



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 18

Toz Metalurjisi ve Eklemeli İmalat

Toz üretimi ve karakterizasyonu, presleme ve sinterleme, MIM ve HIP, metal eklemeli imalat aileleri (PBF-LB, PBF-EB, DED, BJT), enerji yoğunluğu, anizotropi ve AM için tasarım

Hazırlayan: Ahmet Asım ESER — SAE Mühendislik ve Danışmanlık Hizmetleri

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

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

1. Giriş: Tozdan Parçaya İki Yol

Klasik imalatın büyük bölümü **çıkarmalıdır**: bir kütükten başlanır, istenmeyen kısım talaş olarak atılır. Bu yayının konusu olan iki aile ise tersini yapar — malzemeyi **taneciklerden birleştirerek** parçayı kurar:

- Toz metalurjisi (TM/PM)**: metal tozu kalıpta preslenir ve **ergime noktasının altında** ısıtılarak (sinterleme) katı parçaya dönüşür. Yüz yıllık, yüksek hacimli ve çok ucuz bir seri üretim yöntemidir.
- Eklemeli imalat (Eİ/AM)**: aynı toz (ya da tel), parça geometrisine göre **katman katman** eritilerek veya bağlanarak birleştirilir. Kalıp yoktur; karmaşıklık bedava, adet pahalıdır.

İkisinin ortak dili **tozdur**. Bu yüzden belge önce tozu, sonra iki yolu anlatır.

Yaygın yanlış: "Eklemeli imalat toz metalurjisinin modern hâlidir." Değildir — ikisi **farklı ekonomik bölgelerde** yaşar. Klasik TM'de kalıp pahalıdır ama parça başı maliyet çok düşüktür: **on binlerce adet** için doğru yöntemdir. AM'de kalıp yoktur ama parça başı süre ve maliyet yüksektir: **tek parça, prototip, karmaşık geometri ve yedek parça** için doğru yöntemdir. Adet eğrisi hangisinin kazandığını belirler.

2. Toz Üretimi ve Karakterizasyonu



Şekil 1 — Toz üretim yöntemi, tanenin **şeklini** belirler; şekil de tozun nerede kullanılabileceğini. Eklemeli imalatla küresel toz zorunludur: düzensiz toz yatakta düzgün serilmez ve yoğunluk tutmaz. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

Toz, bir "malzeme" değil bir **ürün şartnamesidir**. Satın alınırken şu büyüklükler yazılır:

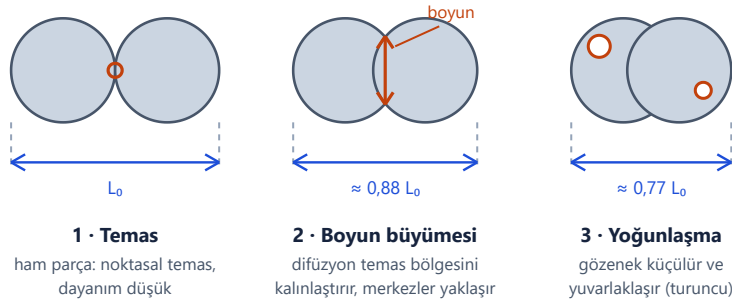
Özellik	Standart	Neden önemli
Tane boyutu dağılımı (D10/D50/D90)	ISO 13320	PBF-LB için tipik 15–45 µm; çok ince toz akmaz, çok iri katman kalınlığına sığmaz
Akıcılık (Hall hunisi)	ISO 4490	Yatağın düzgün serilmesi; kötü akan toz boşluk bırakır
Görünür ve sıkışık yoğunluk	ISO 3923 · ISO 3953	Kalıp dolumu ve yatak yoğunluğu
Tane şekli ve uydu oranı	ISO/ASTM 52907	Küresellik akıcılığı belirler; "uydu" tanecikler akıcılığı bozar
Oksijen ve nem	ISO/ASTM 52907	Ti ve Al tozlarında oksijen kalıcı olarak artar; nem gözenek yapar
İçi boş tane oranı	—	Gaz atomize tozda argon hapsolabilir; parçada kapalı gözenek olarak kalır

Toz, kullandıkça değişir. AM'de kullanılmayan toz elenip tekrar kullanılır; her çevrimde **oksijen artar**, ince fraksiyon azalır, uydu ve sıçrantı (spatter) taneleri birikir. Bu yüzden ciddi üretimde **toz yaşı ve çevrim sayısı izlenir**, taze tozla karıştırma oranı sabitlenir. "Aynı toz" varsayımı, AM'deki tekrarlanabilirlik sorunlarının en yaygın kaynağıdır.

