

**GÖZENEKLİ MALZEMELERİN
SOĞUMA EĞRİLERİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Onur YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2006
ANKARA**

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Onur YILMAZ

GÖZENEKLİ MALZEMELERİN SOĞUMA EĞRİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Onur YILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2006

ÖZET

Su verme (quenching) işlemi, metallerin sertlik değerlerini artırıp, aşınma dayanımını yükseltmek amacıyla uygulanan ısı işlemidir. Bu işlemde, metaller erime sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklara kadar ısıtılır ve hızlı bir şekilde bir soğutucu akışkan içerisinde soğutulur. Hızlı soğutma sonucunda, metallerde sert bir yapı elde edilir. Bu çalışmada, Toz Metalürjisi (T/M) ile üretilmiş gözenekli alüminyum, bakır, bronz, demir ve paslanmaz çelik silindirlerin su ile soğutulması işlemi incelenmiştir. Farklı gözenek değerlerine sahip silindirlerin belirlenen noktaları için sıcaklığın zamanla değişimini veren soğuma eğrileri deneysel yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde bu konuda daha önceden yapılan sayısal ve analitik çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada, gözenek geometrileri, silindirlerin yoğunluk dağılımları ve deneylerin yapılması sürecinde ısı kayıplar ihmal edilmiştir.

Bilim Kodu : 914.1.065

Anahtar Kelimeler : Su verme, soğuma eğrileri, gözenekli ortam, toz metalürjisi

Sayfa Adedi : 74

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Ö. Ercan ATAER

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COOLING CURVES
OF POROUS METALS**

(M.Sc. Thesis)

Onur YILMAZ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2006

ABSTRACT

The quenching process is a heat treatment and it increases the hardness of the metals. With this process, metals are heated to high temperatures under their melting points. Then, they were rapidly cooled in the quenchant. At the end of this treatment, the strength of the metals increased. In this study, the water-cooling process of porous aluminium, copper, bronze, iron and stainless steel cylinders produced with Powder Metallurgy (P/M) was investigated. For the points on the cylinders at different porosity, cooling curves which include the change of temperature with the time were obtained by the experimental method. The results were compared with the results of the numerical and analytical studies given in the literature. Effect of porosity geometries, density variations of the metals and heat losses are neglected in the experimental method.

Science Code : 914.1.065

Key Words : Quenching, cooling curves, porous materials, powder metallurgy

Page Number : 74

Adviser : Prof. Dr. Ö. Ercan ATAER

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmamım Prof. Dr. Ö. Ercan ATAER olmak üzere, çalıőmalarımdaki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. İbrahim USLAN'a ve yüksek lisans öğrenimim sürecinde benden manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teőekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. TOZ METALÜRJİSİ	3
2.1. Toz Metalürjisine Giriş	3
2.2. Metal Tozu Üretim Teknikleri	3
2.2.1. Mekanik yöntemle toz üretimi	4
2.2.2. Fiziko-kimyasal yöntemle toz üretimi	5
2.2.3. Doğrudan indirgeme yöntemle toz üretimi	6
2.2.4. Elektroliz yöntemle toz üretimi.....	6
2.2.5. Atomizasyon yöntemlerle toz üretimi.....	7
2.3. Metal Tozların Preslenmesi.....	12
2.4. Sinterleme	14
3. GÖZENEKLİ ORTAMLAR İÇİN SU VERME İŞLEMİ	16
3.1. Çeliklere Uygulanan Su Verme İşlemi	24
3.1.1. Isıtma ortamları	26

	Sayfa
3.1.2. Martemperleme	26
3.1.3. Ostemperleme	29
3.1.4. TTT ve CCT diyagramları ve önemi.....	29
3.2. Alüminyum ve Alaşımlarına Uygulanan Su Verme İşlemi	39
3.2.1. Soğuma hızı.....	40
3.2.2. Su verme gecikmeleri.....	40
3.2.3. Suyu daldırma ile su verme	41
3.3. Bakır ve Alaşımlarına Uygulanan Su Verme İşlemi.....	41
3.3.1. Sertleştirme.....	42
4. DENEY DÜZENEGİ VE DENEYSEL YÖNTEM.....	43
4.1. Test Numunelerin Hazırlanması	43
4.2. Test Numunelerin Sinterlenmesi.....	44
4.3. Test Numunelerinin Özellikleri.....	45
4.4. Isıl-Çiftlerin Hazırlanması ve Yerleştirilmesi.....	48
4.5. Deneyin Yapılışı.....	49
5. SONUÇLAR	51
6. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI	66
7. BU KONUDA İLERİDE YAPILACAK ÇALIŞMALAR	71
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	74

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Boyutsuz ısı iletimi ve direnci	18
Çizelge 3.2. Isı iletimin gözeneklilik ile değişimi tablosu.....	20
Çizelge 3.3. Martemperleme, ostenitleme ve martemperleme sıcaklıkları.....	27
Çizelge 4.1. Numunelerin sinterleme sıcaklık değerleri ve süreleri	45
Çizelge 4.2. Alüminyum numunelerinin özellikleri.....	46
Çizelge 4.3. Bakır numunelerinin özellikleri	46
Çizelge 4.4. Bronz numunelerinin özellikleri	46
Çizelge 4.5. Çelik numunelerinin özellikleri	47
Çizelge 4.6. Demir numunelerinin özellikleri.....	47
Çizelge 5.1. Alüminyum için soğuma süresinin gözeneklilikle değişimi.....	52
Çizelge 5.2. Bakır için soğuma süresinin gözeneklilikle değişimi	53
Çizelge 5.3 Bronz için soğuma süresinin gözeneklilikle değişimi	55
Çizelge 5.4 Çelik için soğuma süresinin gözeneklilikle değişimi.....	58
Çizelge 5.5. Demir için soğuma süresinin gözeneklilikle değişimi.....	62
Çizelge 6.1. Karbon çelik silindiri için analitik ve sayısal yöntemlerle elde edilen soğuma süreleri.....	69
Çizelge 6.2. Çelik numuneler için analitik,sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen soğuma süreleri	69
Çizelge 6.3. Deneysel yöntemin sayısal ve analitik yöntemlere göre hata oranları...	70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Toz Metalürjisi üretim yönteminin basit akım şeması.....	4
Şekil 2.2. Mekanik öğütme ile toz üretiminin şematik gösterimi	5
Şekil 2.3. Elektroliz yöntemi ile toz üretiminin şematik gösterimi	7
Şekil 2.4. Döner disk atomizasyon yöntemi ile toz üretiminin şematik gösterimi	8
Şekil 2.5. Döner elektrod atomizasyonu ile toz üretiminin şematik gösterimi	9
Şekil 2.6. Su atomizasyonu ile toz üretiminin şematik gösterimi	10
Şekil 2.7. Gaz atomizasyonu ile toz üretiminin şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.8. Tek yönlü preslemenin şematik gösterimi	13
Şekil 2.9. Çift yönlü preslemenin şematik gösterimi	13
Şekil 2.10. Sinterleme sürecinde malzemenin mikro yapısındaki değişimler	15
Şekil 3.1. Isıl iletimin gözeneklilik ile değişimi tablosu.....	20
Şekil 3.2. Toz metal çeliklerin su verme işleminde 25 mm mesafedeki gözenekliliğin etkisini gösteren soğuma eğrileri.....	21
Şekil 3.3. Gözenekli karbon çelik silindirin dikey yüzeylerindeki ısı aktarım katsayısının sıcaklık farkına göre değişimi	24
Şekil 3.4. Sertleştirme için uygulanan farklı soğutma yöntemlerinin prensiplerini gösteren diyagramlar.....	28
Şekil 3.5. Çeşitli karbon çeliklerinde ısıtma sırasındaki yapısal dönüşümlerin dönüşümlerin şematik gösterilişleri	33
Şekil 3.6. Çeşitli çeliklerin çeşitli soğutma programlarından sonuçlanan yapısal dönüşümler.	34
Şekil 3.7. Perlit'in büyümesinin şematik olarak gösterilişi	35

Şekil	Sayfa
Şekil 3.8. Östenit'ten Martensite dönüşüm için yapılmış basit bir modelin şematik olarak gösterimi	36
Şekil 4.1. Numunelerin sinterlenmesi için kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi	45
Şekil 4.2. Numunelerinin gözenek oranlarının basınca göre değişimi.....	48
Şekil 4.3. Numune ve sıcaklık ölçüm noktalarının şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.4. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	50
Şekil 5.1. % 12,28 Gözeneklilikteki alüminyum numunenin soğuma eğrisi	52
Şekil 5.2. % 9,50 Gözeneklilikteki alüminyum numunenin soğuma eğrisi	52
Şekil 5.3. % 8,61 Gözeneklilikteki alüminyum numunenin soğuma eğrisi	53
Şekil 5.4. %15,98 Gözeneklilikteki bakır numunenin soğuma eğrisi	54
Şekil 5.5. %15,20 Gözeneklilikteki bakır numunenin soğuma eğrisi	54
Şekil 5.6. %27,03 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi	55
Şekil 5.7. % 25,73 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi	56
Şekil 5.8. % 19,61 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi	56
Şekil 5.9. %18,87 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi	57
Şekil 5.10. %17,95 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi	57
Şekil 5.11. %16,99 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi	58
Şekil 5.12. %24,45 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi....	59
Şekil 5.13. %19,03 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi....	59
Şekil 5.14. %14,52 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi....	60
Şekil 5.15. %11,86 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi....	60

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. %9,91 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi.....	61
Şekil 5.17. %9,40 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi.....	61
Şekil 5.18. % 24,01 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi.....	62
Şekil 5.19. % 18,51 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi.....	63
Şekil 5.20. %14,24 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi.....	63
Şekil 5.21. %11,80 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi.....	64
Şekil 5.22. %10,03 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi.....	64
Şekil 5.23. % 9,39 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi.....	65
Şekil 6.1. % 10 Gözenekli karbon çeliği için analitik ve sayısal analizden ve % 10 gözenekli paslanmaz çelik için deneysel analizden elde edilen soğuma eğrileri	67
Şekil 6.2. % 15 Gözenekli karbon çeliği için analitik ve sayısal analizden ve % 15 gözenekli paslanmaz çelik için deneysel analizden elde edilen soğuma eğrileri	68
Şekil 6.3. % 20 Gözenekli karbon çeliği için analitik ve sayısal analizden ve % 20 gözenekli paslanmaz çelik için deneysel analizden elde edilen soğuma eğrileri	68
Şekil 6.4. Çelik numuneler için analitik,sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen soğuma sürelerin gözenek değerlerine göre değişimi.....	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Sinterleme sürecinde boyun oluşumu	15
Resim 3.1. % 0.45 C'lu bir çeliğin çeşitli ısıl işlemler sonrası mikro yapısı.....	32
Resim 3.2. Düşük sıcaklıklarda östenitin martensite dönüşümü.....	38
Resim 4.1. Preslemede kullanılan kalıp ve zımbalar	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
C	Sementit
F	Ferit
HV	Vickers sertlik değeri, kgf/mm ²
k	Gözenekli katının ısı iletim katsayısı, W/mK
k_s	Katının ısı iletim katsayısı, W/mK
M	Martenzit
M_s	Martensit başlama sıcaklığı, K
P	Perlit
T	Sıcaklık, K
V	Soğutma hızı, m/s
V_{kr}	Kritik soğutma hızı, m/s
α	Isı yayılma katsayısı, m ² /s
γ	Sementit bölgesi
ΔT	Sıcaklık farkı, K
ε	Gözeneklilik, (%)
ρ	Elektriksel direnç, Ω
λ	Isı iletim katsayısı, W/mK
Kısaltmalar	Açıklama
T/M	Toz Metalürjisi

1. GİRİŞ

Günümüzde toz metalürjisi ile üretilen parçaların yaygın kullanım alanları vardır. Bu yöntem özellikle otomotiv sektöründe olmak üzere küçük ve karmaşık parçaların seri imalatına oldukça elverişlidir. Toz metalürjisi, mikron mertebesindeki tozları presleme işlemi ile birbirine bağlayarak parça elde etme işlemidir. Bunun için metal veya alaşım malzemelerinin tozları bir kalıp içerisinde sıkıştırılır. Kalıbın şeklini alan tozlar ana bileşenin erime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta sinterlenir ve tozların temas yüzeyleri arasında kuvvetli bağlar oluşturulur. Bu yöntemle döküm, talaşlı işlem veya kalıcı deformasyonla şekillendirilmesi zor olan malzemeler, ekonomik bir şekilde üretilir. Çoğu zaman toz metalürjisi parçalarının mekanik özellikleri, döküm ve dövme ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinden daha düşüktür. Yüksek gerilmelerin söz konusu olduğu uygulama alanlarında, Toz Metalürjisi parçalarının kullanılması güçtür. İlave masrafların göze alınması durumunda, ürünlerin mukavemet değerleri artırılabilir.

Bu yöntemle üretilen parçalarda malzeme kaybı çok azdır ve parçalar bir miktar gözeneklilik içerir. Gözenekli bir yapıya sahip ürünlere yağ veya diğer sıvılar emdirilebilir. Bu uygulamanın en güzel örneği yağ emdirilmiş yataklardır. Yağ emdirilmiş yataklar, kullanım esnasında bakıma ihtiyaç duymadıklarından otomotiv endüstrisinde ve ev aletlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yataklara benzer olarak gözenekli üretilen filtrelerin de uygulama alanları oldukça geniştir. Gözenekli filtreler, her boyutta gözeneğe sahip bir şekilde üretilirler ve belirli bir geçirgenlik sağlarlar.

Toz metalürjisi ile üretilmiş gözenekli yapıya sahip metal parçalara bilinen, geleneksel ısıtma işlemleri uygulanabilir. Isıtma işlemlerinin amacı, metallerin mekanik özelliklerini istenilen şekilde değiştirmektir. Bu ısıtma işlemlerinin başında, metallerin aşınma dayanımını artırmak için yapılan su verme işlemi (quenching) gelir.

Su verme işlemi malzemenin yapısında, martensitik bir yapı elde etmek için gerekli olan ısıtma ve soğutma işlemidir. Bu işlem, belli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış metal parçasının, hızlı bir şekilde soğutulmasıyla martensitik yapı sağlanmasıdır. Bu amaç için

gerekli soğutma hızı, su verilecek parçanın büyüklüğüne, metalin sertleşme eğilimine ve su verme ortamına bağlı olarak değişmektedir.

En uygun su verme ortamı, yüksek sıcaklık aralıklarında, iyi soğutma özelliği olan ve parçada istenen sertleşmenin olduğu dönüşüm sıcaklıkları aralıklarında, çatlamalara meydan vermeyecek kadar bir soğutma hızı sağlanmış olanıdır.

Su verme koşullarının devamlılığını sağlamak için, soğutma ortamı sıcaklığının sabit tutulması gereklidir. Bu da soğutma ortamı içine uygun soğutucular konmasıyla sağlanabilir. Su verme işlemine tabi tutulmakta olan parça yapısının tamamen martensitik dönüşümünü sağlamak amacıyla, soğutma ortamının içinde kalacağı süre kesin olarak tayin edilmelidir.

Toz metalürjisi yöntemi kullanılarak 200-700 MPa basınç aralığında preslenerek üretilen gözenekli alüminyum, bakır, bronz, paslanmaz çelik ve demir silindirik numunelerin, su ile soğutulması işlemi deneysel yöntemle incelenmiştir. Farklı gözenekliliğe sahip numunelerin, 700°C'den laboratuvar sıcaklığına kadar olan soğutulma sürecindeki sıcaklık değişimleri, belirlenen noktalarında açılan deliklere takılan ısı-çiftler vasıtası ile anbean kaydedilip soğuma eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen soğuma eğrilerinden numunelerin, sahip oldukları gözenekliliğin soğuma sürelerine etkisi incelenmiştir.

Deneysel yaklaşımda numunelerin yoğunluk dağılımları, meydana gelen ısı kayıpları, daldırma esnasında meydana gelen çalkanma hareketleri ve daldırma sırasında banyo sıcaklığında meydana gelen değişimler dikkate alınmamıştır. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar Ataer, Aygün ve Uslan tarafından yapılan sayısal çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. TOZ METALÜRJİSİ

2.1. Toz Metalürjisine Giriş

Toz metalürjisi, partikülleri presleme işlemi ve yüksek sıcaklıkla birbirine bağlayarak parça haline getirme işlemidir. Daha geniş bir ifade ile toz metalürjisi, toz şeklindeki malzemelerin preslenmesi ve takibinde yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi ile parça imalatını kapsamaktadır. İnce partikül şeklindeki saf metaller, alaşımlar, seramik ve plastik malzemeler birbirleriyle karıştırılarak basınç altında şekillendirilirler. Daha sonra bu parçalar ana bileşenin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta sinterlenerek partiküllerinin temas yüzeyleri arasında bir bağ oluşturulur ve böylece istenilen fiziksel özellikler elde edilir. Toz metalürjisi küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatına son derece uygundur. Malzeme kaybı çok azdır, belirli derece gözeneklilik elde edilir.

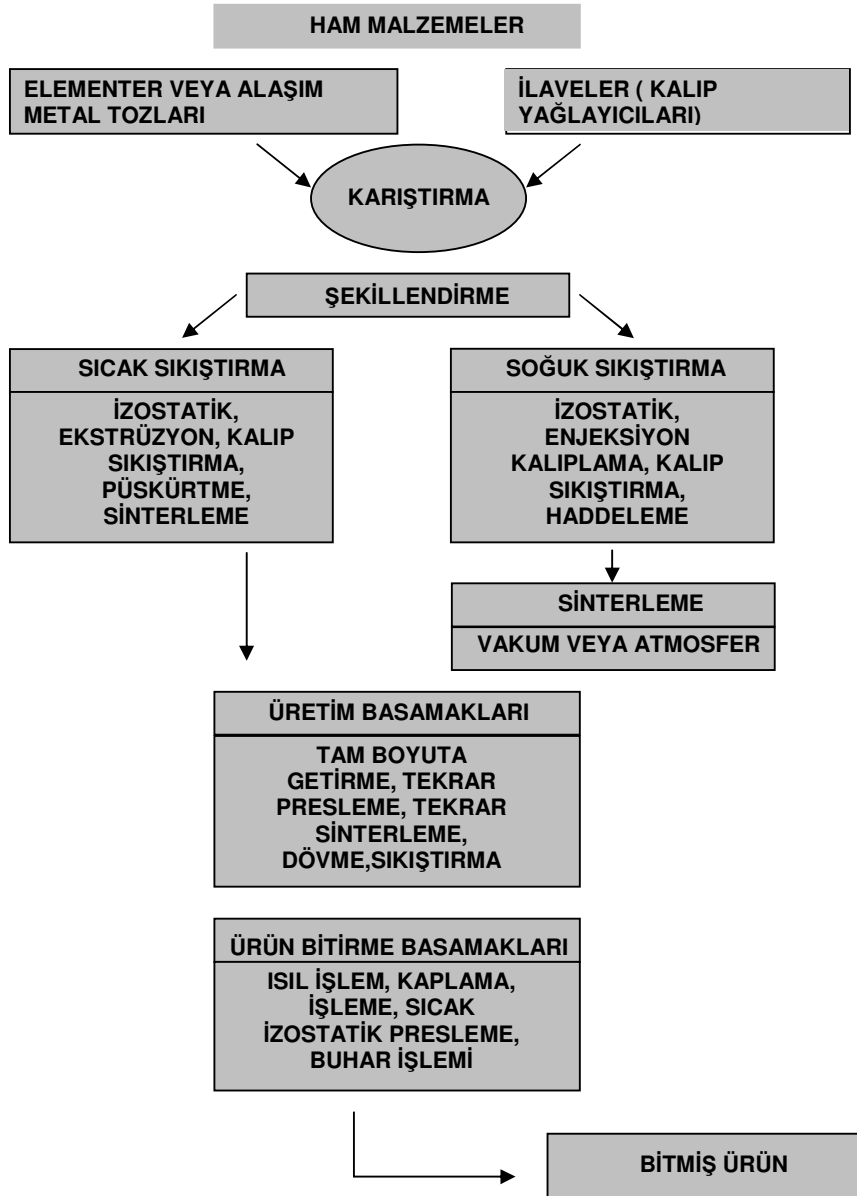
Metal tozlarının boyutları mikron mertebesindedir. Presleme işlemi oda sıcaklığında ve bazen de yüksek sıcaklıklarda yapılır. Toz metalürjisi ile üretilen parçaların büyük bir kısmında elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi talaşlı işlem gibi diğer operasyonlara olan gereksinimi ortadan kaldırmaktadır. Toz Metalürjisi üretim yönteminin basit akım şeması Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

2.2. Metal Tozu Üretim Teknikleri

Metal malzeme üretimi açısından ortalama boyutları birkaç mikrondan birkaç yüz mikrona kadar parçalanmış partiküller toz olarak tanımlanabilir. Tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Tozun ortalama boyutları, şekli ve yüzey durumu parça imali açısından önemlidir. Toz üretimini esas olarak mekanik, fiziko-kimyasal, doğrudan indirgeme, elektroliz ve atamizasyon olmak üzere beş grupta toplamak mümkündür.

2.2.1. Mekanik yöntemle toz üretimi

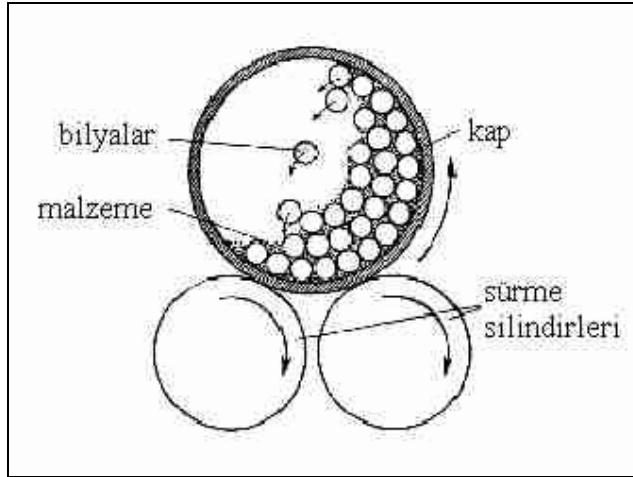
Bu yöntemde malzeme mekanik yada pnömatik olarak kırma, çarpma ve öğütme şeklinde parçalanarak toz haline getirilir. Bu amaçla kullanılan makineler kırıcılar, kaba ve ince öğütücüler olarak gruplandırılır.



Şekil 2.1. Toz Metalürjisi üretim yönteminin basit akım şeması

Kırıcılar genellikle cevher hazırlamada kullanılır. Kaba ve ince öğütücüler ise birkaç mikrona kadar değişen boyutlarda toz hazırlamada kullanılır. Seramik malzemeler metaller arası bileşikler, ferro alaşımlar, ferrokrom gibi gevrek malzemeler bilyalı değirmenlerde öğütülür ve toz haline getirilir. Gevrek olmayan malzemelerin kırılması zor olduğundan öğütme işlemi genellikle bu tür malzemelere uygulanmaz, bunun yerine bazı sünek malzemeler sıvı azot ile soğutularak gevrek hale gelmesi ve öğütme işlemine elverişli hale gelmesi sağlanır.

Sünek malzemelerin öğütülmesi özellikle alüminyumun öğütülmesinde yapışmayı engelleyici yağlayıcılar kullanılır. Bu yöntemde diğer bir uygulama da hidrürler oluşturmak ve sonra bu hidrürlerin vakum ortamında giderilmesi ile metal veya tozlarının eldesi sağlanır. Bu yöntem daha çok titanyum için kullanılan bir yöntemdir. Şekil 2.2’de öğütme yöntemi ile mekanik olarak toz elde edilmişinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2.2. Mekanik öğütme ile toz üretiminin şematik görünümü

2.2.2. Fiziko-kimyasal yöntemle toz üretimi

Bu yöntemde bileşenler organik bir bağlayıcı ile fiziksel olarak bir bağ oluşturacak şekilde karıştırılır. Sistemdeki solvent uçurularak kalan malzeme elekten geçirilir.

Üfleme sırasında bağlayıcının yanması sağlanır. Bu yöntem daha çok NiAl ve AlSi-polyester tozlarının üretilmesinde kullanılır. Püskürtme ile kurutma yöntemi tozların topak haline getirilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem zirkonya gibi seramik malzemelerde ve WC-kobalt gibi malzemelerde kullanılır. Toz genellikle küreseldir, fakat püskürtme ile kurutma yapıldığından gözenekli ve kolayca ufalanabilir durumdadır. Malzeme genellikle sinterleme ile yoğunlaştırılır ve kararlı hale getirilir.

