



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 14

Tahribatsız Muayene

VT, PT, MT, ET, UT ve RT yöntemleri; kusurun konumu ve yönelimine göre yöntem seçimi, bulgu olasılığı, personel yeterliliği ve kabul ölçütleri

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: Muayene Bir Karar Aracıdır

Tahribatsız muayene (TM / NDT), parçayı kullanım dışı bırakmadan içindeki ve yüzeyindeki süreksizlikleri bulma yöntemlerinin ortak adıdır. Ancak muayene tek başına bir sonuç üretmez: bir süreksizliğin **kusur** sayılıp sayılmayacağına, önceden belirlenmiş **kabul ölçütü** karar verir.

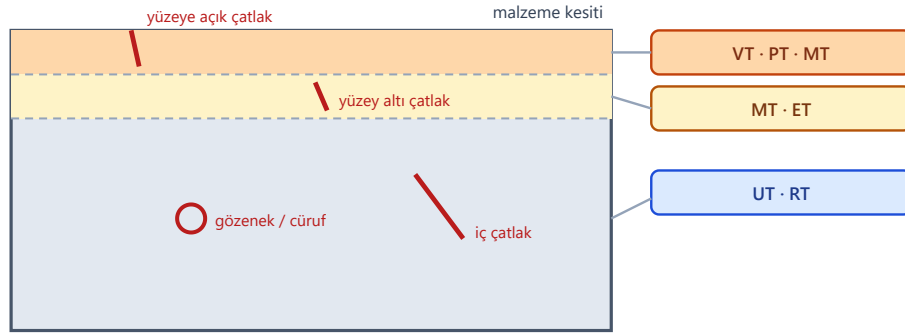
Bu yüzden her muayene işinde üç şeyin birlikte tanımlanması gerekir:

1. **Ne aranıyor?** — beklenen kusur türü, konumu ve yönelimi
2. **Hangi yöntemle, hangi hassasiyette?** — yazılı prosedür ve kalibrasyon
3. **Hangi sınırdaki ret?** — kabul ölçütü (ör. kaynakta EN ISO 5817 B/C/D seviyesi)

En sık yapılan hata: "Ultrasonik baktık, temiz çıktı." Hangi prosedürle, hangi probla, hangi tarama açısıyla ve hangi kabul seviyesine göre bakıldığı yazılmadıkça bu cümlelerin mühendislik değeri yoktur. **Kabul ölçütü olmayan muayene, bulgu üretir; karar üretmez.**

2. Yöntem Seçiminin Mantığı: Konum ve Yönelim

Yöntemi belirleyen üç soru vardır: kusur **nerede** (yüzeye açık / yüzeye yakın / hacim içinde), **hangi türde** (düzlemsel çatlak mı, hacimsel gözenek mi) ve **hangi yönde** duruyor.



turuncu şerit: yüzey · sarı şerit: yüzeye yakın (birkaç mm) · gri: hacim
UT düzlemsel kusura, RT hacimsel kusura daha duyarlıdır — ikisi birbirinin yerine geçmez.

Şekil 1 — Kusurun konumu yöntemi seçer. Yüzeye açık kusur için yüzey yöntemleri yeterlidir ve ucuzdur; hacimsel muayene gerekiyorsa UT veya RT devreye girer. Yöntem seçimi için kaynaklı bağlantılarda **ISO 17635** genel kuralları verir. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

3. Yüzey Yöntemleri

3.1 Gözle Muayene — VT (ISO 17637)

En ucuz, en hızlı ve **en çok atlanan** yöntemdir. Diğer tüm yöntemlerden **önce** yapılır: yüzey düzgünlüğü, dikiş profili, yanma çentiği, krater, sıçrıntı, kaşık montaj ve belirgin çatlaklar burada yakalanır. Gerekli aydınlatma (tipik olarak ≥ 500 lx), görüş açısı ve mesafe standartla tanımlıdır; endoskop ve ayna ile erişilemeyen hacimlere de uzatılabilir.

3.2 Penetrant — PT (ISO 3452)

Renkli veya floresan sıvı kılcallıkla süreksizliğe dolar, fazlası temizlenir, geliştirici (developer) sıvıyı geri çekerek izi görünür hâle getirir. Malzeme ayrımı yoktur — paslanmaz, alüminyum, titanyum, dökme demir, hatta seramikte çalışır.

- **Yalnızca yüzeye açık** süreksizlikleri bulur; 1 mm derindeki çatlakı göremez.
- **Gözenekli yüzeyde kullanılamaz** (kumlanmamış döküm yüzeyi, toz metalurjisi parçası) — her yer iz verir.
- Yüzey temizliği belirleyicidir: yağ, boya, oksit veya önceden yapılmış **taşlama/kumlama** çatlakların ağzını kapatıp izi yok edebilir.
- Bekleme süreleri (penetrasyon ve geliştirme) prosedürle belirlenir; aceleyle atlanırsa kusur bulunmaz.