3. Klasik Toz Metalurjisi: Presle–Sinterle

Standart akış dört adımdır: **karıştırma** → **presleme** → **sinterleme** → **ikincil işlem**.

- **Presleme:** Demir esaslı tozda tipik olarak **400–800 MPa** tek eksenli basınç. Çıkan "ham parça" (green compact) zayıftır, sadece taşınabilir.
- **Sinterleme:** Ergime noktasının **%70–80'i** sıcaklıkta (demirde $\approx 1120^\circ\text{C}$), koruyucu atmosferde. Taneler arasında **boyun** oluşur, boyunlar büyür, gözenek küçülüp yuvarlaklaşır ve parça **büzülür**.
- **İkincil işlem:** kalibrasyon (sizing), yağ emdirme, buhar işlemi, ısıtma işlemi, talaşlı bitirme.



Sinterleme ERGİTMEZ — katı hâlde difüzyonla birleştirir; bu yüzden parça büzülür.

Şekil 2 — Sinterlemenin üç aşaması. Boyutsal küçülme rastgele değildir; kalıp, **büzülme hesaba katılarak büyük yapılır**. Çizimdeki oranlar abartılıdır: gerçek doğrusal büzülme presle–sinterlede birkaç %, MIM ve BJT'de %15–20 mertebesindedir. Oranın kararlılığı toz ve pres parametrelerinin sabitliğine bağlıdır. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

Yoğunluk her şeyi belirler

Klasik presle–sinterle parçalarda **gözeneklilik kalır**. Çelikte teorik yoğunluk $7,87 \text{ g/cm}^3$ iken tipik TM parçası **$6,8\text{--}7,2 \text{ g/cm}^3$** (yaklaşık %86–92) olur. Gözenek yalnızca ağırlığı değil, **mekanik davranışı** da belirler:

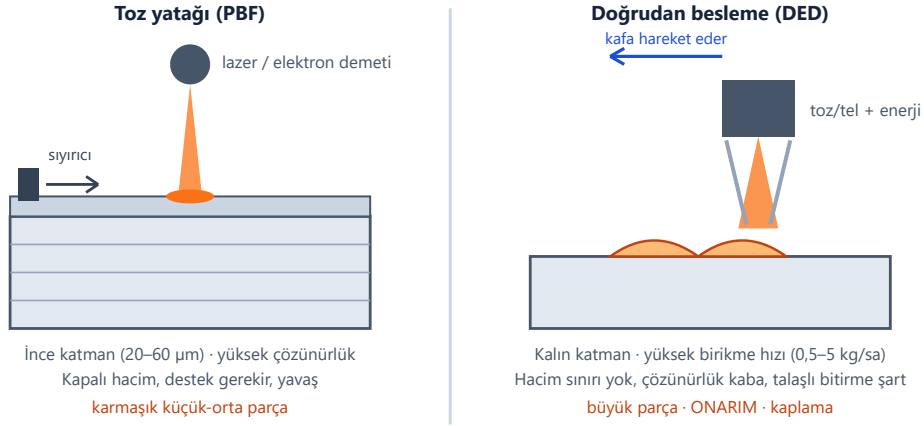
Özellik	Gözenekliliğin etkisi
Çekme ve akma dayanımı	Yoğunlukla hızla artar; gözenek kesit kaybı + çentik etkisi yapar
Süneklik ve tokluk	En çok etkilenen özellik. Gözenekli TM parçası gevrek davranır (bkz. No.15)
Yorulma dayanımı	Gözenekler hazır çatlak başlangıcıdır; dövme eşdeğerinin belirgin altında (bkz. No.9)
Korozyon	Açık gözenek sıvıyı içeri çeker; paslanmaz TM parçada bile aralık korozyonu olur (bkz. No.12)
Yağ emdirme	Avantaja dönen tek etki: kendinden yağlamalı burçlar gözenekliliğe borçludur

