



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 12

Korozyon ve Korunma

Elektrokimyasal temel, galvanik seri ve alan oranı, korozyon türleri, pasiflik ve çukurcuk, gerilmeli korozyon çatlaması, kaplama ve katodik koruma, tasarım kuralları

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: Korozyon Bir Malzeme Kusuru Değil, Bir Denge Hâlidir

Metallerin çoğu doğada **cevher** hâlinde, yani oksit veya sülfür bileşiği olarak bulunur. Metalurji bu bileşiklere enerji vererek saf metali elde eder; korozyon ise metalin aldığı o enerjiyi geri vererek **bileşik hâline dönme eğilimidir**. Bu yüzden korozyon "önlenebilir bir hata" değil, **yavaşlatılması gereken doğal bir süreçtir**.

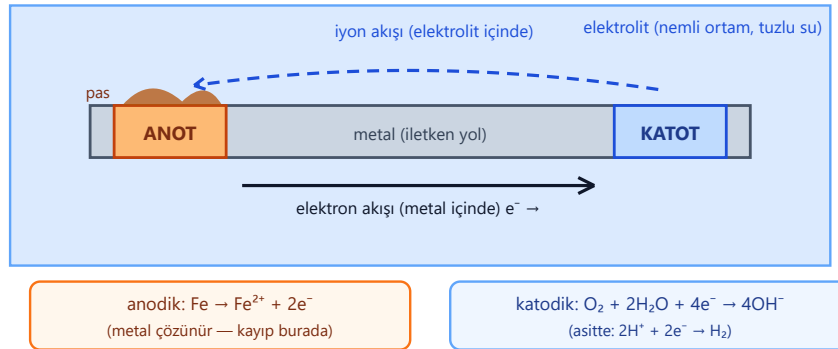
Mühendislik açısından sonuç ikidir: (a) korozyonu sıfırlamayı değil, **servis ömrü boyunca kabul edilebilir hızda tutmayı** hedefleriz; (b) hasarların büyük bölümü üniform incelmeden değil, **yerel ve haber vermeden ilerleyen** türlerden (çukurcuk, aralık, gerilmeli korozyon çatlaması) gelir.

Ölçek: NACE/AMPP'nin 2016 IMPACT çalışmasına göre korozyonun küresel doğrudan maliyeti yılda yaklaşık **2,5 trilyon ABD doları** — dünya gayrisafi hasılasının kabaca **%3,4'ü**. Çalışmanın ana bulgusu, mevcut bilgi doğru uygulandığında bu maliyetin **%15–35'inin** önlenebilir olduğudur. Yani sorun çoğunlukla bilgi eksikliği değil, uygulama eksikliğidir.

2. Elektrokimyasal Temel

Sulu ortamda korozyon bir **pil** gibi çalışır. Dört bileşenin hepsi bulunmadıkça korozyon yürümez:

1. **Anot** — metalin çözündüğü, elektron verdiği bölge
2. **Katot** — elektronun tüketildiği bölge
3. **Elektrolit** — iyon taşıyan sulu ortam (deniz suyu, yoğuşma, nemli toprak, yol tuzu)
4. **İletken yol** — anot ile katot arasında elektron geçişi (çoğu zaman metalin kendisi)



Şekil 1 — Korozyon hücresi. Metal kaybı yalnızca **anotta** olur; katotta metal kaybı yoktur. Dört bileşenden birini ortadan kaldırmak korozyonu durdurur — korunma yöntemlerinin tamamı bu dört halkadan birine saldırır. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

3. Galvanik Seri ve Alan Oranı Kuralı

İki farklı metal aynı elektrolitte temas ederse, **daha aktif olan** anot olur ve hızla çözünür. Hangi metalin anot olacağını, ilgili ortam için ölçülmüş **galvanik seri** söyler (deniz suyu serisi en yaygın kullanılanıdır).