3.3 Manyetik Parçacık — MT (ISO 17638 / ISO 9934)

Parça manyetize edilir; süreksizlik manyetik akıyı saptırır ve yüzeyde **kaçak akı** yaratır, serpiyen manyetik toz orada toplanır. PT'den üstünlüğü, **yüzeye yakın** (birkaç mm) süreksizlikleri de yakalayabilmesidir.

İki hayati kural: (1) Yöntem yalnızca **ferromanyetik** malzemede çalışır — östenitik paslanmaz, alüminyum, bakır ve titanyumda **kullanılamaz**. (2) Manyetik alan, çatlakla mümkün olduğunca **dik** olmalıdır; alana paralel çatlak görünmez. Bu yüzden muayene daima **birbirine dik iki yönde** tekrarlanır. Muayene sonunda **demanyetizasyon** gerekebilir.

3.4 Girdap Akımı — ET (ISO 15549)

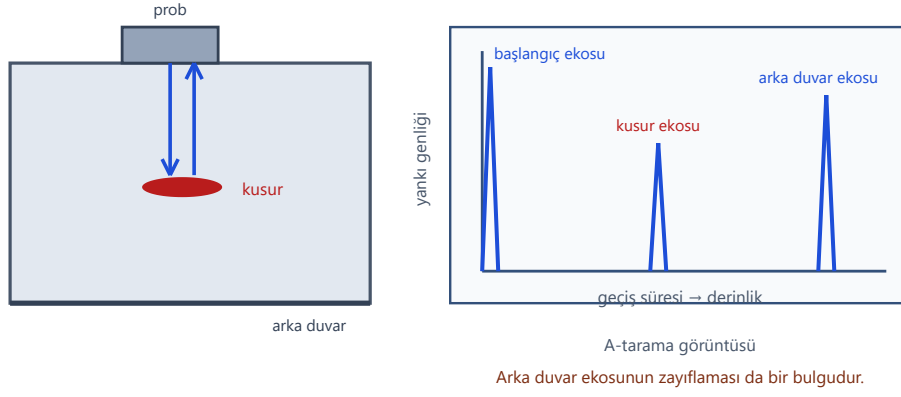
Bobinin ürettiği değişken alan, iletken malzemede girdap akımları oluşturur; süreksizlik bu akımları bozar ve bobin empedansı değişir. Temas gerektirmez, çok hızlıdır ve otomasyona çok uygundur.

- Boru ve tüp muayenesinde (ısı değiştirici), ince cidar taramasında ve **kaplama kalınlığı** ölçümünde yaygındır.
- Malzeme karıştırma kontrolünde (alaşım/ısı işlem ayrımı) pratik bir ayıklama aracıdır.
- Derinlik sınırlıdır: **nüfuz derinliği** frekans arttıkça ve iletkenlik/geçirgenlik arttıkça azalır — tipik olarak yüzeyin birkaç milimetresi.
- Geometri değişimlerine ve kaldırma mesafesine (lift-off) duyarlıdır; referans numunesiyle kalibrasyon şarttır.

4. Hacimsel Yöntemler

4.1 Ultrasonik — UT (ISO 16810 / kaynakta ISO 17640)

Yüksek frekanslı ses dalgası (tipik 2–10 MHz) malzemeye gönderilir; süreksizlikten ve arka duvardan dönen yankılar zaman ekseninde değerlendirilir. Tek yüzeyden erişim yeterlidir, radyasyon yoktur ve **derinlik bilgisi** verir.



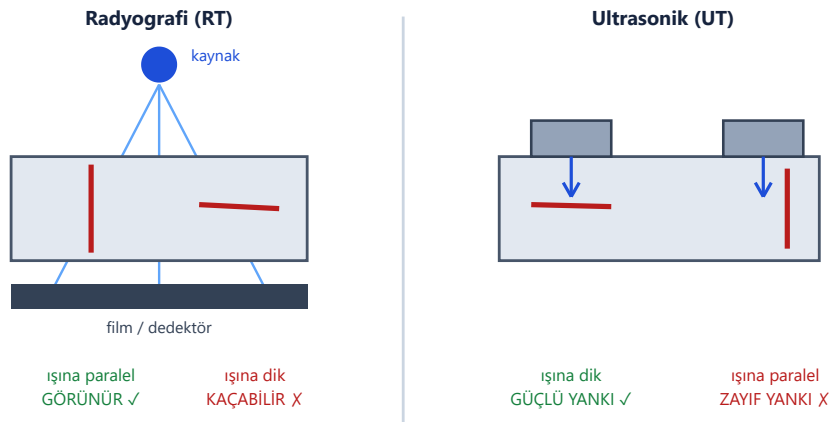
Şekil 2 — UT'nin temeli: yankının **geçiş süresi** derinliği, **geniği** yansıtıcının büyüklüğü hakkında bilgi verir. Faz dizili (PAUT, ISO 13588) ve TOFD (ISO 10863) teknikleri aynı ilkeyi görüntüye çevirir. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

