



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 17

Triboloji: Aşınma ve Yağlama

Sürtünme ve gerçek temas alanı, altı aşınma mekanizması, Archard bağıntısı, Stribeck eğrisi ve yağlama rejimleri, film parametresi λ , yağ seçimi ve yağ analizi

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: Aşınma Bir Malzeme Özelliği Değildir

Triboloji, birbirine göre hareket eden yüzeylerin bilimidir ve üç konuyu birlikte ele alır: **sürtünme**, **aşınma** ve **yağlama**. Bu üçlünün en çok yanlış anlaşılan yanı şudur:

Temel ilke: Sürtünme katsayısı ve aşınma hızı **malzemenin değil, sistemin** özellikleridir. Elastisite modülü bir malzeme sabitidir; "çeliğin aşınma direnci" diye bir sabit **yoktur**. Aynı çelik çifti, yükü, hızı, sıcaklığı, yağı veya ortamı değiştiğinde aşınma hızını **bin kat** değiştirebilir. Bu yüzden triboloji daima **tribosistem** üzerinden konuşur: iki yüzey + arayüz maddesi (yağ, toz, hava) + çevre + yükleme koşulu.

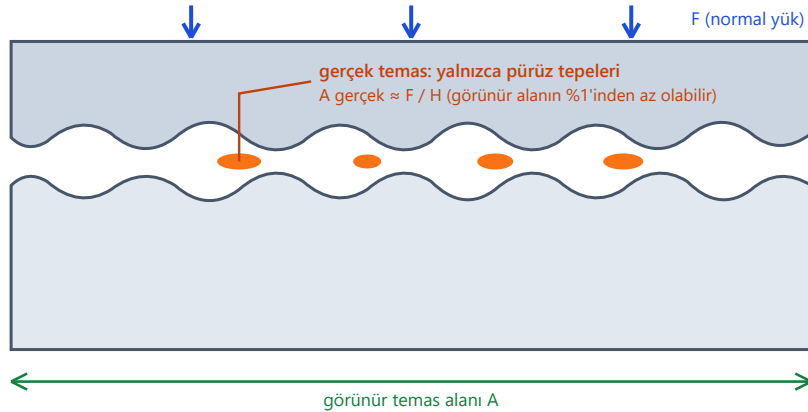
Pratik sonuç: bir aşınma probleminde "daha sert malzeme koyalım" refleksi çoğu zaman yanlıştır. Önce **hangi mekanizmanın** çalıştığı belirlenmelidir; abrazif aşınmada sertlik işe yarar, adeziv aşınmada **malzeme çifti uyumu**, yorulma aşınmasında **yağ filmi** belirleyicidir.

2. Sürtünme ve Gerçek Temas Alanı

Klasik Amontons–Coulomb yasaları sürtünme kuvvetini basitçe verir:

$$F_s = \mu \cdot F_N$$

ve iki gözlem ekler: sürtünme kuvveti **görünür temas alanından bağımsızdır** ve (yaklaşık olarak) **kayma hızından bağımsızdır**. Bu görünüşte tuhaf sonucun açıklaması, yüzeylerin aslında her yerden değil, yalnızca **pürüz tepelerinden (asperite)** temas etmesidir.



Şekil 1 — Yüzeyler göründükleri gibi değil, yalnızca pürüz tepelerinden temas eder. Gerçek temas alanı yükle **doğru orantılı** olduğu için sürtünme kuvveti görünür alandan bağımsız çıkar — Amontons yasasının fiziksel açıklaması budur. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

Yasaların sınırı: μ sabit bir sayı değildir. Çok yüksek yüzey basıncında (gerçek alan görünür alana yaklaşıncaya), çok yüksek hızda (sıcaklık ve yüzey filmi değişir), yumuşak polimerlerde ve temiz/vakum ortamında Amontons yasaları bozulur. Katalogdan alınan tek bir μ değeri **yalnızca ölçüldüğü koşulda** geçerlidir.