Konum	Deniz suyunda tipik sıralama
Soy (katodik) uç	Grafit · titanyum · 316 paslanmaz (pasif) · 304 paslanmaz (pasif) · nikel (pasif) · bakır alaşımları
Orta	Pirinç · bronz · kalay · kurşun · 316/304 paslanmaz (pasiflik bozulmuşsa) · dökme demir
Aktif (anodik) uç	Karbon çeliği · alüminyum alaşımları · galvaniz (çinko) · magnezyum

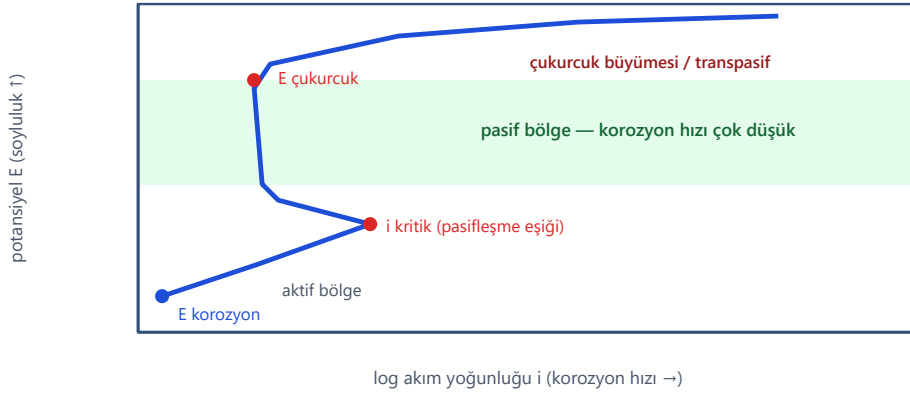
ALAN ORANI — sahadaki en pahalı hata: Korozyon hızını belirleyen, akımın **anot alanına bölünmesidir**. **Küçük anot + büyük katot** felakettir. Paslanmaz sac üzerine karbon çeliği cıvata = cıvata birkaç ayda gider. Ters (büyük anot + küçük katot) genellikle güvenlidir: karbon çeliği sac üzerine paslanmaz cıvata uzun yıllar sorun çıkarmaz. Çift metal kaçınılmazsa **yalıtım** (yalıtkan pul/burç, boya, conta) veya anodu büyütme yoluna gidilir.

4. Korozyon Türleri

Tür	Nasıl tanınır	Kritik noktası
Üniform	Yüzeyin tamamında düzgün incelme	En zararsız tür — ölçülebilir ve hesaba katılabilir (korozyon payı)
Galvanik	İki metalin birleşme hattında yoğun kayıp	Alan oranı; tasarımda yalıtım
Çukurcuk (pitting)	Yüzeyde iğne ucu delikler, az toplam kayıp	Klorür + pasif metal. Kesit sağlam görünürken delinme olur
Aralık (crevice)	Conta altı, bindirme, somun altı, tortu altı	Durgun ve oksijensiz hacim; tasarımla önlenir
Tanelerarası	Tane sınırları boyunca ilerler, tane dökülür	Paslanmazda hassaslaşma (bkz. No.11)
Seçici (dezinkifikasyon)	Pirinçte sarı renk bakır kırmızısına döner	Alaşımin bir bileşeni çözünür; parça şeklini korur ama gözenekli ve zayıftır
Grafitik korozyon	Dökme demir yumuşar, bıçakla çizilir	Demir çözünür, grafit iskelet kalır — boru şekli yerinde, dayanımı yok
Erozyon / kavitasyon	Akış yönünde oluklar, pervane/pompada çukurlar	Koruyucu filmin mekanik olarak sıyrılması; akış hızı sınırı
Gerilmeli korozyon çatlaması (SCC)	Gevrek görümlü dallı çatlak, deformasyon yok	En tehlikeli tür — uyarı vermez (bkz. §6)
Korozyon yorulması	Çok sayıda çatlak, yorulma limiti kaybolur	Korozif ortamda çelikte yorulma limiti ortadan kalkar (bkz. No.9)
Hidrojen hasarı	Gecikmeli gevrek kırılma, kabarcık	Kaplama/temizleme/katodik aşırı koruma kaynaklı hidrojen

5. Pasiflik, Çukurcuk ve PREN

Paslanmaz çelik, alüminyum ve titanyum korozyona "dayanıklı" değildir; **çok hızlı korozyona uğrayıp kendi koruyucu oksit filmini kurarlar**. Paslanmazda bu film krom oksittir ve yalnızca birkaç nanometre kalınlığındadır. Dayanım bu filmin **sürekliliğine** bağlıdır — film yerel olarak delinirse, altında kalan metal çok küçük bir anot olarak kalır ve çukurcuk hızla derinleşir.



