

**ASTALOY CrA ALAŞIMLARINDA SİNERLEME İLE SERTLEŞTİRME**

**HAKAN HAFIZOĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2013**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Ünver Kaynak  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Prof. Dr. Ünver Kaynak  
Anabilim Dalı Başkanı

Hakan Hafizoğlu tarafından hazırlanan ASTALOY CrA ALAŞIMLARINDA SİNERLEME İLE SERTLEŞTİRME adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Doç. Dr. Nuri Durlu  
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Bilgehan Ögel

Üye : Doç. Dr. Mehmet Ali Güler

Üye : Doç. Dr. Nuri Durlu

## **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.

Hakan HAFIZOĞLU

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Makine Mühendisliği  
**Tez Danışmanı** : Doç. Dr. Nuri DURLU  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Haziran 2013

**Hakan HAFIZOĞLU**

## **ASTALOY CrA ALAŞIMLARINDA SİNERLEME İLE SERTLEŞTİRME**

### **ÖZET**

Bu çalışmada, su atomizasyon yöntemi ile üretilen Astaloy CrA-0,5C, Astaloy CrA-1Ni-0,5C, Astaloy CrA-1Cu-0,5C ve Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımlarında sinterleme ile sertleştirme işleminin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Numuneler, 600 MPa basınç altında preslendikten sonra 1120°C’ de 20 dakika süre ile endüstriyel olarak kullanılan endogaz ortamında sinterlenmiş ve sinterleme sonrası 0,5°C/s, 1,5°C/s ve 3°C/s soğutma hızlarında soğutulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda sinterleme sonrası yapılan sinterleme ile sertleştirme işleminde soğutma hızı arttıkça beynit ve martensit oluşumuna bağlı olarak sertlik değerlerinde artış, gözeneklere ve gözeneklerdeki düzensizliğe bağlı olarak çapraz kırılma dayanımı ve çekme dayanımı değerlerinde ise düşüş olduğu belirlenmiştir.

Sinterleme ile sertleştirme çalışmalarına ek olarak ikincil ısıtma işleminin mekanik özelliklere etkisi de incelenmiştir. Toz alaşımları 600 MPa basınç altında preslendikten sonra, %90N<sub>2</sub>-%10H<sub>2</sub> gaz ortamında 1120°C’de 45 dakika süre ile sinterlenmiştir. Sinterlenmiş numuneler, 1070°C’de 20 dakika süre ile azot ortamında tavllanmış, ve tavlama işleminden sonra yapılan havada soğutma, suverme ve menevişleme işlemlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Isıtma işlemi uygulanan numunelerde soğutma hızı artışına ve ısıtma işlemi sırasında oluşan karbonsuzlaşmış tabaka oluşumuna bağlı olarak sertlik ve çapraz kırılma dayanımı değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Toz metalurjisi, sinterleme, sinterleme ile sertleştirme, mekanik özellikler, demir toz alaşımları, sertleştirilebilirlik, ısıtma işlemi, Astaloy CrA

**University** : TOBB Economics and Technology University  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Mechanical Engineering  
**Supervisor** : Associate Professor Dr. Nuri DURLU  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – June 2013

**Hakan HAFIZOĞLU**

## **SINTER HARDENING OF ASTALOY CrA ALLOYS**

### **ABSTRACT**

In this study, the effect of sinter-hardening operation on the mechanical properties of water atomized Astaloy CrA-0,5C, Astaloy CrA-1Ni-0,5C, Astaloy CrA-1Cu-0,5C, Astaloy CrA-2Cu-0,5C powder alloys was examined. The samples were pressed under 600 MPa and were sintered at 1120°C for 20 minutes in an industrial belt sintering furnaces under endogas atmosphere. After sintering, 0.5 °C/s, 1.5 °C/s, 3 °C/s cooling rates were applied to the samples. The study showed that sinter-hardening led to an increase in the hardness due to the transformation of martensite and bainite whereas a decrease in the transverse rupture strength and tensile strength values due to the irregular pores in the microstructure.

In addition to the sinter hardening studies, the effect of the secondary heat treatment on the mechanical properties was also examined. The samples were sintered at 1120°C for 45 minutes under 90%N<sub>2</sub>-10%H<sub>2</sub> atmosphere after pressing under 600 MPa. The sintered samples were annealed at 1070°C for 20 minutes under nitrogen atmosphere. After annealing, the effect of normalizing, quenching and tempering on the microstructure and mechanical properties was studied. An increase in the hardness and transverse rupture strength values of the heat treated samples was observed due to the increase of cooling rate and decarburization layer which was formed during secondary heat treatment.

**Key Words:** Powder metallurgy, sintering, sinter hardening, mechanical properties, iron powder alloys, hardenability, heat treatment, Astaloy CrA

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca tecrübelerinden ve derin bilgi birikiminden faydalandığım, yardımlarını ve katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam ve danışmanım **Doç. Dr. Nuri DURLU**'ya teşekkür ederim.

Çekme deneylerindeki katkılarından dolayı **Prof. Dr. Rıza GÜRBÜZ** ve **Önder ŞAHİN**'e, ikincil ısı işlem ve kimyasal analiz çalışmalarındaki katkılarından dolayı **Kaan ÇALIŞKAN**'a, mikroyapı çalışmalarındaki katkılarından dolayı **Gülten KILIÇ**'a, sinterleme ile sertleştirme işlemindeki katkılarından dolayı Tozmetal San. ve Tic. A.Ş. Genel Müdürü Sayın **Hüsnü ÖZDURAL**'a, Kalite Kontrol Müdürü Sayın **Aytaç ATAŞ**'a, Üretim Müdürü Sayın **Cengiz BOYACI**'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmalarım boyunca katkılarından ve yardımlarından dolayı arkadaşlarım **Ahmet Murat ÖGE**'ye ve **Samet Çaka ÇAKMAKÇIOĞLU**'na teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
KISALTMALAR .....	xii
SEMBOL LİSTESİ .....	xiii
BÖLÜM 1 .....	1
1.GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
2.LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1.TOZ METALURJİSİ .....	3
2.1.1.Toz Metalurjisi Yönteminin İşlem Basamakları.....	4
2.1.2.Toz Üretimi-Su Atomizasyon Yöntemi.....	5
2.1.3.Tozların Preslenmesi.....	6
2.1.4.Sinterleme .....	7
2.1.5.Demir Esaslı Toz Alaşımlarının Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları... 9	
2.1.6.Demir Esaslı Toz Metal Parçaların Kullanım Alanları.....	10
2.2.ISIL İŞLEM.....	12
2.3.SİNERLEME İLE SERTLEŞTİRME.....	15
2.3.1.Sinterleme ile Sertleştirme Fırınları.....	15
2.3.2. Sinterleme ile Sertleştirmenin Avantajları.....	16
2.4.SİNERLEME İLE SERTLEŞTİRMEYİ ETKİLEYEN UNSURLAR.....	17
2.4.1.Alaşım Elementleri .....	17
2.4.2.Soğutma Hızı .....	21
2.4.3.Östenit Tane Büyüklüğü .....	23
2.4.4.Yapının Homojenliği .....	23
2.4.5.Gözeneklilik.....	25
2.5.ASTALOY CrA ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI .....	31

2.6.SİNERLENMİŞ VE SİNERLEME İLE SERTLEŞTİRİLMİŞ PARÇALARIN İŞLENEBİLİRLİĞİ .....	36
BÖLÜM 3 .....	38
3.DENEYSEL YÖNTEM .....	38
3.1.Toz Alaşımının Özellikleri.....	38
3.2.Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	39
3.3.Toz Alaşımının Sinterlenmesi .....	41
3.3.1.Endüstriyel Fırında Sinterleme .....	41
3.3.2.Laboratuvar Ölçekli Fırında Sinterleme ve Isıl İşlem Deneyleri.....	42
3.4.Toz Alaşımının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	43
3.4.1. Çapraz Kırılma Dayanım Ölçümleri.....	43
3.4.2.Sertlik Ölçümleri.....	44
3.4.3.Çekme Deneyleri .....	45
3.4.4.Mikroyapı Çalışmaları .....	46
3.4.5.Gözenek Miktarının ve Küreselliğinin Ölçülmesi .....	46
BÖLÜM 4 .....	47
4.DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	47
4.1. Mikroyapı Çalışmaları.....	47
4.2.Mekanik Özellikler .....	61
4.2.1 Sertlik Ölçümleri.....	61
4.2.2. Çapraz Kırılma Dayanımı Ölçümleri.....	65
4.2.3. Çekme Dayanımı Ölçümleri .....	71
4.2.4. Mikrosertlik Ölçümleri .....	73
BÖLÜM 5 .....	76
5.SONUÇLAR .....	76
KAYNAKLAR .....	78
ÖZGEÇMİŞ .....	82



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Krom içerikli toz alaşımlarının sinterleme ve sinterleme ile sertleştirme işlemleri sonucu mekanik özellikleri. ....	32
Çizelge 2.2. Astaloy CrA-2Ni-0,6grafit alaşımının mekanik özellikleri. ....	33
Çizelge 2.3. Astaloy CrA alaşımların mekanik özellikleri. ....	34
Çizelge 2.4. Astaloy CrA-1Cu alaşımlarının mekanik özellikleri. ....	35
Çizelge 2.5. Astaloy CrA-1Ni içeren alaşımların mekanik özellikleri. ....	36
Çizelge 3.1. Tez çalışmasında kullanılan tozların bileşimleri.....	38
Çizelge 4.1. Numunelerin gözenek miktarları ve gözeneklerin küresellikleri.....	49
Çizelge 4.2. Astaloy CrA alaşımlarında sinterleme ile sertleştirme sonrası oluşan mikroyapılar. ....	55
Çizelge 4.3. Sinterlenmiş ve 1070°C’de 20 dakika süre ile tavlandıktan sonra havada soğutulmuş alaşımlardaki karbon miktarı. ....	69
Çizelge 4.4. Sinterleme ile sertleştirme sonrası numunelerin mikrosertlik değerleri. 73	
Çizelge 4.5. Sinterlenmiş ve 1070°C’de 20 dakika süre ile tavlandıktan sonra havada soğutulmuş, su verilmiş ve menevişlenmiş (200C, 1 saat) numunelerin mikrosertlik değerleri.....	75