4. Tam Yoğunluğa Giden Yollar

Yöntem	Nasıl çalışır	Tipik sonuç ve yer
HIP (sıcak izostatik presleme)	Yüksek sıcaklıkta her yönden gaz basıncı (tipik 100–200 MPa) uygulanır	Kapalı iç gözenekleri kapatır → ≈%100 yoğunluk. Döküm ve AM parçalarda standart iyileştirme; yüzeğe açık gözenegi kapatmaz
MIM (metal enjeksiyon kalıplama)	≈%60 toz + ≈%40 bağlayıcı plastik gibi enjekte edilir; bağlayıcı uzaklaştırılır (debinding), sonra sinterlenir	%98–99 yoğunluk, karmaşık küçük parça, %15–20 büzülme . Yüksek adette çok ekonomik
Sıcak presleme / SPS	Basınç ve sıcaklık aynı anda; SPS'te akım darbesiyle hızlı ısıtma	Laboratuvar ve özel malzemeler; ince taneli yapı korunur
Toz dövme	Ön sinterlenmiş parça sıcak dövülür	Tam yoğunluk + dövme lif yapısı; biyel kolu klasik örneği

5. Eklemeli İmalat Aileleri

ISO/ASTM 52900 eklemeli imalatı yedi aileye ayırır. Metal üretiminde dördü belirleyicidir:



Şekil 3 — Metal AM'in iki ana mantığı. **PBF** tozu önce serer sonra eritir: hassas ama yavaş ve hacimle sınırlı. **DED** tozu/teli doğrudan ergime havuzuna besler: hızlı ve sınırsız ama kaba — bu yüzden **onarım ve dolgu** uygulamalarının yöntemidir. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

Aile	Nasıl birleştirir	Güçlü ve zayıf yanı
PBF-LB (lazer, toz yatağı)	Koruyucu gazda lazerle eritme, katman 20–60 µm	En yaygın metal AM. İyi çözünürlük; yüksek artık gerilme , destek ve gerilim giderme şart
PBF-EB (elektron demeti)	Vakumda elektron demeti; yatak ≈600–700 °C ön ısıtmalı	Sıcak yatak sayesinde artık gerilme çok düşük , destek azalır; yüzey daha kaba, vakum gerekir. Ti alaşımları ve implant
DED	Toz/tel ergime havuzuna beslenir (lazer, ark veya elektron demeti)	Yüksek birikme hızı, mevcut parçaya ekleme ve onarım ; kaba yüzey, talaşlı bitirme zorunlu
BJT (bağlayıcı püskürtme)	Toz yatağına bağlayıcı basılır; ham parça sonra fırında sinterlenir	Hızlı ve ucuz, ısı gerilme yok; ≈%20 büzülme ve boyut kontrolü zorluğu, yoğunluk sinterlemeye bağlı

6. Proses Parametreleri ve Kusurlar (PBF)

Dört ana parametre tek bir büyüklükte toplanır — **hacimsel enerji yoğunluğu**:

$$E = P / (v \cdot h \cdot t) \quad [J/mm^3]$$

P lazer gücü (W), v tarama hızı (mm/s), h tarama aralığı (hatch, mm), t katman kalınlığı (mm). Çelik ve titanyumda çalışma penceresi tipik olarak **40–120 J/mm³** aralığındadır. Pencerenin iki yanında iki ayrı kusur ailesi vardır:

Kusur	Ne zaman	Görünümü ve sonucu
Ergime eksikliği (lack of fusion)	Enerji düşük	Katmanlar arası düzensiz, köşeli, düzlemsel boşluk. En tehlikelisi: çatlak gibi davranır, yorulmayı öldürür
Anahtar deliği (keyhole) gözeneği	Enerji yüksek	Derin buhar kanalı çöker, küresel gaz gözeneği kalır. HIP ile kapatılabilir
Boncuklanma (balling)	Hız yüksek / ıslatma kötü	Sürekli dikiş yerine kopuk damlalar; yüzey ve katman bağı bozulur
Sıçrantı (spatter)	Her koşulda bir miktar	Yatak üstüne düşer, sonraki katmanda kusur çekirdeği olur; gaz akışı tasarımı önemli
Çarpılma / tabladan kopma	Artık gerilme	Destek kopar, parça kalkar; tabladan kesmeden önce gerilim giderme şarttır