Şekil 2 — Pasifleşen bir metalin anodik davranışı. Potansiyel pasif bölgede kaldığı sürece korozyon hızı çok düşüktür; **çukurcuk potansiyeli** aşıldıkça akım yeniden fırlar. Klorür bu potansiyeli aşağı çeker, molibden yukarı iter. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir; ölçüm ASTM G5/G61.)

Paslanmaz çeliklerde çukurcuk direncinin yaygın göstergesi **PREN** (Pitting Resistance Equivalent Number) sayısıdır:

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$$

Kalite	Yaklaşık PREN	Pratik yorum
304 / 304L	≈ 18–20	İç mekân, içme suyu. Deniz ortamı ve klorürlü proses için uygun değil
316 / 316L	≈ 24–26	Genel amaçlı; kıyı atmosferi tamam, sıcak deniz suyu sınırda
Dubleks 2205	≈ 34–36	Klorürlü proses, offshore; SCC direnci de yüksek
Süper dubleks / 6Mo	≥ 40	Deniz suyu, asit klorür. "Deniz suyu paslanmazı" ölçütü PREN ≥ 40 kabul edilir

Yaygın yanlış: "Paslanmaz paslanmaz." 304 kalite kıyı şeridinde ve yol tuzuna maruz yerlerde çukurcuk yapar; kaynak sonrası **temizlenmemiş** tufal ve ısı rengi (heat tint) pasif filmi zayıflatır. Kaynaklı paslanmazda **asitle temizleme + pasifleştirme** (pickling/passivation) ihmal edilirse en iyi kalite bile erken bozulur.

6. Gerilmeli Korozyon Çatlaması (SCC)

SCC, soğuk çatlak gibi **üç koşulun aynı anda** bulunmasını gerektirir ve herhangi biri kaldırıldığında durur:

1. **Hassas malzeme**
2. **Çekme gerilmesi** (dış yük ya da çoğu zaman **artık gerilme** — kaynak, soğuk şekillendirme, sıkı geçme)
3. **Özgül ortam** — her malzemenin kendi "zehri" vardır

Malzeme	Ortam	Not
Östenitik paslanmaz (304/316)	Klorür + sıcaklık (tipik olarak $\geq 50-60$ °C)	Klasik örnek: izolasyon altı klorür SCC. Dupleks ve ferritik kaliteler çok daha dirençli
Pirinç	Amonyak / amin	Tarihsel adı "mevsim çatlaması" (season cracking)
Karbon çeliği	Kostik (NaOH) — "kostik gevrekliği"; nitrat çözeltileri	Kazan ve proses hatlarında gerilim giderme tavlama ile önlenir
Yüksek dayanımlı çelik	H ₂ S içeren ortam (ekşi servis)	Sertlik sınırı ve malzeme seçimi ISO 15156 / NACE MR0175 ile yönetilir
Alüminyum (2xxx, 7xxx)	Klorürlü nem	Temper seçimi (ör. T73 aşırı yaşlandırma) direnç kazandırır

SCC'nin tehlikesi, **ölçülebilir bir kalınlık kaybı vermeden** ilerlemesidir: parça ölçüsünde, görünüşte sağlam, sonra bir anda gevrek kırılır. Kırık yüzeyi okuma yöntemleri **Teknik Yayınlar No.6**, kesit incelemesi **No.10** konusudur.

7. Korozyon Hızı ve Ortam Şiddeti

Üniform korozyon **mm/yıl** (veya mpy, mil/yıl; 1 mm/yıl $\approx$ 39,4 mpy) olarak verilir ve kütle kaybından hesaplanır. Yaygın mühendislik yorumu:

Hız	Yorum
< 0,02 mm/yıl	Çok iyi — ince kesitli, kritik parçalar için bile uygun
0,02 – 0,1 mm/yıl	İyi — genel yapı ve ekipman
0,1 – 0,5 mm/yıl	Koşullu — korozyon payı eklenerek kullanılabilir
> 0,5 mm/yıl	Çoğu uygulamada kabul edilemez; malzeme ya da koruma değişmeli

Atmosferik ortamın şiddeti **ISO 9223** ile **C1** (çok düşük — kuru iç mekân) ile **CX** (aşırı — tropik kıyı/offshore) arasında sınıflandırılır. Boya sistemi seçimi ve beklenen koruma süresi **ISO 12944**'te bu kategorilere bağlanır; yüzey hazırlığı derecesi (Sa 2½ gibi) **ISO 8501-1**'den gelir.