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Toz Metalurjisi ile üretilmiş parçalardan bir kesit.....	3
Şekil 2.2 Toz metalurjisiyle üretilen parçaların sektörlere göre dağılımı.....	4
Şekil 2.3. Toz metalurjisi akım şeması. ....	4
Şekil 2.4. Su atomizasyonun şematik gösterimi. ....	5
Şekil 2.5. Presleme işleminin şematik gösterimi .....	6
Şekil 2.6. Hall akış ölçerin şematik gösterimi .....	7
Şekil 2.7. Sürekli fırının ve ısıtma rejiminin şematik gösterimi. ....	8
Şekil 2.8. Ötektoid demir-karbon alaşımının zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı A:östenit, P:pörlit, B:beynit, M:martensit.....	13
Şekil 2.9. Sinterleme ile sertleştirme fırınının şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.10. Alaşım elementlerinin (örneğin Mo) hiperötektoid gri demirin sürekli soğuma dönüşüm diyagramlarındaki (CCT) etkisi .....	17
Şekil 2.11. Alaşım elementlerinin sıkıştırılabilirliğe etkisi.....	19
Şekil 2.12. Alaşımlama yöntemlerinin şematik gösterimi .....	24
Şekil 2.13. 1120°C’de 30 dakika sinterlenen Fe-2Ni-0,5Mo-0,3C alaşımı için gözenekliliğe bağlı mekanik özellik değişimi.....	25
Şekil 2.14. Gözeneğin en büyük ve en küçük çapları .....	26
Şekil 3.1. Taramalı elektron mikroskopunda incelenen tozların morfolojileri (a) Astaloy CrA-0,5C, (b) Astaloy CrA-1Ni-0,5C, (c) Astaloy CrA-1Cu-0,5C, (d) Astaloy CrA-2Cu-0,5C. ....	39
Şekil 3.2. 60 tonluk çekme-basma cihazı.....	40
Şekil 3.3. Deneylede kullanılan kalıp ve zımbaların şematik gösterimi. (a) Çapraz kırılma dayanımı kalıp ve zımbaları, (b) Pelet kalıp ve zımbaları, (c) Çekme kalıp ve zımbaları.....	41
Şekil 3.4. Bantlı fırının şematik gösterimi. ....	42
Şekil 3.5. Laboratuvar ölçekli fırının şematik gösterimi.....	43
Şekil 3.6. Çapraz kırılma dayanımı test düzeneği.....	44
Şekil 3.7. Çalışmalarda kullanılan sertlik cihazları (a) makrosertlik, (b) mikrosertlik .....	45
Şekil 3.8. Çekme deneyi numunelerinin şematik gösterimi .....	46

Şekil 4.1. Numunelerin parlatılmış yüzey görüntüleri (a) Astaloy CrA-0.5C (100 x) (b) Astaloy CrA-1Ni-0.5C (100 x) (c) Astaloy CrA-1Cu-0.5C (100 x) (d) Astaloy CrA-2Cu-0.5C (100 x). .....	48
Şekil 4.2. Astaloy CrA-0,5C alaşımının dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) 0,5°C/s (b) 3°C/s. ....	50
Şekil 4.3. Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımının dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) 0,5°C/s (b) 3°C/s. ....	51
Şekil 4.4. Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımının dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) 0,5°C/s (b) 3°C/s. ....	53
Şekil 4.5. Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımının dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) 0,5°C/s (b) 3°C/s. ....	54
Şekil 4.6. Astaloy CrA-0,5 C alaşımının ısıtma işlem sonrası dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) havada soğutma (b) su verme. ....	56
Şekil 4.7. Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımının ısıtma işlem sonrası dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) havada soğutma (b) su verme. ....	57
Şekil 4.8. Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımının ısıtma işlem sonrası dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) havada soğutma (b) su verme. ....	58
Şekil 4.9. Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımının ısıtma işlem sonrası dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) havada soğutma (b) su verme. ....	59
Şekil 4.10. İkincil ısıtma işlem sonrası dört farklı alaşımdan elde edilen numunelerin ferrit tabakası görüntüleri (100x) (a) Astaloy CrA-0,5C (b) Astaloy CrA-1Ni-0,5C (c) Astaloy CrA-1Cu-0,5C (d) Astaloy CrA-2Cu-0,5C. ....	60
Şekil 4.11. Astaloy CrA alaşımlarının soğutma hızlarına göre makrosertlik değerlerinin değişimi. ....	62
Şekil 4.12. Astaloy CrA alaşımlarına 1070°C’de 20 dakika uygulanan ikincil ısıtma işlemler sonucu elde edilen makrosertlik değerleri. ....	64
Şekil 4.13. Sinterleme ile sertleştirilmiş numunelerin çapraz kırılma dayanımı değerleri. ....	66
Şekil 4.14. İkincil ısıtma işlem çapraz kırılma dayanımı değerleri. ....	68
Şekil 4.15. Soğutma hızına göre numunelerin çekme dayanımı değerleri. ....	71

## KISALTMALAR

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>C</b>	Karbon
<b>Co</b>	Kobalt
<b>CO</b>	Karbonmonoksit
<b>Cr</b>	Krom
<b>Cu</b>	Bakır
<b>Fe</b>	Demir
<b>HB</b>	Brinell ölçüsündeki sertlik birimi
<b>HRA</b>	Rockwell-A ölçüsündeki sertlik birimi
<b>HRC</b>	Rockwell-C ölçüsündeki sertlik birimi
<b>HV10</b>	Vickers ölçüsündeki makrosertlik birimi
<b>HV0,1</b>	Vickers ölçüsündeki mikrosertlik birimi
<b>Mn</b>	Mangan
<b>Mo</b>	Molibden
<b>Nb</b>	Niyobyum
<b>Ni</b>	Nikel
<b>Si</b>	Silisyum
<b>Ti</b>	Titanyum

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler Açıklama

$\alpha$	Hacim merkezli kübik kristal yapılı ferrit fazı
$\gamma$	Yüzey merkezli kübik kristal yapılı östenit fazı
$M_s$	Martensit dönüşümü başlama sıcaklığı
F	Gözeneklerde şekil faktörü
A	Gözenek Alanı
p	Gözenek çevresi
f	Gözenek uzama faktörü
$D_{maks}$	Gözenek maksimum çapı
$D_{min}$	Gözenek minimum çapı
$S_0$	Gözenek dayanımı
$R_{tr}$	Çapraz kırılma dayanımı
F	Çapraz kırılma dayanımında kırılma için gerekli yük
L	Çapraz kırılma dayanımı düzeneğinde destekler arası mesafe
b	Çapraz kırılma dayanımı numunesinin eni
h	Çapraz kırılma dayanımı numunesinin kalınlığı
$\mu m$	Mikrometre

## BÖLÜM 1

### 1. GİRİŞ

Toz metalurjisi; son zamanlarda önemi artan, seri imalata uygun bir imalat teknolojisidir. Toz metalurjisinin yaygın olarak kullanıldığı sektörlerin başında otomotiv sektörü gelmektedir. Dişliler, piston kolları, çeşitli yataklar en çok üretilen parçalardır. Bu tür iş parçalarının yanı sıra; elmas kesici takımlar, kendinden yağlamalı yataklar, kesici takım malzemesi olarak kullanılan aşınmaya dayanıklı titanyum karbür ve tungsten karbür esaslı metal matriks kompozitleri de toz metalurjisi teknikleri kullanılarak üretilmektedir.

Toz metalurjisinin ilk aşaması toz üretimidir. Üretilen tozlar, çeşitli yağlayıcı ve bağlayıcı katkılarla karıştırıldıktan sonra presleme işlemi ile sıkıştırılır ve üretilecek parçanın şekli verilmiş olur. Presleme işleminden sonraki aşama parçaya dayanım kazandıran sinterleme işlemidir. Bu işlemden sonra, eğer gerek duyulursa parçaya ikincil işlemler (talaşlı imalat, damgalama, ısıl işlem) uygulanmaktadır.

1990'lı yıllarda, sinterleme işleminden sonra parçaların mekanik özelliklerini artırmak için uygulanan ısıl işlemlerin maliyetlerini azaltmak için parçalara sinterleme ile sertleştirme işlemi uygulanmaya başlamıştır. Sinterleme ile sertleştirme işlemi, sinterleme fırınlarında sinterleme işleminden sonra parçaların soğuk akışkan vasıtasıyla soğutulması şeklinde yapılmaktadır ve bu işlemden sonra mekanik özellikleri artırıcı ikinci bir ısıl işleme gerek duyulmadan martensitli ve beynitli mikroyapılar elde edilmektedir. Sinterleme ile sertleştirme işlemi; alaşım elementleri, soğutma hızı, östenit tane büyüklüğü, yapının homojenliği ve parçaların gözenekliliği gibi unsurlar etkilemektedir [1]. Alaşım elementleri, sertleşebilirliği artırmakta dolayısıyla sinterleme işlemi sonrasında yapılan hızlı soğutma işleminde parçalarda martensit ve beynit fazları gözlenmektedir. Soğutma hızı arttıkça sert fazların miktarı da artmaktadır. Alaşım elementlerinin sertleşebilirliği parçanın her noktasında homojen olarak arttırması için ön alaşımlama yöntemi önem kazanmaktadır. Bütün bu etkenlerin yanı sıra parçanın gözenekliliği de önemli bir unsurdur. Büyük ve düzensiz gözenekler gerilmenin daha büyük hissedilmesine ve bu noktalardan kopmaya neden olmaktadır.

Bu çalışmada, dört farklı Astaloy CrA alaşım sisteminde sinterleme ile sertleştirme işleminin mekanik özelliklere etkisi ve de sinterlenmiş alaşımlara uygulanan ikincil ısıl işlemlerin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Bu amaçla; pelet, çapraz kırılma dayanımı ve çekme numuneleri hazırlanmış ve endüstriyel olarak kullanılan fırında endogaz ortamında 1120°C’de yapılan sinterleme işleminden sonra üç farklı soğutma hızı (0,5°C/s, 1,5°C/s, 3°C/s) uygulanarak sinterleme işlemi ve sinterleme ile sertleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sonrası ısıl işlemler; ise 1070°C’de azot ortamında 20 dakika süre ile yapılan tavlama işleminden sonra havada soğutma ve su verme şeklinde iki farklı soğutma hızında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde konu ile bağlantılı literatür özeti verilecektir. Çalışmanın üçüncü bölümünde kullanılan deneysel yöntemler açıklanacak, dördüncü bölümde elde edilen deneysel sonuçlar tartışılacaktır. Çalışmanın altıncı bölümünde sonuçlar verilecektir.