- **Düzlemsel kusurlara** (çatlak, ergime hatası, lamel yırtılma) RT'den çok daha duyarlıdır.
- Kaba taneli yapı (kalın östenitik kaynak, dökme demir) sesi saçar — **muayene edilebilirlik düşer**.
- Yüzeye çok yakın bölgede "ölü bölge" vardır; yüzey kusurları için yüzey yöntemi gerekir.
- Sonuç operatöre ve prosedüre bağlıdır: referans bloklarıyla kalibrasyon, tarama planı ve kayıt zorunludur.

4.2 Radyografi — RT (ISO 17636)

X ışını veya gama kaynağından çıkan ışın malzemeden geçerken soğurulur; kalınlık veya yoğunluğu azaltan süreksizlikler filmde/dijital dedektörde daha koyu iz bırakır. Kalıcı ve yoruma açık bir **belge** üretmesi en büyük üstünlüğüdür.

- **Hacimsel kusurlarda** (gözenek, cüruf, nüfuziyet eksikliği) çok etkilidir.
- **Düzlemsel kusurda yönelime bağlıdır:** ışına paralel duran bir çatlak görünür, ışına dik duran çatlak kaçabilir (bkz. Şekil 3).
- Görüntü kalitesi **IQI / tel tipi gösterge** ile kanıtlanır (ISO 19232) — IQI görünmüyorsa film geçersizdir.
- **Radyasyon güvenliği** zorunludur: saha kapatma, dozimetre, yetkili kullanıcı. Çoğu zaman üretimi durdurur; bu da gerçek bir maliyettir.
- Dijital radyografi (CR/DR) film banyosunu ortadan kaldırır, kontrast işleme ve arşivleme kolaylığı sağlar.



Şekil 3 — Aynı çatlak, iki yöntemde tam tersi davranır: RT çatlakı **ışına paralel** olduğunda görür, UT ise **ışına dik** olduğunda. Bu yüzden "UT yaptık" ile "RT yaptık" eşdeğer değildir; kritik bağlantılarda ikisi birlikte istenir. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

5. Diğer Yöntemler

Yöntem	Kullanım alanı
Akustik emisyon (AE)	Yük altındaki yapıda aktif çatlak ilerlemesini gerçek zamanlı dinler; basınçlı kap testlerinde bütün hacmi aynı anda izler. Konumu yaklaşık verir, doğrulama başka yöntemle yapılır
Termografi (IRT)	Isıtma sonrası sıcaklık dağılımından delaminasyon ve yapışma kusurları; kompozit ve kaplamalarda, elektrik panolarında
Sızdırmazlık (LT)	Basınç düşümü, köpük, helyum kaçak dedektörü; kapalı hacimlerde (ISO 20484)
Replika	Yüzeyden mikroyapı kopyası alma — servisteki parçada sürünme hasarı takibi (bkz. No.10)
Pozitif malzeme tanımlama (PMI)	Taşınabilir XRF/OES ile alaşım doğrulama; malzeme karışıklığını önler

6. Karşılaştırma

Yöntem	Bulduğu	Bulamadığı / sınırı	Malzeme ve maliyet
VT	Yüzey geometrisi, belirgin çatlak, profil hataları	Yüzey altı hiçbir şey	Hepsi · en ucuz
PT	Yüzeye açık çatlak, gözenek ağzı	Yüzey altı; gözenekli yüzeyde uygulanamaz	Hepsi · ucuz
MT	Yüzey + yüzeye yakın çatlak	Yalnızca ferromanyetik; alana paralel çatlak	Çelik · ucuz
ET	Yüzey/yüzeye yakın çatlak, kaplama kalınlığı, alaşım ayrımı	Derinlik sınırlı; geometriye duyarlı	İletken · orta
UT	Hacimsel; özellikle düzlemsel kusur, derinlik ölçümü	Yüzeye yakın ölü bölge; kaba tanede zorlanır	Çoğu metal · orta-yüksek
RT	Hacimsel; özellikle hacimsel kusur, kalıcı belge	Yönelime bağlı; radyasyon güvenliği, erişim iki yüzey	Çoğu metal · yüksek