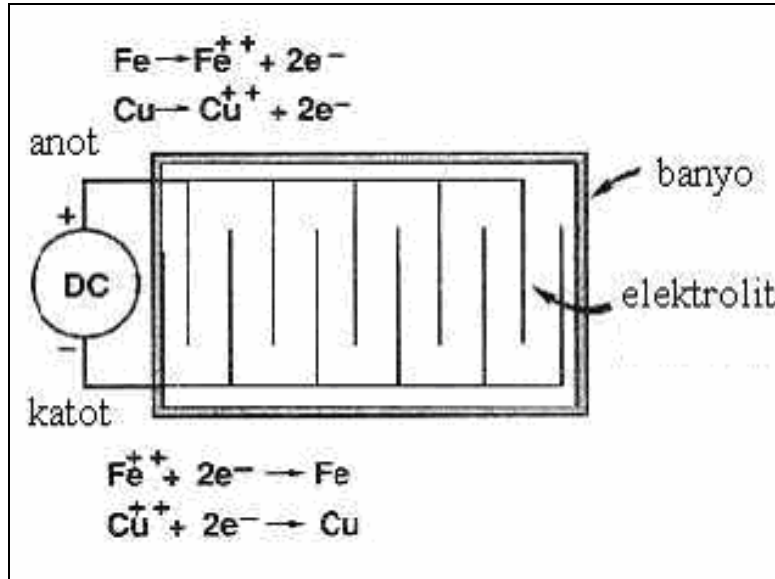
2.2.3. Doğrudan indirgeme yöntemle toz üretimi

Demir, bakır, nikel ve kobaltın oksitlerinden doğrudan indirgeme yoluyla tozların üretilmesi, bilinen bir endüstriyel yöntemdir. Toz haline öğütülen oksitler, indirgeyici atmosfer altında uygun sıcaklıklara ısıtılarak indirgenir. En ucuz indirgeyici ortam karbon ve hidrojenidir.

2.2.4. Elektroliz yöntemle toz üretimi

Elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartları uygunca seçerek, tozu elde edilecek metal anot olarak elektroliz banyosuna yerleştirilir ve metal parçaları çözünerek katot üzerinde toplanır.

Daha sonraki işlemler olarak, yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme gerekli olabilir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır gelir, aynı zamanda krom ve magnezyum da bu yöntemle üretilebilir. Elektrolitik tozlar saftır, ancak bu yöntemin pahalı olmasından dolayı kullanımı sınırlıdır. Şekil 2.3 'de elektroliz yöntemi ile toz elde edilmesinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2.3. Elektroliz yöntemi ile toz üretiminin şematik görünümü

2.2.5. Atomizasyon yöntemleri ile toz üretimi

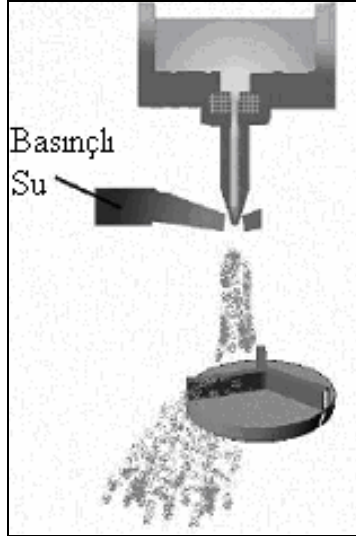
Bu yöntemde tozlar, sıvı metalin başka bir katı yüzeye çarpmadan önce küçük damlacıkların hızlı bir şekilde katılaşması ile elde edilir. Bu ise sıvı metalin, bir gazı ile veya sıvı akışkan jeti ile parçalanmasını sağlamak suretiyle gerçekleştirilir. Kullanılan gaz çeşitleri genellikle argon, azot veya hava, sıvı olarak ise su kullanılır. Püskürtme açısı ve konisi, akışkan hızı, debisi, akan metalin kalınlığı gibi birçok parametrenin kontrolü ile çok farklı boyutlarda toz üretmek mümkündür.

Katılaşma hızına bağlı olarak parçacığın şekli küresel halden, su veya düşük ısı kapasiteli gaz kullanılması halinde ise daha düzensiz parçacığa kadar farklılık gösterebilir. Pratikte bu yöntem ergitilebilen bütün metallere uygulanabilir. Ticari olarak üretilebilen tozlar arasında, demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, piring, bronz, alüminyum, kurşun, kalay, çinko ve kadmiyum gibi diğer düşük ergitme dereceli metal tozları sayılabilir. Krom gibi kolay oksitlenebilen metaller içeren alaşımlar, argon gibi asal gaz altında üretilmektedir. Atomizasyon yönteminin

avantajlarından biri de alaşım tozlarının ergitilmesinde rahatlıkla kullanılabilmesidir. Bu yöntemle üretilen tozların bileşimleri her bir toz tanesinde aynı kalmaktadır.

Döner diskli atomizasyon yöntemi

Atomizasyon için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bunların içinde önemli bir yer tutan yöntem merkezkaç kuvvetinin etkisiyle toz metal üretimini sağlayan döner disk yöntemidir. Bu yöntem içinde de iki ayrı üretim tekniği vardır. Bunlardan biri belli miktarda sıvı metal toz oluşturacak kadar merkezkaç kuvvetine tabi tutulur, diğer yöntemde ise ergimiş metal sürekli dönen bir disk veya koni üzerine akıtılır. Buradan saçılan metalin toz haline gelmesi sağlanır. Şekil 2.4'te döner disk yöntemi ile toz üretiminin şematik görünümü verilmiştir.

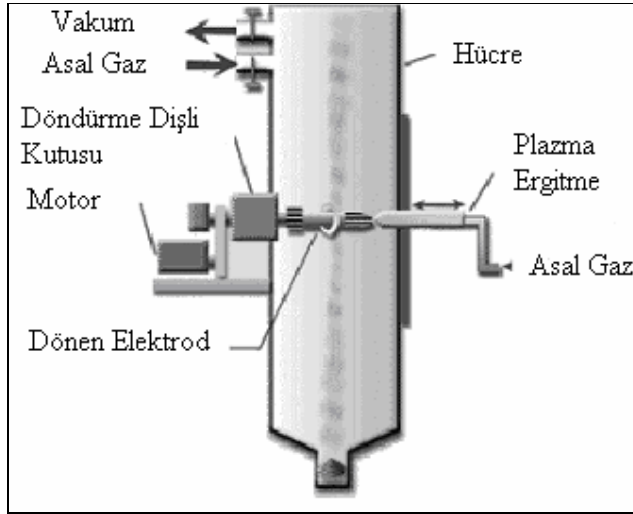


Şekil 2.4. Döner disk atomizasyon yöntemi ile toz üretiminin şematik görünümü

Döner elektrotlu atomizasyon yöntemi

Bu yöntemde tozu elde edilecek metalden yapılmış bir elektrod ile ergimeyen tungsten elektrod arasında ark oluşturulur. Şekil 2.5'te şematik görünümü verilen yöntemde ergiyen elektrodun döndürülmesiyle, elektrik arkı altında bunun ucunda

oluşan metal damlaları savrulurarak parçalanır ve tanka toplanır. Oksidasyonu önlemek amacıyla toz toplama tankı genellikle helyum veya argon gibi bir asal gazla doldurulur. Bu yöntemle küresel ve oldukça eşit tane büyüklüğünde metal tozu üretmek mümkün olmaktadır.



Şekil 2.5. Döner elektrotlu atomizasyonu ile toz üretiminin şematik görünümü

Vakum atomizasyon yöntemi

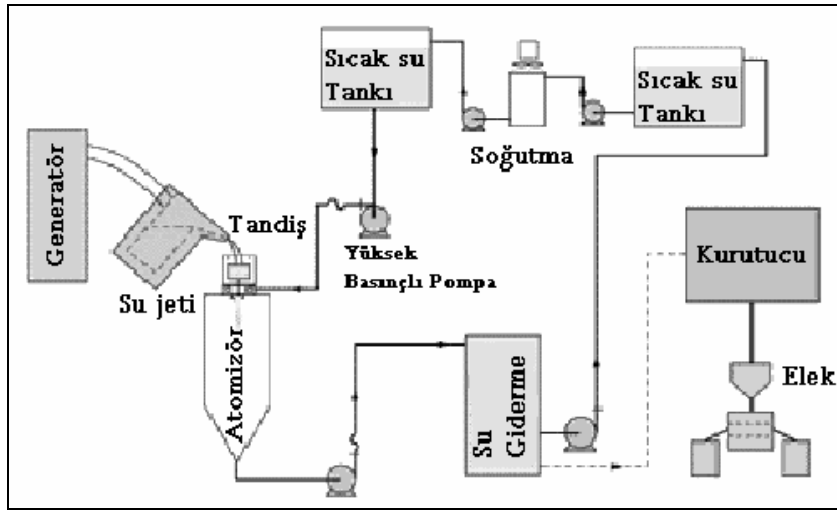
Bu yöntemde silindirik bir tankın alt kısmında sıvı metal potası, üst kısmında da vakum atomizasyon odası bulunmaktadır. Her iki bölüm sıvının geçeceği memeyi taşıyan bir plaka tarafından bölünmüştür. Memenin alt kısmında ona bağlı bir seramik boru bulunmaktadır.

Vakum altındaki sıvı metal önce belirli bir sıcaklığa kadar indüksiyon akımı ile ısıtılır. Sonra bu bölüme hidrojen gazı doldurulur. Potadaki sıvı metalde bu hidrojen gazı çözüldükten sonra potayı yukarı taşıyan mil potayı yukarı doğru iterek seramik boruyu potaya daldırır. Üst kısmında vakum olduğu için ergimiş sıvı metal memeden geçip parçalanarak soğur.

Su atomizasyon yöntemi

Sıvı metali toz haline getirebilmek için bu yöntemde basınçlı su kullanılır. Şekil 2.6'da yöntemin temel prensibi şematik olarak verilmiştir. Ergitme ocağından tandiçe, buradan da bir nozuldan geçerek akan sıvı metal demetine belirli bir açıda basınçlı su püskürtülerek toz haline gelmesi sağlanır. Kimyasal ve fiziksel özellikleri değiştirebilmek için suya bazı katkıları yapılabilir.

Özel memelerden püskürtülen suyun basıncı 5,5-20 MPa, hızı 70-230 m/s, debisi ise 110-380 litre/dakika değerleri arasında değişir. Kullanılan su filtre edilip soğutulduktan sonra tekrar kullanılabilir. Atomize edilen sıvı metal paslanmaz çelikten yapılan bir tanka toplanır. Metal tozunu oksidasyondan korumak için tanka azot gazı doldurulabilir. Sıvı metalin aktığı memenin şekli ve suyu püskürten üfleçlerin tipi elde edilecek metal tozunun boyutlarını, boyut dağılımını ve şeklini etkilemektedir.

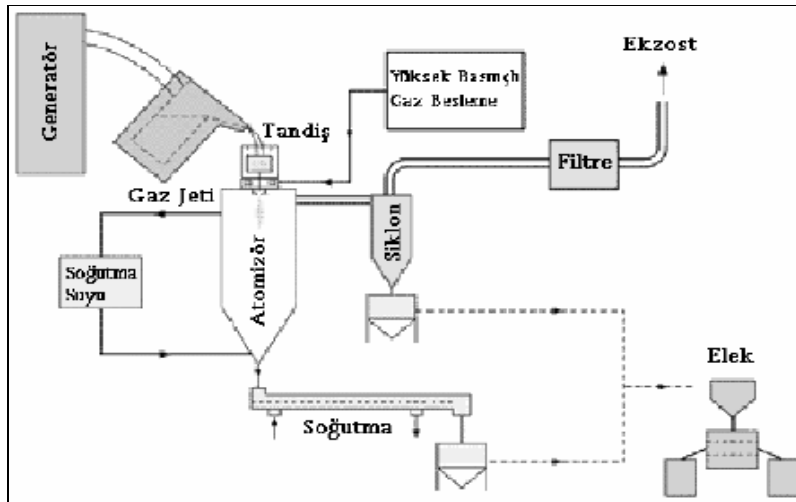


Şekil 2.6. Su atomizasyonu ile toz üretiminin şematik görünümü

Gaz atomizasyon yöntemi

Basınçlı gaz ile atomizasyon yönteminin çalışma prensibi su atomizasyon yöntemine benzer, ancak burada akışkan olarak su yerine gaz kullanılır. Basınçlı gaz ile atomizasyon yöntemi Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi şematik olarak gösterilebilir. Sistemin birbirine püskürtme memesi ile bağlantılı üst üste bulunan iki odası vardır. Üstteki odada sıvı metal potası bulunmakta, alttaki odada ise atomizasyon işlemi yapılmaktadır. Her iki oda da vakum pompasına bağlantılı olup oksidasyonu engellemek amacıyla işlem vakum altında yapılmaktadır. Sıvı metal potası ve atomizasyon memesi yüksek frekanslı indüksiyon bobinleri ile sıcak tutulmaktadır. Atomizasyon odasında oluşan fazla buharı ve yüksek basıncı engellemek için emniyet ventilinden yararlanılmaktadır. Bu ventilin bulunduğu borunun diğer ucu siklon ve filtre üzerinden atmosfere veya bir çıkışa bağlıdır.

Basınçlı gaz çıkışından boru ile memeye ulaşan gaz potadaki sıvı metali beraberinde sürükleyerek atomizasyon odasında pülverize ederek dağıtır. Soğuyan metal tozu bu odanın tabanında bir hazne içerisinde toplanır. Pülverize edilen metal tozlarının birbirine yapışmaması ve şekillerinin bozulmaması için atomizasyon odasının boyutları dikkatli seçilmelidir.



Şekil 2.7. Gaz atomizasyonu ile toz üretiminin şematik görünümü

Süper alaşımlar için kapalı devre argon gazı kullanılır. Takım çelikleri ve paslanmaz çelikler için ise daha ucuz olması bakımından argon veya argon gazı karışımı kullanılır. Sıvı metal atomizasyon gazının bir kısmını absorplayabilir, bu gaz daha sonra vakum altında uzaklaştırılabilir.

Su atomizasyon yönteminde olduğu gibi gaz atomizasyon yönteminde de üfleçlerin özellikleri elde edilecek tozun şeklini yakından etkilemektedir. Genellikle istene tane boyutu olabildiğince ince tane boyutlu toz üretmektir. Bunun için ise süpersonik üfleçler geliştirilmiştir. Bu yöntem ile çok ince boyutlu toz elde edilir.[1]

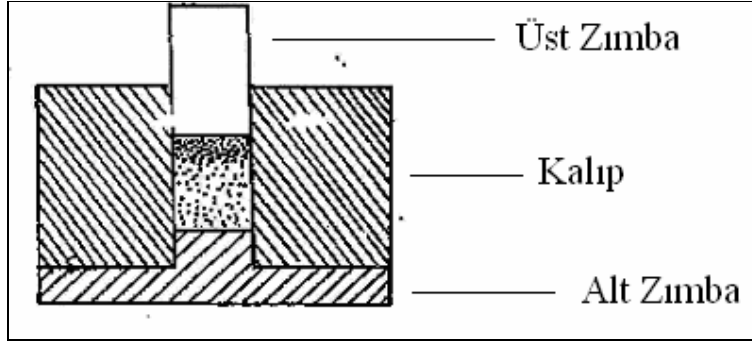
2.3. Metal Tozların Preslenmesi

Toz Metalürjisindeki en önemli adım preslemedir. Metal tozlar, özel olarak hazırlanmış çelik kalıp içersinde basıncın etkisiyle kompakt bir hale getirilir. Bu işlem için genellikle hidrolik, mekanik ve pnömatik presler kullanılmaktadır. Preslerin uyguladıkları basınç değerleri 70 ila 700 MPa arasındadır ve pratikte kullanılan basınç değerleri ise genellikle 145-450 MPa arasındadır. Preslerin büyük bir kısmının kapasitesi 100 ton civarındadır. Son zamanlarda 200-300 ton kapasiteli presler yapılmıştır. Toz Metalürjisi ürünlerinin kesit alanı maksimum 2000 mm²'dir. Ancak yüksek kapasiteli özel preslerin kullanılması halinde bu değer 6500 mm²'ye kadar çıkabilmektedir.

Uygulamaların çoğunluğunda, toz karışım yerçekimi etkisiyle kalıbı doldurur, fazla kısımlar alınır ve tozu sıkıştırmak için pres kapatılır. Toz miktarı için hacim veya ağırlık esasına göre bir başlangıç ölçüsü oluşturulur. Sıkıştırma işlemi esnasında toz partikülleri önce uygulanan kuvvet yönünde hareket ederler.

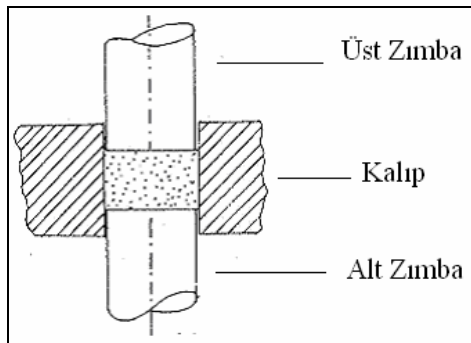
Tozlar sıvı gibi akmaz, kalıp yüzeyi ile partiküller arasında sürtünme neticesi bir reaksiyon kuvveti gelişir. Bu kuvvet uygulanan kuvvete eşit bir değere ulaşana kadar sıkışma eksenel yönde devam eder.

Basınç bir darbe şeklinde uygulanırsa, maksimum yoğunluk alt zımbanın hemen altında meydana gelir ve alt zımba ile temas eden yüzeyden itibaren artan mesafe ile birlikte azalır. Bu yüzden ürün boyunca homojen yoğunluğun sağlanması amacıyla basıncın homojen bir şekilde transferi pek mümkün değildir.



Şekil 2.8. Tek yönlü preslemenin şematik görünümü

Çift aksiyonlu presler daha homojen yoğunluk elde edilmesi ve daha kalın ürünlerin preslenebilmesi için kullanılırlar. Sıkıştırma işleminde kalıp ile zımbalar arasındaki sürtünme önemli bir faktör olduğundan, presleme ile elde edilen yoğunluk, preslenen parçanın kalınlığı ve genişliğinin bir fonksiyonudur. Homojen yoğunluk dağılımını sağlayabilmek için kalınlık/genişlik (t/w) oranı 2 den küçük olmalıdır. Kalınlık/genişlik oranı 2 den büyük olan ürünlerde yoğunluk parça içinde bir noktadan diğer bir noktaya değişiklik gösterebilir.



Şekil 2.9. Çift yönlü preslemenin şematik görünümü

Presleme esnasında meydana gelen olumsuzlukların sebebi olarak, toz partiküllerinin yüzeylerinin genellikle düzgün olmayıp çok karmaşık olmalarına, karşılıklı temas yüzeyinin çok küçük olmasına ve tozların saflığının imalat şekline göre değişmesi gösterilebilir. Ayrıca partiküller havada çok molekülü oksit ve gaz tabakalarıyla kaplıdır. Bu ise çekme kuvvetlerinin tesirini engeller. Ergime ile elde edilen bir metal yüzeyini çevreleyen tabakanın yapısı, içinde bulunan bir kristalin dış tabakasındakinden genellikle farklıdır.

2.4. Sinterleme

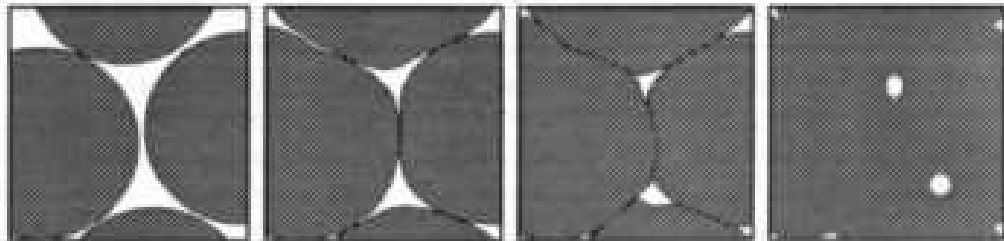
Sinterleme, preslenmiş toz metallerin mukavemet kazandığı bir ısı işlemidir. Demir esaslı alaşımlar için sinterleme sıcaklığı genellikle 1100-1150°C arasındadır. Bazı durumlarda sinterleme sıcaklığı 1250°C'a kadar çıkabilir. Sinterleme işleminin süresi uygulamanın çeşidine göre 10 ile 60 dakika arasında değişebilir. Malzemeler bir kap içine yerleştirildikten sonra fırınlanmaktadır. Sinterleme sırasında oluşacak oksidasyonu engellemek için kullanılan ortamlar kırılmış amonyak, azot veya argon gibi atmosferlerdir. Sinterlenmiş parçalarda örneğin demir esaslı alaşımlarda karbon içeriğinin kontrolü önemlidir.

Zhao Naiqin ve arkadaşları [2] Toz Metalürjisi ile üretilen, WC ile takviye edilmiş bakır kompozit malzemenin farklı sıcaklıklarda ve zamanlarda yapılan sinterleme işleminin malzemenin mikro yapısındaki dönüşümlere etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Sonuçlar, sinterleme işleminin sonunda malzemede belirgin bir büzülmenin olmadığını göstermiştir. WC partikülleri sinterleme sürecini geciktirip tozların büyümelerine karşı direnç göstermiştir. Zhang Rui ve arkadaşlarının [3] yapmış oldukları çalışmada, bronz toz metallerin sinterlenmesi sırasında, yoğunluk değişimi ve diğer heterojen faktörler (çarpılma, eğilme, çatlaklar vs.) malzemelerde büzülme neden olduğunu görmüşlerdir. İki küresel parça Resim 2.1'de görüldüğü gibi temas halinde olduğu kabul edilir. Sinterleme sırasında parçacıklarda önce bir boyun büyümesi, ilerleyen sinterleme zamanı ile gözeneklerde büzülme olur. Gözenek kanalları kapanarak kapalı gözenek şekline dönüşürler. Gözenek küreselleşirken gözenekler tane sınırları tarafından yerleştirilir.



Resim 2.1. Sinterleme sürecinde boyun oluşumu

Sinterleme işlemlerinin birçoğu üç aşamalıdır ve kullanılan fırınlar buna göre tasarlanmıştır. İlk aşamada, parçaları oluşturan toz tane yüzeyleri oksitlerden temizlenir. Bu aşamada ısıtma sıcaklığı düşüktür. Çünkü yüksek ısıtma sıcaklıkları, yüksek bir iç basınç oluşturarak parçaların dağılmasına yol açar. İkinci aşamada, yüksek sıcaklık sağlanarak tanecikler arasında kuvvetli bağlar oluşturulur. Bu aşamadaki kalış süresi, istenen yoğunluk ve özelliklerin elde edilebilmesi için yeterli olmalıdır. Bu süre genellikle on dakika ile birkaç saat arasındadır. Üçüncü aşamada, parçalar kontrollü bir atmosfer altında kontrollü bir şekilde soğutulur, oksidasyon ve ısıl şok önlenir. Pişirme işlemi sonunda parçaların hacmi azalır, yoğunluklar ve mukavemetleri artar.



Şekil 2.10. Sinterleme sürecinde malzemenin mikro yapısındaki değişimler

3. GÖZENEKLİ ORTAMLAR İÇİN SU VERME İŞLEMİ

Metallere su vermektan amaç, belli sıcaklığa kadar ısıtılmış bir metal parçasının hızlı bir şekilde soğutularak martensitik bir yapı sağlanmasıdır. Bu amaç için gerekli soğutma hızı, su verilecek parçanın büyüklüğüne, metalin sertleşme eğilimine ve su verme ortamına bağlı olarak değişir.

Su verilmekte olan parçanın bünyesinde çatlamlara veya çarpımalara neden olacak anormal dönüşüm gerilmelerine meydan vermemek için soğutma hızı, gereğinden daha hızlı olmamalıdır. Eğer soğutma hızı çok düşükse, uygun bir sertlik elde edilemez, soğutma hızı çok yüksek ise genellikle çarpımlar ve çatlamlar meydana gelebilir.

En uygun su verme ortamı yüksek sıcaklık aralıklarında, iyi soğutma özelliği olan ve parçada istenen sertleşmenin olduğu dönüşüm sıcaklıkları aralıklarında, çatlamlara meydan vermeyecek kadar bir soğutma hızı sağlanmış olanıdır.

Uygulanan soğutma ortamı; genellikle su, yağ veya tuz banyolarıdır. Metal türleri için bu ortamların her birinin, kendine has soğutma hızları ve çeşitli yararları olsa da, bir soğutma ortamının pompa, pervane veya püskürtücü gibi yardımcı donanımlarla hareketlendirilmesi malzemeye olumlu özellikler sağlar. Örneğin suyun yüksek soğutma hızı özelliğinden tam anlamıyla yararlanabilmek için, suyu hareketli hale getirmek gerekir.

Su verme koşullarının devamlılığını sağlamak için, soğutma ortamı sıcaklığının sabit tutulması gereklidir. Bu da soğutma ortamı içine uygun soğutucular konmasıyla sağlanabilir. Su verme işlemine tabi tutulmakta olan parça yapısının tamamen martensitik dönüşümünü sağlamak amacıyla, soğutma ortamının içinde kalacağı süre, kesin olarak tayin edilmelidir. Çatlamlara meydan vermemek için, su verilmiş parçanın derhal temperlenmesi (meneviş işlemi) kesinlikle gereklidir.

Birçok mühendislik malzemesi az veya çok, bir miktar gözeneklidir. Gözenek, malzemelerin yapılarında bulunan çok ufak boşluklardır. Gözeneklilik ise gözenekli olma durumu şeklinde tanımlanabilir. Pek çok malzemenin fiziksel özelliklerinin ısı iletim katsayısı, elektriksel direnç gibi özellikler üzerindeki etkisi deneysel ve teorik çalışmalarla birçok defa ortaya konmuştur. Bu çalışmalardan bazılarını sıralarsak;

Aivazov ve Domashnev [4] sıcak şekillendirilmiş titanyumnitride gözenekliliğin, ısı iletkenlik üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Oda sıcaklığındaki, çeşitli gözeneklilikteki, sıcak şekillendirilmiş titanyumnitrit parçalarının elektriksel ve ısı iletkenliklerini belirlemek için deneyler yapmışlardır. Deneylerden teorik sonuçlarla uyum içinde sonuçlar elde edilmiştir.

