



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 7

Çeliklerde Isıl İşlem

Dönüşüm sıcaklıkları, soğuma hızı ve mikroyapı; sertleştirme, temperleme, sertleşebilirlik, yüzey sertleştirme ve ısıtıl işlem hatalarının kök nedenleri

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: Isıl İşlem Neyi Değiştirir?

Isıl işlem, katı haldeki bir metalin kimyasal bileşimini değiştirmeden, **kontrollü ısıtma ve soğutma** ile mikroyapısını — dolayısıyla mekanik özelliklerini — değiştirme işlemidir. Aynı bileşimdeki bir çelik, yalnızca soğuma hızı değiştirilerek 180 HB sertliğinde ve kolay işlenebilir bir malzeme ya da 600 HV sertliğinde ve çok gevrek bir malzeme hâline getirilebilir. Mühendislik açısından söylenmesi gereken tek cümle şudur: **çeliğin özelliğini bileşimi değil, bileşim + ısı geçmişi birlikte belirler.**

Bu nedenle bir parçanın malzeme tanımı tek başına "42CrMo4" olarak verilemez; teslim durumu (+QT, +N, +A) ve hedef sertlik aralığı ile birlikte verilmelidir. Teknik resimde ısı işlem gösterimi ISO 15787'nin konusudur ve çoğu sahada hasarın kökeni, resimde eksik bırakılmış bu satırdır.

Temel zincir: Bileşim + östenitleme + soğuma hızı → **mikroyapı** → sertlik, dayanım, tokluk, yorulma ömrü. Bir ısı işlem sorununun çözülmesi için bu zincirin hangi halkasının koptuğu aranır; doğrudan "sertlik düşük" demek tanı değildir.

2. Dönüşüm Sıcaklıkları ve Östenitleme

Çeliğin ısı işlemi, demir-karbon dengesindeki **kritik sıcaklıklar** üzerine kuruludur:

- **A₁ (727 °C):** ötektoid sıcaklık. Altında ferit + sementit, üstünde östenit oluşmaya başlar.
- **A₃:** ötektoid altı çeliklerde ferritin tamamen östenite dönüştüğü sıcaklık; karbon arttıkça düşer (0,2 %C ≈ 860 °C, 0,45 %C ≈ 790 °C).
- **A_{cm}:** ötektoid üstü çeliklerde ikincil sementitin çözündüğü sınır; karbonla birlikte yükselir.

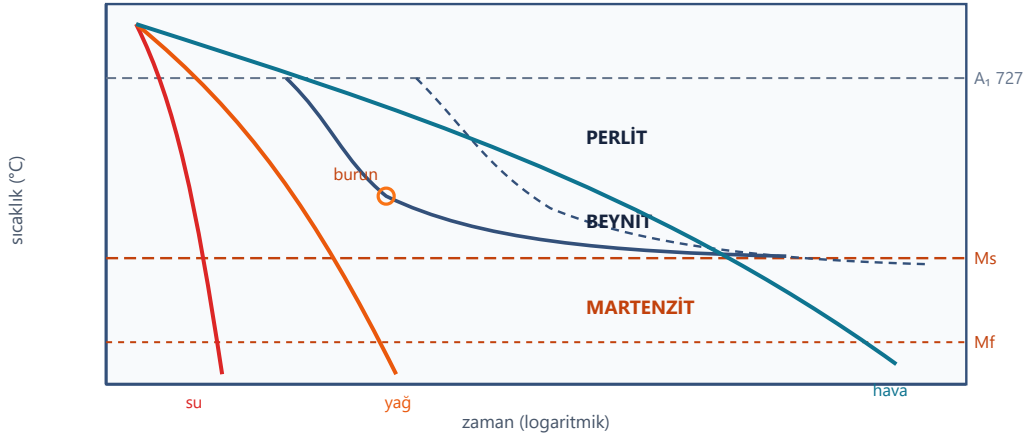
Isıtmada bu sınırlar bir miktar yukarı (Ac), soğumada aşağı (Ar) kayar; fark ısıtma/soğutma hızıyla büyür. Pratikte **östenitleme sıcaklığı** ötektoid altı çeliklerde $A_{c3} + 30-50$ °C seçilir. Daha yüksek karbürlerin çözünmesini kolaylaştırır ama **östenit tane boyutunu büyütür**; iri taneli östenit, su verildiğinde hem daha gevrek bir martenzit hem de daha yüksek çarpılma ve çatlama riski demektir.

