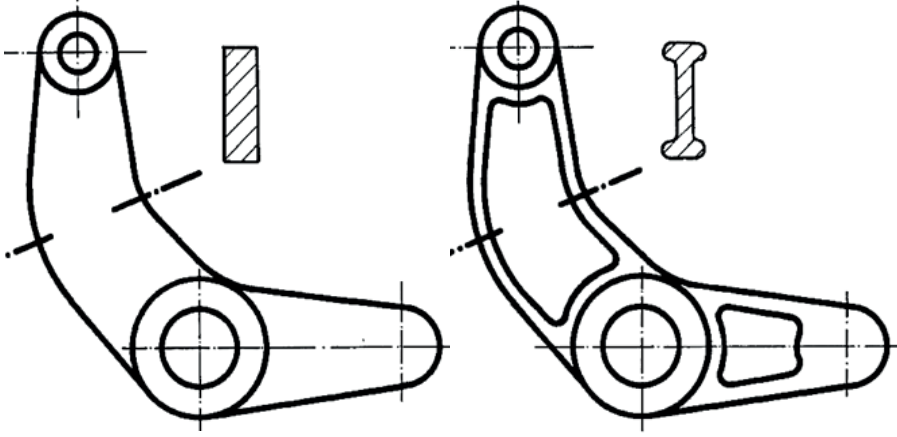
3. Döküm Parça Tasarımında Konstrüksiyon Kuralları

Döküm teknolojisinde üretilebilirlik kavramı, soyut bir temenni değil, geometrik kesinliği olan bir disiplindir. Bu bölümde, önceki kısımlarda değinilen termodinamik ve hidrodinamik yasaların, teknik resim masasında (veya CAD ekranında) nasıl somut tasarım kurallarına dönüştüğü incelenecektir.

3.1. Et Kalınlığı Homojenliği ve Kesit Geçişleri

Döküm parça tasarımının en temel kuralı, literatürde genellikle “Altın Kural” olarak nitelendirilen et kalınlığı homojenliğidir. İdeal bir döküm parçası, mümkün olan her bölgesinde eşit veya birbirine çok yakın et kalınlıklarına sahip olmalıdır. Bu gereklilik, estetik bir tercihten ziyade, metalin soğuma fiziğinin bir dayatmasıdır.

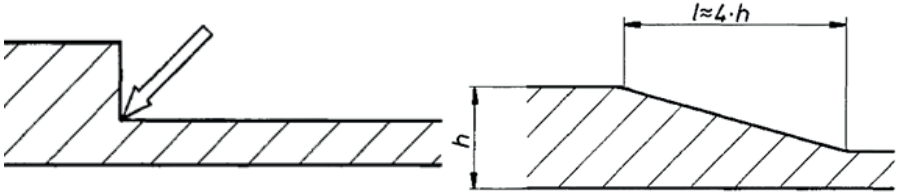
Chvorinov kuralında ifade edildiği üzere, bir kesitin katılma süresi o kesitin modülü ile karesel orantılıdır. Homojen olmayan bir tasarımda, ince kesitler hızla soğuyup katılırken, kalın kesitler geç soğur ve çevreleri donduğu için izole kalarak sıcak nokta oluşturur. Bu izole kütleler, katılma büzülmesi sırasında taze metal ile beslenemedikleri için parçanın merkezinde çekinti boşluğuna (porozite) neden olur. Ayrıca, farklı soğuma hızları parça üzerinde kalıcı iç gerilmelere ve çarpılmalara yol açar. Bu nedenle tasarımcı, kütsel yığılmaları engellemek için iç boşaltma yöntemini kullanmalı; dolu bir kütle yerine, aynı atalet momentini sağlayacak federli ve ince cidarlı yapıları tercih etmelidir.



Şekil 1. Kütle azaltma prensibi. (a) Yanlış Tasarım: İç boşluklara ve sıcak nokta oluşumuna neden olan dolu kütle. (b) Doğru Tasarım: Aynı mukavemeti sağlayan ancak et kalınlığı homojenleştirilmiş federli yapı (Bode, 1996).

Mühendislik gereksinimleri nedeniyle et kalınlığı değişiminin zorunlu olduğu durumlarda ise (örneğin flanş bağlantıları), geçişin asla ani olmaması gerekir. Ani kesit değişimleri, sıvı metalin dolum sırasında türbülansa girmesine ve keskin köşelerde gerilme yığılması oluşmasına neden olur.