3. Aşınma Mekanizmaları

Aşınma tek bir olay değildir. Hasar incelemesinde ilk iş, aşınmış yüzeyin **hangi mekanizmanın izini** taşıdığını okumaktır:

Mekanizma	Yüzeydeki izi	Baskın önlem
Adeziv (yapışma)	Malzeme transferi, yırtılma, sıvanma; ağır hâlde sıcak kapma (scuffing/seizure)	Malzeme çifti uyumsuzluğu (aynı metali aynı metale sürme), EP katkılı yağ, yüzey filmi
Abraziv (çizici)	Kayma yönünde paralel çizikler, talaş benzeri kıvrımlar	Sertlik: yüzey sertliği aşındırıcının $\approx 1,3$ katı olmalı; keçe/sızdırmazlık, filtrasyon
Yüzey yorulması	Çukurcuklanma (pitting), pul pul kalkma (spalling); rulman ve dişli yan yüzeyinde	Yağ filmi (λ), temas basıncını düşürme, temizlik (bkz. No.9)
Tribokimyasal	Oksit tozu (kırmızı/siyah), renk değişimi	Ortam ve sıcaklık kontrolü, uygun katkı paketi
Fretting	Sıkı geçme/cıvata altında kırmızımsı oksit tozu, "kan izi"; fretting yorulması çatlak başlatır	Mikro hareketi kes (sıkılık, geometri), kaplama, gres
Erozyon / kavitasyon	Akış yönünde oluklar, süngerimsi çukurlar	Hız ve geometri, sert kaplama (bkz. No.12, No.16)

Adeziv ve abraziv aşınmada hacim kaybı için en yaygın mühendislik bağıntısı **Archard** bağıntısıdır:

$$V = K \cdot (F \cdot s) / H \quad \text{veya} \quad k = V / (F \cdot s) \quad [\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})]$$

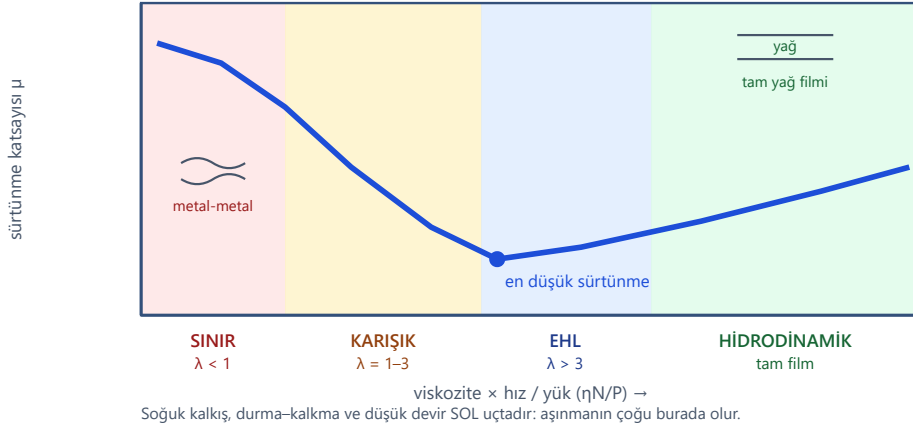
Burada V hacim kaybı, F normal yük, s kayma yolu, H daha yumuşak yüzeyin sertliği, K boyutsuz aşınma katsayısı, **k ise özgül aşınma hızıdır**. Pratikte k kullanılır çünkü doğrudan ölçülür ve karşılaştırılabilir:

Özgül aşınma hızı k	Yorum
$10^{-8} - 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$	Hafif aşınma — yağlı, kararlı sistem; uzun ömür beklenir
$10^{-6} - 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$	Orta — kabul edilebilir ama izlenmeli
$> 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$	Şiddetli aşınma — mekanizma değişmiş demektir (film kaybı, kapma, kirlenme)

Archard'ın doğru okunuşu: Bağıntı, aşınmanın **yükle ve yolla doğru, sertlikle ters** orantılı olduğunu söyler — ama bu yalnızca **mekanizma değişmediği sürece** geçerlidir. Yük artınca film kopup hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçilirse k birkaç mertebe birden sıçrar; Archard o sıçramayı öngörmez. Bu yüzden deney, servis koşuluna yakın yapılmalıdır.

4. Yağlama Rejimleri ve Stribeck Eğrisi

Yağlı bir temasta sürtünme ve aşınmayı belirleyen asıl büyüklük, yüzeyleri **ayıran film kalınlığıdır**. Film kalınlığı; **viskozite (η)**, **hız (N)** ve **yük/basınç (P)** üçlüsünün oranına bağlıdır. Bu oran eksen alınarak çizilen eğri **Stribeck eğrisidir**.



