



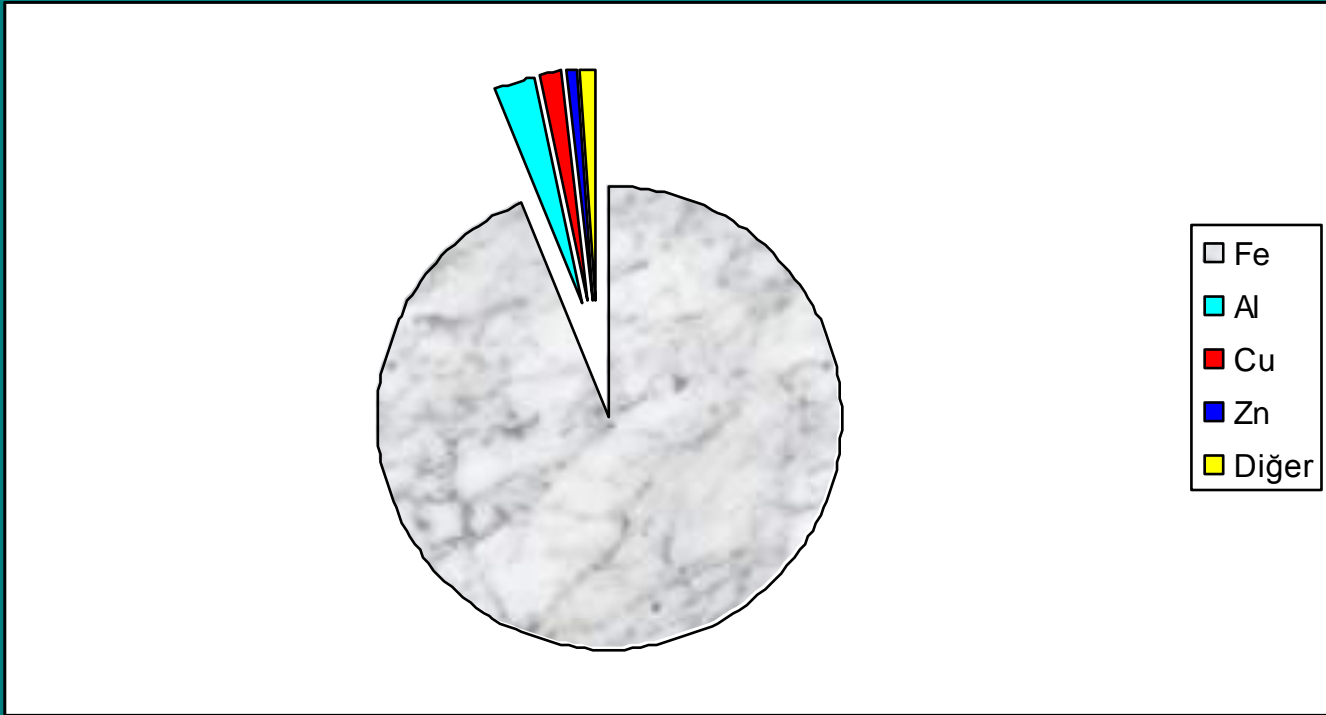
# Mühendislik Fakültesi

*temiz enerji ve enerji verimliliğinde en önemli adres*

## ISIL İŞLEMLER

***Doç. Dr. Bülent AKTAŞ***

# DEMİR – KARBON ALAŞIMLARI



## Dünya Metal Üretimi

(%)	<u>Fe</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Zn</u>	<u>Diğer</u>
	94	1	3	1	1

**Tablo 1. Dünya Ham Çelik Üretiminde İlk 10 Ülke (milyon ton)**

Sıra	Ülke	2009	2010	2011	2012	2013
1	Çin	573,6	626,7	683,3	731	779
2	Japonya	87,5	109,6	107,6	107,2	110,6
3	ABD	58,2	80,6	86,2	88,7	86,9
4	Hindistan	62,8	68,3	72,2	77,3	81,2
5	Rusya	60	66,9	68,7	70,4	68,7
6	Güney Kore	48,6	58,5	68,5	69,1	66,1
7	Almanya	32,7	43,8	44,3	42,7	42,6
8	Türkiye	25,3	29	34,1	35,9	34,7
9	Brezilya	26,5	32,8	35,2	34,5	34,2
10	Ukrayna	29,9	33,6	35,3	33	32,8



# Türkiye'de Ham Çelik Üretim Rakamları

Yıllar	Üretim Miktarı(Milyon Ton)
1991	9.3
1995	12.8
2000	14.3
2005	20.9
2007	25.8
2008	26.8
2009	25.3
2010	29.1
2011*	16.4

**Kaynak:** WSA \*2011 verileri 6 aylıktır

**Tablo 6. Türkiye'de Demir-Çelik Sektöründeki Önemli Tesislerin Faaliyete Geçiş Tarihleri**

Kurum	Yıl	Kurum	Yıl	Kurum	Yıl
MKEK	1928	Diler	1984	Sider	2006
Kardemir	1937	Habaş	1987	Mega	2009
Erdemir	1965	İDÇ	1987	Bilecik	2009
Çolakoğlu	1969	Çebitaş	1989	Ede	2010
Kroman	1969	Ekinciler	1989	Platinum	2010
İçdaş	1970	Sidemir	1992	Tosçelik	2010
Çemtaş	1972	Yazıcı	1994	Özkan	2010
İsdemir	1997	Yeşilyurt	1997	Yolbulan-Baştuğ	2010
Asil Çelik	1979	Kaptan	2002	MMK-Atakaş	2011
Ege Çelik	1982	Nursan	2005	Cansan	2012

Kaynak: Türkiye Çelik Üreticileri Derneği

# Demir - elik Üretimi

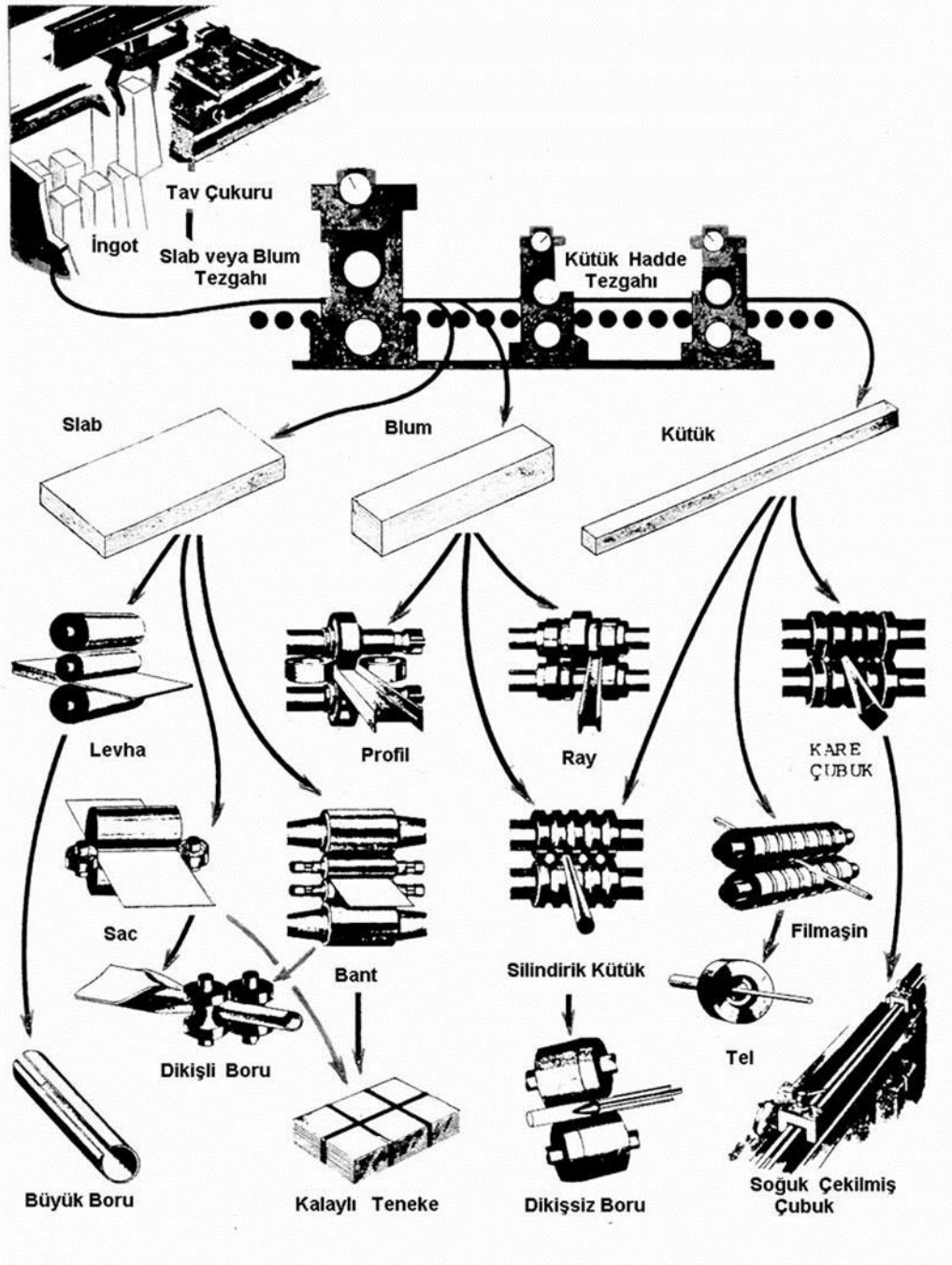
- Demir doğada demir oksit olarak bulunur.
- Demir oksit yüksek fırında pik demirine dönüştürülür.

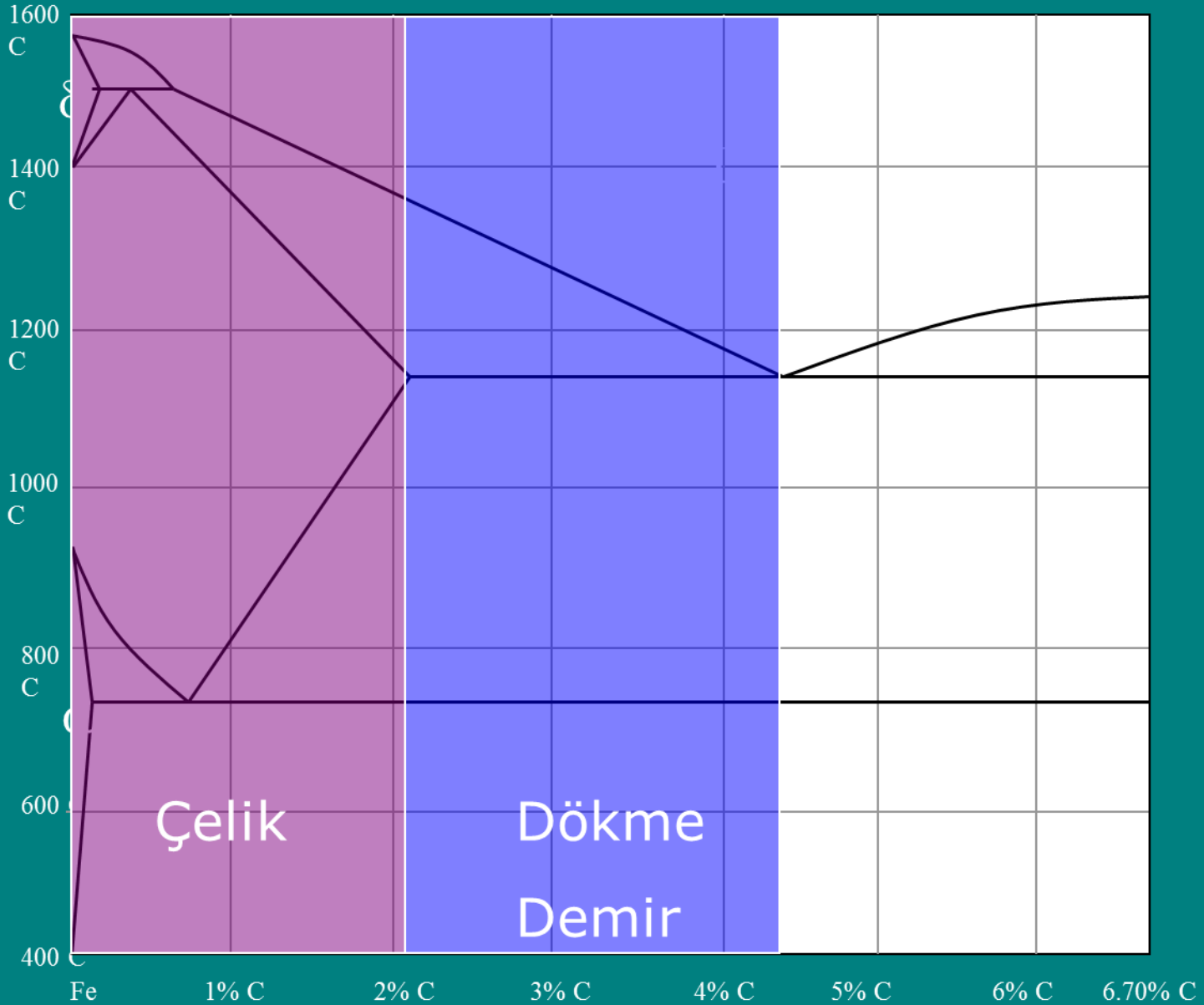
**Pik demir: Demir + yüksek % karbon**



# Çelik

- Çelik üretimine 1850 yıllarında başlandı
- Simens Martin Fırınları ile aşırı karbon giderildi
- Karbon giderilmesini sağlayan diğer yöntemler
  - Elektrik Fırını
  - Oksijen Fırını





# Çelik ve Dökme Demirler

- Fe-C denge diyagramı sadece demir ve karbon alaşımlarına aittir.
- Çelikler ve dökme demirler genellikle diğer alaşım elementlerini bileşimlerinde içerebilirler. Alaşım elementlerinin mevcudiyeti Fe-C diyagramını modifiye eder.

# Demir – Karbon Alaşımlarının Sınıflandırması

## Fe – C Alaşımları

### Çelikler

### Dökme Demirler

#### Alaşımsız Çelikler

#### Alaşımlı Çelikler

Gri Dökme Demir

Küresel Grafitli Dökme Demir

Beyaz Dökme Demir

Temper Dökme Demir

#### Az Alaşımlı

#### Yüksek Alaşımlı

- Az karbonlu
- Orta karbonlu
- Yüksek karbonlu

- Mn çeliği
- Cr çeliği
- Cr-Mo çeliği
- Ni-Cr çeliği
- Ni-Cr-Mo çeliği

- Paslanmaz çelik
- Takım çeliği



# Çeliklere Alaşım Elementlerinin Etkisi

- **Faz diyagramını modifiye eder**
- **TTT diyagramını modifiye eder**
- **Mukavemeti artırır**
- **Korozyon direncini artırır**

# Çeliklere Alaşım Elementlerinin Etkisi

**Principle Effects of Major Alloying Elements in Steel**

Element	Percentage	Primary Function
Manganese	0.25–0.40 > 1	Combine with sulfur to prevent brittleness Increase hardenability, by lowering transformation points and causing transformations to be sluggish
Sulfur	0.08–0.15	Free-machining properties
Nickel	2–5 12–20	Toughener Corrosion resistance
Chromium	0.5–2 4–18	Increase hardenability Corrosion resistance
Molybdenum	0.2–5	Stable carbides; inhibits grain growth
Vanadium	0.15	Stable carbides; increases strength while retaining ductility; promotes fine grain structure
Boron	0.001–0.003	Powerful hardenability agent
Tungsten		Hardness at high temperatures
Silicon	0.2–0.7 2 Higher percentages	Increases strength Spring steels Improve magnetic properties
Copper	0.1–0.4	Corrosion resistance
Aluminum	0.95–1.30	Alloying element in nitriding steels
Titanium	—	Fixes carbon in inert particles Reduces martensitic hardness in chromium steels
Lead	—	Improves machinability

# Çeliklere Alaşım Elementlerinin Etkisi

## ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ÇELİKLERİN ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

ALAŞIM ELEMENTİ	SERTLİK	MUKAVEMET	AKMA NOKTASI	UZAMA	KESİT BÜZÜLMESİ	DARBE DİRENCİ	ELASTİSİTE	YÜKSEK SICAKLIĞA DAYANIM	SOĞUMA HIZI	KARBÜR OLUŞUMU	AŞINMA DİRENCİ	DÖVÜLEBİLİRLİK	İŞLENEBİLİRLİK	OKSİTLENME EĞİLİMİ	KOROZYON DİRENCİ
Si	↑	↑	↑↑	↓	~	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	—
Mn*	↑	↑	↑	~	~	~	↑	~	↓	~	↓↓	↑	↓	~	—
Mn**	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	~	—	—	—	↓↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	—
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	—	↓↓↓	↑↑↑
Ni*	↑	↑	↑	~	~	~	—	↑	↓↓	—	↓↓	↓	↓	↓	—
Ni**	↓↓	↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	—	↑↑↑	↓↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑
Al	—	—	—	—	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓	—	↓↓	—
W	↑	↑	↑	↓	↓	~	—	↑↑↑	↓↓	↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	—
V	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↑	—	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	—	↑↑	↑↑	—	↑↑↑	↓	~	↓	—
Mo	↑	↑	↑	↓	↓	↑	—	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	—
S	—	—	—	↓	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓↓	↑↑↑	—	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	—	—	—	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑

\* Perlitik Çeliklerde

\*\* Ostenitik Çeliklerde

↑  
Arttırır

↓  
Azaltır

~  
Değiştirmez

—  
Önemsiz ya da bilinmiyor

## Alaşımsız Çelikler

Element	Az Karbonlu Çelik	Orta Karbonlu Çelik	Yüksek Karbonlu Çelik
Karbon (%)	0.0 – 0.20	0.20 - 0.50	> 0.50
Manganez (%)	0.3 – 0.6	0.6 - 0.9	0.7 - 1.00
Silisyum (%)	0.1 – 0.2	0.15 - 0.30	0.15 - 0.3
Fosfor (%)	0.04 maks.	0.04 maks.	0.04 maks.
Kükürt (%)	0.05 maks.	0.05 maks.	0.05 maks.

# Alaşımsız Çelikler

AISI/SAE Simgesi	Kimyasal bileşim, % ağı	İşlem durumu	Akma Mukavemeti, MPa	Çekme Mukavemeti, MPa	Kopma uzama oranı, %	Tipik uygulama alanı
1010	0.10 C, 0.40 Mn	Sıcak haddelenmiş, Soğuk haddelenmiş	179-310 159-262	276-414 290-400	28-47 30-45	Sac ve şerit, çivi, vida, tel, çubuk, beton çeliği
1020	0.20 C, 0.45 Mn	Haddelenmiş halde Tavllanmış	331 297	448 393	36 36	Çelik levha ve yapı elemanları, şaft ve dişliler
1040	0.40 C, 0.45 Mn	Haddelenmiş halde Tavllanmış Su verilmiş ve temperlenmiş*	414 352 593	621 517 800	25 30 20	Şaft, çivi, yüksek mukavemetli borular, dişliler
1060	0.60 C, 0.65 Mn	Haddelenmiş halde Tavllanmış Su verilmiş ve temperlenmiş*	483 483 780	814 628 1100	17 22 13	Yay, dövme kalıpları vagon tekerlekleri
1080	0.80 C, 0.80 Mn	Haddelenmiş halde Tavllanmış Su verilmiş ve temperlenmiş*	586 373 980	967 614 1304	12 25 12	Yaylı çalgı teli, helisel yaylar, keski, dövme blokları
1095	0.95 C, 0.40 Mn	Haddelenmiş halde Tavllanmış Su verilmiş ve temperlenmiş*	573 379 814	966 655 1263	9 13 10	Kalıp, zımba, freze bıçakları, kesme bıçakları, yüksek mukavemetli tel

\* Temperleme sıcaklığı: 315 °C.

# Alaşımlı Çelikler

$\Sigma$  Alaşım Elementi < % 5  $\Rightarrow$  Az Alaşımlı Çelik

Mn Çelik

Cr Çelik

Cr-Mo Çelik

Ni-Mo Çelik

Ni-Cr-Mo Çelik

$\Sigma$  Alaşım Elementi > % 5  $\Rightarrow$  Yüksek Alaşımlı Çelik

Paslanmaz Çelik

Takım Çeliği



# Az Alaşımlı Çelikler

- a) Alaşımız çeliklerde süneklik ve toklukta aşırı azalma olmaksızın 700 MPa'dan daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşamaz,
- b) Kalın kesitli alaşımız çeliklerin tüm kesiti ısıt işleme martensite dönüştürülemez. Alaşımız çeliklerde su verme ile oluşan sertlik derinliği düşüktür,
- c) Alaşımız çeliklerin korozyon ve oksidasyon direnci düşüktür,
- d) Orta karbonlu alaşımız çeliklerde yapının tamamen martensite dönüşmesi için su verme işleme çok hızlı yapılmalıdır. Hızlı soğutma, ısıt işleme sonrasında parçada aşırı distorsiyona ve çatlamaya neden olur,
- e) Düşük sıcaklıklarda alaşımız çeliklerin darbe direnci çok düşüktür.

# Az Alaşımli Çelikler

AISI/SAE Simgesi	Kimyasal bileşim, % ağı	İşlem durumu	Akma Mukavemeti, MPa	Çekme Mukavemeti, MPa	Kopma uzaması, %	Tipik uygulama alanı
<b>Manganezli çelikler</b>						
1340	0.40 C, 1.75 Mn	Tavllanmış	435	704	20	Yüksek mukavemetli civata
		Temperlenmiş*	1421	1587	12	
<b>Kromlu çelikler</b>						
5140	0.40 C, 0.8 Cr, 0.8 Mn	Tavllanmış	297	573	29	Otomobillerin transmisyon dişlisi
		Temperlenmiş*	1449	1580	10	
5160	0.60 C, 0.80 Cr, 0.90 Mn	Tavllanmış	276	725	17	Otomobil amortisör ve yaprak yayları
		Temperlenmiş*	1773	2000	9	
<b>Krom-Molibdenli çelikler</b>						
4140	0.40 C, 1.0 Cr, 0.90 Mn, 0.20 Mo	Tavllanmış	421	655	26	Uçak türbin dişlisi, transmisyon dişlisi
		Temperlenmiş*	1433	1550	9	
<b>Nikel-Molibdenli Çelikler</b>						
4620	0.20 C, 1.83 Ni, 0.55 Mn, 0.25 Mo	Tavllanmış	373	517	31	Transmisyon dişlisi, zincir halkası, şaftlar, rulmanlar
		Normalleştirilmiş	366	573	29	
4820	0.20 C, 3.50 Ni, 0.60 Mn, 0.25 Mo	Tavllanmış	462	683	22	Çelik tesislerindeki ekipman dişlileri, kağıt makineleri, madencilik makineleri
		Normalleştirilmiş	483	690	60	
<b>Nikel (%1.83) - Krom-Molibdenli Çelikler</b>						
4340 (E)	0.40 C, 1.83 Ni, 0.90 Mn, 0.80 Cr, 0.20 Mo	Tavllanmış	469	745	22	Büyük kesitler, iniş takımları, kanyon parçaları
		Temperlenmiş*	1587	1725	10	
<b>Nikel (%0.55) - Krom-Molibdenli Çelikler</b>						
8620	0.20 C, 0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.80 Mn, 0.20 Mo	Tavllanmış	407	531	31	Transmisyon dişlileri
		Normalleştirilmiş	359	635	26	
8650	0.50 C, 0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.80 Mn, 0.20 Mo	Tavllanmış	386	710	22	Küçük makinelerin aksları, şaftlar
		Temperlenmiş*	1552	1725	10	

\*Temperleme sıcaklığı: 315 °C



# Yüksek Alaşımli Çelikler

## Paslanmaz Çelikler

Ferritik Paslanmaz Çelikler,  
Martensitik Paslanmaz Çelikler,  
Ostenitik Paslanmaz Çelikler  
Çökeltme ile Sertleşen Paslanmaz Çelikler

## Takım Çelikleri

Suda Sertleşen Takım Çeliği  
Şok Dirençli Takım Çeliği  
Soğuk İş Takım Çeliği  
Sıcak İş Takım Çeliği  
Yüksek Hız Takım Çeliği  
Plastik Kalıp Takım Çeliği  
Özel Amaç Takım Çeliği

# Paslanmaz Çelikler

**%12'den daha yüksek oranda Cr içerirler ve bir çok ortamda üstün korozyon direncine sahiptirler.**

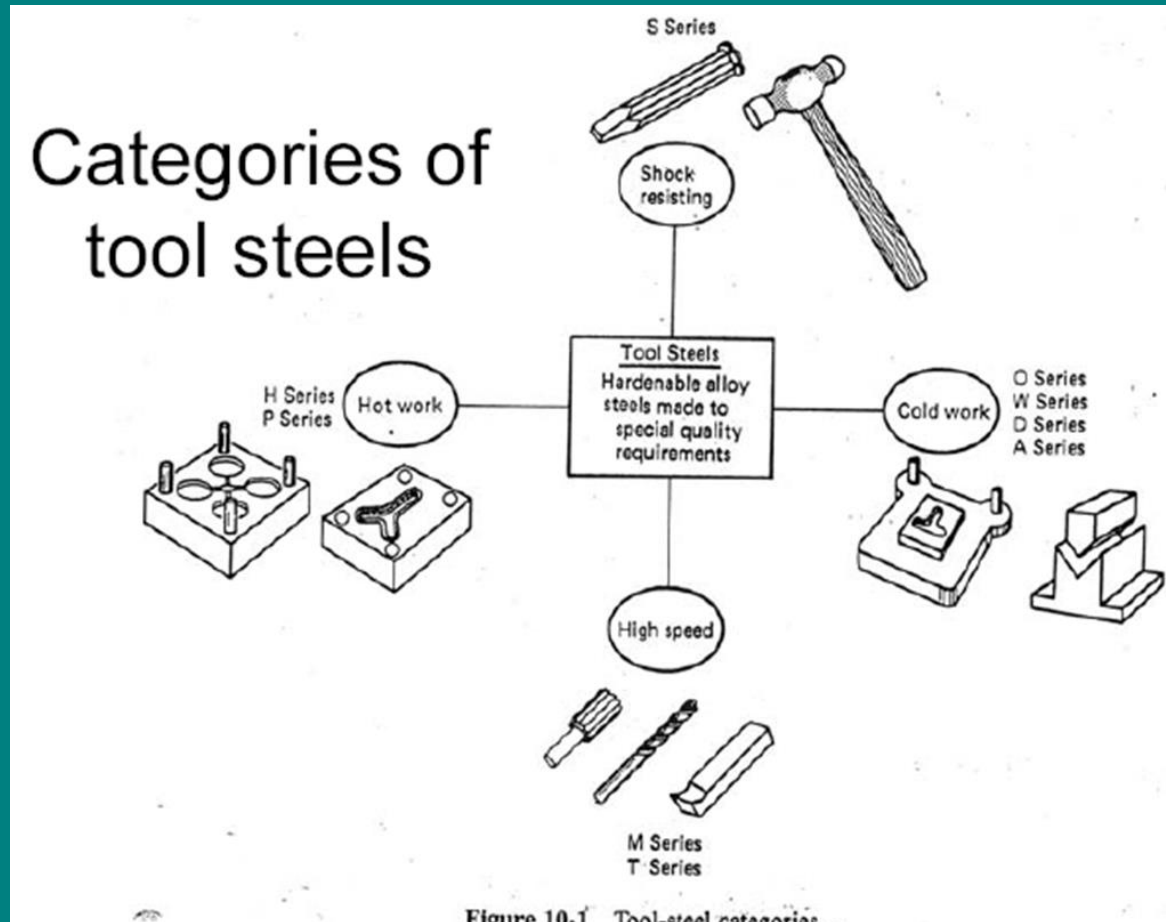
- Ferritik P.Ç.: %12-30 Cr ve %0,12'den az C içerirler. HMK yapıdadırlar. Ni içermediklerinden ucuzdurlar.
- Martensitik P.Ç.: %12-17 Cr ve %0,15-1,0 C içerirler. Su verme ve temperleme ısı işlemleri uygulanabilir.
- Ostenitik P.Ç.: %16-25 Cr, %7-20 Ni içerirler. Korozyon dirençleri ferritik ve martensitik p.ç.'den üstündür.
- Çökelme ile Sertleşen P.Ç.: Ostenitik p.ç.'lerden farkları, bileşimlerinde Al, Nb ve Ta gibi alaşım elementleri içermeleridir. Düşük karbon içeriklerinde bile üstün mekanik özelliklere sahiptirler. Yaşlandırma ile sertleştirilirler.

# Paslanmaz Çelikler

Standart	Bileşim	Durum	Mukavemet (MPa)		Kopma Uzaması, % (50 mm'de)	Kullanım alanı
			Çekme	Akma		
<b>Ferritik Paslanmaz Çelikler</b>						
430	17Cr,0.0012 C	Tavllanmış	517	345	25	Genel amaçlı; Isıl işlemle sertleştirilemez; restoran ekipmanları
446	25 Cr, 0.20 C	Tavllanmış	552	345	20	Yüksek sıcaklık uygulamaları; ısıtıcılar, yanma odaları
<b>Martensitik Paslanmaz Çelikler</b>						
410	12.5 Cr, 0.15 C	Tavllanmış	517	276	30	Genel amaçlı; Isıl işlem uygulanabilir; makina parçaları, pompa şaftları, valfler
440A	17 Cr, 0.70 C	Tavllanmış	724	414	20	Kesici aletler, ameliyat malzemeleri
		Su verme+Temperleme	1828	1690	5	
440 C	17 Cr, 1.1 C	Tavllanmış	759	276	13	Yataklar, valf parçaları
		Su verme+Temperleme	1966	1897	2	
<b>Ostenitik Paslanmaz Çelikler</b>						
301	17 Cr, 7 Ni	Tavllanmış	580	290	55	Deformasyon sertleşmesi yüksek alaşım; Konstrüksiyon uygulamaları
304	19 Cr, 10 Ni	Tavllanmış	559	269	55	Kimya ve gıda proses ekipmanları
304L	19 Cr, 10 Ni, 0.03 C	Tavllanmış	6217	241	45	Kaynak işlemine uygun az karbonlu, kimyasal tanklar
321	18 Cr, 10 Ni, Ti = 10x%C min.	Tavllanmış	655	276	45	Kaynak işleri için stabilize edilmiş, proses ekipmanları, basınç kapları
347	18 Cr, 10 Ni, Nb = 10x%C min.	Tavllanmış	655	276	45	Kaynak işlemi için stabilize edilmiş, kimyasallar için tanklar
<b>Çökeltme ile Sertleşen Paslanmaz Çelikler</b>						
17-4 PH	16 Cr, 4 Ni, 4Cu, 0.03 Nb	Çökeltme Sertleşmesi	1311	1207	14	Dişliler, şaftlar, uçak ve türbin parçaları

# Takım Çelikleri

Bileşimlerinde %50'ye varan oranlarda Cr, Mo, V, W, Co gibi alaşım elementi içerirler. Sıcak ve soğuk haldeki iş parçalarını kesme, dövme, vs yöntemlerle şekillendiren kalıpların yapımında kullanılırlar.



# Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması

- **Suda Sertleşen T.Ç.:** Bileşimlerinde az oranda Cr ve V bulunur. Karbon oranları %0,60-1,40 arasındadır. Su verilerek mukavemetleri arttırılır.
- **Sok Dirençli T.Ç.:** Yüksek tokluk gerektiren ve tekrarlı, darbeli yüklemelerin olduğu yerlerde kullanılırlar. Nispeten düşük C (%0,4-0,65) ve alaşım elementi olarak Si, Cr, V bazen de Mo içerirler. Zimba ve kesici bıçak yapımında kullanılırlar.
- **Soğuk İş T.Ç.:**
  - (a) Yağda Sertleşen: Yüksek C'lu (%0,9-1,5) ve alaşım elementi olarak Mn ve az miktarda Cr ve W içerirler. Yağda su verilerek sertleştirilirler.
  - (b) Havada Sertleşen: Yaklaşık %1 C, %2 Mn, %5 Cr (maks.), %1 Mo içerirler. Havada soğutularak sertleştirilirler.
  - (c) Yüksek C'lu Yüksek Cr'lu: %1,5-2,35 C, %12 Cr içerirler. Ayrıca Mo, V ev Co da alaşım elementi olarak bulunabilir. Mo içeren türleri havada, içermeyenleri yağda su verilerek sertleştirilir.



# Takım Çelikleri

- **Sıcak İş T.Ç.:** Yüksek sıcaklıklardaki kesme ve şekillendirme işlemlerinde kullanılırlar. %0,3-0,6 C, %2-12 Cr ve Mo, W gibi alaşım elementleri içerirler. Havada sertleştirilebilirler.
  - (a) Cr'lu: En az %3-25 Cr ve daha az oranlarda V, W ve Mo içerirler. Yüksek tokluğa sahiptirler. Sıcak dövme kalıbı, sıcak kesme bıçağı ve Alüminyum döküm kalıplarının yapımında kullanılırlar.
  - (b) W'lı: %9-18 W ve %3-12 Cr içerirler. Daha yüksek sıcaklıklara dayanıklıdırlar.
  - (c) Mo'li: Sünekliğin ve tokluğun önemli olmadığı durumlarda kullanılırlar.

# Takım Çelikleri

- **Yüksek Hız T.Ç.:** Ana element olarak W ve Mo içerirler. Cr, V ve Co da içerebilirler. Karbon içerikleri %0,75-1,2 arasındadır. Yüksek sıcaklıklarda yumuşama, aşınma ve şok dirençleri çok yüksektir.
  - (a) W'lı: Kesici takım yapımında kullanılır. Maliyetleri yüksektir.
  - (b) Mo'li: Kesici takım yapımı ve çeşitli soğuk işlem koşullarında çalışan kalıpların imalatında kullanılırlar.
- **Plastik K.Ç.:** Düşük ve orta C'lu Cr ve Ni alaşımlı az oranda V ve Mo içeren çeliklerdir. Toplam alaşım elementleri %1,5-5 düzeyindedir.
- **Özel Amaçlı T.Ç.:** Bileşimleri suda setleşen t.ç.'lerine yakındır. Aşınma direnci ve sertleşebilirliği arttırmak için Cr, V, Mo ve Ni içerebilirler. Genellikle yağda su verme ile sertleştirilirler.

# Takım Çelikleri

Sınıf	Simge	Tür
Suda sertleşen	W	Sade karbonlu
Şok dirençli	S	Orta karbonlu, az alaşımlı
Soğuk iş	O	Yağda sertleşen
	A	Havada sertleşen, orta alaşımlı
	D	Yüksek karbonlu, yüksek kromlu
Sıcak iş	H	Kromlu (H1-H19) Volframli (H20-H39) Molibdenli (H40-H59)
Yüksek hız	T	Volframli
	M	Molibdenli
Plastik kalıp	P	Az karbonlu
Özel amaç	L	Az alaşımlı



## Shock resistant tool steels



screwdriver blade



shear blade

## Cold work tool steels



cutter



punch



shear blade



roll



blanking die

## High speed tool steels



thread rolling die



pin, punch

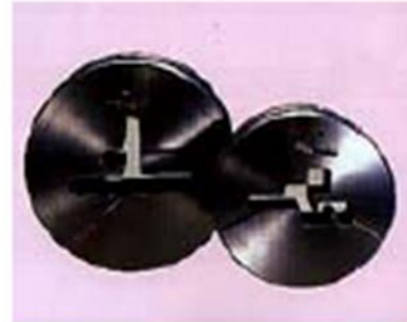


drill bit

## Hot work tool steels



die casting die



extrusion die



punch & die

# Dökme Demirler

Döküm yoluyla şekillendirilen, %2-4 C, %0,5-3 Si içeren Fe-C alaşımlarıdır. Si, grafit oluşumunu sağlamak amacıyla ilave edilir.

- **Beyaz D.D.:** Katılaşma sırasında grafit yerine karbürler oluşur. Mikroyapısında perlitik matris içinde iri demir karbürler içerirler. Yüksek abrasif aşınma direncine sahiptirler.
- **Gri D.D.:** Katılaşma sırasında grafit lameller morfolojide oluşur, ancak grafit lamelleri çentik etkisi yaptığından çekme mukavemetleri düşüktür. Talaşlı imalata çok uygundur. Üstün aşınma direncine sahiptirler.
- **Küresel Grafitli D.D.:** Sıvı demirin Mg veya Cs ile aşılması ile katılaşma sırasında grafit küresel morfolojide oluşur. Talaşlı imalatı kolaydır ve aşınma direnci, mukavemet ve toklukları yüksektir. Mikroyapı grafit kürelerini çevreleyen ferrit ve perlitten oluşur.
- **Temper D.D.:** Beyaz d.d.'lere ısı işlem uygulanarak elde edilirler. Yüksek sıcaklıklarda demir karbürler grafit ve demire ayrışır. Grafit düzensiz küresel (rozet) şeklinde bulunur.

# Dökme Demirler

Element	Gri Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	Temper Dökme Demir	Küresel Grafitli Dökme Demir
Karbon (%)	2.5 – 4.0	1.8 – 3.6	2.00 – 2.60	3.0 – 4.0
Silisyum (%)	1.0 – 3.0	0.5 – 1.9	1.10 – 1.60	1.8 – 2.8
Manganez (%)	0.25 – 1.0	0.25 – 0.80	0.20 – 1.00	0.10 – 1.00
Kükürt (%)	0.02 – 0.25	0.06 – 0.20	0.04 – 0.18	0.03 maks.
Fosfor (%)	0.05 – 1.0	0.06 – 0.18	0.18 maks.	0.10 maks.



# Dökme Demirler

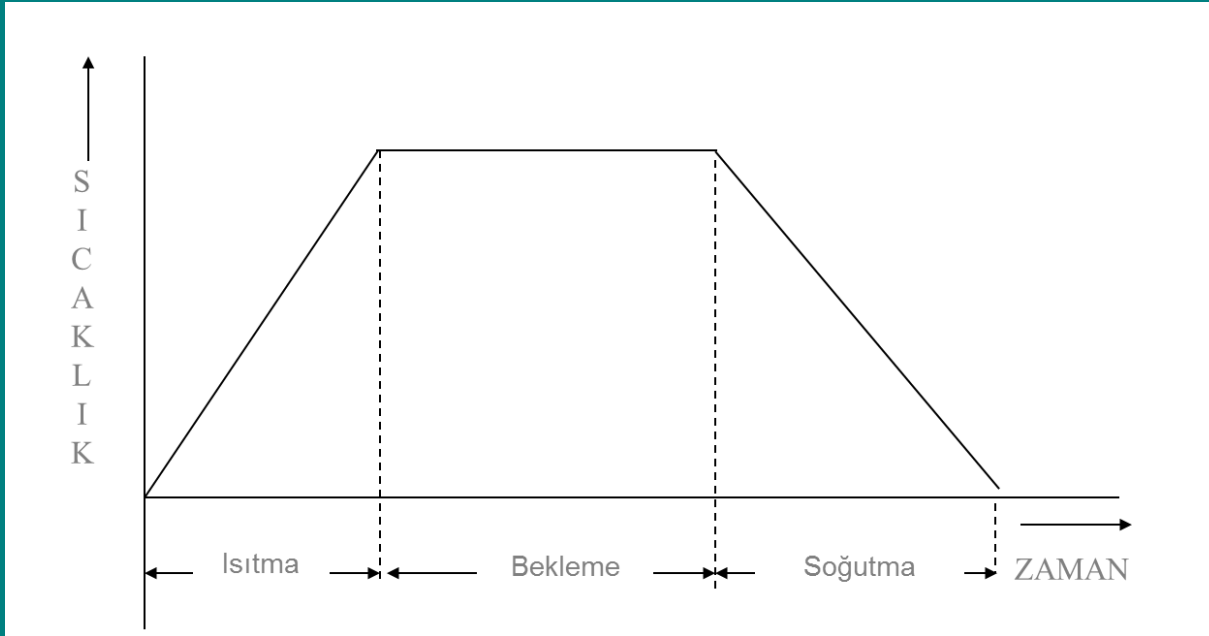
AISI/SAE Simgesi	Kimyasal bileşim, % ağı	İşlem durumu	Mikroyapı	Akma Mukavemeti, MPa	Çekme Mukavemeti, MPa	Kopma uzaması, %	Tipik uygulama alanı
<b>Gri Dökme Demirler</b>							
Feritik (G2500)	3.4 C, 2.2 Si, 0.7 Mn	Tavllanmış	Feritik matriks	-	-	-	Küçük silindir blokları, silindir kafaları, debriyaj balataları
Perlitik (G3500)	3.2 C, 2.0 Si, 0.7 Mn	Döküm Hali	Perlitik Matriks	-	-	-	Kamyon ve traktör silindir blokları, ağır dişli kutuları
Perlitik (G4000)	3.3 C, 2.2 Si, 0.7 Mn	Döküm hali	Perlitik Matriks	-	-	-	Dizel motor dökümleri
<b>Temper Dökme Demirler</b>							
Feritik (G32510)	2.2 C, 1.2 Si, 0.04 Mn	Tavllanmış	Temper karbonu ve ferrit	224	345	10	İyi işlenebilirlik özelliğinden dolayı genel mühendislik hizmetleri
Perlitik (G45008)	2.4 C, 1.4 Si, 0.75 Mn	Tavllanmış	Temper karbonu ve perlit	310	440	8	Özel boyut toleranslarına sahip genel mühendislik elemanları
Martensitik (M7002)	2.4 C, 1.4 Si, 0.75 Mn	Su verilmiş ve temperlenmiş	Temperlenmiş martensit	438	621	2	Yüksek mukavemetli parçalar, bağlantı çubukları, universal bağlantılar
<b>Küresel Grafitli Dökme Demirler</b>							
Feritik (60-40-18)	3.5 C, 2.2 Si	Tavllanmış	Ferit	276	414	18	Vana ve pompa gövdeleri gibi basınç elemanları,
Perlitik	3.5 C, 2.2 Si	Döküm Hali	Feritik- Perlitik	379	552	6	Krank mili, dişli ve hadde merdaneleri
Martensitik (120-90-02)	3.5 C, 2.2 Si	Martensitik	Su verilmiş ve temperlenmiş	621	828	2	Dişliler, hadde merdaneleri ve kızaklar

# Isıl İşlemin Tanımı

Isıl işlem, malzemeyi belirli bir sıcaklığa ısıtıp, bu sıcaklıkta belirli bir süre tuttuktan sonra kontrollü olarak soğutma işlemidir. Malzemeyi oluşturan atomlar, yüksek sıcaklıkta hareketlilik kazanıp yeni konumlara yayındıklarından ısıtma işlemde amaç, atom hareketlerini kontrol altına alarak, malzemeye istenen özellikleri veren mikroyapı kazandırmaktır.