Tutma süresi için saha kuralı, kesit kalınlığının her 25 mm'si için yaklaşık 1 saattir; amaç parçanın merkezinin sıcaklığa ulaşması ve karbürlerin çözünmesidir. Süreyi uzatmak sertliği artırmaz, yalnızca tane büyütür ve yüzey dekarbürizasyonunu derinleştirir.

Dekarbürizasyon: Koruyucu atmosfersiz fırında yüzeydeki karbon oksitlenerek uzaklaşır. Sonuç, su verme sonrası **yumuşak bir yüzey tabakasıdır** — yorulma dayanımı doğrudan yüzeyden yönetildiği için bu, en sinsi ısı işlem hatalarından biridir. Metalografik kesitte yüzeyde ferritçe zengin bant olarak görülür.

3. Soğuma Hızı ve Dönüşüm Ürünleri

Östenitlenmiş çelik soğutulduğunda hangi yapının oluşacağını **soğuma hızı** belirler. Bu ilişki, sürekli soğumada CCT (Continuous Cooling Transformation), sabit sıcaklıkta ise TTT (Time-Temperature-Transformation) diyagramlarıyla gösterilir. Diyagramdaki "burun" bölgesinden hızlı geçilirse difüzyonlu dönüşümler atlanır ve martenzit elde edilir.



Şekil 1 — Sürekli soğuma (CCT) şeması: soğuma eğrisi burnun soluna düşerse martenzit, keserse perlit/beynit oluşur. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

Ürün	Oluşum koşulu	Tipik sertlik	Özellik
Ferit + perlit	Yavaş soğuma (fırın, hava)	120–250 HB	Yumuşak, tok, işlenebilir
Beynit	Orta hız; Ms üstünde izotermal bekleme (ostemperleme)	35–50 HRC	İyi tokluk/sertlik dengesi, düşük çarpılma
Martenzit	Burnu atlayan hızlı soğuma	0,2 %C ≈ 45 HRC 0,4 %C ≈ 57 HRC 0,6 %C ≈ 65 HRC	Çok sert, çok gevrek — temperlenmeden kullanılmaz
Kalıntı östenit	Mf oda sıcaklığının altındaysa (yüksek C ve alaşım)	—	Boyutsal kararsızlık, yüzeyde yumuşak noktalar

Martenzit, karbonun kaçamadığı difüzyonsuz bir kayma dönüşümüdür; sertliği neredeyse tamamen **karbon miktarına** bağlıdır. Alaşım elementleri martenzitin sertliğini değil, **oluşabilme kolaylığını** (sertleşebilirliği) artırır — bu ayrım, çelik seçiminin merkezindeki ayrımdır.

Martenzit başlangıç sıcaklığı bileşimle düşer; Andrews bağıntısı yaygın bir yaklaşımdır (°C):

Ms ≈ 539 – 423·C – 30,4·Mn – 17,7·Ni – 12,1·Cr – 7,5·Mo (element yüzdeleri ağırlıkça).

