



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 1

Döküm Teknolojisi

Döküm yöntemleri, katılaşma metalurjisi, yolluk-besleyici tasarımı,
döküm alaşımları, hata analizi ve kalite kontrol esasları

Hazırlayan: Ahmet Asım ESER — SAE Mühendislik ve Danışmanlık Hizmetleri

Sürüm: 1.0 • **Tarih:** Ağustos 2026 • **saemuhendislik.com**

Bu doküman SAE Mühendislik tarafından özgün olarak hazırlanmıştır. Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.

1. Giriş

Döküm; ergitilmiş metalin, üretilecek parçanın geometrisini taşıyan bir kalıp boşluğuna doldurulması ve katılaşmasının sağlanması esasına dayanan bir imalat yöntemidir. Yaklaşık 6.000 yıllık geçmişiyle bilinen en eski metal şekillendirme tekniklerinden biri olmasına karşın, bugün otomotiv motor blokundan uçak türbin kanadına kadar en kritik parçaların üretiminde vazgeçilmezliğini korumaktadır.

Dökümü öne çıkaran temel üstünlükler şunlardır:

- Geometrik serbestlik:** İç boşluklar, karmaşık kanallar ve değişken kesitler tek operasyonda elde edilir.
- Ekonomiklik:** Orta ve yüksek üretim adetlerinde parça başı maliyet düşüktür; talaşlı imalata göre malzeme kaybı azdır.
- Boyut ve malzeme aralığı:** Birkaç gramdan yüzlerce tona; dökme demirden süper alaşımlara geniş bir yelpaze.

Bunun karşılığında döküm; katılaşma kaynaklı iç yapı kusurlarına (çekinti, porozite, segregasyon) açık bir prosestir. Bu nedenle başarılı bir döküm tasarımı, **katılaşma metalurjisinin** ve **kalıp doldurma hidrodinamiğinin** birlikte yönetilmesini gerektirir. Bu yayının amacı, mühendislik pratiğinde ihtiyaç duyulan temel kavramları derli toplu ve uygulamaya dönük biçimde sunmaktır.

2. Temel Kavramlar ve Proses Akışı

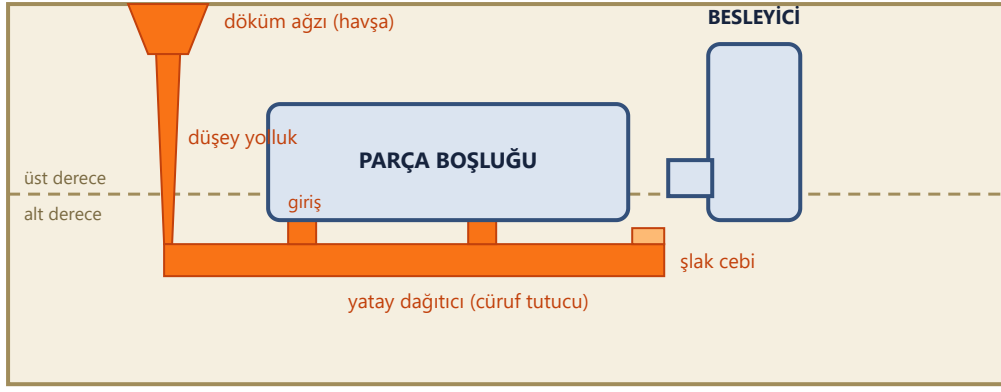
Tipik bir kum döküm prosesi şu adımlardan oluşur: **model (maket) hazırlama** → **kalıplama** → **maça yerleştirme** → **ergitme** → **döküm (dolum)** → **katılaşma** → **bozma** → **yolluk kesme ve temizleme** → **ısıtma işlemi** → **muayene**.