Hızlandırılmış deney uyarısı: Tuz sisi deneyi (ASTM B117 / ISO 9227) bir **karşılaştırma ve kalite kontrol** aracıdır. "X saat tuz sisi = Y yıl saha ömrü" dönüşümü genel olarak **geçerli değildir**; ıslanma–kuruma çevrimi içermediği için gerçek atmosferi temsil etmez. Ömür tahmini için çevrimli deneyler ve saha verisi gerekir.

8. Korunma Yöntemleri

8.1 Malzeme seçimi

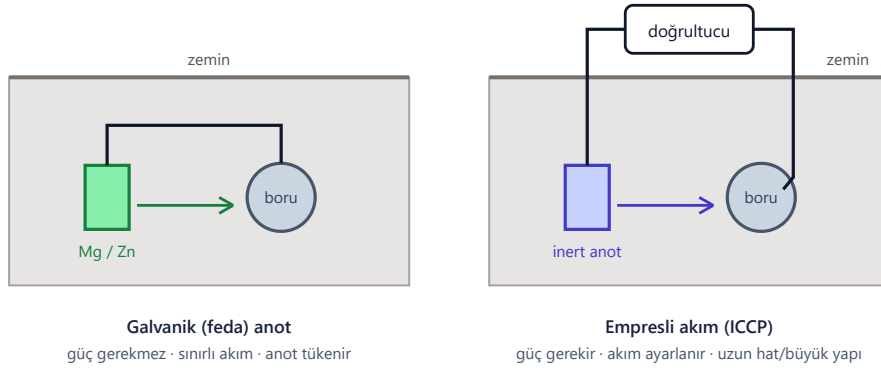
En kalıcı çözümdür ve çoğu zaman en ucuzudur — ilk yatırım değil, **ömür boyu maliyet** karşılaştırılmalıdır. Ortamın klorür içeriği, sıcaklığı ve pH'ı bilinmeden kalite seçilemez (bkz. **No.8**).

8.2 Kaplamalar

- **Metalik — feda eden (galvaniz/çinko):** çizilse bile çevresindeki çeliği **katodik olarak korur**. Hasarlı galvaniz hâlâ çalışır.
- **Metalik — soy (nikel, krom):** sürekli olduğu sürece korur; **çizik noktasında küçük anot** oluşturup yerel korozyonu hızlandırır.
- **Organik (boya):** bariyer görevi görür. Başarısının %80'i **yüzey hazırlığıdır** — ISO 8501'e uygun temizlenmemiş yüzeyde en pahalı boya da kabırır.
- **Dönüşüm kaplamaları:** fosfatlama, alüminyumda eloksal — boya tutunmasını ve bariyeri artırır.

8.3 Katodik koruma

Yapının tamamını **katot** hâline getirip anodik çözünmeyi durdurma yöntemidir; gömülü boru, tank tabanı, gemi gövdesi ve iskele ayaklarında standarttır.



Şekil 3 — Katodik korumanın iki yolu. Her ikisinde de akım anottan korunan yapıya **elektrolit üzerinden** girer; korunan yapıda anodik çözünme durur. Tasarım ve ölçütler EN 12954 / ISO 15589 kapsamındadır. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

Aşırı koruma da zarar verir: Katodik potansiyel gereğinden negatif tutulursa katotta **hidrojen çıkışı** başlar; yüksek dayanımlı çelikte hidrojen gevrekliği, boyalı yüzeyde ise kabarma ve soyulma (katodik ayrılma) görülür. Koruma potansiyeli ölçülerek ayarlanır, "ne kadar çok o kadar iyi" değildir.

8.4 İnhibitörler

Kapalı devrelerde (soğutma suyu, kazan, antifriz, asitle temizleme) ortama katılan kimyasallardır; anodik, katodik veya film oluşturmaya olabilir. **Anodik inhibitörde doz kritiktir:** yetersiz doz yüzeyi kısmen kaplar, korunmayan küçük bölgeler anot olur ve çukurcuk riski **artar**. Açık devrelerde (kaybedilen su) ekonomik değildir.