Bu sorunları aşmak için uygulanması gereken strateji kama kuralı veya kademeli geçiştir. Kalın kesitten ince kesite geçiş, belirli bir eğimle (genellikle 1:3 veya 1:4 oranında) ve geniş radyuslar kullanılarak yapılmalıdır. Bu eğim, sadece gerilmeleri yaymakla kalmaz, aynı zamanda katılma cephesinin besleyiciye doğru yönlendirilmesine yardımcı olan bir termal patika oluşturur. Tasarımcı lego bloklarını üst üste koyar gibi keskin geometriler değil, doğadaki formlar gibi birbirine akan, yumuşak geçişli geometriler kurgulamalıdır.

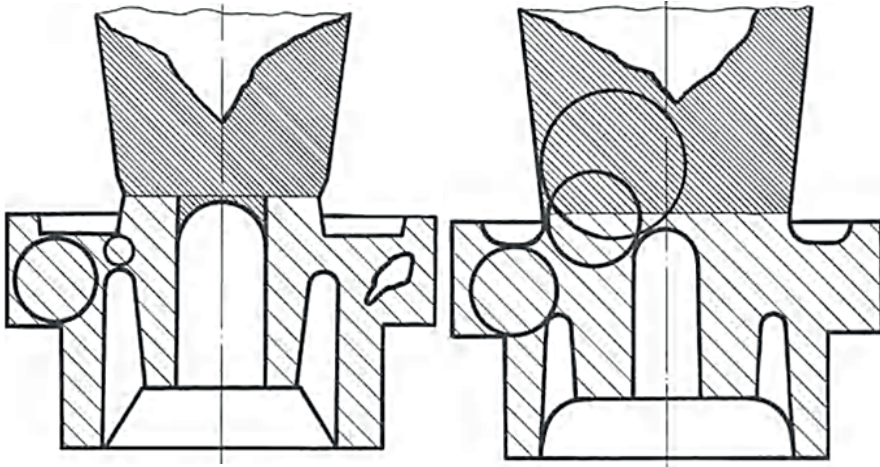


Şekil 2. Kesit geçişlerinde tasarım stratejileri. (a) Hatalı: Ani kesit değişimi (sıcak nokta ve gerilme yığılması riski). (b) Doğru: Kama kuralına uygun kademeli geçiş (Bode, 1996).

3.2. Kesit Birleşimleri ve Sıcak Noktalar

Bir döküm parçası, ne kadar karmaşık görünürse görünsün, aslında levhaların, çubukların ve köşelerin farklı kombinasyonlarla bir araya gelmesinden oluşur. Tasarımcı için en büyük tuzak, bu temel geometrilerin kesiştiği noktalardır. L, T, V, X ve Y şeklinde sınıflandırılan bu birleşim bölgeleri, termal dengenin bozulduğu ve döküm hatalarının yoğunlaştığı kritik alanlardır.

Sorunun temel kaynağı, geometrik birleşim yerlerinde hacmin artmasına rağmen, ısı transferi yapacak yüzey alanının azalmasıdır. Örneğin iki plakanın kesişerek oluşturduğu bir (+) şeklinde X birleşimi veya T birleşimi ele alındığında, kesişim noktasındaki kütle, kolların kütesinden daha fazladır. Bu durum, o bölgenin çevreye göre daha geç soğumasına ve bir ısı merkezi haline gelmesine neden olur. Döküm literatüründe bu durumu tespit etmek için Heuvers Çemberi yöntemi kullanılır. Bu yöntemde göre, kesitin içine çizilebilecek en büyük teğet çemberin çapı, birleşim noktasında kolların kalınlığından belirgin şekilde büyükse (örneğin 1,5 katı), o noktada çekinti boşluğu oluşması kaçınılmazdır.

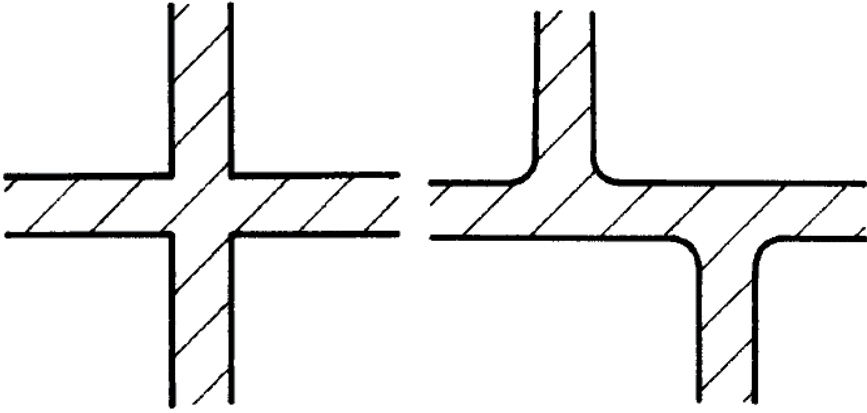


Şekil 3. Birleşim noktalarındaki kütle artışını gösteren Heuvers Çemberi analizi. Kesişim bölgesindeki çember çapının artması, o bölgenin en son katılaşacağını ve çekinti riski taşıdığını gösterir (Bode, 1996).

