



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 3

Alüminyum ve Alaşımları

Alaşım serileri ve temper gösterimleri, çökelme sertleşmesi, ergiyik kalitesi, üretim yolları, korozyon 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: Neden Alüminyum?

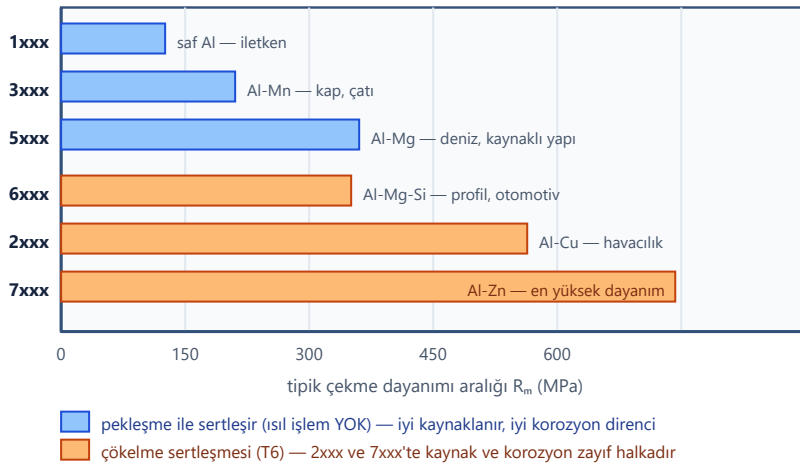
Alüminyum; 2,70 g/cm³ yoğunluğu (çeliğin ~üçte biri), doğal oksit filmi sayesinde korozyon direnci, yüksek ısı/elektriksel iletkenliği ve teorik olarak sınırsız geri dönüştürülebilirliğiyle demir dışı metallerin açık ara en çok üretilenidir. Saf hâlde yumuşaktır ($R_m \approx 90$ MPa); ancak alaşımlama ve ısıl işleme **700 MPa** üzerine çıkan dayanımlara ulaşılır — bu da onu "hafif ama güçlü" arayan her sektörün ana malzemesi yapar.

- Özgül mukavemet:** 7075-T6'nın dayanım/ağırlık oranı birçok yapı çeliğini geçer.
- Enerji ekonomisi:** Geri dönüşüm, birincil üretime göre ~%95 daha az enerji ister.
- İşlenebilirlik:** Dökülebilir, dövülebilir, ekstrüde edilebilir, haddelenebilir ve kolay talaş kaldırılır.

2. Alaşım Serileri

2.1 Dövme (işlem) alaşımları — EN 573 / AA gösterimi

Seri	Ana alaşım elementi	Sertleşme yolu	Tipik temsilci	Başlıca kullanım
1xxx	≥ %99 Al	Pekleşme	1050, 1350	Elektrik iletkenleri, kimya ekipmanı
2xxx	Cu	Isıl işlem (çökelme)	2024, 2014	Havacılık yapıları, perçin
3xxx	Mn	Pekleşme	3003, 3105	Levha, ısı eşanjörü, ambalaj
4xxx	Si	—	4043, 4047	Kaynak/lehim teli, piston
5xxx	Mg	Pekleşme	5083, 5754	Denizcilik, tank, kaynaklı yapı
6xxx	Mg + Si	Isıl işlem	6060, 6061, 6082	Ekstrüzyon profilleri, yapısal parçalar
7xxx	Zn (+Mg, Cu)	Isıl işlem	7075, 7050	Havacılık, yüksek dayanımlı yapı
8xxx	Diğer (Li, Fe)	Değişken	8090	Al-Li havacılık, folyo



Şekil 2. Dövme alaşım serilerinin dayanım haritası. Seçimde tek ölçüt dayanım değildir: **yukarı çıktıkça dayanım artar, kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci düşer**. 6xxx serisi bu üç özelliğin dengelendiği bölgedir; bu yüzden en yaygın kullanılan ailedir. (şematik — SAE Mühendislik çizimi; değerler temper'e göre değişir.)