Çeşitli toz şekillerini içeren gözenekli malzemelerin ısı iletkenlikleri için çok sayıda analitik ifade olmasına rağmen, ısı iletkenliği gözenekliliğin bir fonksiyonu olarak veren deneysel olarak belirlenmiş bağıntılar da vardır. Aivazov ve Domashnev, toz geometrisinden bağımsız olan deneysel bir ifade önermişlerdir:

$$\frac{k}{k_s} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + n\varepsilon^2} \quad (3.1)$$

Bu bağıntıda n deneysel olarak belirlenmiş bir sabittir ve Koh ve Fortini [5] istatistiksel analiz kullanarak n değerini 11 olarak belirlemişlerdir. Dolayısıyla Eş. 3.1.,

$$\frac{k}{k_s} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + 11\varepsilon^2} \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir.

Koh ve Fortini değişik gözeneklilik ve sıcaklıktaki, 304L paslanmaz çeliği Rigimesh metodu, küresel geometrideki tozların sinterlenmesi ve OFHC metoduyla küresel

geometrideki tozların sinterlenmesi gibi gözenekli malzemelerin ısı iletimi ve elektriksel dirençlerini hesaplayıp, çeşitli bağıntılar kurmuşlardır.

Isıl iletim ve elektriksel direncin, katı malzeme özelliklerinin fonksiyonu olduğunu bulup, kalıp yapısında bulunan gözenekler ihmal edilmiştir. Aynı zamanda, geliştirilmiş Wiedeman-Franz-Lorenz eşitliğinin gözenekli malzemeler üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Çizelge 3.1. Paslanmaz çelik ve bakır tozları için boyutsuz ısı iletimi ve direnci

Malzeme	Gözeneklilik	λ/λ_0	ρ_0/ρ
304L Paslanmaz çelik (Rigimesh yöntemi)	0.093	0.869	0.970
	0.203	0.530	0.494
	0.385	0.267	0.243
304L Paslanmaz çelik (Sinterlenmiş tozlar)	0.0924	0.739	0.750
	0.215	0.528	0.526
	0.315	0.347	0.330
OFCH yöntemi (Sinterlenmiş bakır tozları)	0.103	0.805	0.810
	0.210	0.528	0.494
	0.304	0.403	0.380

Yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin gözeneklilikten bağımsız olmasına karşın, malzemelerin düşük ısı iletiminin yapılarındaki gözenekliliğe bağlı olduğunu saptamışlardır.

Howard ve Koczak [6] demir, paslanmaz çelik ve bronz tozundan yapılmış taneciklerin ısı iletkenliğinin analizi ile fırın atmosferi, yoğunluk ve toz şekillerinin bağıl etkilerinin analizini yapmışlardır.

Odelevski [7] ısı iletkenliğin, matris sistemindeki merkezleri kübik kafeste bulunan gözeneklerin bir fonksiyonu olduğuna dair ifadeler önermiştir.

$$k = k_s \left(1 + \frac{\varepsilon}{\frac{1-\varepsilon}{3} + \frac{k_s}{k_1 - k_s}} \right) \quad (3.3)$$

Uzun prizma veya silindir formda gözenekliliğe sahip malzemelerin analitik olarak ısı iletim katsayısı ifadeleri şu şekildedir.

$$k = k_s \left(1 + \frac{\varepsilon}{\frac{1-\varepsilon}{2} + \frac{k_s}{k_1 - k_s}} \right) \quad (3.4)$$

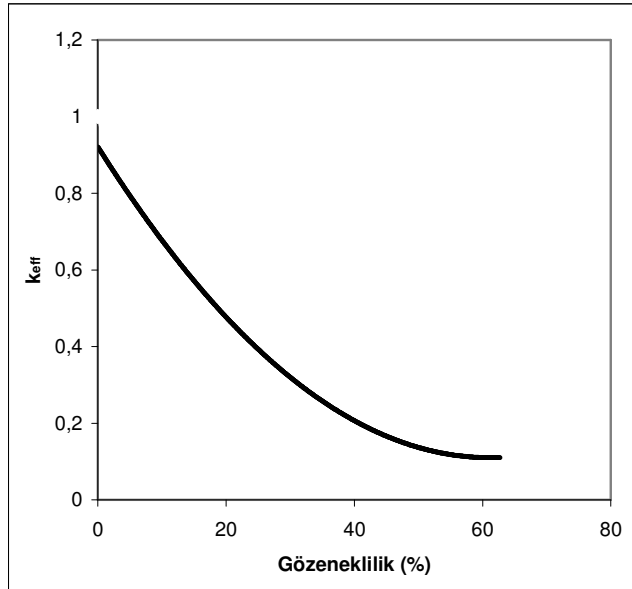
Veinberg [8] küresel gözenekler içeren malzemeler için ısı iletimini şu ifade ile belirtmiştir.

$$(1-\varepsilon) \left(\frac{k}{k_s} \right)^{1/3} = \frac{k_1 - k}{k_1 - k_s} \quad (3.5)$$

Stewart ve Welsh [9] sonlu elemanlar metoduyla yaptıkları sayısal çalışmada, gözenekli malzemelerde ısı iletim katsayısının önemli ölçüde düşebileceği ve buna bağlı olarak ısı aktarımının azalacağı sonucuna ulaşmışlardır.

Çizelge 3.2. Etken ısı iletiminin gözeneklilik ile değişimi

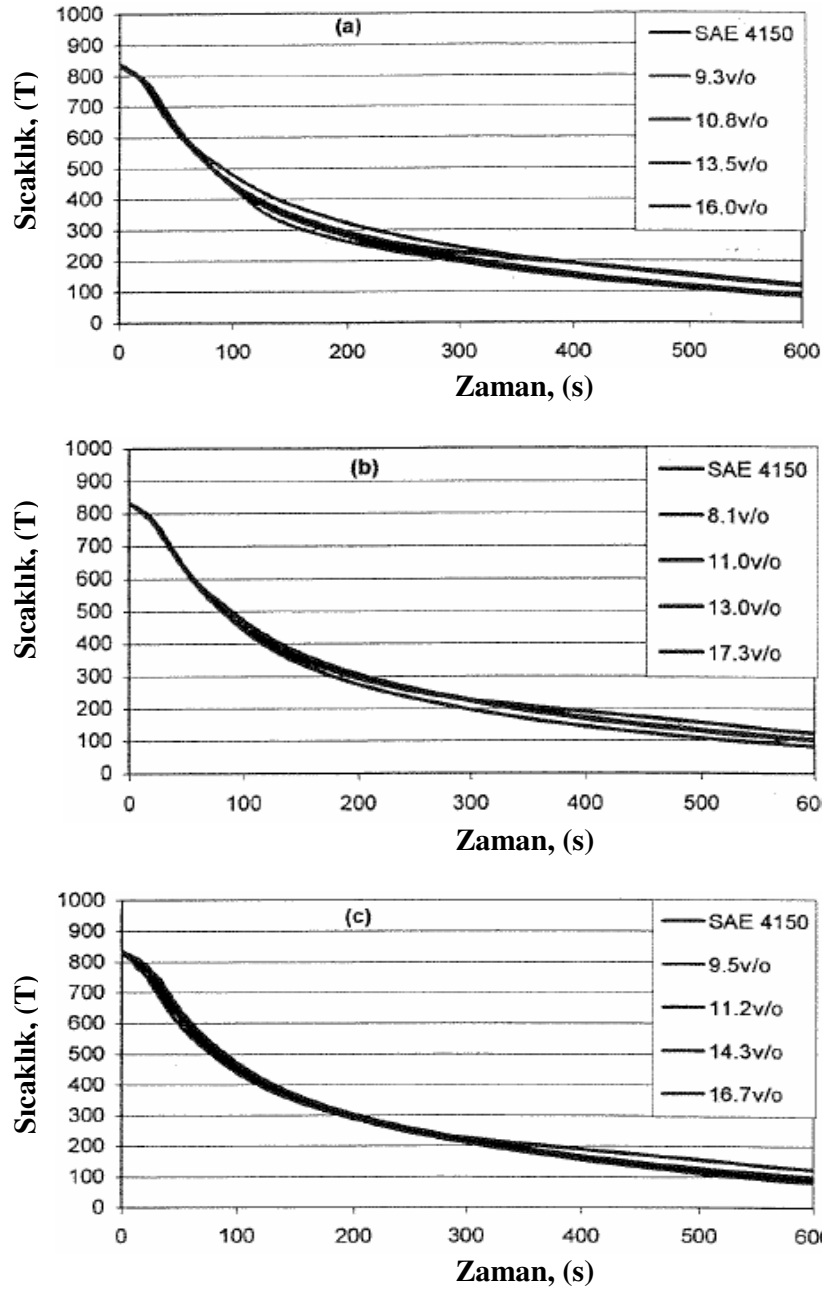
Hücreler	Mesh yoğunluğu	Gözenek yarıçapı (cm)	Bağıl yoğunluk	Gözeneklilik	k_{eff}
1	100	2,5	91,7%	8,3%	0,722
1	320	2,5	91,7%	8,4%	0,73
2	320	2,5	91,7%	8,3%	0,675
3	320	4,9	37,3%	62,7%	0,079
3	320	4,5	51,4%	48,6%	0,198
3	320	3,5	77,1%	22,9%	0,442
3	320	3	85,6%	14,4%	0,56
3	320	2,5	91,7%	8,3%	0,675
3	320	2	95,7%	4,3%	0,78
3	320	1,5	98,2%	1,8%	0,87
3	320	0	100%	0%	1



Şekil 3.1. Isıl iletimin gözeneklilik ile değişimi

Sarıtaş ve arkadaşları [10] Sinterlenmiş T/M çeliklerinde gözenekliliğin termal iletkenliğe ve sertleşebilirliğe etkisini araştırmışlar ve deneysel olarak

gözlemlemişlerdir. Gözenekliliğin ısı iletkenliği azalttığı ve soğuma eğrilerini etkilediğini görmüşlerdir. Deneylerini üç farklı çelik için yapmışlardır.



Şekil 3.2. Toz metal çeliklerin su verme işleminde 25 mm mesafedeki gözenekliliğin etkisini gösteren soğuma eğrileri (a. FL-4405, b. FLN'-44055, c. FLC2-4405)

7v/o ile 16v/o arasında değişen gözeneklilikte Jominy test numuneleri hazırlanmış ve ısı-çiftler çubuğun sonundan başlamak üzere 5, 25, 45, 65 mm uzaklıklara yerleştirilmiş ve soğuma eğrisi gözlemlenmiştir.

Teorik olarak ; 10 v/o gözenekliliğe kadar ısıl yayılım katsayısı

$$\frac{\alpha}{\alpha_s} = 1 - 2\epsilon \quad (3.6)$$

olarak tanımlanır.

Daha önceki deneylerle karşılaştırıldığında 20 v/o gözenekliliğe kadar ısıl iletkenliğin

$$\frac{k}{k_s} = 1 - 2\epsilon \quad (3.7)$$

olduğu tanımlanmıştır.

FL-4405 kompozisyonu yağlayıcı madde konulmadan karıştirılmıştır. Daha sonra 246 ile 422 MPa arasında değişen basınçlar uygulanarak soğuk izostatik numuneler elde edilmiştir. Ham çubuklar 1120 °C 'de hacimce %75 H₂ + %25 N₂ atmosferinde sinterleme yapılmıştır. Sinterleme sonucu 6,5gr/cm³ ile 7,22 gr/cm³ yoğunluğa sahip numuneler elde edilmiştir. K tipi 3m uzunluğundaki ısı-çiftler ile datalogger aracılığı ile ölçüm yapılmıştır.

P. Grootenhuis ve arkadaşları [11] % 89 bakır % 11 kalay içeren sinterlenmiş gözenekli bronz malzeme parçacıklarının 20 °C' den 200 °C 'ye kadarki, ısıl iletim ve elektriksel dirençlerinin ölçümlerini yapmışlardır. Tozlar küresel geometride olup boyutları 0.00133 cm ile 0.040 cm arasında, yoğunluklarının ise 5.27 g/cm³ ile 7.01 g/cm³ aralığında değiştiğini saptamışlardır.

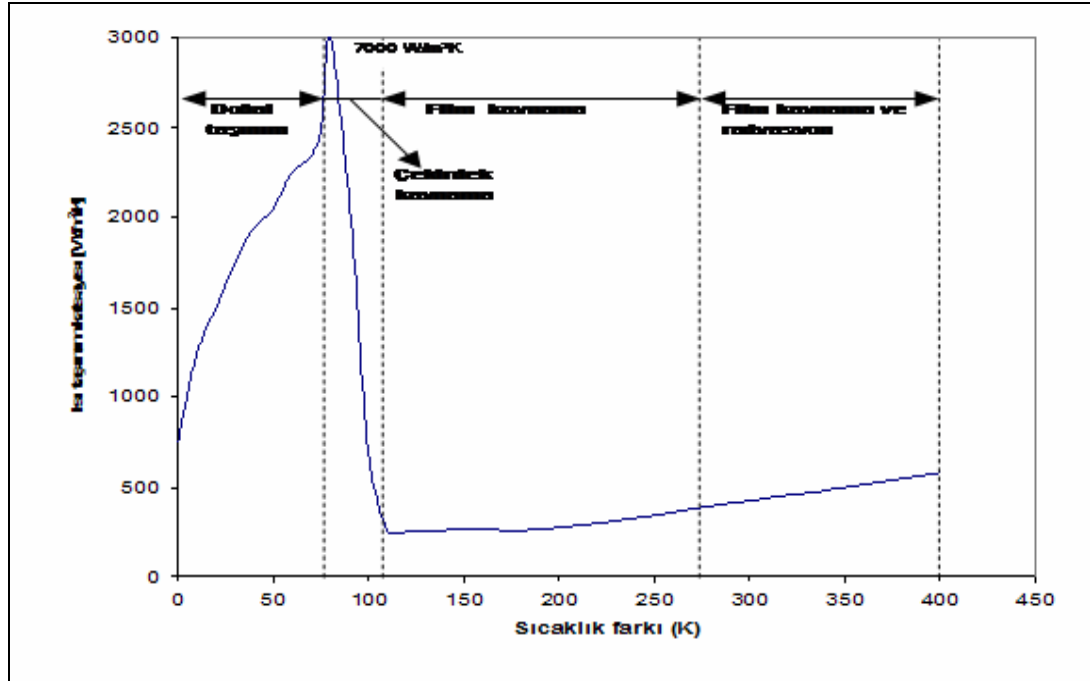
Geliştirilmiş Lorenz bağıntısını kullanarak; ısı iletimi K , elektriksel direnci ρ ve ortalama sıcaklığı T olarak ifade ederek deneysel sonuçları aşağıdaki denklem ile ifade etmişlerdir.

$$K = 0,58 \times 10^{-8} \frac{T}{\rho} + 0,005 \quad (3.8)$$

Benzer kompozisyondaki katı bronz malzemeleri de aynı ifade (6) ile belirtmişlerdir. Buradan; ısı iletimini toz boyutlarından bağımsız olduğunu ancak ısı iletimin yoğunluğa bağlı olup, gözeneklilikten dolayı yoğunluğun azalmasıyla ısı iletiminin de azaldığı görülmüştür.

Su verme mekanizmasını tanımlamak için en uygun yol, malzemenin soğuma eğrilerini geliştirmektir. Ataer ve arkadaşlarının [12] gerçekleştirdiği sayısal çalışmada, literatürde verilen ampirik bağıntılardan elde edilmiş olan ısı taşınım katsayısının sıcaklık sıcaklık farkıyla olan değişim eğrisi görülmektedir. Yükseltilmiş sıcaklık olan 700 K'den banyo sıcaklığı olan 298 K'e kadar olan teorik çalışmada şu kabuller yapılmıştır:

- Malzeme soğutucuya dikey olarak daldırılmıştır.
- Batırma esnasındaki karıştırma etkisi ihmal edilmiştir.
- Su banyosu çok büyüktür ve sıcaklığı sabittir.



Şekil 3.3. Dikey yüzeylerindeki ısı aktarım katsayısı sıcaklık farkıyla değişimi [12]

Bu eğriye göre;

- $\Delta T < 80$ K olduğunda doğal taşınım olduğu,
- $80 < \Delta T < 105$ K arasında yüzeyde havuz tipi çekirdek kaynamanın olduğu,
- $105 < \Delta T < 275$ K arasında iken yalnız film kaynamanın olduğu ve,
- Radyasyonun ve film kaynamanın sıcaklık farkı 275 K'den büyük olduğunda yer aldığı görülüyor.

3.1. Çeliklere Uygulanan Su Verme İşlemi

Sertleştirme, demir-sementit diyagramında, ötektoid altı çelikleri A_3 , ötektoid üstü çelikleri ise A_1 sıcaklığının üzerine ısıtıp ($A_3+50^\circ\text{C}$ veya $A_1+50^\circ\text{C}$), hızla soğutarak mevcut östenitin perlit yerine martensit denilen çok sert ve iğneli görünümde bir mikro yapıya dönüştürülmesine denir. Böylece östenit alanından su verilen ötektoid altı çeliklerde çok az kalıntı östenitin dışında tamamen martensitik yapı olduğu halde, ($\gamma+2$.sementit) alanından su verilen ötektoid üstü çeliklerde martensit ve

kalıntı östenitten başka 2. sementit de bulunur. Bu durum özellikle tercih edilir. Çünkü sementit martensit kadar serttir.

Alaşımız çeliklerin sertleştirilebilmesi için soğuma hızının çok yüksek olması gerektiğinden suda soğutulurlar. Bu nedenle çeliklerin sertleştirilmesine pratikte genel olarak su verme veya sulama denmektedir. Ancak böyle çeliklerden yapılmış kalın kesitli parçaların iç kısmı, yeteri kadar hızla soğutulamadığı için maksimum sertliğe erişemez. Yani alaşımız çeliklerde sertleşme kabiliyeti azdır. Belli karbon miktarı için maksimum sertlik, östenitin tamamen martensite dönüşmesi halinde elde edilir ve bunun için gerekli minimum soğutma hızına kritik soğutma hızı denir. Bu hız “zaman-sıcaklık-dönüşüm, TTT” eğrilerinden kolayca görülebilir. TTT eğrileri A_1 sıcaklığı altındaki dengesiz östenitin sürekli soğuma ile veya sabit sıcaklıktaki faz değişimini zaman ve sıcaklığa bağlı olarak belirler. Biçimlerinden ötürü (S) eğrileri olarak ta adlandırılan bu diyagramlar her çelik için farklıdır. Örneğın alaşımız ve %0.8 C lu çelikten yapılmış bir parçayı suda soğutarak ($v > v_{kr}$) yalnız martenzit, yağda soğutmada ($v < v_{kr}$) martensit ve perlit, normalleştirmede ise (havada soğutma $v < v_{kr}$) yalnızca ince perlit elde edilmektedir. Suda soğutmaya rağmen kalın bir parçanın iç kısmında $v < v_{kr}$ olabilir. Alaşım elemanlarının çoğunlukla TTT eğrilerini sağa kaydırarak kritik hızı küçültmeleri nedeniyle alaşımız çelikleri östenit alanından yağda ve hatta havada soğutarak sertleştirmek mümkündür. Aynı sebepten ötürü bu çeliklerin sertleşme kabiliyetleri de fazladır.

Sertleştirilen parçalarda iç gerilmeler meydana gelir. Mikro gerilmelere, kübik ferrit kafesinin yerini alan ve karbon atomları ile gerilmiş olan tetragonal martenzit kafesinin sebep olduğu söylenebilir. Makro gerilmeler ise, martenzitin oluştuğu bölgelerdeki hacim artışından doğan dönüşüm gerilmeleri ile ani soğutulan parçanın iç ve dış bölgeleri arasındaki büyük soğuma hızı farkından ileri gelen ısı gerilmeleridir. Bu gerilme durumu, özellikle karmaşık şekilli parçalarda, çarpılma ve çatlama ile sonuçlanabilir [13].

3.1.1. Isıtma ortamları

Isıtma esnasında karbürizasyon ve dekarbürizasyon önlenmelidir. Aksi takdirde ölçülen sertlik değerleri hatalı olacağından, temperleme sıcaklığının seçimi de yanlış olur.

Yüzeydeki karbon miktarının değişimi, sertleştirme sırasında çeliğin çatlamasına neden olur. Eğer oksidasyon çok fazlzı ise, takım için ayarlanan toleranslar taşlama sonrası sağlanamayabilir. Takımın yüzeyini korumak için izlenecek ön tedbirler fırının tipine bağlıdır.

Su verme işleminde kullanılan bazı ısıtma ortamları;

- Tuz Banyosu Fırınları
- Gaz veya Yağla Ateşlenen Mufl Fırınlar
- Elektrikle Isıtılan Mufl Fırınlar
- Kontrolörlü Atmosferler
- Vakum Sertleştirici şeklinde sıralanabilir.

3.1.2. Martemperleme

Martemperleme işleminin prensipleri Şekil 3.4'deki TTT diyagramlarından açıkça anlaşılabilir. Bu sertleştirme işleminde soğuma iki basamakta oluşur. İlkinde takım bir ergimiş tuz banyosunda veya M_s , martansit başlama sıcaklığı, sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta tutulan bir metal banyosunda soğutulur. Banyoda soğutulan çelik takım, sıcaklığın takımın her tarafında eşit olmasına kadar banyoda tutulur. Takım sonra banyodan çıkarılır ve havada soğutularak martenzitik yapı elde edilir. Bu tür bir ısıl işleminde martensitin oluşması sırasında takımın yüzey ve merkezindeki sıcaklık farkı normal sertleştirmeye göre daha düşüktür. Bu nedenle, martemperleme yönteminde malzeme kesitleri çok farklı kalınlıklarda olsa bile ostenitin martensite dönüşümü tüm malzeme boyunca aynı anda gerçekleşir. Bunun sonucu olarak, takım

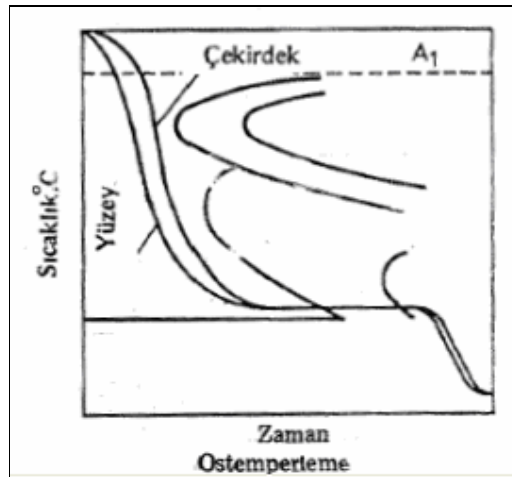
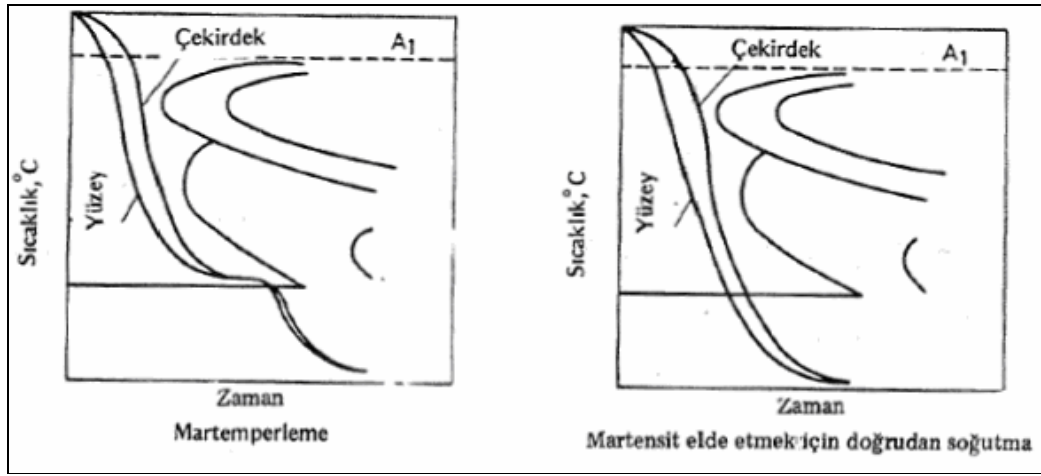
çok az kalıntı gerilmeler içerir ve minimum distorsiyon gösterir. Martemperleme sonucu elde edilen mikro yapı, prensip olarak alışagelmış su vermeyle sağlanan martenzitik yapı gibidir, ancak martemperleme sonrası yapıda daha fazla kalıntı östenit kalmaktadır. Martemperleme işlemini başarılı bir şekilde yürütmek için çeliğin bileşiminin doğru seçilmesi gerekir. Doğru seçilecek bileşimle, çeliğe martemperleme banyosunda su vermeyle ve daha sonra havada soğutmayla, istenilen martensitik bir yapı kazandırılabilir. Bu nedenle, martemperleme, yağda ve havada soğutulan çelikler grubu için sınırlandırılmıştır. Çizelge 3.3’de bazı takım çelikleri için uygulanabilir su verme ve martemperleme sıcaklıkları verilmiştir. Aynı tabloya martemperleme için uygun en büyük boyutlarda ilave edilmiştir. Bu boyutlar içinde maksimum çap 300 mm olarak alınmıştır. Bazı hallerde 300 mm çaptan daha büyük parçalar da martemperlenebilmektedir ancak bu durumlarda çok yüksek kapasiteli banyolar ve etkin karıştırıcı cihazlar gerekli olmaktadır [14].