Şekil 2 — Stribeck eğrisi. Sağa doğru gidildikçe yüzeyler ayrılır ve aşınma pratikte durur; sola doğru metal-metal temas artar. Bir yatağın ömrü, **eğrinin neresinde çalıştığıyla** belirlenir. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

Rejim	Ne olur	Tipik yer
Sınır	Film yok; yükü katkı filmleri (AW/EP) taşır. Aşınma burada olur	Kalkış–duruş, çok düşük hız, aşırı yük
Karışık	Film kısmen taşır, pürüz tepeleri hâlâ değer	Dişli diş dibi, kam-izleyici, değişken rejim
EHL (elastohidrodinamik)	Nokta/çizgi temasında basınç viskoziteyi fırlatır, yüzeyler esner; film ince (0,1–1 μm) ama sürekli	Rulman, dişli, kam
Hidrodinamik	Kendi kendine oluşan basınçlı kama; metal teması yok, aşınma $\approx$ sıfır	Kaymalı (journal) yatak, yüzer burç

Film parametresi λ

Rejimi belirleyen pratik ölçüt, film kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne oranıdır:

$$\lambda = h_{\min} / \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$$

Burada $h_{\min}$ en küçük film kalınlığı, σ her iki yüzeyin pürüzlülüğüdür. $\lambda < 1$ sınır, **1–3** karışık, **> 3** tam film demektir. Bu bağıntının en önemli mesajı şudur: **yüzeyi düzgünleştirmek, yağı koyulaştırmakla aynı işi görür** — çoğu zaman daha ucuza ve enerji kaybı yaratmadan.

5. Yağlar, Gresler ve Katkılar

Konu	Bilinmesi gereken
Viskozite	Yağın tek en önemli özelliği. Sıcaklıkla hızla düşer; viskozite indisi (VI) bu düşüşün ne kadar az olduğunu gösterir (yüksek VI = daha kararlı)
ISO VG	Endüstriyel yağ sınıfı = 40 °C'deki kinematik viskozite (mm ² /s, ±%10). Basamaklar: 32 · 46 · 68 · 100 · 150 · 220 · 320 · 460 (ISO 3448)
SAE	Motor/şanzıman yağı sınıfı. "W" kışlık (düşük sıcaklık akışkanlığı), ikinci sayı 100 °C davranışı: 5W-30 gibi (SAE J300)
Gres	Yağ + kalınlaştırıcı (sabun) + katkı. Kıvam NLGI sınıfıyla verilir (000...6); NLGI 2 en yaygındır. Gresin "taşıyıcısı" yine baz yağ viskozitesidir — NLGI tek başına seçim ölçütü değildir
Baz yağ	Mineral (Grup I-III), sentetik PAO (Grup IV), ester/PAG (Grup V). Sentetikler geniş sıcaklık aralığı ve yüksek VI verir; PAG bazı yağlar mineral yağla karışmaz

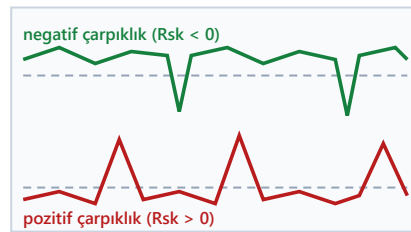
Katkılar

- **AW (antiwear)** — sınır rejimde yüzeyde koruyucu film kurar (klasik örnek ZDDP). **EP (extreme pressure)** katkıları daha ağır yükte, yüzeyle tepkimeye girerek kurban filmi oluşturur.
- **Antioksidan** yağın oksitlenip koyulaşmasını, **dispersan/deterjan** kurumun çökmesini geciktirir.
- **VI iyileştirici** sıcaklıkla viskozite düşüşünü azaltır; **köpük kesici** ve **korozyon inhibitörü** (bkz. **No.12**) tamamlayıcıdır.
- **Uyarı:** EP katkıları kükürt-fosfor esaslıdır ve **sarı metallere (bronz, pirinç) saldırabilir**; bronz yataklı veya bronz dişli sistemlerde "EP uyumlu" ürün istenir.