Bu birleşim türleri arasında en riskli olanı X (Artı) birleşimidir. Dört kolun tek bir noktada buluştuğu bu geometri, ısının merkezde hapsolmesine neden olur. Besleyicinin bu merkezi noktaya ulaşması ve beslemesi genellikle zordur çünkü ince kollar daha önce donar. Bu sorunu çözmek için tasarımcı, X birleşimini kaydırarak iki adet T birleşimine dönüştürmelidir. Kolların

birbirinden uzaklaştırılması, ısı merkezini böler ve katılaşmayı rahatlatır. Eğer tasarım kısıtları nedeniyle X birleşimi zorunluysa, birleşim noktasının tam ortasına maça yerleştirilerek kütle azaltılmalı ve ısı transfer yüzeyi yaratılmalıdır.

L ve V köşelerinde ise sorun genellikle iç köşede oluşan sıcaklıktır. Keskin bir iç köşe, ısıнын kalıp kumuna aktarılmasını zorlaştırır (kum o bölgede çok ısınır ve doygunluğa ulaşır). Bu nedenle iç köşelere mutlaka yarıçap verilmeli, ancak bu yarıçapın yarıçapı da aşırıya kaçmamalıdır. Çok büyük dış yarıçaplar, köşedeki kütleyi (modülü) artırarak sorunu çözmek yerine daha da kötüleştirir. İdeal tasarım, iç ve dış yarıçapların eş merkezli olduğu ve et kalınlığının köşeyi dönerken sabit kaldığı tasarımıdır.



Şekil 4. X-birleşimlerinde tasarım iyileştirilmesi. Kolları kaydırarak X profilini iki ayrı T profiline dönüştürmek, sıcak nokta oluşumunu engeller (Bode, 1996).

3.3. Feder (Kaburga) Tasarımı

Mühendislik tasarımlarında, bir parçanın rijitliğini artırmanın en kolay yolu et kalınlığını artırmak gibi görünse de döküm teknolojisinde bu yaklaşım hatalıdır. Kalın kesitler, daha önce değinildiği üzere porozite riskini ve ağırlığı artırır. Bu nedenle döküm tasarımcıları, mukavemeti artırmak için kütle eklemek yerine, feder yapılarını kullanmalıdır. Federler, parçanın atalet momentini artırarak bükülme ve burulmaya karşı direnç sağlarken, et kalınlığının ince ve homojen kalmasına olanak tanır. Ancak, metalurjik açıdan bakıldığında federler, sadece birer mukavemet elemanı değil, aynı zamanda kalıp içinde hızla soğuyan ısı yutucu (fin) yüzeylerdir.

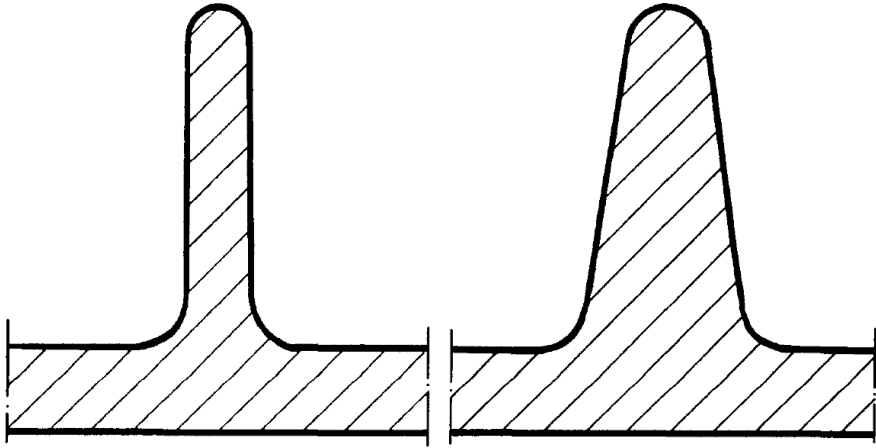
Feder tasarımında yapılan en yaygın hata, feder kalınlığının ana gövde kalınlığı ile aynı yapılmasıdır. Eğer feder kalınlığı, bağlandığı duvar kalınlığına

eşit olursa, birleşim noktasındaki T kesitinde oluşan kütle, her iki duvardan da %50-60 daha büyük bir modüle sahip olur. Bu durum, federin tabanında kaçınılmaz bir sıcak nokta (hot spot) ve akabinde çekinti boşluğu yaratır.