## Isıl İşlem Kademeleri

Malzemelerin özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan ısıtma işlemlerinin hemen hepsinde, ısıtma, tutma ve soğutma olmak üzere üç temel kademe mevcuttur.



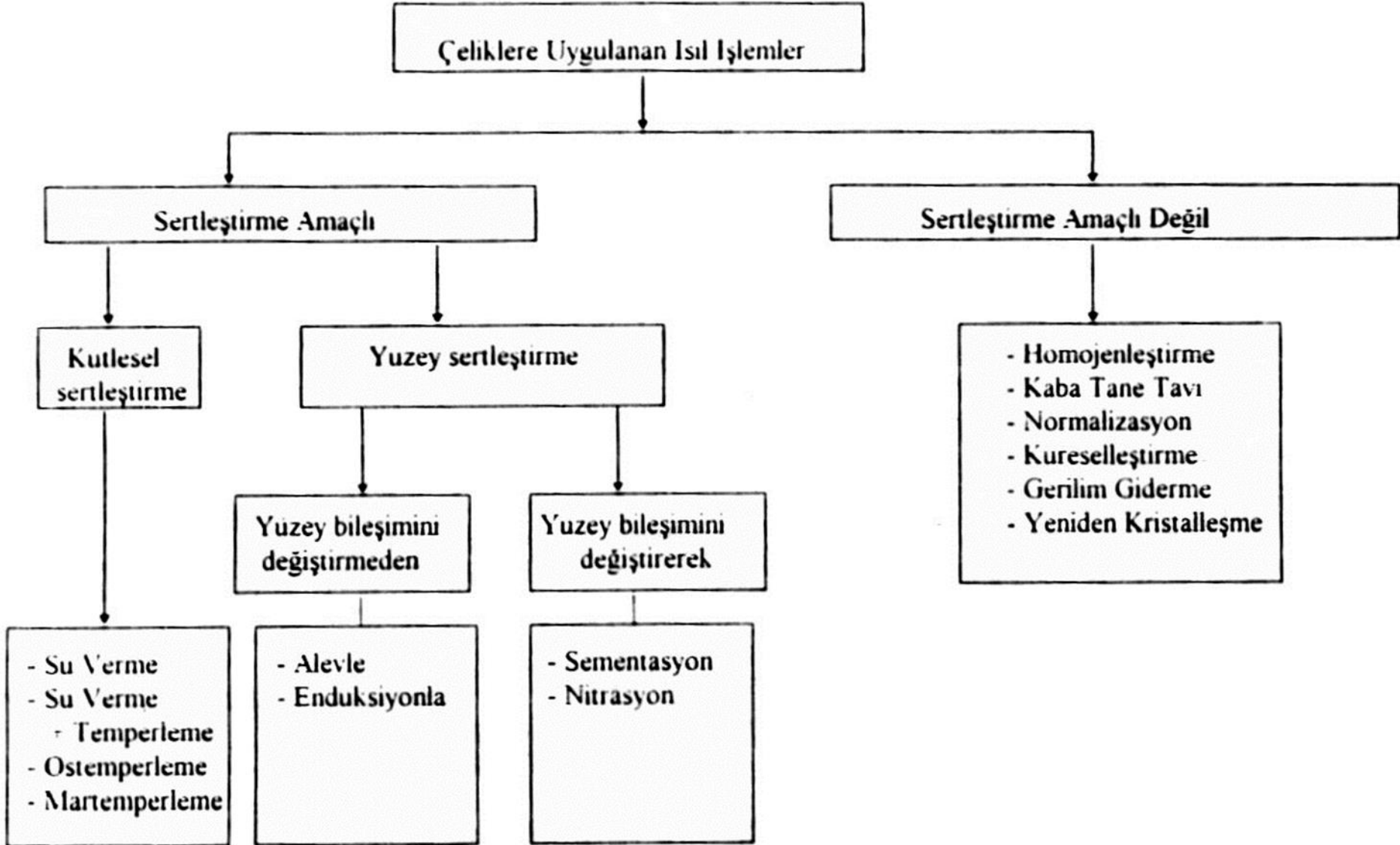


Isıl işlemin ilk kademesinde, malzeme tutma sıcaklığına kadar ısıtılır. Isıtma hızı, malzemenin bileşimi, ısı genleşme katsayısı, boyutu gibi özelliklerine bağlı olarak seçilir. Malzemelerin tutma sıcaklığındaki fırına konması halinde ısıtma hızı yüksek olur. Bu yöntem, düzgün şekilli küçük parçalar için uygun olmasına karşın, kalın ve karmaşık şekilli çatlamalara neden olabilir. Bu durumda, kalın ve karmaşık şekilli parçaların fırınla birlikte ve/veya kademeli ısıtılarak, ısıtma hızının düşürülmesi gereklidir.

Tutma kademesinde, önceden belirlenen sıcaklığa ısıtılan malzeme, bu sabit sıcaklıkta atom yayınına bağlı olarak bir takım mikroyapısal değişimler (faz dönüşümü, yeni tane oluşumu gibi) oluncaya dek bekletilir. Tutma süresi ve/veya sıcaklığının gerekenden daha düşük olması mikroyapısal dönüşümlerin tamamlanamamasına, gereğinden uzun olması ise, tane büyümesine neden olmaktadır. Uzun tutma süreleri, enerji ve zaman kaybının yanısıra, malzeme yüzeyinde oksitlenmeye ve/veya bileşim farklılaşmasına (örneğin çeliklerde dekarburizasyon) da sebebiyet verebilir. Bu nedenle tutma kademesinde, malzeme en uygun sıcaklıkta en uygun süre bekletilmelidir. Tutma süresi genellikle 25 mm kalınlığındaki bir parça için 1 saat olarak seçilir.

Isıl işlemin son kademesinde, tutma sıcaklığında bekletilen malzeme, istenen mikroyapıyı oluşturmak amacıyla uygun bir hızda soğutulur. Soğutma genellikle su, yağ ve hava ortamında yapılır. Tutma sıcaklığındaki parçanın suya daldırılması, yağda ve havada soğutmaya nazaran daha yüksek soğuma hızı sağlar. Özellikle farklı kalınlıktaki karmaşık şekilli parçalar, bileşimlerine de bağlı olarak, soğutma kademesinde çarpılma ve çatlama tehlikesi ile karşı karşıyadırlar. Soğutma hızını düşürerek bu tür problemlerin önüne geçmek mümkündür. Ancak soğutma hızının çok düşük olması halinde, soğutma kademesinde malzemeye istenen mikroyapı kazandırılmayabilir.

# ÇELİKLERİN ISIL İŞLEMİ

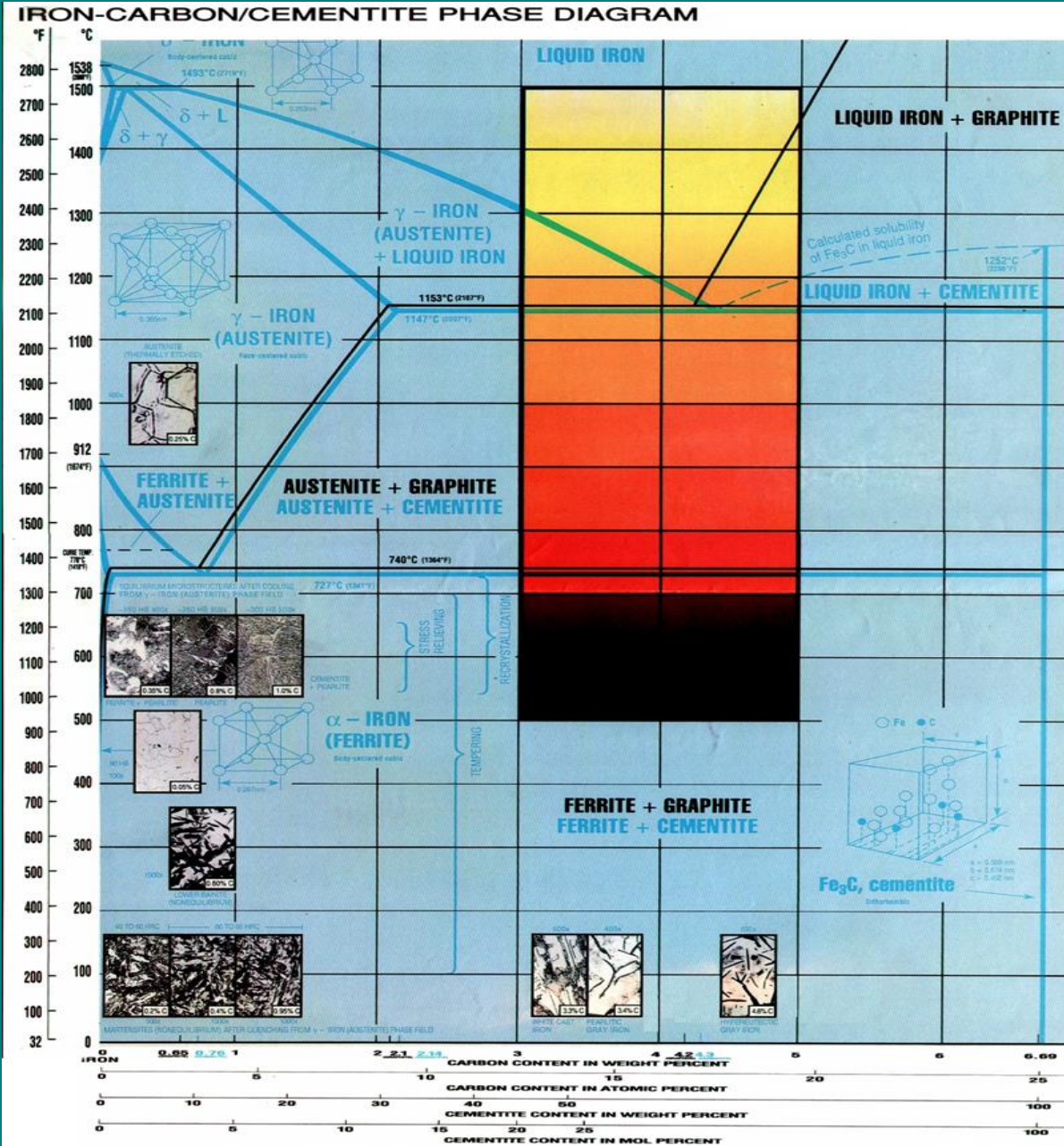




# ÇELİKLERİN ISIL İŞLEMİ

Isıl İşlem	Amaç	Yöntem
Homojenleştirme	Kimyasal homojenliği sağlamak (özellikle dokum parçalarda)	1100°C civarında bir süre tutup yavaş soğutmak
İnı Tane Tavlaması	Yumuşatmak talaş kaldırma kabiliyetini artırmak	A <sub>1</sub> sıcaklığının 150 - 200°C üzerinde tutup, yavaş soğutmak
Normalizasyon	Yumuşatmak, tane küçültmek, düzgün mikroyapı elde etmek	Otektoid altı çeliklerde A <sub>3</sub> , otektoid üstü çeliklerde A <sub>1</sub> sıcaklığının 30 - 50°C üzerinde tutup yavaş soğutmak
Su verme	Mikroyapıyı martensite donuşturarak sertleştirmek	Otektoid altı çeliklerde A <sub>3</sub> , otektoid üstü çeliklerde A <sub>1</sub> sıcaklığının 30 - 50°C üzerinde tutup hızlı soğutmak
Küreleştirme	Karburları küresel hale getirerek yumuşatmak, talaş kaldırma kabiliyetini artırmak	Otektoid sıcaklığının (723°C) hemen altında uzun süre tutmak
Gerilme Giderme	İç gerilmeleri gidererek parçanın çarpılma veya çatlamaını onlemek	550 - 650 °C sıcaklık aralığında 1-2 saat tutmak
Temperleme (Menevişleme)	Martensitik mikroyapıdaki çeliği yumuşatmak, tokluğunu artırmak (Bazı alaşımli çeliklerde temperleme ile karbur çokelmesine bağlı olarak sertlik artışı olmaktadır)	Martensitik çeliği (su verilmiş) 200 - 600 °C'de tutmak
Yemden Kristalleştirme	Soğuk işlem yapısını bozmak, yumuşatmak, sunekliği ve tokluğu artırmak	Soğuk işlem uygulanmış çeliği 500 - 700°C'de tutmak
Ostemperleme	Kırılgan martensit oluşturmada sertleştirmek	Ostenit sıcaklığındaki çeliği 250°C civarındaki bir banyoya daldırıp, beynit oluşuncaya dek beklemek
Martemperleme	Çatlama olmaksızın sertleştirme	Ostenit sıcaklığındaki çeliği 250-550°C sıcaklıklarındaki bir banyoya daldırıp, kısa bir süre beklemek ve tekrar soğutmak
Alevle Yüzey Sertleştirme	Parçanın gobeğini yumuşak bırakıp yüzeyini sertleştirmek	Yüzeyi alevle ısıtıp hızlı soğutmak
Endüksiyonla Yüzey Sertleştirme	Parçanın gobeğini yumuşak bırakıp yüzeyini sertleştirmek	Yüzeyi endüksiyon akımı ile ısıtıp hızlı soğutmak
Sementasyon	Yüzeydeki karbon miktarını artırarak yüzeyi sertleştirmek	Çeliği karbon içeriği yüksek olan bir ortamda uzun süre tutmak (tutma sıcaklığı 850 - 950°C)
Nitrasyon	Yüzeyi, azot emdirerek sertleştirmek	Çeliği azot içeriği yüksek olan bir ortamda uzun süre tutmak (tutma sıcaklığı 450 - 550°C)

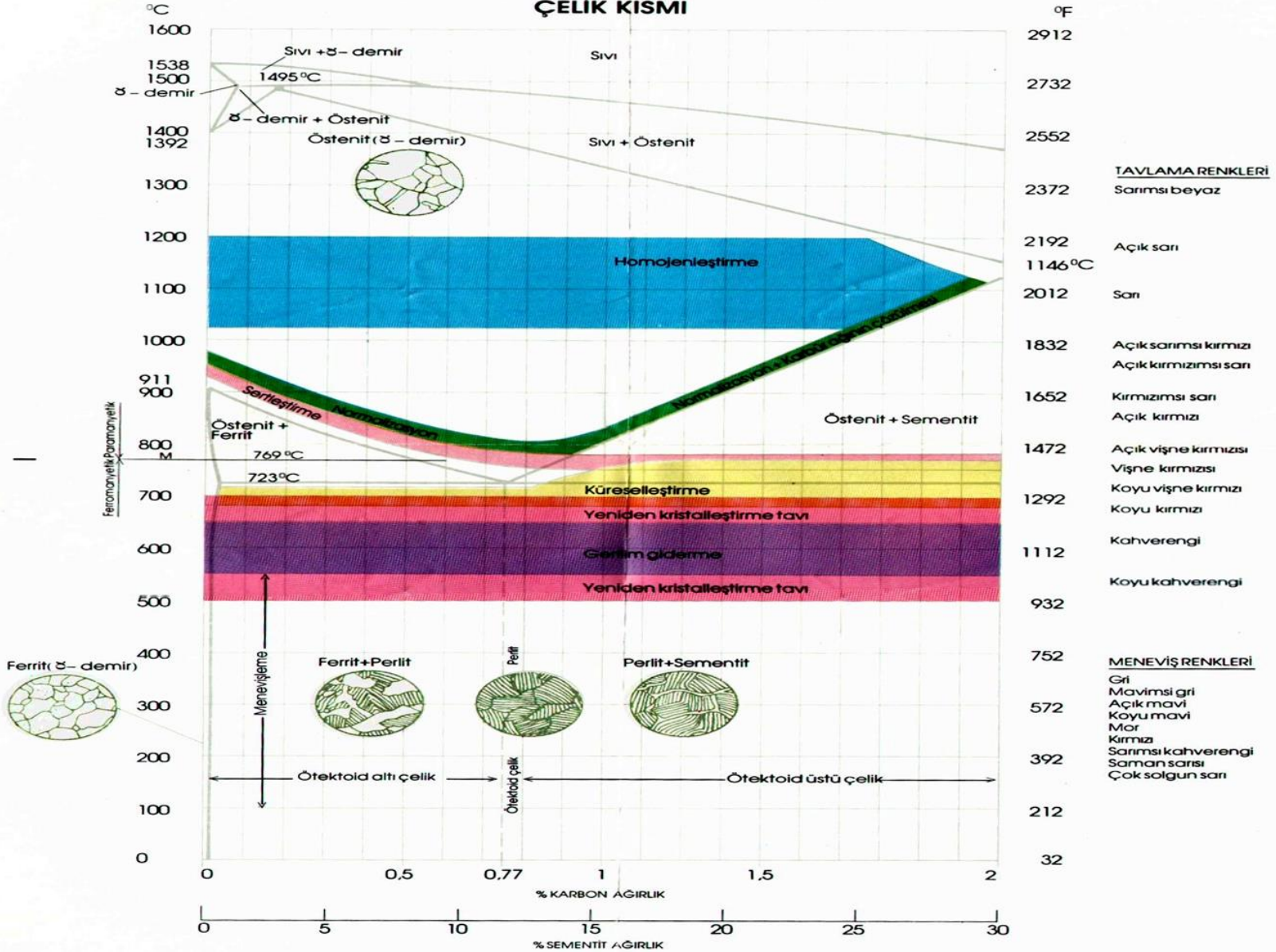
# Fe-C Faz Diyagramı





# Fe-C Faz Diyagramında Isıl İşlem Bölgeleri

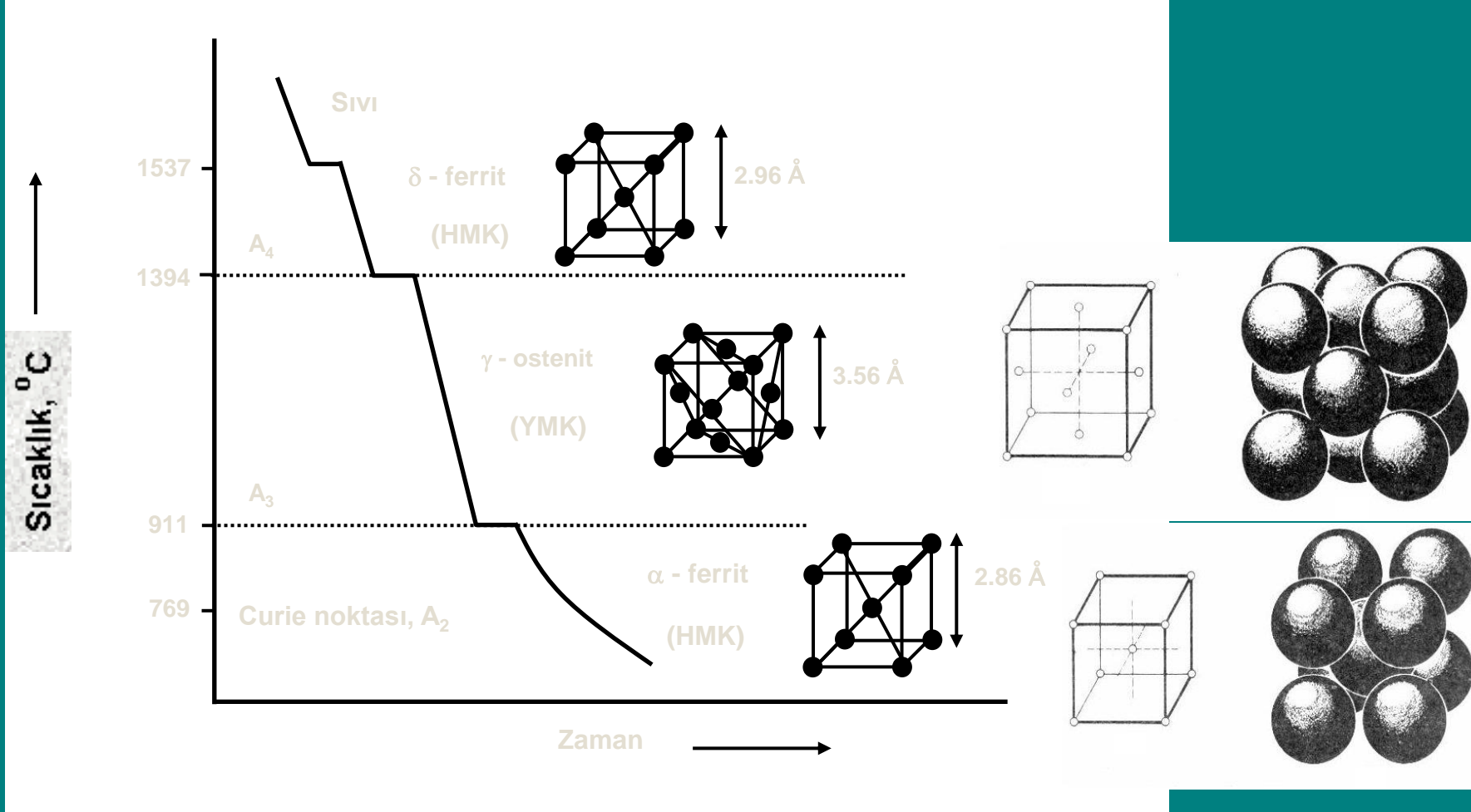
DEMİR - SEMENTİT DENGİ DİAGRAMI  
ÇELİK KISMI



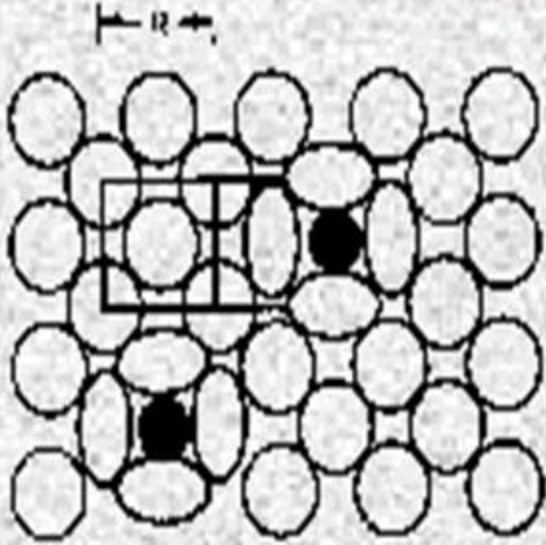
# DEMİR – KARBON ALAŞIMLARI





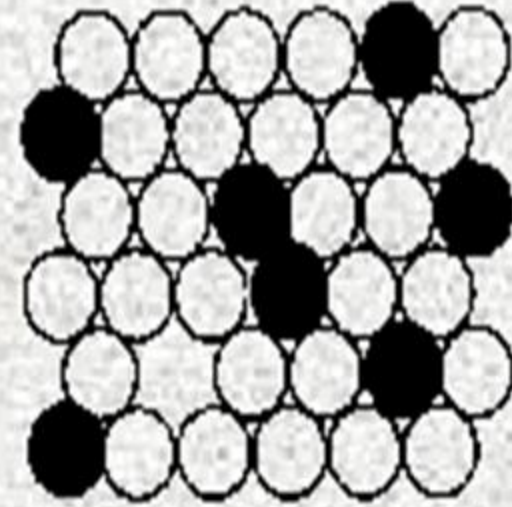
**Allotropik (polimorf) Dönüşüm :** Bir malzemenin farklı sıcaklıklarda farklı kristal yapıya dönüşmesine denir.





# Fe'de Katı Eriyik Oluşumu

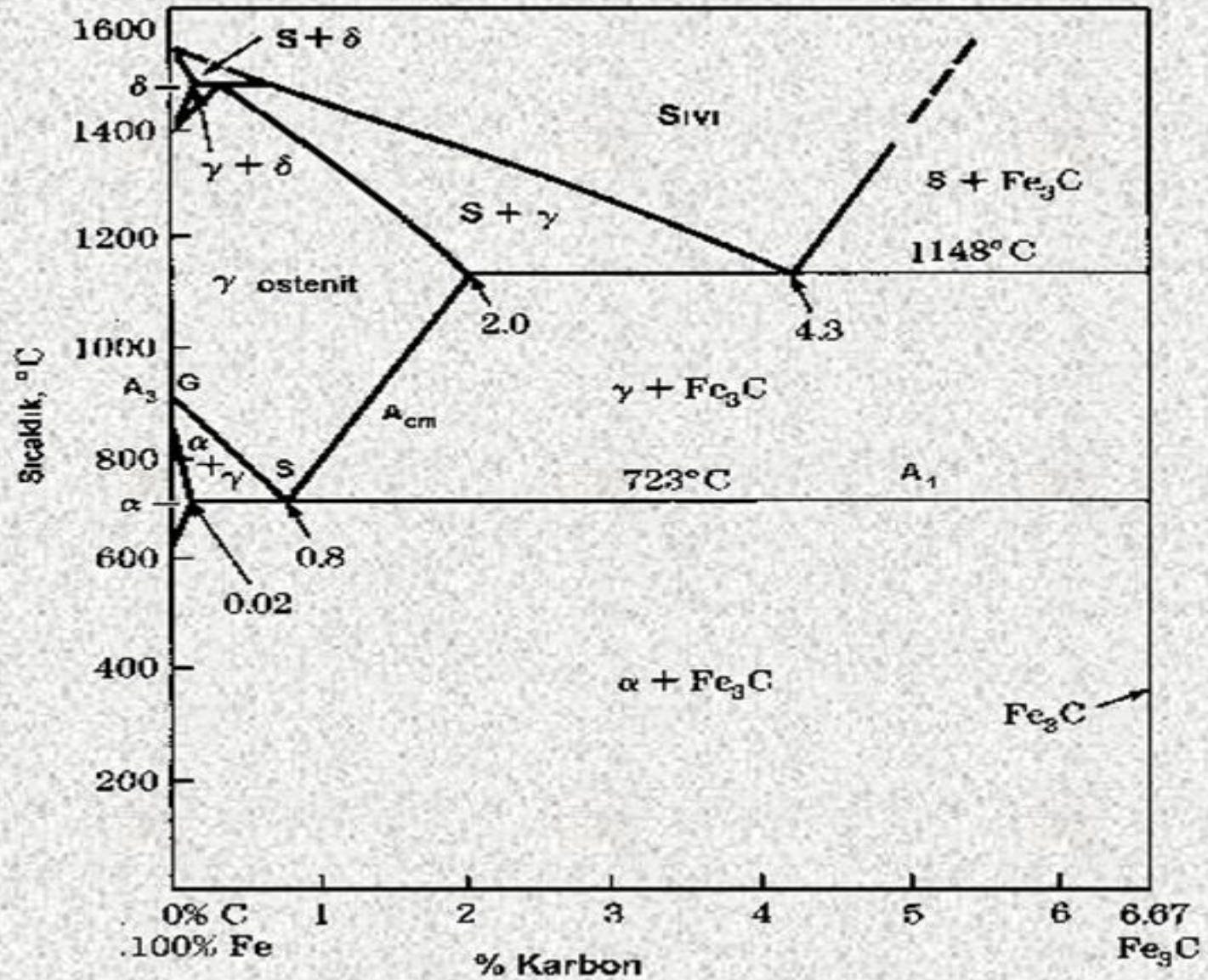


-  Karbon  
 $r = 0.77 \text{ \AA}$
-  Demir  
 $r = 1.24 \text{ \AA}$



-  Yeralan element atomu
-  Demir atomu

# Fe – C Denge Diyagramı

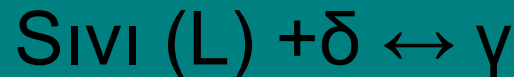


Fe-C denge diyagramında izotermal reaksiyonları gösteren üç yatay çizgi vardır:

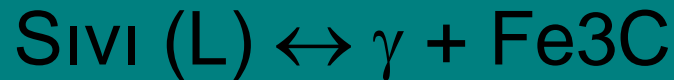
- Peritektik reaksiyon
- Ötektik reaksiyon
- Ötektoid reaksiyon

1493 °C sıcaklıkta bulunan yatay çizgi peritektik reaksiyonu göstermektedir.

Peritektik reaksiyon şöyle yazılabilir:



İkinci yatay çizgi, 1147 ° C sıcaklıkta bulunan çizgidir. Bu çizgi, aşağıdaki verilen reaksiyonun meydana geldiği ötektik sıcaklığı çizgisidir.

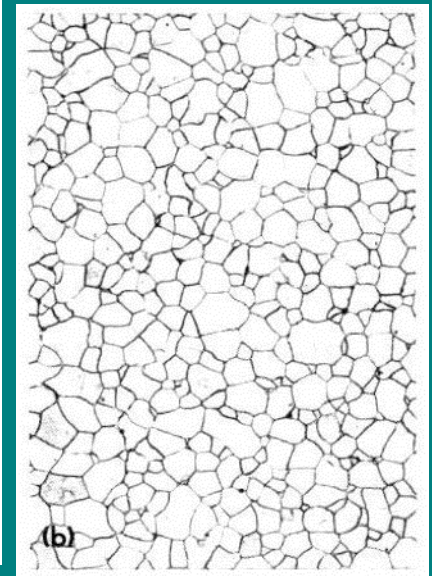
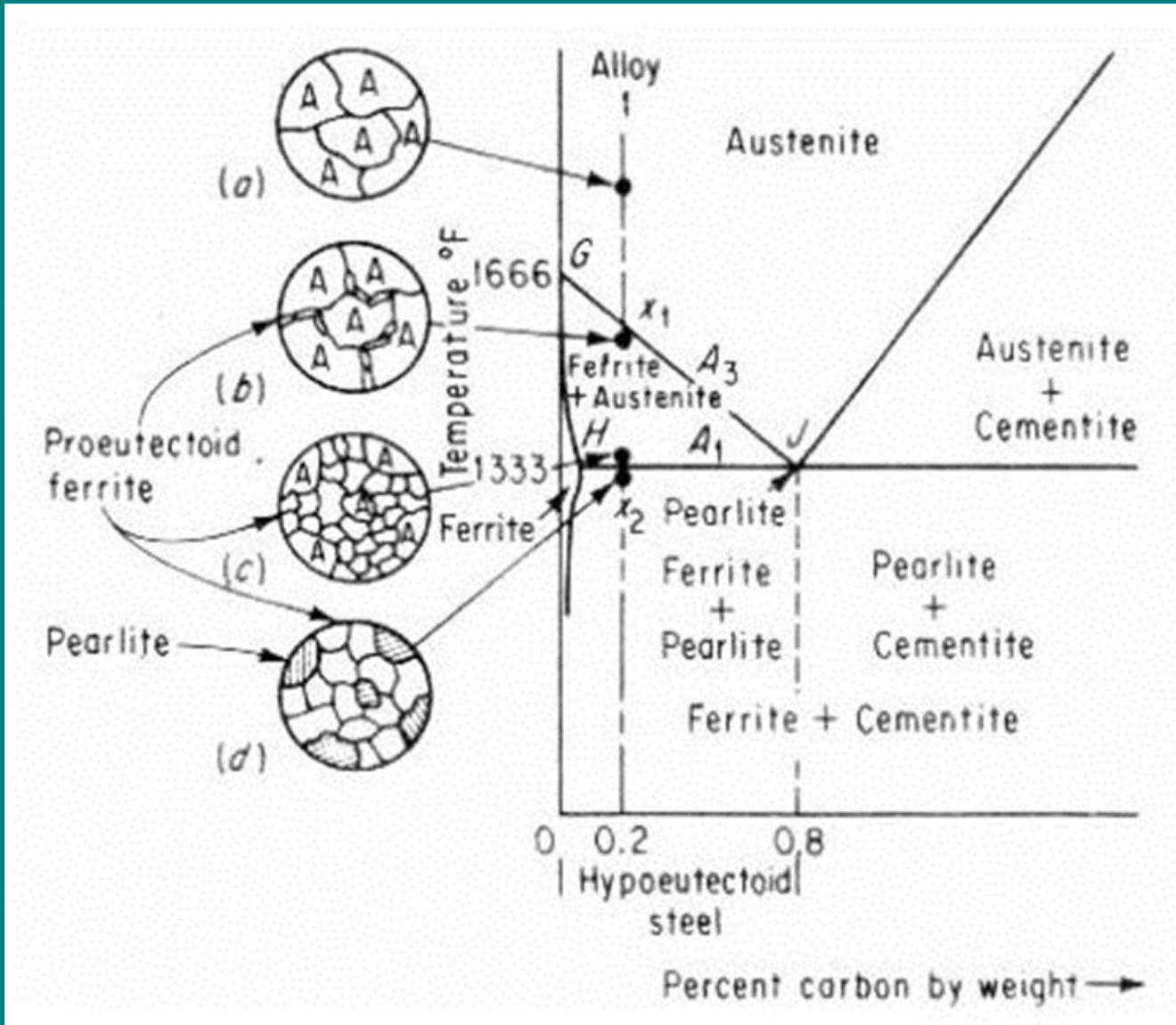


En son yatay çizgi 723 °C sıcaklıkta oluşur. Bu çizgiye ötektoid sıcaklığı çizgisi denir. Ötektoid reaksiyon şöyle yazılabilir.



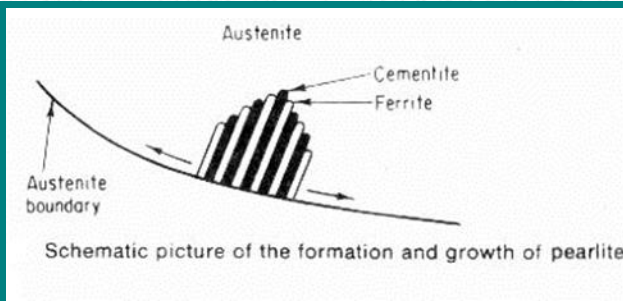
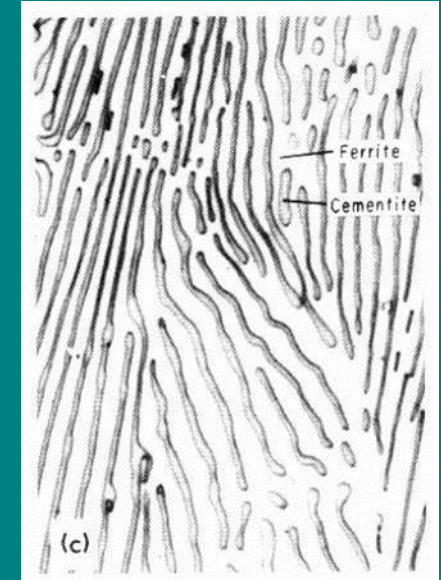
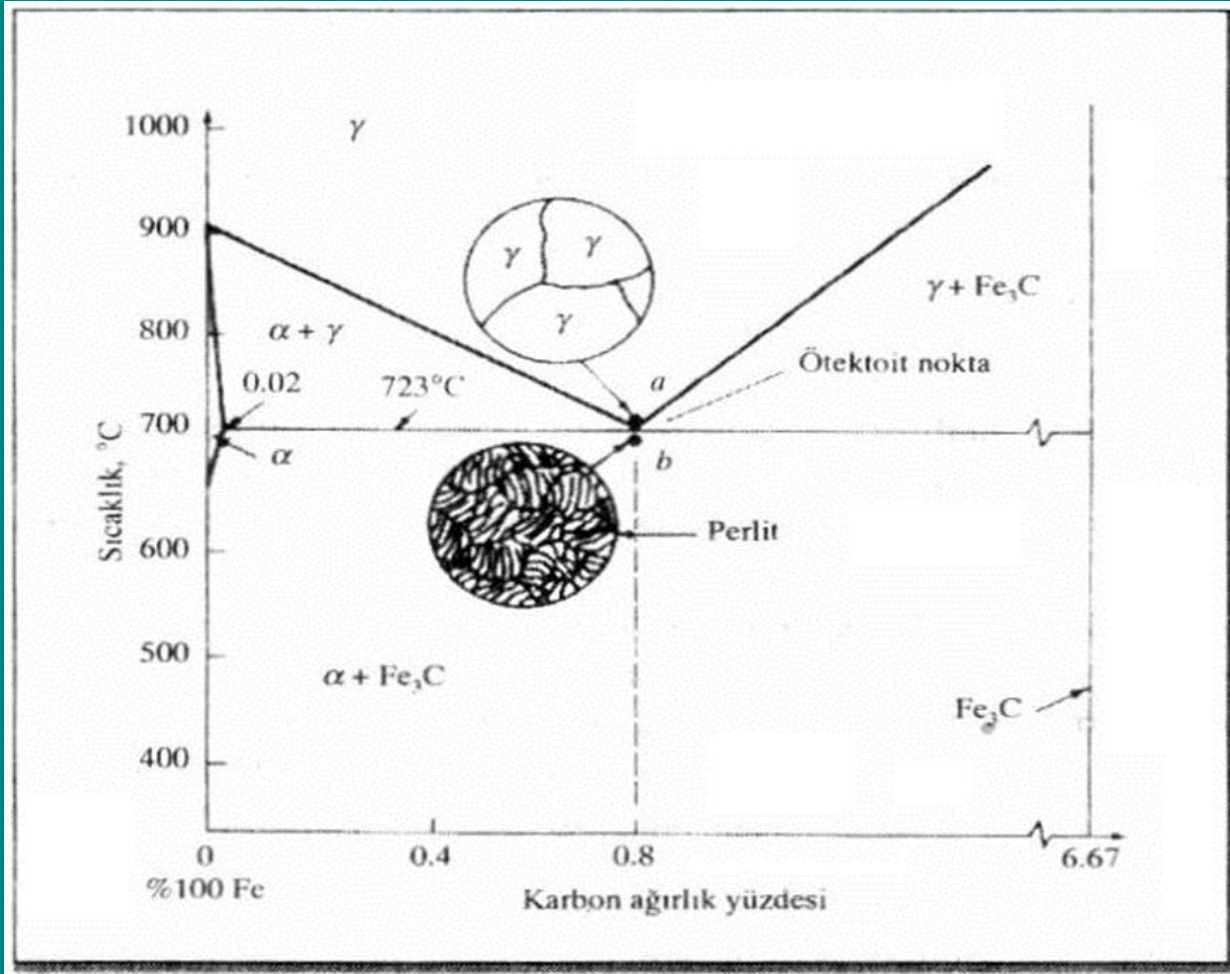