2.1 Terimler

Terim	Tanım
Model (pattern)	Parçanın, çekme payları eklenmiş kopyası; kalıp boşluğunu oluşturmak için kullanılır.
Maça (core)	Parçadaki iç boşlukları oluşturan, genellikle reçine bağlı kumdan yapılan kalıp elemanı.
Derece (flask)	Kum kalıbı taşıyan çerçeve; üst (cope) ve alt (drag) olmak üzere iki parçalıdır.
Mala yüzeyi (parting line)	Kalıp yarımlarının ayırım düzlemi; çapak ve kaçıklık bu düzlemde oluşur.
Çekme payı	Katılaşma ve soğuma büzülmesini karşılamak için modele eklenen boyut payı (çelikte ~%2, gri dökme demirde ~%1).
Eğim (draft)	Modelin kalıptan hasarsız çıkarılabilmesi için yüzeylere verilen açı (tipik 1–3°).

2.2 Yolluk sistemi

Yolluk sistemi; sıvı metali kalıp boşluğuna **kontrollü, türbülanssız ve cürufsuz** taşımakla görevlidir. Klasik bir sistem, döküm ağzı (havşa), düşey yolluk, cüruf tutucu (yatay dağıtıcı) ve parça girişlerinden (ingate) oluşur.



Şekil 1. Tipik bir kum kalıp kesitinde yolluk sistemi ve besleyici düzeni (şematik — SAE Mühendislik çizimi).

3. Döküm Yöntemlerinin Sınıflandırılması

3.1 Harcanan (bozulan) kalıba döküm

- **Yaş kum kalıba döküm:** Bentonit bağlayıcılı silis kumu. En ekonomik ve en yaygın yöntemdir; boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesi sınırlıdır.
- **Kimyasal bağlı kum (furan, fenolik-üretan):** Daha rijit kalıp, daha iyi boyut kararlılığı; büyük parçalarda ve seri dışı üretimde tercih edilir.
- **Kabuk kalıp (shell molding):** Isıyla sertleşen reçineli kum; ince cidarlı, iyi yüzeyli orta boy parçalar.
- **Hassas döküm (investment casting):** Mum model + seramik kabuk. En yüksek boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesi; türbin kanatları, implantlar, silah parçaları.
- **Kaybolan köpük (lost foam):** Polistiren model kalıpta bırakılır, sıvı metal modeli buharlaştırarak yerini alır.

3.2 Kalıcı (metal) kalıba döküm

- **Kokil döküm (gravity die):** Yerçekimiyle dolum, metal kalıp. Kum döküme göre daha ince tane, daha iyi mekanik özellik.
- **Alçak basınçlı döküm (LPDC):** Ergiyik, 0,2–1 bar hava basıncıyla alttan yukarı sakın şekilde yükselir; jant üretiminin standardıdır.
- **Yüksek basınçlı döküm (HPDC):** Ergiyik 10–200 MPa ile kalıba enjekte edilir. Çok yüksek üretim hızı ve ince cidar; gaz porozitesine eğilim nedeniyle klasik HPDC parçalara ısıtılma işlemi ve kaynak genellikle uygulanmaz. **Sıcak kamara** (Zn, Mg) ve **soğuk kamara** (Al, Cu) olarak ikiye ayrılır.
- **Savurma döküm:** Dönen kalıpta merkezkaç kuvvetiyle şekillendirme; boru, burç, silindir gömleği.
- **Sürekli döküm:** Kütük, blum ve slab yarı mamullerinin endüstriyel üretim yolu.

Yöntem	Tipik malzeme	Boyut hassasiyeti	Yüzey (Ra, μm)	Ekonomik adet	Tipik uygulama
Yaş kum	Tüm alaşımlar	Düşük (CT11–13)	12–25	$1 - 10^5$	Gövde, şasi parçaları
Kabuk kalıp	DD, çelik, Al	Orta (CT8–10)	3–12	$10^2 - 10^5$	Dişli kutusu, manifold
Hassas döküm	Çelik, süper alaşım	Yüksek (CT4–6)	1,5–6	$10 - 10^5$	Türbin kanadı, implant
Kokil	Al, Mg, Cu	Orta-yüksek (CT7–9)	2–8	$10^3 - 10^5$	Piston, armatür
Alçak basınç	Al	Yüksek	2–6	$10^3 - 10^6$	Alaşımlı jant
HPDC	Al, Zn, Mg	Çok yüksek (CT5–7)	0,8–3	$10^4 - 10^7$	Şanzıman gövdesi, E-motor muhafazası