4. Sertleştirme ve Su Verme Ortamları

Su verme (quenching), parçayı burnun solundan geçirecek kadar hızlı ama çarpılma ve çatlağı doğurmayacak kadar yumuşak olmalıdır. Ortamın çekme şiddeti **Grossmann H katsayısı** ile ifade edilir:

Ortam	H (yaklaşık)	Tipik kullanım	Risk
Durgun hava	0,02	Hava sertleşen çelikler, normalizasyon	Düşük sertlik
Yağ (karıştırılmalı)	0,3–0,6	Alaşımlı ıslah çelikleri (42CrMo4, 50CrV4)	Yangın, duman, yıkama ihtiyacı
Polimer çözeltisi	0,2–1,2	İndüksiyon, orta alaşımlı çelikler	Derişim/sıcaklık kontrolü şart
Su (karıştırılmalı)	1,0–1,5	Sade karbonlu çelikler	Çarpılma, su verme çatlağı
Tuzlu su	2,0	Düşük sertleşebilirlikli kesitler	Korozyon, yüksek çatlak riski
Tuz banyosu / gaz (vakum)	değişken	Martemperleme, takım çeliği	Yatırım maliyeti

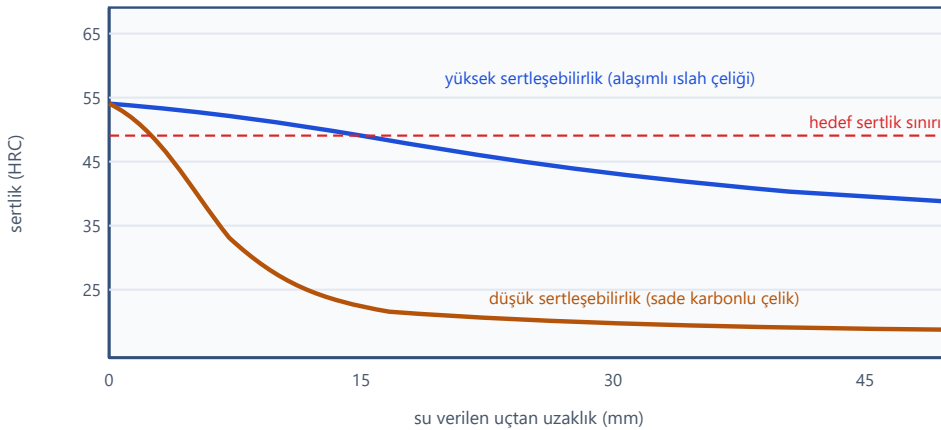
Su vermede soğuma üç aşamada ilerler: **buhar filmi** (yavaş), **kabarcıklı kaynama** (en hızlı) ve **taşınım** (yavaş). Buhar filminin parçanın bazı bölgelerinde geç kırılması, aynı parçada **yumuşak nokta** bırakmanın en sık nedenidir; çözüm karıştırma (agitasyon) ve banyo sıcaklığının kontrolüdür.

Su verme çatlağı: Martenzitik dönüşüm hacim artışı (yaklaşık %4) yaratır. Kesit farklarının keskin olduğu yerlerde dönüşüm eş zamanlı olmaz; çeken ve iten bölgeler birbirini zorlar ve çatlak doğar. Önlem tasarımıdır: **keskin köşe yerine radyus**, kesit geçişlerinin yumuşatılması, delik ve kama kanallarının konumlandırılması. Çatlak çoğunlukla su verme sonrası temperlemenin geciktirildiği saatlerde ortaya çıkar; bu nedenle parça **soğur soğumaz temperlenir**.

5. Sertleşebilirlik ve Jominy Deneyi

Sertleşebilirlik (hardenability), sertliğin ne kadar yüksek olacağı değil, martenzitin **yüzeyden ne kadar derine** oluşabileceğidir. Bu kavram sertlikle karıştırıldığında yanlış çelik seçilir: büyük kesitli bir parça sade karbonlu çelikten yapılırsa yüzeyi sert, çekirdeği perlitik kalır — "ıslah edilmiş" sanılan parça aslında çekirdekten yumuşaktır.

Ölçüm standardı **uç su verme (Jominy) deneyi**dir (ISO 642, ASTM A255): standart bir numune östenitlenir, bir ucundan su püskürtülerek soğutulur ve uçtan uzaklığa karşı sertlik ölçülür. Uçtan uzaklaştıkça soğuma hızı düştüğü için eğrinin düşüş biçimi, çeliğin sertleşebilirlik parmak izidir.