2.2 Döküm alaşımları — EN 1706

Döküm tarafının bel kemiği **Al-Si** sistemidir. Si akıcılığı artırır, katılaşma büzülmesini azaltır. Başlıca temsilciler; **EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3 / A356)** — ısıtılmalı yapısal döküm standardı, **EN AC-46000 (AlSi9Cu3)** — basınçlı dökümün iş atı, **EN AC-44300 (AlSi12)** — ötektik, ince kesit dolumu. Cu içeren döküm alaşımları dayanımı artırır ancak korozyon direncini düşürür.

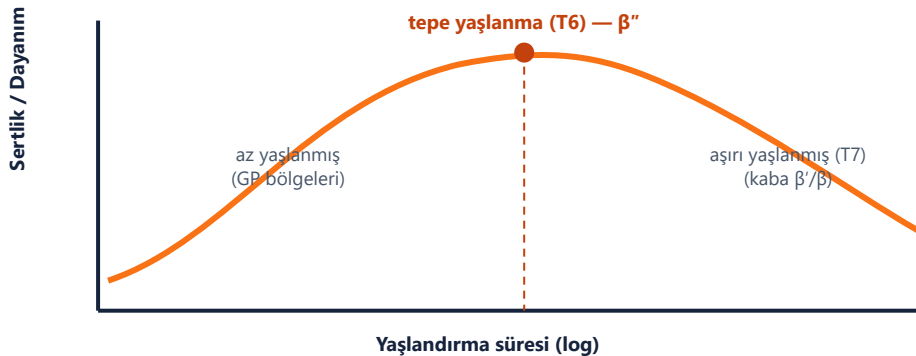
3. Temper Gösterimleri (EN 515)

Kod	Anlamı	Not
F	Üretildiği gibi	Özellik garantisi yok
O	Tavlanmış	En yumuşak, en sünek durum
H1x / H2x / H3x	Pekleştirilmiş	1xxx, 3xxx, 5xxx için; x = sertlik derecesi (H14 = yarı sert)
T4	Çözeltili alma + doğal yaşlanma	Şekillendirilebilirlik iyi
T5	Şekillendirme sıcaklığından soğutma + yapay yaşlandırma	Ekstrüzyonda yaygın
T6	Çözeltili alma + su verme + yapay yaşlandırma	En yüksek dayanım kombinasyonu
T7	Aşırı yaşlandırma	Boyut kararlılığı, SCC direnci (T73)

4. Çökelme Sertleşmesi: T6'nın Metalurjisi

Isıl işleme sertleşen serilerin (2xxx, 6xxx, 7xxx ve Al-Si-Mg dökümler) dayanım kaynağı, dislokasyon hareketini kesen **nano boyutlu çökeltilerdir**. Üç adımlı klasik reçete:

- Çözeltili alma:** Alaşım, tek faz bölgesine ısıtılır (örn. 6082 için ~530 °C); alaşım elementleri katı çözeltiliye alınır.
- Su verme:** Hızlı soğutma, aşırı doymuş katı çözeltili (SSSS) oda sıcaklığına "dondurur". Kritik adımdır: yavaş soğuma, çökeltilerin tane sınırlarında kabaca oluşup dayanımı ve korozyon direncini düşürmesine yol açar.
- Yaşlandırma:** Ilımlı sıcaklıkta (150–200 °C) bekletme; çökelti dizisi ilerler (6xxx için: SSSS → GP bölgeleri → β'' → β' → β -Mg₂Si). En etkili engel, kafesle uyumlu **ara fazlardır** (β'').



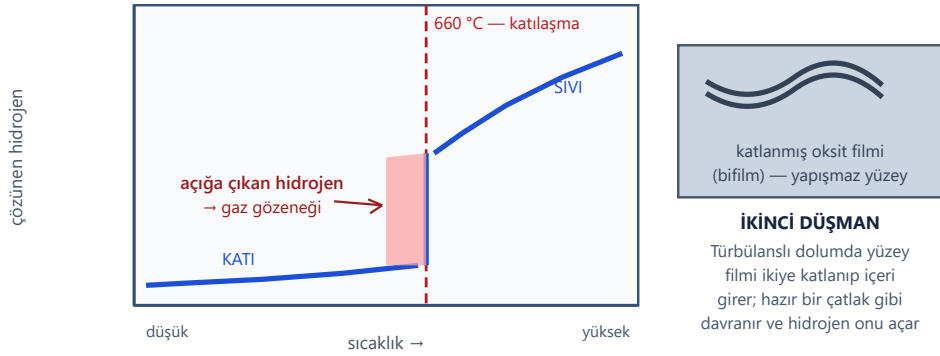
Şekil 1. Yaşlandırma eğrisi: sertliğin çökelti dizisiyle değişimi (şematik — SAE Mühendislik çizimi).