E tek başına yeterli değildir. Aynı E değeri farklı P ve v çiftleriyle elde edilebilir ve sonuçlar **aynı olmaz**. Enerji yoğunluğu bir ön eleme aracıdır; gerçek pencere, malzeme ve makine için deneysel olarak (tek dikiş denemeleri + yoğunluk ölçümü) belirlenir ve parametre seti **makineye özgüdür**.

7. AM Parçanın Mikroyapısı ve Özellikleri

AM'de her nokta saniyeler içinde erir ve **10³–10⁶ K/s** mertebesinde soğur. Bu, döküm ya da dövme ile kıyaslanamayacak bir katılaşmadır ve kendine özgü bir yapı üretir:

- Sütunsal taneler:** ısı tabla yönüne aktığı için taneler **yapım yönünde** uzar; birçok katmanı birden keser.
- Anizotropi:** özellikler yöne bağlıdır. Yapım yönünde (Z) çekme dayanımı ve özellikle **süneklik, düzlem içi (XY) değerlerin altındadır**. Katman sınırı zayıf halkadır.
- Artık gerilme:** ardışık hızlı ısınma-soğuma yüksek gerilme bırakır; çarpılma ve çatlak nedenidir (bkz. **No.15**).
- Yüzey:** işlenmemiş AM yüzeyi tipik olarak **Ra 10–25 µm**'dir ve yapışmış yarı ergimiş taneler içerir — yorulma için ciddi bir çentik kaynağıdır (bkz. **No.9**).
- Yapım yönü bir tasarım parametresidir:** aynı geometri farklı açıyla basıldığında farklı dayanım, farklı yüzey ve farklı maliyet verir.

8. AM İçin Tasarım (DfAM)

AM "her şeyi basar" değildir. ISO/ASTM 52910 bu kuralları toplar; pratikte en çok işe yarayanlar:

- **45° kuralı:** yatayla **45°'den dik** yüzeyler genellikle kendini taşır; daha yatık yüzeyler destek ister. Destek = ek malzeme, ek süre, ek temizlik ve bozuk yüzey.
- **Delikleri yuvarlak değil damla ya da eşkenar dörtgen yap:** yatay silindirik deliğin tavanı desteksiz kalır ve sarkar; damla kesit kendini taşır.
- **Toz boşaltma yolu bırak.** Kapalı iç hacim güzel görünür ama içindeki toz asla çıkmaz. İç kanallara **tahliye deliği** koy.
- **Kritik yüzeyleri işleme payıyla tasarla.** AM yüzeyi doğrudan sızdırmazlık veya yatak yüzeyi olamaz.
- **Parça birleştirme (part consolidation):** AM'in en gerçek kazancı tek bir parçayı basmak değil, **montajı tek parçaya indirmektir** — daha az bağlantı, daha az sızdırmazlık, daha az ağırlık.
- **Topoloji optimizasyonu ve kafes yapı** ancak AM ile üretilebilir; ama kafes iç yüzeyleri muayene edilemez (bkz. **No.14**) — kritik parçada dikkatli kullan.
- **Yapım yönünü erken seç;** yüzey kalitesi, destek miktarı, anizotropi ve maliyet aynı anda ona bağlıdır.

9. Son İşlemler ve Kalite Kontrol

Makineden çıkan parça **yarı mamuldür**. Tipik zincir:

1. **Gerilim giderme** — parça hâlâ tablaya bağlıyken yapılır; kesince çarpılmasını önler.
2. **Tabladan ayırma** (tel erozyon veya testere) ve **destek temizliği**.
3. **Toz giderme** — iç kanallar dâhil; kalan toz sonradan dökülür ve sistemi tıkar.
4. **HIP** (gerekiyorsa) — kapalı gözenekleri kapatır, yorulma dayanımını belirgin yükseltir.
5. **Isıl işlem** — malzemeye özgü çözeltiye alma/yaşlandırma (bkz. **No.7**).
6. **Yüzey işlemi ve talaşlı bitirme** — kritik yüzeyler (bkz. **No.16**).
7. **Muayene** — boyut, yoğunluk, **bilgisayarlı tomografi (CT)** iç gözenek için en etkili yöntemdir; standart TM yoğunluğu ISO 2738, sertlik ISO 4498 ile ölçülür.