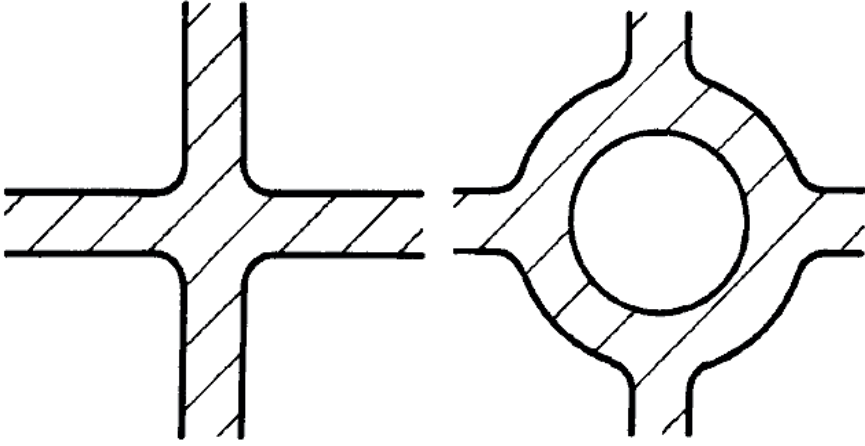
Bu sorunu önlemek için literatürde kabul gören standart kural; feder kalınlığının, ana duvar kalınlığının %60'ı ile %80'i arasında seçilmesidir. Bu oran, birleşim noktasındaki kütle yığılmasını minimize ederken, federin uç kısımlarından başlayan katılaşmanın gövdeye doğru sağlıklı bir şekilde ilerlemesini sağlar. Ayrıca, federlerin ucunun küt (düz) bırakılması yerine radyüslü (yuvarlak) bitirilmesi, dış liflerdeki gerilme yığılmasını azaltır.

Federlerin konumu ve yönü de en az boyutları kadar kritiktir. Rastgele yerleştirilen bir feder, sıvı metalin akış yolunu kesen bir baraj görevi görebilir veya türbülansa neden olabilir. Federler, mümkün olduğunca metal akış yönüne paralel yerleştirilmeli ve kalıp dolumunu desteklemelidir.

Karmaşık parçalarda, geniş yüzeyleri desteklemek için genellikle ızgara (grid) şeklinde çapraz feder yapıları kullanılır. Ancak bu yapıların kesişim noktaları (dört yol ağızları), yukarıda bahsedilen X-birleşimi sorununu doğurur. Bu durumu çözmek için federlerin kesiştiği noktanın tam ortasına silindirik bir maça (delik) yerleştirilerek kütle azaltılmalıdır.



Şekil 5. Doğru feder tasarımı ve et kalınlığı oranları. Feder kalınlığı, birleşim yerindeki kütleyi azaltmak için ana duvar kalınlığından daha az olmalıdır (Bode, 1996).



Şekil 6. Çoklu feder kesişimlerinde sıcak noktayı önlemek için merkezi boşaltma (maçalama) tekniği (Bode, 1996).

Son olarak, federlerin kalıptan rahat çıkabilmesi için (özellikle kum kalıp ve basınçlı dökümde) mutlaka uygun çıkma açısına sahip olması gerekir. Derin federlerde bu açı, federin tepe noktasını çok inceltebileceğinden, feder yüksekliği genellikle taban kalınlığının belirli bir katı ile sınırlandırılır.

3.4. Çıkma Açıları

Döküm parçalarının tasarımında, geometrinin kalıp içerisinden hasarsız bir şekilde çıkarılabilmesi, en az dolum ve katılaşma kadar kritik bir süreçtir. Parçanın kalıp ayırım düzlemine dik olan yüzeylerine, kalıptan sıyrılmayı kolaylaştırmak amacıyla verilen eğime çıkma açısı adı verilir.

Tasarımcılar genellikle parçaları dik açılı duvarlara sahip olacak şekilde modelleme eğilimindedir. Ancak dökümhane pratiğinde, yüzeyin kalıba sürtünmesi ve parça ile kalıp arasında oluşan vakum etkisi nedeniyle, 0° açılı (dik) bir yüzeyin kalıptan sıyrılması fiziksel olarak neredeyse imkânsızdır. Yetersiz çıkma açısı, kalıp yüzeyinin bozulmasına (kum kopması), parça yüzeyinde derin çiziklere ve hatta parçanın kalıp içinde sıkışıp deforme olmasına neden olur.