# Ötektoid altı bileşimli çeliklerin soğuması ve mikroyapı değişimleri

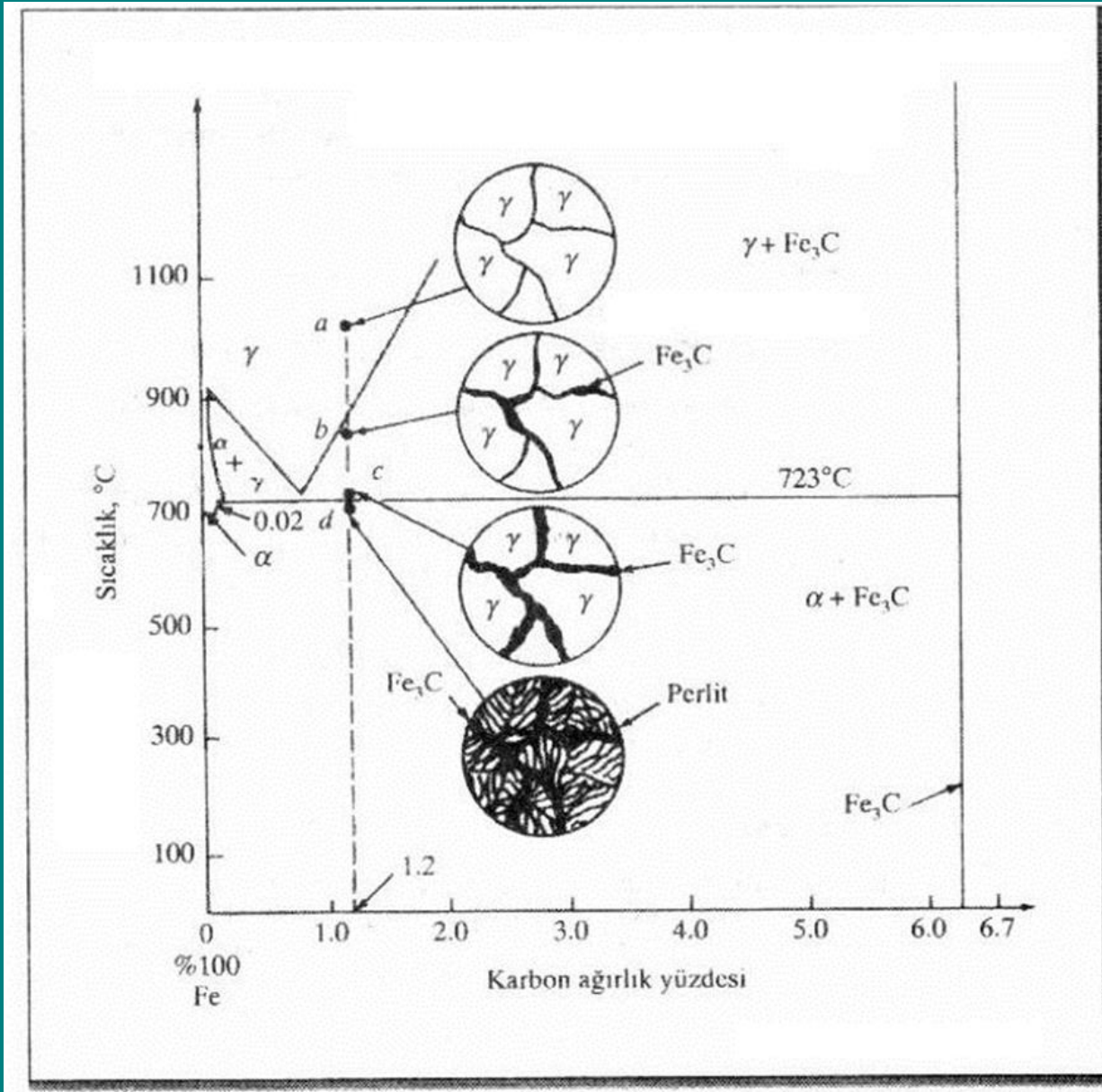




# Ötektoid bileşimli çeliklerin soğuması ve mikroyapı değişimleri



# Ötektoid üstü bileşimli çeliklerin soğuması ve mikroyapı değişimleri





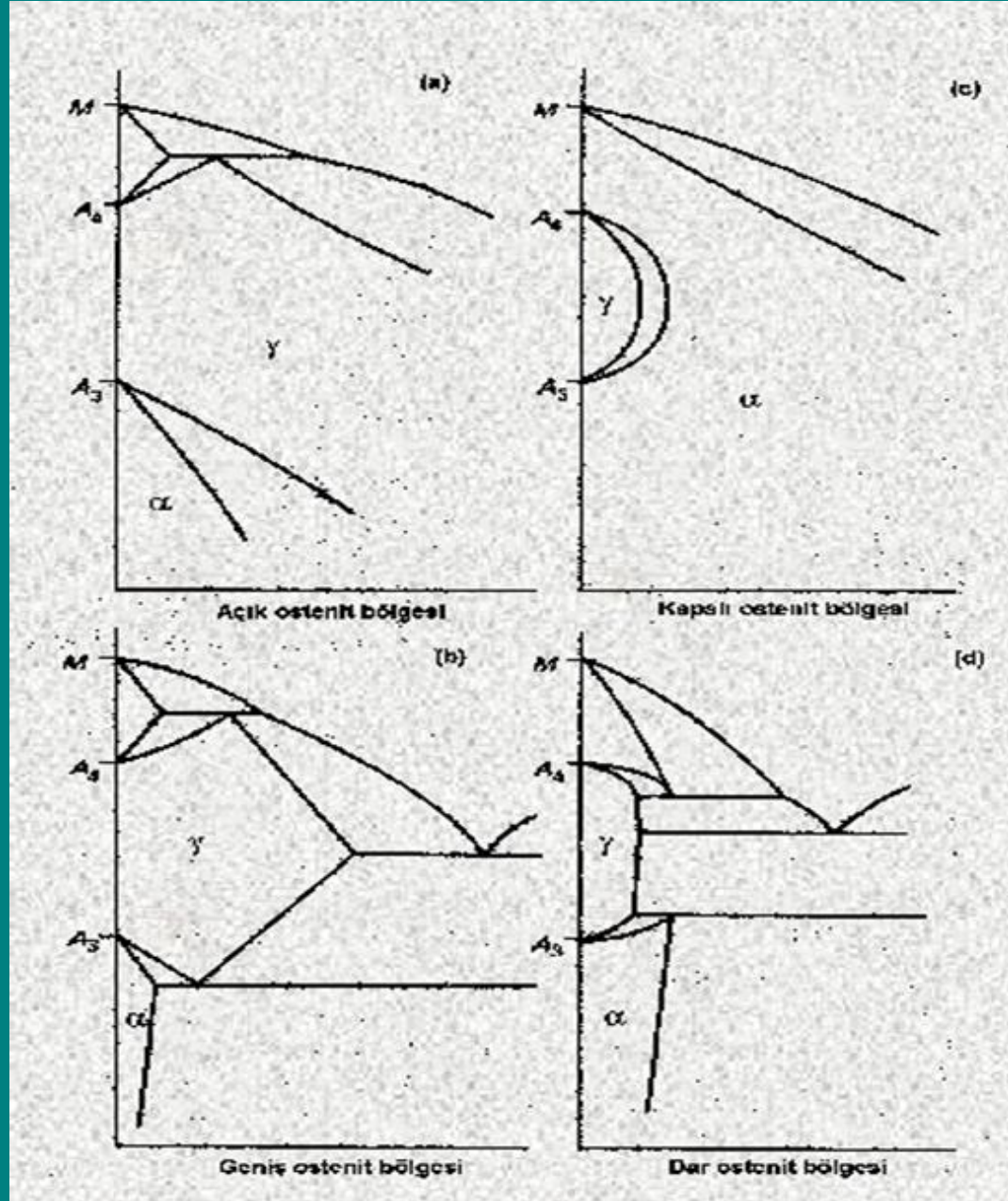
# Fe – C Alaşımlarında Mikroyapı Bileşenleri

Tanım	Özellikler
<b>Ferrit</b>	$\alpha$ ile gösterilir. HMK kristal yapıdadır. Karbon çözünlüğü maks. % 0.025'tir. Oda sıcaklığında % 0.008 karbon çözündürür. Yumuşak ve sünektir. Sertliği 0 HRC'den veya 90 HRB'den düşüktür.
Ostenit	$\gamma$ ile gösterilir. YMK kristal yapıdadır. Maks. % 2.11 karbon çözünlüğüne sahiptir. Çoğu çelikte oda sıcaklığında kararlı değildir. Yüksek tokluğa ve yaklaşık 40 HRC sertliğine sahiptir.
Perlit	Demir ve sementit fazlarının bir araya gelerek oluşturduğu lameler morfolojiye sahip iki fazlı bir yapıdır. Ötektoid reaksiyon sonucu ostenitten oluşur. % 0.8 karbon içeren çeliğin oda sıcaklığındaki mikroyapısında % 100 oranında bulunur. 20 HRC, 95-100 HRB veya 250-300 HB düzeyinde sertliğe sahiptir.
Ledeburit	Ostenit ve sementit karışımı ötektik yapıdır. % 4.3 karbon oranında ve 1148. °C'de oluşur.
Sementit	$Fe_3C$ olarak gösterilir. Demir ve karbonun oluşturduğu ortorombik kristal yapıya sahip demir karbürdür. Sert ve kırılımandır. Kararsız bir faz olup, uygun koşullarda demir ve grafitte dönüşme eğilimindedir. Ancak bu dönüşüm nisbeten uzun bir zaman aldığı için çoğu çelikte bulunan yaygın bir fazdır.
Beynit	Demir ve sementit fazlarının oluşturduğu bir diğer iki fazlı yapıdır. Üst ve alt beynit olmak üzere iki farklı morfolojidedir. Üst beynitte, iğnesel ferrit ve sementit plakaları yan yana dizilmiştir, alt beynitte ise partikül halindeki sementit, iğnesel ferrit fazı içinde bulunmaktadır. Morfolojisi ısıl işlem koşullarına bağlıdır. İzotermal bir ısıl işlemle ostenitin dönüşümü sonucu oluşur.
Martensit	Isıl işlem sırasında ostenit bölgesinden yapılan çok hızlı soğutmayla oluşur. Kristal yapısı hacim merkezli tetragonaldır (HMT) ve karbonca aşırı doymuştur. Morfolojisi, düşük karbon oranına sahip çeliklerde iğnesel, yüksek karbon içeren çeliklerde ise levhasaldır. Orta karbon oranına sahip çeliklerde her iki morfoloji bir arada bulunabilir. Çok serttir.
Temperlenmiş martensit	Martensitin temperlenmesi sonucu ferrit ve karbür fazlarının oluşturduğu iki fazlı bir karışımdır. Ferrit taneleri içerisinde küçük ve yuvarlak karbür partiküllerinin bulunduğu bir morfolojidedir.
Grafit	Fe-C alaşımlarının denge fazı olup, çok yavaş soğuma hızlarında oluşur. Dökme demirlerin mikroyapısında bulunur.

# Alaşım Elementlerinin Fe – C Denge Diyagramına Etkisi

Ni  
Mn  
Co  
Pt

C  
N  
Cu  
Zn  
Au

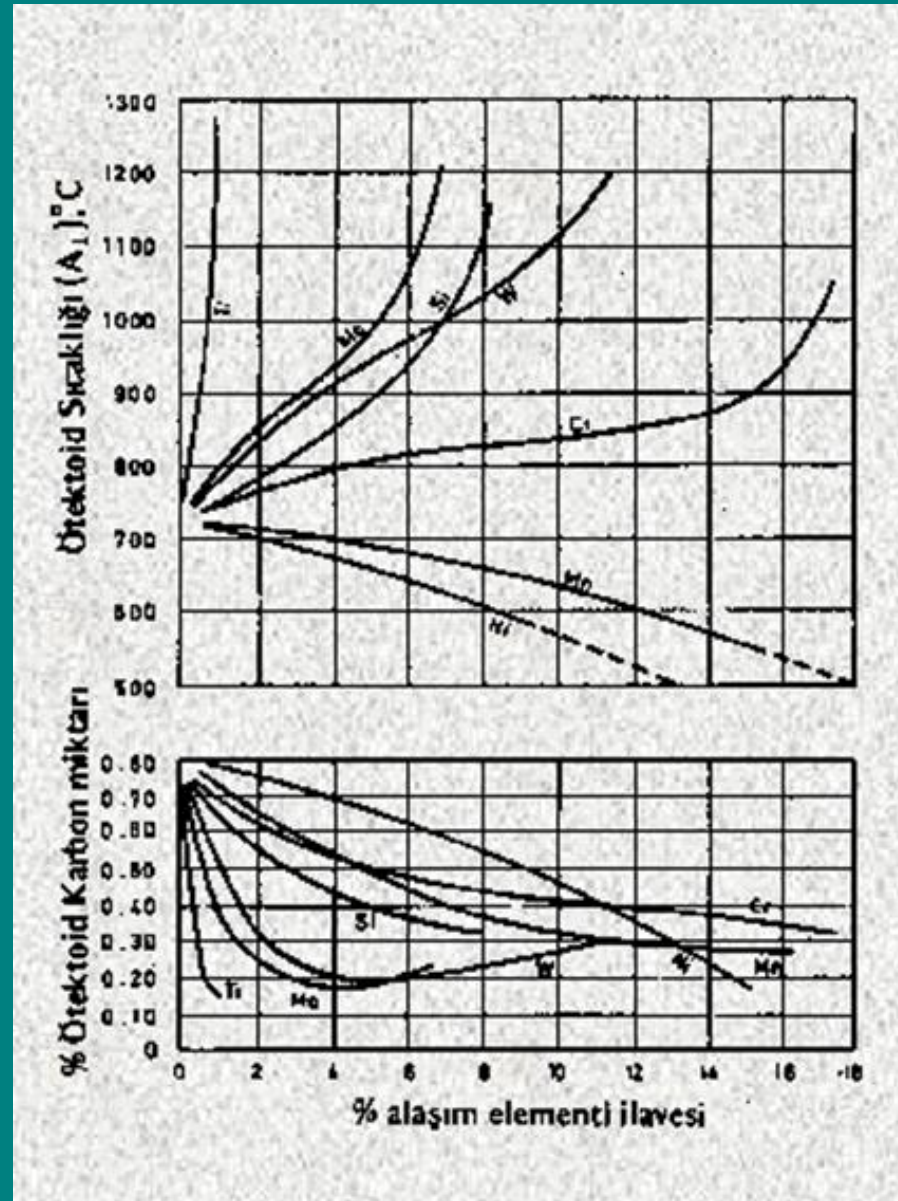


Si  
Al  
Be  
P  
Ti  
V  
Mo  
Cr

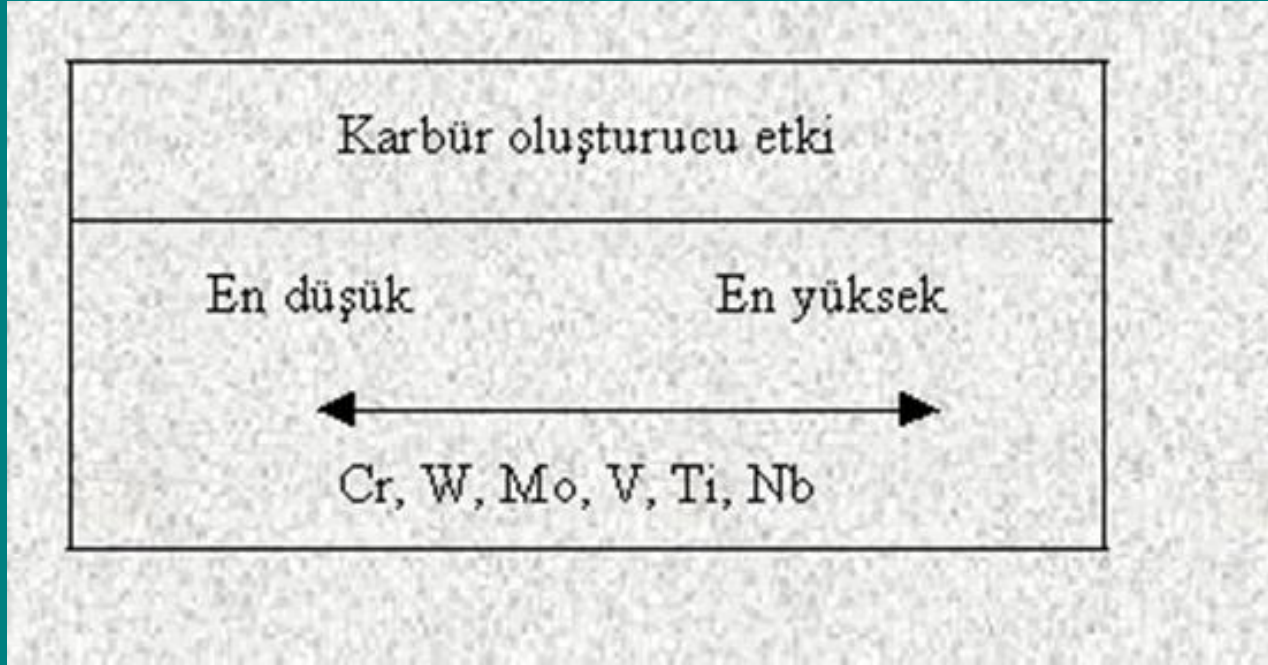
B  
Nb



# Alaşım Elementlerinin Ötektoid Noktaya Etkisi



# Alaşım Elementlerinin Karbür Oluşturma Eğilimleri

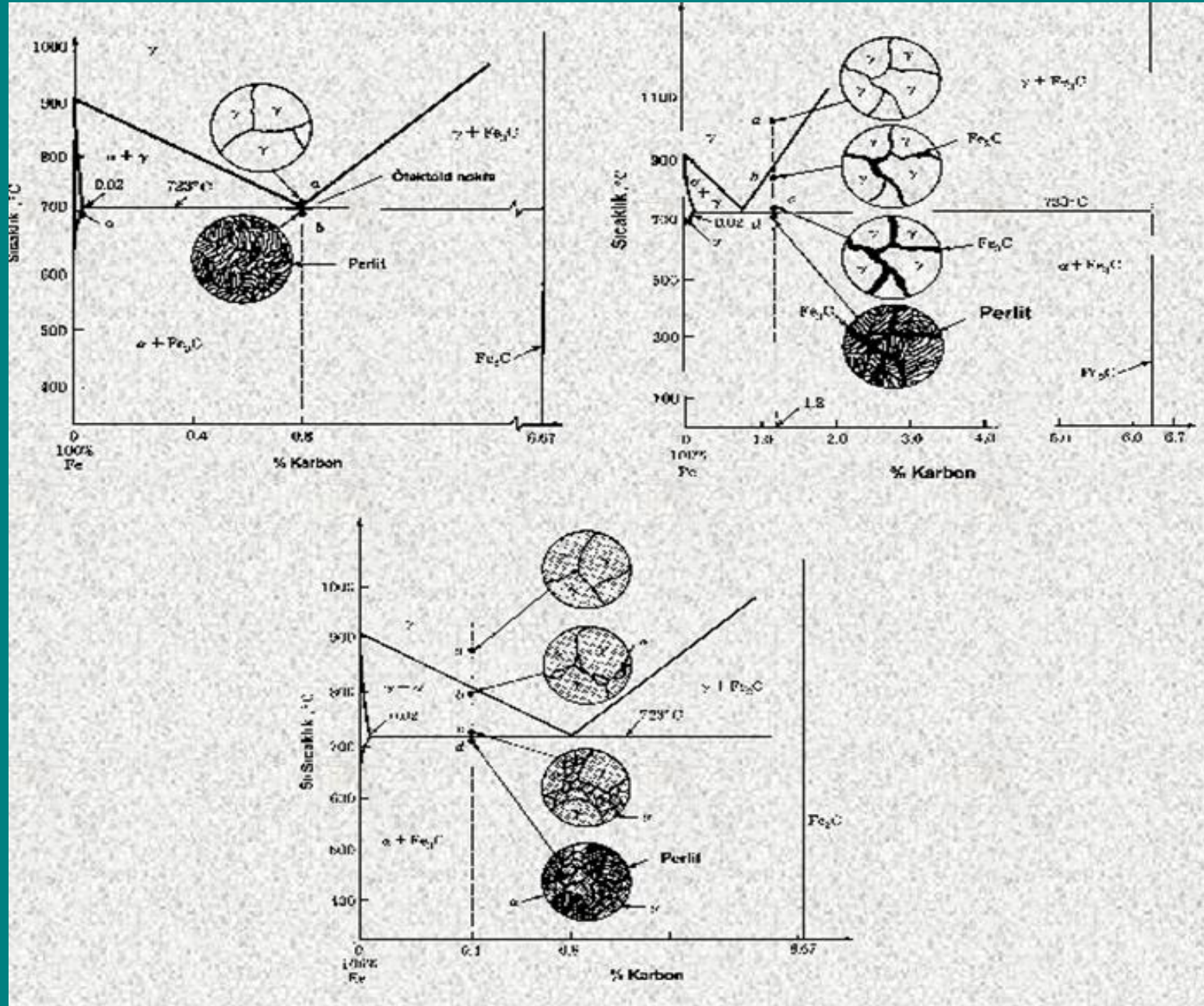




# Karbür Türleri

Karbür Tipi	Kafes Tipi	Açıklama	Örnekler
$M_3C$	Ortorombik	Sementit, $Fe_3C$ tipi bir karbürdür	$Fe_3C$ , $(Fe,Mn)_3C$
$M_7C_3$	Hekzagonal	Genellikle kromlu çeliklerde bulunur. Yüksek sıcaklıklarda çözünmeye karşı dirençlidir	$(Fe,Cr,Mo,W,V)_7C_3$
$M_{23}C_6$	YMK	Yüksek kromlu çeliklerde ve tüm yüksek hız takım çeliklerinde bulunur	$(Fe,Cr,Mo,W,V)_{23}C_6$
$M_6C$	YMK	Tungsten veya molibdence zengin karbürlerdir. Aşınma dirençleri fazladır.	$(Cr,Mo,V,W,Co)_6C$
$M_2C$	Hekzagonal	Tungsten veya molibdence zengin karbürlerdir. Temperleme sonrası oluşur.	$W_2C$ , $Mo_2C$
MC	YMK	Vanadyumca zengin karbürlerdir. Çözünmeye karşı dirençlidirler.	VC, NbC, ZrC, TiC

# Çeliklerde Dengeli Soğuma



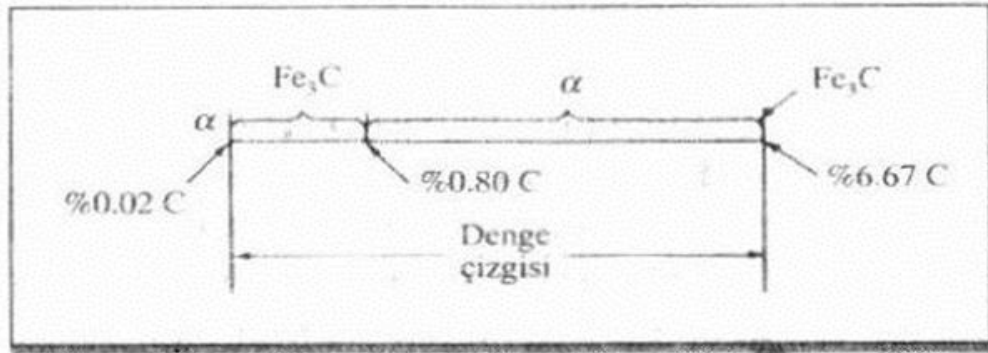


## Soru

%0.80 C içeren bir ötektoid karbon çeliği 750 °C'tan 723 °C'ın biraz altına yavaşça soğutulmaktadır. Östenitin tümüyle  $\alpha$  ferrite ve sementite dönüştüğünü varsayarak,

- Oluşan ötektoid ferritin ağırlık yüzdesini hesaplayın.
- Oluşan ötektoid sementitin ağırlık yüzdesini hesaplayın.

## Çözüm:



- Ferritin ağırlık oranı, denge çizgisinin %0.80 noktasının sağında kalan kısmının denge çizgisinin bütün uzunluğuna oranından hesaplanacaktır. Yüzde yüzle çarpmak ferritin ağırlık yüzdesini verecektir:

$$\text{Ağ. \% ferrit} = \frac{6.67 - 0.80}{6.67 - 0.02} \times \%100 = \frac{5.87}{6.65} \times \%100 = \%88.3 \blacktriangleleft$$

- Sementitin ağırlık yüzdesi de aynı şekilde hesaplanır. %0.80 C'un sol tarafındaki çizgi uzunluğunun bütün denge çizgisi uzunluğuna oranı yüzde yüzle çarpılarak

$$\text{Ağ. \% sementit} = \frac{0.80 - 0.02}{6.67 - 0.02} \times \%100 = \frac{0.78}{6.65} \times \%100 = \%11.7 \blacktriangleleft$$

bulunur.

## Soru

- (a) %0.40 karbonu olan ötektoid altı bir karbon çeliği 940 °C'tan 723 °C'ın biraz üzerine yavaşça soğutulmaktadır.
- Çelikteki östenitin ağırlık yüzdesini hesaplayın.
  - Çelikteki ötektoid öncesi ferritin ağırlık yüzdesini hesaplayın.
- (b) %0.40 karbonu olan ötektoid altı bir karbon çeliği 940 °C'tan 723 °C'ın biraz altına yavaşça soğutulmaktadır.
- Çelikteki ötektoid öncesi ferritin ağırlık yüzdesini hesaplayın.
  - Çelikteki ötektoid ferritin ve ötektoid sementitin ağırlık yüzdesini hesaplayın.

## Çözüm:

(a) (i) Ağ. % östenit =  $\frac{0.40 - 0.02}{0.80 - 0.02} \times \%100 = \%50 \blacktriangleleft$

(ii) Ağ. % ötektoid öncesi ferrit =  $\frac{0.80 - 0.40}{0.80 - 0.02} \times \%100 = \%50 \blacktriangleleft$

- (b) (i) Çelikte 723 °C'ın hemen altındaki ötektoid öncesi ferrit, hemen üstündeki aynı olacaktır ve %50'dir.

- (ii) 723 °C'ın hemen altında ferrit ve sementitin toplam ağırlık yüzdesi:

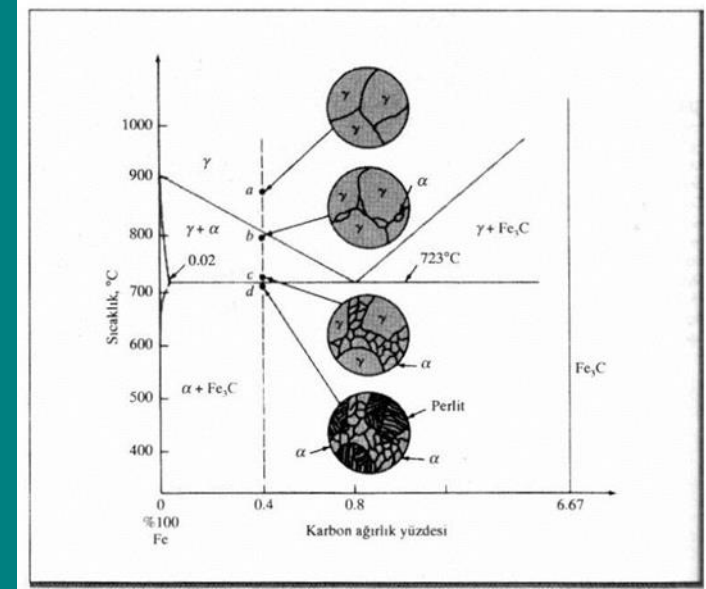
$$\text{Ağ. \% toplam ferrit} = \frac{6.67 - 0.40}{6.67 - 0.02} \times \%100 = \%94.3$$

$$\text{Ağ. \% toplam sementit} = \frac{0.40 - 0.02}{6.67 - 0.02} \times \%100 = \%5.7$$

$$\begin{aligned} \text{Ağ. \% ötektoid ferrit} &= \text{toplam ferrit} - \text{ötektoid öncesi ferrit} \\ &= 94.3 - 50 = \%44.3 \blacktriangleleft \end{aligned}$$

$$\text{Ağ. \% ötektoid sementit} = \text{ağ. \% toplam sementit} = \%5.7 \blacktriangleleft$$

(Soğuma sırasında ötektoid öncesi sementit oluşmamıştır.)



## Soru

Östenitli bölgeden oda sıcaklığına yavaşça soğutulan bir ötektoid altı karbon çeliği ağı. %9.1 ötektoid ferrit içermektedir. Ötektoid sıcaklığın hemen altından oda sıcaklığına soğurken yapıda bir değişiklik olmadığını varsayarsak çeliğin karbon miktarı nedir?

## Çözüm:

$x$  = ötektoid altı çeliğin karbon ağırlık yüzdesi olsun. Ötektoid ferritin toplam ferrit ve ötektoid öncesi ferritle ilişkisinden yararlanarak

$$\text{Ötektoid ferrit} = \text{toplam ferrit} - \text{ötektoid öncesi ferrit}$$

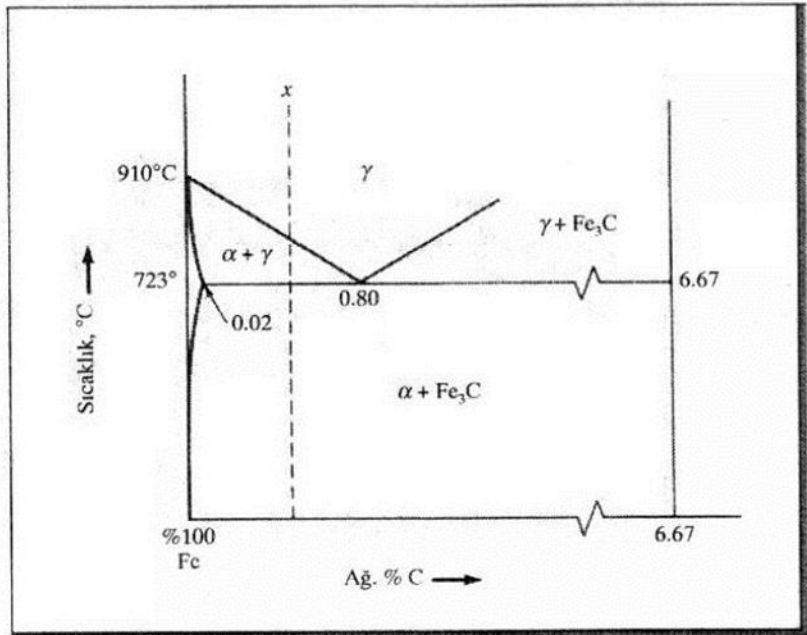
kaldıraç kuralını kullanarak yukarıdaki eşitliği şöyle yazabiliriz:

$$0.091 = \frac{6.67 - x}{6.67 - 0.02} - \frac{0.80 - x}{0.80 - 0.02} = \frac{6.67}{6.65} - \frac{x}{6.65} - \frac{0.80}{0.78} + \frac{x}{0.78}$$

Ötektoid ferrit      Toplam ferrit      Ötektoid öncesi ferrit

veya  $1.28x - 0.15x = 0.091 - 1.003 + 1.026 = 0.114$

$$x = \frac{0.114}{1.13} = \%0.101 \text{ C} \blacktriangleleft$$

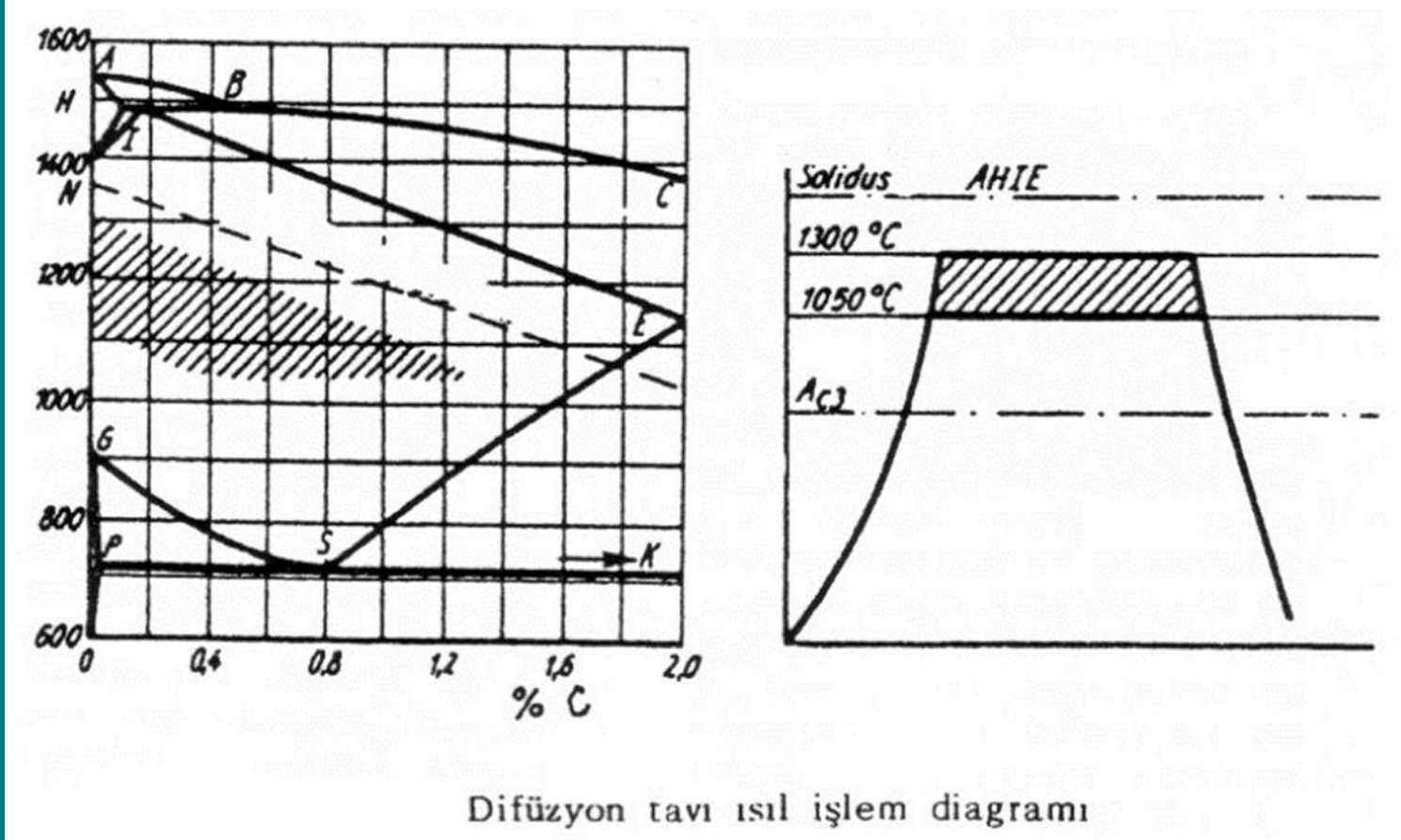


# ISIL İŞLEM TÜRLERİ



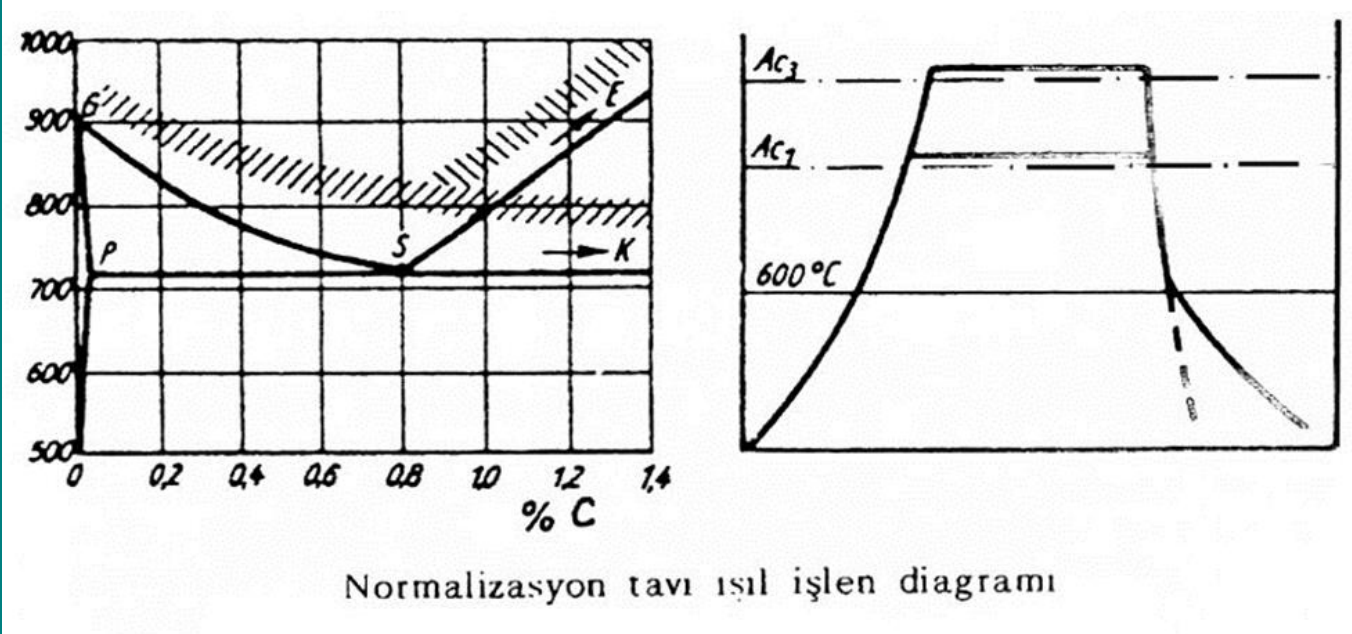
# Difüzyon ve Homojenleştirme Tavlaması

- Bu tavlamanın amacı, parçayı mümkün olan en yüksek sıcaklığa ısıtıp, belli bir süre tutarak malzeme içinde katılaşma sırasında ortaya çıkan segregasyonları (bölgesel bileşim farklılıkları) yayınma yoluyla gidermektir.



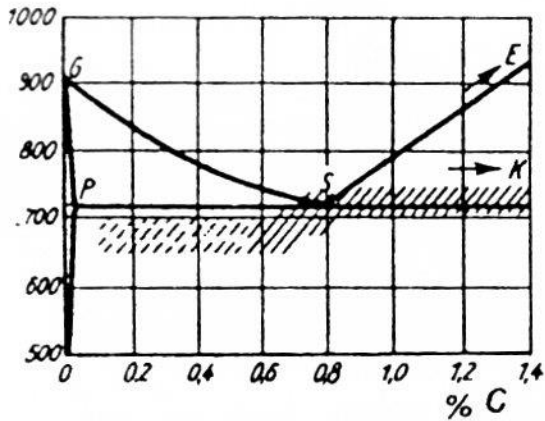
# Normalizasyon Tavlaması

- Bu tavlamanın amacı küçük ve düzgün dağılmış taneli ferrit ve perlit içeren bir mikroyapı elde etmektir.
- Haddelene, dövme gibi plastik şekillendirme yöntemleri ile oluşturulan homojen olmayan tane boyutuna ve döküm sonrası oluşan iri tanelere sahip malzemelere uygulanır.

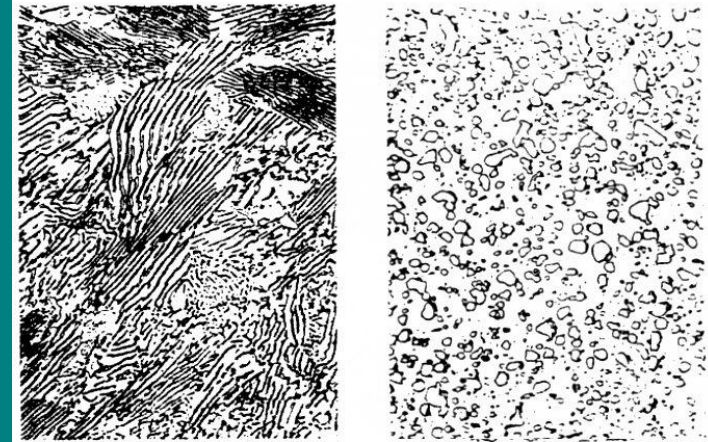
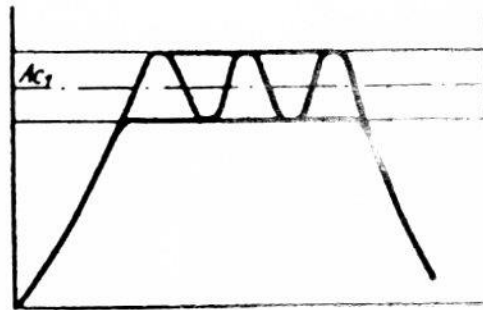


# Yumuşatma ve Küreleştirme Tavlaması

- Bu tavlamanın amacı, %0,5'ten çok C içeren çeliklere talaşlı imalat, haddeleme, bükme, çekme gibi şekillendirme işlemleri öncesinde en yumuşak ve sünek hali kazandırmaktır.
- Böyle bir yapı, C'un yayılımı ile ferritik matris içinde küresel sementit tanecikleri oluşturarak sağlanır.
- C'un ferrit içindeki yayılım hızı, ostenit içindekinden hızlı olduğu için uygulamada kullanılan sıcaklık  $A_1$  sıcaklığı ( $723^{\circ}\text{C}$ ) civarındadır.



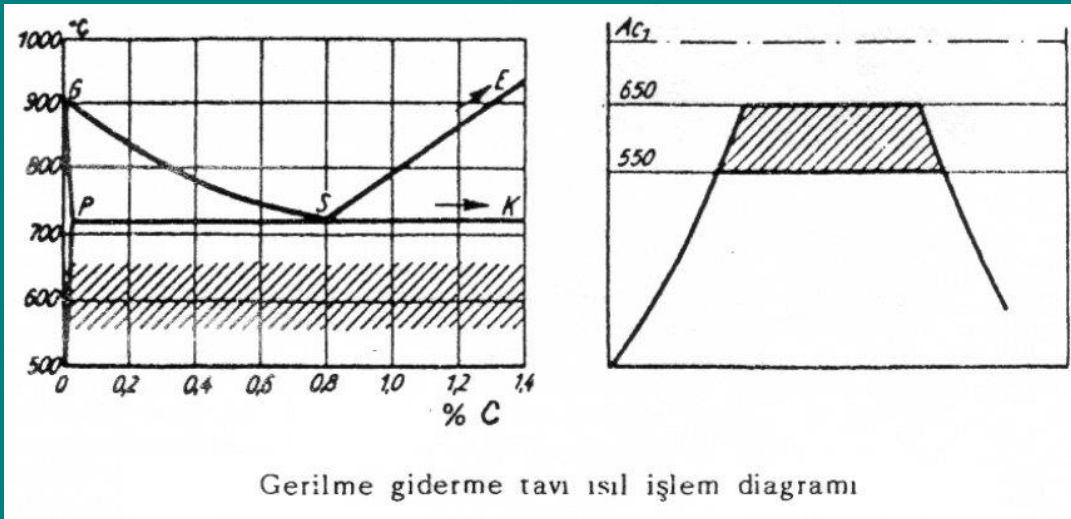
Küreleştirme tavlama ısıl işlem diagramı



Ötektoid bileşimdeki çeliğin türlü içyapıları  
Normal perlitik içyapı (sol taraf)  
Küreleştirme tavlama sonrası içyapı (sağ taraf)

# Gerilme Giderme Tavlaması

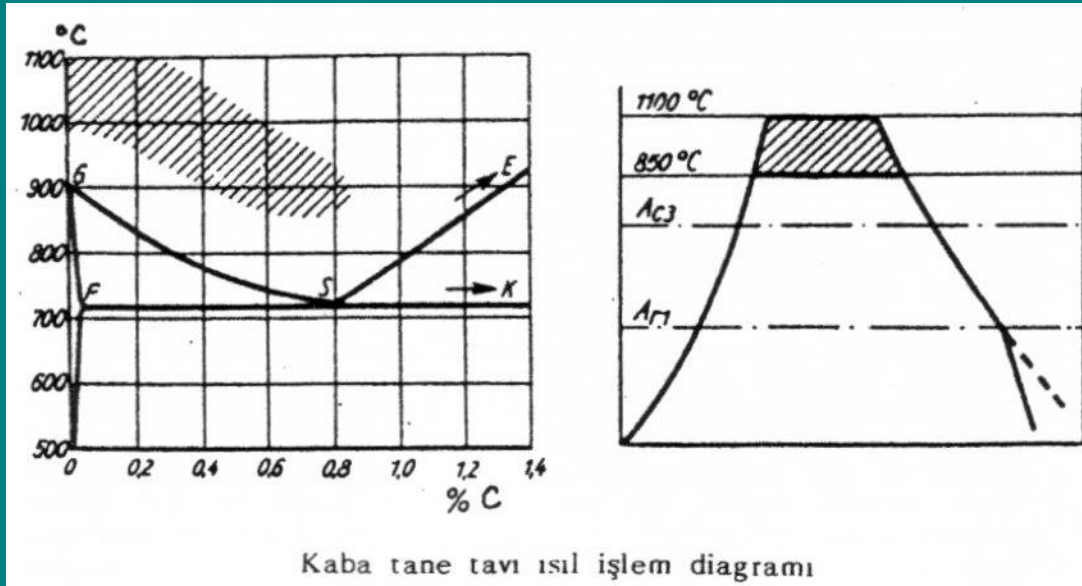
- Bu tavlamanın amacı kaynak, döküm, plastik şekil verme ve ısıl işlemler sonucunda malzemede var olan iç gerilmelerin en az düzeye indirilmesidir.
- İç gerilmeler malzemenin maruz kaldığı gerilmelere ilave olurlar ve beklenen değerlerin altında kırılmaya yol açabilirler.
- Artan sıcaklık ile malzemenin akma mukavemetinde gerçekleşen azalma sonucunda, iç gerilmeler nedeniyle malzemede akma olayı gerçekleşir ve iç gerilmeler azalır.
- Çeliklerde, bu ısıl işlem faz dönüşüm sıcaklığının altında ( $550-650^{\circ}\text{C}$  civarında) 25mm parça kalınlığı başına 1 saat tutma süresi uygulanarak gerçekleştirilir. Yavaş soğutma yapılmalıdır.