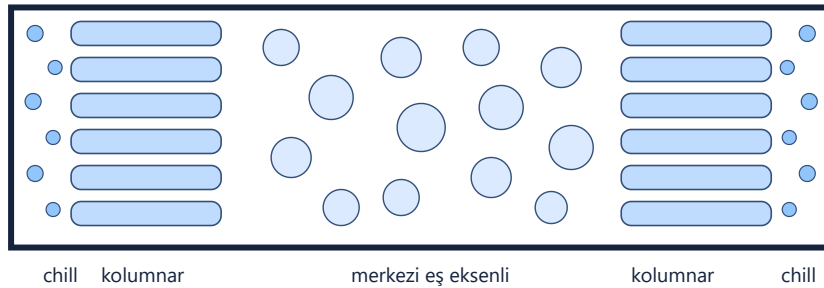
4. Katılaşma Metalurjisi

4.1 Çekirdeklenme ve tane yapısı

Katılaşma, sıvı içinde katı çekirdeklerin oluşması (**çekirdeklenme**) ve bunların büyümesiyle ilerler. Homojen çekirdeklenme pratikte gözlenmez; katılaşma daima kalıp yüzeyi, inklüzyonlar veya bilinçli eklenen **aşılaiıcılar** (örn. Al alaşımlarında TiB_2 , gri dökme demirde FeSi) üzerinde **heterojen** olarak başlar.

Tipik bir ingot/döküm kesitinde üç bölge ayırt edilir:

- **Chill bölgesi:** Kalıp cidarında ani soğumayla oluşan ince eş eksenli taneler.
- **Kolumnar bölge:** Isı akışının tersi yönünde uzayan sütunsal taneler; anizotropi kaynağıdır.
- **Merkezi eş eksenli bölge:** Aşılama ve düşük döküm sıcaklığıyla genişletilmesi hedeflenen izotrop bölge.



Şekil 2. Döküm kesitinde makro tane yapısı bölgeleri (şematik — SAE Mühendislik çizimi).

4.2 Katılaşma aralığı ve besleme davranışı

Saf metaller ve ötektikler sabit sıcaklıkta (**cilt tipi** katılaşma), geniş katılaşma aralıklı alaşımlar ise kesit boyunca **lapa (mushy) tipi** katılaşır. Cilt tipi katılaşan alaşımlar (ör. ötektiğe yakın Al-Si) merkezî çekintiye; lapa tipi katılaşanlar (ör. Al-Cu, çelik) dağınık mikro çekintiye eğilimlidir. Besleyici stratejisi bu davranışa göre kurulur.

4.3 Chvorinov kuralı ve modül

Katılaşma süresi, parçanın **modülü** (M = hacim/soğuyan yüzey alanı) ile belirlenir:

$$t = B \cdot (V / A)^n \rightarrow t = B \cdot M^n \quad (n \approx 2)$$

Burada t katılma süresi, B kalıp sabitidir. **Yönlenmiş katılmanın** altın kuralı şudur: katılma, besleyiciden en uzak bölgeden başlayıp besleyiciye doğru ilerlemeli; besleyici en son katılmalıdır. Pratik tasarımda $M_{\text{besleyici}} \geq 1,2 \cdot M_{\text{parça}}$ alınır; ulaşılamayan sıcak noktalar **soğutucu (chill)** ile eritilir.

Saha notu: Çekinti kaynaklı hurdanın en yaygın kök nedeni, modül zinciri kırılarak beslemenin önünün kesilmesidir. Şüpheli bölgede kesit modüllerini besleyiciye doğru artan sırada kontrol etmek, simülasyona başvurmadan önce yapılabilecek en etkili el hesabıdır.

5. Yolluk ve Besleyici Tasarımının Esasları

5.1 Dolum: hızlı ama sakın

Dolum süresi uzarsa soğuk birleşme, kısalsa türbülans riski doğar. Alüminyum gibi kolay oksitlenen alaşımlarda serbest yüzey hızının **~0,5 m/s** altında tutulması, çift oksit filmi (bifilm) hasarını önlemenin anahtarıdır. Basıncsız sistemlerde kesit oranları (düşey yolluk : dağıtıcı : girişler) tipik olarak **1 : 2 : 4** seçilerek girişlerde hız düşürülür.