Çizelge 3.3. Çeliğin martemperleme ve ostenitleme sıcaklıkları

Çeliğin gösterimi			Ostenitleme sıcaklığı	Martemperleme sıcaklığı	Maksimum çap
AISI BS	SIS	Bofors	°C	°C	Mm
-	2092	SR 1855	850-880	225-250	75
O1	2140	RT 1733	810-840	225-250	60
A2	2260	ROP 21	950-980	225-250	150
D2	2310	ROP 57	1000-1020	225-500	200
D6	2312	RT 60	960-1000	225-500	200
-	2550	HRO 1243	820-840	225-300	15
S1	2710	RTO 912	880-920	350-400	25
H 13	2242	ROP 19	1000-1050	300-500	300
H 10 A	-	QRO 45	1000-1050	300-500	100
-	-	QRT 71	1075-1100	300-500	100

Yeterince ostenitleştirdikten sonra, takım martemperleme banyosuna aktarılır. Banyonun ısı kapasitesi öyle büyük olmalıdır ki, içine daldırılan takımdan alacağı ısı ile kendi sıcaklığında her hangi bir artış meydana gelmemelidir. Takım, çekirdek

kısmı banyonun sıcaklığına ulaşmaya kadar, banyoda yeterli bir süre tutulur. Bununla beraber, tutma süresinin, ostenitin beynite dönüşmesine meydan verecek bir uzunlukta olmaması gerekir. Eğer böyle bir dönüşüm gerçekleşirse takım tam olarak sertlik kazanamaz. Genel olarak, 10 mm lik kesit kalınlığı için 2-4 dakikalık bir tutma süresi uygun olmaktadır. Bundan daha kısa tutma süresi düşük sertleştirme sıcaklıkları (850 °C), daha uzun tutma süresi için ise, yüksek sıcaklıklar (1000 °C), uygulanmaktadır.



Şekil 3.4. Sertleştirme için uygulanan farklı soğutma yöntemlerinin prensiplerini gösteren diyagramlar [14]

3.1.3. Ostemperleme

Ostemperleme adı verilen işleminde, çeliğin tokluğunu, aynı sertliği verecek normal sertleştirme ve temperleme işlemine oranla daha fazla artırmak mümkündür. Ostemperlenmiş takımlarda zararlı veya fazla gerilmeler mevcut olmadığı için çarpılma çok azdır. Ostemperleme işleminde, tıpkı martemperlemede olduğu gibi, sertleştirilecek parçalar M_s sıcaklığı üzerinde tutulan bir tuz banyosunda su verilirler. Ancak, tuz banyosunda tutma süresi çok uzun olduğunda, ostenitin pratik olarak beynite tamamen dönüşmesi söz konusudur. Tamamen beynitik olan yapının sertliği tuz banyosunun sıcaklığına bağlıdır. Yüksek sıcaklıktaki banyoda yapılan ostemperleme sonucu düşük sertlik elde edilir. TTT diyagramları, çoğu kez, farklı sıcaklıklarda %98-99 beynit oluşum sonrası sertlikleri gösterirler.

Martemperleme işlemi uygulanabilen tüm çelikler ostemperleme işlemine tabi tutulurlar. Buna ek olarak 10 mm'lik parçalara kadar olan yağ çelikleri ve maksimum 5 mm çapa kadar olan sade karbonlu çeliklere genel olarak ostemperleme işlemi uygulanır. Ostemperleme sıcaklığından soğutma, havada yapılır. Soğutma sonrası temperleme uygulanmaz.

Ostemperleme işlemi tokluğu, genellikle, belli bir sertlik aralığında artırır. Bu sertlik aralığında alışagelmış yöntemlerle sertleştirme ve temperleme uygulanmış çeliklerin darbe mukavemetlerinde azalma görülmektedir.

3.1.4. TTT ve CCT diyagramları ve önemi

Sabit sıcaklıkta dönüşümü gösteren zaman-sıcaklık-dönüşüm (time-temperature-transformation–TTT) diyagramları izotermal tavlama, ostemperleme veya martemperleme gibi izotermal işlemleri içerdiği zaman yararlı bilgiler verebilir. Ancak bu tip TTT diyagramlarıyla çeliklerin sertleşebilirlikleri belirlenebilmektedir. İkinci tip olarak sürekli soğuma dönüşüm (continuous-cooling-transformation –CCT) eğrileri, soğuma hızının değişimine bağlı olarak hangi fazın oluşacağını tahmin etmede önemlidir. Herding Th. ve arkadaşları, alüminyum katı çözeltilerinin sertleştirilmesinden sonra yüksek gerilim, küçük deformasyonlar için gerekli olan en

düşük su verme oranının hesabı ve su verme sıcaklıklarını belirlemek için TTT ve CCT diyagramlarının gerekliliğini yapmış oldukları çalışmada belirtmişlerdir [15].

Zaman - sıcaklık - dönüşüm

Demir - karbon denge diyagramının ısıtma işlemi proseslerinde tartışılmaz bir önemi vardır. Ancak bu diyagram sadece demir ile karbon arasında denge oluşumunun söz konusu olduğu koşulu tarif eder. Isıtma işlemlerinin büyük bir çoğunluğunda işlemi belirleyici faktörlerden biri olan zaman parametresinin etkisinin gösterildiği "Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm" adı verilen diyagramlardan yararlanır. Bu diyagramlarda hem zamanın hem de sıcaklığın dönüşümlere olan etkilerini takip etmek mümkündür.

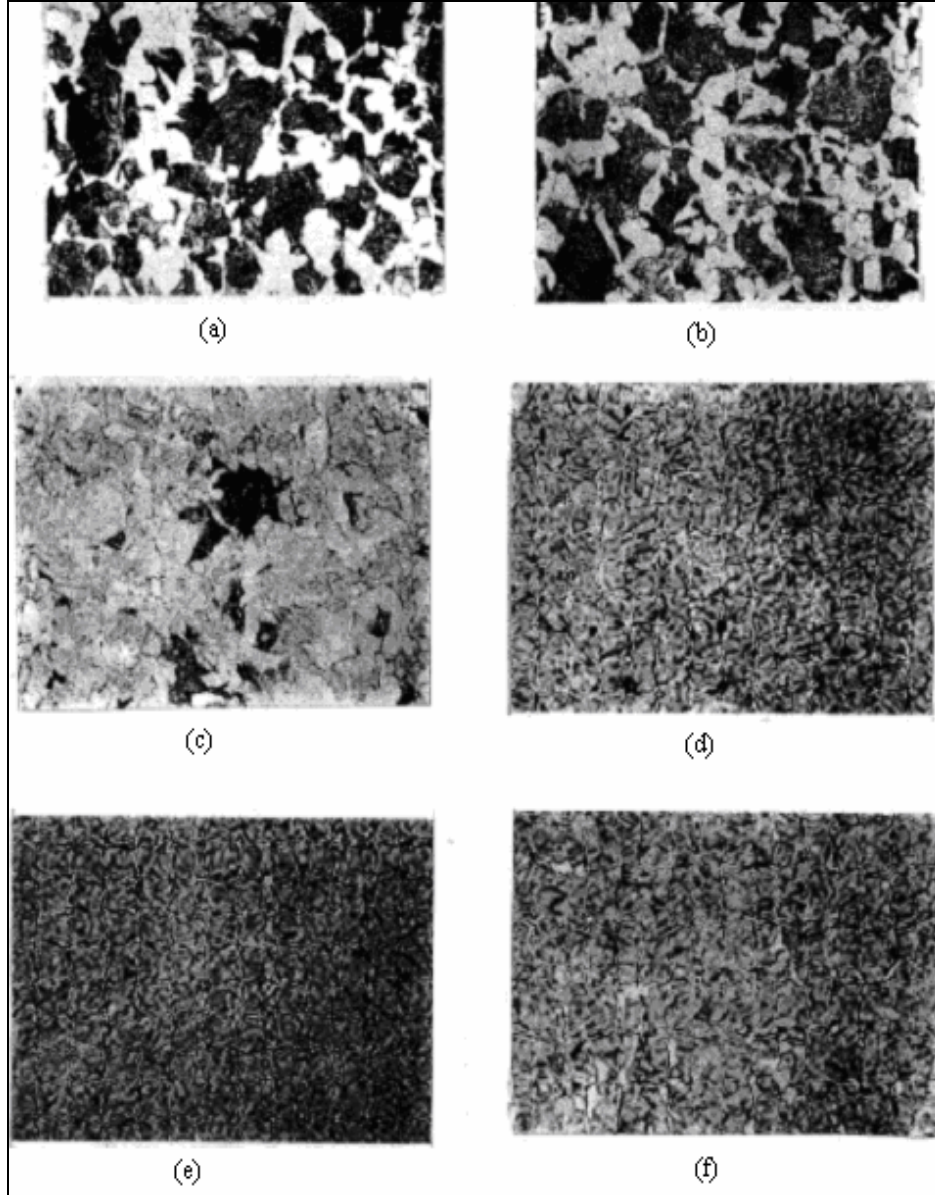
Isıtma

Zamanın etkisi en iyi bir şekilde Şekil 3.5 a-f de gösterilen diyagramlardan açıklanabilir. Şekil 3.5a. Fe-C denge diyagramının sol alt kısmına ait olup % 0,8C'lu bir çeliğin 723°C ye ısıtılması sırasında ostenite dönüşümünü göstermektedir. Bu diyagram dönüşümün ne kadar süreceği hususunda bilgi vermektedir. Şekil 3.5 b'den % 0,8 C'lu çelik için sıcaklığın 730°C de tutulduğu durumda dönüşümün 30 saniyede başlayacağı tahmin edilebilir. Eğer çelik bunun yerine, aniden 750 C ye ısıtılırsa, dönüşüm 10 saniye içinde, 810°C ye ısıtıldığında ise 1 saniyenin çok az üzerinde yani pratik olarak bu sıcaklıkta aniden başlar. Perlitin ostenit ve sementite dönüşümü 810°C de yaklaşık 6 saniyede tamamlanır. Eğer çelik tamamen ostenitik olacak ise, bu sıcaklıkta yaklaşık 5 saat tutulmalıdır. Pratikte, örneğin sertleştirme için yapılan ısıtmada, sementitin nadiren tam olarak katı eriyik içine alınması (ostenit içinde çözünmesi) % 100 ostenitik yapının elde edilmesini zorlaştırmaktadır.

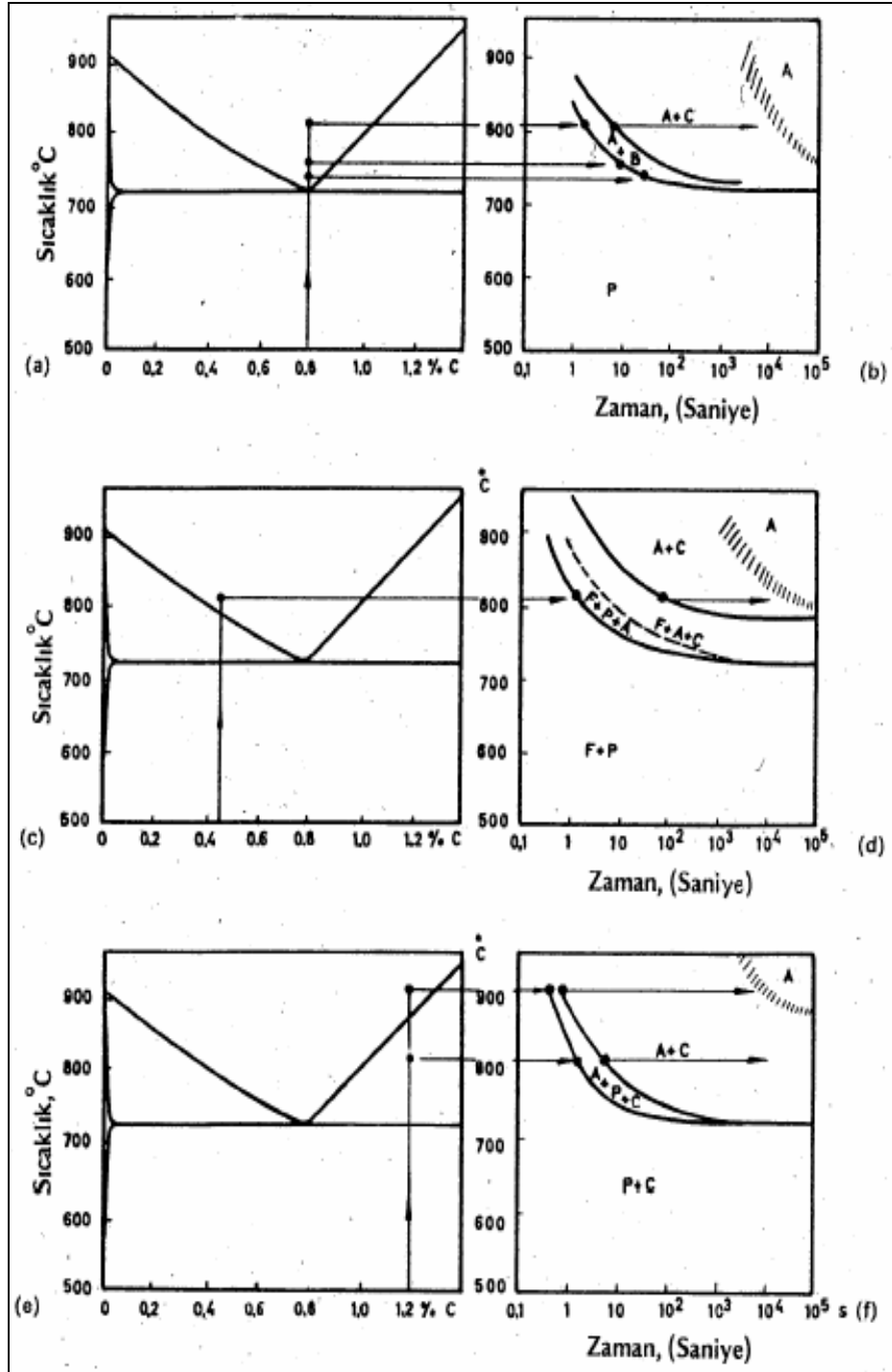
% 0,45 C içeren sade karbonlu bir çeliğe ait olan Şekil 3.5c ve Şekil 3.5d, 810°C'de aynı özellikleri, örneğin perlitin ostenite dönüşümünün ani oluşmasını göstermektedir. Burada perlitin dönüşümü 5 saniye içerisinde gerçekleşmiş olup, yapı; ferrit, ostenit ve sementitden oluşmaktadır. Yaklaşık 1 dakika sonra karbon ferrite difüze olmuş ve dolayısıyla ferrit ostenite dönüşmüştür. Yapıda mevcut sementit partiküllerin» tamamen çözümlenebilmek (katı eriyik içine almak) için 10 saatlik bir süre

gereklidir. % 1,2 C içeren ötektoid üstü bir çelik 810°C'ye ısıtıldığında, 5 saniye içerisinde Şekil 3.5'te ve Şekil 3.5f 'den görüldüğü gibi ostenit ve sementit karışımı bir yapıya sahip olur. Bu sıcaklıkta sementitin tamamen çözünmesi mümkün değildir. Bu durum denge diyagramından açıkça görülebilir. Sementitin tam olarak çözünmesini etkilemek için sıcaklığın en azından 860°C ye çıkarılması gerekir.

Sementitin çözünme hızını incelemek için çelik önceden tesbit edilen bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve orada belirli bir süre tutulduktan sonra su verme sonucu önceki mevcut yapı dondurulmuş yani dönüşmesi önlenmiş olur, ancak bu işleme ostenit martensite dönüşür, %0. 45 C'lu çeliğe ait böyle bir deneyden elde edilen sonuç Resim 3.1'te gösterilmektedir. Burada tüm hallerde tutma süresi 5 dakikadır. Resim 3.1a. % 50 Ferrit + % 50 Perlit içeren orijinal yapıyı göstermektedir. Bu yapıda mevcut sementit lamellerinin bir kısmı 725°C'de 5 dakika ısıtma sonucu küreler haline dönüşürler. Bu tür bir işleme küreselleştirme adı verilir. Küreselleştirme işlemi sonucu sertlikte azalma meydana gelir ve herhangi bir dönüşüm söz konusu değildir. Eğer yukarıdaki bileşimdeki çelik 735°C'ye ısıtılırsa perlitin esas kısmı ostenite dönüşür ki bu yapıya su verilmesi sonucu yapıda bir miktar ferrit ve perlit dönüşmemiş olarak kalır. 750 °C'de 5 dakikalık tutma süresi tüm perlitini dönüştürmek için yeterli olmamaktadır. Ferrit kalıntıları Resim 3.1'de açıkça görülebilir.



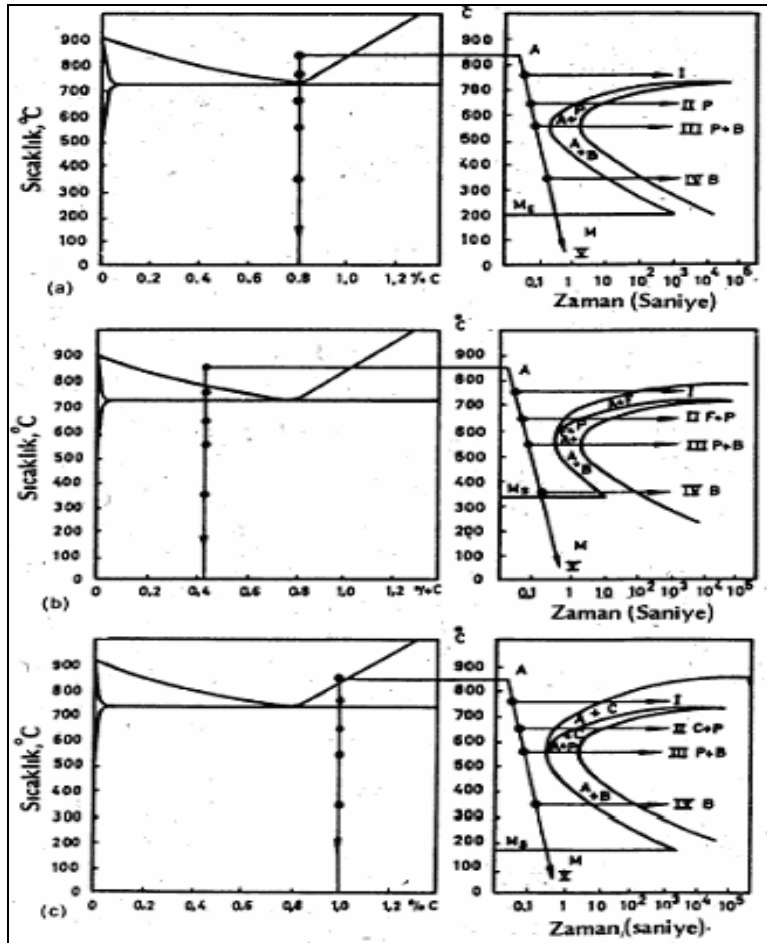
Resim 3.1. % 0.45 C'lu bir çeliğin çeşitli ısıl işlemler sonrası mikro yapısı (a. işlem görmemiş, sertlik 220 HV, b. tuz banyosunda 725 °C'ye ısıtılmış, su verilmiş sertlik 215 HV, c. tuz banyosunda 735 °C'ye ısıtılmış, su verilmiş sertlik 376 HV, d. tuz banyosunda 750 °C'ye ısıtılmış, su verilmiş sertlik 662 HV, e. tuz banyosunda 775 °C'ye ısıtılmış, su verilmiş sertlik 738 HV, f. tuz banyosunda 825 °C'ye ısıtılmış, su verilmiş sertlik 744 HV, suda tutma süreleri 5 dakikadır.)



Şekil 3.5. Çeşitli karbon çeliklerinde ısıtma sırasındaki yapısal dönüşümlerin şematik gösterilişleri (a. % 0,8 C, b. %0,8 C, c. % 0,45 C, d. % 0,45 C, e. %1,2 C, f % 1,2 C A.Ostenit, B.Beynit, C. Sementit, F. Ferrit, P. Perlit)

Soğutma

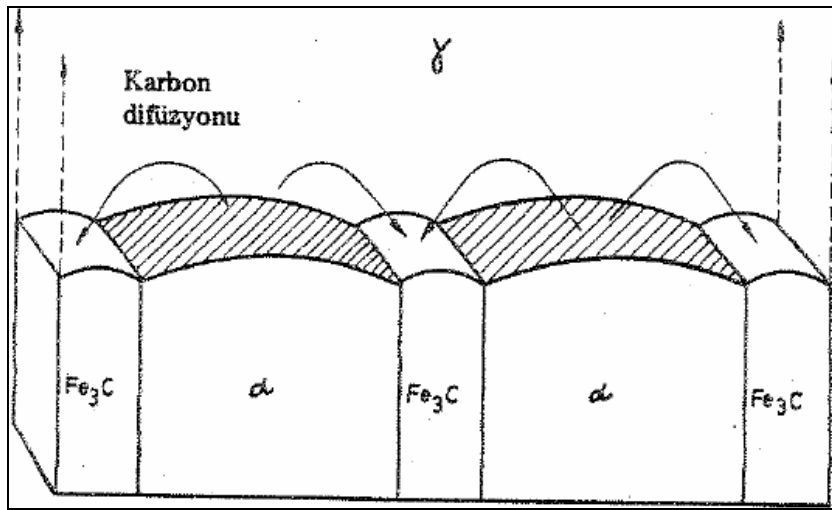
Soğutma sürecinde oluşan yapının genel görünümü, dönüşüm sıcaklığına ve dönüşümün başlaması için geçen süreye bağlıdır. Isıtma durumunda olduğu gibi Fe-C denge diyagramı bize bu husustan başka bir şey vermemektedir. Çeliğin belli bir sıcaklıktaki dönüşümü; çeliğin ostenitik halden ilgili sıcaklığa kadar soğutulduktan sonra dönüşümüne ve bu dönüşümü takiben oda sıcaklığında su verilmesine izin verilerek incelenebilir. Bu işlemler sonucu elde edilen yapı mikroskopta gözlenir.



Şekil 3.6. Çeşitli çeliklerin çeşitli soğutma programlarından sonuçlanan yapısal dönüşümler. (a %0,80 C, b %0,45 C, c % 1,0 C A Ostenit, B Beynit, C Sementit, F Ferrit, P Perlit, M Martensit, Ms Martensit başlama sıcaklığı)

Perlit oluşumu

Bir perlitik çelik ostenitleme sıcaklığından, örneğin 850°C den 750°C ye soğutulduğunda, Fe-C denge diyagramına göre herhangi bir dönüşümün meydana gelmesi söz konusu değildir. Eğer sıcaklık 650°C ye düşerse 1 saniye sonra perlit oluşur ve dönüşüm 10 saniye içinde tamamlanır. Perlit oluşum sıcaklığı düştükçe, perlit lamelleri çok inceler ve tüm yapı sert olur. Şekil 3.6b’de gösterilen ötektoid altı bir çeliğin 750°C de dönüşümüne izin verilirse, sadece ferrit ayrışır ve ferrit ile ostenit arasında bir denge sağlanır. Eğer dönüşüm 650°C’de gerçekleşirse önce ferrit ayrışması ve bunu takiben kısa bir süre sonra perlit oluşumu meydana gelir. Şekil 3.6c’den görüldüğü gibi benzer olarak ötektoid üstü çelikte de ilk önce sementit ayrışır ve bunu perlit oluşumu takip eder. Perlit oluşumu ostenit tane sınırlarında veya ostenit tanelerinin içersindeki diğer düzensiz bölgelerde başlar. Bu proses Hillert tarafından ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Hillert yapmış olduğu çalışmalarda perlit teşekkülünün ya ferrit, ya da sementit üzerinde başladığını ve perlitin büyümesinde dallanma şeklinde ilerlediğini saptamıştır. Ostenitten ince sementit plakalarının kenarlarına karbon iletimi, aynı zamanda ferrit plakalarının kenarlarının karbonca fakirleşmesine neden olduğundan sementit ve ferrit plakaları yan yana pozisyonda büyürler. Perlitin bu modele göre büyümesi Şekil 3.7’te gösterilmektedir.