## BÖLÜM 2

### 2. LİTERATÜR ÖZETİ

#### 2.1. TOZ METALURJİSİ

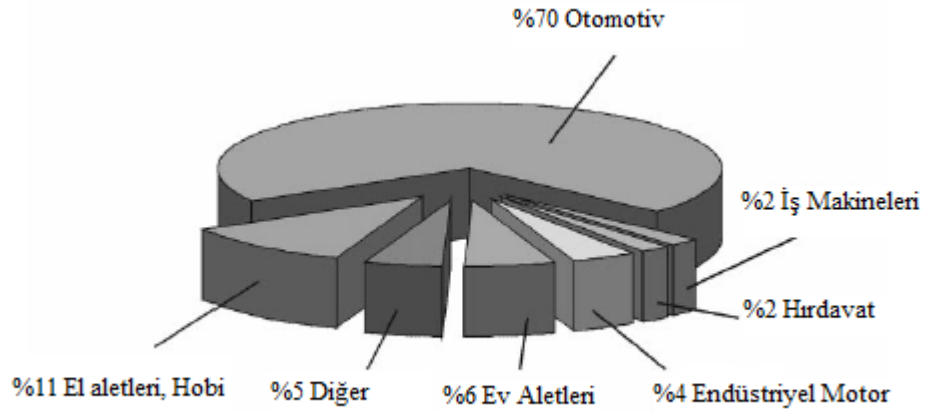
Toz Metalurjisi, net şekilde veya net şekle yakın parça üretimine imkan sağlayan ekonomik bir imalat yöntemidir [2]. Şekil 2.1’de toz metalurjisi ile üretilmiş parçalar gösterilmiştir. Dişliler, bağlantı elemanları, valf yatakları otomotiv sektöründe toz metalurjisi ile üretilen parçaların başında gelmektedir [2].



Şekil 2.1. Toz Metalurjisi ile üretilmiş parçalardan bir kesit [3].

Toz metalurjisi imalat yöntemi, net şekilde parçaların ekonomik olarak üretimine imkan sağladığı için birçok sektörde tercih edilmektedir. Şekil 2.2’de toz metalurjisiyle üretilmiş parça kullanımının sektörlere göre dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılımda en yüksek pay sahibi %70’lik dilim ile otomotiv sektörüdür. Otomobillerde kullanılan parçaların yaklaşık 19,5 kg’ı toz metalurjisi ile üretilmektedir [2]. Daha sonra en yüksek pay sahibi %11 ile el aletleri ve hobi sektörü iken bir sonraki en yüksek pay sahibi ise %4 ile ev aletleridir. Toz metalurjisi, belirtilen sektörlerin yanısıra; elmas kesici takımlar, sert metaller, mıknatıslı malzemeler gibi birçok alanda üretim imkanı sunmaktadır [4].



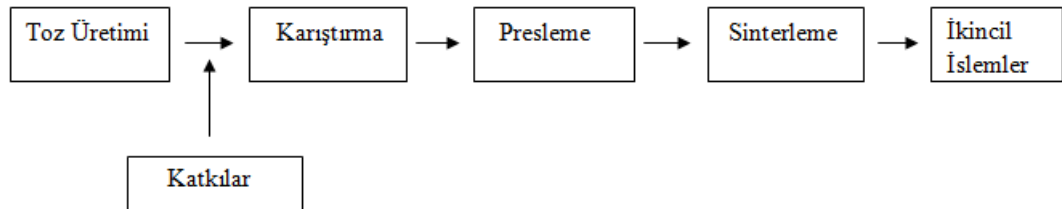


Şekil 2.2 Toz metalurjisiyle üretilen parçaların sektörlere göre dağılımı [5].

Toz metalurjisiyle üretilmiş parçaların dünya çapındaki satışı yılda 75 milyar dolarlık bir büyüklüğe ulaşmıştır [6]. 2001 yılında Türkiye’deki pazar payı 150 milyon dolar olan toz metalurjisinin bugünkü pazarının yaklaşık 250 milyon dolar olduğu düşünülmektedir [4]. Dünyadaki ve Türkiye’deki pazar payı dikkate alındığında, toz metalurjisi imalat sanayisindeki pazar payı sürekli büyüyen bir imalat yöntemidir.

### 2.1.1. Toz Metalurjisi Yönteminin İşlem Basamakları

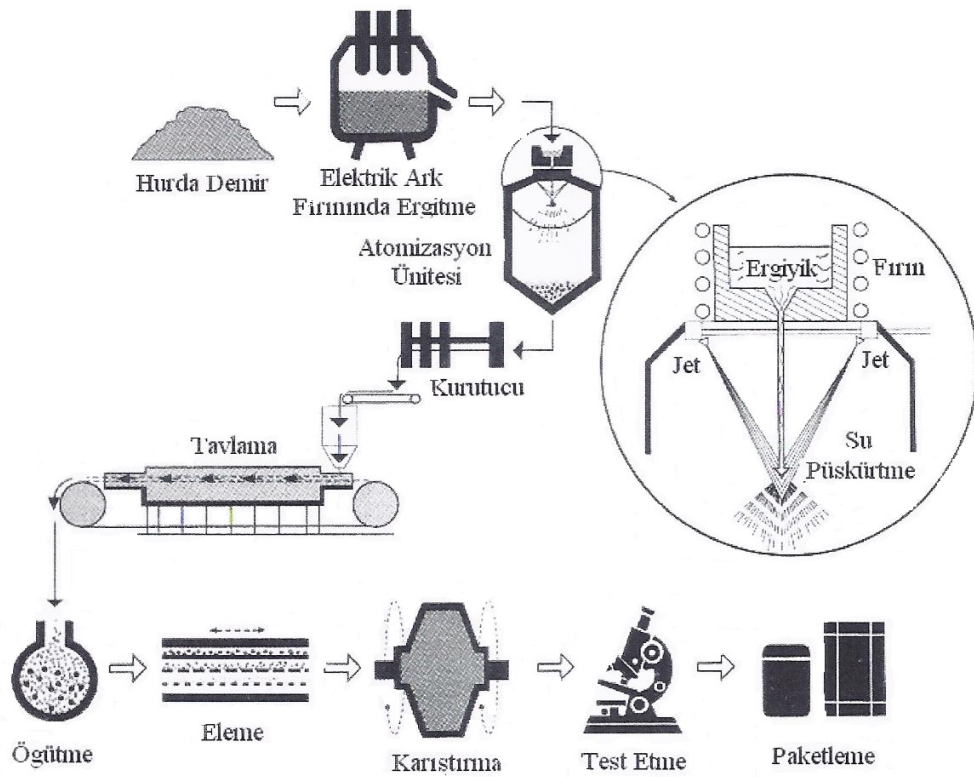
Toz metalurjisi imalat yönteminin toz üretiminden nihai parça imalatına kadar çeşitli basamakları bulunmaktadır. Toz metalurjisinin ilk aşaması toz üretimidir (Şekil 2.3). Üretilen tozlar katkı maddeleriyle karıştırıldıktan sonra belirli basınç altında preslenip sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Sinterlemeden sonra üretilen parçanın kullanım yerine göre ikincil işlemler uygulanır ve nihai ürün elde edilir.



Şekil 2.3. Toz metalurjisi akım şeması.

### 2.1.2. Toz Üretimi-Su Atomizasyon Yöntemi

Metal tozlarının üretilmesinde temel olarak mekanik üretim, atomizasyon, kimyasal üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Metal tozlarının ve alaşımlarının düşük maliyetli imalatında genellikle su atomizasyon yöntemi tercih edilir. Su atomizasyon yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir. Akışkan halde bir nozuldan geçen sıvı metal ergiyiğe su püskürtülerek düşük maliyetli metal tozları elde edilmiştir.

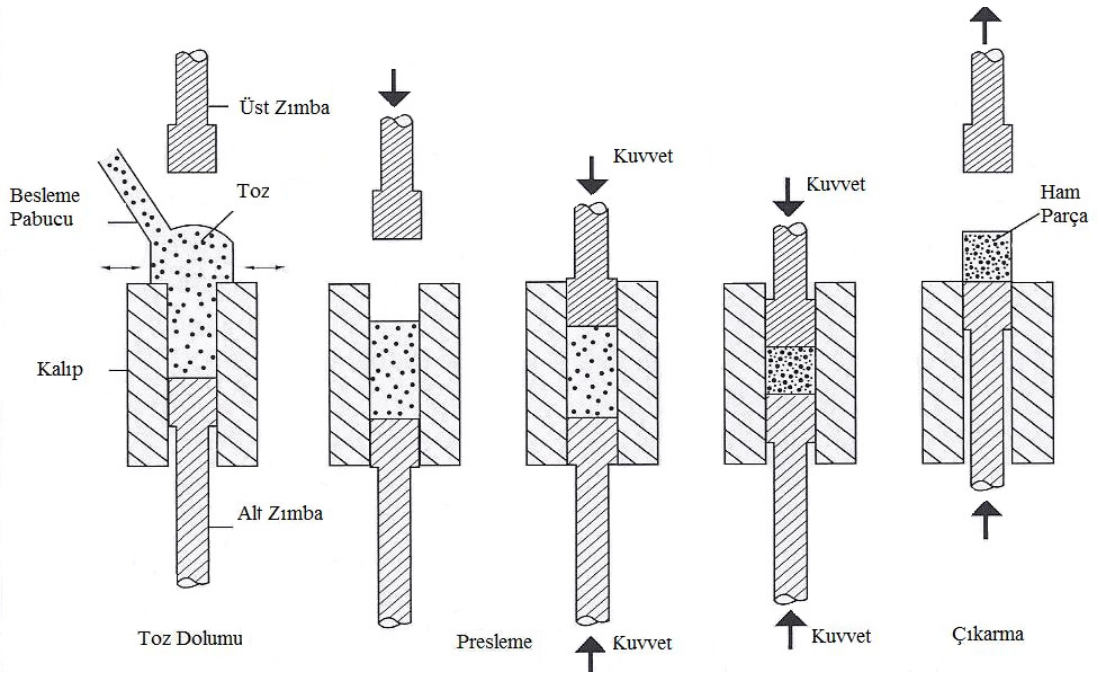


Şekil 2.4. Su atomizasyonun şematik gösterimi [6].

Metal tozları, yağlayıcı ve bağlayıcıyla karıştırıldıktan sonra preslenme işlemi ile kalıpta belirli bir basınç altında sıkıştırılmaktadır. Yağlayıcılar kalıp duvarlarındaki aşınmayı önlemek için, bağlayıcılar ise presleme işleminden sonra parçaya ham dayanım sağlamak için kullanılır.

### 2.1.3. Tozların Preslenmesi

Presleme işleminde toz bir pabuç vasıtasıyla kalıba boşaltılır. Tek veya çift yönlü kuvvet uygulamak suretiyle sıkıştırılan tozlar kalıptan çıkarılır. Presleme işlemi şematik olarak Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Presleme işlemi; soğuk veya sıcak sıkıştırma olarak iki türlü yapılmaktadır. Soğuk sıkıştırma işlemi sonrasında sinterleme işlemi yapılırken sıcak sıkıştırma sonrası sinterleme işlemine gerek olmayabilir [6].