5.2 Besleyici hesabının adımları

1. Parçayı basit geometrik bölgelere ayır; her bölgenin modülünü hesapla.
2. Beslenecek kritik bölgeyi (en büyük modül) belirle.
3. $M_b \geq 1,2 \cdot M_p$ koşulunu sağlayan besleyici boyutunu seç (silindirik besleyicide $H/D \approx 1-1,5$).
4. Besleyici hacminin, alaşımın katılma büzülmesini (Al ~%6-7, çelik ~%3-4, sfero ~%0-3) karşıladığını doğrula.
5. Besleme mesafesini kontrol et; yetmiyorsa besleyici sayısını artır veya soğutucu ekle.

6. Başlıca Döküm Alaşımları

6.1 Dökme demirler

- **Gri dökme demir (EN-GJL):** Lamel grafitli; mükemmel titreşim sönümü ve işlenebilirlik. Motor bloğu, tezgâh gövdesi, fren diski.
- **Sfero — küresel grafitli (EN-GJS):** Mg ile küreselleştirme işlemi grafiti nodüle çevirir; çeliğe yakın mukavemet + döküm kolaylığı. Aks taşıyıcı, dişli kutusu, rüzgâr türbini göbeği. Kalite güvencesinde **nodülerite (küresellik) oranı** kritik metriktir (hedef tipik $\geq \%80$, ISO 945 / ASTM A247'ye göre değerlendirilir).
- **Vermiküler (EN-GJV):** Gri ile sfero arası; ağır vasıta motor bloklarında yükselen malzeme.
- **Temper ve beyaz dökme demir:** Beyaz DD aşınma uygulamalarında; temper DD günümüzde büyük ölçüde sferoya terk edilmiştir.

6.2 Çelik döküm

Yüksek mukavemet ve tokluk sağlar; ancak yüksek ergitme sıcaklığı (~1600 °C), büyük büzülme ve düşük akıcılık nedeniyle yolluk-besleyici tasarımı en zahmetli malzeme grubudur. Vana gövdeleri, ray ekipmanı, iş

makinesi parçaları tipik uygulamalardır (EN 10293).

6.3 Alüminyum alaşımları

Döküm alüminyumunun bel kemiği **Al-Si** sistemidir: Si akıcılığı artırır, büzülmeyi azaltır. En bilinen temsilci **A356 / EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3)**; T6 ısıt işleminde (çözültü alma → su verme → yapay yaşlandırma) jant ve şasi parçalarında kullanılır. Ergiyik kalitesinde hidrojen gazı ve oksit filmleri iki ana düşmandır; **döner gaz giderme (rotary degassing)** ve filtrasyon standart önlemlerdir.

6.4 Diğerleri

Magnezyum (AZ91: en hafif yapısal döküm metali, HPDC ile), **bakır alaşımları** (bronz/pirinç: yatak, armatür, pervane) ve **çinko** (ZAMAK: ince cidarlı hassas HPDC parçalar) sanayide önemli yer tutar.

7. Döküm Hataları: Tanı ve Önleme

Hata yönetiminin ilk kuralı doğru teşhistir; yanlış adlandırılan hata, yanlış önlemlerle "çözölmeye" çalışılır. Aşağıdaki tablo en sık karşılaşılan hataları özetler.

Hata	Tipik görünüm	Kök neden	Başlıca önlemler
Gaz porozitesi	Düzensiz cidarlı, parlak küresel boşluklar	Ergiyikte çözünmüş H ₂ (Al), nem, kalıp/maça gazları	Gaz giderme, kuru şarj ve kepçe, kalıp havalandırması
Çekme boşluğu	Düzensiz, dendritik iç yüzeyli boşluk; sıcak noktada	Yetersiz besleme, modül zinciri kırılması	Besleyici/soğutucu tasarımı, yönlendirilmiş katılma
İnklüzyon	Düzensiz oksit/cüruf parçacıkları	Türbülanslı dolum, kirli ergiyik, kalıp erozyonu	Filtre, cüruf tutucu, sakın dolum (<0,5 m/s)
Soğuk birleşme	Yuvarlak kenarlı birleşme çizgisi	Düşük döküm sıcaklığı, uzun dolum, ince kesit	Sıcaklık/dolum süresi optimizasyonu, giriş düzeni
Eksik dolum	Parçanın uç bölgelerinin oluşmaması	Akıcılık yetersizliği, erken katılma	Döküm sıcaklığı, kesit kalınlığı, kalıp ön ısıtma
Sıcak yırtılma	Kesit geçişinde dallanmış, oksitli çatlak	Katılma sonu büzölmenin engellenmesi	Radyüs artırma, kum mukavemetini düşürme, alaşım seçimi
Kum hataları	Kum yapışması, erozyon izleri, rat kuyruğu	Düşük kum mukavemeti, yüksek metal hızı	Kum reçetesi, boya/refrakter kaplama, yolluk revizyonu