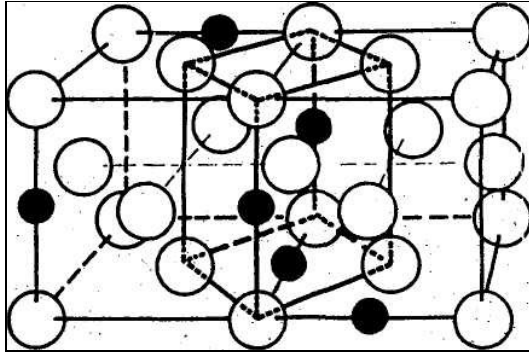
Şekil 3.7. Perlit'in büyümesinin şematik olarak gösterilişi

Beynit oluşumu

550°C'nin altındaki sıcaklıklarda beynit perlitte beraber ayrışmaya başlar. Beynit oluşumunun tane sınırlarından plakalar halinde büyüyen ferrit çekirdeklerinin üzerinde başladığı varsayılır. Beynit oluşumu sırasında ostenitin çevresindeki karbon miktarı sürekli olarak artar. Bu artış belli bir sınıra geldiğinde ferrit plakalarıyla yanyana pozisyonda sementit plakaları meydana gelir.

Sıcaklık düştükçe beynitin oluşumu tanelerin içerisinde de başlar, aynı zamanda beynitin meydana geliş şekli de değişir. Metalürjik amaçlı mikroskopta beyniti diğer fazlardan ayırt etmek zor olabilir, çünkü beynitin oluşum sıcaklığına ve çeliğin bileşimine bağlı olarak görünümü de değişir.

Martensit oluşumu

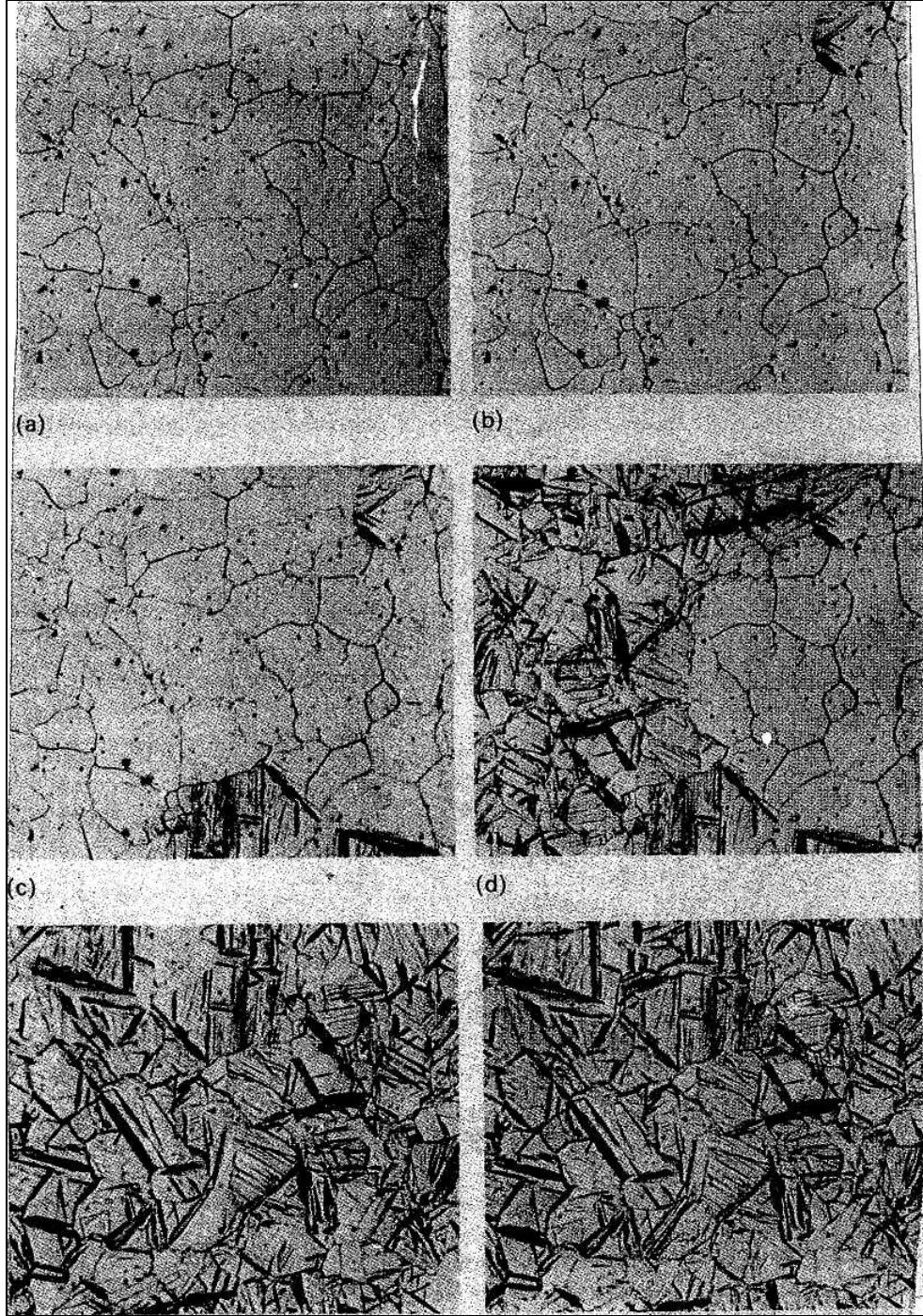


Şekil 3.8. Östenit'ten Martensite dönüşüm için yapılmış basit bir modelin şematik gösterimi

Şekil 3.6a-c' de, eğer soğuma V eğrisiyle temsil edildiği şekilde meydana gelirse, örneğin çok hızlı soğuma, ostenit; M hattına ulaşıldığında ferrite dönüşmeye başlayacaktır. Eğer soğumaya M_s 'nin altında devam edilirse ostenitin dönüşümü sırasında çok az karbon hareketi olacak, böylece karbon atomları α demiri katı eriyiği içerisinde kalacaklardır. Karbon atomlarının yerleşebilecekleri mevcut boşluklar demirine oranla α demirinde daha az olduğu için, α demiri kafesinde bir genişleme söz konusu

olacak ve böyle bir gerilmeli hal ise çeliğin sertleşmesine yol açacaktır. Sertleşme sonrası oluşan ve karbonun α demiri içerisinde aşırı doymuş bir eriyiği olan bu yeni faza martensit adı verilir. Şekil 3.8. martensit oluşumu sırasında γ demirinden, α demirine geçişin şekil olarak görünümü sunulmaktadır. Martensit birim hücrenin kenarlarında yerleşmiş karbon atomları birim hücrenin bir yönde uzamasına ve sonuçta tetragonal kafesin ortaya çıkmasına neden olurlar. Yüksek karbonlu çeliklerde bile, mümkün kafes yerlerinin çok az bir kısmı karbon atomları tarafından işgal edilirler. Martensit miktarı karbon içeriğindeki artışa bağlı olarak artar.

Dönüşüm diyagramlarından görüldüğü gibi, perlit ve beynit oluşması zamana bağlı olarak ilerlediği halde, martensit oluşuunda böyle bir durum söz konusu değildir. M_s ' in altındaki her bir sıcaklık belli bir martensit oluşum yüzdesine tekabül eder, ancak oluşan gerçek martensit miktarı çeliğin cinsine, ostenitleme işleminin koşullarına ve sertleştirme için uygulanacak soğutma hızına bağlıdır. Sıcaklık düştükçe meydana gelen martensitik dönüşüm mikroskopla gözlenebilir. Resim 3.2. a-f martensit oluşumunun adım adım ilerleyişini göstermektedir. Bu şekile göre 220°C de martensit meydana gelecek ve 175°C de ostenitin büyük bir kısmı martensite dönüşmüş olacaktır. Bu örnekteki çelik MAR 2 olarak isimlendirilen yüksek alaşımlı bir çelik tipi olup, martensiti demir ve nikelden oluşmaktadır.



Resim 3.2. Düşük sıcaklıklarda östenitin martensite dönüşümü (a. 280°C, b. 220°C, c. 200°C, d. 195°C, e 180°C, f.175°C)

3.2 Alüminyum ve Alaşımlarına Uygulanan Su Verme İşlemi

Alüminyumun mühendislik uygulamalarında kullanımını sağlayan çok önemli özellikler vardır. Alüminyum hafiftir, iyi bir ısı ve elektrik iletkenidir. Kolayca dökülür ve işlenebilir. Yaşlanabilir alaşımları oluşturur.

Alüminyumu diğer metallerden ayıran özelliklerin başında hafif olması gelir. Magnezyum ve berilyumdan sonra en hafif metaldir. Yoğunluğu 2710 kg/m^3 'tür. İkinci en önemli özelliği elektrik iletkenliğidir. Alüminyumun elektrik iletkenliği bakırın iletkenliğinin yalnızca %60'ı kadar olmasına karşın, düşük yoğunluğundan dolayı birim kütleye düşen iletkenlik bakımından bakırdan daha yüksek iletkenliği vardır.

Alüminyum diğer metallerde göre daha yüksek ışık yansıtma ve ısı yayılımı kabiliyetine sahiptir. Ultraviyole ışığını yüksek yansıtma özelliğinden dolayı, güneş ışınlarının tahribatına karşı koruyucu olarak alüminyum boyalar kullanılmaktadır [16].

Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan su verme işleminde mekanik özelliklere veya korozyon direncine zararlı olabilecek çökmelerden kaçınmak için katı eriyik işlemi esnasında, oda sıcaklığında aşırı doymuş bir eriyik oluşturmak üzere hızla soğutulmalıdır. Bu daha sonraki çökme ve sertleştirme işlemleri için optimum şarttır ve genellikle parçaların soğuk suya daldırılmaları ile sağlanır.

Su verme sürecinde büyük çapta çökme olmaması için iki şartın yerine getirilmesi gerekir. Önce, parçanın $260-400^\circ\text{C}$ bölgesine soğumaması için fırından su verme ortamına transferi hızlı olmalıdır. Aksi halde bu sıcaklık bölgesi içinde çok hızlı bir çökme yer alır. Ayrıca su verme ortamının hacmi, ısı soğuma kapasitesi ve parça üzerinden geçme hızı $260-400^\circ\text{C}$ sıcaklık bölgesinde parçada ancak az çökme yer alabilecek kadar yüksek olmalıdır.

Pratikte su verme işlemi normal olarak azami su verme gecikmesi (parçanın fırından su verme ortamına getirilişine kadar geçen süre) ve azami su sıcaklığı ile kontrol edilir. Birinci faktör parçanın transferi esnasındaki soğuma hızını kontrol eder ve yüksek dayanımlı alaşımlarda parça 400°C'ye düşmeden önce tamamen su ortamına daldırılması esasına dayanır. İkinci faktör ise en kritik bölge olan 400-260°C bölgesinde soğuma hızını kontrol eder. 7178 ve 7075 alaşımlarına su verilmesinde, çökme ısıl işleminden sonra azami çekme ve akma dayanımlarının sağlanabilmesi için kritik sıcaklık bölgesindeki soğutma hızının 335 °C/s olması gerekmektedir.[17]

3.2.1. Soğuma hızı

400-260°C bölgesindeki soğuma hızı parçanın hem dayanım ve hem de korozyon özelliklerini büyük çapta etkiler. Korozyon dolayısıyla çekme dayanımı kaybı 5-50°C/s soğutma hızlarında azamiye çıkmakta, 200°C/s'den büyük soğutma hızlarında ise minimuma inmektedir. Buna göre kritik bölgedeki soğuma hızının 200°C/s'den daha düşük olması gerekmektedir. Soğutma esnasında parçaya sürekli ve sabit bir gerilme uygulandığında, düşük soğutma hızlarındaki direnç kaybının etkisi çok büyüktür.

3.2.2. Su verme gecikmeleri

Parçaların fırından su verme transfer süresi azami su verme gecikmesini aşmamalıdır. İzin verilebilecek azami gecikme veya "standart su verme gecikmesi" hava sıcaklığı ve parçanın ısı yayıcılığı ile değişir. Su verme gecikmesi, fırın kapısının açılmaya başlaması veya malzemenin herhangi bir noktasının banyo yüzeyinde görünmesi ile başlayan ve malzemenin son noktasının su verme ortamına dalmasıyla biten süre şeklinde tanımlanabilir. Günlük çalışmalarda kronometre kullanmak veya parçalara ısıl-çiftler bağlamak suretiyle su verme gecikmesinin kontrolü mümkündür.

3.2.3. Suya daldırma ile su verme

MIL-H- 6088C spesifikasyonuna göre dövme ve döküm parçalar dışındaki üretim teknikleri için, su verme işlemi sonunda suyun sıcaklığı 38 °C'yi aşmamalıdır. Bu şart hem daldırmadan önceki su banyo sıcaklığını ve hem de daldırılan kütlenin su hacmine oranını kontrol eder. Fakat etkin bir su verme sağlamak için daldırmanın ilk saniyelerinde soğutma suyunun malzemenin her yüzeyi üzerinde akması da şarttır. Daldırmanın ilk saniyelerinde su hareketi lokal sıcaklık yükselmelerini önleyecek kadar şiddetli olmalıdır.

3.3. Bakır ve alaşımlarına uygulanan su verme işlemi

Tarihin tespit edebildiği devirlerden bugüne kadar bakır, dünyanın en kullanışlı metali olarak tanınmıştır. Özellikle altın, kendine has sarı rengi, parlaklığı korozyona dayanaklılığı ve tabiatta serbest bulunabilmesi bakımından insanların ilk kez ilgisini çeken metal olmuştur. Demir, oksit demir cevherinin odun kömürü ile indirgenmesi yoluyla elde edilip, bakırdan önce kullanılmıştır. Ancak tarih, metallerin üretilip kullanılması konusundaki her türlü gelişmeyi bakırın kullanılması ile başladığını kaydetmektedir.

Başlangıçta bakır saf olarak, çekiçle dövülmesi suretiyle parçalanıp eritilerek kullanıldığı gibi, daha sonraları bakır ve kalay cevherleri birlikte eritilerek tunç yapılmıştır. Bakır ve tunç sertlik, mukavemet ve sağlamlığının odun ve taştan üstün olması dolayısıyla alet, ev malzemesi ve savaş teçhizat ve malzemesinin üretiminde kullanılmıştır .

Dünyada üretimi bakımından demir ve çelikten sonra ikinci yeri alan bakır 1963 yılından itibaren yerini alüminyuma bırakmış ve alüminyum üretimi ile bakır üretimi arasındaki fark yıllar ilerledikçe artmıştır.

Bakırın önemi aşağıdaki üç esas sebebe dayanmaktadır.

- Hemen hemen dünyanın her yerinde bulunabilmesi onun geniş ölçüde üretimini mümkün kılmaktadır.
- Elektriği, diğer bütün metaller içinde gümüşten sonra en iyi ileten metaldir. Gümüşün yeteri kadar üretilmesine imkan verecek ölçüde tabiatta bol bulunmayışı, pahalı ve bakır kadar yüksek kopma ve mukavemetine sahip olmaması, gümüşün kullanılmasını sınırlamaktadır.,
- Bakır, çok önemli alaşımlar yapar. Bunlardan en çok kullanılanlar; korozyon direnci için nikel alaşımları, görünüş ve mimari için bronz ve pirinç alaşımlarıdır.

Bakır metalürjisinin, pahalı bir teknoloji olması ve dünyadaki zengin bakır yataklarının azalması, maliyet faktörlerinin etkinliğini arttırmıştır [18].

3.3.1. Sertleştirme

Çökme sertleştirmesine cevap veren önemli ticari bakır alaşımlar alüminyum bronz, berilyum bakır, krom bakır, zirkonyum bakır, bakır nikel silisyum ve bakır nikel fosfor alaşımlarıdır. %10 alüminyum içeren alüminyumlu bronzlar için farklı bir sertleştirme mekanizmasından yararlanılır. Bu alaşımlar yüksek sıcaklıklardan hızla soğutularak martensitik bir yapı meydana getirdikten sonra daha düşük sıcaklıklarda temperlenirler.

4. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEYSEL YÖNTEM

4.1. Test Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmalarımızda alüminyum, bakır, bronz, paslanmaz çelik ve demir tozları kullanılmıştır. Hava atomizasyon yöntemi ile üretilmiş alüminyum, bakır, bronz, çelik ve demir tozları tartılıp, presleme işleminden sonra, numunelerin kalıptan kolayca çıkarılmasını sağlamak, tozların zımbaya ve kalıba sıvanmasını önlemek amacı ile ayrı ayrı ağırlıkça %1 oranında katı yağlayıcı olan çinko stereat ile 30 dakika süresince Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde homojen olarak karıştırılmıştır.

Homojen olarak karıştırılan alüminyum, bakır, bronz, çelik ve demir tozları 200-700 MPa arasında farklı basınçlarda Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında 60 ton kapasiteli Dartec çekme-basma cihazı kullanılarak preslendi. Presleme işleminden sonra numunelerin kalıptan çıkartılmasındaki zorlukların yanı sıra, tozların kalıba ve üst zımbaya sıvanması gibi zorluklar da yaşandı. Bu sıkıntıları gidermek amacıyla her presleme işleminden önce kalıp ve üst zımba tekrar çinko stereat ile yağlandı. Ayrıca her presleme işleminden sonra kalıba ve üst zımbaya sıvanan tozlar ince zımpara kullanılarak kalıp ve üst zımba yüzeyinden temizlendi. Preslemede kullanılan kalıp ve zımbaların resimleri Resim 4.1.'de verilmiştir.



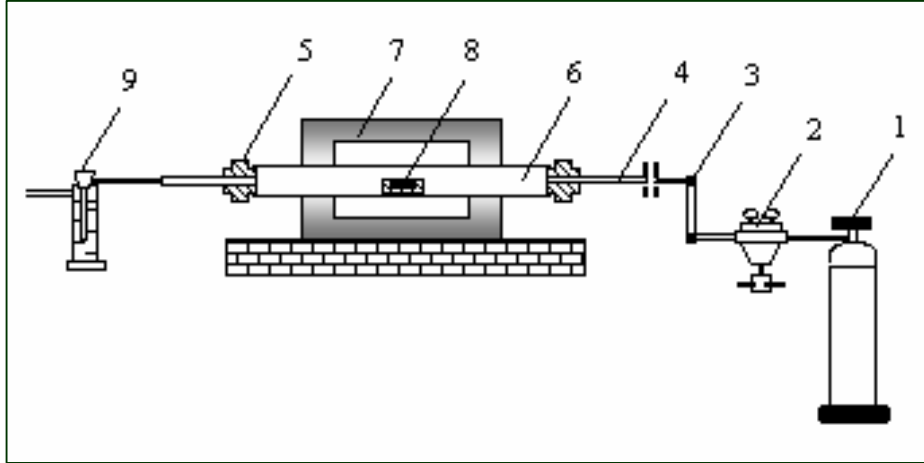
Resim 4.1. Preslemede kullanılan kalıp ve zımbalar

4.2. Test Numunelerin Sinterlenmesi

Numunelerin sinterlenmesi için kullanılan deney düzeneği Şekil 4.1’te gösterilmiştir. Preslemeden sonra elde edilen numuneler grafitten yapılmış olan numune kayığına konularak fırın içine yerleştirildi. Daha sonra grafit başlıklar yerleştirildi ve kırmızı sıvı conta kullanılarak iyice sıkıştırılarak dış ortamdan etkilenmesi önlenildi. Gaz giriş vanası açıldı. Gaz çıkış kabından saniyede 10 kadar kabarcık çıkacak şekilde debisi ayarlandı. Daha sonra fırın alüminyum, bakır, bronz, paslanmaz çelik ve demir numuneler için sırasıyla 630°C, 1045°C, 850°C, 1050°C, 1200°C’ye ayarlandı. Preslenerek elde edilen numuneler aşağıda verilen sıcaklık değerlerinde ve sürelerde Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesinde argon gazı atmosferinde sinterlenmiştir. Sinterleme işleminin amacı toz taneciklerinin birbiri içine nüfuz edip darbelere karşı daha dayanıklı duruma getirmektir. Alüminyum, bakır, bronz, paslanmaz çelik ve demir numuneleri için sinterleme sıcaklık değerleri ve süreleri [19];

Çizelge 4.1. Numunelerin sinterleme sıcaklık değerleri ve süreleri

Malzeme	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Sinterleme süresi (dakika)
Alüminyum	630	30
Bakır	1045	30
Bronz	850	30
Paslanmaz çelik	1050	60
Demir	1200	30



Şekil 4.1. Numunelerin sinterlenmesinde kullanılan deney düzeneğinin şematik görünümü (1. Argon Tüpü, 2. Manometre, 3. Flowmetre, 4. Plastik Hortum, 5. Grafit Başlık, 6. Alümina Tüp, 7. Fırın, 8. Numune Kayığı, 9. Gaz Çıkış Kabı)

4.3. Test Numunelerinin Özellikleri

Elde edilen numuneler sinterlendikten sonra torna tezgahında talaş kaldırarak boyları istenilen seviyeye getirildi. Tartılıp boyutları ölçülen numunelerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri hesaplandı. Numunelerin gözeneklilik değerleri hesaplanırken

dolu durumdaki yoğunlukları referans alınmıştır. Çizelge 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6’da alüminyum, bakır, bronz, paslanmaz çelik ve demir numunelerine ait özellikler verilmiş olup gözeneklilik değerleri Şekil 4.2’te grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 4.2. Alüminyum numunelerinin özellikleri

Numune No	Basınç (MPa)	Kuvvet (kN)	Çap (mm)	Boy (mm)	Ağırlık (g)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik (%)
1	200	98,17	24,87	29,72	34,20	14,43	2,37	12,28
2	300	147,26	25,01	29,87	35,87	14,67	2,44	9,50
3	400	196,34	24,72	29,85	35,36	14,32	2,46	8,61

Çizelge 4.3. Bakır numunelerinin özellikleri

Numune No	Basınç (MPa)	Kuvvet (kN)	Çap (mm)	Boy (mm)	Ağırlık (g)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik (%)
1	600	294,52	24,90	30,05	110,78	14,70	7,53	15,98
2	700	343,61	24,92	30,03	111,27	14,64	7,60	15,20

Çizelge 4.4. Bronz numunelerinin özellikleri

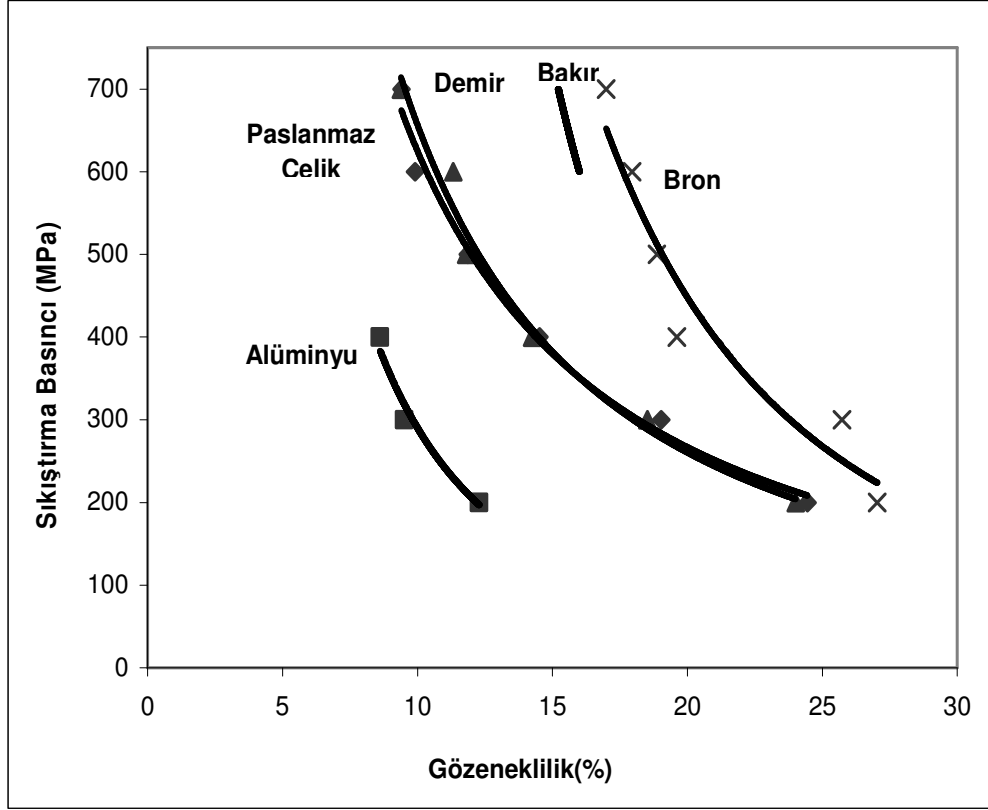
Numune No	Basınç (MPa)	Kuvvet (kN)	Çap (mm)	Boy (mm)	Ağırlık (g)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik (%)
1	200	98,17	24,97	29,78	93,51	14,58	6,41	27,03
2	300	147,26	25,01	26,61	85,31	13,07	6,52	25,73
3	400	196,34	24,94	30,08	103,82	14,69	7,06	19,61
4	500	245,43	25,01	30,01	105,13	14,74	7,13	18,87
5	600	294,52	24,96	30,05	106,01	14,70	7,21	17,95
6	700	343,61	24,93	30,05	106,96	14,66	7,29	16,99

Çizelge 4.5. Paslanmaz çelik numunelerinin özellikleri

Numune No	Basınç (MPa)	Kuvvet (kN)	Çap (mm)	Boy (mm)	Ağırlık (g)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik (%)
1	200	98,17	24,99	29,93	87,06	14,68	5,93	24,45
2	300	147,26	24,96	29,92	92,98	14,63	6,35	19,03
3	400	196,34	24,96	30,03	98,57	14,69	6,71	14,52
4	500	245,43	24,99	29,92	101,50	14,67	6,91	11,86
5	600	294,52	24,92	30,01	103,46	14,63	7,07	9,91
6	700	343,61	24,98	30,02	104,61	14,71	7,11	9,40

Çizelge 4.6. Demir numunelerinin özellikleri

Numune No	Basınç (MPa)	Kuvvet (kN)	Çap (mm)	Boy (mm)	Ağırlık (g)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik (%)
1	200	98,17	24,98	29,98	87,73	14,69	5,97	24,01
2	300	147,26	25,01	29,82	93,77	14,64	6,40	18,51
3	400	196,34	24,95	29,86	98,33	14,59	6,73	14,24
4	500	245,43	25,02	30,01	102,24	14,75	6,93	11,80
5	600	294,52	25,04	29,95	102,72	14,74	6,96	10,03
6	700	343,61	24,98	29,92	104,39	14,66	7,12	9,39

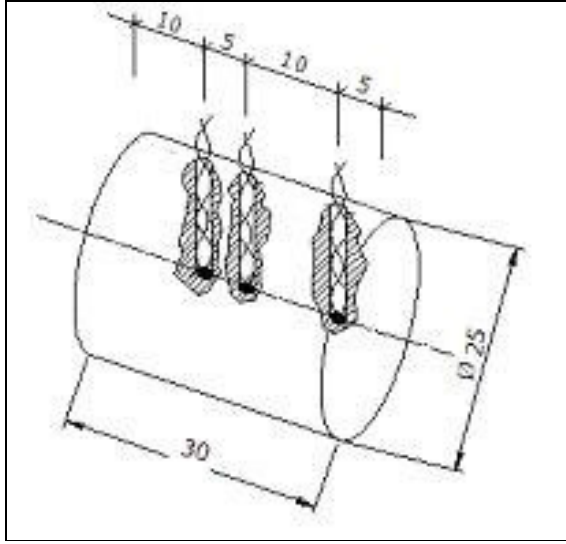


Şekil 4.2. Numunelerin gözenek oranlarının basınç ile değişimi

4.4. Isıl-Çiftlerin Hazırlanması ve Yerleştirilmesi

Isıl-çift olarak 0,5 mm çapında K-tipi NiCr(+)/Ni(-) teller kullanıldı. Tellerin numune yüzeyi ile temasını engellemek amacıyla tel yüzeyi tellerin birleşme noktası haricinde şamot çamuru ile izole edildi. Isıl-çiftler uç noktaları numune üzerine açılan deliklerin tabanına oturtularak tek bir yerden teması sağlandı.