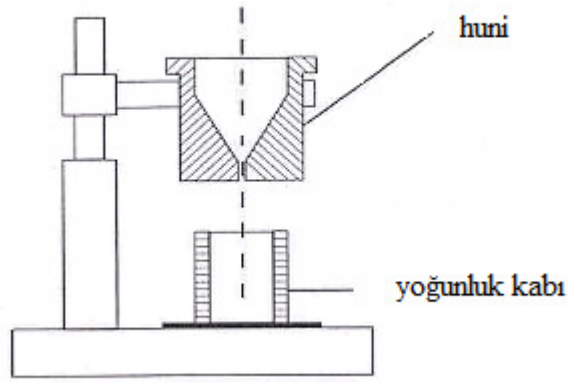


Şekil 2.5. Presleme işleminin şematik gösterimi [6].

Presleme sırasında; toz, besleme pabucu kullanılarak kalıba boşaltılır. Alt ve üst zimbalar kullanılarak belirli basınçta preslenen ham parça alt zimba ile kalıptan çıkarılır ve bu işlem aynı döngüde devam eder. Presleme basıncı 100 MPa'dan 1000 MPa'a kadar değişmektedir [6]. Malzemelerin sertlikleri presleme sırasında uygulanan basıncı etkilemektedir. Çok sert ve çok yumuşak tozlarda düşük basınçlar kullanılmaktadır.

Parçacıklar arasındaki sürtünme, tozun akışkanlığını ve presleme işlemini olumsuz etkilediğinden dikkat edilmesi gereken bir unsurdur [6]. Yüzey alanı, yüzey bileşimi ve yüzey pürüzlülüğü parçacıklar arasındaki sürtünme kuvvetini etkilemektedir.

Tozun akış hızının hesaplanması, parçacıklar arasındaki sürtünme kuvvetinin belirlenmesi için kullanılan bir yöntemdir. Hall akış ölçerler kullanılarak parçacıklar arasındaki sürtünme hakkında bilgi edinilir. Şekil 2.6'da Hall akış ölçerinin kesit alanı şematik olarak gösterilmiştir. Akış hızı, 50 gr tozun Hall akış ölçerden aktığı saniye cinsinden süredir.

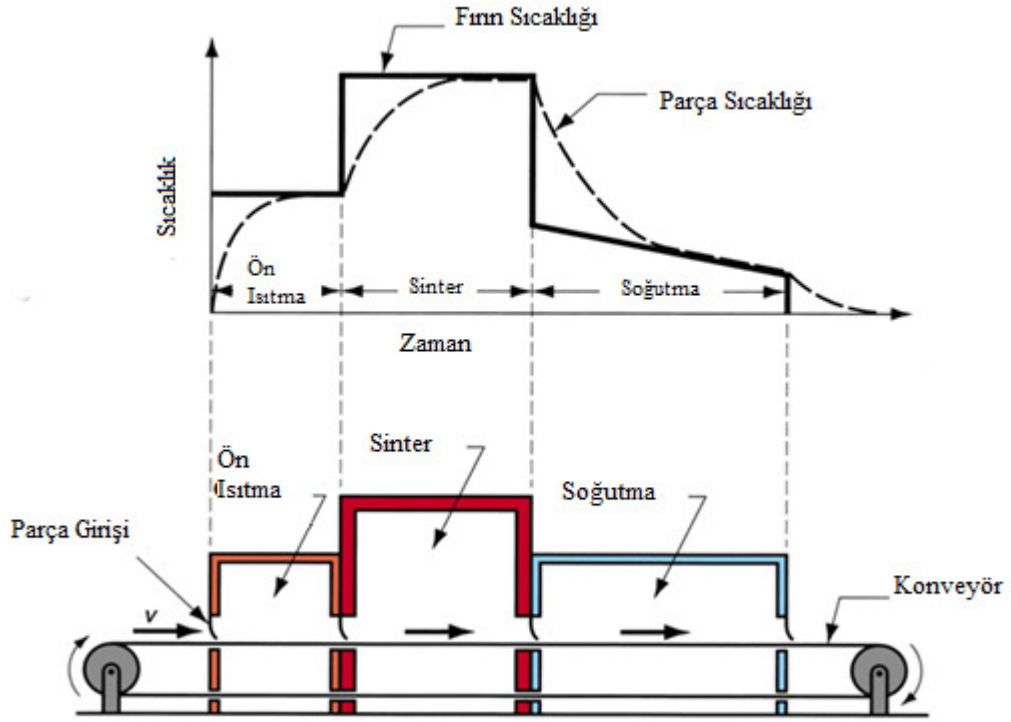


Şekil 2.6. Hall akış ölçerinin şematik gösterimi [6].

Hall akış ölçer, 2,5 mm çapı olan 60° açılı bir hunidir. Kısa akış süreleri tozlar arasında sürtünme kuvvetinin az olduğunu, akış süresinin uzunluğu ise sürtünme kuvvetinin fazla olduğunu göstermektedir [6].

#### 2.1.4. Sinterleme

Presleme işleminden sonra parçaların dayanımını arttırmak için sinterleme işlemi yapılmaktadır. Sinterleme işlemi; üretilecek parçaya ve istenen mekanik özelliklere göre vakum fırınları, kutu fırınları ve sürekli fırınlarda yapılmaktadır [6]. Kutu fırınları ve sürekli fırınlarda sinterleme atmosferi kullanılırken vakum fırınlarında sinterleme işlemi vakum altında gerçekleştirilmektedir. Aşağıdaki Şekil 2.7'de sürekli bir fırının ve ısıtma rejiminin şematik gösterimi verilmektedir. Sinterleme çevrimi demir esaslı alaşımlarda genel olarak; yaklaşık 600°C'de yağlayıcı ve bağlayıcı gibi katkıların giderilmesi, devamında 1120°C'de sinterleme ve sonrasında soğutma işlemlerini içermektedir.



Şekil 2.7. Sürekli fırının ve ısıtma rejiminin şematik gösterimi.

Sinterleme işleminden sonra parçalarda gerekli özelliklerin sağlanması için genellikle ikincil işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemler genel olarak; boyutsal toleransların sağlanması için yapılan yeniden boyutlandırma, şekil vermek için yapılan talaşlı imalat ve taşlama, yüzey baskıları oluşturmak için damgalamadır.

Sinterleme işlemi sırasında fırınlarda koruyucu atmosferin kullanılması sinterlenen parçalarda mekanik özelliklerin düşmesine neden olacak kimyasal tepkimelerin kontrolü açısından son derece önemlidir [6]. Koruyucu atmosfer; alaşımlarda kullanılan yağlayıcı ve bağlayıcıların sistemden uzaklaşmasına, parçalara ısı iletimini artırarak sinterleme işleminin daha etkili olmasına yardımcı olmaktadır ve zararlı kimyasal tepkimeleri kontrol edilmesinde önemli bir rolü bulunmaktadır.

Koruyucu atmosfer kullanımı sinterlenecek parçanın özelliğine göre değişmektedir [6]. Seramik ve alüminyum parçalarda koruyucu atmosfer olarak hava kullanılırken, metal esaslı alaşımların ortamdaki nemden ve oksijenden etkilenip oksit oluşmasını engellemek için indirgeyici koruyucu atmosfer kullanılmalıdır. Sinterleme sırasında

farklı amaçla kullanılan sinterleme atmosferleri bulunmaktadır [6]. Bu atmosferlerden en yaygın kullanılanları; oksitleyici (karbon dioksit su veya hidrojen), nötr (argon, helyum, vakum), indirgeyici (hidrojen veya karbon monoksit), hidrit giderici (vakum veya argon), karbürleyici (metan veya propan) şeklindedir.

Endüstriyel üretim esnasında genellikle endotermik atmosferler kullanılmaktadır [6]. Bu tür bir atmosferin üretim maliyetinin düşük olması endüstride kullanılmasına olanak sağlamıştır. Endotermik atmosfer, havanın doğal gaz ile yakılması sonucu genellikle metan üretilmesiyle elde edilir.

Hidrojen; metal alaşımları, paslanmaz çelikler, alümina, tungsten alaşımları gibi birçok malzemenin sinterlenmesinde kullanılan yanıcı ve patlatıcı bir gazdır [6]. Hidrojenin ısı iletkenliği yüksek olduğu için parçaların ısınmasına ve soğumasına yardımcı olur. Hidrojen genellikle azot ile karıştırılır ve bu karışım indirgeyici bir ortam oluşturan maliyeti düşük koruyucu sinterleme atmosferidir.

Vakum atmosferi, çok düşük basınçlarda ( $\sim 10^{-4}$ - $10^{-6}$  normal atmosfer basıncı kadar) uygulanan yüksek performanslı parça imalatında kullanılan koruyucu atmosferdir [6].

#### **2.1.5. Demir Esaslı Toz Alaşımlarının Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları**

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen parçalarda esas olarak, düşük gözeneklilik ve yüksek mekanik özellikler elde etmek esas amaçtır. Demir esaslı toz metal parçalarda mekanik özellikleri belirleyen en önemli faktör gözeneklilik ve yoğunluktur [7]. Gözeneklilik, toz metal parçaların sertliğini, dayanımını ve sünekliğini düşürmektedir. Gözenek miktarı kadar gözenek boyutu ve şekli de mekanik özelliklerin belirlenmesi açısından önemlidir. Köşeli ve düzensiz gözenekler, yuvarlak ve köşesiz gözeneklere kıyasla mekanik özellikleri daha olumsuz etkilemektedir. Gözenek miktarı ve geometrisi yorulma dayanımını da etkilemektedir [7]. Parça yoğunluğundaki azalma yorulma dayanımını da düşürmektedir. Gözeneklilik ayrıca, toz metal parçalarda korozyona neden olan maddelerin gözeneklere dolmasına ve daha fazla etki alanı oluşturarak korozyon direncinin düşmesine neden olmaktadır. Demir esaslı toz parçalarda yoğunluk yaklaşık  $7 \text{ g/cm}^3$ 'tür [7]. Bu değer,

üretim esnasında uygulanan yöntemlere göre değişiklik göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan sinterleme işlemleri gözenek şeklindeki değişimi ve mikroyapıda homojenliği sağladığı için parçaların dinamik özelliklerini artırmaktadır [7].