# Kaba Tane Tavlaması

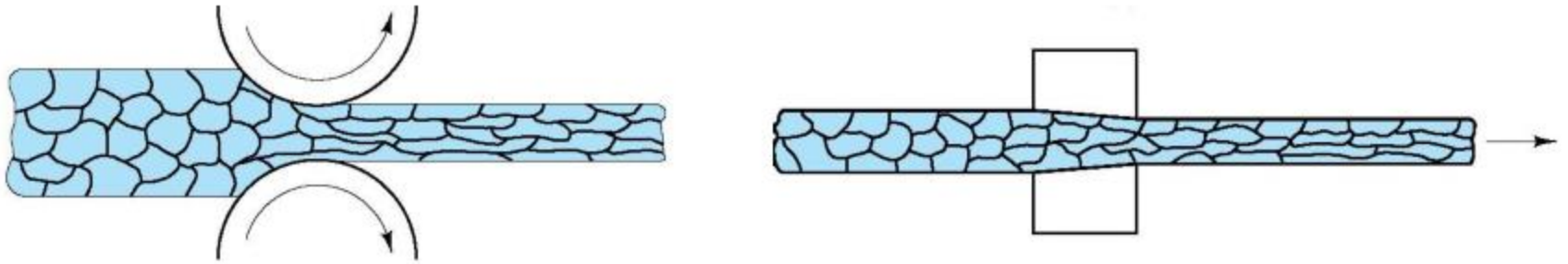
- Bu tavlamanın amacı çeliğin tane boyutunu büyüterek, malzemeyi yumuşatmak ve talaşlı imalat kabiliyetini arttırmaktır.
- Çelik ostenit sahası içinde, normalizasyon sıcaklığının üzerinde ısıtılır ve birkaç saat tutulur.
- A1 sıcaklığına kadar çok yavaş soğuma sağlanır. Daha sonra malzeme havada soğumaya bırakılır.
- Bu işlem sonunda çok iri tane yapısına sahip olan çelik, talaşlı imalat sonrasında normalizasyon işlemine tabi tutularak, ince taneli bir yapı elde edilebilir.



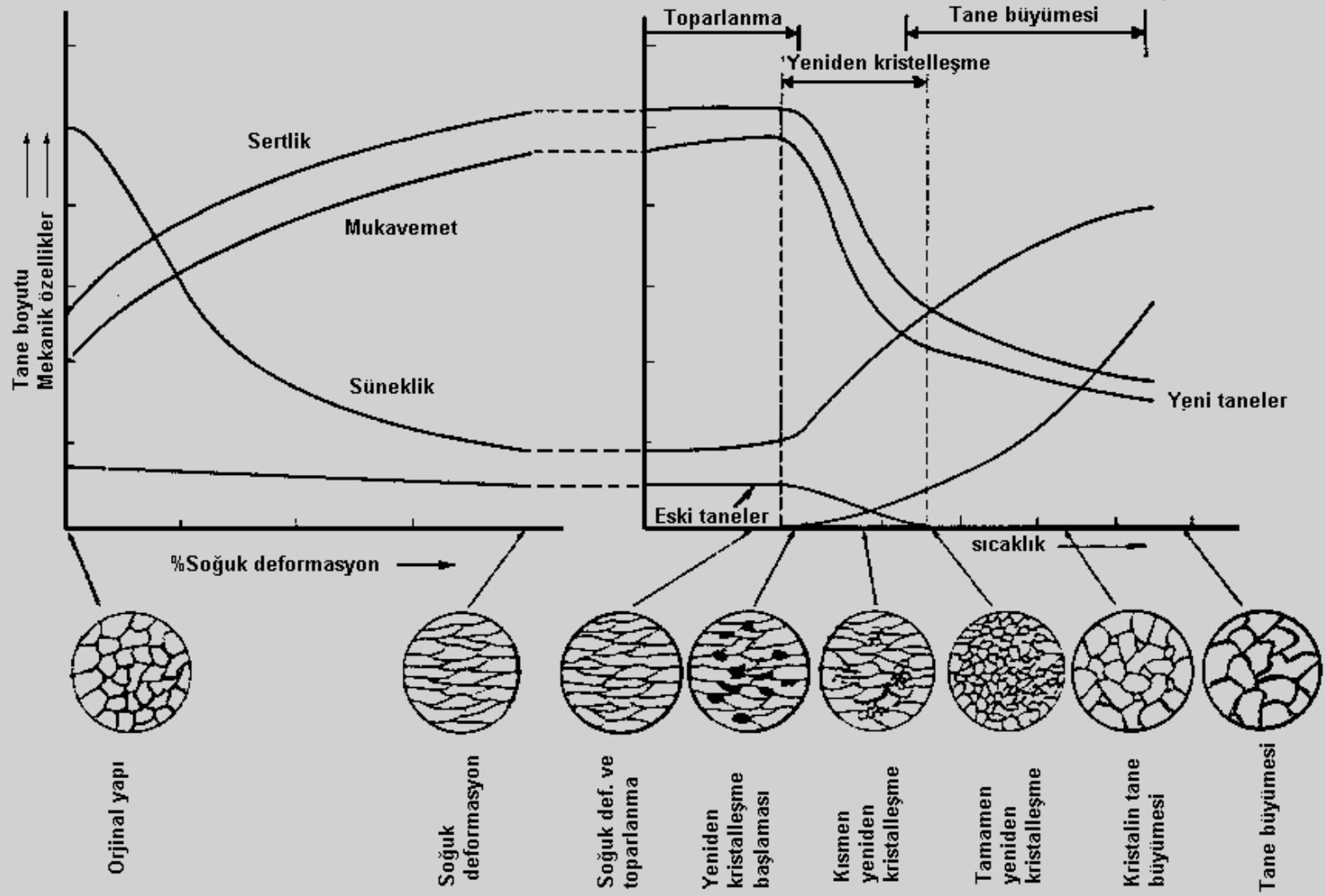
# Yeniden Kristalleştirme Tavlaması

- Soğuk şekil değiştirme sonucunda kristal ve tane yapısı bozulmuş, iç gerilemeler oluşmuş metalik malzemelerin mukavemetlerinde artış; süneklik ve şekil alma kabiliyetlerinde ise azalma olur.
- Bu tavlamanın amacı, malzemedeki bir faz dönüşümü oluşturmadan metale iç yapısı da dahil olmak üzere soğuk işlem öncesi özelliklerini kazandırmaktır.
- $T_{\text{yeniden kr.}} = 0,4T_{\text{ergime}}$  (K)'dir.
- Ancak çeliklerde faz dönüşümü olmaması için bu sıcaklık 600-700°C civarında tutulur.
- Yeniden Kristalleştirme ısıl işlemi uygulanan malzemelere Gerilme Giderme Tavlaması uygulanması gerekmez.

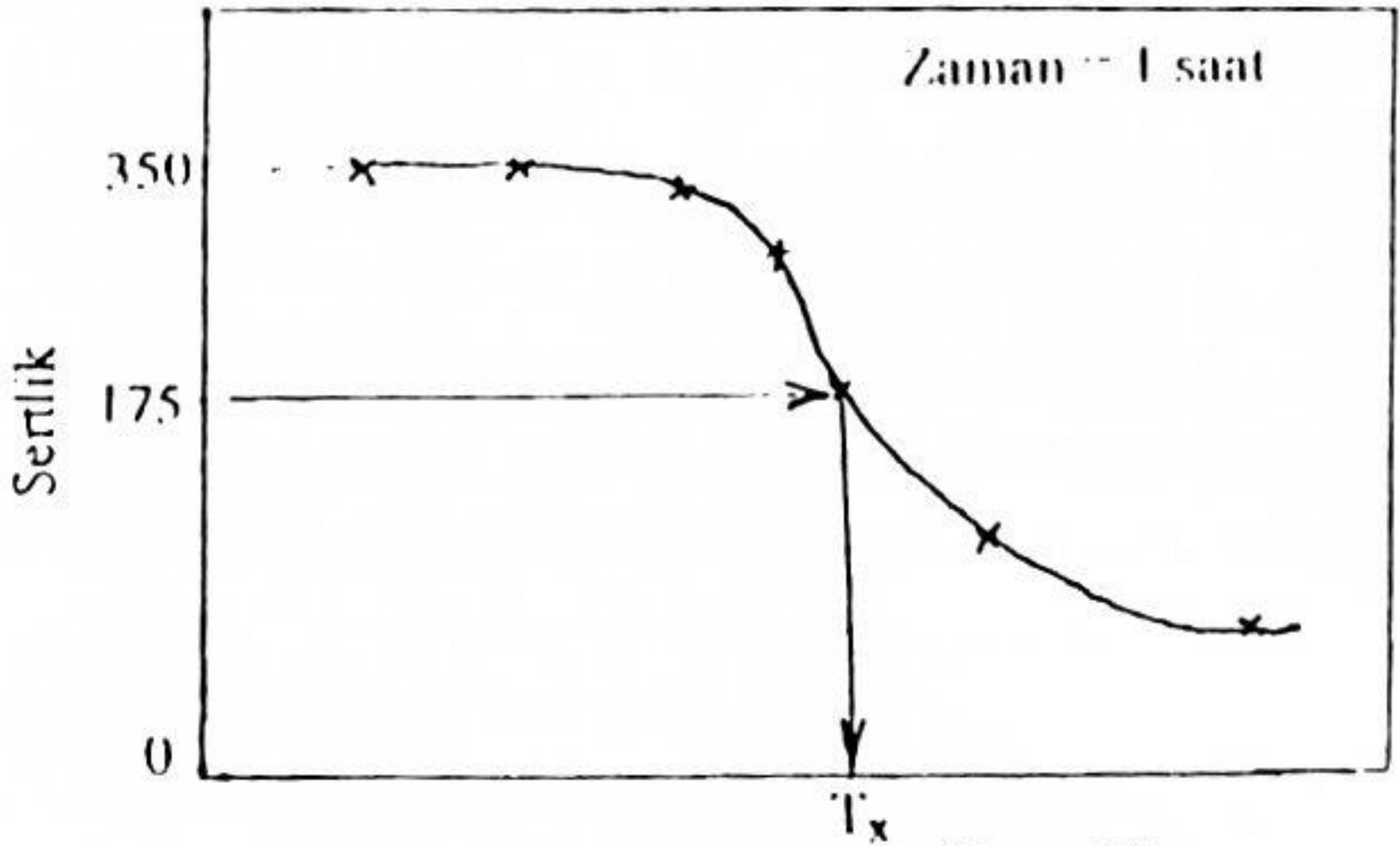
$$\%S\check{S}D = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times \%100$$



- Soğuk ş.d. Sırasında **pekleşme ile dayanım ve sertlik artar süneklik ve elektrik iletkenliği azalır**, iç gerilmeler artar.
- Belirli bir oranın üzerine çıkılması ile **mikro çatlak oluşumu ve hasar** meydana gelebilir.

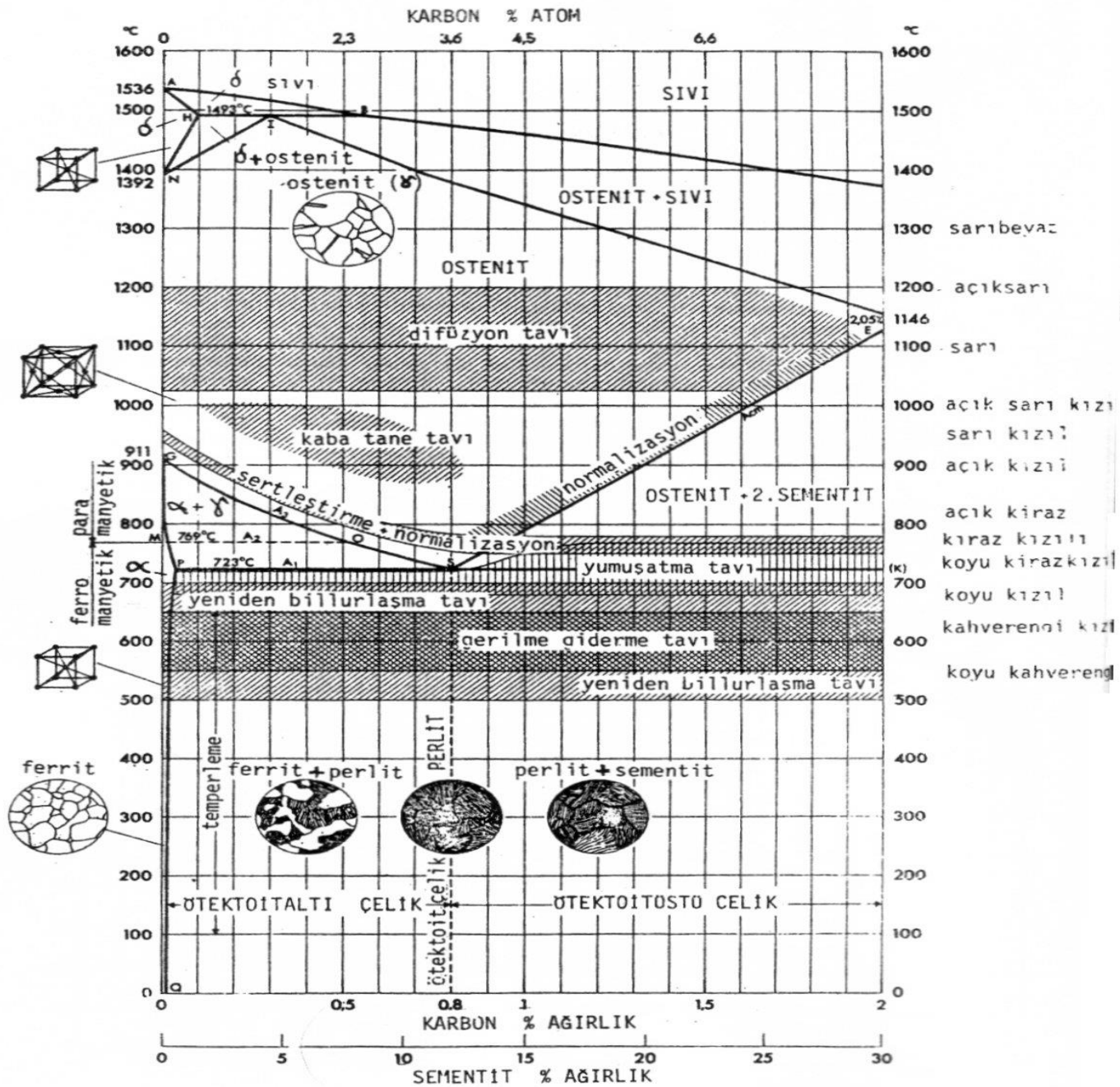






Yeniden kristalleşme sıcaklığı (°K)

Yeniden kristalleşme sıcaklığının bulunmasında deneysel olarak çizilen eğri.



Fe-Fe<sub>3</sub>C diyagramının çelikler bölgesi ve çeliklere uygulanan ısıl işlemlerin sıcaklık bölgeleri

# Yeniden Kristalleşme Tavı

Yeniden Kristalleşme tavı üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar ;

- Toparlanma
- Yeniden kristalleşme
- Tane büyümesi

# I. Aşama ( $0.2 < T_b < 0.4$ ) Toparlanma

- İç yapıda önemli ölçüde değişiklikler olmaz. ( $0.2 < T_b < 0.4$ )
- Tane içlerinde *noktasal kusurların azalması* ve *dislokasyonların* daha düşük iç enerji oluşturacak şekilde *yeniden dizilmesi* (poliganizasyon) için termal aktivasyon için yeterli sıcaklık vardır.
- Dislokasyonların dizilmesi ile **alt taneler** oluşur.
- Bu alt taneler YK sırasında oluşan gerçek taneler için çekirdekler görevi görür.
- Mekanik özelliklerden önemli bir değişim olmaz. Fakat elektrik iletkenliği önemli ölçüde artar.

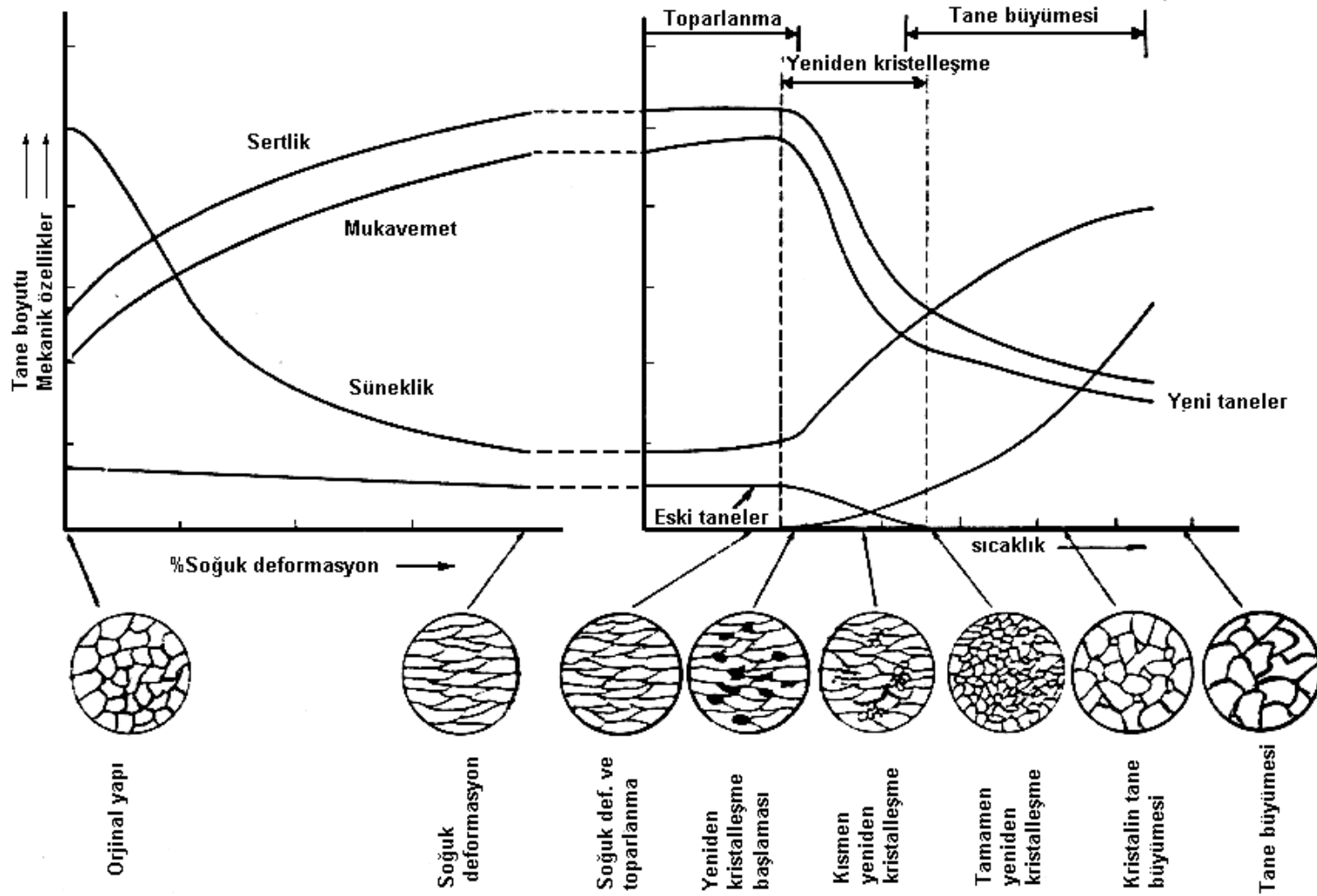




## **II. Aşama, Yeniden Kristalleşme:**

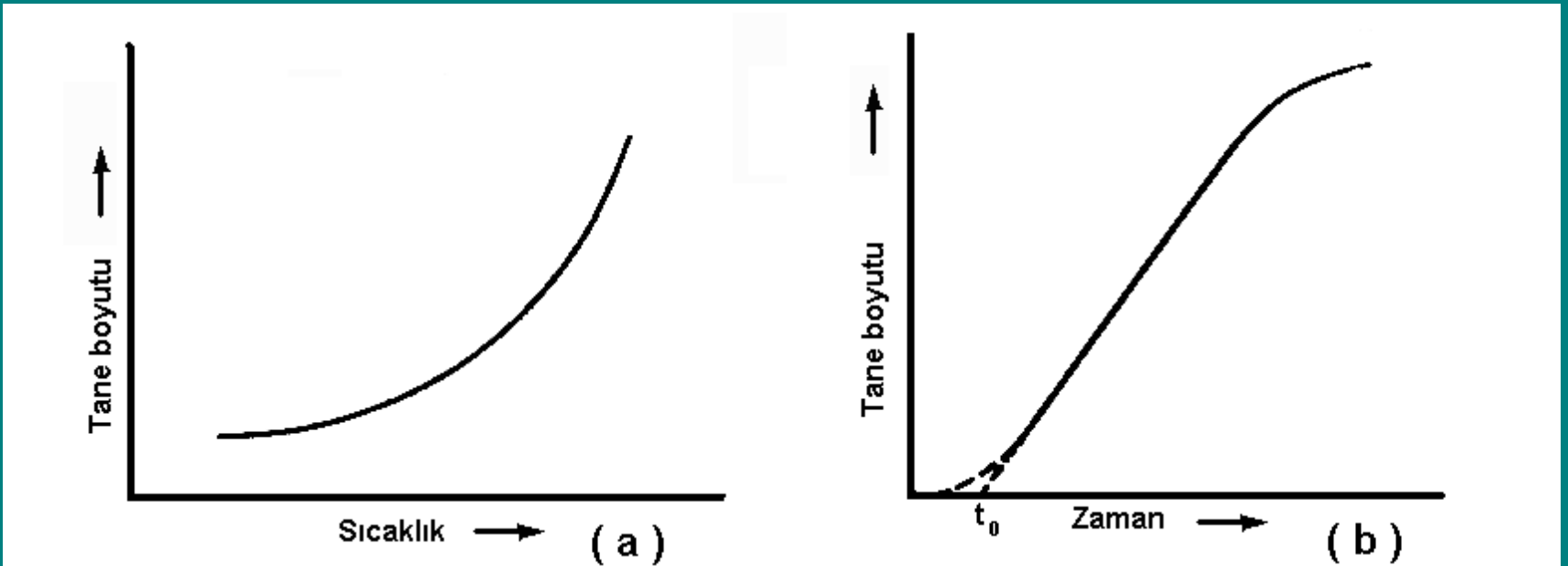
Bu safhada dislokasyon içeren toparlanmış taneler kaybolur ve yerine yeni taneler çekirdeklenir. Çekirdeklenme genellikle hatalı bölgelerde, tane sınırlarında meydana gelir.

Yeniden kristalleşme sıcaklığı, malzemenin pratik olarak bir saat içinde %50'sinin yeniden kristalleştiği sıcaklıktır. Ve yaklaşık olarak malzemenin ergime sıcaklığının 13ü ile 12'si arasındadır. Malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı sabit olmayıp soğuk işlem miktarı, kimyasal bileşim, ilk tane boyutu, tav süresi, malzemenin ergime sıcaklığı çeşitli faktörlere bağlıdır.



# III.Aşama, Tane Büyümesi

Yeniden kristalleşen taneler, tavlama sıcaklığında uzun süre tutulursa veya yeniden kristalleşme sıcaklığında uzun süre tutulursa veya yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda tavlaniırsa yayınma ile zamanla büyürler. Tane büyümesi tavlama süresi ve sıcaklığa bağlıdır.



- *Tane büyümesine sebep olan itici güç: yüksek enerji bölgeleri olan tane sınırlarının azaltılıp iç enerjini düşürülmesi eğilimidir.* Malzeme sonuçta sadece bir büyük tane şeklinde olup min enerjiye sahip olmak eğilimi gösterir.





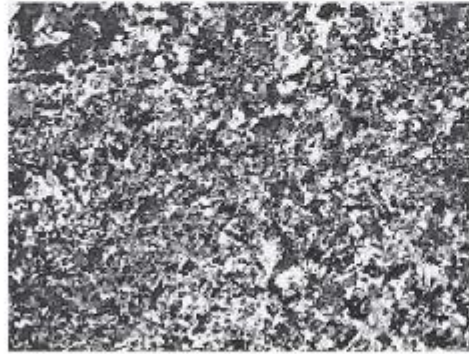
(a)



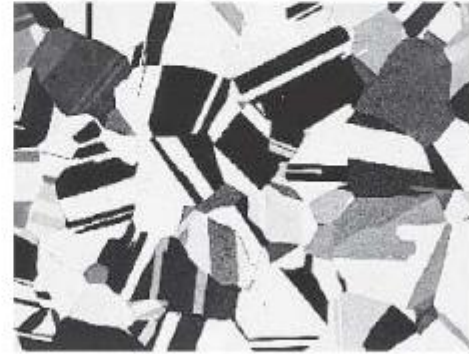
(b)



(c)



(d)

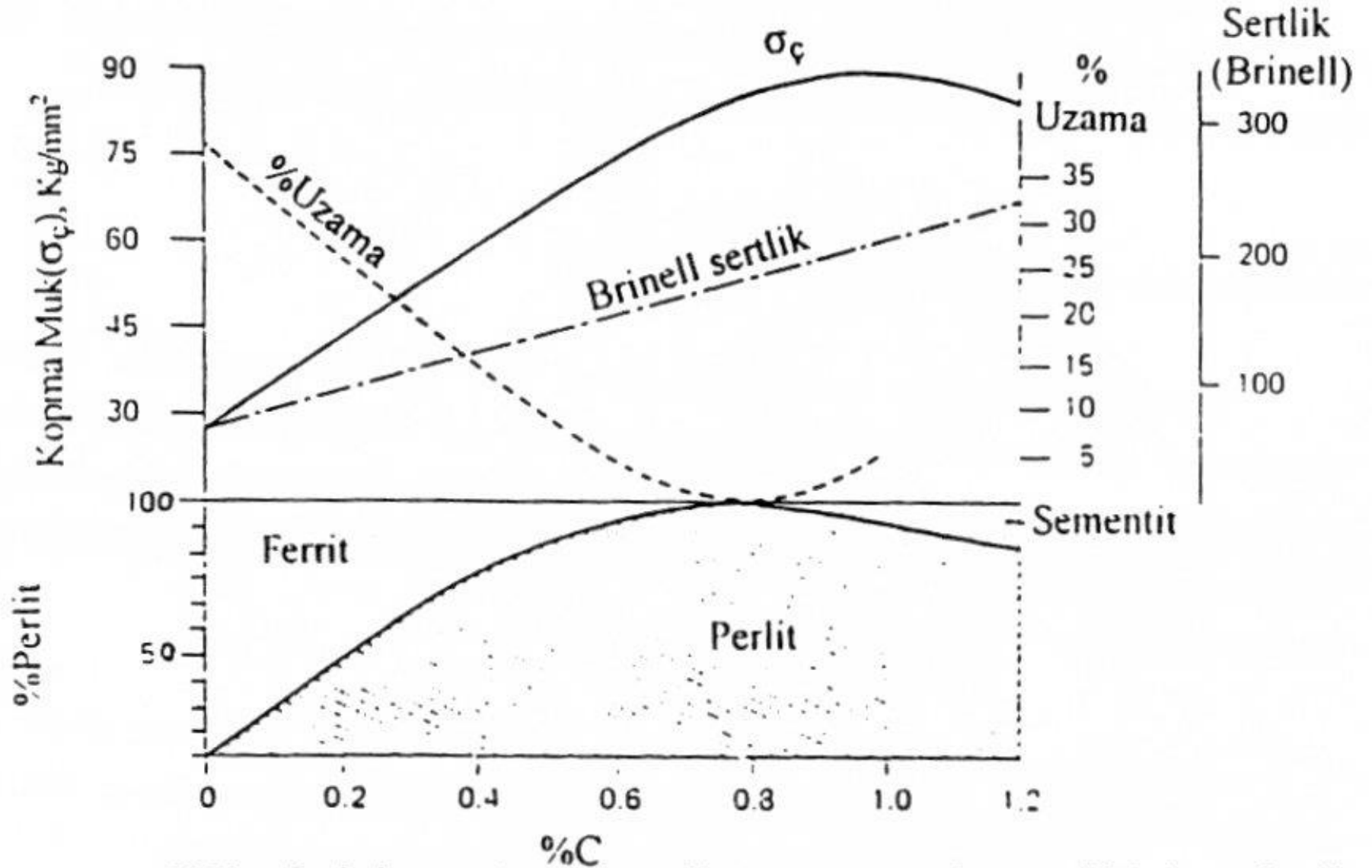


(e)

Prinçte; (a) soğuk ş.d. Yapı, (b) yeni tanelerin görülmesi, (c) yeni tanelerin oluşumu, (d) Y.K tamamlanması, (e) Tane büyümesi

# SERTLEŞTİRME

# Karbon Miktarının Sertliğe Etkisi



%C'un fonksiyonu olarak dengeli (yavaş) soğutulmuş çeliklerin mekanik özelliklerindeki değişiklik.



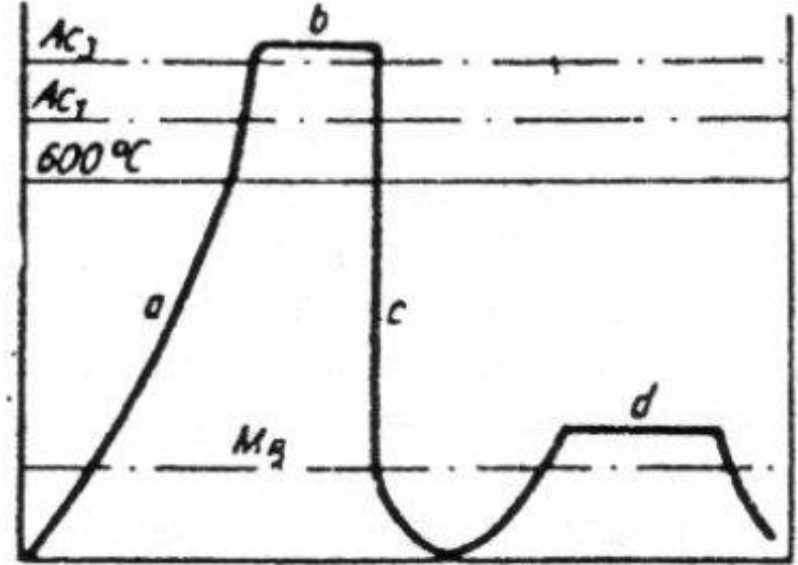
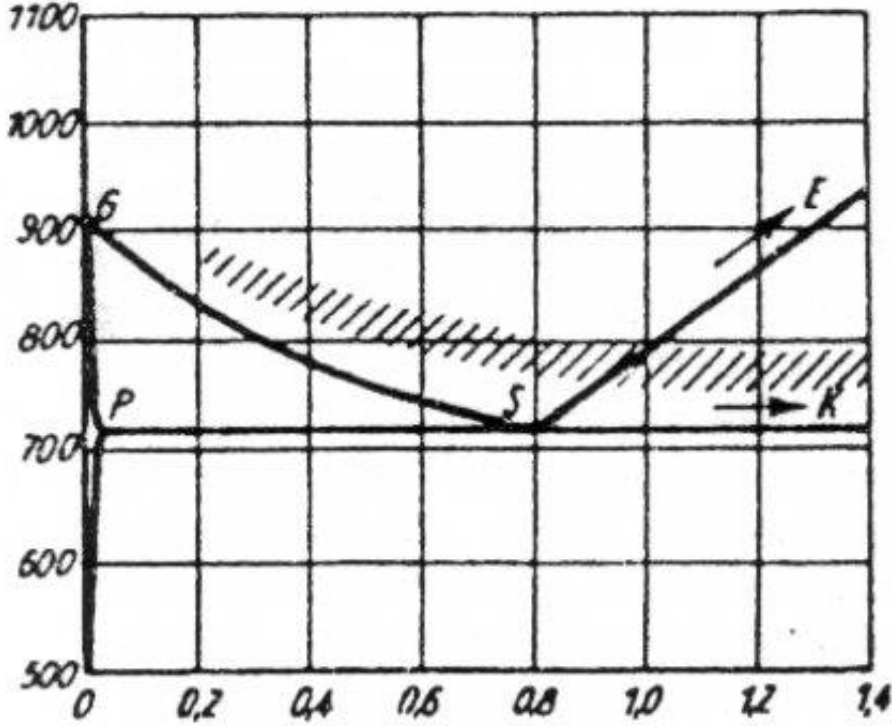
# Su verme (Quenching)

- Amaç **tamamen martenzitik bir yapı (%100)** (very hard but brittle) elde etmektir.
- Bu amaçla önce çelik ostenit bölgesinde en az 1 saat ısıtılır:
  - **Ötektoid altı çelikler için:  $A_3 + 30-50^{\circ}\text{C}$**
  - **Ötektoid üstü çelikler için:  $A_{cm} + 30-50^{\circ}\text{C}$**
- Daha sonra, Mf in altındaki sıcaklıklara, **kritik soğuma hızlarının üzerindeki değerlerde** hızlı soğutma yapılırsa yapı tamamen martenzite dönüşür (quenching).

**Su verme** – çeliğin ostenit bölgeden kritik soğuma sıcaklıklarının üzerindeki hızlarda ani olarak soğutulması işlemidir. Eğer Mf in altındaki sıcaklıklara ani soğutma söz konusu ise yapı tamamen martenzite dönüşür. Aksi halde ani soğutma sırasında eğer ZDS eğrileri kesilmiyorsa yapı dengesiz ostenit halinde bulunuz.



# Hızlı Soğutma ile Sertleştirme



Şertleştirme tavı ısıl işlem diagramı

(a) Isıtma, (b) Ostenitleme, (c) Su Verme ve (d) Temperleme

# Hızlı / Yavaş Soğutmanın Çeliklerin Yapısına Etkisi

## OSTENİTLEME (OSTENİT SAHASINA ISITMA)



## YAVAŞ SOĞUMA

---



## HIZLI SOĞUMA (SU VERME)

---

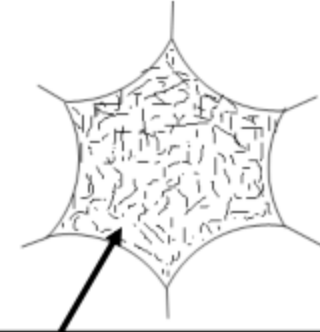


# Yayınmasız dönüşüm: Martenzit

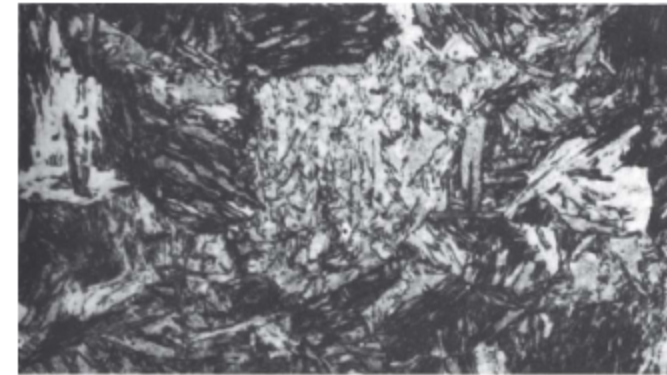
Kararlı fazların oluşması için gereken yayınmanın olmaması durumlarında dönüşüm kararsız olarak gerçekleşir.

Bu değişim **yayınmasız olmasından dolayı zamandan bağımsızdır** ve iki yatay çizgi şeklinde gösterilir.

**Soğumanın kritik bir hızın üzerinde** olması durumunda ostenit faz martenzit faza dönüşür.

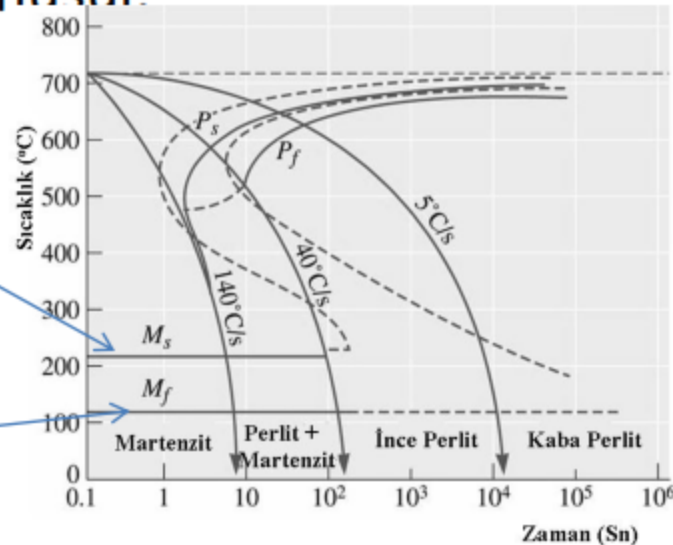


İğnemsî yapı  
(Optik mikroskopta)



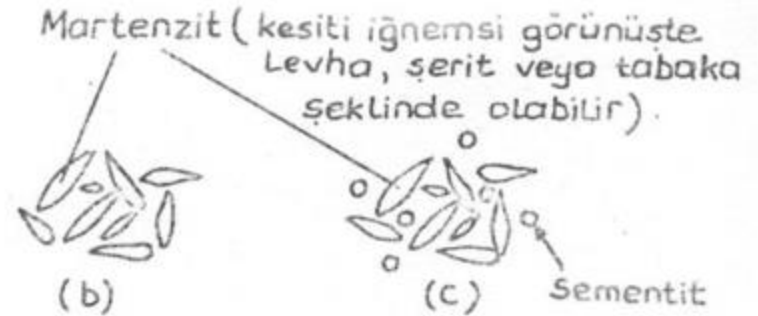
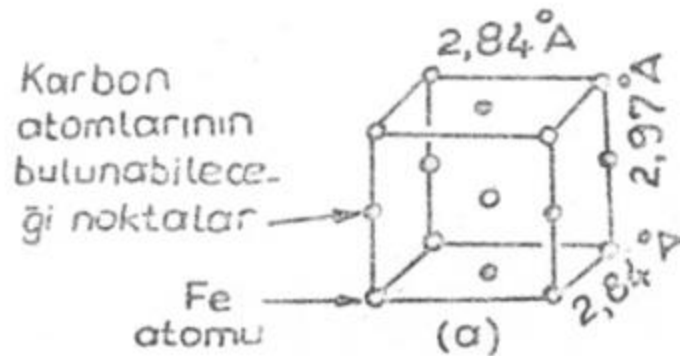
**Martenzit başlangıç sıcaklığı**

**Martenzit bitiş sıcaklığı**



# Martenzit

- Fakat hızlı soğumada C, yayınma (difüzyon) için zaman bulamaz ve ferrit içerisinde hapis olur.
- Yayınamayan C atomları **hacim merkezli kübik** yapıyı gererek **hacim merkezli tetragonal** yapıya dönüşmesine sebep olur.
- Bu yapıya **martenzit** adı verilir.
- **Çok serttir** ve **iğnemsisi** bir görünüme sahiptir.

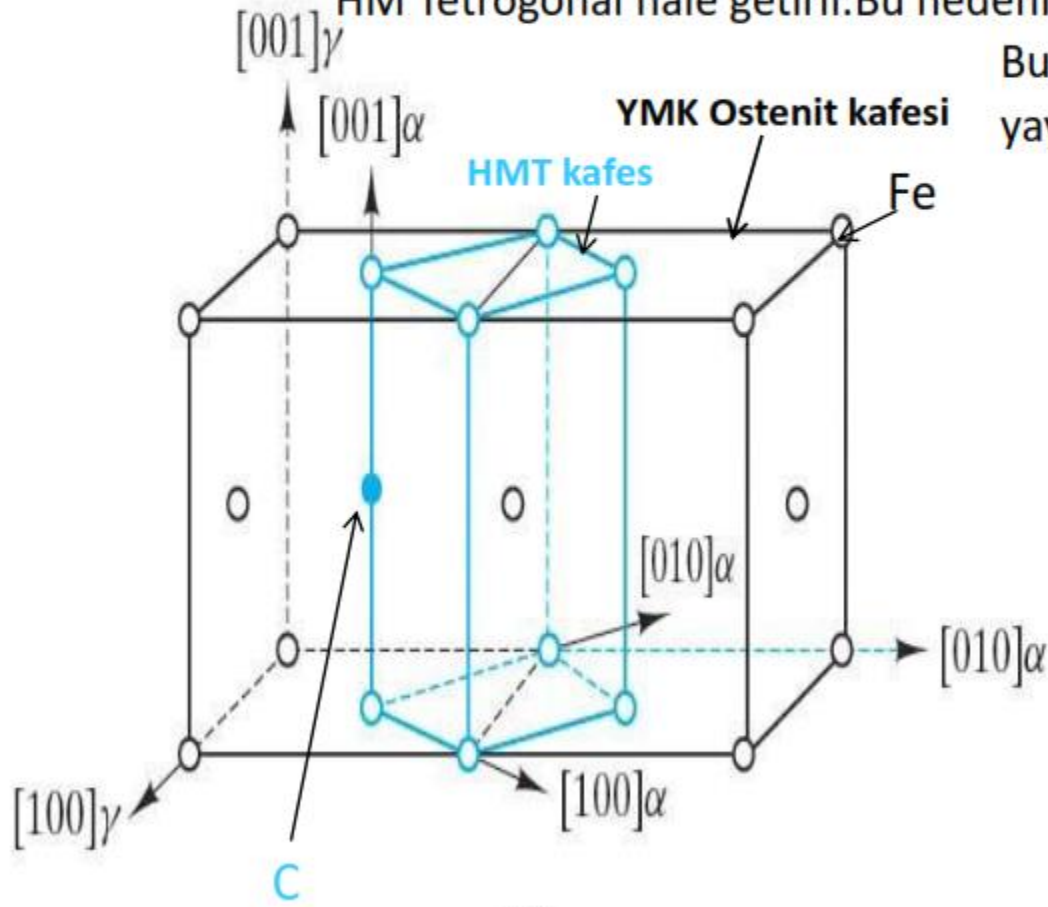




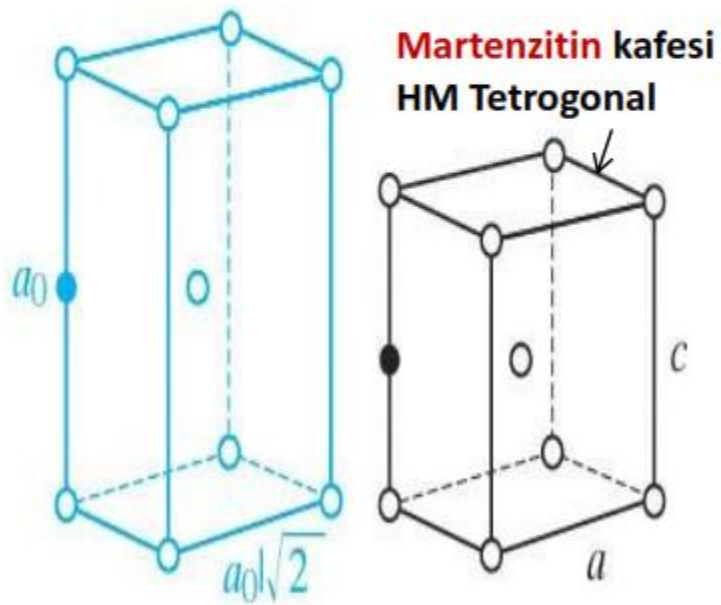
# Yayınmasız dönüşümler-Martenzitik yapılar

HMK Ostenit ( $\gamma$ )  $\longrightarrow$  YMK ferrit( $\alpha$ ) allotropik dönüşümü yavaş soğumada karbon atomunun kafesten yayınması sonucu kolaylıkla oluşur .Ancak **hızlı soğumada** C kafesten yayınmadan kafes soğur ve C yayınmadan kafeste hapsolür ve HMK  $\alpha$  kafesini zorlar ve HM Tetragonal hale getirir.Bu nedenle Kafeste iç gerilmeler de doğar.