Şekil 2 — Jominy eğrisi: iki çelik ucta aynı sertliğe ulaşır, farkı derinlikte gösterir. Hedef sertlik çizgisinin kesişim noktası, o çelikle güvenli sertleştirilebilecek kesiti belirler. (SAE Mühendislik özgün çizimi.)

Jominy eğrisi pratikte iki soruya cevap verir: (1) elimdeki kesitte istenen sertliği tutturabilir miyim, (2) tutturamıyorsa ortamı mı sertleştireyim yoksa daha alaşımlı çeliğe mi geçeyim. İkincisi genellikle daha doğrudur, çünkü ortamı sertleştirmek çarpılma ve çatlak riskini birlikte büyütür.

6. Temperleme ve İslah

Su verilmiş martenzit, aşırı doymuş karbonun ve yüksek iç gerilmelerin yarattığı gevrek bir yapıdır; kullanılabilir hâle gelmesi için **temperlenir**. Temperleme sıcaklığı yükseldikçe sertlik ve dayanım düşer, tokluk ve süneklik artar. Su verme + temperleme birlikte **ıslah (quenching & tempering, +QT)** olarak adlandırılır ve makine imalatının en yaygın ısıl işlemidir.

Sıcaklık	Olan	Kullanım
150–200 °C	İç gerilme azalır, sertlik az düşer	Sementasyonlu ve indüksiyonla sertleştirilmiş parçalar, yataklar
200–350 °C	Temperlenmiş martenzit gevrekliği bölgesi — darbe tokluğu düşer	Mümkünse kaçınılır
400–500 °C	Karbürler kabalaşır; yay dayanımı optimumu	Yaylar, burulma yüklü parçalar
550–650 °C	Sorbitik yapı: dayanım + tokluk dengesi	Mil, dişli, bağlantı elemanı — klasik ıslah

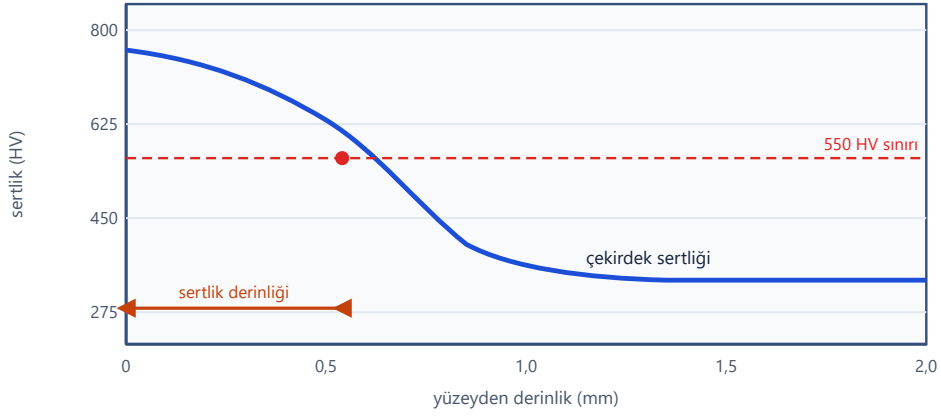
İki ayrı gevreklik: 260–370 °C aralığındaki **temperlenmiş martenzit gevrekliği** hızlı soğutmayla önlenemez; o aralıktan kaçınmak gerekir. 375–575 °C'de yavaş soğutmada görülen **geri dönüşlü temper gevrekliği** ise fosfor, kalay, antimon gibi safsızlıkların tane sınırına göçünden kaynaklanır; bu aralıktan **hızlı soğutarak** çıkmak ve molibden içeren çelik seçmek çözümdür.

Temperlemede süre, sıcaklığın yerini tutmaz: 2 saat 550 °C ile 8 saat 450 °C aynı sonucu vermez. Sertlik hedefi tutmuyorsa süre uzatılmaz, **sıcaklık yeniden seçilir** ve işlem baştan uygulanır.