Demir esaslı toz metal parçaların üretimi sırasında mikroyapıda gözlemlenen fazlar ferrit, pörlit, beynit, martensit ve kalıntı östenittir. Ayrıca tozda kullanılan alaşım elementine göre mikroyapıda karbürler ve oksitler gözlemlenebilmektedir. Oluşan bu fazları; alaşım elementi miktarı, soğutma koşulları, fırında kullanılan koruyucu atmosfer çeşidi belirlemektedir.

Demir esaslı toz alaşımlarında presleme basıncı genellikle 480-820 MPa aralığında değişmektedir [6]. Presleme sonucunda ham yoğunluk değerleri %85-92 teorik yoğunluğa ulaşmaktadır. Presleme sonrası sinterleme işlemi sıcaklığı 1120-1250°C aralığında değişmektedir. Sinterleme atmosferi olarak metan, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> altlık olarak ise genellikle alümina ve yüksek sıcaklığa dayanıklı çelikler kullanılmaktadır.

Toz metalurjisi, son zamanlarda önemli ölçüde büyüme gösteren bir imalat yöntemidir. Her yıl yaklaşık olarak %8-10 arası büyüme gösteren toz metalurjisinin endüstride kullanım alanları giderek artmaktadır [7]. Demir esaslı tozlar, toz metalurjisi ile üretilmiş tozların yaklaşık %80'lik bir bölümünü oluşturmaktadır [7]. Toz metalurjisindeki büyüme eğiliminin demir esaslı tozlardaki büyüme eğilimi (~% 5) ile karşılaştırıldığında toz metalurjisi endüstrisindeki esas karın ileri teknoloji ile üretilmiş toz metal malzemelerden elde edildiği görülmektedir. Otomotiv sektörü, demir esaslı tozların kullanıldığı en büyük pazar olarak göze çarpmaktadır.

#### **2.1.6. Demir Esaslı Toz Metal Parçaların Kullanım Alanları**

Havacılık, demir esaslı toz parçaların kullanıldığı sektörlerden biridir [7]. Ancak üretilen parçaların gözenekli ve yorulma direncinin düşük oluşu ve yüksek sıcaklık uygulamalarına çok uygun olmamasından dolayı kullanımı kısıtlanmıştır. Bu nedenle genellikle sıcak izostatik presleme ile üretilmiş, Ni, Co, Ti alaşımlarının kullanıldığı yüksek alaşımli çelik parçalar tercih edilmektedir.

Ev eşyalarında kullanılan kasnaklar, yataklar, bağlantı kolları, dişliler genellikle demir esaslı düşük alaşımlı toz parçalardır [7]. Bulaşık ve çamaşır makinelerinde kullanılan dişliler, yüksek üretim hacmi ve yakın toleranslardan dolayı toz metalurjisi yöntemi tercih edilerek üretilmektedir. Yük transferi için kullanılan bağlantı elemanları, Fe-Cu-C toz alaşımı kullanılarak imal edilmektedir.

Demir esaslı toz alaşımları; otomotiv sektöründe motosikletlerin, arazi araçlarının, kamyonların ve birçok endüstriyel araç parçalarının üretiminde kullanılmaktadır [7]. Emniyet kemeri kiliti, fren sistemleri, sönümleyiciler, kapı kolları, debriyaj sistemleri, eksantrik miller, yağ pompaları, motor yatakları, bağlantı elemanları, uyarı işareti parçaları demir esaslı toz alaşımların kullanıldığı otomotiv parçalarıdır.

İş yerlerinde kullanılan makinelerde ve bilgisayarlarda demir esaslı toz parçalar kullanım alanına sahiptir [7]. Fotokopi makinelerinin parçaları, elektrik uygulamaları iş yerlerinde demir esaslı, toz metalurjisi ile üretilen parçalara ihtiyacı arttırmaktadır. Bu alanda kullanılan parçaların karmaşık oluşu enjeksiyon kalıplama yönteminin kullanılması ile aşılabilmektedir. Elektrikli daktilolarda kullanılan parçalar demir ve nikel alaşımından enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmektedir. Ayrıca bazı dişliler, kollar, yazıcı parçaları da enjeksiyon kalıplama yöntemi ile demir esaslı alaşımlardan elde edilmektedir. Bilgisayarlarda kullanılan disk sürücüsü mıknatısları özellikle demir esaslı alaşımlardan üretilmektedir [7].

Gözlük menteşeleri, gözlük çerçeveleri, saat şeritleri, elektrikli diş fırçası dişlileri, elektrikli bıçaklar, mutfak eşyaları, ortodonti tedavisinde kullanılan malzemeler ve benzeri birçok tüketici eşyaları özellikle demir esaslı toz parçalardır.



## 2.2. ISIL İŞLEM

Isıl işlem, bir metal veya alaşımında istenilen mekanik özellikleri elde etmek için yapılan ısıtma ve soğutma işlemlerinin bütünüdür [8]. Sertlik artışı sağlayan veya sertlik artışı sağlamayan olmak üzere iki farklı ısıl işlem bulunmaktadır. Gerilme giderici işlemler, tavlama ve normalleme ısıl işlemleri sertlik artışı sağlamazken, ısıtma ve sonrasında yapılan hızlı soğutma işlemleri sertlik ve dayanım artışı sağlayan ısıl işlemlerdir.

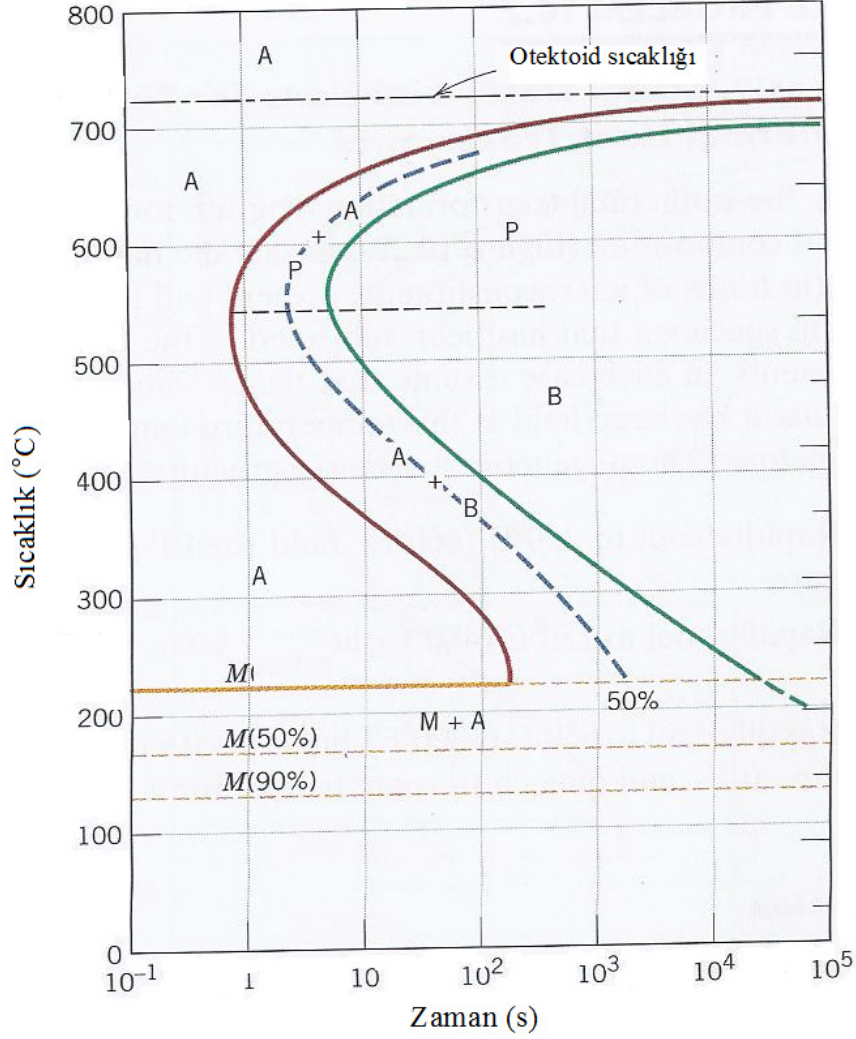
Gerilme giderici işlemlerde, malzemelerin imalatı sırasında oluşan gerilmeler giderilmektedir. Bu işlem; malzemenin kontrollü bir şekilde ısıtılmasını ve kontrollü bir şekilde soğutulmasını içermektedir.

Tavlama işlemi; malzemenin belirli bir sıcaklığa çıkarıldıktan sonra fırında soğutulması şeklinde uygulanan bir ısıl işlemdir. Tavlama esnasında amaç, sertliğin azaltılması ile malzemeyi çeşitli imalat işlemlerine hazırlamaktır. Tavlama işlemi, kritik sıcaklığın üzerinde, kritik sıcaklık bölgesinde ve kritik sıcaklık altında yapılabilmektedir.

Normalleme işleminde çelik; kritik sıcaklığın üzerine çıkarılarak östenitlenir daha sonra havada soğuma işlemi gerçekleştirilerek tavlama esnasında elde edilen yapıya göre daha ince yapıya ferrit ve pörlit karışımı fazlar elde edilir [8]. Normalleme işlemi; bileşimin türdeş olmasını, ince tane yapısı elde etmeyi ve kalıntı gerilmelerin giderilmesini sağlar.

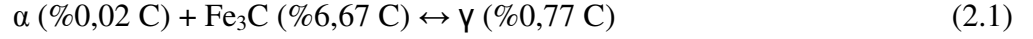
Çeliklerin sertliğini ve dayanımını artırmak için östenitleme sıcaklığına kadar ısıtma ve bu sıcaklıktan hızlı bir şekilde soğutma işlemleri yapılmaktadır [8]. Soğutma işleminin hızına ve alaşım elementlerine göre çelikte çeşitli fazlar meydana gelmektedir. Oluşan bu fazlar, çeliğin sertliğinde ve dayanımda etkin olmaktadır. Çelikte kullanılan en önemli alaşım elementi C iken diğer kullanılan alaşım elementleri Si, Cr, Mo, Ti, Nb, Mn, Ni'dir [8]. Çeliğin ısıl işleminde soğutma hızının yanı sıra soğutma süresinin de önemi bulunmaktadır [8]. Çeliğin belirli bir sıcaklıktan belirli bir soğutma hızı ve süresi ile oluşan fazlar zaman sıcaklık dönüşüm diyagramlarında (TTT) gösterilmektedir. Bu nedenle çeliklerin ısıl

işleminde bu diyagramların önemi çok büyüktür. Şekil 2.8’de ötektoid Fe-C alaşımının zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagramdan görüldüğü üzere soğutma hızı ve süresine bağlı olarak yapıda östenit, pörlit, beynit, martensit fazları oluşabilmektedir.