30 mm boyunda ve 25 mm çapında olan silindirik numuneler üzerine açılan üç delik 2 mm çapında olup sırasıyla, silindirik numunenin ekseninde tabandan 5 mm, eksenin merkezinde ve eksen üzerinde silindirin üst yüzeyine 10 mm mesafede açılmıştır. Deliklerin derinlikleri ise 12,5 mm dir.



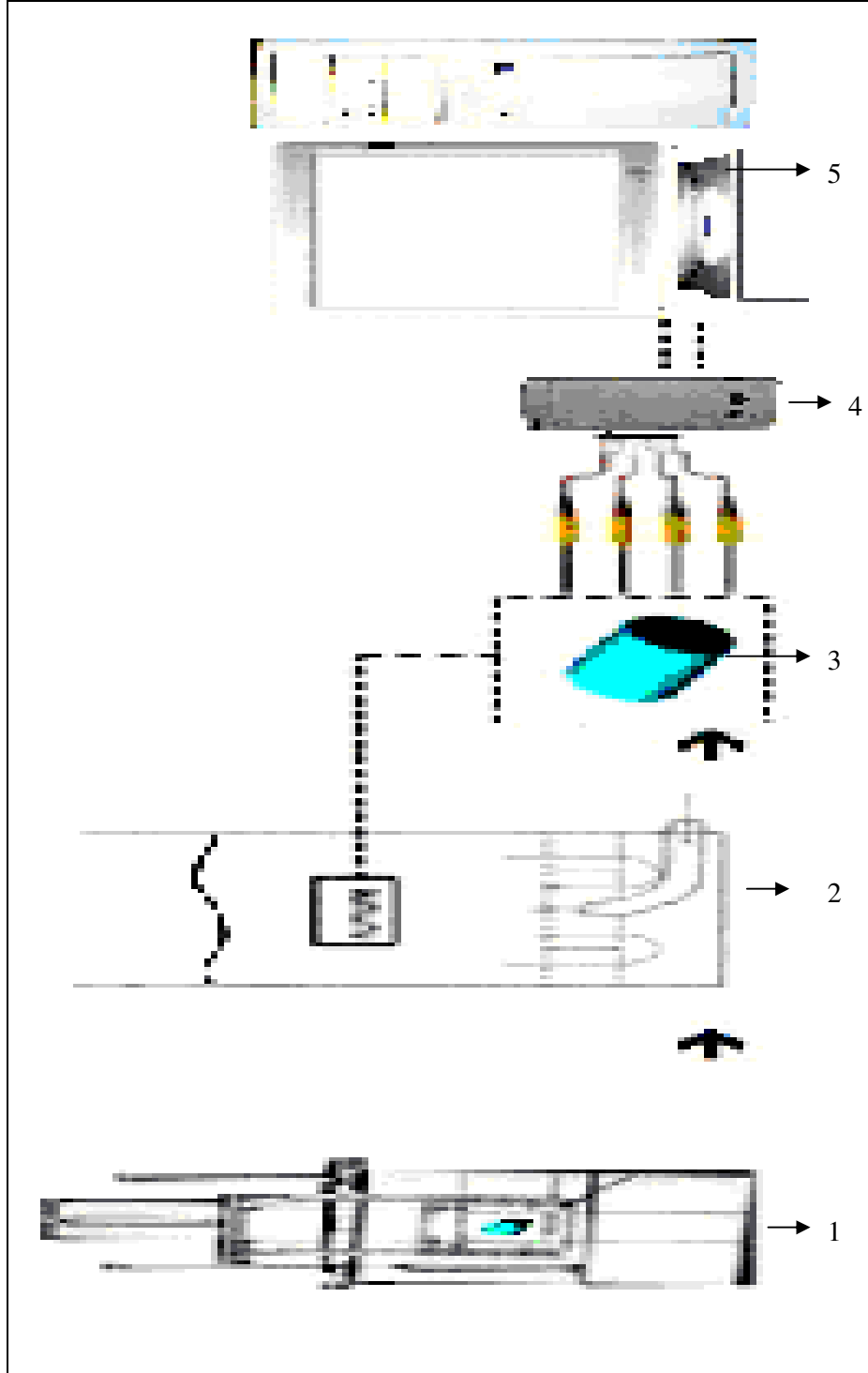
Şekil 4.3. Numune ve sıcaklık ölçüm noktalarının şematik görünümü

4.5. Deneysel Yöntem

Deneyler Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Isı Bilimleri Laboratuvarında yapılmıştır. Deneylerde dijital ısı işlem fırını, su banyosu, analog dijital veri toplama kartı (datalogger) ve bilgisayar kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 4.4.'te verilmiştir.

Tek noktadan temas sağlanarak yerleştirilen ısıl-çiftler dijital ısı işlem fırınında 700 °C' ye kadar ısıtılmıştır. Numuneler üzerinde homojen sıcaklık dağılımını elde edebilmek ve kararlı bir ısı dağılımı amacıyla numuneler 700°C sıcaklığındaki fırında 1 saat bekletilmiştir.

Fırından çıkartılan numuneler ortam sıcaklığında bulunan 1m³ hacmindeki su banyosuna hızla daldırılarak sıcaklığın zamanla değişimi kaydedilmiştir. Sıcaklık değişimi analog-dijital veri toplama kartı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. LabView programı kullanılarak alınan veriler bir saniyede bir kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler kullanılarak farklı gözeneklilikteki her bir numunenin soğuma eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (1 ısıl işlem fırını, 2 su banyosu, 3 numune, 4 veri toplama kartı, 5 bilgisayar)

5. SONUÇLAR

Deneyler bölümümüz ısı bilimleri laboratuvarında yapılmıştır. Tek noktadan teması sağlamak ve deliklerin içerisine su girişini engellemek amacı ile, ısıl-çiftler numuneye takılırken delik yüzeyleri şamot çamuru ile izole edilmiştir. 700 °C'e kadar ısıtılan ve ısıl kararlılığı sağlamak amacıyla 1 saat fırın içinde bekletilen farklı gözenekliliğe sahip alüminyum, bakır, bronz, demir ve çelik numuneler fırından çıkartılarak hızla laboratuvar sıcaklığında bulunan 1 m³ hacmindeki su banyosuna daldırılmıştır. Numuneler üzerinde belirlenen yerlere açılan deliklere takılan ısıl-çiftlerden alınan sıcaklık değerleri veri toplama kartına gönderilip oradan da LabView programı kullanılarak saniyede bir kaydedilmiştir. Bu sıcaklık değerleri kullanılarak farklı gözenek değerlerine sahip soğuma eğrileri elde edilmiştir.

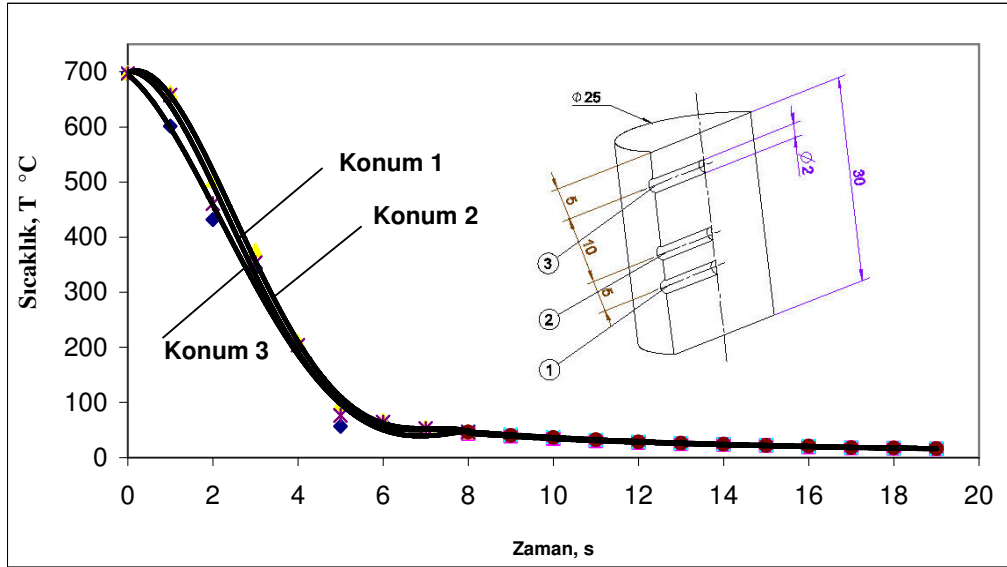
Deneyisel çalışma sürecinde bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabulleri sıralarsak;

- Tozların gözenek geometrileri dikkate alınmamıştır.
- Numuneler tek yönlü sıkıştırılmış ve yoğunluğu her noktada aynı değerdedir.
- Numunelerin ısıtılma sürecinde bütün ısı kayıplar ihmal edilmiştir
- Daldırma esnasında meydana gelen çalkanma hareketleri ihmal edilmiştir.
- Daldırma esnasında banyo sıcaklığı sabit ve laboratuvar sıcaklığındadır (13°C).

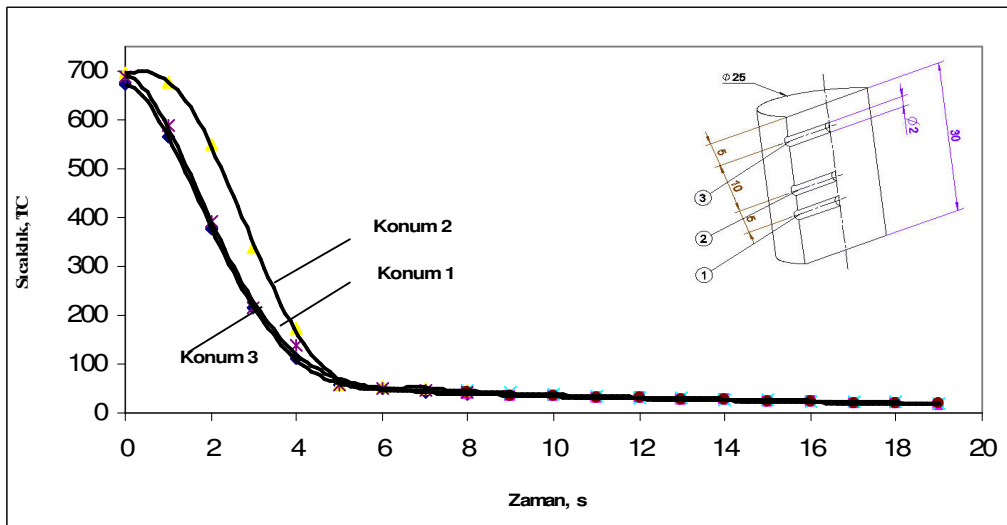
Çizelge 5.1'de deneyler sonucunda alüminyum için merkez noktasında 600 °C'den laboratuvar sıcaklığına kadar olan soğuma zamanları yer almaktadır. Şekil 5.1, 5.2, 5.3'te alüminyumun %12,28, 9,50, 8,61 gözeneklilik değerleri için elde edilmiş soğuma eğrileridir. Silindirin çapı 25mm, boyu 30 mm'dir. Delikler sırasıyla silindirin eksen üzerinde tabandan 5mm mesafede, eksenin merkezinde ve eksen üzerinde silindirin üst yüzeyine 10 mm mesafedeki noktalardadır. Gözeneklilik azaldıkça soğuma zamanları da azalmaktadır. Bu da ısı iletim katsayısının gözeneklilikle azalmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5.1. Alüminyum için soğuma süresinin gözeneklilikle değişimi

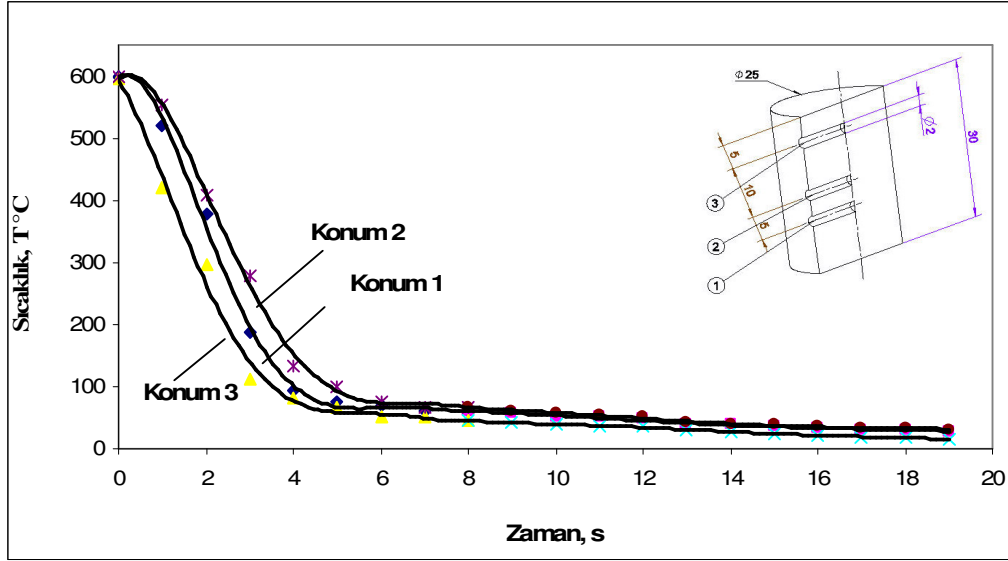
Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Gözeneklilik (%)	Soğuma süresi (s)
200	12,28	73
300	9,50	69
400	8,61	67



Şekil 5.1. % 12,28 Gözeneklilikteki alüminyum numunenin soğuma eğrisi



Şekil 5.2. % 9,50 Gözeneklilikteki alüminyum numunenin soğuma eğrisi

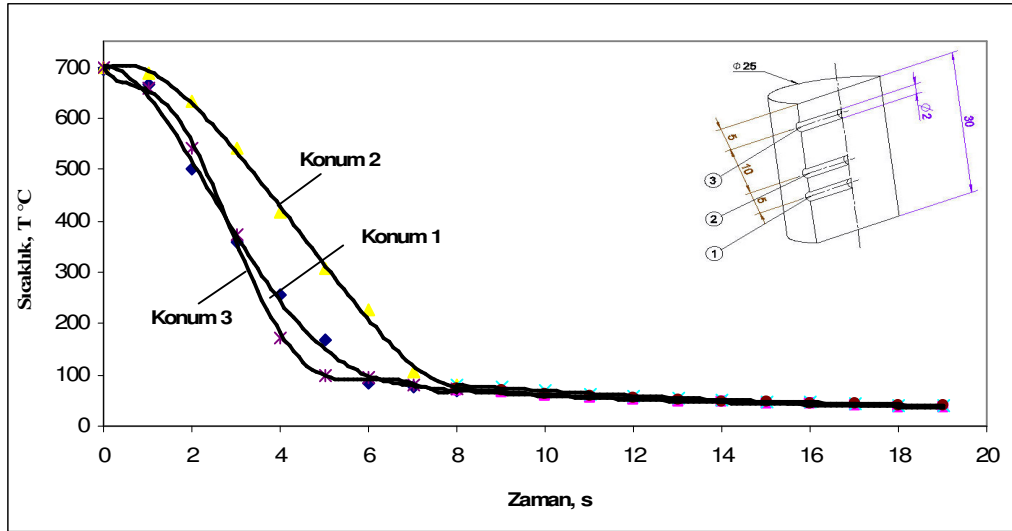


Şekil 5.3. % 8,61 Gözeneklilikteki alüminyum numunenin soğuma eğrisi

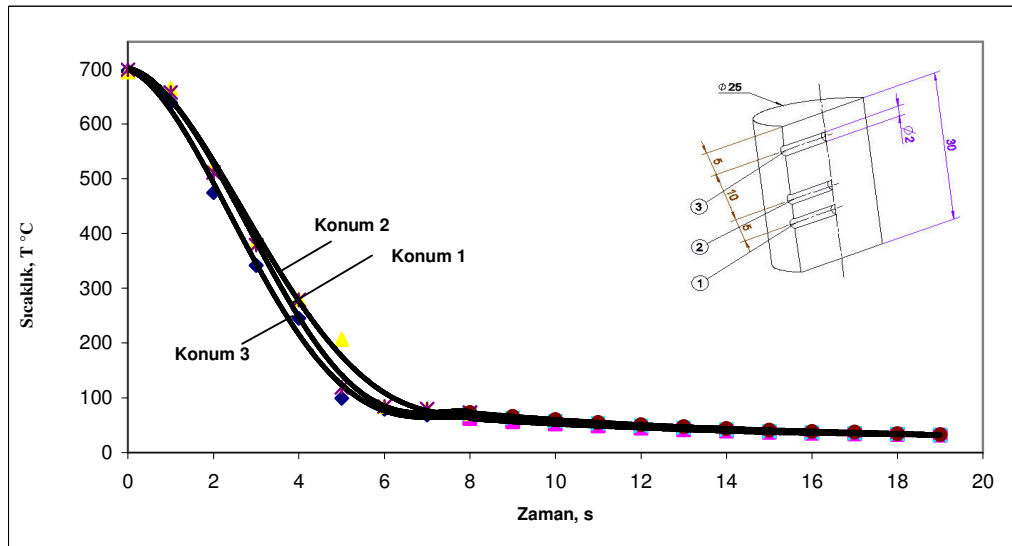
Benzer sonuçlar Çizelge 5.2’de bakır için de elde edilmiştir. Ancak bakır numunelerin sinterlenmesi sırasında sorunlar meydana gelmiştir. Bu sorunlardan dolayı, numunelerin torna tezgahında uygun boyutlara getirilmesi sırasında numunelerde kırılmalar olmuştur. Bu nedenlerden dolayı ancak iki bakır numunesi için sağlıklı sonuçlar alınmıştır. Şekil 5.4. ve 5.5. bakır numuneler için % 15,98, 15,20 gözeneklilik değerleri için elde edilmiş soğuma eğrileridir.

Çizelge 5.2. Bakır için soğuma süresinin gözeneklilik ile değişimi

Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Gözeneklilik (%)	Soğuma süresi (s)
600	15,98	91
700	15,20	91



Şekil 5.4. %15,98 Gözeneklilikteki bakır numunenin soğuma eğrisi

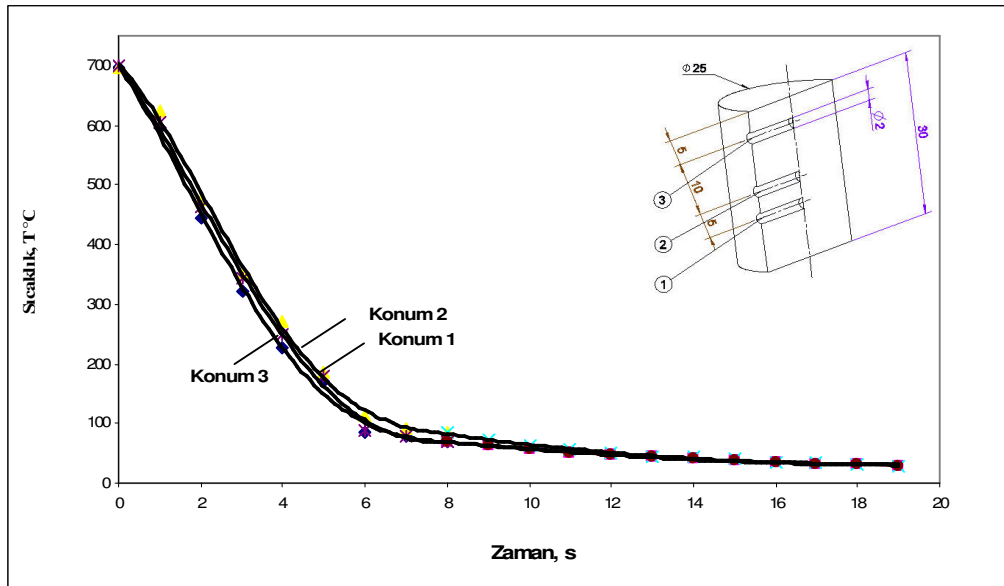


Şekil 5.5. %15,20 Gözeneklilikteki bakır numunenin soğuma eğrisi

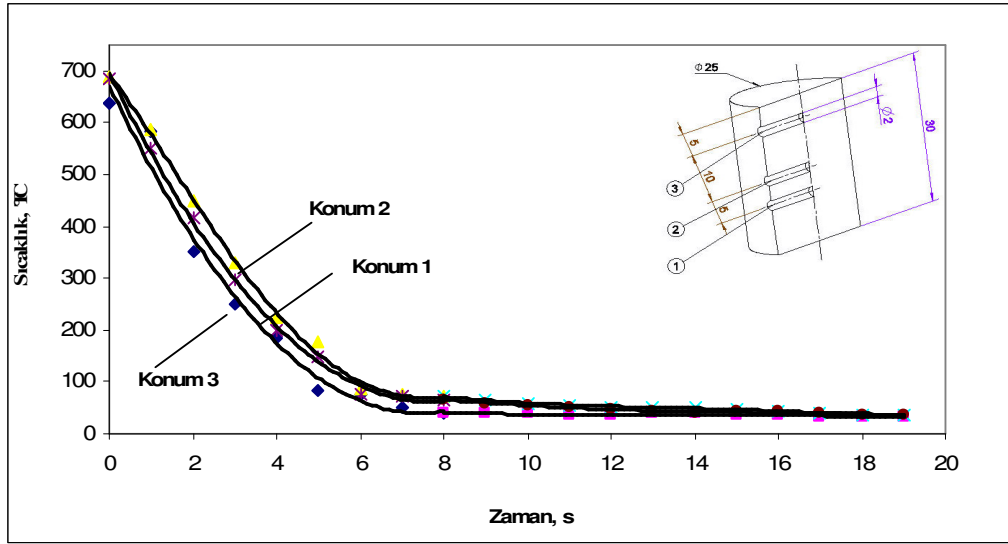
Çizelge 5.3'te bronz için soğuma zamanları elde edilmiştir. Şekil 5.6., 5.7., 5.8, 5.9., 5.10. ve 5.11., bronzun % 27,03, 25,73, 19,61, 18,87, 17,95 ve 16,99 gözeneklilik değerleri için elde edilmiş olan soğuma eğrileridir.