7. Yüzey Sertleştirme

Yorulma ve aşınma yüzeyden yönetilir; buna karşılık darbe dayanımı tok bir çekirdek ister. Bu iki çelişkili isteği aynı parçada buluşturan yöntem **yüzey sertleştirmedir**. Ek olarak sert tabakadaki hacim artışı yüzeyde **basma artık gerilmesi** bırakır; çatlak başlangıcını geciktirdiği için yorulma ömrünü doğrudan uzatır.

Yöntem	Sıcaklık	Tabaka	Yüzey sertliği	Uygun çelik
Sementasyon	880–950 °C + su verme	0,3–2,0 mm	58–62 HRC	Düşük karbonlu (EN 10084: 16MnCr5, 20MnCr5)
Karbonitrüleme	780–880 °C	0,1–0,8 mm	55–62 HRC	Düşük karbonlu, küçük parçalar
Nitrüleme	500–530 °C (su verme yok)	0,1–0,6 mm	900–1200 HV	Al/Cr/Mo'lu ıslah çelikleri (31CrMoV9)
İndüksiyonla sertleştirme	850–1000 °C (yüzeyel)	0,5–5,0 mm	55–60 HRC	0,35–0,55 %C ıslah çelikleri



Şekil 3 — Yüzey sertleştirilmiş kesitte sertlik–derinlik profili. Sertlik derinliği, profilin tanımlı sınır sertliği (çoğunlukla 550 HV) ile kesiştiği derinliktir; ölçüm EN ISO 18203'e göre yapılır. (SAE Mühendislik özgün çizimi.)

8. Yumuşatma ve Hazırlık İşlemleri

- **Normalizasyon (+N):** Ac_3 + 30–50 °C'den durgun havada soğutma. Döküm ve dövme sonrası iri/yönlenmiş taneyi inceltir ve yapıyı homojenleştirir; **ısıtım işlemi öncesi standart hazırlık adımıdır.**
- **Tam tavlama (+A):** Ac_3 üstünden fırında yavaş soğutma. En yumuşak, en işlenebilir hâl; iç gerilmeleri de giderir.
- **Küreselleştirme tavlama:** A_1 civarında uzun süreli bekleme ile sementitin küreselleşmesi. Yüksek karbonlu çeliklerde soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat kabiliyetini belirgin şekilde artırır.
- **Gerilim giderme tavlama:** 550–650 °C, dönüşüm olmadan. Kaynak, soğuk şekillendirme veya kaba talaş sonrası biriken artık gerilmeleri azaltır; işleme sonrası boyut kaymasını önler.
- **Yeniden kristalleştirme tavlama:** Soğuk deformasyonla pekleşmiş yapının yeniden yumuşatılması; çok kademeli çekme ve derin çekme hatlarının ara işlemidir.

Sıra önemlidir: Kaba talaş → gerilim giderme → ıslah → son talaş/taşıma sırası, çarpılmanın son ölçüye yansımaları engeller. Isıl işlemi en sona bırakmak, tam toleranslı yüzeylerin hurda olmasının en bilinen nedenidir.

9. Yaygın Isıl İşlem Hataları ve Kök Nedenleri

Belirti	Olası kök neden	Doğrulama yolu
Sertlik hedefin altında	Düşük östenitleme sıcaklığı/süresi, yetersiz sertleşebilirlik, yavaş su verme, yüksek temperleme	Kesitte sertlik haritası + metalografi (perlit/beynit arayışı)
Yüzeyde yumuşak noktalar	Buhar filmi, yetersiz karıştırma, yüzey kiri/tufal, dekarbürizasyon	Yüzey sertliği taraması; kesitte ferritik bant
Su verme çatlağı	Keskin köşe, kesit farkı, aşırı sert ortam, temperlemenin gecikmesi	Çatlak ağzı oksitsiz ve kesite dik; metalografide martenzitik yapı
Aşırı çarpılma	Dengesiz ısıtma/soğutma, yanlış asma düzeni, önceki işlemlerden artık gerilme	Isıl işlem öncesi/sonrası ölçüm karşılaştırması
Düşük darbe tokluğu	İri östenit tanesi, temper gevrekliği aralığı, yavaş soğutma	Tane boyutu (ASTM E112) + Charpy; kırık yüzeyde intergranüler görünüm
Sertlik derinliği yetersiz	Karbon potansiyeli/süre, indüksiyonda frekans ve güç ayarı	Mikrosertlik profili (EN ISO 18203)