Şekil 2.8. Ötektoid demir-karbon alaşımının zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı [9].  
A:östenit, P:pörlit, B:beynit, M:martensit.

Östenit fazı, kritik sıcaklıkların üzerinde oluşan diğer bütün fazların (ferrit, beynit, martensit) oluşumunu sağlayan ana fazdır [8]. Kritik sıcaklıkta ( $727^{\circ}\text{C}$ ), %0,77C içeren alaşımda gerçekleşen tepkimeye ötektoid tepkime denilmektedir. Tepkime denklemi aşağıda gösterilmiştir.



Demir-bakır alaşımlarında gerçekleşen bu tepkimede;  $\alpha$  ferrit fazını,  $\text{Fe}_3\text{C}$  sementiti,  $\gamma$  ise östenit fazını göstermektedir [8]. Ötektoid tepkime tersinirdir ve östenitin soğutulması sonucu pörlit (katmanlı ferrit+sementit), pörlitin ısıtılması sonucu östenit oluşmaktadır. Bu dönüşümde, C atomlarının yayınımları esas mekanizma olduğu için kontrollü ve yavaş soğutma koşulları gereklidir.

Östenit fazından hızlı soğutma koşulları sonucunda, sertliği pörlit fazına göre daha yüksek olan beynit ve martensit fazları elde edilmektedir [8]. Beynit, pörlit ve martensit oluşum sıcaklıkları arasında ( $550-250^\circ\text{C}$ ) oluşan bir fazdır. Beynit, ferrit ve sementitten oluşan katmanlı olmayan bir yapıya sahiptir. Alt ve üst beynit olmak üzere iki çeşit beynit vardır [8].  $550-400^\circ\text{C}$  arasındaki sıcaklıklarda oluşan beynit üst beynit iken,  $400-250^\circ\text{C}$  sıcaklıkları arasında alt beynit oluşmaktadır.

Östenit fazından hızlı soğutma yapıldığında martensit fazı elde edilmektedir. Martensit oluşumu, çok hızlı gerçekleştiği için yayınımsız bir dönüşümdür [8]. Östenitten dönüşen fazlar içerisinde, martensit en sert ve en kırılğan fazdır [9]. Çeliklerde martensit oluşturmak için genellikle östenit sıcaklığından su verme işlemleri kullanılmaktadır. Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramları, bir burun oluşturarak kıvrım yapmaktadır. Martensit oluşumu için, soğutma işleminin burunu kesmeyecek şekilde çok kısa bir sürede ( $\sim 1$  saniye) gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Su verilmiş martensitli çelikler; yüksek sertliğin neden olduğu aşırı gevreklik özelliklerinden ve yapılarındaki kalıntı gerilmelerden dolayı çoğu uygulamada kullanılmaz [9]. Bu nedenle, çeliklerin sertliğini düşürmek, tokluğunu ve sünekliğini artırmak için menevişleme işlemi yapılmaktadır. Menevişleme işlemi, ötektoid sıcaklığının altında yaklaşık  $250-650^\circ\text{C}$  arasında gerçekleştirilmektedir.

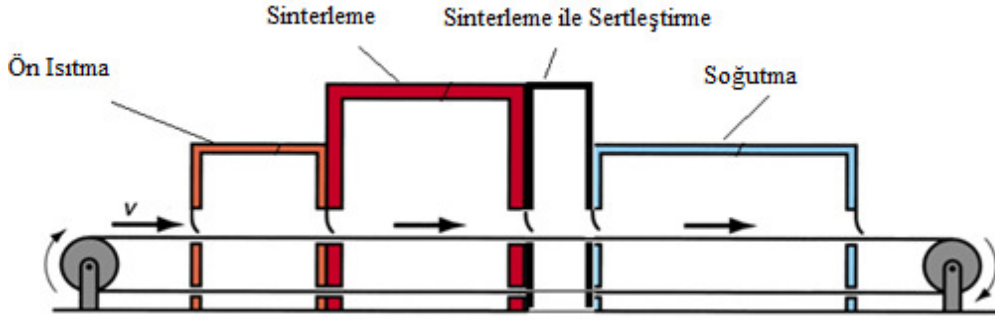
### **2.3. SİNERLEME İLE SERTLEŞTİRME**

Toz metalurjisinin son yıllarda artan önemi bu üretim yönteminde daha ekonomik ve zaman açısından avantajlı yolların geliştirilmesini sağlamaktadır. Sinterleme işlemi ve sonrasında yapılan ikincil ısıl işlemleri bir arada barındıran sinterleme ile sertleştirme işlemi geliştirilen yeniliklerdendir. Sinterleme ile sertleştirme işleminde, fırında sinterlenen parçalar soğutma bölgesinde gaz ile hızlı soğumaya maruz bırakılarak yapıda beynitik ve/veya martensitik fazların oluşumu beklenmektedir [10]. Bu şekilde parçalarda istenilen mekanik özellikler elde edilmektedir.

#### **2.3.1. Sinterleme ile Sertleştirme Fırınları**

Sinterleme ile sertleştirme işlemi endüstriyel ölçekli bantlı fırınlarda yapılmaktadır. Bu fırınlar; parçaların hareketini sağlayan bant, bağlayıcı giderme, sinterleme, gaz ile soğutma, normal soğutma işlemlerinin gerçekleştiği bölümlerden oluşmaktadır. Parçaların fırın içerisinde ilerlemesi bantlar aracılığıyla sağlanmaktadır [11]. Fırınlarda yüksek sıcaklıkta çalışıldığı için bant malzemesi de bu sıcaklığa dayanıklı seramik, grafit veya refrakter malzemeden üretilir [6]. Bantların sağlıklı bir şekilde çalışması için yüklemenin 30-40 kg/m<sup>2</sup> olması öngörülmektedir [11].

Fırın içerisindeki ısıtma elektrikli ısıtıcı elemanlar ile sağlanmaktadır. Sinterleme işleminde parçalar ilk olarak 500-600°C sıcaklıkta bağlayıcı giderme işlemine maruz bırakılmaktadır. Daha sonra fırın sıcaklığı kademeli olarak sinterleme sıcaklığına çıkarılarak sinterleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Sinterleme işleminin yapıldığı bölüm bağlayıcı giderme işleminin yapıldığı bölüme göre daha uzundur [11]. Sinterleme ile sertleştirilme işlemi, sinterleme işleminden hemen sonra aynı fırın içerisinde sıkıştırılmış hava ile gerçekleştirilmektedir. Sinterleme ile sertleştirme işlemini gerçekleştiren fırının şematik olarak gösterimi Şekil 2.9'da verilmiştir. Sıkıştırılmış hava, ortama bir pompa ile gönderilmektedir. Sıkıştırılmış hava ile soğutma işleminden sonra parçalar normal soğutma bölgesine ilerlemektedir. Bu bölgeye gelmeden sıcaklık 200°C'ye kadar düşürüldüğünden parçalar hava ile reaksiyona girmemektedir.



Şekil 2.9. Sinterleme ile sertleştirme fırınının şematik gösterimi.

Fırında redükleyici atmosfer olarak endogaz kullanılmaktadır. Bu şekilde parçaların hava ile teması kesilerek mekanik özelliklerin olumsuz etkilenmesi önlenmiş olmaktadır. Sinterleme ve sinterleme ile sertleştirme işleminde ısıtmanın ve ani soğutmanın, parçaların her bölgesinde eşit şekilde olmasına dikkat edilmelidir.

### 2.3.2. Sinterleme ile Sertleştirmenin Avantajları

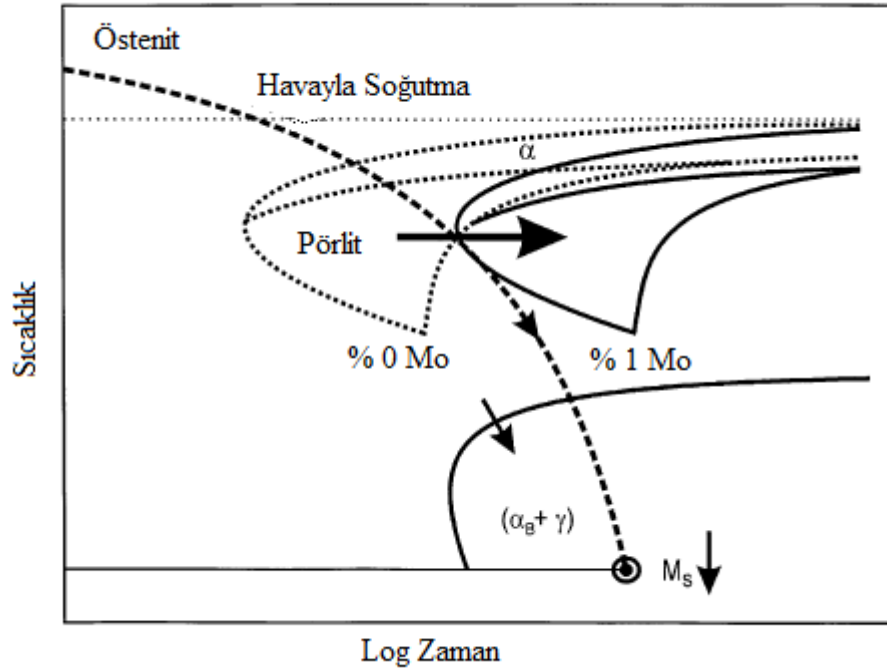
Sinterleme ile sertleştirme işlemi son zamanlarda önemi artan, düşük maliyetli ve yüksek performanslı parça imalatında kullanılan bir imalat tekniğidir [10]. Sinterleme ile sertleştirme işleminin geleneksel sinterleme ve sonrasında yapılan ikincil ısıtma işlemine kıyasla çeşitli avantajları bulunmaktadır [12]. Bunlardan ilki, sinterleme ile sertleştirme işlemi uygulanan parçalarda ikincil bir ısıtma işlemi gerek kalmaması nedeni ile üretim maliyetlerinin düşmesidir. İşlemin diğer bir avantajı, sinterleme ile sertleştirilen parçalarda su verme işlemi ile sertleştirilen parçalara kıyasla daha az boyutsal değişimin gözlenmesi ve imalat işleminin kolaylaşmasıdır. Geleneksel sinterleme ve ikincil ısıtma işlemde parçalar yağ banyosunda soğutulmaktadır [12]. Sinterlenmiş parçaların gözenekli olması, soğutma işlemi sırasında yağın gözeneklere sızmasına neden olmaktadır. Yağın gözeneklerde birikmesi ve sonrasında belirli bir sıcaklıkta uzaklaştırılmaması mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Sinterleme ile sertleştirme işleminde soğutma işleminin sinterleme fırını içinde yapılması bu tür sorunların oluşumunu engellemekte ve düşük maliyetli yüksek performanslı parça üretimini sağlamaktadır.