Çizelge 5.3 Bronz için soğuma süresinin gözeneklilikle değişimi

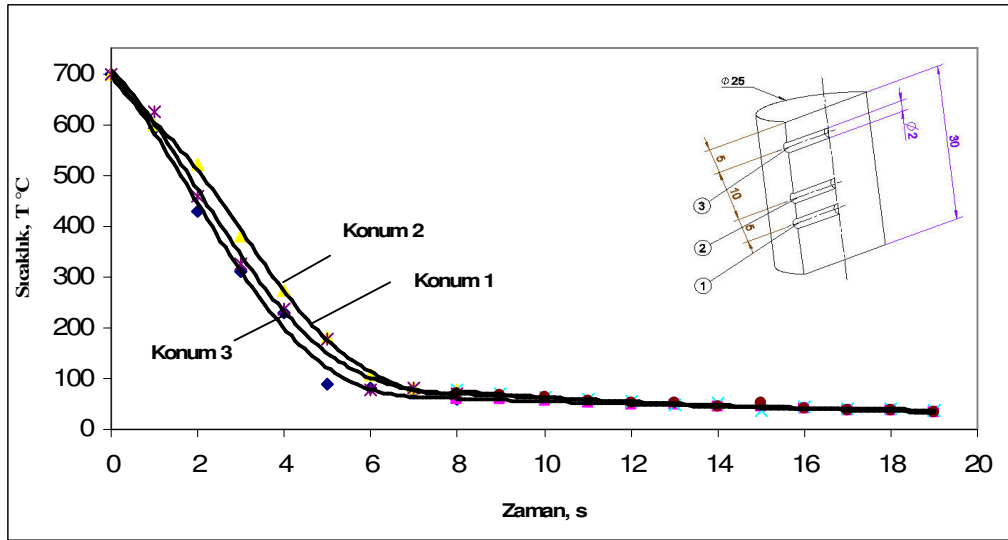
Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Gözeneklilik (%)	Soğuma süresi (s)
200	27,03	115
300	25,73	112
400	19,61	104
500	18,87	100
600	17,95	97
700	16,99	95



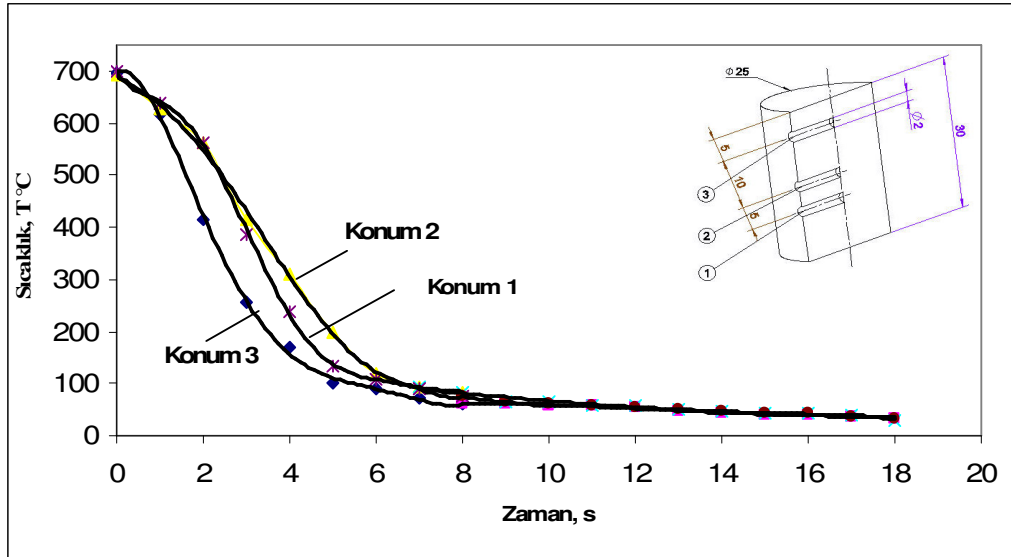
Şekil 5.6. %27,03 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi



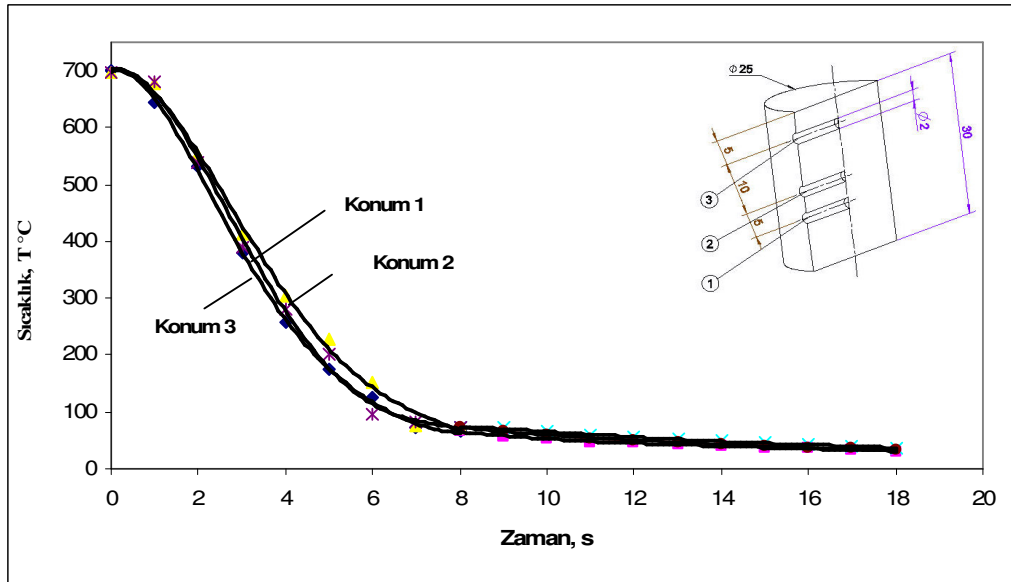
Şekil 5.7. % 25,73 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi



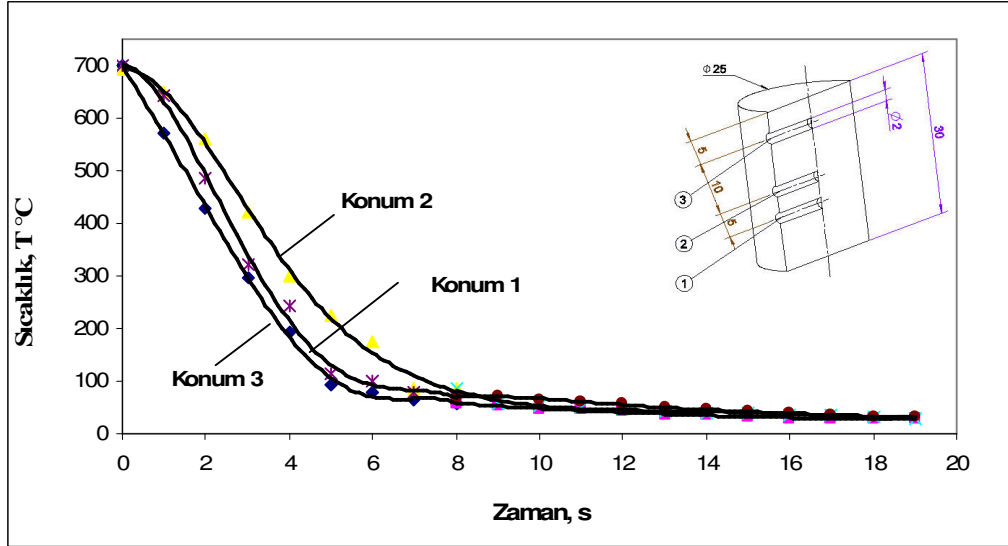
Şekil 5.8. % 19,61 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi



Şekil 5.9. %18,87 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi



Şekil 5.10. %17,95 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi

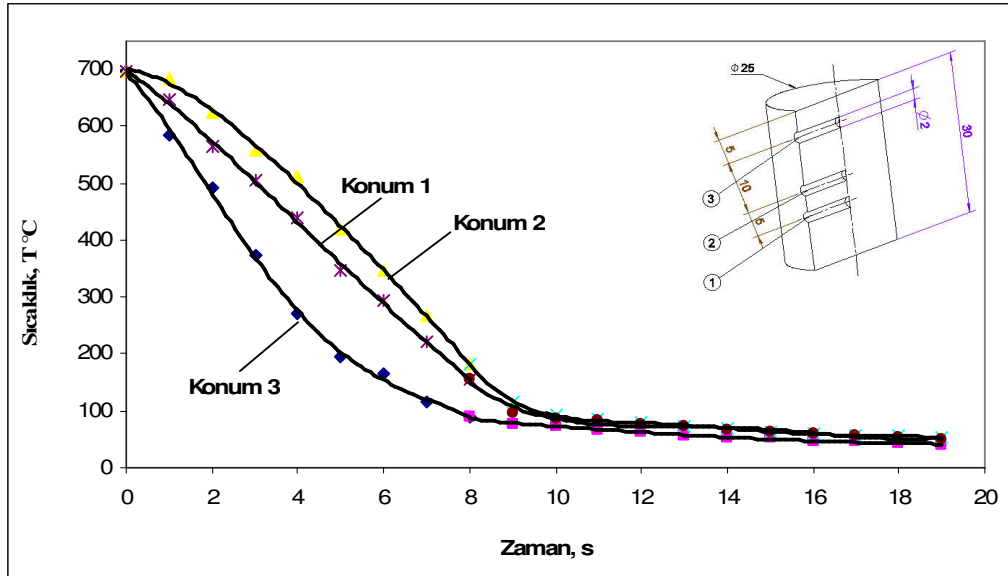


Şekil 5.11. %16,99 Gözeneklilikteki bronz numunenin soğuma eğrisi

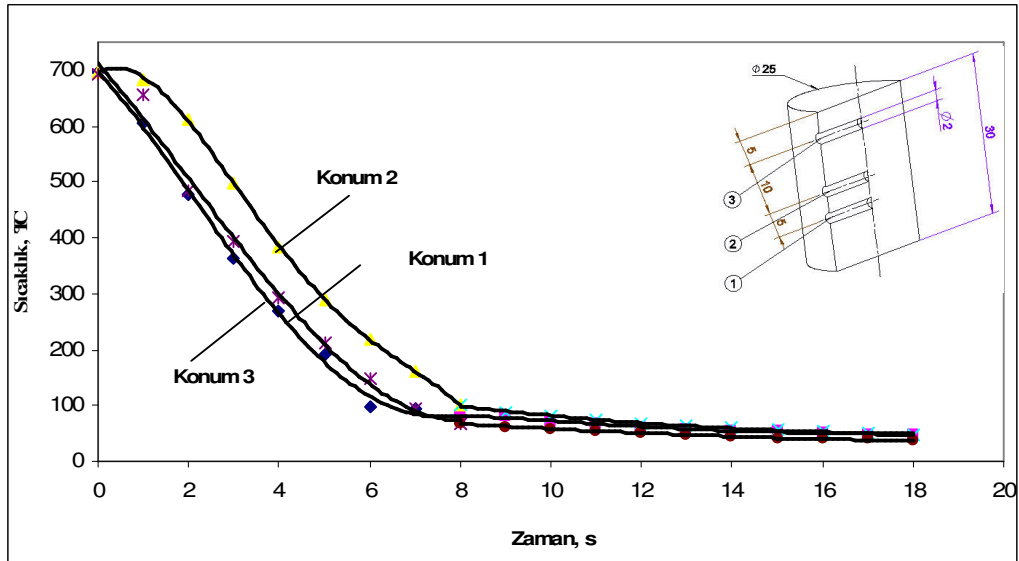
Benzer şekilde, Çizelge 5.4'te paslanmaz çelik için soğuma zamanları elde edilmiştir. Şekil 5.12., 5.13., 5.14., 5.15., 5.16. ve 5.17., paslanmaz çeliğin % 24,45, 19,03, 14,52, 11,86, 9,91 ve 9,4 gözeneklilik değerleri için elde edilmiş olan soğuma eğrileridir.

Çizelge 5.4 Paslanmaz çelik için soğuma süresinin gözeneklilikle değişimi

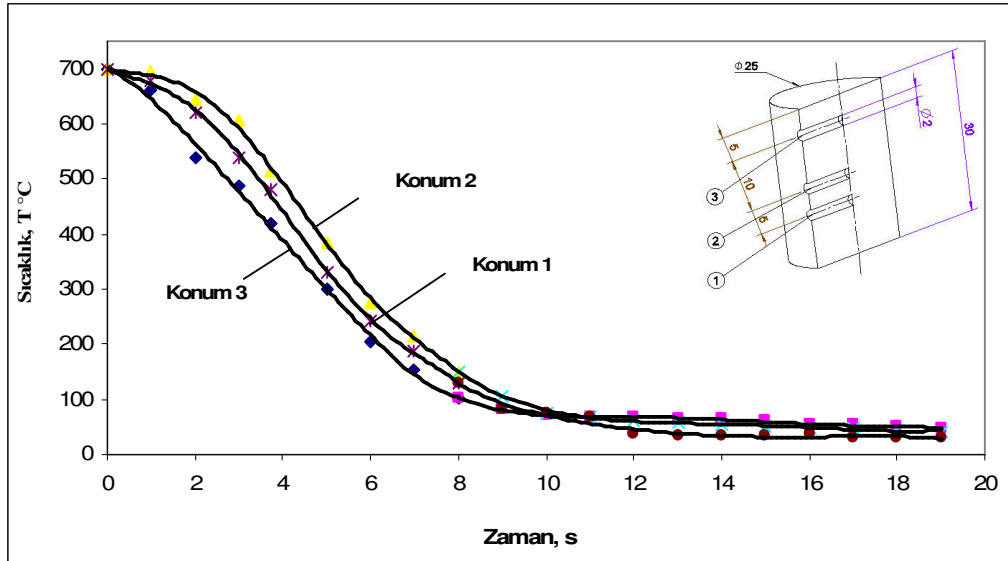
Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Gözeneklilik (%)	Soğuma süresi (s)
200	24,45	128
300	19,03	123
400	14,52	120
500	11,86	118
600	9,91	117
700	9,40	116



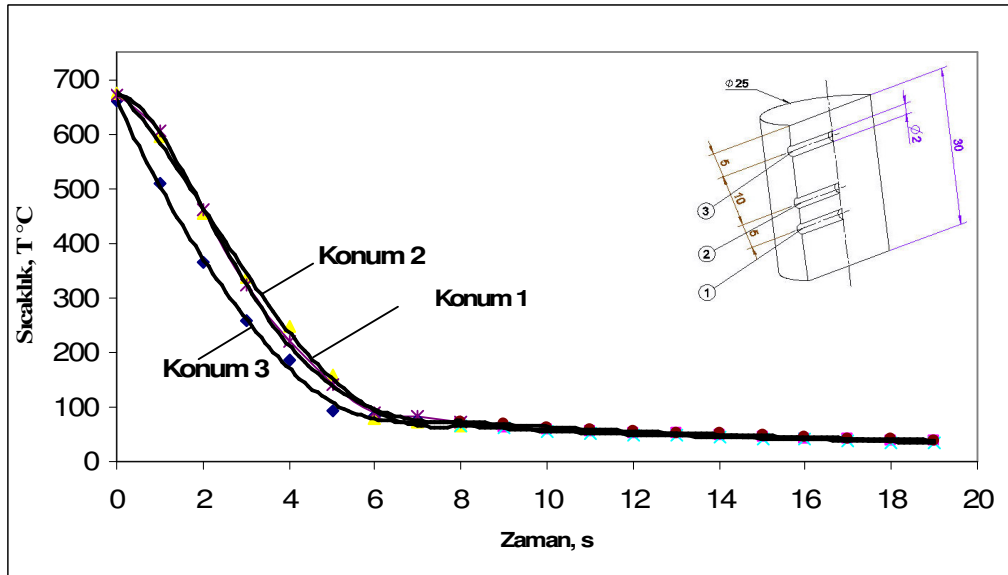
Şekil 5.12. % 24,45 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi



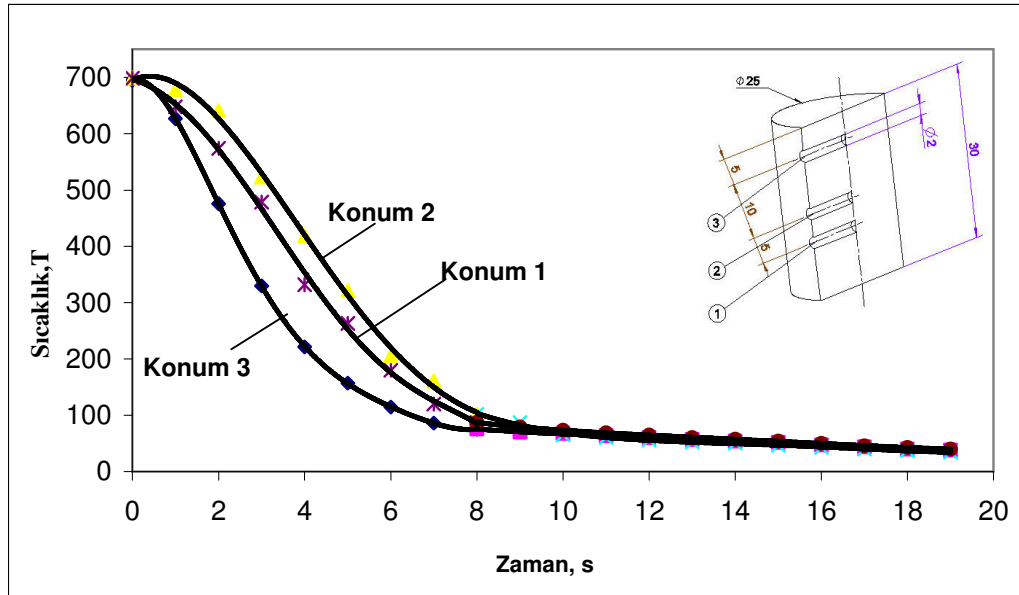
Şekil 5.13. % 19,03 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi



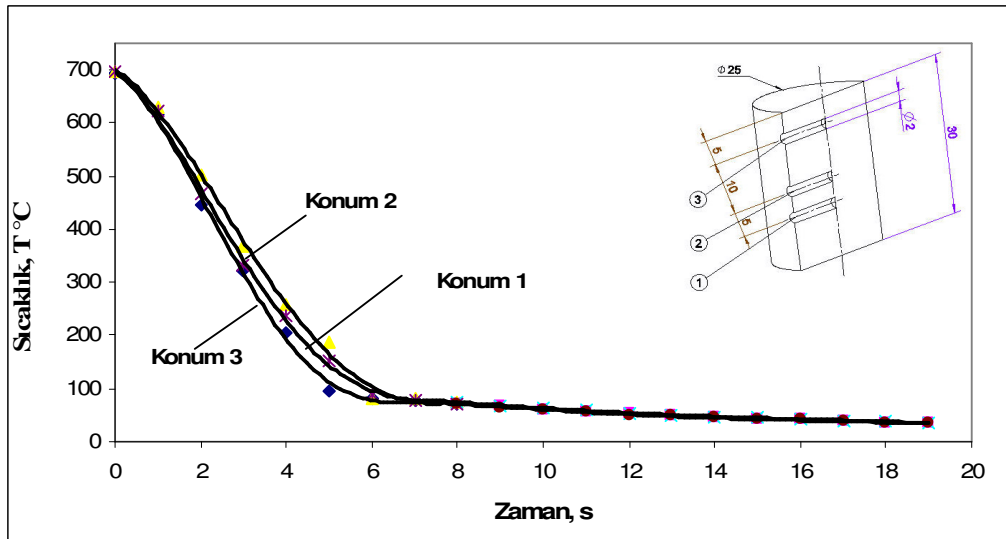
Şekil 5.14. %14,52 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi



Şekil 5.15. %11,86 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi



Şekil 5.16. %9,91 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi

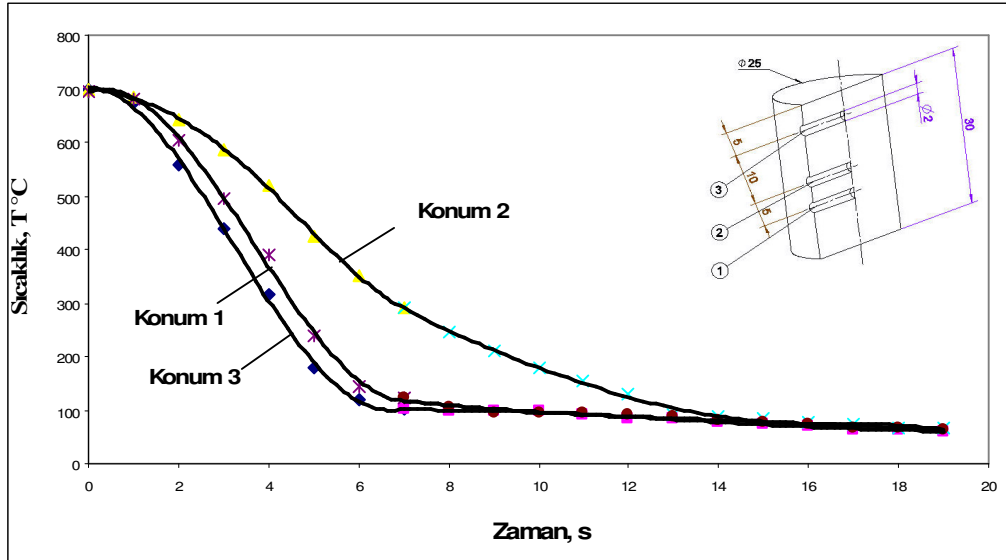


Şekil 5.17. %9,40 Gözeneklilikteki paslanmaz çelik numunenin soğuma eğrisi

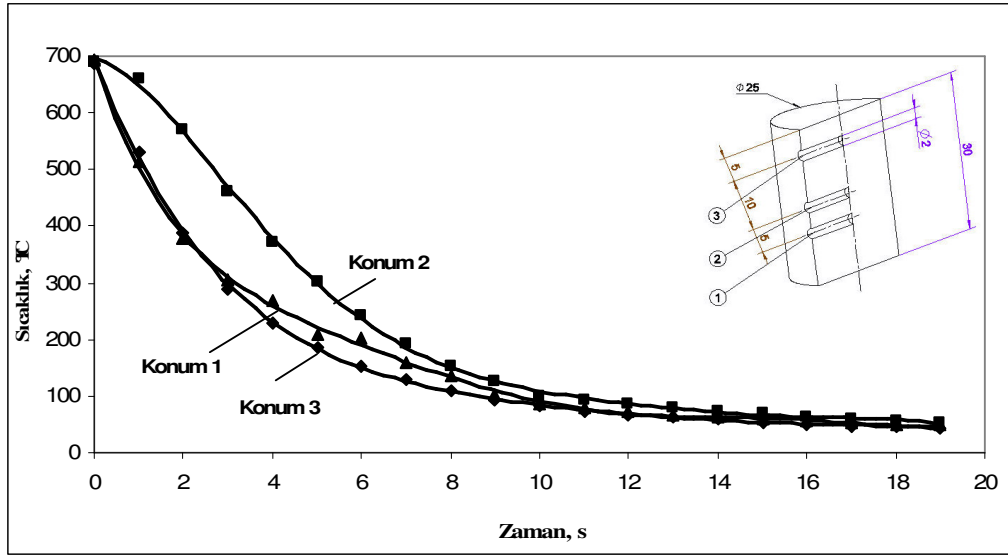
Son olarak aynı işlem demir için de tekrarlanmış, sonuçlar Çizelge 5.5'te gösterilmiştir. Şekil 5.18., 5.19., 5.20., 5.21., 5.22. ve 5.23. , demirin % 24,01, 18,51, 14,24, 11,80, 10,03 ve 9,39 gözeneklilik değerleri için elde edilmiş olan soğuma eğrileridir.