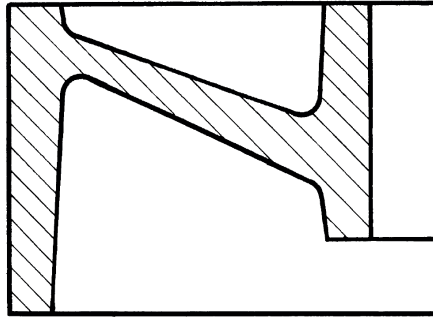
Çıkma açısının belirlenmesinde geçerli olan temel fiziksel mekanizma, metalin büzülme yönüdür. Bu bağlamda yüzeyler, iç yüzeyler ve dış yüzeyler olarak iki ana kategoride değerlendirilmelidir:

- **Dış Yüzeyler:** Metal katılaşırken büzüldüğünde, dış kalıp duvarlarından uzaklaşma eğilimi gösterir. Bu durum, parça ile kalıp arasında doğal

bir boşluk oluşmasını sağlar ve sıyrılmayı kolaylaştırır. Dolayısıyla dış duvarlarda nispeten küçük açılar (1° ile $1,5^\circ$) yeterli olmaktadır.

- **İç Yüzeyler (Maça ve Göbekler):** Parça soğuduğunda, içindeki maça veya kalıp çıkıntısının üzerine doğru büzülür. Bu durum, parçanın kalıbı bir mengene gibi sıkmasına neden olur ve sürtünme kuvvetlerini dramatik şekilde artırır. Bu nedenle, iç yüzeylerde ve derin ceplerde, dış yüzeylere kıyasla daha büyük çıkma açıları (en az 2° ile 3°) uygulanması zorunludur.

Tasarımcının teknik resimde çıkma açısını nasıl ifade ettiği de boyutsal toleranslar açısından hayati önem taşır. Çıkma açısı verilirken parça geometrisinin tabanda mı yoksa tepede mi değişeceği netleştirilmelidir. Bode (1996) tarafından şematize edildiği üzere; aç, parçanın mukavemetini düşürmemek adına genellikle malzeme ekleyerek (+) verilmeli, yani taban genişletilmelidir.



Şekil 7. Çıkma açısı prensibi. Uygun çıkma açısı ile sürtünmesiz ayrılma ve açının malzeme eklenerek uygulanması.

Sonuç olarak; çıkma açısı, üretimden sonra parçanın neden teknik resimdeki ölçülerden farklı olduğu tartışmasının en büyük kaynağıdır. Bu tartışmayı önlemek için tasarımcı, açının nereden başlayacağını ve hangi yöne doğru verileceğini teknik resim üzerinde net olarak tanımlamalıdır.

3.5. Delik ve Yuvaların Konumu

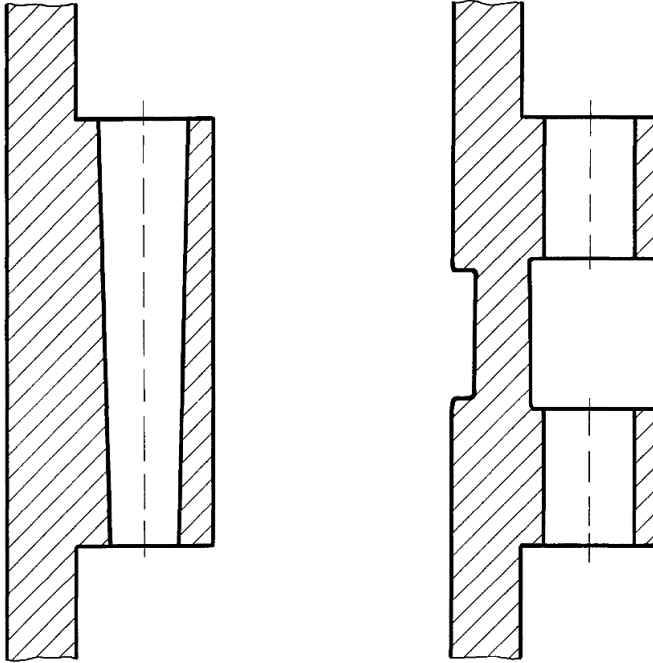
Döküm parçaları üzerindeki delikler ve yuvalar, montaj ve fonksiyonellik için vazgeçilmez unsurlardır. Ancak tasarımcı, teknik resim üzerine her çapta ve derinlikte deliği kolaylıkla çizebilse de bu deliklerin döküm yöntemiyle elde edilmesi her zaman teknik veya ekonomik açıdan rasyonel değildir.

Tasarımcının bu aşamada vermesi gereken ilk stratejik karar şudur: “Bu deliği dökmeli miyim, yoksa parçayı dolu döküp sonradan talaşlı imalatla mı delmeliyim?”

Küçük çaplı deliklerin (genellikle 6-10 mm altı) dökülerek elde edilmesi, ince kesitli kum maçaların kullanılmasını gerektirir. Bu ince maçalar, döküm sırasında sıvı metalin yüksek sıcaklığı ve basıncı altında kırılarak parçanın içinde kalabilir veya metalin ısıyla sinterleşerek (kum yanması) yüzeye yapışabilir. Bu tür durumlarda deliği temizlemek, matkapla yeni bir delik açmaktan çok daha zor ve maliyetli hale gelir. Bu nedenle genel kabul gören yaklaşım; küçük deliklerin körlenmesi (dolu bırakılması) ve sonradan delinmesidir.