6. Yüzey Pürüzlülüğü — Ra Yetmez



Aynı Ra, çok farklı yüzeyler anlamına gelebilir.



Plato + vadi: yük taşır, yağ tutar. Sivri tepeler: hemen aşınır.

Yağlı temasta yüzeyin ŞEKLİ, pürüzlülüğün SAYISINDAN daha belirleyicidir.

Bu yüzden motor silindirinde plato honlama uygulanır: tepeler alınır, yağ tutan çapraz vadiler kalır.

Şekil 3 — Ra tek başına yüzeyi tanımlamaz. Aynı Ra değerine sahip iki yüzeyden **negatif çarpıklıklı** olan (düz platolar + derin vadiler) yük taşır ve yağ tutar; **pozitif çarpıklıklı** olan (sivri tepeler) ilk saatlerde aşınıp ölçü kaybeder. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir; parametreler ISO 21920.)

Parametre	Anlamı ve kullanımı
Ra	Orta çizgiden sapmaların mutlak ortalaması. En yaygın, en az ayırt edici
Rz	Tepe-vadi yüksekliği; tek bir derin çizgi Ra'dan çok daha iyi yakalar
Rsk (çarpıklık)	Profilin asimetrisi. Negatif = plato + vadi (istenen), pozitif = sivri tepeler
Rk, Rpk, Rvk	Taşıma eğrisi parametreleri: sırasıyla çalışan çekirdek, alınacak tepe, yağ tutan vadi derinliği. Silindir ve yatak yüzeylerinin asıl dili budur

7. Aşınma Deneyleri

Deney	Standart	Ne ölçer
Pin-on-disc	ASTM G99	Kayma aşınması ve μ ; en yaygın karşılaştırma deneyi
Block-on-ring	ASTM G77	Kayma aşınması, yağ/kaplama sıralaması
Dört bilye (four-ball)	ASTM D4172 (AW) · D2783 (EP)	Yağın aşınma önleyici ve aşırı basınç performansı
Kuru kum / kauçuk tekerlek	ASTM G65	Abrazif aşınma direnci
Katı parçacık erozyonu	ASTM G76	Erozyon hızı, çarpma açısına bağlılık
Fretting	ASTM G204 · ISO 12103 (toz)	Mikro hareketli temasta hasar
Terminoloji ve hacim kaybı hesabı	ASTM G40 · ASTM G118	Ortak dil ve k hesabı

Deney sonucu okunurken: Aşınma deneyleri **mutlak ömür vermez**, sıralama verir. Geçerli olması için deneyin servis koşuluyla aynı **mekanizmayı** üretmesi gerekir: yağlı çalışan bir dişliyi kuru pin-on-disc ile sıralamak yanıltıcıdır. Rapor daima yük, hız, sıcaklık, ortam, karşı yüzey ve süreyi içermelidir.

8. Yağ Analizi: Makinenin Kan Tahlili

Yağ, sistemin içinde dolaşır ve aşınma ürünlerini toplar; bu yüzden yağ analizi **parçayı sökmeden** iç durumu okumanın en ucuz yoludur ve kestirimci bakımın omurgasıdır.

Ölçüm	Standart	Ne söyler
Parçacık sayımı / temizlik kodu	ISO 4406	Üç sayı (≥ 4 / ≥ 6 / $\geq 14 \mu m$). Kirlilik, rulman ömrünün en güçlü tek değişkenidir
Element analizi (spektrometre)	ASTM D5185	Fe/Cu/Cr/Al → hangi parçanın aşındığı; Si → dışarıdan toz girişi
Ferrografi / parçacık morfolojisi	—	Parçacığın şekli mekanizmayı söyler: pul = yorulma, talaş = abrazif, küre = çatlak
Viskozite	ASTM D445	Artış = oksidasyon/kurum; düşüş = yakıt veya yanlış yağ karışımı
TAN / TBN	ASTM D664 / D2896	Asitlenme ve kalan nötralizasyon rezervi
Su içeriği	ASTM D6304 / ISO 12937	Az miktarda su bile rulman ömrünü ciddi biçimde kısaltır

Tek ölçüm değil, trend: Yağ analizinin değeri mutlak sayıda değil, **aynı noktadan düzenli alınan örneklerin eğilimindedir.** Demir 25 ppm "iyi" ya da "kötü" değildir; üç ay 8 ppm giderken aniden 25'e çıkması ise alarıdır. Örnek daima **aynı noktadan, aynı koşulda** alınır.