Çizelge 5.5. Demir için soğuma süresinin gözeneklilikle değişimi

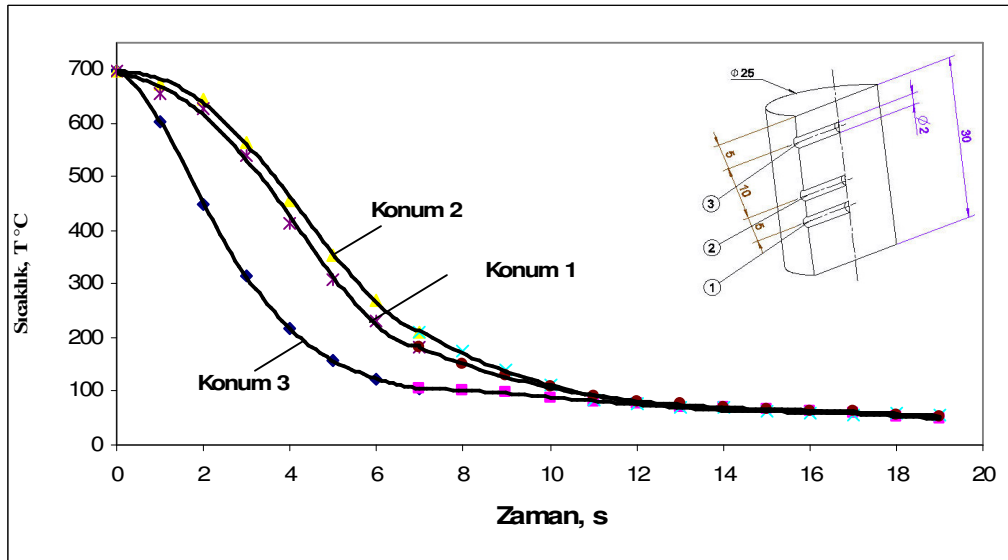
Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Gözeneklilik (%)	Soğuma süresi (s)
200	24,01	147
300	18,51	140
400	14,24	135
500	11,80	131
600	10,03	131
700	9,39	130



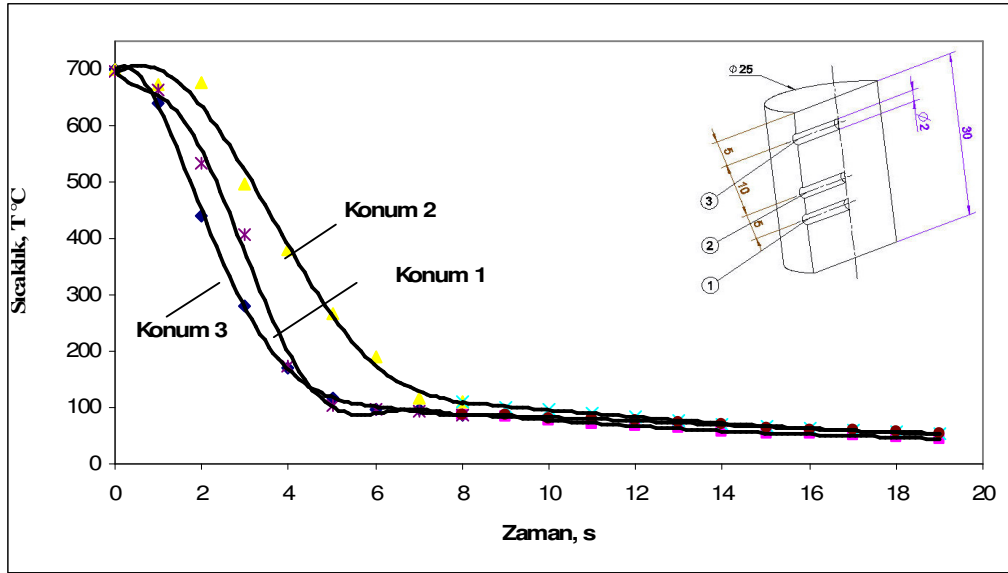
Şekil 5.18. % 24,01 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi



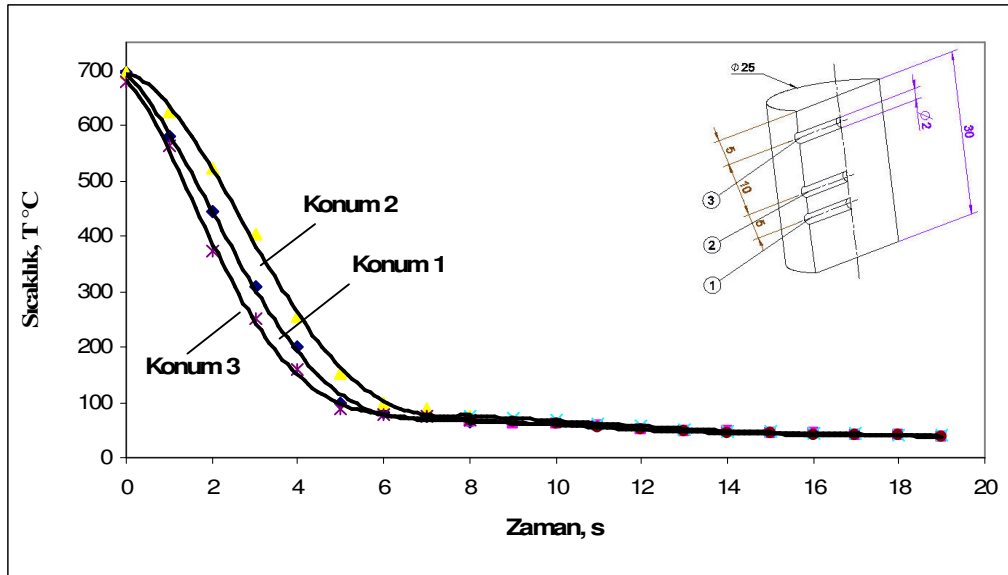
Şekil 5.19. % 18,51 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi



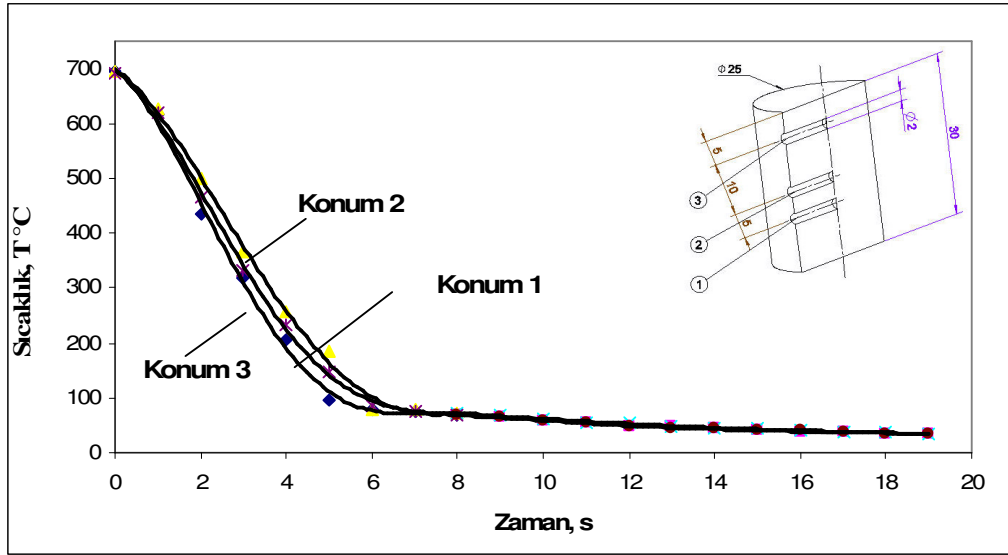
Şekil 5.20. % 14,24 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi



Şekil 5.21. %11,80 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi



Şekil 5.22 %10,03 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi



Şekil 5.23 % 9,39 Gözeneklilikteki demir numunenin soğuma eğrisi

6. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

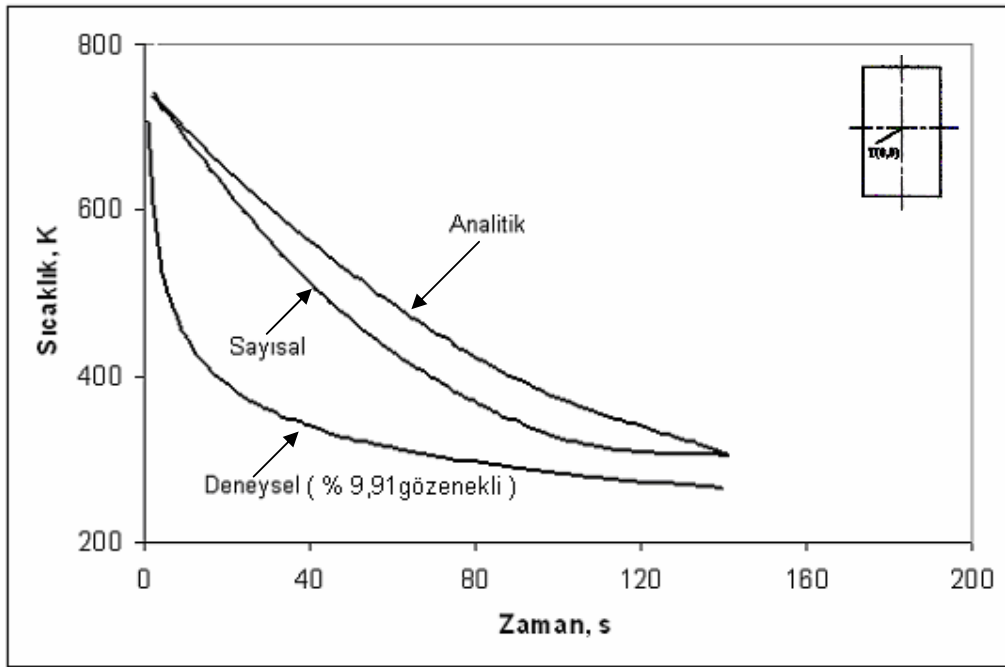
Elde edilen bu sonuçlara göre alüminyum, bakır, bronz, paslanmaz çelik ve demir numuneler için farklı gözenek değerlerinde, numunenin merkez noktasında 700°C'den laboratuvar sıcaklığına kadar olan soğuma süreleri belirlenmiştir. Silindirlerin çapı 25 mm, boyu 30 mm'dir. Gözeneklilik azaldıkça soğuma zamanları da azalmaktadır. Bu da ısı iletim katsayısının gözeneklilikle azalmasından kaynaklanmaktadır.

Deneyler sonucunda paslanmaz çelik numunenin, merkez noktasında 700°C'den laboratuvar sıcaklığına kadar olan soğuma zamanları, % 24,45, 19,03, 14,52, 11,86, 9,91, 9,40 gözeneklilik değerleri için sırasıyla 128 s, 123 s, 120 s, 118 s, 117 s ve 116 s olarak tespit edilmiştir ve soğuma eğrileri Şekil 5.12., 5.13., 5.14., 5.15., 5.16. ve 5.17.'de verilmiştir.

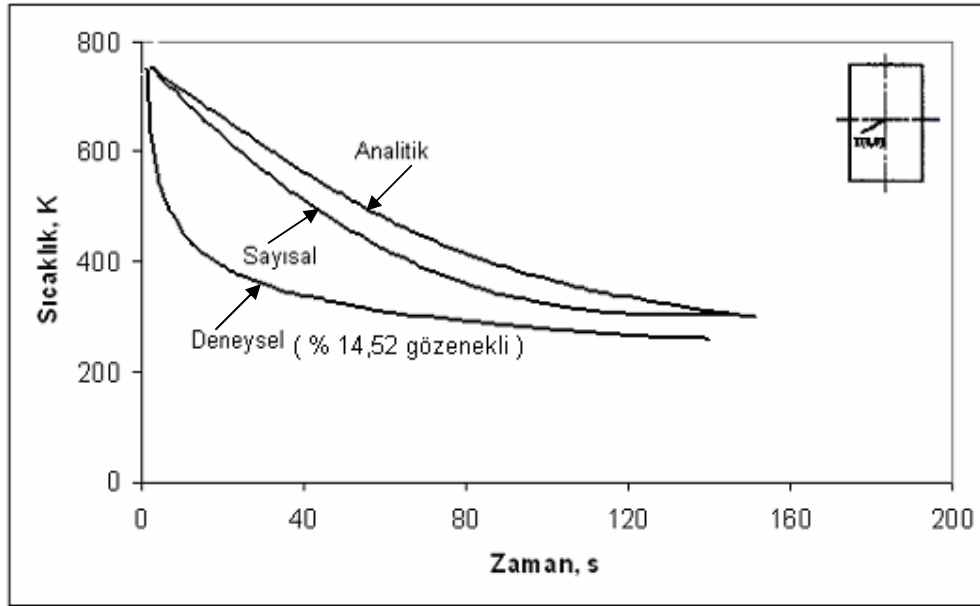
Metal silindirlerin içerisinde ısı aktarımı iletim yoluyla olmaktadır. Silindirlerin gözeneklilik değerlerinin artması, ısı iletim katsayısının azalmasına ve metal içerisinde ısı iletimine karşı direncin oluşmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı elde edilen soğuma süreleri ve eğrileri değişik gözeneklilik değerlerinde farklılık göstermiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi artan gözeneklilik değerleri için elde edilen soğuma süreleri artmıştır. Metalin ısı iletim katsayısının yüksek olması, çeşitli gözeneklilik değerleri için elde edilen ısı iletim katsayıları arasında oluşan farkların artmasına neden olmuştur. Bundan dolayı alüminyum numuneler için değişik gözeneklilik değerlerinde elde edilen soğuma eğrileri ve süreleri, çelik numunelere göre daha büyük değişimlere neden olmuştur.

Paslanmaz çelik numuneler için deneysel olarak elde edilen soğuma eğrileri Ataer ve arkadaşları [20] tarafından sonlu farklar ve analitik yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sayısal olarak yapılan çalışmada % 2,5, 5, 10, 15 ve 20 gözenekliliğe sahip karbon çeliklerin merkez noktaları için soğuma eğrileri elde edilmiştir. Bu çalışmada da kullanılan silindirin çapı 25 mm, yüksekliği 30 mm olarak alınmış ve numuneler su içerisine 773,15 K'den 298,15 K'ne kadar

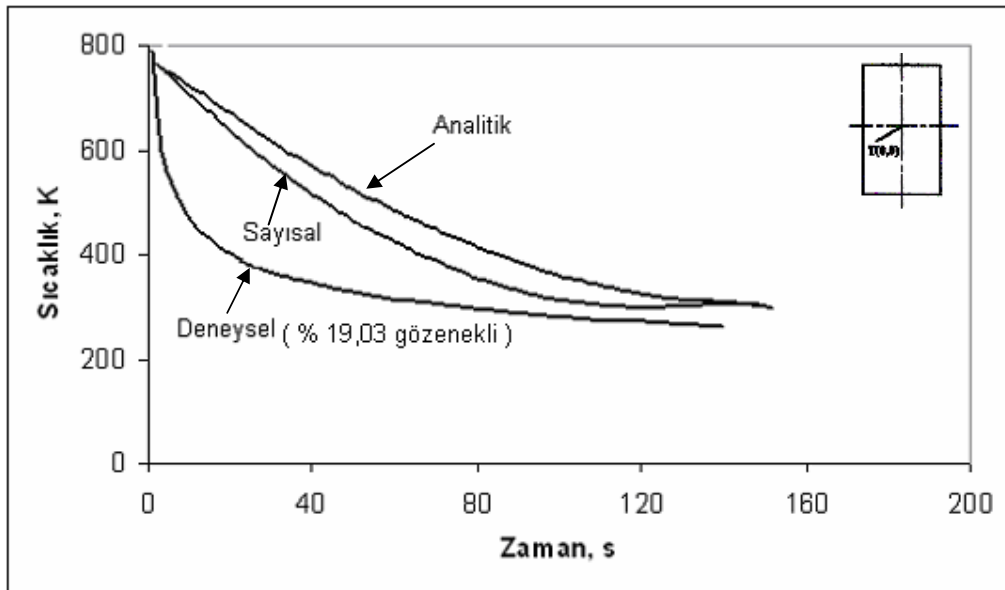
soğutulmuştur. Sayısal yöntemde 0,015 s zaman aralıkları için silindir içerisindeki sıcaklık dağılımını, süreksiz şartlarda iki boyutlu olarak silindirik koordinatlarda bulmaktadır. Bunun için silindir radyal yönde beş, eksen yönünde dokuz eşit parçaya bölünmüştür. Bu çalışmada karbon çelik silindirin ısı iletim katsayısı, özgül ısısı ve suyun fiziksel özellikleri sıcaklığın fonksiyonu olarak düşünülmüştür. %10, 15, ve 20 gözenekliliğe sahip karbon çeliklerin analitik ve sayısal analizle, paslanmaz çelik numuneleri için deneysel analizle elde edilen merkez noktaları sıcaklık değerleri için soğuma eğrileri sırasıyla Şekil 6.1, 6.2, 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.1. % 10 Gözenekli karbon çeliği için analitik ve sayısal analizden ve % 9,91 gözenekli paslanmaz çelik için deneysel analizden elde edilen soğuma eğrileri



Şekil 6.2. % 15 Gözenekli karbon çeliği için analitik ve sayısal analizden ve % 14,52 gözenekli paslanmaz çelik için deneysel analizden elde edilen soğuma eğrileri



Şekil 6.3. % 20 Gözenekli karbon çeliği için analitik ve sayısal analizden ve % 19,03 gözenekli paslanmaz çelik için deneysel analizden elde edilen soğuma eğrileri

Karbon çelik silindirin merkez noktası için analitik ve sayısal yöntemlerle elde edilen soğuma süreleri hesaplanmış ve bu süreler Çizelge 6.1’de gösterilmiştir [21].

Çizelge 6.1. Karbon çelik silindiri için analitik ve sayısal yöntemlerle elde edilen soğuma süreleri

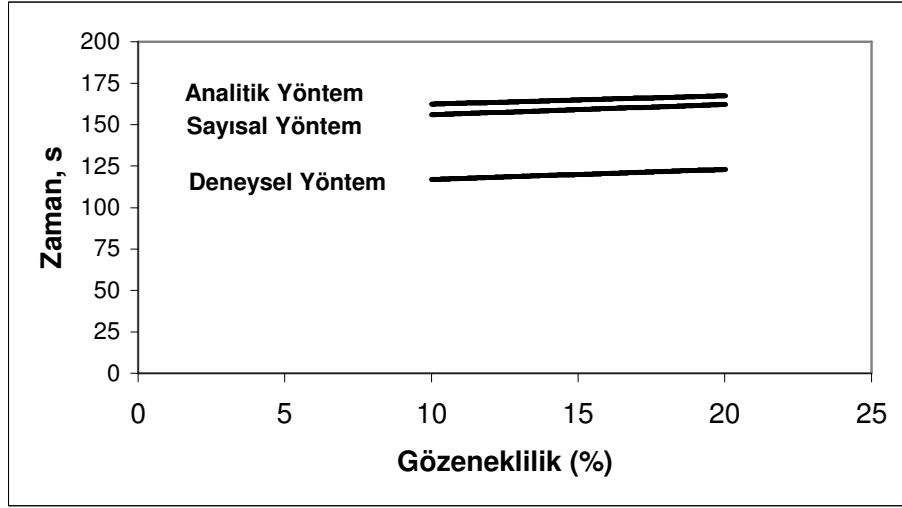
Gözeneklilik Değerleri	Soğuma süreleri (s)	
	Sayısal Yöntem	Analitik Yöntem
% 5	154,2	159,2
%10	156,1	162,3
%15	158,9	165,1
%20	162,3	167,4

DeneySEL yöntemde ise elde edilen sonuçlar, % 24,45, 19,03, 14,52, 11,86, 9,91, 9,40 gözeneklilik değerleri için sırasıyla 128 s, 123 s, 120 s, 118 s, 117 s ve 116 s olarak tespit edilmişti. Buna göre en yakın gözeneklilik değerleri için bir karşılaştırma yapılırsa;

Çizelge 6.2. Çelik numuneler için analitik, sayısal ve dENEYSEL yöntemlerle elde edilen soğuma süreleri

Gözeneklilik Değerleri	Soğuma süreleri (s)		
	Sayısal Yöntem	Analitik Yöntem	DENEYSEL Yöntem
%10	156,1	162,3	117
%15	158,9	165,1	120
%20	162,3	167,4	123

Bu sonuçlara göre çelik numuneler için analitik, sayısal ve dENEYSEL yöntemlerle elde edilen soğuma sürelerin gözenek değerlerine göre değişimi Şekil 6.4’da verilmiştir.



Şekil 6.4. Çelik numuneler için analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen soğuma sürelerinin gözenek değerlerine göre değişimi

Bu veriler kullanılarak deneysel yöntem ile analitik ve sayısal yöntem arasındaki meydana gelen farklı sonuçların hata analizini yapılmıştır ve Çizelge 6.3.'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Deneysel yöntemin sayısal ve analitik yöntemlere göre sapma oranları

Gözeneklilik Değerleri	Sapma Oranı (%)	
	Sayısal Yöntem	Analitik Yöntem
%10	25,04	27,91
%15	24,48	27,31
%20	24,21	26,52

Her üç yöntem için elde edilen soğuma eğrileri ve süreleri karşılaştırıldığında, deneysel yöntemle elde edilen sürelerin daha kısa olduğu görülmektedir. Sonuçlarda meydana gelen bu farklar deneysel çalışmada sürecinde yapılan kabuller ve deney parametrelerinde oluşan sorunlardan dolayı kaynaklanmaktadır. Aynı gözeneklilik değerine sahip numuneler arasında yapılan karşılaştırmada, soğuma zamanlarını temel olarak etkileyen faktörler yoğunluktaki ve ısı iletim katsayısındaki ani fiziksel özelliklerindeki değişimlerdir.

7. BU KONUDA İLERİDE YAPILACAK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada Toz Metalürjisi yöntemi ile üretilmiş farklı gözeneklilik değerlerine sahip alüminyum, bakır, bronz, paslanmaz çelik ve demir metallerinin soğuma zamanları buna bağlı olarak soğuma eğrileri elde edilmiştir. Bu konuda ileride yapılacak çalışmalarda çok daha hassas, analitik ve sayısal sonuçlara daha yakın değerler elde etmek için deney ekipmanlarının geliştirilmesi sağlanabilir. Bu çalışmada, sıkıştırma sonrasında edilen numunelerin homojen bir yoğunluğa sahip olduğu kabul edilmişti. Numunelerin farklı noktalarındaki farklı yoğunluk değerlerinin soğuma eğrilerine etkisi ileride yapılacak çalışmalarda belirlenebilir. Su verme işlemi sırasında alınan verilerin zaman aralığının düşürülmesi ile daha hassas sonuçlar elde edilebilir. Kesitleri alınıp mikro yapılarına bakılan gözenekli silindirlerin gözenek dağılımlarına bakılarak ısı iletme etkisi incelenebilir. Ayrıca farklı metal tozları belirlenen oranlarda karıştırılıp elde edilecek numunelerde, karıştırılan tozların numune soğuma eğrilerine etkisi üzerine çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Baksan B., Gürler R.; “Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması”, *Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü*, 26480 Eskişehir, 2-7, (1998).
2. Zhao, Naiqin (Tianjin Univ); Zhou, Fugang; Chen, Minfang; Wang, Zheren; Li, “Microstructure and sintering process of P/M WC reinforced copper composite”, *Powder Metallurgy Technology*, Nov, 18(4): 265-269, (2000).
3. Zhang, Rui (Ctr. for Innov. Sintered Products, P/M Lab, Pennsylvania State University); Liu, Yang; Salamon, Nicholas J.; German, Randall M.; Engel, Renata “Finite element analysis for the solid phase sintering of bronze” *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 80-86, (2001).
4. Aivazov, M.I., Domashev, I.A., “Influence of Porosity on the Conductivity of the Hot Pressed Titanium Nitride Specimens”, *Poroshkovaya Metallurgiya (Soviet P/M and Metal Ceramics)*, 8(9): 51-54, (1968).
5. Koh, J.C., Fortini, “Prediction of Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Porous Metallic Materials”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 16: 2013-2021, (1973).
6. Howard, P., Koczak, M. J., “How Porosity and Atmosphere Effect the Conductivity of P/M parts”, *Int. J. Powder Metallurgy*, 17(1): 25-35, (1981).
7. Odelevski, V. I., Zh, Tekh, fiz., *Int. J. Powder Metallurgy*, 6, 667, (1951).
8. Veinberg, A.K., Nauk, Dokl. Akad., *Powder Technology*, 3, 543, (1966).
9. Stewart M. And Welsh S., “Thermal Conductivity of Porous Materials with Isolated Pores”, *Eng. Comp. Lab.*, 4 (3):178-184 (1997).
10. Sarıtaş, S., Doherety, R., Lawley, A., “Effect of Porosity on the Hardenability of P/M Steels”, *International Journal of Powder Metallurgy*, 38(1) :31-39 (2002)
11. Grootenhuis, P., Powell, W. R., Tye P. R., “Thermal and Electrical Conductivity of Porous Metals Made by Powder Metallurgy Methods”, *Proceeding of Physical Society*, 65B : 502-511 (1952).
12. Ataer, Ö. E., Aygün, C. and Uslan, İ., “A Numerical Approach to the Cooling Curves of Porous P/M Materials for Quenching Process”, *Powder Technology*, 137(3): 159-166 (2003).
13. Cerit, M., “Makine Mühendisliği El Kitabı”, *Makine Mühendisleri Odası*, Yayın No:100, Ankara, 4, 43-45 (1976).

14. Thelning, K. E. , “Steel and Its Heat Treatment”, *Bofors Handbok*, 6-16: 211-216 (1975).
15. Herding, Th. (Foundation Inst. of Material Science); Kessler, O.;Hoffmann, F.; Mayr, P. “An approach for Continuous Cooling Transformation (CCT) diagrams of aluminium alloys” *Materials Science Forum*, 396-402 (2): 869-874 (2002).
16. Tekin E., ”Demir Dışı Metaller ve Alaşımlarının Uygulamalı Optik Metalografisi 2. Baskı” *SEGEM Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi*, Yayın No:101, Ankara, 132, 137, (Ağustos 1984)
17. Çiğdemoğlu M. “Metal Alaşımlarının Isıl İşlemleri” *Makine Mühendisleri Odası*, Yayın No:73, Ankara, 4, 13-16, 50, (1972)
18. Cankut S. “Ekstraktif Metalürji Uygulaması: Bakır” , *Doğa Yayıncılık*, 34-76, (1973).
19. Metal Handbook “Powder Metallurgy” *John & Wiley*, 89-112, (1998).
20. Uslan İ., Ataer Ö. E., Sarıtaş S. “Numerical And Analytical Approach To The Cooling Curves Of Porous P/M Materials For Variable Boundary Conditions” *In Press*.(2006)
21. Yılmaz, İ. “Gözenekli Malzemelerde Soğuma Eğrilerinin Sayısal Yöntemle Elde Edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 34-87 (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILMAZ Onur
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 1980 , Kırıkkale
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 533 685 44 16
e-mail : onuryilmaz23@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi	2003
Lise	Kırıkkale Anadolu Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003-2004 2004-	ADS Yapı Denetim MKE Silah Fabrikası	Kontrolör Müh. Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce İleri