Şekil 3. Üç boşluk tipinin ayırt edilmesi. Teşhis, boşluğun **iç yüzeyinden** ve **kesitteki yerinden** yapılır; yanlış adlandırılan hata yanlış önlemlerle çözülmeye çalışılır — besleme sorununa gaz giderme uygulamak sonuç vermez. (şematik — SAE Mühendislik çizimi.)

Ayırt etme ipucu: Gaz boşluğunun iç yüzeyi parlak ve düzgün, çekme boşluğununki ise mat ve dendritiktir. Stereo mikroskopla yapılacak bu basit ayırım, iyileştirme çabasını doğru hedefe (ergiyik kalitesi ↔ besleme tasarımı) yönlendirir.

8. Kalite Kontrol ve Muayene

- **Döküm öncesi:** Kimyasal analiz (spektrometre), Al'de hidrojen ölçümü (RPT/yoğunluk endeksi), dökme demirde termal analiz ve aşı kontrolü.
- **Tahribatsız muayene:** Yüzey için penetrant (PT) ve manyetik parçacık (MT); iç yapı için radyografi (RT, ASTM E155 referans görüntüleri) ve ultrasonik muayene (UT); HPDC'de bilgisayarlı tomografi yaygınlaşmaktadır.
- **Mikroyapı:** Sferoda nodülerite ve ferrit/perlit oranı; Al-Si'de dendrit kol aralığı (SDAS) ve modifikasyon derecesi.
- **Mekanik testler:** Ayrı dökülen veya parçaya yapışık test çubuklarıyla çekme ve sertlik; kritik parçalarda parçadan numune.
- **Başlıca standartlar:** TS EN 1559 (genel teknik teslim şartları), EN 1563 (sfero), EN 1561 (gri DD), EN 1706 (Al döküm), EN 10293 (çelik döküm), ISO 945 / ASTM A247 (grafit sınıflandırma).

9. Simülasyon ve Güncel Eğilimler

Katılma ve dolum simülasyonu (sonlu farklar/elemanlar tabanlı ticari yazılımlar), sıcak nokta, hava hapsi ve mikro porozite tahminini deneme-yanılmanın önüne geçirek devreye alma süresini kısaltmıştır. Güncel eğilimler arasında; **binder-jet ile kalıp/maça baskısı** (modelsiz kalıplama), otomotivde çok büyük tek parça HPDC gövdeler (*mega-casting*), yapısal HPDC için vakum destekli prosesler ve döküm simülasyonunun makine öğrenmesiyle hızlandırılması sayılabilir.

10. Yararlanılan Temel Kaynaklar

1. Campbell, J., *Castings — The New Metallurgy of Cast Metals*, 2. baskı, Butterworth-Heinemann, 2003.
2. Campbell, J., *Complete Casting Handbook*, 2. baskı, Elsevier, 2015.

3. ASM International, *ASM Handbook Vol. 15: Casting*, 2008.
4. Groover, M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 7. baskı, Wiley, 2019.
5. Beeley, P., *Foundry Technology*, 2. baskı, Butterworth-Heinemann, 2001.
6. Stefanescu, D.M., *Science and Engineering of Casting Solidification*, 3. baskı, Springer, 2015.
7. İlgili standartlar: TS EN 1559, EN 1561, EN 1563, EN 1706, EN 10293, ISO 945, ASTM A247, ASTM E155.