Bu tablonun pratik değeri, tanıyı **tek bir ölçümle değil, iki bağımsız kanıtla** kapatma disiplindedir: sertlik düşüklüğü yalnızca sertlik ölçerek değil, mikroyapıda beklenen dönüşüm ürününün görülmesiyle doğrulanır. Kırık bir parçada ısıl işlemde şüpheleniliyorsa inceleme **Teknik Yayınlar No.6: Hasar ve Kırık Yüzey Analizi**'ndeki kademeli yöntemle yürütülür.

10. Kalite Kontrol ve Dokümantasyon

Isıl işlem, sonucu nihai üründe gözle görülmeyen bir **özel prosestir**; bu nedenle denetimi ürüne değil, sürece kurulur:

- Fırın sıcaklık doğruluğu ve üniformitesi:** düzenli TUS (sıcaklık uniformite ölçümü) ve SAT (sistem doğruluk testi) kayıtları.
- Su verme banyosu:** sıcaklık, karıştırma debisi, polimer derişimi, kirlilik takibi.
- Atmosfer kontrolü:** karbon potansiyeli, çiy noktası; dekarbürizasyon ve tufal oluşumunun önlenmesi.
- Parça bazlı doğrulama:** sertlik (ISO 6508 / ISO 6507), mikroyapı, sertlik derinliği, tane boyutu, çarpılma ölçümü.
- İzlenebilirlik:** şarj numarası, fırın çevrim kaydı, operatör, kullanılan reçete; hasar analizinde ilk istenen belge budur.

Otomotiv tedarik zincirinde bu kontrollerin çerçevesi **CQI-9 Isıl İşlem Sistem Değerlendirmesi** ile tanımlanır. Teknik resimde ısıl işlemin gösterimi ise ISO 15787'ye göre yapılır: yöntem, hedef sertlik ve ölçüm yeri resimde açıkça yazılmadığında, tedarikçi ile alıcı aynı parçadan farklı şeyler anlar.

Sahada en çok işe yarayan tek cümle: Sertlik hangi **yüzeyde**, hangi **derinlikte** ve hangi **yöntemle** ölçülecek — resimde yazmıyorsa tartışma kaçınılmazdır. Bu üç bilgi, uyumsuzlukların büyük kısmını daha başlamadan bitirir.

11. Yararlanılan Temel Kaynaklar

1. ASM International, *ASM Handbook Vol. 4: Heat Treating*, 1991.
2. Krauss, G., *Steels: Processing, Structure, and Performance*, 2. baskı, ASM International, 2015.
3. Totten, G.E. (ed.), *Steel Heat Treatment Handbook*, 2. baskı, CRC Press, 2006.
4. Bhadeshia, H.K.D.H., Honeycombe, R., *Steels: Microstructure and Properties*, 4. baskı, Butterworth-Heinemann, 2017.
5. Thelning, K.E., *Steel and its Heat Treatment*, 2. baskı, Butterworth-Heinemann, 1984.
6. Dieter, G.E., *Mechanical Metallurgy*, SI Metric ed., McGraw-Hill, 1988.
7. *İlgili standartlar*: EN 10052 (ısıtıl işlem terimleri), EN ISO 683-1/-2 ve EN 10083-1/-2/-3 (ıslah çelikleri), EN 10084 (sementasyon çelikleri), ISO 642 ve ASTM A255 (Jominy sertleşebilirlik), EN ISO 18203 (sertleştirilmiş tabaka derinliği), ASTM E112 (tane boyutu), ISO 6507-1 (Vickers), ISO 6508-1 (Rockwell), ISO 15787 (teknik resimde ısıtıl işlem gösterimi), AIAG CQI-9 (ısıtıl işlem sistem değerlendirmesi).