Bu olay aniden olur yani yayınmasızdır.



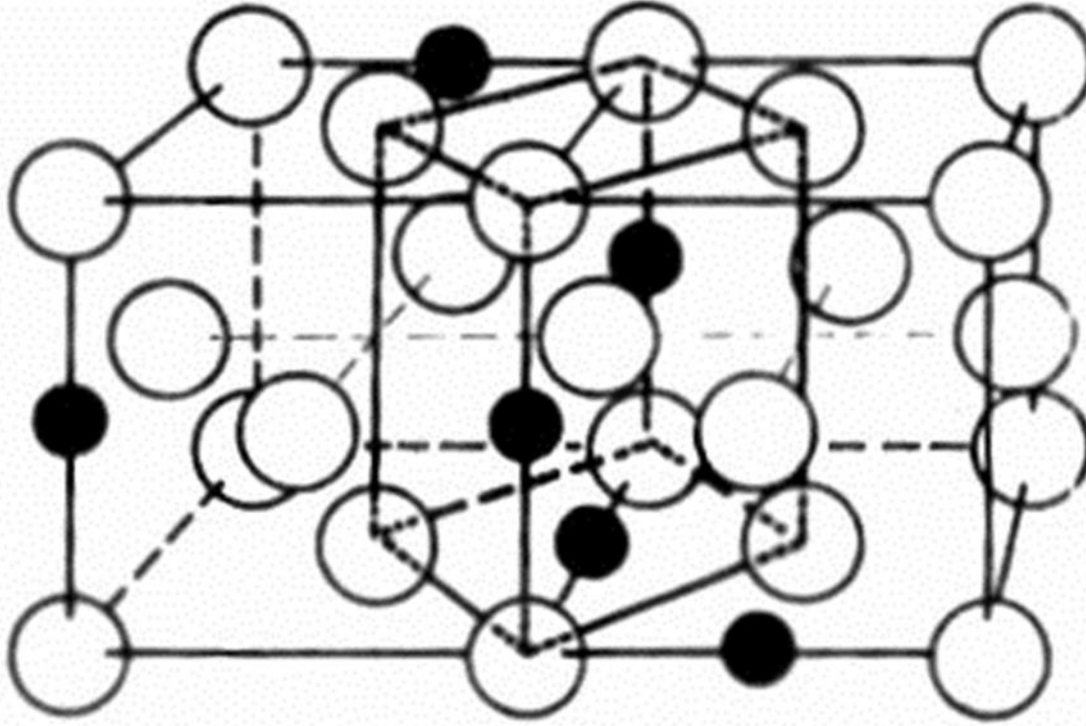
(a)



(b)

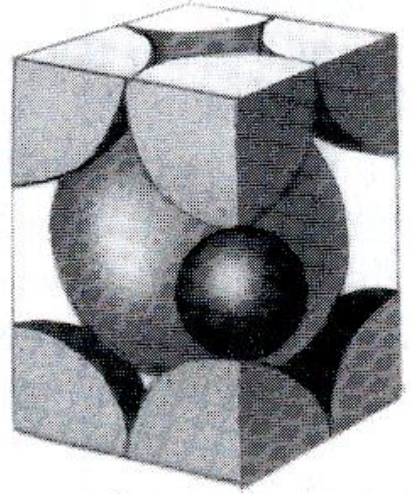
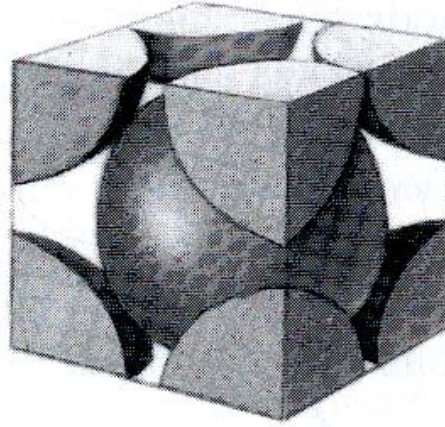
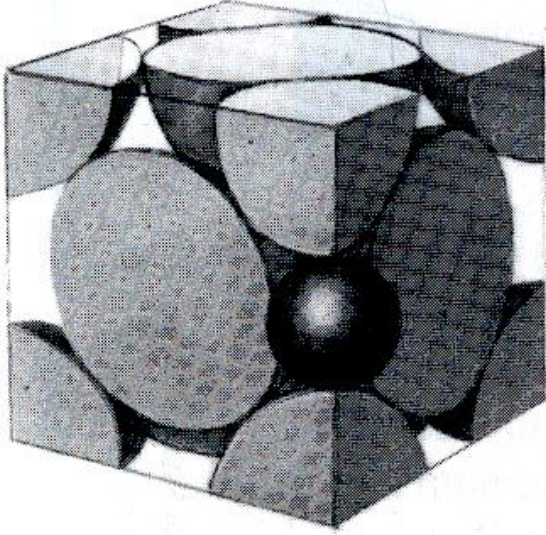
**DİKKAT: Çelikte Karbon içeriği arttıkça c/a artar, buna bağlı olarak sertlik artar**

# Martensitik Dönüşüm



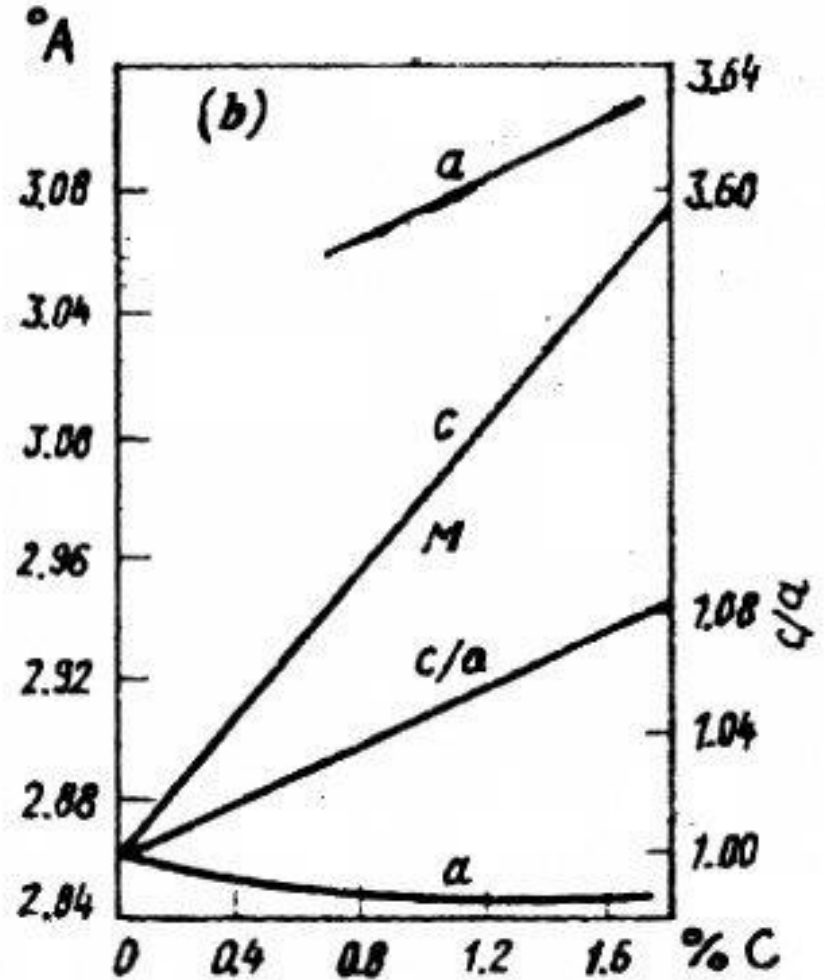
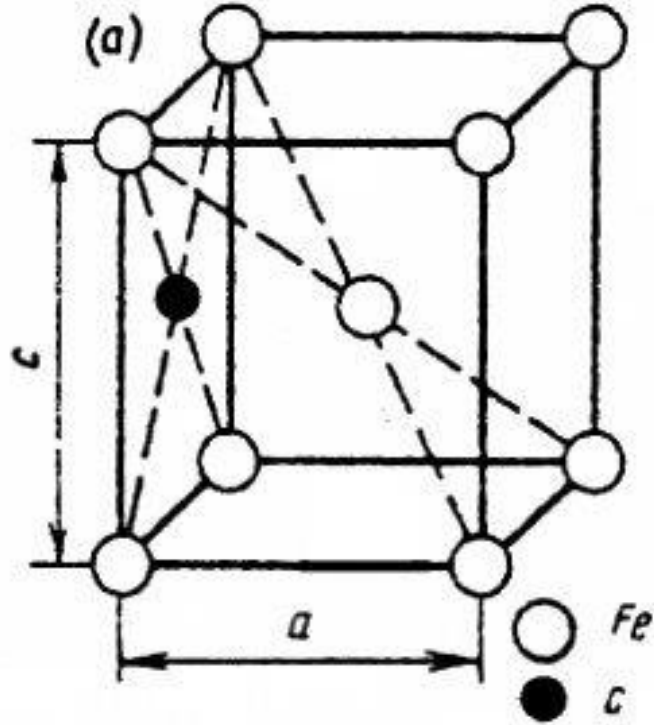
*Ostenit'ten ( $\gamma$ ) Martensite ( $\alpha$ ) dönüşüm için yapılmış basit bir modelin şematik olarak gösterilişi*

# Martensitik Dönüşüm



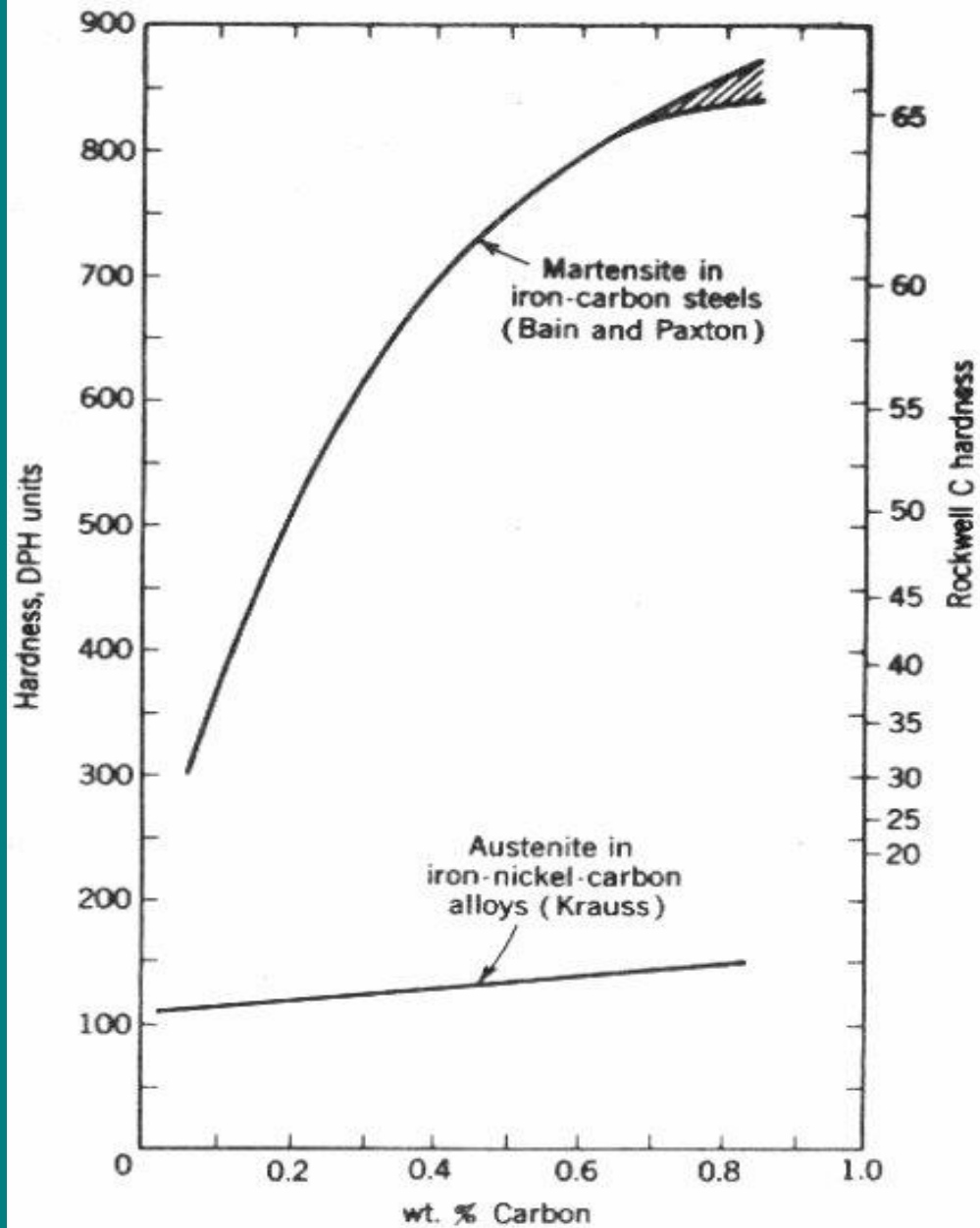


# Martensitik Dönüşüm



Martenzit kafes parametrelerinin C içeriğine göre değişimi





Effect of carbon on the hardness of austenite and on the hardness of martensite. The shaded area of the upper curve represents the effect of retained austenite.

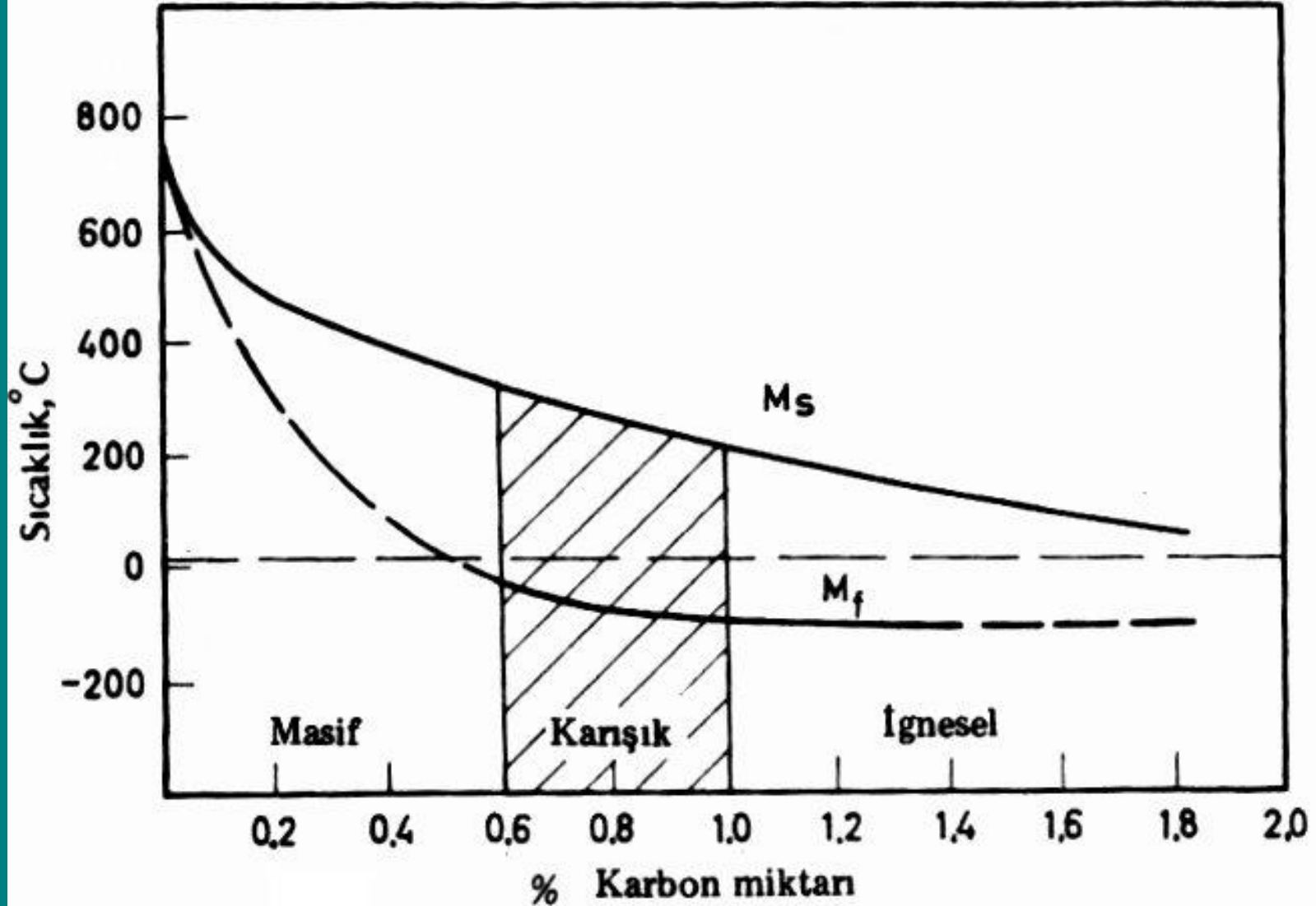
# Martensitin Özellikleri

- Fe-C martensiti C'ca aşırı doymuş bir fazdır.
- Martensitik dönüşüm ile yapıda mikroskobik seviyede iç gerilmeler, ikizler ve dislokasyonlar oluşur. %0,2 C'lu bir çelik, martensitik yapıda  $1 \times 10^{12}$  cm/cm<sup>3</sup> yoğunluğunda dislokasyon içerir. Bu haliyle martensit soğuk deforme edilmiş yapıya benzer.
- Martensitik yapıda bir ısı karşısında (Temperleme) çökelti oluşur. Çökelti tercihilen levha ve iğneler arasındaki sınırlarda yer alır.

# Martensitin Özellikleri

- ✦ Isıl işlem şartlarına bağlı olarak, yapıda martensitin yanı sıra kalıntı ostenit de bulunabilir. Bu kalıntı ostenit kararlı olmayıp, herhangi bir ısı karşısında (Temperleme) daha kararlı ürünlere dönüşür.
- ✦ Özellikle takım çeliklerinde yapı içinde bulunan karbürler, ostenit içinde çözündürülemez ise martensitik yapı içinde yer alabilir.

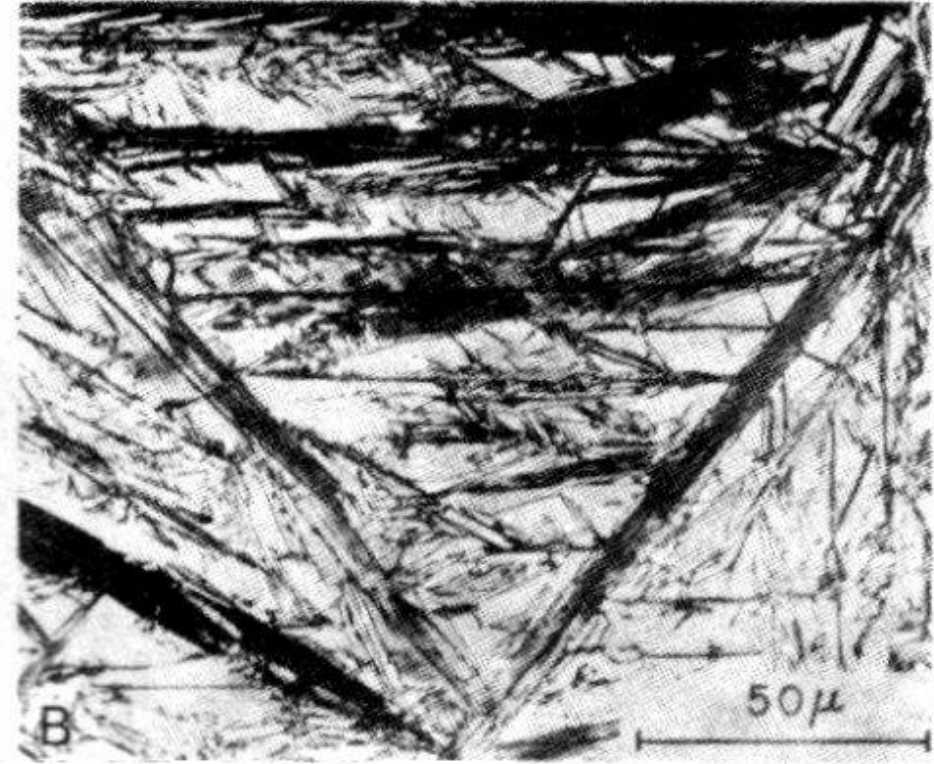
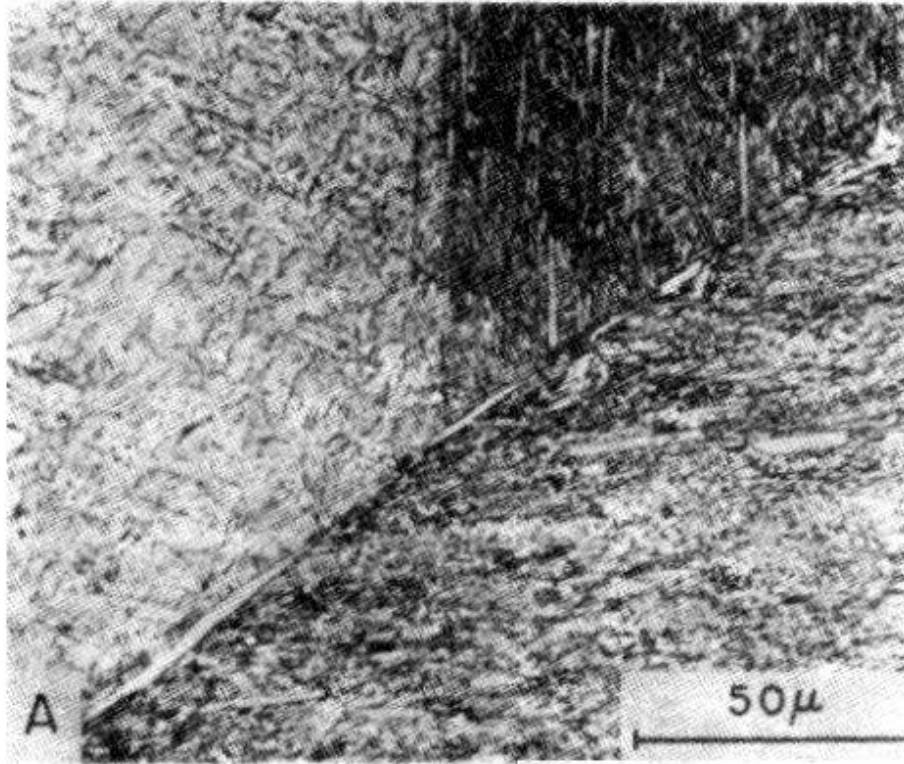
# Martensitin Özellikleri



*Alaşımız bir çelikte ostenitik karbon (Ostenit içerisinde çözünmüş) miktarının Ms ve Mf sıcaklığına etkisi.*



# Fe-C Martensitinin Tipleri



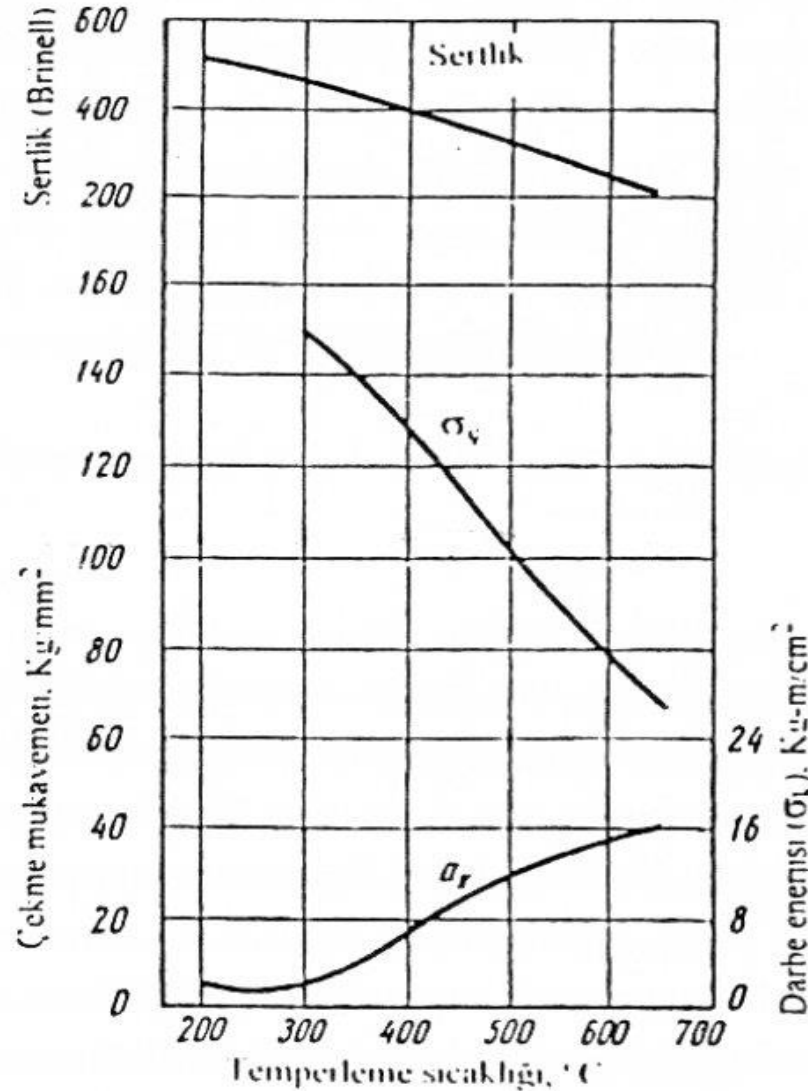
(a) *Masif Martensit*, (b) *İğnesel martensit*

# TEMPERLEME (MENEVİŞLEME)

- Ostenit sahasından su verilerek martensitik yapı kazandırılmış olan çelikleri yumuşatmak ve tokluğunu arttırmak amacıyla ötektoid sıcaklığın altında belli bir süre tutma işlemidir.

Martensit → Temperlenmiş Martensit + Sementit

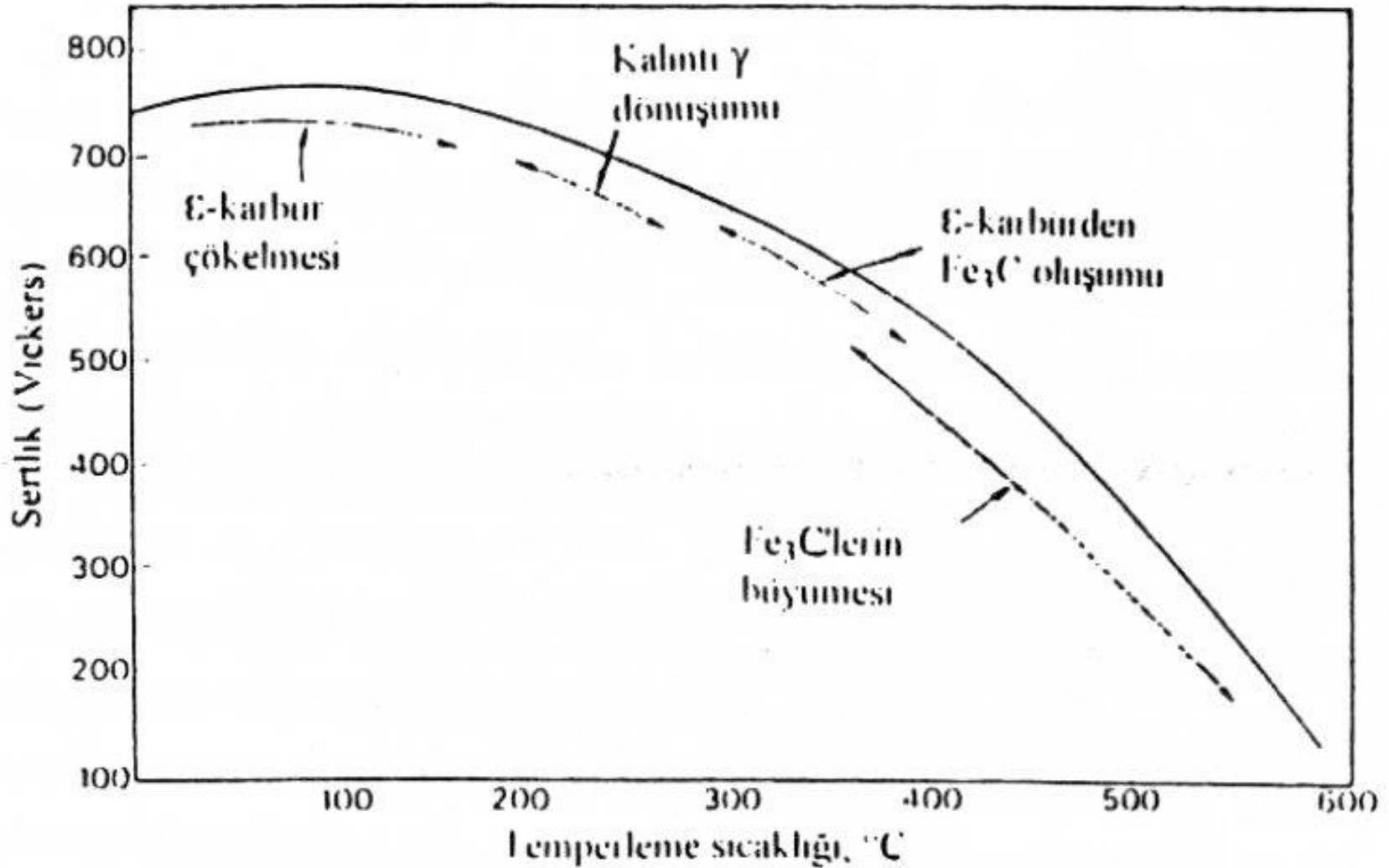
# Temperleme Sıcaklığının Mekanik Özelliklere Etkisi



Temperleme sıcaklığının, martensitik yapıdaki sade karbonlu çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi.

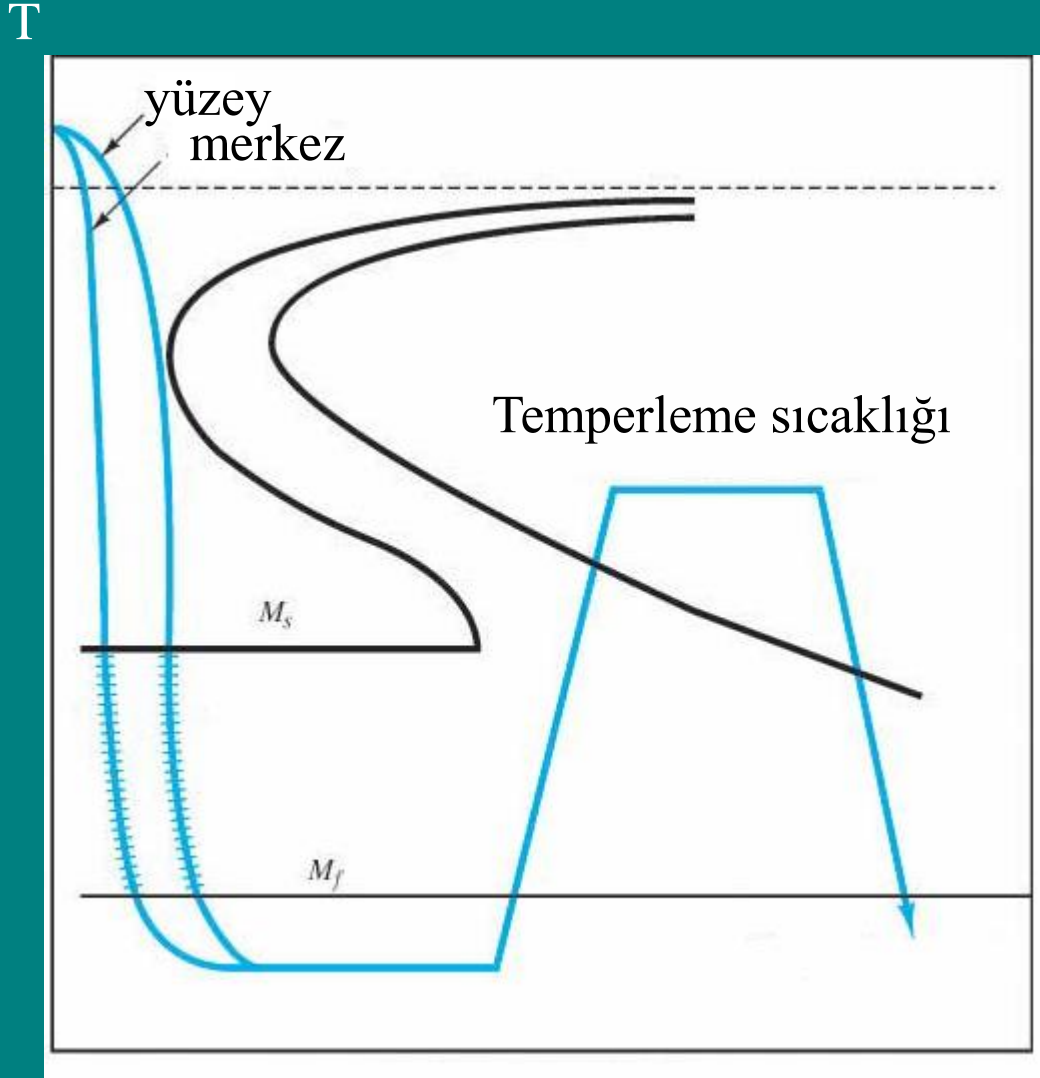


# Temperleme Sırasında Martensitik Yapıdaki Değişimler



Sade karbonlu ötektoit çeliklerde temperleme sıcaklığının fonksiyonu olarak çeliğin sertliği ve içyapısındaki değişikliklerin şematik gösterilimi.

# Menevişleme (Temperleme)



- Kırılgan Martenzit iç yapının, **daha tok ve hala yüksek dayanımlı iç yapıya dönüştürülmesi** ısı işlemdir.
- Ostenit sıcaklıktan su verilen iç yapıda martenzitler oluşur.
- Daha sonra bu malzeme temper sıcaklığına ısıtılarak martenzit **temper yapıya** yani **ince taneli ferritik-perlitik** bir yapı dönüştürülür.

# Temperleme Sırasında Martensitik Yapıdaki Değişimler

## 1. Safha (38-250°C):

- Yüksek C'lu çeliklerde SPH yapıdaki  $\epsilon$  karbürün ( $\text{Fe}_{2,5}\text{C}$ ) çökmesi ile martensitin sertliği bir miktar artar.
- Martensit tetragonelliğini kısmen kaybeder.
- $C < 0,25$  çelikte  $\epsilon$  karbür oluşma şansı yoktur.
- Çeliğe Si ilavesi  $\epsilon$  karbürün 200°C'nin üzerinde kararlı olmasını sağlar.

# Temperleme Sırasında Martensitik Yapıdaki Değişimler

## 2. Safha (230-370°C):

- 200°C'nin üstünde  $\epsilon$  karbür çözünür ve çok ince sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) çöker.
- Martensit tetragonel yapısını tamamen kaybederek bir nevi ferrit oluşur.
- Temperleme sıcaklığının yükselmesi ile sementitler büyür ve küreselleşir. Sertlik düşer.
- Yüksek karbonlu çeliklerin mikroyapısında martensitle birlikte bulunan kalıntı ostenit kısmen beynite dönüşerek malzemenin sertliğinde artışa neden olur.
- Bu sıcaklık aralığındaki temperleme ile sade karbonlu düşük alaşımlı çeliklerin tokluğunda düşme olur (Temper Gevrekliği). Bu nedenle bu sıcaklıkta temperleme işlemlerinden kaçınılır. Ancak temperlemeye karşı direnci arttıran alaşım elentlerinin ilavesi ile temper gevrekliği azaltılabilir.

# Temperleme Sırasında Martensitik Yapıdaki Değişimler

## 3. Safha (370-540°C):

- Sementit büyümeye ve küreleşmeye devam eder.
- Malzemenin sertliği düşerken, tokluğu artar.
- Tokluk ve mukavemetin optimum kombinasyonu bu aralıkta elde edilir.
- Yüksek tokluk gerektiren ortamlarda kullanılan sade karbonlu ve düşük alaşımlı yapı çelikleri bu aralıkta temperlenir.



# Temperleme Sırasında Martensitik Yapıdaki Değişimler

## 4. Safha (540-675°C):

✔ Bu bölgede 1 saat temperleme ile aşağıdaki dönüşüm olur:

Martensit → Yeniden kristalleşmiş ferrit + Küresel Sementit

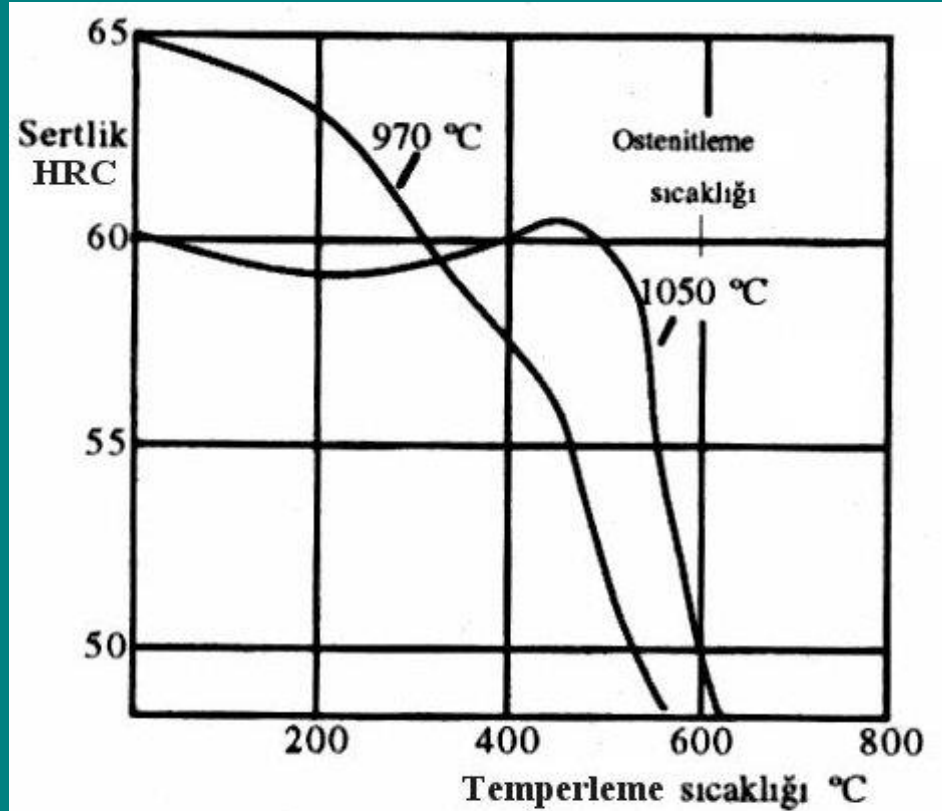
- ✔ Yeniden kristalleşme ile sınırlarında ve içinde küresel sementit içeren eş eksenli ferrit taneleri oluşur ve daha sonra bu ferrit taneleri büyür.
- ✔ Bu safhada dislokasyonlar yeniden düzenlenir ve dislokasyon yoğunluğu azalır.
- ✔ Düşük karbonlu çeliklerde yeniden kristalleşme kolay olurken, yüksek karbonlu çeliklerde sementit partiküllerinin yoğunluğu fazla olduğundan, sementitler tane sınırlarında dislokasyon hareketini ve ferrit tane sınırlarını kilitleyerek yeniden kristalleşmeyi zorlaştırır.

# Alaşımli Çeliklerin Temperlenmesi

- Yer alan atomlarının (Cr, Mo, Ni, ...) yayılımı, arayer atomlarının yayılımından çok daha yavaştır.
- Çeliğin bileşiminde alaşım elementlerinin bulunması durumunda C'un yayılımı yavaşlar ve dolayısıyla, temperleme sırasında karbür çökmesi ve büyümesi daha yavaş olur.
- Alaşım elementleri, C'un martensit latisinden çıkış hızını azaltarak martensit tetragonelliğinin 450-500°C'ye kadar kararlı olmasını sağlar.