Dökülerek elde edilmesine karar verilen delikler içinse tasarımcı, maçanın dayanım sınırlarını belirleyen geometrik oranlara sadık kalmalıdır. Maça ne kadar uzun ve ince olursa, kırılma veya yüzme riski o kadar artar.

Özellikle yataklama amacıyla kullanılan uzun deliklerde, boydan boya tek bir maça kullanmak yerine, tasarımın optimize edilmesi gerekir. Şekil 8’de görüldüğü üzere, deliğin orta kısmı boşaltılarak iki kısa delik haline getirilmesi, maça boyunu kısaltır ve dayanımı artırır.



Şekil 8. Çapma oranla uzun olan deliklerin tasarım optimizasyonu. (a) Yanlış: Tek parça uzun maça kullanımı kırılma ve eksen kaçıklığı riski taşır. (b) Doğru: Orta kısmın boşaltılarak iki kısa ve rijit maça ile çözüm üretilmesi (Bode, 1996).

Ayrıca deliklerin parça kenarına olan mesafesi de kritiktir. Bir delik, parçanın kenarına çok yakın konumlandırılırsa, arada kalan ince metal duvar döküm sırasında yeterince beslenemeyebilir. Güvenli bir tasarım için, işlenmeyecek ham deliklerin kenara olan mesafesi, en az delik yarıçapı kadar olmalıdır.

3.6. İşleme Paylarının Optimizasyonu

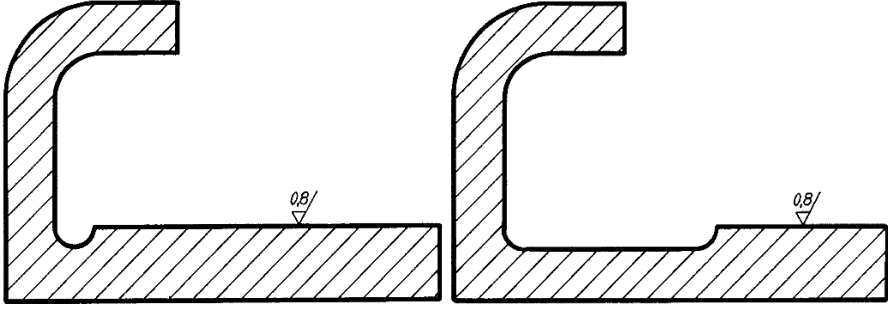
Döküm teknolojisi, net şekle yakın üretim kabiliyeti sunsa da fonksiyonel yüzeylerin çoğu zaman ham döküm toleranslarından daha hassas ölçülere ve daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olması gerekir. Bu nedenle, bir döküm parçasının diğer parçalarla temas edeceği, sızdırmazlık sağlayacağı veya yataklanacağı yüzeyler mutlaka talaşlı imalat işlemine tabi tutulur.

Tasarımcının burada yönetmesi gereken temel parametre işleme payıdır. İşleme payı, ham döküm parça üzerine eklenen ve sonradan talaş kaldırılarak yok edilecek olan ekstra metal katmanıdır. Bu katmanın kalınlığı; döküm yönteminin hassasiyetine, parçanın boyutuna ve seçilen referans yüzeylere göre değişir (ISO 8062 standartları referans alınır).

Ancak tasarım hatası, genellikle payın miktarında değil, konumunda yapılır. En sık yapılan hata, geniş yüzeylerin tamamının işlenmeye çalışılmasıdır. Bu yaklaşım hem işleme maliyetini artırır hem de dökümün sert kabuğunun tamamen kaldırılmasına neden olarak korozyon direncini düşürebilir.

Doğru tasarım stratejisi, sadece temasın gerçekleşeceği bölgelerin işlenmesi ve bu bölgelerin ham yüzeyden daha yukarıda olacak şekilde yükseltilmiş tasarlanmasıdır.

Yüzeylerin yükseltilmesi sadece talaş hacmini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kesici takımın erişimini de kolaylaştırır. Bode (1996) tarafından Şekil 9'da gösterildiği üzere; eğer işlenecek yüzey, parçanın geri kalanıyla aynı seviyede veya daha aşağıda (gömük) tasarlanırsa, standart ve ekonomik bir takım olan çanak taşlama taşı dikey duvarlara çarpacağı için kullanılamaz. Bu durumda daha küçük çaplı, özel ve pahalı takımlarla işlem yapmak gerekir.