Sinterleme ile sertleştirme işlemini; alaşım elementleri, soğutma hızı, östenit tane büyüklüğü, yapının homojenliği ve gözeneklilik gibi unsurlar etkilemektedir [1].

## 2.4. SİNERLEME İLE SERTLEŞTİRMEYİ ETKİLEYEN UNSURLAR

### 2.4.1. Alaşım Elementleri

Alaşım elementleri demir esaslı parçaların sertleşebilirliğini artırmaktadır [13]. Sertleşebilirlik, çeliğin soğutma koşulları altında belirlenen bir derinliğe kadar martensit oluşturma kapasitesi olarak tanımlanmaktadır [8]. Sinterleme ile sertleştirme işleminde sertleşebilirliği arttıran alaşım elementleri; Mn, Cr, Mo, Ni, C, Cu'dur. Alaşım elementlerinin etkisi, CCT diyagramında şematik olarak Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Alaşım elementleri, sürekli soğuma dönüşüm diyagramlarında (CCT) martensitli dönüşüm için gerekli soğutma süresini arttırarak, daha uzun bir sürede martensit oluşumu sağlamaktadır [14].



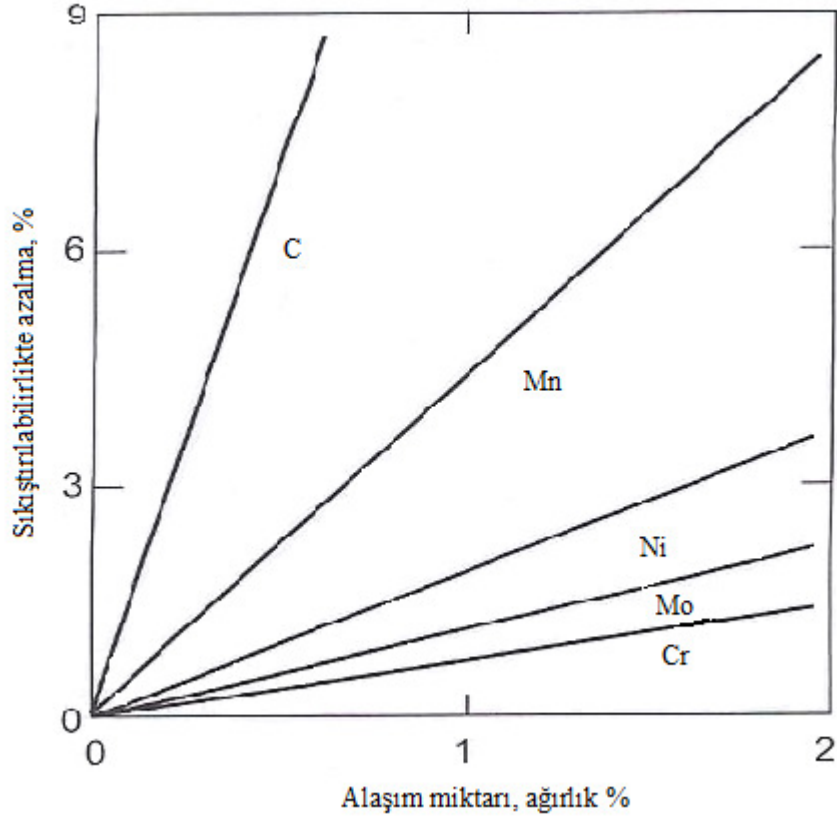
Şekil 2.10. Alaşım elementlerinin (örneğin Mo) hiperötektoid gri demirin sürekli soğuma dönüşüm diyagramlarındaki (CCT) etkisi [15].

Alaşım elementlerinin sertleşebilirliği arttırması için karbür veya nitür oluşturmada östenit fazı içerisinde çözülmüş olarak bulunması gerekmektedir [10]. Sinterleme

atmosferinde karbon miktarının fazla olması düşük sıcaklıklarda karbür oluşumuna neden olurken, sinterleme sırasında koruyucu atmosfer olarak azotun fazla miktarda kullanılması nitrür oluşumuna neden olmaktadır [10,16]. Sinterleme fırınlarında koruyucu atmosfere CO verilmesi veya metan, propan gibi hidrokarbonların ayrışarak CO oluşturması sinterleme atmosferinde karbon oluşmasına neden olabilmektedir [16]. Karbür ve nitrür oluşumu alaşım elementlerinin östenit içerisinde çözünmüş olarak bulunmasını engelleyeceğinden sertleşebilirliği düşürecektir. Buna bağlı olarak, sinterleme ile sertleştirme işleminden sonra istenilen mekanik özellikler elde edilemeyecektir.

Alaşım elementlerinin sertleşebilirliği artırma oranları büyükten küçüğe doğru Mn, Cr, Mo, Cu, Ni olarak belirtilmektedir [1]. Alaşımlama işlemi sertleşebilirliği artırmakta, bunun yanı sıra sıkıştırılabilirliği de belirli bir miktarda azaltmaktadır. Alaşım elementlerinin sıkıştırılabilirliğe etkisi büyükten küçüğe C, Mn, Ni, Mo, Cr'dur [17]. Şekil 2.11'de alaşım elementlerinin sıkıştırılabilirliği etkisi gösterilmiştir. Alaşım elementlerinin sıkıştırılabilirliği azaltmaması için toza, karıştırma yöntemiyle alaşımlama işlemi uygulanmaktadır. Ön alaşımlama işlemi sıkıştırılabilirliği azaltmaktadır.

Sıkıştırılabilirliğin azalması sıkıştırma işlemi sırasında elde edilecek ham yoğunluk değerlerinin düşmesine neden olmaktadır. Düşük ham yoğunluk değerleri, sinterleme işlemi sonrasında parçalardaki çekme miktarının artmasına neden olarak istenilen boyutsal toleransların elde edilmesine engel olacaktır. Bu nedenle son zamanlarda, az miktarda alaşım elementi kullanmak için soğutma yapılacak parçalar ile soğutucu akışkan arasındaki ısı iletiminin artırılması amaçlanmıştır [18]. Daha hızlı soğutma, parçada istenilen özelliklerin oluşması için gerekli koşullardan biridir. Yüksek hızda soğutma işlemi, endüstriyel fırınlarda bandın daha hızlı çalışmasını ve üretimin artmasını sağlar.



Şekil 2.11. Alaşım elementlerinin sıkıştırılabilirliğe etkisi [6].

En yaygın kullanılan alaşım elementleri Mo, Cr, Mn ve Ni' dir. Molibden ve Ni'in fiyatlarının yüksek olması nedeniyle bu alaşım elementlerinin yerine nispeten ucuz olan Cr ve Mn daha sıklıkla kullanılmaktadır [19]. Krom ve Mn'ın oksijenle tepkimeye girme isteklerinin yüksek olması, sinterleme veya sinterleme ile sertleştirme işleminde bu elementlerin oksitlerinin oluşmasına neden olmaktadır [19]. Bu nedenle Mn ve Cr miktarları genellikle ağırlıkça %0.35'in altında tutulmaktadır [12]. Molibden elementinin oluşturduğu oksitler; ergitme, atomizasyon, tavlama veya sinterleme aşamasında kolaylıkla giderildiği için problem oluşturmamaktadır [20].

Giguere ve Blais'in yaptığı bir çalışmada; Cr, sıkıştırılabilirliği en fazla etkileyen element olduğu belirtilmiştir [2]. Bunun nedeni olarak, Cr un atomizasyon sırasında oluşturduğu oksitlerinin sıkıştırılabilirliği azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada, Cr tozunun üretim aşamasına bağlı olarak küresel geometri yerine uzun geometride olmasının da görünen yoğunluğu, ham dayanımı, tozun akış hızını buna bağlı olarak



da sıkıştırılabilirliği etkilediği gösterilmiştir. Aynı çalışmada ön alaşımlanmış Cr ve Mn elementlerinin krom oksit ve mangan oksit oluşturduğu gösterilmiştir. Buna bağlı olarak östenit içerisinde çözülmüş olarak bulunan Cr ve Mn miktarları azalacağından sertleşebilirlikte önemli bir artış olmayacağı belirtilmiştir. Ayrıca Ni elementinin sertleşebilirliği artırma açısından önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür Giguere ve Blais'e göre; karıştırma yöntemiyle alaşımlanan Ni yeterli bir şekilde yayınmamış ve nikelce zengin bölgeler oluşturmuştur.

Molibden ve kromun alaşımlama elementleri olarak kullanılması, ötektoid dönüşümün daha yüksek sıcaklıkta ve daha düşük C miktarında gerçekleşmesine neden olmaktadır [21]. Bain'in yaptığı çalışmaya göre ağırlıkça %3Cr'un eklenmesi ötektoid dönüşümü 775 °C'ye çıkarırken, ötektoid dönüşüm için C miktarını ağırlıkça %0,76'dan %0,55'e düşürmektedir [21]. Alaşım elementi olarak Mo ile birlikte ağırlıkça %0,75'in üzerinde Ni'in kullanılması, sertleşebilirliğe bu elementlerin tek başına kullanılmasından daha fazla etki etmektedir [22].

Yüksek miktarda Mo genellikle dişli uygulamalarında kullanılmaktadır [20]. Bu uygulamalarda dişliler; karbürleme işlemine maruz bırakılarak karbürize edilmiş dış bölge ile düşük C'lu martensit çekirdekten oluşmaktadır. Bu şekilde dişlilerin dayanımı ve tokluğu istenilen oranda artırılmaktadır. Dış bölge ve çekirdek arasındaki C farkı yüksek basma gerilmeleri oluşturarak yorulma direncini artırmaktadır.

Karbon; üretilen parçalarda sertliği arttırmak için kullanılan, çelik sektörünün temel alaşımlama elementidir ve tozlara sıkıştırılabilirliğe olan etkisini en aza indirmek için karıştırma-alaşımlama yöntemiyle grafit olarak eklenmektedir [23,6]. Böylelikle, sinterleme işlemi sırasında daha iyi yayılım ve çözünme sağlanabilmektedir. Doğal ve yapay olmak üzere iki farklı grafit bulunmaktadır [23]. Doğal grafitler yapay grafitlere göre demir içerisinde daha iyi çözünme sağlarken, yapay grafitlerde ise kalite, kontrollü bir şekilde sağlanabilmektedir.