9. Tasarımla Korunma — En Ucuz Yöntem

Korozyon hasarlarının çoğu malzeme yanlışından değil **detay yanlışından** doğar. Çizim aşamasında bedelsiz olan şu kararlar, sahada en pahalı onarımları önler:

- **Su biriktirme.** Yatay yüzey, yukarı bakan U/L profil, kör cep bırakma — hepsi kalıcı elektrolit demektir. **Drenaj deliği** ve eğim ver.
- **Aralık yaratma.** Bindirme bağlantı, punta kaynak, sıkıştırılmamış conta, somun altı: aralık korozyonunun doğduğu yerler. Mümkünse **sürekli kaynak**, değilse dolgu macunu ile kapat.

- **Farklı metal teması.** Yalıtkan pul/burç, boya, ara conta; anodu büyüt, katodu küçült.
- **Gerilme yığılması.** SCC'yi besleyen artık gerilmeyi gerilim giderme tavı veya bilyalı dövme ile azalt.
- **Erişim.** Boyanamayan, muayene edilemeyen, anodu değiştirilemeyen bölge = ömrü bilinmeyen bölge.
- **Akış.** Ani daralma, dirsek ve kısıntıdaki türbülans koruyucu filmi sıyrır; hız sınırına ve giriş geometrisine dikkat et.

10. Deney ve Standartlar

Konu	Standart
Terimler ve tanımlar	ISO 8044
Daldırma ile korozyon hızı	ASTM G31
Çukurcuk ve aralık direnci (FeCl ₃)	ASTM G48
Paslanmazda tanelerarası korozyon	ASTM A262 · ASTM G28
Klorür SCC (kaynayan MgCl ₂)	ASTM G36
Potansiyodinamik / çevrimli polarizasyon	ASTM G5 · ASTM G61
Tuz sisi (nötr)	ASTM B117 · ISO 9227
Atmosferik korozivite sınıfları	ISO 9223 · ISO 9224
Boya ile koruma sistemleri	ISO 12944
Yüzey hazırlık dereceleri	ISO 8501-1
Katodik koruma (gömülü/denizaltı yapılar)	EN 12954 · ISO 15589
Ekşi servis (H ₂ S) malzeme seçimi	ISO 15156 / NACE MR0175

11. Pratik Kontrol Listesi

1. Ortam tanımlandı mı? **Klorür derişimi, sıcaklık, pH, akış hızı, ıslanma süresi** — bunlar bilinmeden kalite seçilemez.
2. Beklenen baskın tür hangisi: üniform mu, yoksa çukurcuk/aralık/SCC mi? Tasarım ona göre mi?
3. Çift metal var mı? Alan oranı hangi yönde? Yalıtım çizime işlendi mi?
4. Su birikecek yüzey, kapalı cep veya aralık kaldı mı? Drenaj var mı?
5. Paslanmaz kaynak sonrası **ısı rengi temizlenip pasifleştirildi** mi?
6. Boya sistemi ISO 12944'e göre korozivite sınıfıyla eşleşiyor mu? Yüzey hazırlığı yazılı mı?
7. Katodik koruma varsa potansiyel ölçüm noktaları ve anot değişim erişimi planlandı mı?
8. Korozyon payı ve muayene aralığı, kabul edilen hızdan **hesaplanarak** mı belirlendi?

12. Yararlanılan Temel Kaynaklar

1. Fontana, M.G., *Corrosion Engineering*, 3. baskı, McGraw-Hill, 1986.
2. Jones, D.A., *Principles and Prevention of Corrosion*, 2. baskı, Prentice Hall, 1996.
3. Revie, R.W. & Uhlig, H.H., *Corrosion and Corrosion Control*, 4. baskı, Wiley, 2008.

4. ASM International, *ASM Handbook Vol. 13A–13B–13C: Corrosion*, 2003–2006.
5. Cottis, R. vd. (ed.), *Shreir's Corrosion*, 4. baskı, Elsevier, 2010.
6. NACE International, *IMPACT: International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technologies Study*, 2016.
7. *İlgili standartlar*: ISO 8044, ISO 8501-1, ISO 9223, ISO 9224, ISO 9227, ISO 12944, ISO 15156 (NACE MR0175), ISO 15589, EN 12954, ASTM A262, ASTM B117, ASTM G5, ASTM G28, ASTM G31, ASTM G36, ASTM G48, ASTM G61.