Saha notu: T6 parçada "dayanım tutmuyor" şikâyetinin en sık kök nedeni yaşlandırma fırını değil, **su verme gecikmesidir**. Çözeltiye alma fırınından su verme ortamına transfer süresi (tipik hedef < 15 s, kalın kesitte daha kritik) uzadıkça özellikler geri dönüşsüz kaybedilir.

5. Ergiyik Kalitesi: Alüminyumun İki Düşmanı

5.1 Hidrojen

Sıvı alüminyum, nemden gelen hidrojeni kolayca çözer; katılaşmada çözünürlük ~20 kat düşer ve fazla hidrojen **gaz porozitesi** olarak yapıda kalır. Önlem: **döner gaz giderme** (rotary degassing, inert gazla), kuru şarj/takım, ölçüm için **vakum altında katılaştırma testi (RPT)** ve yoğunluk endeksi takibi.



İki düşman birlikte çalışır: bifilm boşluğu açacak yüzeyi, hidrojen onu şişirecek gazı sağlar.
Bu yüzden gaz giderme tek başına yetmez; sakın dolum şarttır.

Şekil 3. Alüminyumun iki düşmanı. Hidrojen çözünürlüğü katılaşmada **yaklaşık 20 kat düşer**; sıvıda çözülmüş olan fazla hidrojen katıya sığmaz ve gözenek olarak kalır. Oksit bifilmli ise bu gözenegin çekirdekleneyeceği hazır yüzeyi sağlar. (şematik — SAE Mühendislik çizimi.)

5.2 Oksit filmleri (bifilm)

Serbest yüzey her an oksitlenir; türbülanslı transfer ve dolum, bu filmleri ergiyik içine katlayarak **çift oksit filmi (bifilm)** hâlinde gömer. Bifilmli; porozite çekirdeği, yorulma çatlak başlangıcı ve süneklik kaybının başlıca sorumlusudur. Önlem: sakın transfer (< 0,5 m/s), alttan dolum, köpük seramik filtre (CFF), bekletme ve temiz pota pratiği.

5.3 Yapı iyileştirme

- **Tane inceltme:** Al-Ti-B (TiB_2) master alaşımıyla eş eksenli ince tane; besleme ve süneklik iyileşir.
- **Modifikasyon:** Al-Si ötektikindeki iğnesel Si'yi Sr (veya Na) ilavesiyle lifsi hâle çevirme; tokluk belirgin artar.
- **SDAS kontrolü:** Dendrit kol aralığı soğuma hızının parmak izidir; kritik dökümlerde spesifikasyona bağlanır.

6. Üretim Yolları

- **Döküm:** Kum, kokil, alçak/yüksek basınçlı döküm (bkz. SAE Teknik Yayınları No.1).
- **Dövme:** 6082/7075 yapısal parçalar; fiber yapı avantajı (bkz. No.2).
- **Ekstrüzyon:** Alüminyumun imza prosesi. Isıtılmış biyet, kalıptan geçirilerek profil hâline getirilir; 6xxx serisi "ekstrüzyon alaşımları"dır. Press-quench + T5/T6 ile tek hatta profil + mukavemet elde edilir. Karmaşık çok

boşluklu kesitler başka hiçbir yöntemle bu maliyete üretilemez.

- **Haddeleme:** Levha/folyo; otomotiv gövde sacları (5xxx iç, 6xxx dış panel).
- **Birleştirme:** MIG/TIG kaynağı (5xxx-6xxx iyi; 2xxx/7075 çatlama eğilimli), sürtünme karıştırma kaynağı (FSW), yapıştırma ve mekanik bağlantılar.