# İkincil Sertleşme

- Özellikle yüksek alaşımlı çeliklerde  $450^{\circ}\text{C}$ 'den yüksek sıcaklıklarda yapılan temperleme ile martensitin sertliği düşmesine rağmen, mikroyapıda oluşan alaşım karbürlerinden dolayı çeliğin sertliğinde daha düşük temperleme sıcaklıklarına göre sertlik artışı görülebilir.
- Bu olaya ikincil sertleşme adı verilir.



X 210 Cr 12 çeliğinde, ostenitleştirme ve menevis sıcaklığına bağlı olarak sertliğin değişimi ve ikincil sertleşme etkisi

**DEMİR – KARBON  
ALAŞIMLARININ  
TTT (ZSD) DİYAGRAMLARI**

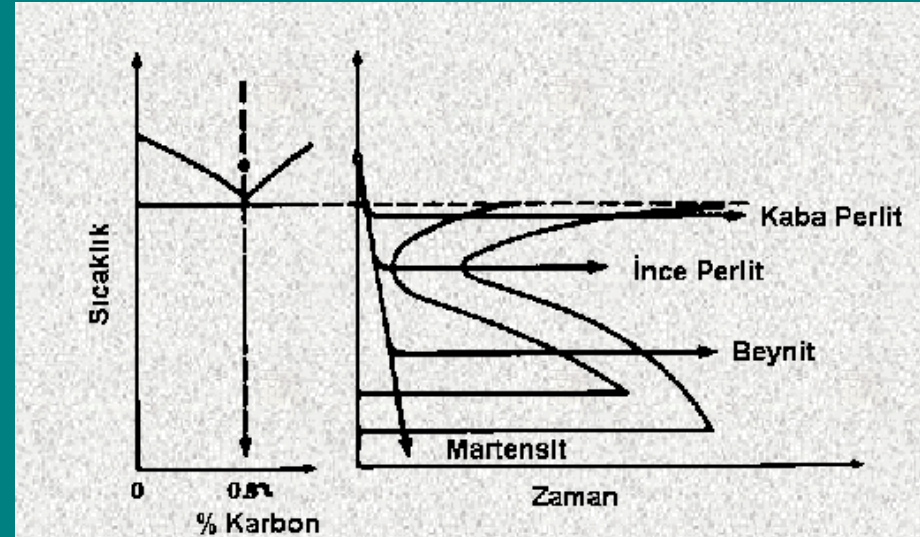
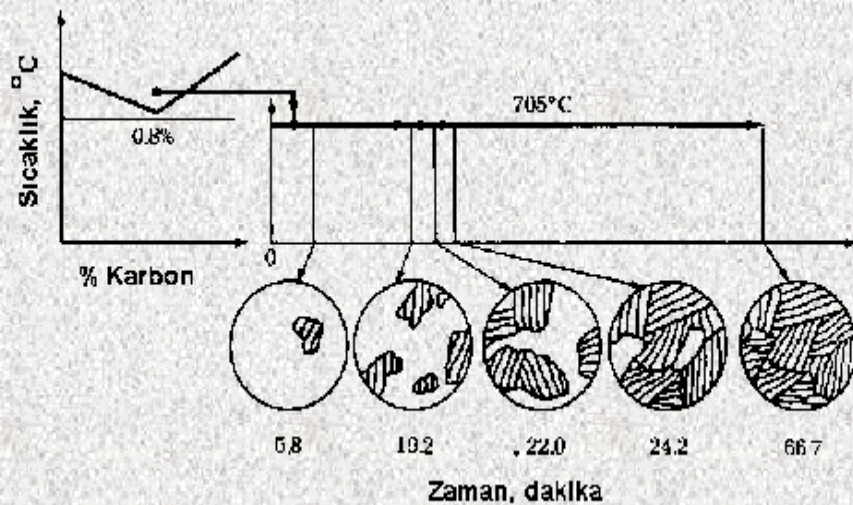
# TTT Diyagramları

- Çeliğin ostenit bölgesinden oda sıcaklığına yavaş soğutulması sonucunda yapıda Fe-C denge diyagramında da görülen Ferrit ve Sementit fazları oluşur.
- Çeliğin değişik hızlarda dengesiz şekilde soğutulması durumunda ise Fe-C denge diyagramı fazları belirlemek yönünden yetersiz kalır.
- Dengesiz soğutma sırasında çelikte oluşan mikroyapılar TTT (Time-Temperature-Transformation) diyagramları ile etüd edilir.

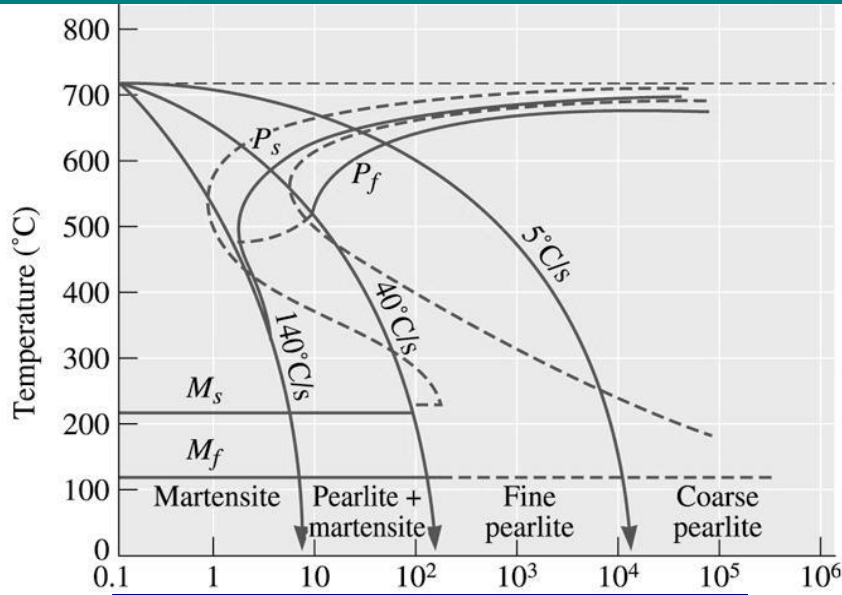


# TTT Diyagramının Çıkarılması

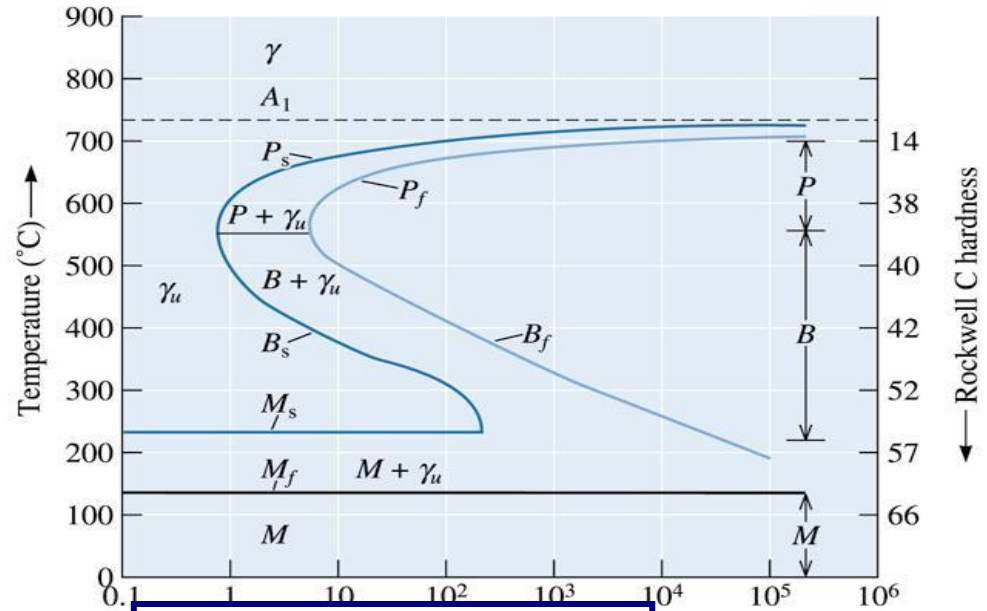
- %0,8 C içeren ötektoid bir çeliğin TTT diyagramının çıkarılması aşağıda gösterilmiştir.
- Ostenit sıcaklığındaki çelik, daha düşük sıcaklıkta bulunan bir fırına konulup bekletilerek, bu sıcaklıktaki faz dönüşümleri ve faz oranları saptanır.
- Dönüşümün başladığı ve bittiği süreler saptanarak, TTT diyagramları çizilir.



## TTT Diagrams



**Sürekli soğutma eğrisi  
boyunca dönüşüm**



**İzotermal eğri  
boyunca dönüşüm**

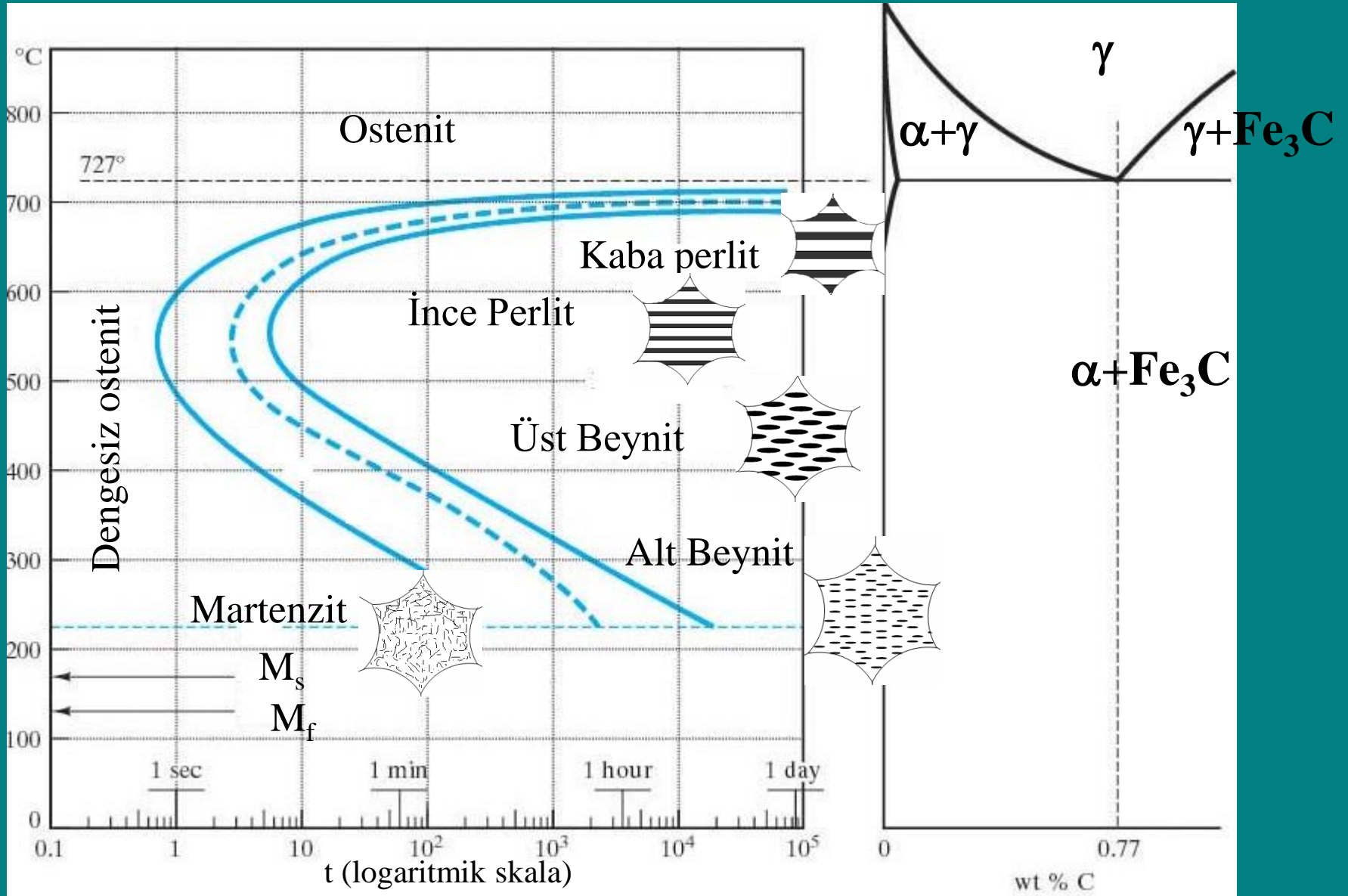
**Isothermal annealing for fully pearlitic structure.**

**Ferrite + Pearlite for hypoeutectoid steels**

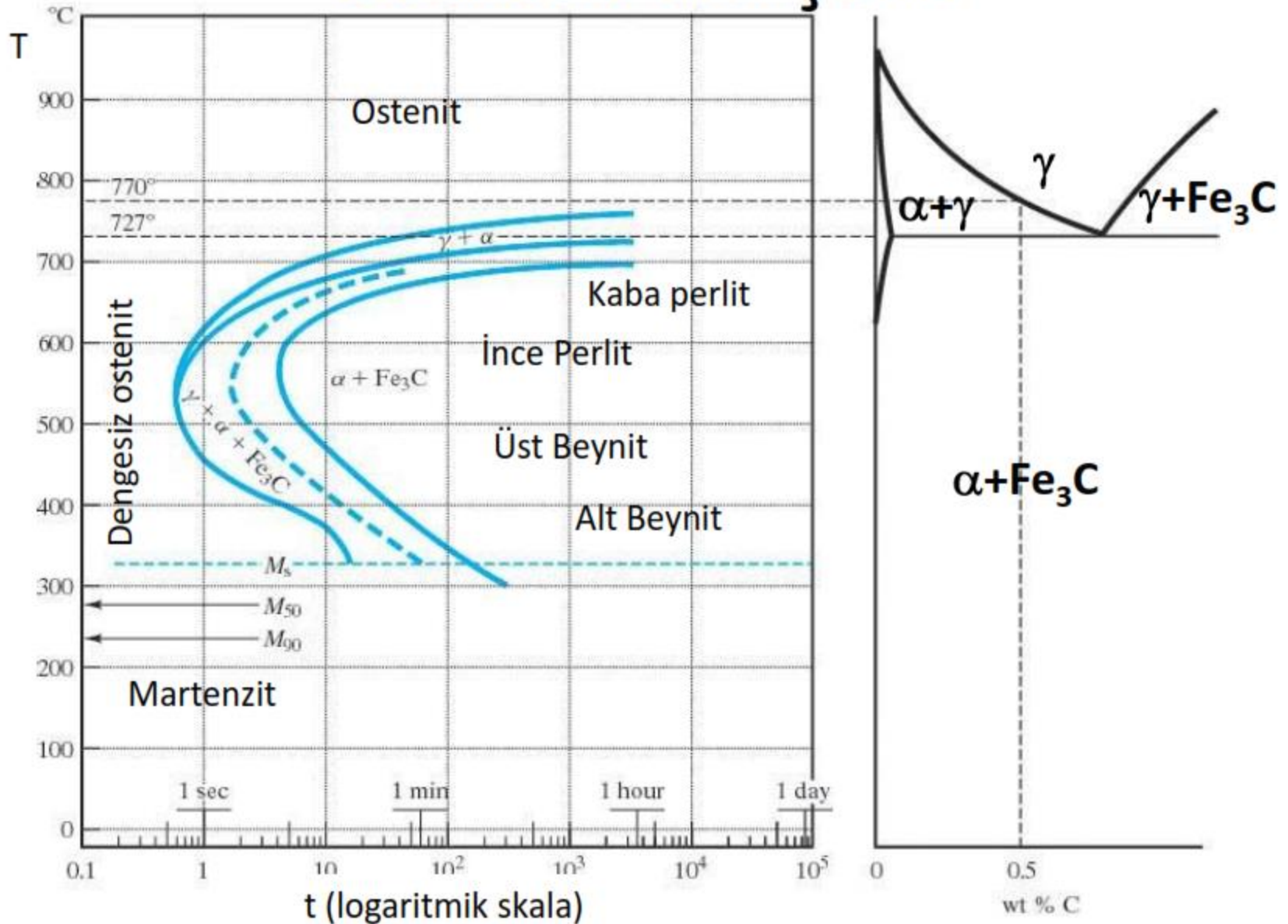
or

**Pearlite + Cementite for hypereutectoid steels**

# Ötektoit Çelik

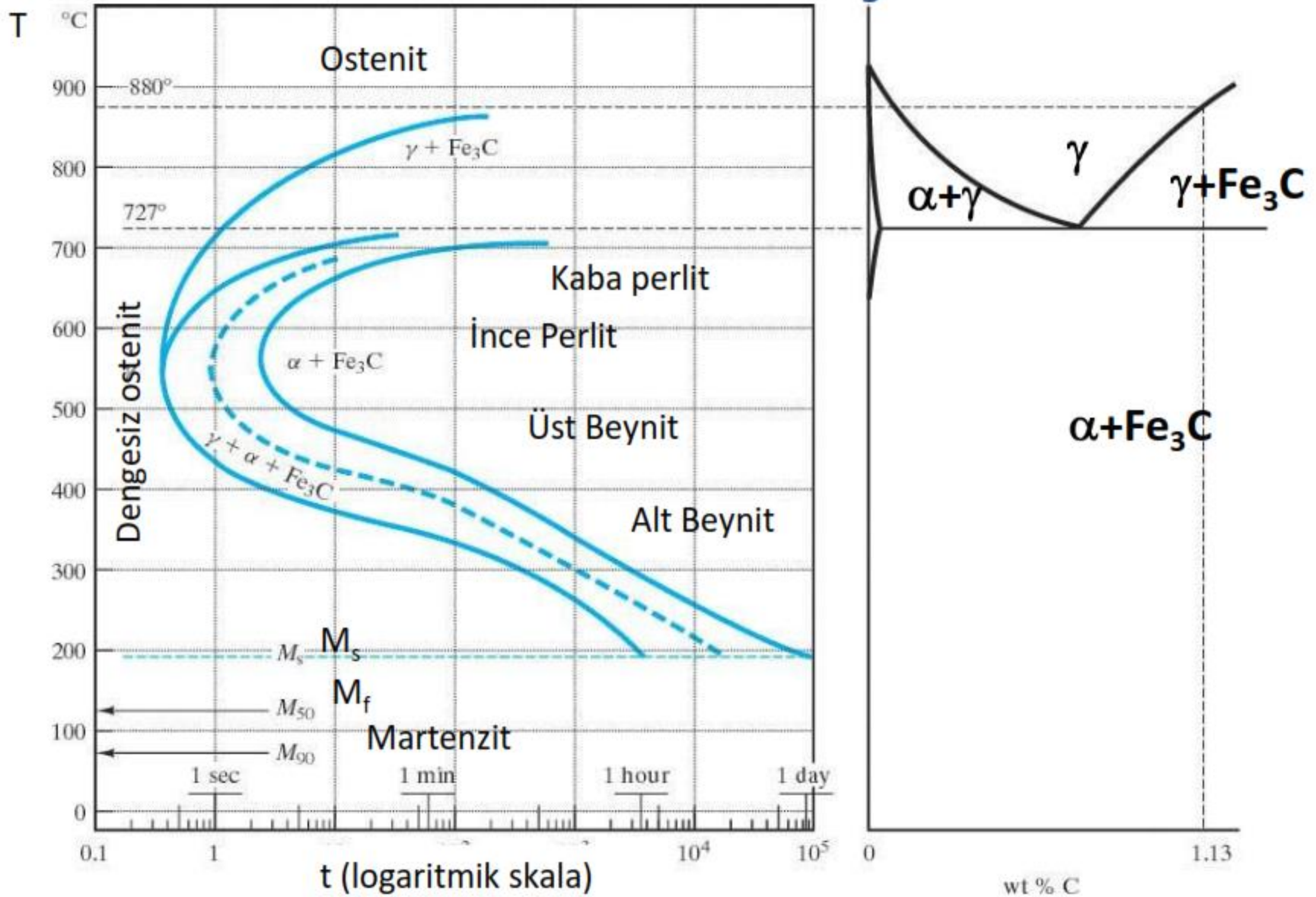


# Ötektoit altı çelik





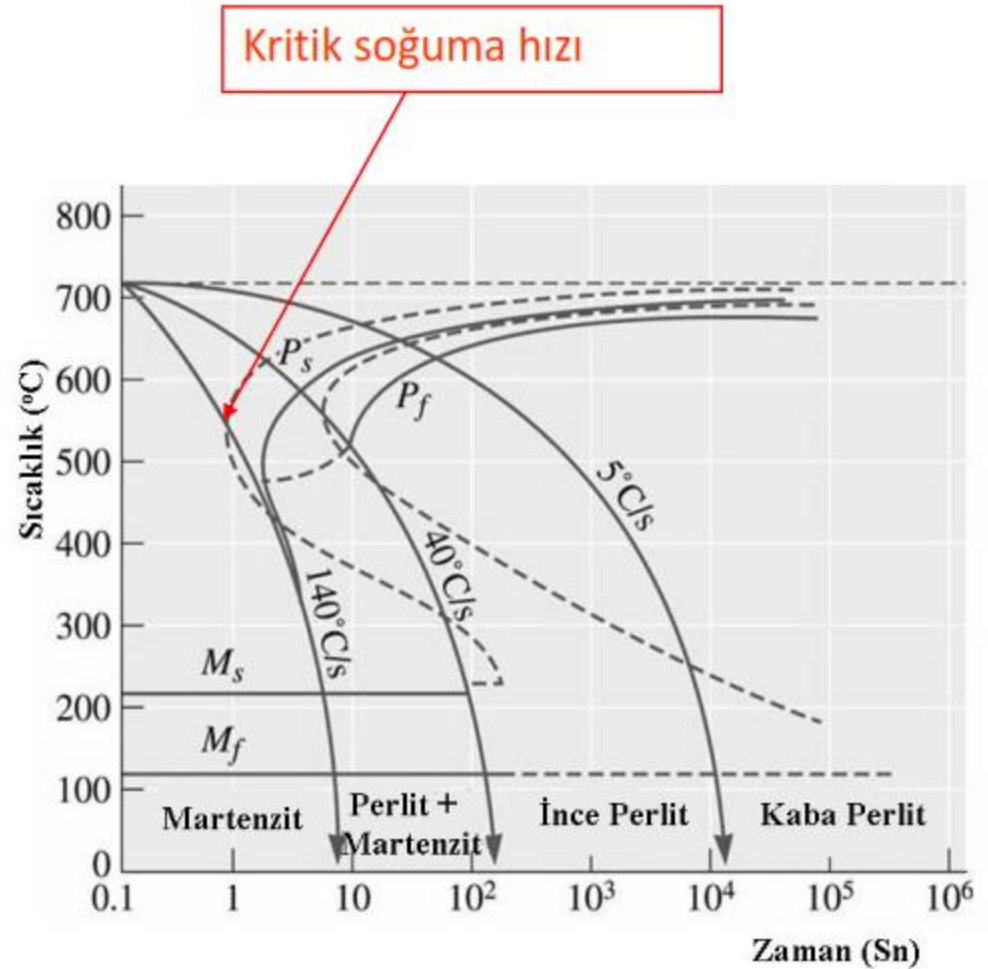
# Ötektoit üstü çelik

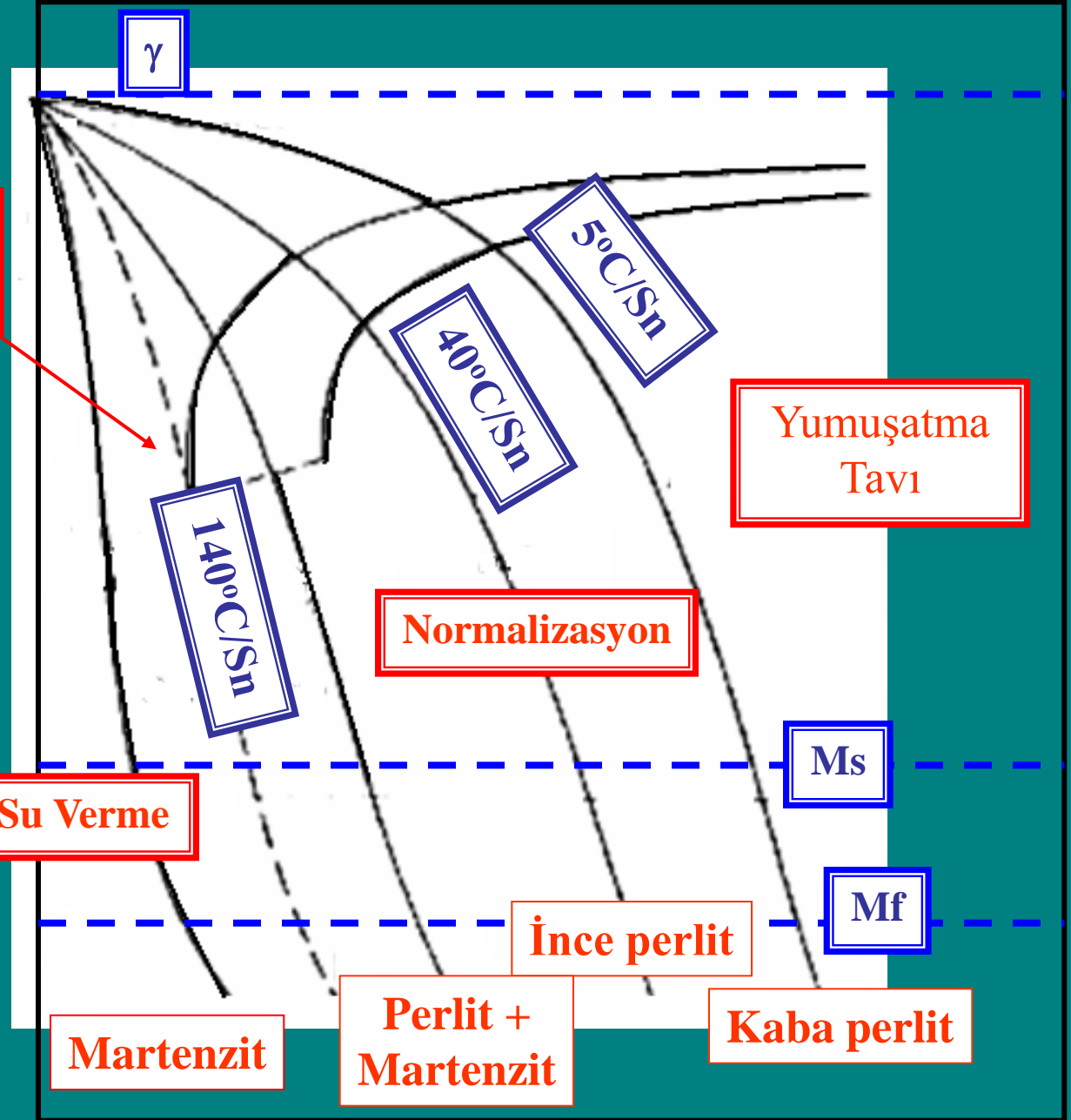




# Kritik soğuma hızı

- Yayınmalı veya yayınması dönüşüm olacağını belirleyen parametre soğuma hızıdır.
- Soğumanın kritik bir hızın üzerinde olması durumunda ostenit martenzite dönüşür.
- Daha yavaş soğuma hızlarında yayınma gerçekleşir ve soğuma hızına bağlı olarak yayınma perlit veya beyrit oluşabilir.





**Kritik soğuma hızı**

**Yumuşatma Tavlı**

**Normalizasyon**

**Su Verme**

**Ms**

**Mf**

**İnce perlit**

**Martenzit**

**Perlit + Martenzit**

**Kaba perlit**

**γ**

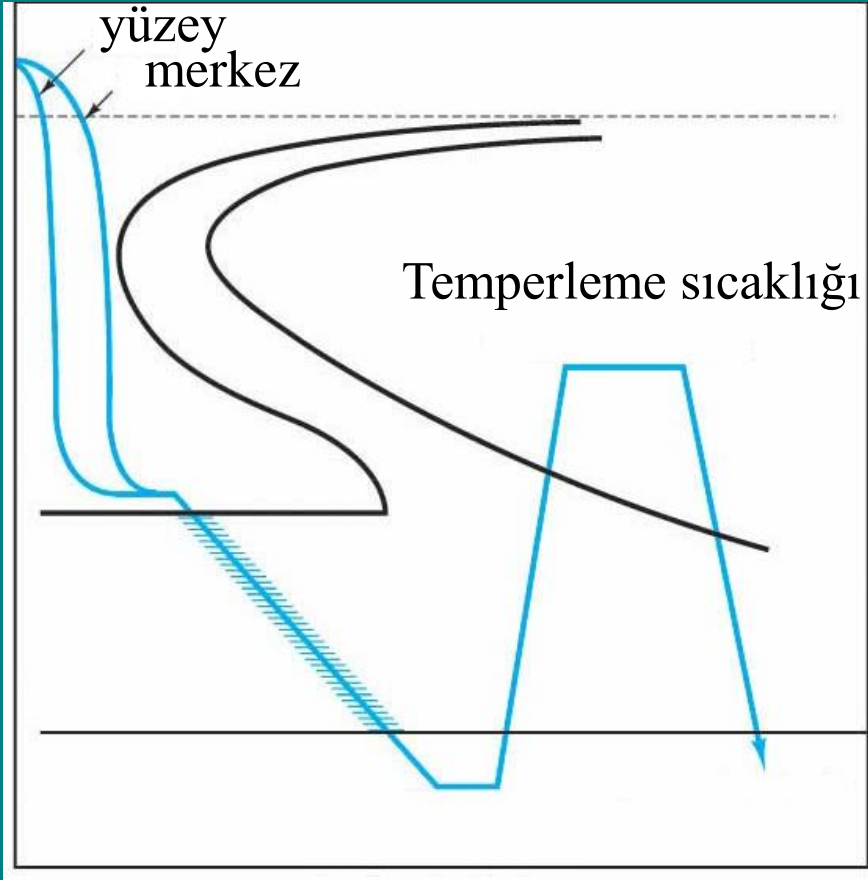
**5°C/Sn**

**40°C/Sn**

**140°C/Sn**

# Martemperleme (Martempering)

T



t (logaritmik skala)

- Martenzit oluşumu sırasında **çatlama ve kırılma risklerini azaltmak** amacıyla ostenit bölgesinden martenzit başlangıç sıcaklığının hemen üzerinde ani olarak soğutulur.
- Bu sıcaklıkta **iç ve yüzey sıcaklıkları eşitlenecek** ve beynit oluşum sıcaklığına girmeyecek şekilde bekletilir ve sonra **tekrar su verilir**.
- TEMPERLENMİŞ MARTENZİT**

# Ostemperleme (Austempering)

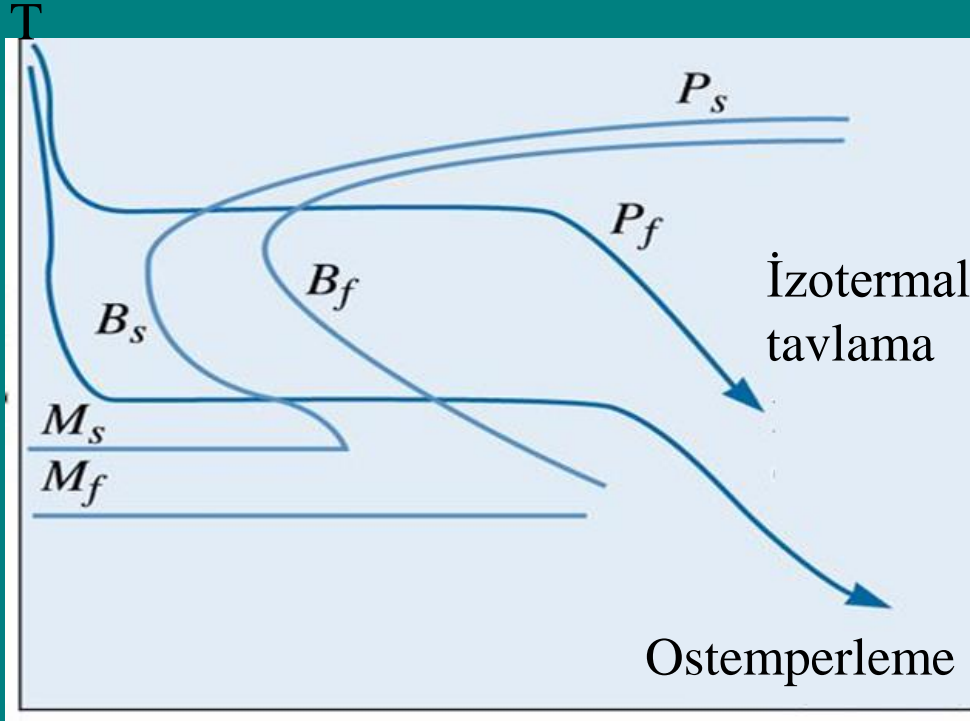


- Yapının **%100 alt beynite** dönüştürülmesi için yapılan ısıl işlemdir.
- Ostenit sıcaklığına ısıtılan malzeme **martenzit oluşum sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa su verilir.**
- Daha sonra **yeterince uzun süre bekletilen** dengesiz ostenit **%100 beynite** dönüştürülür.

**Not:** Karbonlu eliklerde beynit, sürekli soğutma ile elde edilemez. Beynit elde etmek için izotermal soğutma gereklidir.



# İzotermal tavlama (Isothermal annealing)



t (logaritmik skala)

- Çeliğin tamamen kaba perlitik bir yapıya dönüştürülmesi için yapılan izotermal işlemdir.
- **Önce ostenit bölgesinden dönüşüm sıcaklığına ani soğutma yapılır ve bu sıcaklıkta eğriyi kesecek şekilde beklenir.**
- Dönüşüm sonrası oda sıcaklığına soğutulur.

# Özet

Çelikte elde edilebilen fazlar:

- a) Üst beynit,
  - b) Martenzit,
  - c) Kaba perlit
  - d) Alt beynit
  - e) İnce perlit
- Sertten yumuşak yapıya doğru sıralayınız.
  - Sünekten gevrek yapıya doğru sıralayınız.
  - Farklı faz oluşumunu kontrol eden parametreleri yazınız.

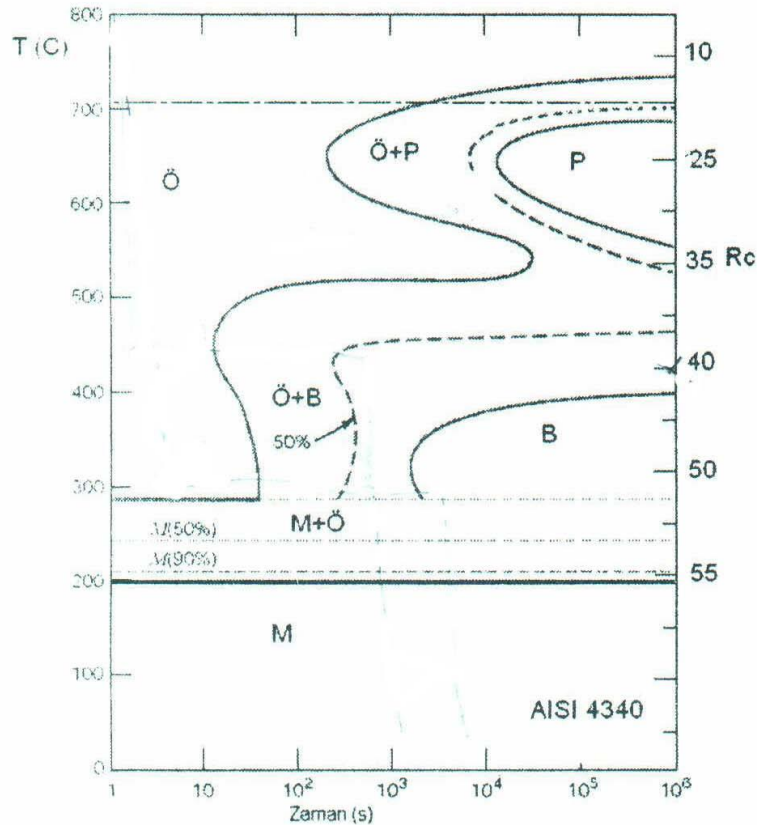
7.(10) ZSD diyagramı aşağıda verilen AISI 4340 çeliğinden imal edilen bir parçaya şu ısıl işlemler uygulanmıştır:

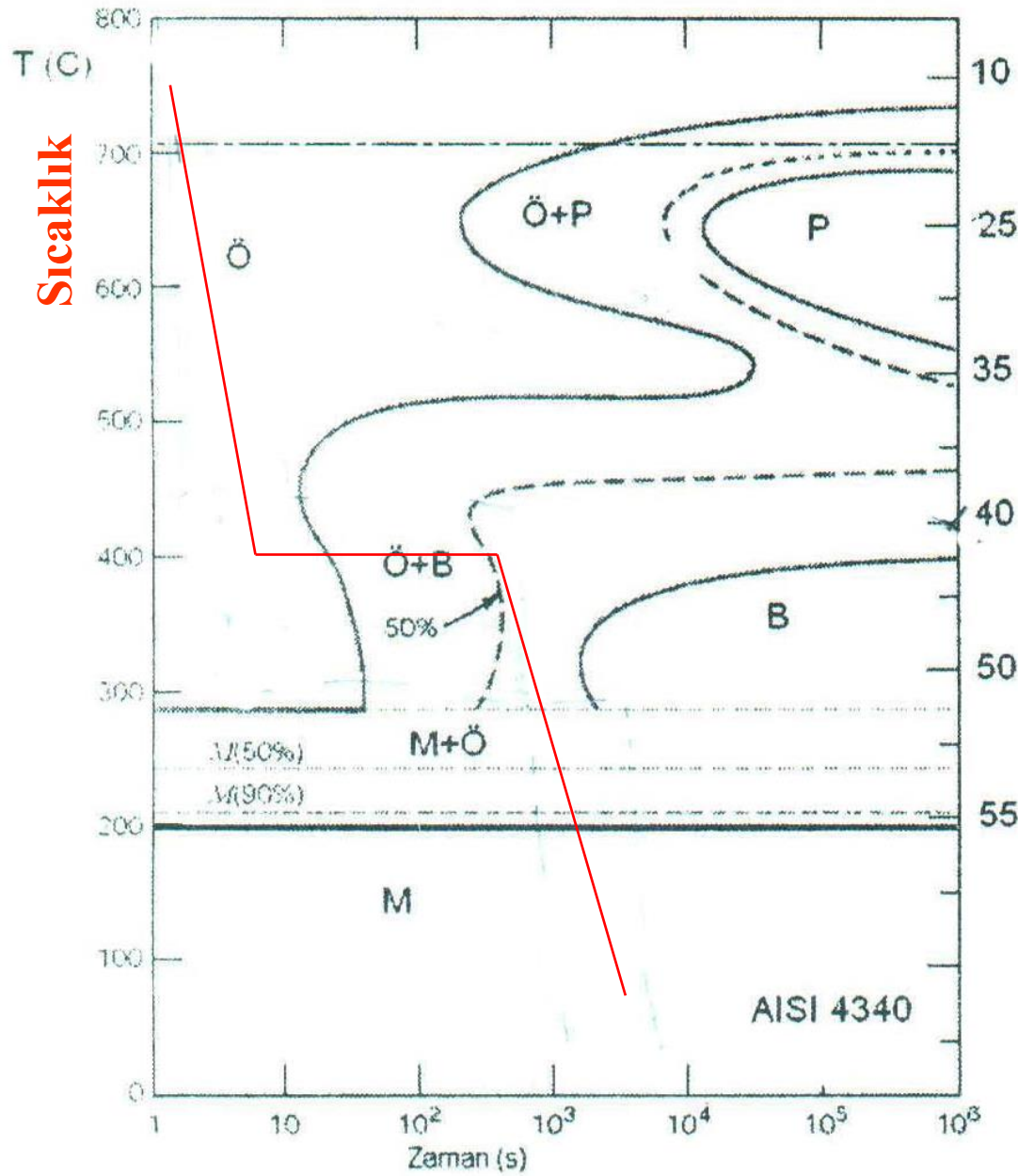
I. 800°C'ye ısıtılan parça ani olarak 450°C'ye soğutulmuş ve burada 10 dakika bekletildikten sonra oda sıcaklığına hızla soğutulmuştur.

II. 800°C'ye ısıtılan parça ani olarak 300°C'ye soğutulmuş ve burada 2 saat bekletildikten sonra oda sıcaklığına hızla soğutulmuştur.

a. Her iki ısıl işlemi ZSD diyagramında gösteriniz.

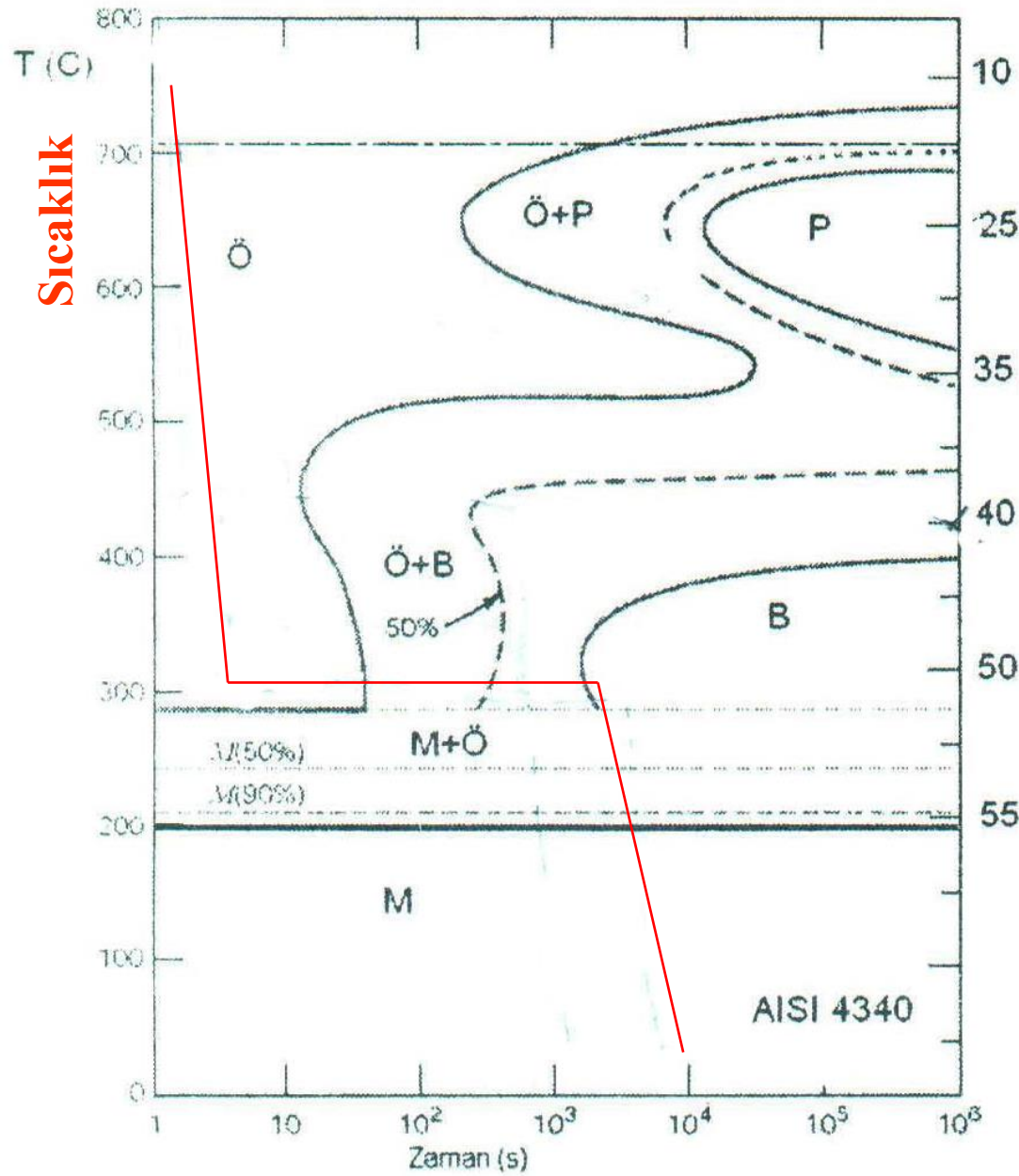
b. Bu iki ısıl işlem sonunda parçada oluşması beklenen mikroyapıları şematik olarak ayrı ayrı çiziniz, oluşması beklenen fazları ve iç yapıdaki oranlarını belirtiniz.