7. Bulgu Olasılığı: "Temiz" Ne Demek?

Hiçbir yöntem %100 bulmaz. Bir yöntemin belirli boyuttaki bir kusuru yakalama olasılığına **bulgu olasılığı (POD — probability of detection)** denir ve kusur büyüdükçe artar. Pratik sonuçlar:

- Muayene **bir kusur boyutu eşiği** üzerinden anlamlıdır. Tasarım, "hiç kusur yok" değil, "muayenenin güvenilir biçimde yakalayabildiği boyuttan küçük kusurla da parça güvenli" varsayımına dayanmalıdır — hasara dayanıklı (damage tolerant) tasarımın özü budur.
- Yanlış negatif** (kusuru atlamak) ile **yanlış pozitif** (olmayan kusuru bildirmek) arasında ayar vardır; hassasiyeti artırmak yanlış alarmı da artırır.

- Bu yüzden muayene sonucu daima **yöntem + prosedür + eşik** ile birlikte raporlanır. "Temiz" tek başına bir bilgi değildir.

8. Personel, Prosedür ve Kabul

Konu	Standart / içerik
Personel yeterliliği (Seviye 1-2-3)	ISO 9712 — Seviye 1 uygular, Seviye 2 değerlendirir ve rapor yazar, Seviye 3 prosedürü yazar ve onaylar
Kaynaklarda yöntem seçimi	ISO 17635
Kaynak kusur sınıfları / kabul seviyeleri	ISO 6520-1 · ISO 5817 (B, C, D)
Gözle muayene	ISO 17637
Penetrant	ISO 3452-1 (yöntem) · ISO 23277 (kaynakta kabul)
Manyetik parçacık	ISO 17638 · ISO 9934-1 · ISO 23278 (kabul)
Girdap akımı	ISO 15549 · ISO 17643 (kaynakta)
Ultrasonik	ISO 16810 · ISO 17640 · ISO 11666 (kabul) · ISO 13588 (PAUT) · ISO 10863 (TOFD)
Radyografi	ISO 17636-1 (film) / -2 (dijital) · ISO 19232 (IQI) · ISO 10675-1 (kabul)
Sızdırmazlık	ISO 20484

Rapor neyi içermeli: muayene edilen parça ve bölge (kroki ile), yöntem ve ekipman, kalibrasyon/referans blok, yüzey durumu, uygulanan prosedür numarası, bulguların konumu ve boyutu, uygulanan **kabul ölçütü** ve kabul/ret kararı, muayene personelinin seviyesi ve imzası, tarih. Bunlardan biri eksikse rapor izlenebilir değildir.

9. Pratik Kontrol Listesi

- Hangi kusur aranıyor — düzlemsel mi hacimsel mi, hangi yönelimde beklenir?
- Kusur yüzeyde mi, yüzeye yakın mı, hacimde mi? Yöntem buna göre mi seçildi?
- Malzeme yöntemle uyumlu mu (MT için ferromanyetik, ET için iletken, UT için ses geçirgen)?
- Yazılı prosedür ve **kabul ölçütü** işten önce belirlendi mi?
- Yüzey hazırlığı yöntemin gerektirdiği düzeyde mi? Taşlama çatlak ağzını kapatmış olabilir mi?
- Kalibrasyon/referans blok ve IQI kullanıldı mı, kayda geçti mi?
- Personel ISO 9712 seviyesi işe uygun mu (değerlendirme Seviye 2 işidir)?
- Soğuk çatlak aranıyorsa muayene **kaynaktan en az 48 saat sonra** mı planlandı (bkz. **No.11**)?
- Bulgu çıkarsa onarım ve **yeniden muayene** akışı tanımlı mı?

10. Yararlanılan Temel Kaynaklar

- ASM International, *ASM Handbook Vol. 17: Nondestructive Evaluation of Materials*, 2018.
- American Society for Nondestructive Testing, *Nondestructive Testing Handbook*, 3. baskı (cilt serisi), ASNT.
- Hellier, C., *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 2. baskı, McGraw-Hill, 2013.
- Halmshaw, R., *Introduction to the Non-Destructive Testing of Welded Joints*, 2. baskı, Woodhead, 1996.

5. *İlgili standartlar:* ISO 9712, ISO 17635, ISO 17637, ISO 3452-1, ISO 23277, ISO 9934-1, ISO 17638, ISO 23278, ISO 15549, ISO 17643, ISO 16810, ISO 17640, ISO 11666, ISO 13588, ISO 10863, ISO 17636-1/-2, ISO 19232, ISO 10675-1, ISO 20484, ISO 6520-1, ISO 5817.