9. Tasarım ve İşletme Kuralları

- **Önce mekanizmayı belirle.** Çözüm abrazifte sertlik, adezivde malzeme çifti ve film, yorulmada λ ve temizliktir. Yanlış teşhis, pahalı ve işe yaramaz bir malzeme değişikliğiyle sonuçlanır.
- **Aynı metali aynı metale sürtme.** Özdeş veya çok benzer metal çiftleri (özellikle östenitik paslanmaz–östenitik paslanmaz, alüminyum–alüminyum) yapışmaya ve kapmaya çok yatkındır; farklı sertlik/yapı seç ya da araya kaplama koy (bkz. **No.16**).
- **Bir yüzey "kurban" olsun.** Yatak burcu gibi ucuz ve değiştirilebilir parça daha yumuşak seçilir; pahalı mili değil onu aşındırırın.
- **Kalkış–duruşu azalt.** Aşınmanın büyük kısmı sınır rejimde, yani başlangıç ve duruşlarda olur. Sık dur-kalk yapan sistemde AW/EP katkı ve ön yağlama kritiktir.
- **Temizlik, viskoziteden önce gelir.** Filtrasyon seviyesini yükseltmek çoğu zaman en ucuz ömür kazandırıcı; toz girişini (keçe, soluk filtresi) kes.
- **Pürüzlülüğü hedefle.** λ 'yı yükseltmek için yüzeyi iyileştirmek, yağı koyulaştırmaktan genelde daha verimlidir (koyu yağ = sürtünme kaybı + ısınma).
- **Fretting'i hareketten kes.** Fretting bir yağlama sorunu değil, **bağlantı sorunudur**: ya mikro hareketi durdur (ön yük, geometri) ya da hareketi serbest bırak.
- **Alıştırma (rodaj) dönemini tasarla.** İlk saatlerdeki kontrollü aşınma plato oluşturur; ilk yağ değişimi erken yapılır.

10. Pratik Kontrol Listesi

1. Tribosistem tanımlandı mı — **iki yüzey, arayüz maddesi, çevre, yük/hız/sıcaklık?**
2. Baskın aşınma mekanizması hangisi? Aşınan yüzey incelendi mi (bkz. **No.6, No.10**)?
3. Hangi yağlama rejiminde çalışıyoruz? λ hesaplandı mı?

4. Yağ viskozitesi **çalışma sıcaklığında** mı seçildi, yoksa 40 °C değerine mi bakıldı?
5. Katkı paketi karşı malzemeyle uyumlu mu (EP ↔ bronz)?
6. Yüzey şartnamesinde yalnızca Ra mı var — Rz ve Rsk/Rk gerekmiyor mu?
7. Filtrasyon ve **ISO 4406 hedef temizlik kodu** tanımlı mı?
8. Yağ analizi için numune noktası, periyodu ve **trend takibi** kurulu mu?
9. Kalkış–duruş sayısı ve rodaj dönemi hesaba katıldı mı?

11. Yararlanılan Temel Kaynaklar

1. Hutchings, I. & Shipway, P., *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, 2. baskı, Butterworth-Heinemann, 2017.
2. Stachowiak, G.W. & Batchelor, A.W., *Engineering Tribology*, 4. baskı, Butterworth-Heinemann, 2013.
3. Bhushan, B., *Introduction to Tribology*, 2. baskı, Wiley, 2013.
4. Hamrock, B.J., Schmid, S.R., Jacobson, B.O., *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, 2. baskı, Marcel Dekker, 2004.
5. ASM International, *ASM Handbook Vol. 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology*, 2. baskı, 2017.
6. Archard, J.F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces", *Journal of Applied Physics*, 24(8), 1953.
7. *İlgili standartlar*: ISO 3448, SAE J300, ISO 21920 (yüzey dokusu), ISO 4406, ISO 12937, ASTM G40, G65, G76, G77, G99, G118, G204, ASTM D445, D664, D2783, D2896, D4172, D5185, D6304.