Şekil 9. İşlenecek yüzeylerin erişilebilirliği. (a) Yanlış: Gömük veya duvar dibindeki yüzeyler standart taşlama taşlarının erişimini engeller. (b) Doğru: Yüzeyin yükseltilerek tasarlanması, geniş çaplı ve ekonomik taşlama taşlarının kullanımına olanak tanır (Bode, 1996).

Sonuç olarak tasarımcı, işlenecek yüzeyleri belirlerken şu prensibi izlemelidir: İşleme yüzeyi asla ham döküm yüzeyi ile aynı düzlemde olmamalı, ondan daima birkaç milimetre yüksekte duran bir adacık şeklinde tasarlanmalıdır. Bu, hem döküm hatalarının (kum vb.) takımı köreltmesini engeller hem de takımın rahatça çalışabileceği bir boşluk yaratır.

3.7. Toleranslandırma

Tasarım mühendisinin teknik resim üzerinde belirlediği toleranslar, parçanın sadece montaj edilebilirliğini değil, döküm maliyetini de doğrudan belirleyen en kritik parametredir. Ancak döküm teknolojisi, doğası gereği talaşlı imalat kadar yüksek hassasiyet sunabilen bir süreç değildir. Sıvı metalin katılaşma büzülmesi, kalıp kumunun termal genleşmesi ve kalıp yarılarının montaj hassasiyeti gibi çok sayıda değişken, nihai boyutlarda sapmalara neden olur.

Bu nedenle tasarımcı, döküm parça toleranslarını belirlerken keyfi dar toleranslar vermekten kaçınmalı ve uluslararası kabul görmüş standartlara sadık kalmalıdır. Günümüzde döküm endüstrisinde küresel geçerliliği olan temel standart ISO 8062 (Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts) standardıdır. Bu standart, döküm yöntemine (kum, kokil, basınçlı vb.) ve alaşım türüne göre ulaşılabilecek boyutsal tolerans sınıflarını (DCTG - Dimensional Casting Tolerance Grades) tanımlar.

Toleranslandırmada dikkate alınması gereken en önemli gizli kısıt, Kalıp Ayrım Düzlemi etkisidir. Bir döküm parçasının tüm ölçüleri aynı hassasiyette değildir:

- **Aynı Kalıp Yarısı İçindeki Ölçüler:** Parçanın iki noktası da aynı kalıp derecesi (örneğin sadece alt derece) içinde kalıyorsa, bu ölçü sadece model hassasiyetine ve metalin büzülmesine bağlıdır. Dolayısıyla oldukça hassastır.
- **Kalıp Ayrımını Kesen Ölçüler:** Eğer ölçülen mesafe, kalıbın alt yarısından başlayıp üst yarısında bitiyorsa (yani ayırım çizgisini kesiyorsa), işin içine kalıp kapatma hassasiyeti ve derece kayması girer. Bu nedenle, kalıp ayırımını geçen ölçülere, aynı kalıp yarısındaki ölçülere kıyasla daha geniş toleranslar verilmesi zorunludur.

Tasarımcılar için altın kural şudur: Parçanın fonksiyonu için kritik olan hassas detaylar, mümkünse kalıbın aynı yarısında kalacak şekilde tasarlanmalıdır. Eğer çok dar bir tolerans (örneğin H7 gibi) mutlaka gerekirse, bu bölge döküm toleranslarıyla elde edilmeye çalışılmamalı; önceki bölümde (Bölüm 3.6) belirtildiği gibi işleme payı bırakılarak talaşlı imalata havale edilmelidir. Unutulmamalıdır ki, dökümhaneden talep edilen gereksiz her mikronluk hassasiyet, kalıp maliyetini ve hurda oranını katlanarak artırır.

4. Sonuç ve Değerlendirme

Endüstriyel üretim tarihinde Bronz Çağından bu yana varlığını sürdüren döküm teknolojisi, günümüzde dijitalleşme ve malzeme bilimindeki gelişmelerle birlikte yeni bir evrim sürecine girmiştir. Ancak teknolojinin ulaştığı seviye ne olursa olsun, bir döküm parçasının kalitesini belirleyen temel faktör değişmemiştir: Tasarımcının geometrik kararları ile sıvı metalin fiziksel davranışları arasındaki uyum.