Nitelendirme (qualification) farkı: Döküm ve dövmede malzeme sertifikası parçayı büyük ölçüde tanımlar. AM'de ise parçanın özelliği **makineye, toz partisine, konuma ve parametre setine** bağlıdır — yani **proses parçanın kendisidir**. Bu yüzden ciddi uygulamada her yapım işine **tanık numune** (witness coupon) konur, makine ve toz izlenir, parametre seti dondurulur. ISO/ASTM 52904 ve 52920/52921 bu çerçeveyi kurar.

10. Hangi Yöntem, Ne Zaman?

Durum	Uygun yöntem
Yılda 100.000 adet küçük dişli, basit geometri	Klasik TM (presle-sinterle) — kalıp amorti olur, parça başı maliyet en düşük
Yılda 50.000 adet küçük ve karmaşık parça	MIM — enjeksiyon kalıplamanın serbestliği + metal özellikleri
Kendinden yağlamalı burç	TM — gözeneklilik burada istenen özelliktir
1–100 adet karmaşık parça, prototip, hafifletme	PBF-LB
Titanyum implant, düşük artık gerilme	PBF-EB
Büyük parça, aşınmış parçanın onarımı , sert dolgu	DED (bkz. No.16 termal püskürtme ile karşılaştır)
Orta-yüksek adet, ısı gerilme istenmeyen, maliyet duyarlı	BJT — ama büzülme ve boyut toleransını hesaba kat
Döküm parçada iç gözeneği kapatmak	HIP (yeni üretim yöntemi değil, iyileştirme)

11. Pratik Kontrol Listesi

1. Adet kaç? Kalıp maliyeti amorti oluyor mu — gerçekten AM mi gerekiyor?
2. Toz şartnamesi yazıldı mı (boyut dağılımı, küresellik, oksijen, akıcılık)? **Toz çevrim sayısı** izleniyor mu?
3. Klasik TM ise: hedef yoğunluk kaç g/cm³? Süneklik ve yorulma bu yoğunlukta yeterli mi?
4. Büzülme (TM $\approx$ ölçüye göre, MIM %15–20, BJT $\approx$ %20) kalıp/model ölçüsüne işlendi mi?
5. AM ise yapım yönü seçildi mi? Anizotropi kritik yön ile çıkıyor mu?
6. 45° kuralı, toz tahliye deliği ve destek erişimi tasarımda var mı?
7. Gerilim giderme **tablardan kesmeden önce** planlandı mı?
8. HIP gerekli mi? Kritik yüzeylerde işleme payı bırakıldı mı?
9. Muayene planı ne — CT mi, yoğunluk mu, tanık numune mi? Kabul ölçütü yazılı mı?

12. Yararlanılan Temel Kaynaklar

1. German, R.M., *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*, MPIF, 2005.
2. German, R.M., *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles*, Butterworth-Heinemann, 2014.
3. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., *Additive Manufacturing Technologies*, 3. baskı, Springer, 2021.
4. DebRoy, T. vd., "Additive manufacturing of metallic components — Process, structure and properties", *Progress in Materials Science*, 92, 2018.
5. ASM International, *ASM Handbook Vol. 7: Powder Metallurgy*, 2015.
6. ASM International, *ASM Handbook Vol. 24: Additive Manufacturing Processes*, 2020.
7. *İlgili standartlar*: ISO/ASTM 52900 (terminoloji), 52901, 52904, 52907 (metal tozları), 52910 (DfAM), 52920 / 52921, ASTM F2924 (Ti-6Al-4V PBF), ASTM F3055 / F3056, ISO 2738, ISO 4498, ISO 4490, ISO 3923, ISO 3953, ISO 13320, MPIF Standard 35.