Sıcaklık

Rockwell sertliği



Sıcaklık

Rockwell sertliği



1050 çeliğinde aşağıdaki ısıl işlemler sonrası hangi mikro yapıların oluşacağını bulunuz.

a) 820°C ye ısıt, 650°C aniden soğut (su ver), 90sn tut, ve 25°Cye aniden soğut.

**Ferrit+Perlit**

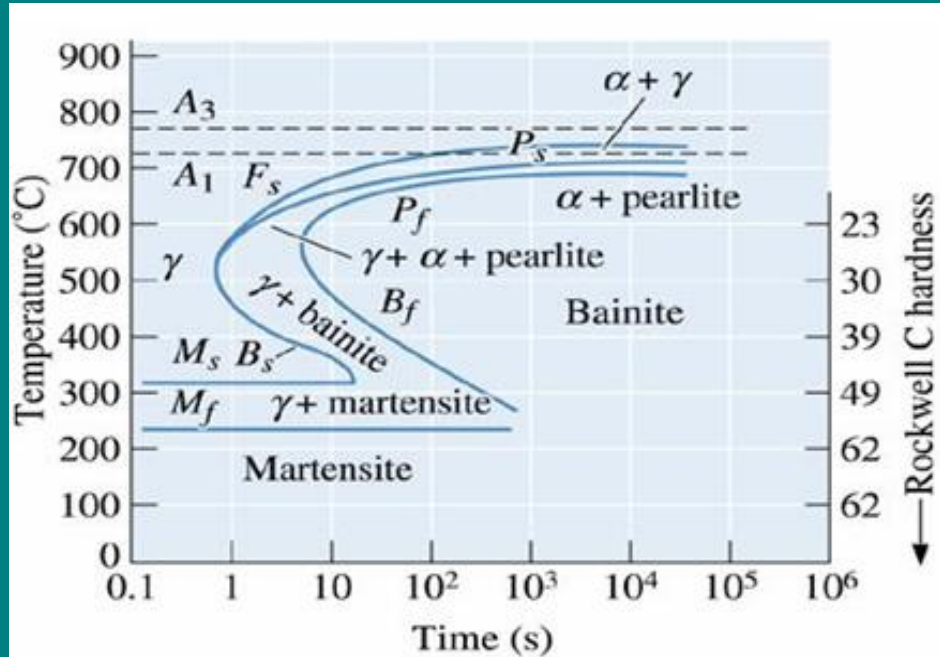
b) 820°C ye ısıt, 450°C aniden soğut (su ver), 90sn tut, ve 25°Cye aniden soğut. **Beynit**

c) 820°C ye ısıt, 25°Cye aniden soğut. **martenzit**

d) 820°C ye ısıt, 720°C aniden soğut (su ver), 100sn tut, ve 25°Cye aniden soğut. **Ferrit + martenzit**

e) 820°C ye ısıt, 720°C aniden soğut (su ver), 100sn tut, ve 400°Cye aniden soğut, 500sn tut, ve 25°C aniden soğut. **Ferrit + beynit**

f) 820°C ye ısıt, 720°C aniden soğut (su ver), 100sn tut, ve 400°Cye aniden soğut, 10sn tut, ve 25°C aniden soğut. **Temperlenmiş martenzit**



**SERTLEŞEBİLİRLİK**

# Sertleşebilirlik (Sertleşme kabiliyeti) (hardenability)

- Çeliklerde soğuma hızı (su verme-quenching) arttıkça, sertlik artar.
- Parçalar kalınlık arttıkça, iç kısımlar martenzit oluşumu için gereken kritik soğuma hızlarına ulaşamayabilir.
- Sadece kritik soğuma hızından daha yüksek hızlarda soğuyan bölgelerde martenzit oluşur.
- Bu nedenle iç ve dış kısımlarda önemli sertlik farkları olabilir.
- “Sertleşme kabiliyeti”, malzemenin sertleştirme işlemi esnasında ne kadar derine sertleşebildiğinin gösteren bir kavramdır.

# Sertleşebilirlik

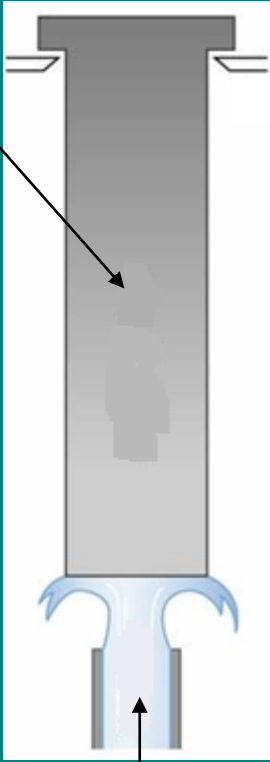
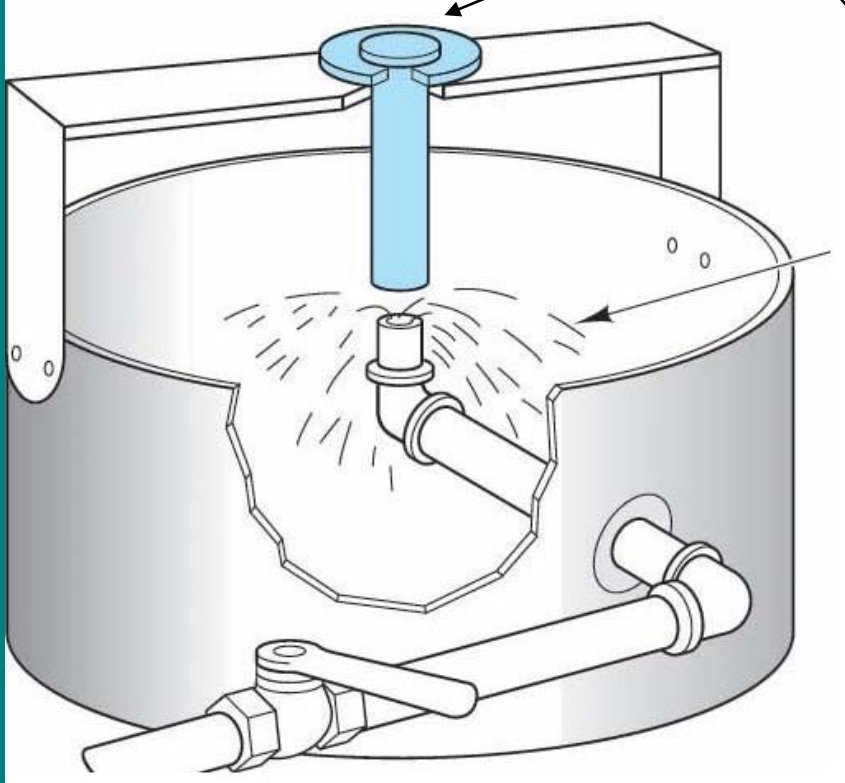
- C oranı düştükçe burun sola kayar ve belli bir değerde martenzit oluşumu için gereken hıza pratik olarak ulaşmak mümkün olmaz.
- **Pratikte %0.25 tan az olan çeliklere su verilmez.**
- Çünkü, orta kısımları hale yumuşak kalma problemi yaşanır.
- Büyük parçaların orta kısımlarınının dahi sertleşebilmesi için çeliğin kritik soğuma hızınının düşürülmesi diğer bir deyişle eğrinin sağa doğru kaydırılması gerekir.
- Bu, çeliğin Cr, Mo, V vs, gibi alaşım elementleri ile alaşımlandırılması sonucu sağlanabilir.

# Jominy deneyi

- Sertleşme kabiliyeti Jominy deneyi ile ölçülür.
- Ostenit sıcaklığına kadar ısıtılan numune bir ucundan soğuk su ile soğutulur.
- Ucundan itibaren soğuma hızı mesafeye bağlı olarak azalır.
- Numune, uç kısmından itibaren sertlik değerleri ölçülür.



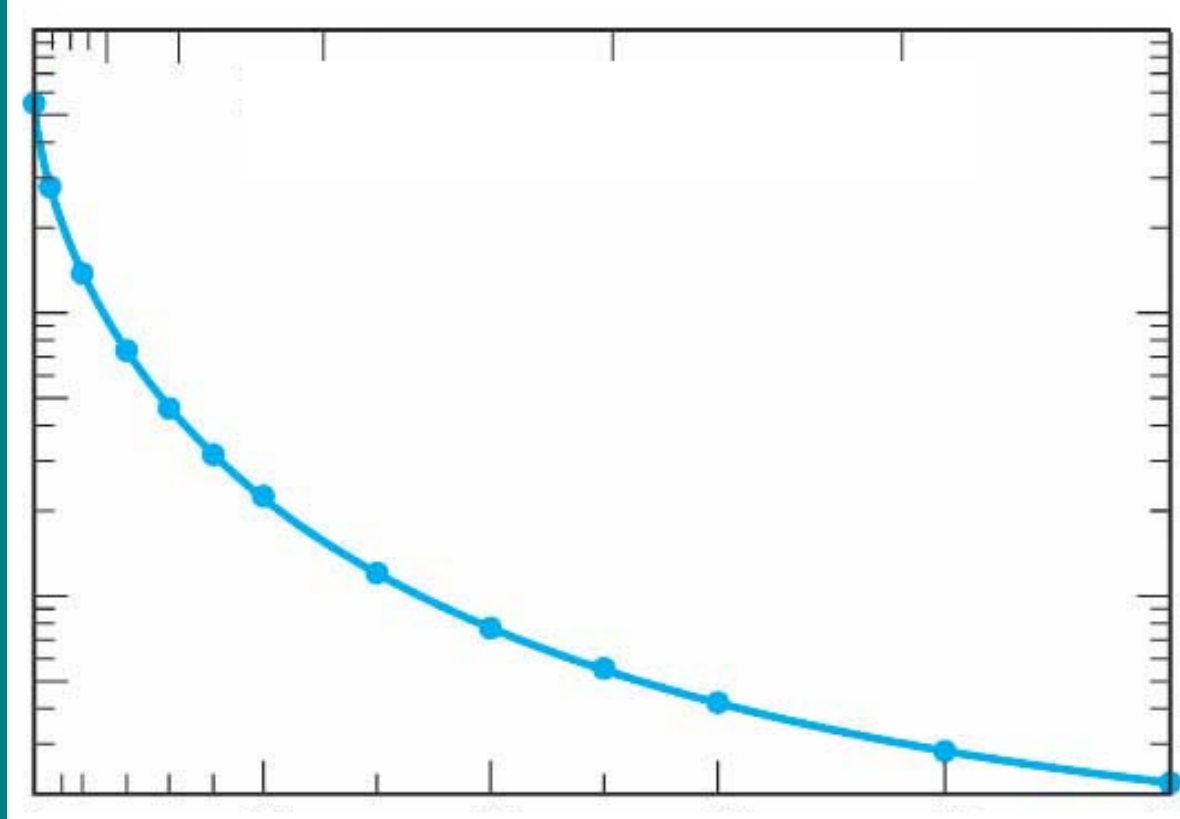
# Jominy numunesi



Su

# Soğuma hızı-mesafe değişimi

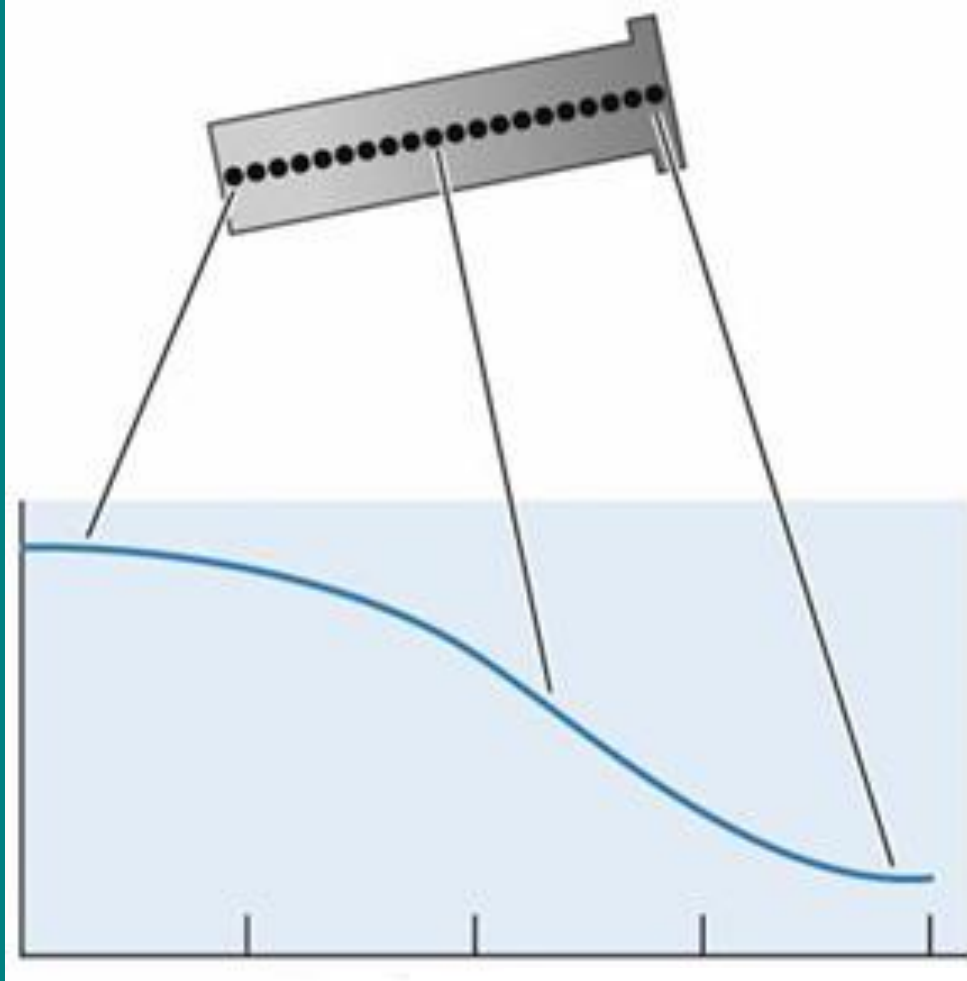
Soğuma hızı



0

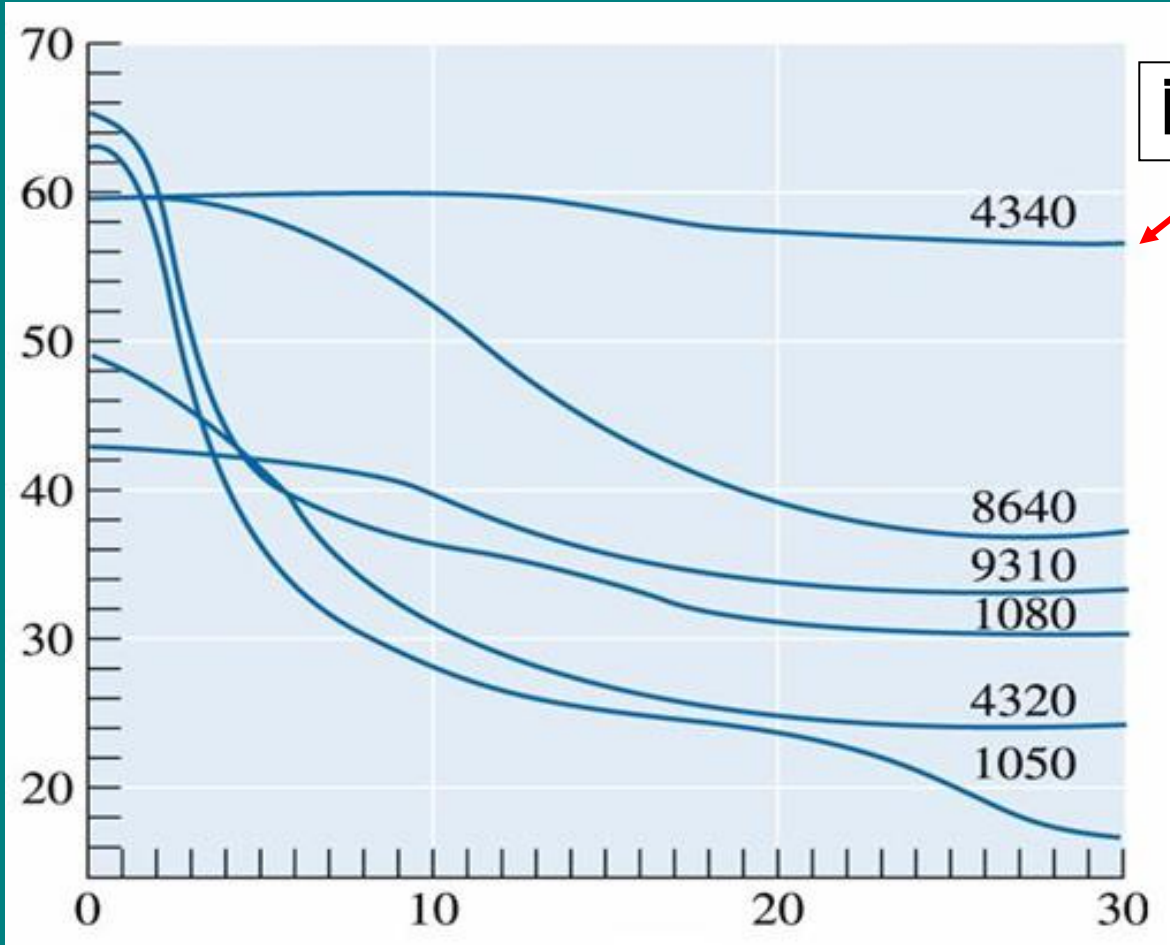
Jominy mesafesi  
(Su verilen uçtan mesafe)

Rockwell sertliği



Jominy mesafesi  
(Su verilen uçtan mesafe)

Rockwell sertliği



İdeal durum

Jominy mesafesi (1/16 inch)

# Sertleşebilirlik

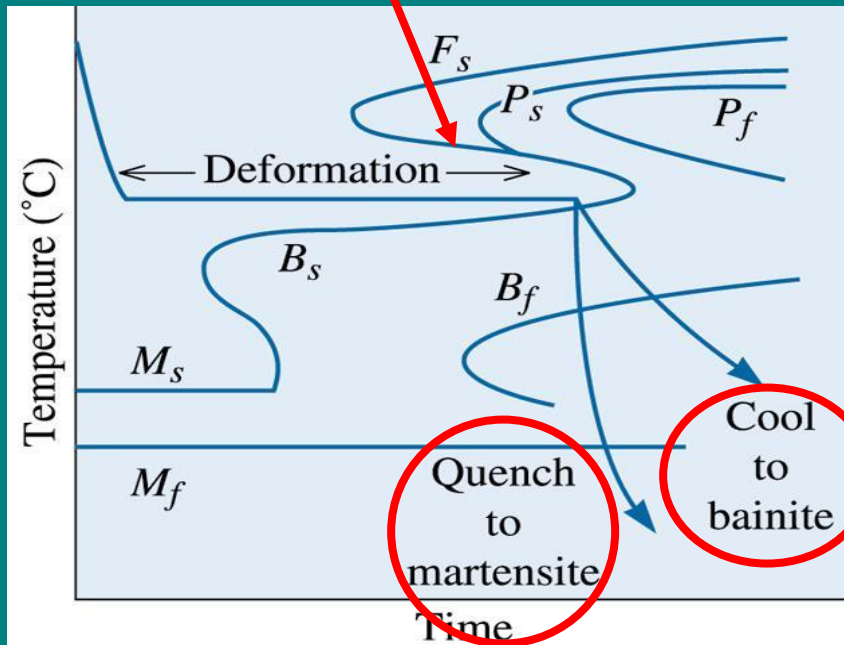
- Mesafeye bağlı olarak sertlik değerinde azalma görülür.
- Mesafenin artması ile yüksek sertlik değerleri gösteren malzemelerin sertleşme kabiliyetleri daha iyidir.
- Soğuma hızı çok arttırıldığında ise çatlama riski doğar.
- Bu nedenle Cr, Mo, V, gibi bazı alaşım elementleri katılarak sertleşebilme kabiliyetleri arttırılır.
- En iyi sertleşebilirliği 4340 göstermektedir.



# Ausforming

A thermomechanical heat treatment in which austenite is plastically deformed below the A1 temperature, then permitted to transform to bainite or martensite.

The bay area obtained by alloying



- First, quench the steel austenite region to Bay area,
  - Then apply forming processes avoiding to enter pearlite and/or bainite region,
- Then;
- If quench to below  $M_f$ : martensite forms.
  - If cooled slowly: bainite forms

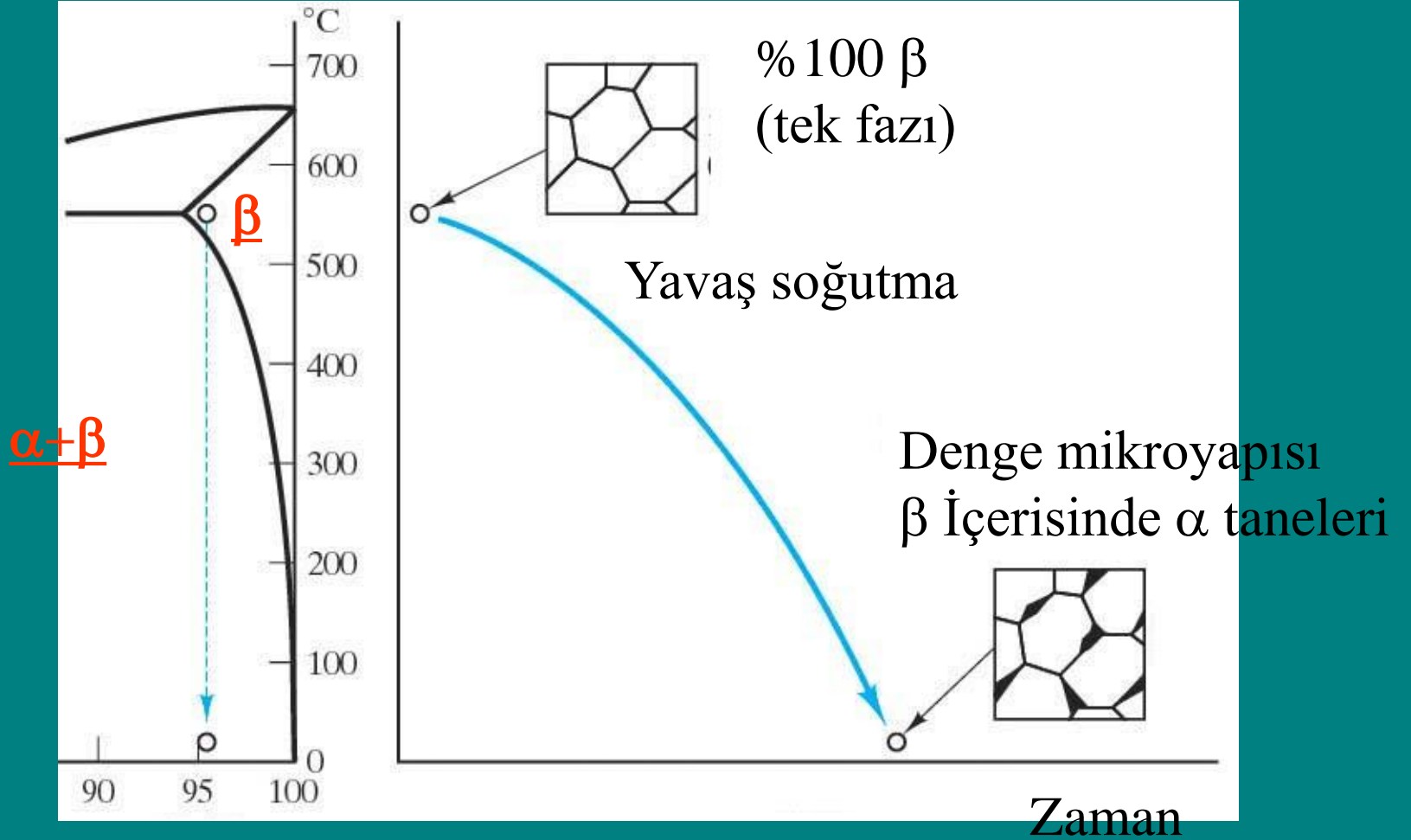
# ÇÖKELME SERTLEŞMESİ

# ökölme sertleşmesi

- İç yapıda, dislokasyon hareketlerini engelleyerek dayanımın artmasına sebep olan çok küçük ve sert ikinci fazların çökeltilmesi işlemidir.

# Yavaş soğutma

T



# Çökeltme sertleşmesinde adımlar

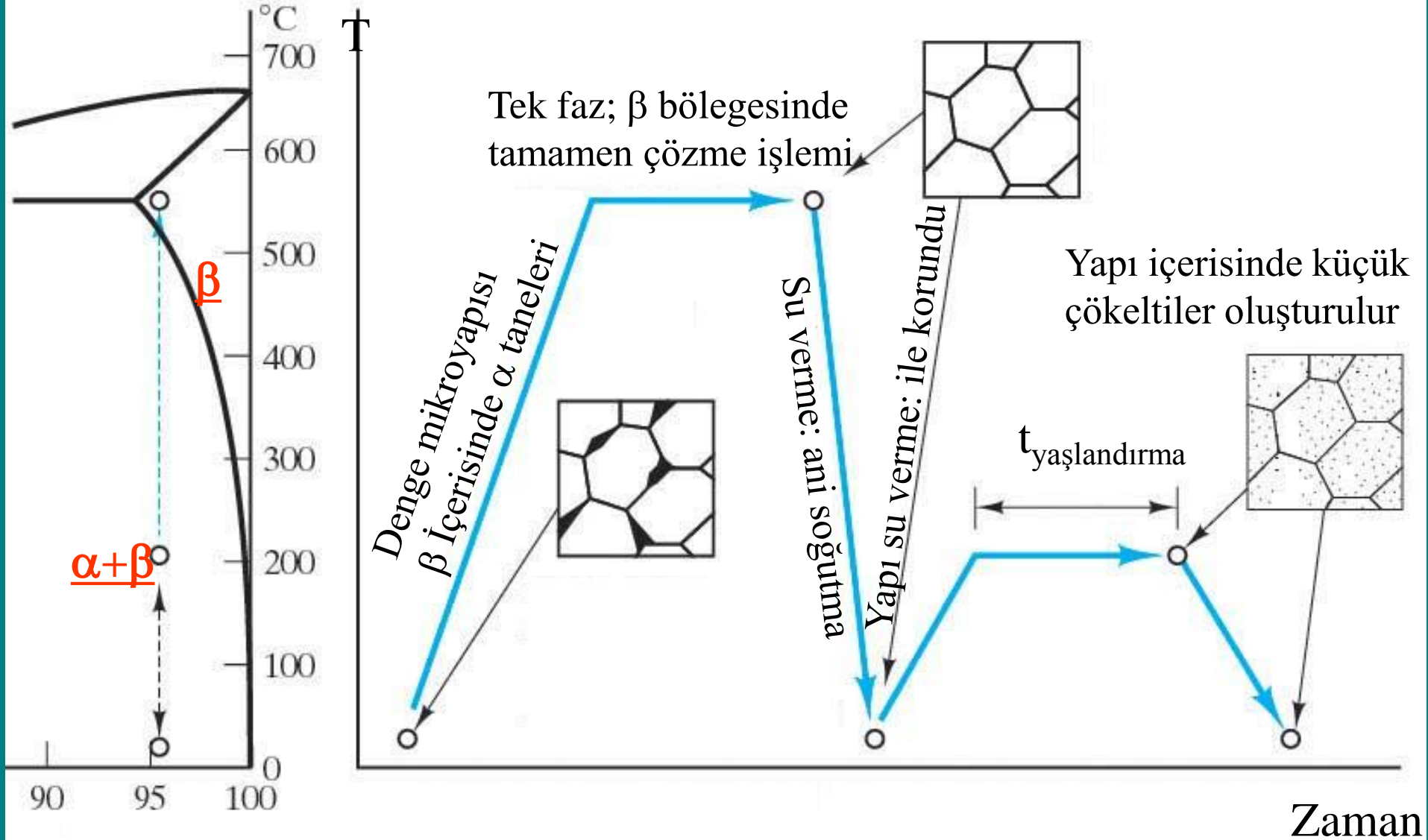
1. **Çözündürme işlemi** (solution treatment): Malzeme tek faz bölgesine ısıtılarak çökelecek olan sert 2. faz, tek faz içerisinde tamamen çözülür.
  2. **Ani soğutma (Quenching)**: Oda sıcaklığına ani soğutma ile 2. fazın çökmesi engellenir ve **aşırı doymuş katı çözelti elde edilir**.
  3. **Yaşlandırma işleminde**; aşırı doymuş katı çözelti, çözündürme sıcaklığından daha düşük olan **yaşlandırma sıcaklığına** tekrar ısıtılarak çok küçük **bağdaşık (koherent) 2. faz tanecikleri çökeltilir**. (Bu çökelti dislokasyonlara engel teşkil ederek malzemenin dayanımını artırır).
- ❖ **Aşırı yaşlanma**: çökelmelerin çok büyüyerek bağdaşıklığın (koherentliğin ) kaybolması (bu durum istenmez).





- Yaşlandırma işleminde; **yaşlandırma sıcaklığı oda sıcaklığında** gerçekleşiyorsa, buna **doğal yaşlandırma** (natural aging), **seçilen bir sıcaklıkta fırın içerisinde** gerçekleşiyorsa **yapay yaşlandırma** (artificial aging) adı verilir.
- **Aşırı yaşlanma**: çökelmelerin çok büyüyerek bağdaşıklığın (koherentliğin ) kaybolması (bu durum istenmez).

# Tipik bir yapay yaşlandırma ısıl işleminin şematik gösterimi



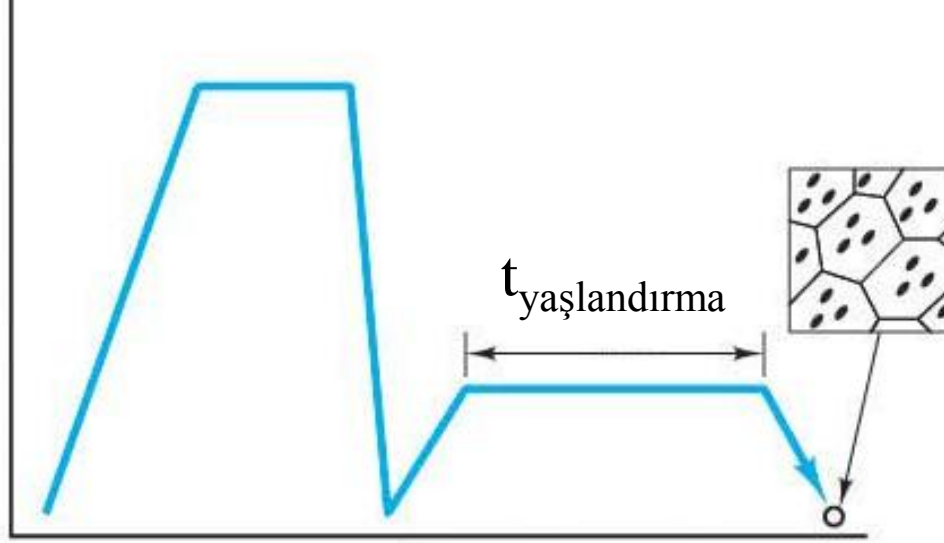
Bileşim

# İç yapı

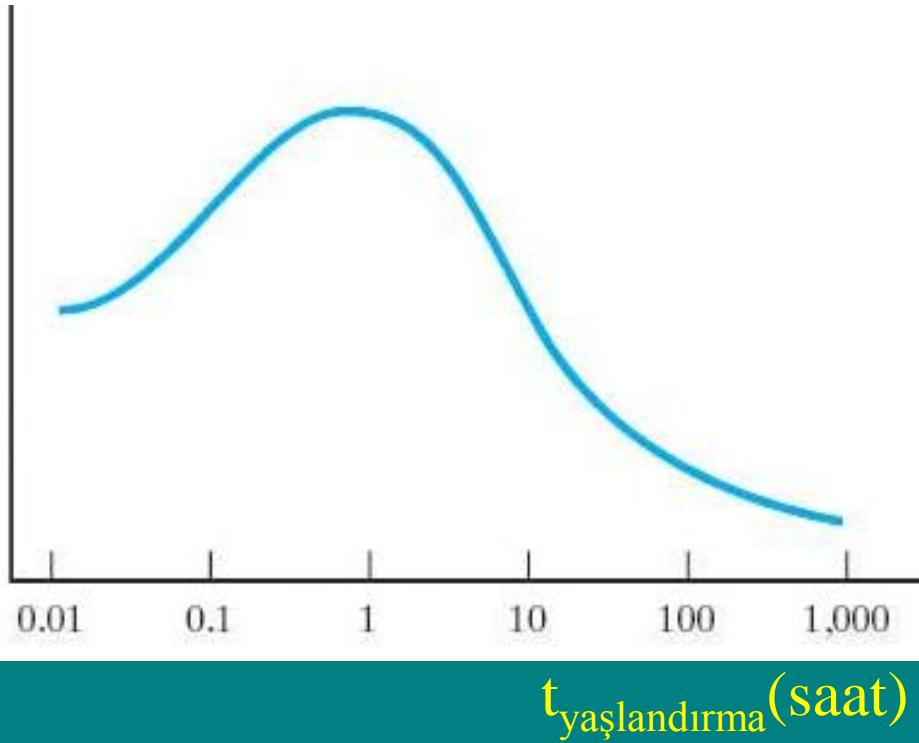
- Çökeltmenin **ilk aşamasında**, çok küçük **koherent-GP bölgeler** (Guinier preston zones) oluşur,
- **GP bölgeleri** genelde **dislokasyon altındaki boşluklarda** çekirdeklenir (sistemin enerjisini düşürmek için) ve **dislokasyon hareketlerini engeller**.
- Bu bölgeler, **daha büyük bağdaşık (koherent) çökeltilere** dönüşür. Bağdaşık çökelti kafesi aşırı **gererek dayanım artışı** oluştururlar.
- Daha sonra sıcaklığın veya zamanın gerekenden yüksek tutulması halinde **tane büyümesi** gerçekleşir. Dayanım düşmeye başlar.

- Yaşlandırma ısıl işleminde sürenin iç yapıya ve dolayısıyla malzeme özelliklerine etkisinin şematik gösterimi.

Sıcaklık



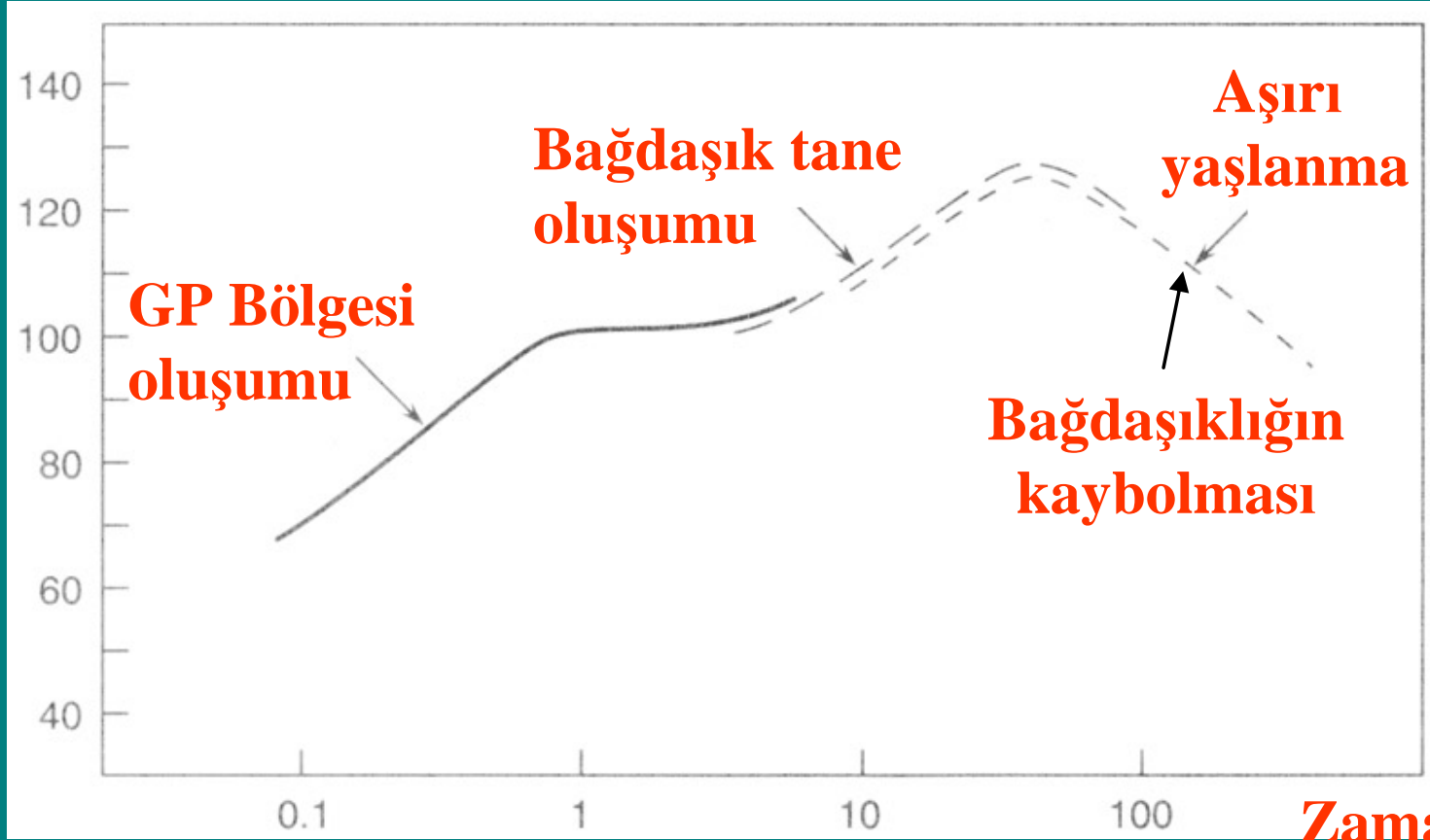
Sertlik



$t_{\text{yaşlandırma}}$  (saat)

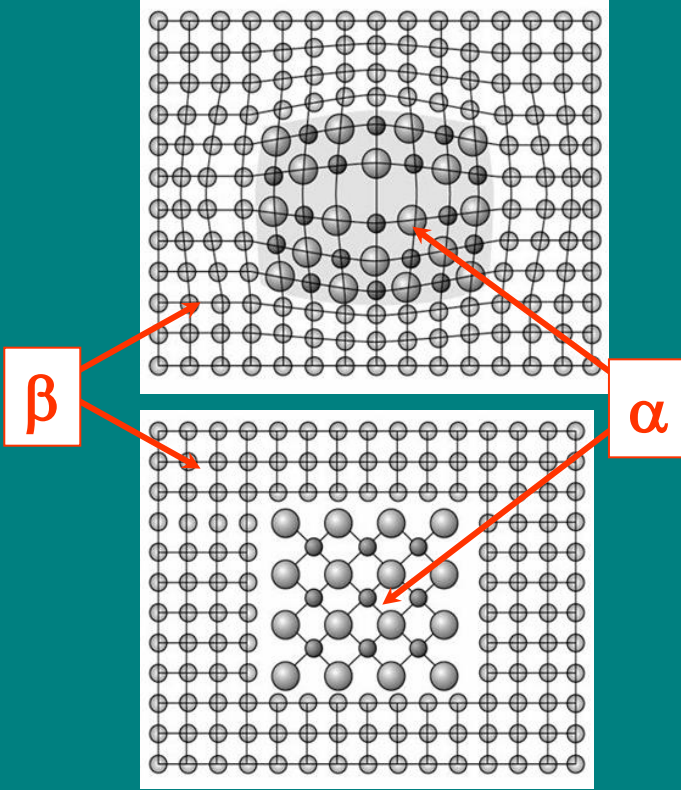


**Sertlik**



**Zaman**

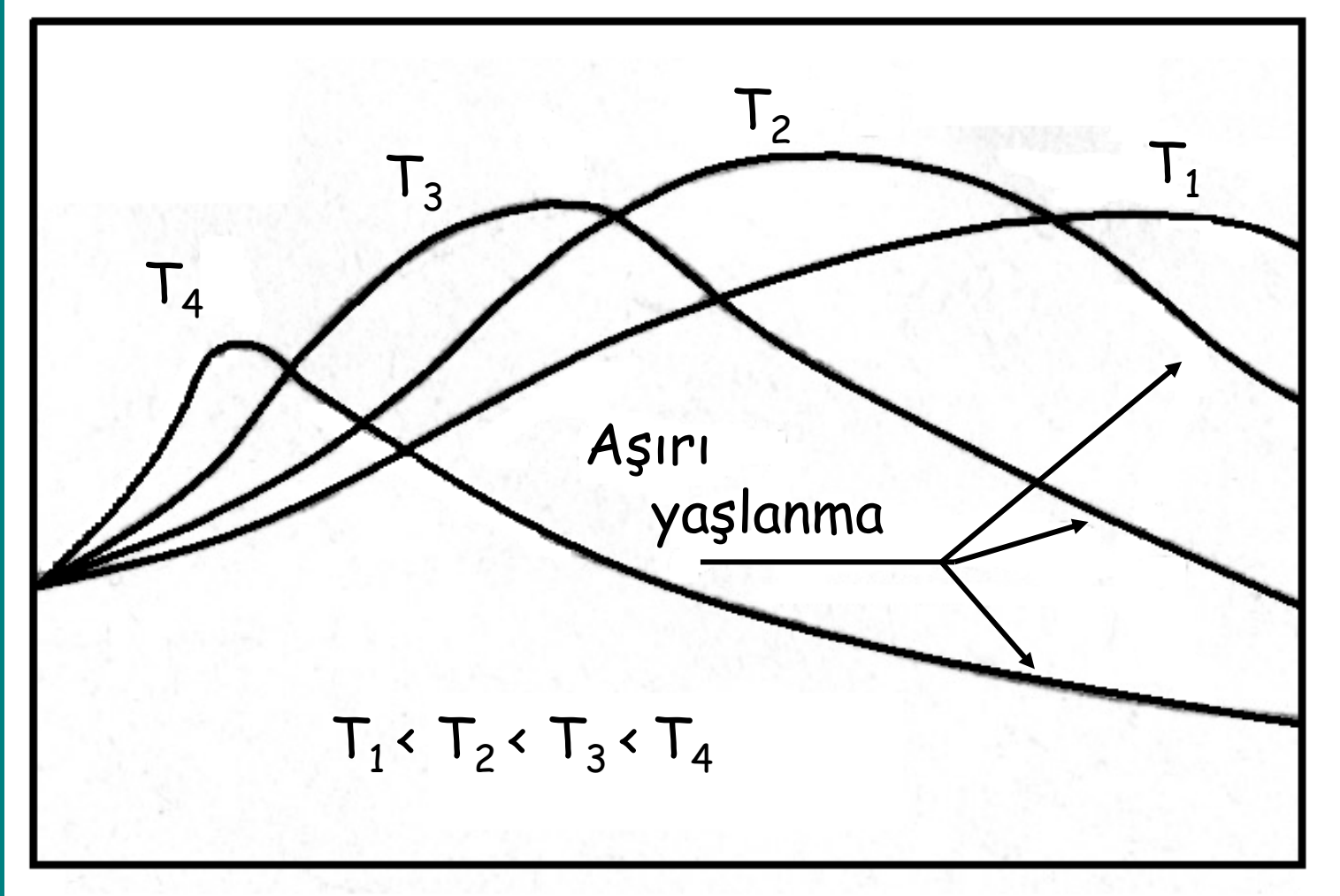
# Aşırı yaşlanma



- **Aşırı büyüme:** Çökeltilerin çok büyümesi ile oluşan gerilmeler artık taşınamaz ve bağdaşıklık sona erer.
- Çökeltinin sertleştirme etkisi azaltır.
- **Yeterince uzun süre** beklendiğinde **ilk yapıya geri dönülür.**

# Yaşlandırma ısıl işleminde sıcaklığın malzeme özelliklerine etkisinin şematik gösterimi

Sertlik



⊕ Zaman

# YÜZEY SERTLEŞTİRME

# Çeliğin Yüzey Isıl İşlemleri

- Birbirleri ile temas halinde çalışan makina parçalarının yüzeylerinin sert, iç kısımlarının ise sünek olması istenir.
- Bu nedenle dış kısımları sertleştirilmiş, iç kısımları ise normalize durumda olan çelikler tercih edilir.
- Yüzey sertleştirme işlemleri krank mili, kamalı mil, kam mili, dişli çark, saplama, kavrama parçaları, zincir parçaları gibi parçalara uygulanır.
- Yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda parçanın yüzey kısmında basma gerilmeleri, iç kısmında ise çekme gerilmeleri oluşur.
- Bu nedenle yüzey sertleştirilmiş parçaların aşınma dayanımlarının yanı sıra yorulma dayanımları da yüksektir.