Bu çalışmada detaylandırılan konstrüksiyon kuralları, tasarım mühendislerine sadece ne yapmaları gerektiğini değil, neden yapmaları gerektiğini termodinamik ve mekanik temellere dayandırarak sunmuştur. İncelenen prensipler ışığında varılan temel çıkarımlar şunlardır:

1. **Geometri, Metalurjiyi Dikte Eder:** Tasarımcının CAD ekranında çizdiği her çizgi, gerçek dünyada bir ısı transfer sınırı şartına dönüşür. Et kalınlığının homojenliği, kesit geçişlerinin yumuşaklığı ve birleşim noktalarının tasarımı; sadece parçanın şeklini değil, iç yapısındaki tane boyutunu, porozite dağılımını ve mekanik özelliklerini doğrudan belirler.
2. **Üretilbilirlik Bir Sonradan Düşünce Değildir:** Geleneksel tasarla ve duvardan at yaklaşımı, yerini eş zamanlı mühendislik prensiplerine bırakmak zorundadır. Maça dayanımı, çıkma açıları ve işleme payları

gibi parametrelerin tasarımın ilk aşamalarında (konsept safhasında) dikkate alınması, ürün geliştirme maliyetlerini ve süresini dramatik ölçüde azaltmaktadır.

3. Simülasyon Bir Doğrulama Aracıdır, Tasarımcı Değildir:

Döküm simülasyon yazılımları (CAE), mühendislik dünyasında devrim yaratmış olsa da bu araçlar kötü bir tasarımı iyi bir parçaya dönüştüremez. Simülasyon teknolojileri, ancak bu bölümde ele alınan temel döküm kurallarına sadık kalınarak oluşturulmuş tasarımlar üzerinde gerçek potansiyelini (optimizasyon ve doğrulama) sergileyebilir.

Geleceğin mühendislik dünyasında, döküm teknolojisinin rolü sadece karmaşık şekilleri üretmekle sınırlı kalmayacak, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerinin (hafifletme ve enerji verimliliği) gerçekleştirilmesinde de kilit bir rol oynayacaktır. Topoloji optimizasyonu ile elde edilen organik formların, bu çalışmada belirtilen döküm kuralları (yönlenmiş katılaşma, beslenebilirlik) ile harmanlanması, Eko-Döküm çağının temelini oluşturacaktır.

Sonuç olarak; başarılı bir döküm parçası, tasarım ofisindeki mühendis ile dökümhane zeminindeki metalürji uzmanının aynı teknik dili konuşabilmesiyle mümkündür. Bu çalışmada sunulan kurallar bütünü, bu iki disiplin arasındaki gri alanları netleştiren ortak bir alfabe niteliğindedir. Tasarımcının görevi, sadece fonksiyonel bir hacim yaratmak değil, sıvı metalin kalıp içerisindeki serüvenine rehberlik edecek akılcı bir geometri kurgulamaktır.

5. Kaynakça

- Allwood, J. M., & Cullen, J. M. (2011). *Sustainable materials: With both eyes open*. Cambridge, UK: UIT Cambridge.
- Anderson, D. M. (2014). *Design for manufacturability: How to use concurrent engineering to rapidly develop low-cost, high-quality products for lean production*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Ashby, M. F. (2012). *Materials selection in mechanical design* (4th ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Beeley, P. R. (2001). *Foundry technology* (2nd ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Bode, E. (1996). *Konstruktionsatlas* (6. Aufl.). Wiesbaden, Almanya: Springer Fachmedien.
- Boothroyd, G. (2002). *Product design for manufacture and assembly* (2nd ed.). New York, NY: Marcel Dekker.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. (2010). *Product design for manufacture and assembly* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Campbell, J. (2003). *Castings* (2nd ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Campbell, J. (2015). *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design* (2nd ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Clark, K. B., & Fujimoto, T. (1991). *Product development performance: Strategy, organization, and management in the world auto industry*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Czerwinski, F. (2011). *Magnesium alloys: Design, processing and properties*. Rijeka, Croatia: InTech.
- Flemings, M. C. (1974). *Solidification processing*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Giurco, D., Prior, T., & Mudiger, B. (2014). Designing for circular production: Metal recycling. *Journal of Cleaner Production*, 66, 22-30.
- Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems* (7th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Hatton, A. P., & Piek, S. (2006). Hot tearing and thermal stresses in casting. *International Journal of Cast Metals Research*, 19(3), 150-158.
- Jolly, M. R. (2005). Profitable casting: Process modeling and simulation. In *Casting design and performance* (pp. 35-42). Materials Park, OH: ASM International.
- Prasad, B. (1996). *Concurrent engineering fundamentals: Integrated product and process organization*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Ravi, B. (2005). *Metal casting: Computer-aided design and analysis*. New Delhi, India: PHI Learning.

- Ravi, B. (2008). Casting simulation and optimization: Benefits, bottlenecks, and best practices. *Indian Foundry Journal*, 54(1), 21-28.
- Sutcliffe, M., & Kim, K. (2012). Real-time simulation of metal casting processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(5), 450-460.
- Swift, K. G., & Booker, J. D. (2013). *Manufacturing process selection handbook*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Ullman, D. G. (2010). *The mechanical design process* (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.