7. Korozyon Davranışı ve Yüzey İşlemleri

- **Doğal pasiflik:** 2–4 nm Al_2O_3 filmi nötr ortamda mükemmel koruma sağlar; kuvvetli asit/baz ortamında bozulur.
- **Çukurcuk korozyonu:** Klorürlü ortamların tipik hasarı; alaşım temizliği (özellikle Fe içeriği) belirleyicidir.
- **Galvanik korozyon:** Al, çoğu metale göre anottur; çelik/bakır ile doğrudan temas yalıtılmalıdır.
- **Taneler arası korozyon / SCC:** Yanlış ısıtım işlem görmüş 2xxx ve 7xxx'te risk; 7075'te T73 aşırı yaşlandırması SCC direnci için geliştirilmiştir.
- **Yüzey işlemleri:** Anodizasyon (dekoratif ve sert anodik), kromat yerini alan Cr(VI)'sız dönüşüm kaplamaları, toz boya öncesi pretretman.

8. Sık Karşılaşılan Sorunlar: Tanı ve Önleme

Sorun	Tipik görünüm	Kök neden	Başlıca önlemler
Gaz porozitesi	Küresel, parlak iç yüzeyli boşluklar	Yüksek H_2 , nemli şarj	Döner gaz giderme, RPT takibi
Bifilm/oksit inklüzyonu	Kırıktaki mat film izleri, erken yorulma	Türbülanslı transfer/dolum	Sakin dolum, filtrasyon, yolluk revizyonu
Düşük T6 özellikleri	Sertlik/çekme bandının altında	Su verme gecikmesi, düşük çözelti sıcaklığı	Transfer süresi, fırın kalibrasyonu
Sıcak yırtılma	Kesit geçişinde dallı çatlak	Geniş katılma aralığı + kısıt	Radyüs, tane inceltme, alaşım seçimi
Ekstrüzyonda kaba tane halkası	Profil çevresinde iri taneli kuşak	Yüzeyde aşırı deformasyon + rekristalizasyon	Biyet sıcaklığı/hız dengesi, Cr-Mn'lu alaşım
Anodizasyonda renk farkı	Aynı partide ton değişimi	Alaşım/temper karışması, yüzey hazırlığı	İzlenebilirlik, tek döküm-tek parti kuralı

9. Kalite Kontrol ve Standartlar

- **Kimyasal analiz:** Optik emisyon spektrometresi; EN 573 (dövme) / EN 1706 (döküm) aralıkları.
- **Mekanik testler:** EN ISO 6892-1 çekme, sertlik (HBW); temper doğrulama.
- **İç yapı:** RT/BT ile porozite değerlendirme, mikroyapıda SDAS ve modifikasyon derecesi, dövme/ekstrüzyonda makro dağlama.
- **Ergiyik kontrol:** RPT/yoğunluk endeksi, K-mold, termal analiz (tane inceltme ve modifikasyon etkinliği).
- **Başlıca standartlar:** EN 573, EN 515, EN 1706, EN 755 (ekstrüzyon), EN 485 (levha), EN 12258 (terimler).

10. Güncel Eğilimler

Taşıtların elektrifikasyonu alüminyum talebini büyütüyor: batarya kasaları (ekstrüzyon + FSW), **mega-casting** ile tek parça gövde bölümleri ve ısıt işlemsiz (self-hardening) döküm alaşımları öne çıkıyor. Diğer başlıklar: yüksek geri dönüşüm içerikli "yeşil alüminyum", Sc/Zr mikroalaşımlama, eklemeli imalat için AlSi10Mg ve yeni nesil yüksek dayanımlı toz alaşımları.

11. Yararlanılan Temel Kaynaklar

1. Polmear, I., StJohn, D., Nie, J.-F., Qian, M., *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*, 5. baskı, Butterworth-Heinemann, 2017.
2. ASM International, *ASM Handbook Vol. 2: Properties and Selection — Nonferrous Alloys*, 1990.
3. Kaufman, J.G., Rooy, E.L., *Aluminum Alloy Castings*, ASM International, 2004.
4. Totten, G.E., MacKenzie, D.S. (ed.), *Handbook of Aluminum Vol. 1*, Marcel Dekker, 2003.
5. Campbell, J., *Castings — The New Metallurgy of Cast Metals*, 2. baskı, Butterworth-Heinemann, 2003.
6. İlgili standartlar: EN 573, EN 515, EN 1706, EN 755, EN 485, EN ISO 6892-1.