# Çeliğin Yüzey Isıl İşlemleri

- ▼ İki temel yüzey sertleştirme yöntemi vardır:

**Isı Birikimi İle:** Sertleşebilir bir çeliğin sadece yüzeyini ısıtıp su vererek sertleştirmek.

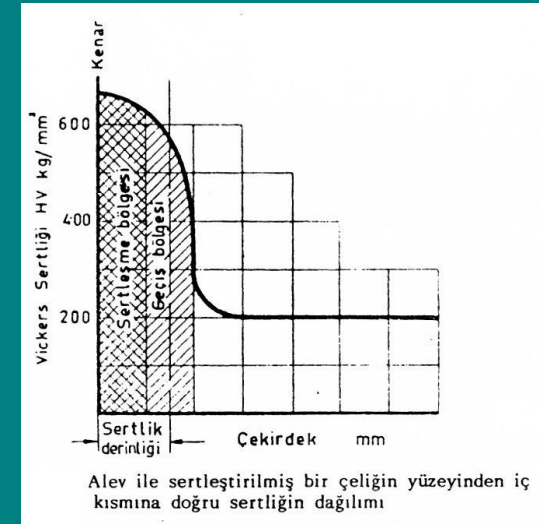
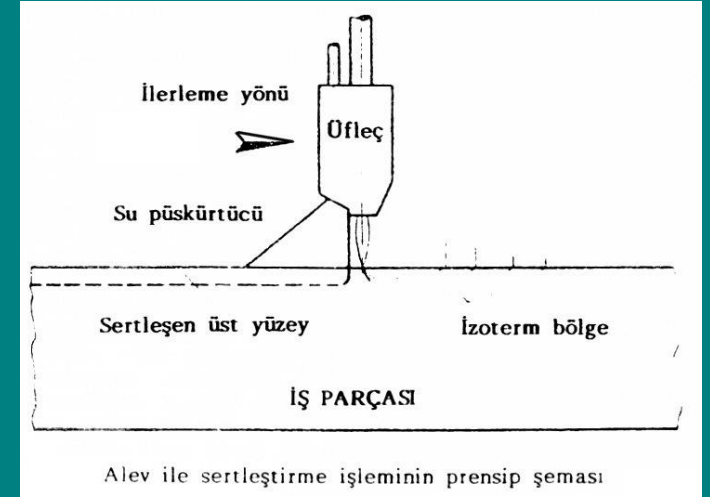
**Yayınım Yolu İle:** Alaşımsız düşük C'lu çeliğin yüzeyini C yayınımı yoluyla alaşımlayarak sertleştirmek.

# Isı Birikimi Yöntemi - Alev

C içeriği %0,35-0,60 olan çeliklere uygulanır.

## Alev ile Yüzey Sertleştirme

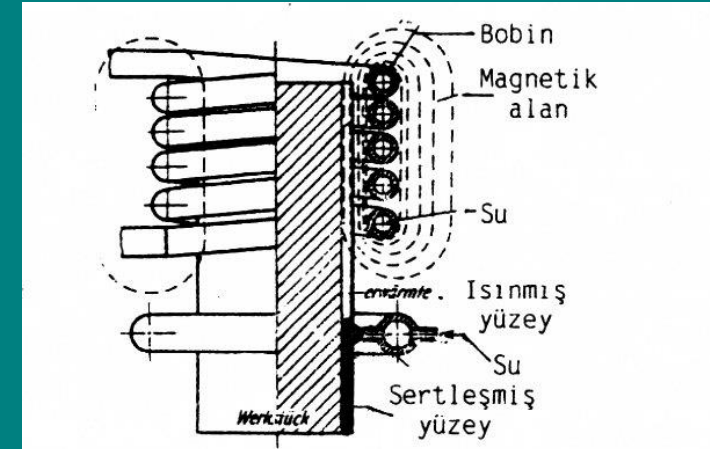
- Çeliğin yüzeyi oksii-asetilen üfleçleri ile ısıtılır. Kullanılan oksijen karışımına göre 3000-3200°C alev sıcaklığına ulaşılır.
- Üfleç tüm yüzeyin üzerinde dolaşarak ısıtır. Yüzeye ya su püskürtülür veya küçük parçalar suya atılabilir.
- Büyük parçalarda hareketli üflecin ısıttığı bölgelere yine hareketli bir sistem yardımıyla su püskürtülür.



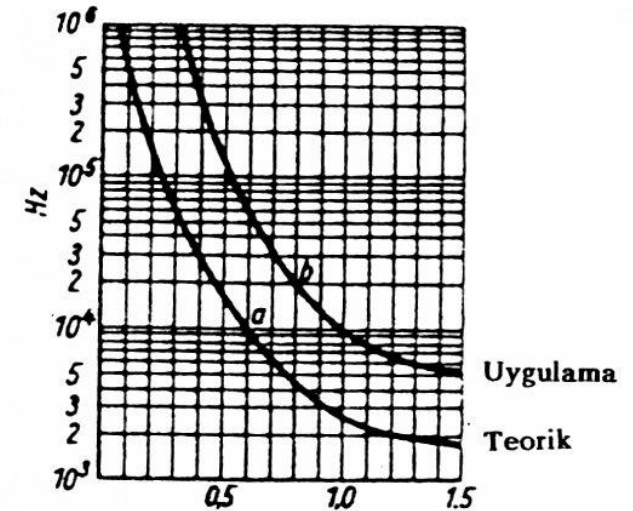
# Isı Birikimi Yöntemi - Endüksiyon

## Endüksiyon ile Yüzey Sertleştirme

- Parçanın yüzey kısımlarında oluşturulan endüksiyon akımları ile ısıtma yapılır.
- İş parçası ince bakır borudan yapılmış, yüksek frekanslı akım ileten bir bobinin içinde tutulur. Bobinin meydana getirdiği manyetik alan parçanın yüzeyinde aynı frekansta fakat ters yönde endüksiyon akımları oluşturur.
- Bu endüksiyon akımları parçanın yüzeyinde çok daha yoğundur ve parça yüzeyinin çok hızlı şekilde ısınmasını sağlar.
- Ostenit sıcaklığına ısınan parçanın yüzeyine su püskürtülerek sertleştirme işlemi tamamlanır.



Endüksiyon ile yüzey sertleştirme prensip şeması

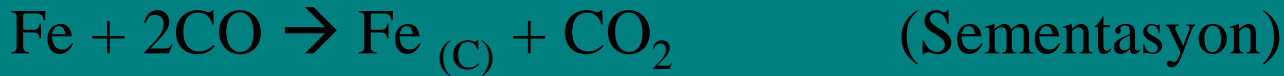


Sert tabaka derinliğinin frekans ile değişimi

# Yayınım Yöntemi - Sementasyon

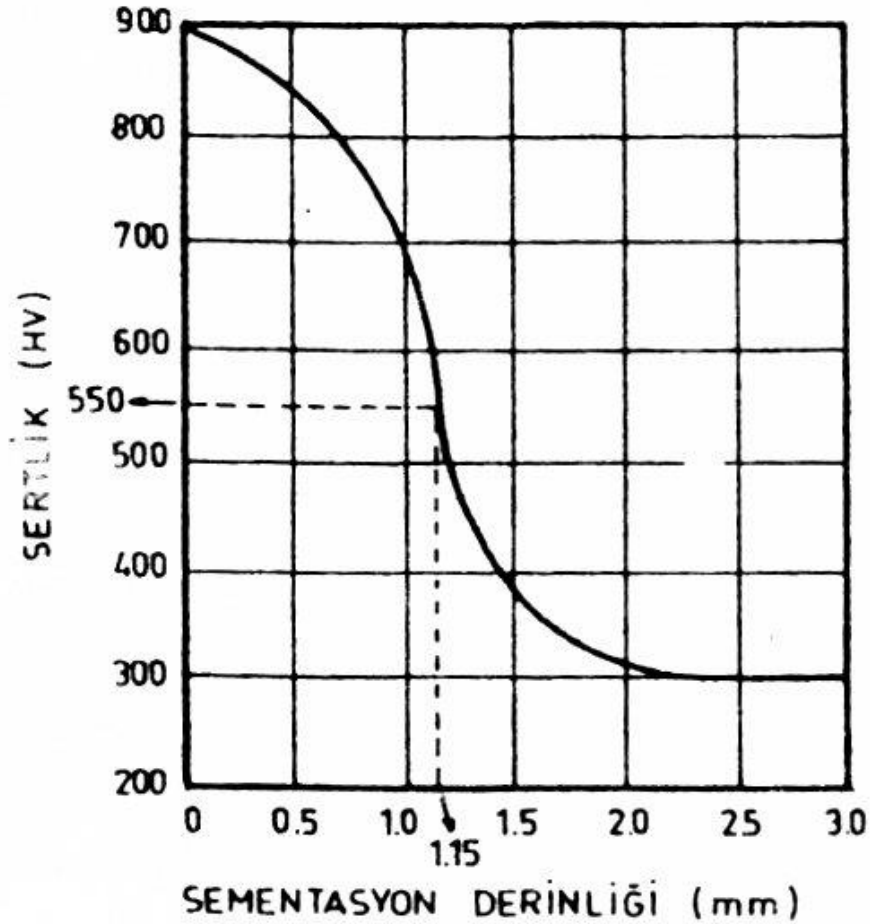
## Sementasyon ile Yüzey Sertleştirme

- Düşük C'lu çelik parçanın yüzeyine C emdirilmesi ile yüzey sertleştirilir.
- CO içeren bir ortamda 850-950°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir.

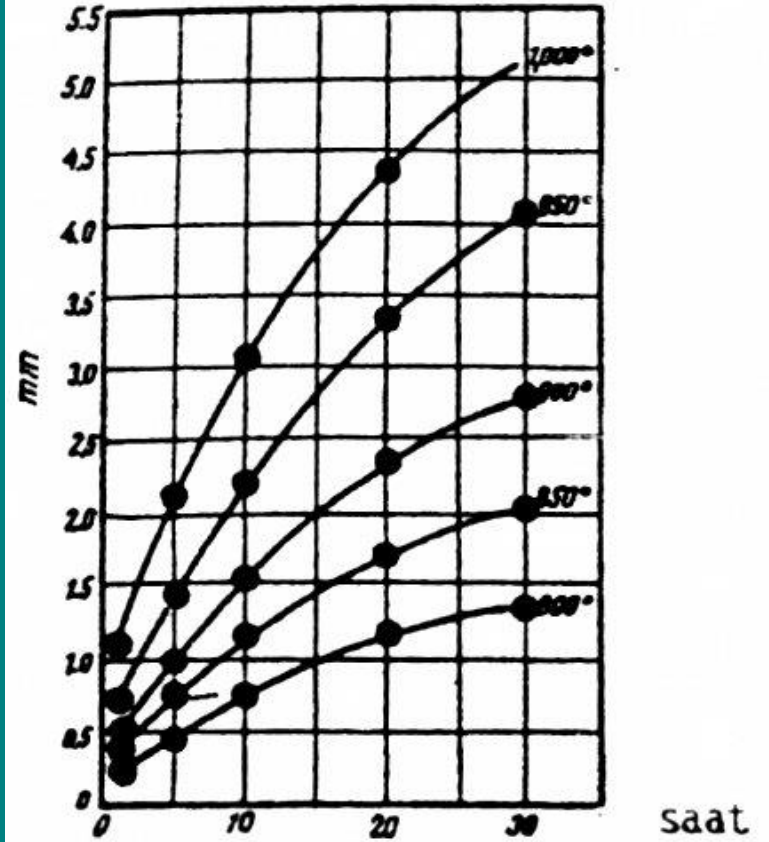


- CO, çelik yüzeyinde parçalanır ve oluşan atomsal C çelik tarafından absorplanır. Daha sonra çeliğin içine doğru yayınır.

# Yayınım Yöntemi – Sementasyon



Sertliğin semantasyon derinliği ile değişimi



Semantasyon derinliğinin işlem süresi ve sıcaklığı ile değişimi



## Sementasyon Yöntemleri

### 1.Katı Ortamda (Kutu) Sementasyon

- Çelik veya dökme demir bir kutu içinde, iş parçası odun kömürü ve reaksiyon hızlandırıcı maddelerden oluşan karışımın içine gömülür.
- Ekonomik bir yöntemdir.
- İnce sementasyon tabakası oluşturmak zordur.

# Yayınım Yöntemi - Sementasyon

## 2.Tuz Banyosunda Sementasyon

- Banyonun bileşimi sementasyon derinliği ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak seçilir.



- Bu reaksiyonlar sırasında C ile birlikte az miktarda N da çelik yapısına yayınır ve fazladan bir sertlik artışı sağlar.
- Banyo sıcaklığı 900-960°C arasındadır.
- İş parçaları banyoya daldırılmadan önce ön ısıtmaya tabi tutulur.
- Seri imalata uygun bir yöntemdir.
- Siyanür tuzları zehirli olduğundan, dikkatli olunmalıdır.

# Yayınım Yöntemi - Sementasyon

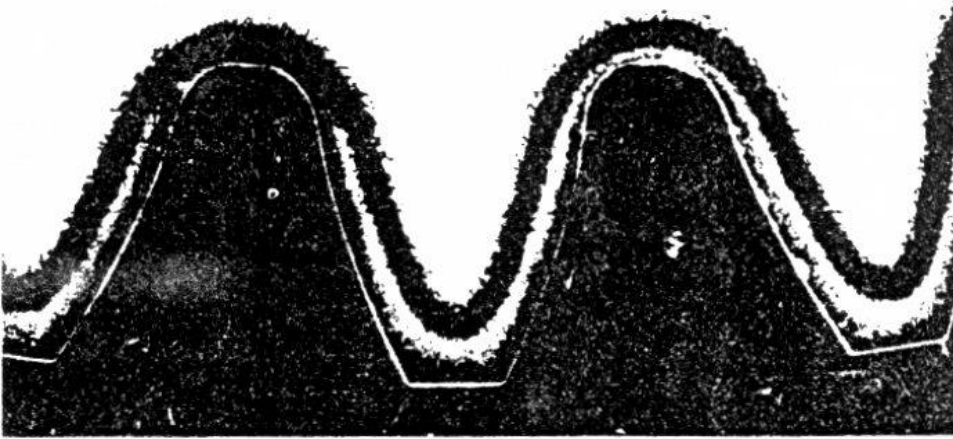


Ötektoidüstü

Ötektoid

Ötektoidaltı

Semantasyon tabakası boyunca karbon derişikliğinin değişimi



Semante edilmiş bir dişli çark kesiti üzerinde sementasyon tabakasının görünüşü (nital ile (nital ile dağlanmış)

# Yayınım Yöntemi - Sementasyon

## 3.Gaz Sementasyonu

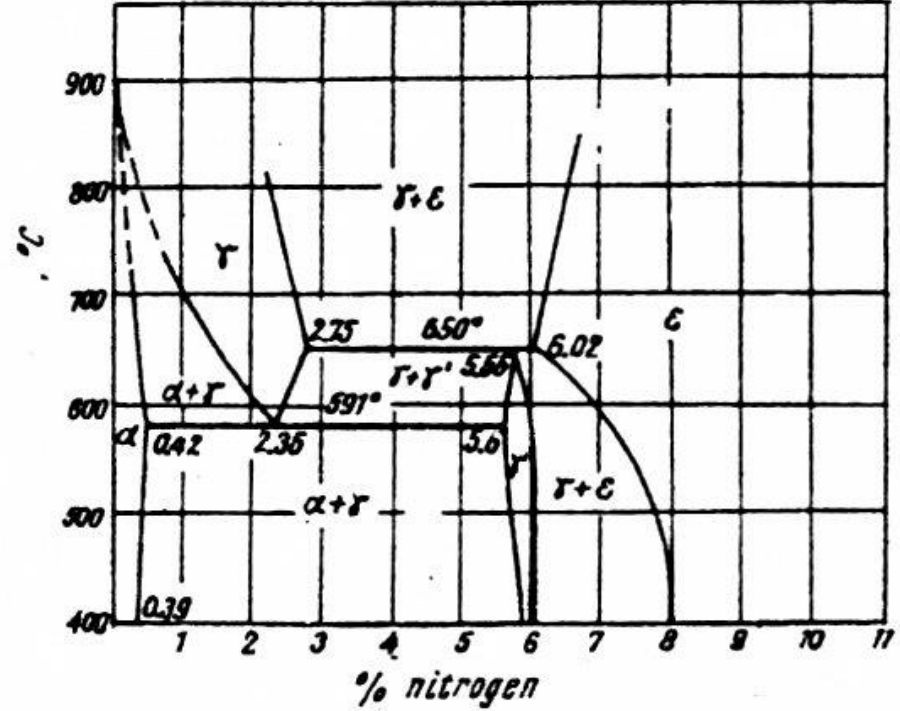
- C verici olarak metan ( $\text{CH}_4$ ), etan ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) gibi hidrokarbonlar kullanılır.



- Sementasyon tabakasının kalınlığı parçanın fırın içinde kaldığı süreye göre değişir.

# Yayınım Yöntemi - Nitrürasyon

- Çeliğin N içeren bir ortam içinde 480-650°C arasında tutulması ile yüzeye N yayılımını sağlanarak sertleştirilmesidir.
- Yüzeyde oluşan sert tabaka çeliğin yorulma ve korozyon dayanımını artırır.
- Oluşan yüzey sertliği, sementasyondakinden daha fazladır ve bu sertlik yüksek sıcaklıklarda bile kararlıdır.



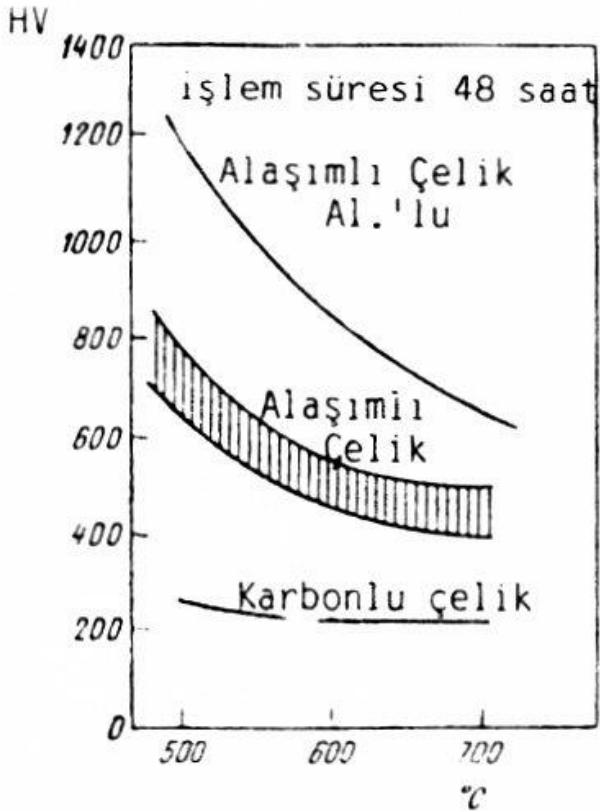
Fe-N denge diyagramı



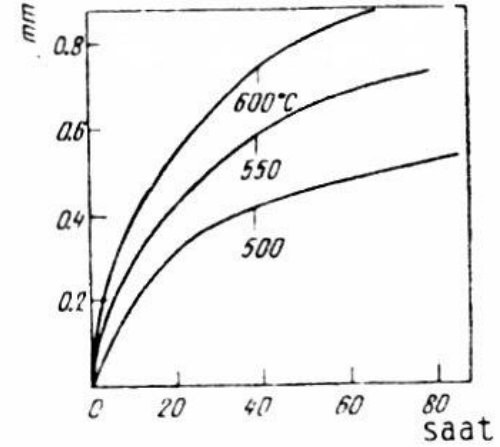
# Yayınım Yöntemi - Nitrürasyon

- ✦ Çelik içinde N'un yayınımı çok sınırlıdır. Bu nedenle tabaka kalınlığı işlem süresi ve sıcaklığına bağlıdır.
- ✦ Otektoid sıcaklığın üzerinde oluşan  $Fe_2N$  ( $\epsilon$ ) fazı çok sert ve gevrek. Bu nedenle fazla miktarda oluşması istenmez.
- ✦ Saf demirde nitrürasyon sonucunda elde edilen yapı çok sert olmaz. Bu nedenle sertleştirilecek çeliklerin bir miktar C içermesi gerekir.

# Yayınım Yöntemi - Nitrürasyon



İşlem sıcaklığının nitrürasyon sertliğine etkisi



Nitrürasyon süresinin sert tabaka kalınlığına etkisi

## Nitrürasyon Yöntemleri

### 1.Gaz Nitrürasyon

- ✔ Amonyak 500°C'nin üzerinde ayrışmaya başlar.
- ✔  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$
- ✔ Nitrürasyon uygulanacak parçalar özel kutular içine konularak elektrikle ısıtılan fırınlara yerleştirilir.
- ✔ Parçaların üzerinden 510-520°C'de amonyak gazı geçirilir.
- ✔ Kalın parçalarda sıcaklık 540°C civarında tutulur.
- ✔ Tutma süresi 10-90 saat arasında olmasına karşın, endüstriyel uygulamalarda 24 saatin üzerine nadiren çıkılır.

# Yayınım Yöntemi - Nitrürasyon

## 2.Tuz Banyosunda Nitrürasyon

- ✓ Çalışma sıcaklığı 550-570°C arasındadır. Tutma süresi en çok 2 saat civarındadır.



# Yayınım Yöntemi - Nitrürasyon

## 3.Toz Nitrürasyon

- Parçalar nitrürasyon ve nitrürasyonu hızlandıran toz karışımı içine gömülerek kutulara yerleştirilir.
- 520-570°C arasında 10-12 saat tutulur.
- Parçada oyuklaşma veya pullanmaya neden olabilir.

# Yayınım Yöntemi – Karbo Nitrürasyon

- ✔ Çelik parçalar karbon verici ve azot verici bir atmosferde 850-860°C de 2-10 saat arası tutulur.
- ✔ İşlem sonunda parçaya su verilir.
- ✔ Gaz sementasyonu yönteminde çarpılmaya eğimli olan parçalara sıklıkla uygundur.



# Borlama

- Termo-kimyasal bir kaplama işlemi olan **borlama**, yüksek sıcaklıkta metallerin yüzeyinde bor atomlarının difüzyonuyla **borür tabakası** oluşturma işlemidir.
- Borlama işlemi bütün çeliklere uygulanabildiği gibi demir dışı metal ve alaşımlara da uygulanabilmektedir.
- Borlamanın diğer yüzey sertleştirme işlemlerine üstünlüğü, yüzey tabakasının çok sert olmasının yanında yüksek aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncine sahip olmasıdır.

# Bor Tabakasının Üstünlükleri

- Yüksek sıcaklıklarda (nitrürlenmiş çeliklerin sertliğini koruyamadığı) bor tabakası sertliğini korur.
- **Borlama**, demir esaslı malzemelerin korozyon-erozyon dayanımını gerek alkali ortam gerekse seyreltik asit çözeltisi içerisinde korur ve bu özelliği sayesinde endüstride geniş bir uygulama alanı bulur.
- Borlanmış yüzey **850 °C'ye kadar** oksidasyona dayanıklıdır
- **Oksitleyici ve koroziv ortamlarda** çalışan parçaların yorulma dayanımlarını arttırır ve servis ömrünü uzatır.

## Tablo Çeşitli Yüzey İşlemleri ile Elde Edilebilecek Sertlik Değerleri

Malzeme	Mikrosertlik, HV
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540–600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630–700
Yüksek hız çeliği BM 42	900–910
Nitrürlenmiş çelik	650–1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650–950
Sert krom kaplama	1000–1200
WC+Co	1160–1820
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub> seramikler	1483
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC+ZrO <sub>2</sub> seramikler	1730
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B <sub>4</sub> C	5000
Elmas	>10000

Borlama işlemi genellikle, **700-1000 °C** sıcaklık

aralığında **1-10 saat** sürelerle çeşitli borlama ortamlarında gerçekleştirilmektedir.

Borlama ortamı **kati, sıvı, gaz** ve **plazma** olup bor kaynağı olarak ;

- **Katı ortamda** ;  $B_4C$ , ferrobor ve amorf bor
- **Gaz ve plazma ortamında** ;  $B_2H_6$  ,  $BCl_3$  ve  $(CH_3)_3B$
- **Sıvı ortamda**; boraks ve borik asit bileşikleridir.

# Termokimyasal Borlama Yöntemleri

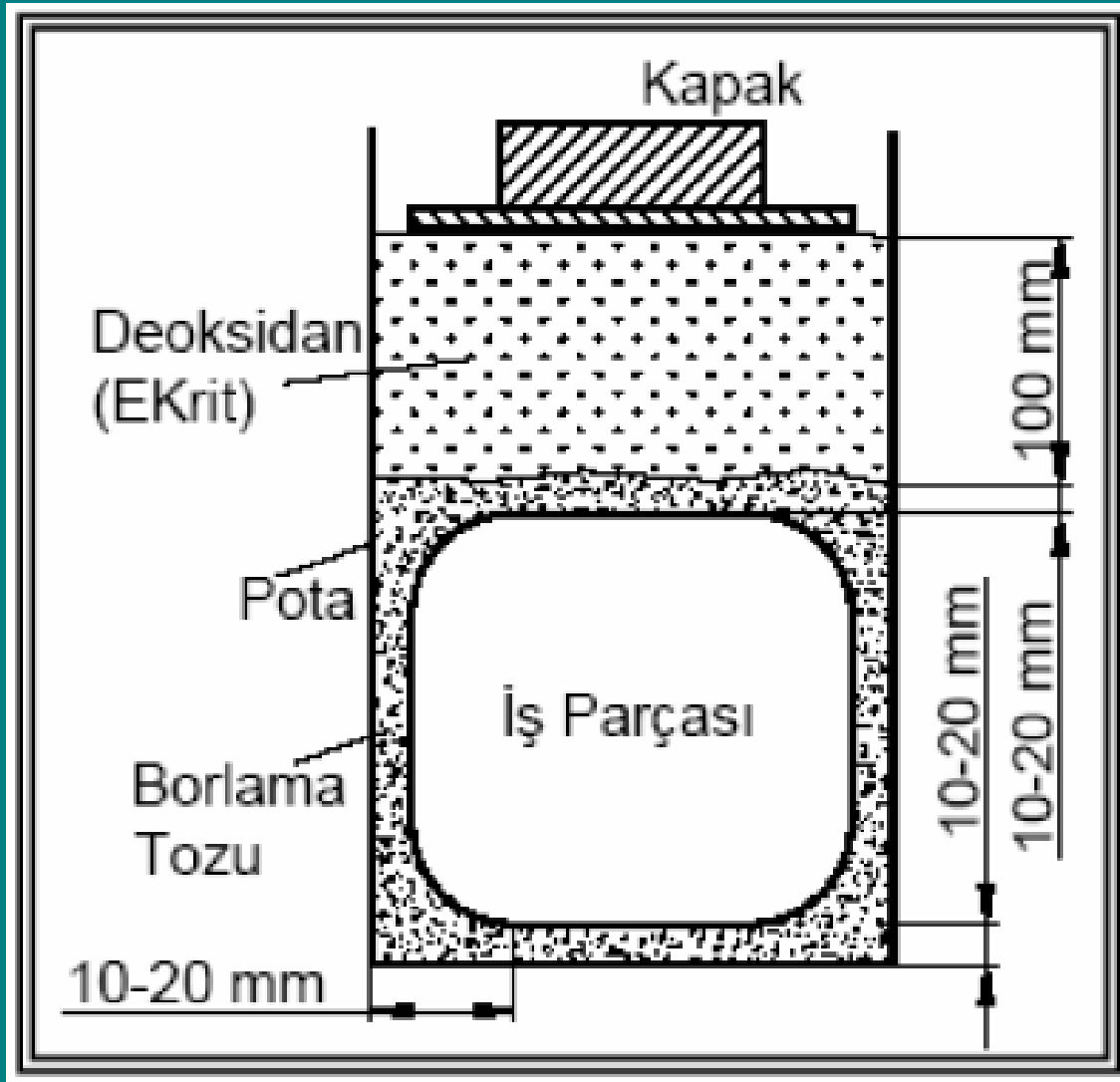
## 1. Katı Borlama

Uygulanmasının kolay olması, basit donanım gerektirmesi, ekonomik, güvenli ve kullanılan toz karışımının kimyasal kompozisyonunda değişiklik yapılabirliği nedeniyle en yaygın borlama tekniğidir.

**Kutu borlama**, borlanacak malzemenin bor verici ortam olan toz karışımı içerisinde belirli sıcaklık ve

sürelerde bekletilmesiyle gerçekleştirilir. Katı borlama

işleminin şematik gösterimi şekilde verilmiştir.



Şekil Katı borlama işleminin şematik gösterimi



- Potanın (kutu) içerisinde, hazırlanan toz karışımı borlanacak parçanın etrafını en az **10-20 mm** kaplayacak şekilde yerleştirilir.
- Borlama tozlarının üzerine **SiC** gibi bir dolgu malzemesi doldurulur.
- **Üst kısma ise** hava girişini dolayısıyla oksitlenmeyi engelleyecek şekilde bir kapak kapatılır.
- **Pota hacmi**, fırın hacminin **% 60'nı** geçmemelidir.
- Yaygın olarak kullanılan bor bileşikleri **bor karbür (B<sub>4</sub>C)**, **ferrobor** ve **amorfbor**dur.
- **Ferrobor** ve **amorfbor** çok iyi bor verici olup, kalın borür tabakası oluştururlar. SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> çözünmeye yardımcı olur. Aktivatör olarak NaBF<sub>4</sub>, KBF<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>BF<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>Cl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, BaF<sub>2</sub> ve Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> kullanılır.

**Borlama kaynağı olarak** literatürde verilen **toz karışımları şöyledir** (Sinha, 1991; Özbek, 2000):

- % 5  $B_4C$ , % 90  $SiC$ , % 5  $KBF_4$
- % 50  $B_4C$ , % 45  $SiC$ , % 5  $KBF_4$
- % 85  $B_4C$ , % 15  $Na_2CO_3$
- % 95  $B_4C$ , % 5  $Na_2B_4O_7$
- % 84  $B_4C$ , % 16  $Na_2B_4O_7$
- Amorf bor (% 95–97), % (3-5)  $KBF_4$
- % (40–80)  $B_4C$ , % (20-60)  $Fe_2O_3$
- % 60  $B_4C$ , % 5  $B_2O_3$ , % 5  $NaF$ , % 30 demiroksit
- Demir esaslı malzemelerde, **işlem sıcaklığı 800-1050 °C** arasında, **borlama süresi ise 1-8 saat** arasında seçilebilmektedir

## 2. Sıvı Borlama

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı halindedir. Borlama işlemi **700-1000 °C** aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama, **elektrolitik olan** ve **olmayan sıvı borlama** olarak iki ana grupta toplanmaktadır.

Bu yöntemin birçok sakıncası vardır:

- Borlama sonrasında parça yüzeyinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor vardır.
- Bunların giderilmesi zaman ve para kaybına yol açar.
- Borlamanın başarılı olabilmesi borlama sırasında banyo viskozitesi artmamalıdır. Bu nedenle sıvı banyoya tuz ilavesi yapılmaktadır. Bu da maliyeti arttırır.
- Korozyif ortamlara dayanıklı fırınlara ihtiyaç vardır.

- Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlama işlemi, **900-950 °C** sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir.
- Tuz banyosunda elektrolitik borlama işleminde, **katot olarak** borlanacak demir esaslı malzeme, **anot olarak** grafit ve **elektrolit olarak ise** boraks kullanılmaktadır.
- Parçanın her tarafında **homojen bir kaplama** tabaka kalınlığı elde edilebilmesi için elektroliz sırasında parça döndürülmektedir.

**Tablo Bazı tuz banyosu içerikleri**

% Ağırlık Olarak Banyo İçeriği						
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	B <sub>4</sub> C	KBF <sub>4</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	Ferro-Si	Al
66	---	---	14	---	20	---
65	---	---	15	---	20	---
70	---	---	---	30	---	---
70	---	---	10	20	---	---
60	40	---	---	---	---	---
---	2.5	10	---	87.5	---	---

### 3. Gaz Borlama

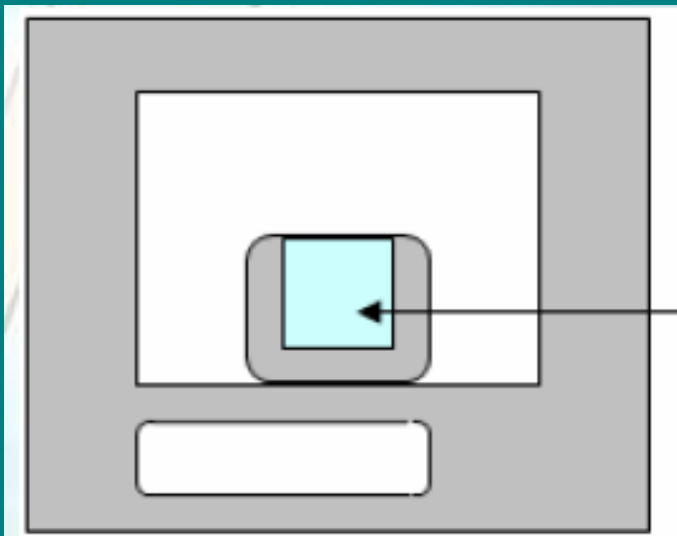
Borlama ortamının gaz fazında olduğu borlama işlemidir. Borlama işlemi **Ar** ve **H<sub>2</sub>** gazlarının ve bir evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının (**BCl<sub>3</sub> gibi**) belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılır,

**Gaz borlama da en çok kullanılan ortamlar şöyledir :**

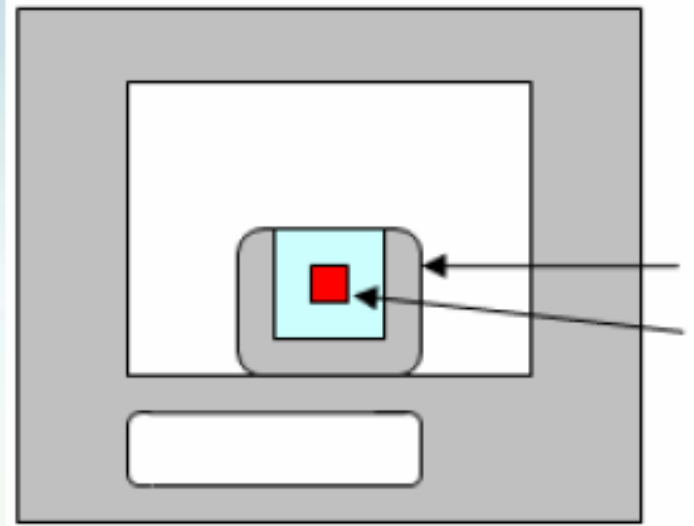
- Diborane (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)-H<sub>2</sub> karışımı
- Borhalid (iyonize bor )-H<sub>2</sub>/veya (75/25 N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>) gaz karışımı
- (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>B ve (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>B gibi organik bor bileşikleri

- $(B_2H_6)-H_2$  karışımı zehirli ve patlayıcı olma özelliği sebebiyle ticari olarak kullanılmamaktadır.
- Organik malzemeler kullanıldığı takdirde borür ve karbür bileşikleri birlikte oluşmaktadır.
- $BBr_3$ , çok pahalı ve suyla olan kuvvetli reaksiyonu ayrıca yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için  $BF_3$ 'e ihtiyaç duyulması sebebi ile kullanım açısından tercih edilmemektedir.
- Gaz borlama için en çok  $BCl_3$  tercih edilmektedir.





a) Bor ortamının eritilmesi



b) Borlama sıvısına numunenin daldırılması

Gaz borlama reaksiyonları şunlardır. Gaz borlamada bor triklorür ısı ile aktive edilir.



Burada hidrojen  $\text{BCl}_3$ 'ü redükler. Böylece bor, demire yayılır. Reaksiyon bileşenleri iki aşamada oluşur.



Gaz fazında borlama işlemi **karmaşık ekipmanlar** gerektirmektedir. Oysa ki proses kendi içerisinde oldukça basittir.

Fakat sakıncalı iki durum vardır:

- a) Son derece tehlikeli olan siyanürün zehirlilik oranı sınırı 10 ppm iken, diboranın zehirlilik sınırı 0.1 ppm'den düşüktür.
- b) Hidrojen ile seyreltilse bile diboran oldukça pahalıdır.

## 4. Plazma Borlama

Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz; ve gaz durumdaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür.

**Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren karışımdır.**

Bu haller arasındaki asıl fark sahip oldukları enerjidir. Yani maddenin konumunun değiştirilmesi, verilecek enerji ile ilgilidir.

**Örneğin** katı haldeki bir maddeye, enerji vererek **sıvı**, sıvı halde iken enerji vererek **gaz** ve **gaz durumundaki** maddeye de belirli bir enerji vererek **plazma haline** geçirmek mümkündür. Bu işlemin terside yapılarak yani verilen bu enerjileri geri alarak tekrar plazma halinden gaz, sıvı ve katı hale geçirmek mümkündür.

**Uygulamada plazma**, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile elde edilir. En yaygın kullanılan plazma yöntemi **elektriksel boşalmadır**. Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli şartlar gerçekleştiği takdirde uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise , bu iki plaka arasında bir elektrik akışı olur

**Plazma borlama** Ar, H<sub>2</sub> gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, BF<sub>3</sub> veya B(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (trimetilborat) kullanarak, **800-1000 °C** sıcaklıkta, yaklaşık **10<sup>-2</sup> Pa** gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır.

Mikroyapı ve demirbor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir.

**Plazma borlama reaksiyonları şunlardır.**



Bor florür (BF<sub>3</sub>) ile borlama reaksiyonu