Alaşım elementi olarak kullanılan Cu, malzemelerinin sertleşebilirliğini artırırken sinterleme sırasında meydana gelen çekmeyi en aza indirmektedir [24]. Bakır, malzemelere eklendiğinde genleşme sağlamakta, böylelikle üretilen parçaların

boyutsal toleranslar içerisinde kalmasına yardımcı olmaktadır. Alaşım elementi olarak Cu'nun kullanılması sıvı fazlı sinterleme işlemiyle daha yoğun parçalar üretilmesine olanak sağlamaktadır [1]. Sıvı fazlı sinterlemede Cu eriyip Fe içinde çözünür [25]. Ancak bu ergime Cu parçacıklarının yerlerinde boşluk bırakmasına, sinterleme sonrasında ise büyük ve düzensiz gözeneklerin oluşmasına neden olmaktadır. Bakır, tozlara karıştırma-alaşımlama yöntemiyle karıştırılmaktadır [1]. Bu durum, sertleşebilirlikte artış sağlanmasının yanı sıra sıkıştırılabilirlikte de azalmayı önlemektedir.

#### **2.4.2. Soğutma Hızı**

Sinterleme ile sertleştirme işlemini etkileyen bir diğer unsur soğutma hızıdır. Soğutma hızının martensit oluşumu için gerekli düzeyde olması, parçanın kimyasal bileşimi ve kütlesi ile ilgili olup, bu hız genellikle 1-10°C/sn olarak belirtilmiştir [10]. Sinterleme ile sertleştirme işleminde soğutma hızını etkileyen çeşitli unsurlar bulunmaktadır. Bu unsurlar; parça geometrisi, fırın tasarımı, soğutucu gazın ısı kapasitesi ve parçadaki gözeneklilik miktarıdır.

Engström ve diğerlerinin yaptığı bir çalışmada; Cr, Ni, Mo ve Cu ile alaşımlanmış ve farklı miktarlarda C katılmış numunelerde, 1,5-2,5°C/s soğutma hızlarında tamamen martensitik mikroyapılar elde edilmiştir [26]. Aynı çalışmada, Astaloy CrL tozunun kullanıldığı numune 2°C/s'den düşük hızlarda soğutulduğunda pörlit/beynit fazlarının, Cu içermeyen Astaloy CrL tozu ile hazırlanmış numune 2,5°C/s ile soğutulduğunda pörlit/beynit fazlarının, %2Cu ihtiva eden numunede ise martensit ve beynit fazlarının oluştuğu görülmüştür.

Maroli ve arkadaşları, ağırlıkça 2Ni ve 1,5Mo ile alaşımlanmış Distaloy DC-1-0,5C tozundan üretilmiş numuneyi 0,1-8°C/s aralığındaki hızlarda soğutmuş ve yapıda beynit ve martensit fazlarını elde etmişlerdir. Aynı numune 8°C/s'den büyük hızlarda soğutulduğunda ise yapıda %98 martensit elde edilmiştir [27]. Astaloy A-2Cu-0,8C içeren tozdan elde edilen numuneler 2-3°C/s ile soğutulduğunda sertlik değeri 400 HV10, AstaloyMo-0,8C içeren tozdan yapılan numuneler 5-6°C/s ile soğutulduğunda ise sertlik değeri 450 HV10 olarak ölçülmüştür.

Berg' in yaptığı bir çalışmada, Distaloy DH-0,65C içeren bir toz karışımı 2°C/s ile soğutulduğunda sertlik değeri yaklaşık 300 HV10 iken, 9°C/s ile soğutma sonrasında sertlik değeri yaklaşık 420 HV10 olarak hesaplanmıştır [1].

Lindsley ve Rutz'un çalışmasında, Fe-2Cu-1,5Mo-C alaşımıyla yavaş soğutma koşullarında elde edilen mekanik özelliklerin, Fe-0,85Mo alaşımında da hızlı soğutmayla elde edilebileceği gösterilmiştir [20]. Bu durum, kg fiyatı 75 dolar olan Mo'dan kg başına 0,49 kg kar sağlamıştır.

Berg ve Maroli, yaptıkları çalışmada; Astaloy CrL(1,5Cr-0,2Mo) tozuna farklı oranlarda Cu ve C ekleyerek sinterleme ile sertleştirilmenin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir [28]. Çalışmada soğutma hızı 2,5°C/s'dir. Çalışma sonucunda; 2Cu ve 0,6C içeren alaşımın sertlik değeri 31 HRC, akma dayanımı 854 MPa, çekme dayanımı 894 MPa bulunmuştur. Alaşımdaki C miktarı 0,8'e çıkarıldığında sertlik değeri 34 HRC'ye çıkmış, akma dayanımı 743 MPa'a, çekme dayanım değeri ise 791 MPa'a düşmüştür. Alaşımın C miktarı 0,6'da sabit tutulup Cu miktarı 1'e düşürüldüğünde ise sertlik değeri 29 HRC'ye, akma dayanımı 779 MPa'a düşmüştür. Çekme dayanım değerine bakıldığında ise 2 Cu içeren alaşım ile yaklaşık aynı değer elde edilmiştir.

Engström ve arkadaşları; Astaloy CrM(3Cr-0,5Mo)-0,6C alaşımında sinterleme ve sinterleme ile sertleştirme işleminin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Sinterleme işlemi sonrasında soğutma hızı 0,25-0,8°C/s, sinterleme ile sertleştirme işleminde soğutma hızı 2-3°C/s'dir. Sıkıştırma basıncı ise 800 MPa'dır [29]. Sinterleme işlemi sonucunda numunenin çekme dayanımı 953 MPa, akma dayanımı 713 MPa, darbe tokluğu 19 J, çapraz kırılma dayanımı değeri ise 1650 MPa bulunmuştur. Numunelere sinterleme ile sertleştirme işlemi uygulandığında ise çekme dayanımı 1144 MPa, akma dayanımı 982 MPa, darbe tokluğu 16 J, çapraz kırılma dayanımı değeri 1818 MPa elde edilmiştir. Çalışmada, sinterleme ile sertleştirme işlemi dayanım ve çapraz kırılma dayanımı değerlerini artırırken darbe tokluğunu düşürmüştür.

### **2.4.3. Östenit Tane Büyüklüğü**

Demir esaslı parçaların sertleşebilirliğini dolayısıyla sinterleme ile sertleştirme işlemi sonrasında mekanik özelliklerini etkileyen bir diğer unsur da östenit tane büyüklüğüdür. Östenit tane büyüklüğü parçanın dayanımını ve tokluğunu etkilemektedir [30].

Östenit tane büyüklüğü arttıkça tane sınırı azalmaktadır. Ferrit ve pörlit östenit tane sınırlarında oluşmaya başladığından, östenit tane büyüklüğü arttıkça tane sınırı azalacak ve ferritin ve pörlitin çekirdeklenme bölgesi en aza inecektir [22]. Böylelikle soğutma sonucu oluşabilecek martensit miktarı artırılmış olacaktır.

Östenit tane boyutunun çok fazla büyümesi istenmeyen bir durumdur [10]. Tane boyutunun çok fazla artması mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Martensit plakaları östenit taneleri içerisinde oluşmaktadır. Buna bağlı olarak çok büyük östenit tanesi elde edildiğinde, geniş ve kırılğan martensit plakaları oluşmakta ve böylelikle parçalarda mikro çatlaklar oluşabilmektedir.

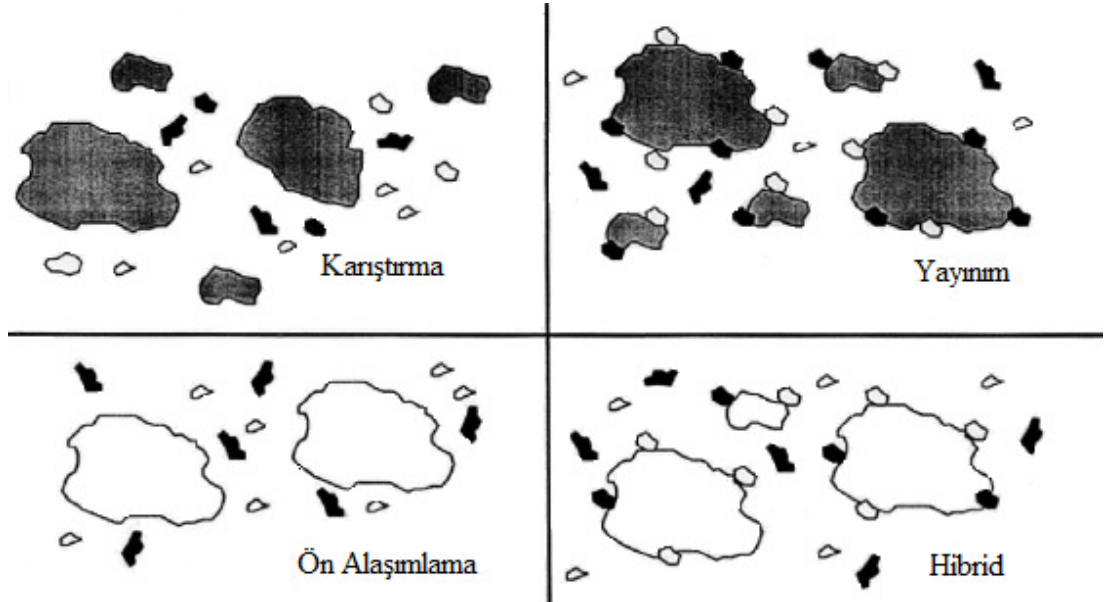
Chagnon' un yüksek sinterleme sıcaklığı ile yaptığı bir çalışmada, 1205 °C'te yapılan sinterleme işleminde 1120 °C'ye kıyasla daha fazla martensit elde edildiği görülmüştür [31]. Bunun nedeni olarak, yüksek sıcaklıkta yapılan sinterleme işleminde daha büyük östenit tane boyutunun elde edilmesi, böylelikle tane sınırının azalması gösterilmiştir.

### **2.4.4. Yapının Homojenliği**

Toz metalurjisiyle üretilen parçalarda alaşımlama yöntemleri, parçaların daha iyi sertleşebilirliğe sahip olması ve sinterleme ile sertleşme işleminden istenilen sonuçların elde edilmesi açısından büyük öneme sahiptir [22]. Alaşımlama işleminden sonra parçaların homojen yapıda olması, her noktada benzer sertleşebilirlik dağılımı göstereceğinden mekanik özelliklerin daha iyi olmasını sağlayacaktır [22].

Demir esaslı alaşımlarda kullanılan temel olarak dört alaşımlama yöntemi bulunmaktadır [12]. Bu yöntemlerden ilki ve en çok kullanılanı karıştırma

alaşımlama yöntemidir. Alaşım elementleri ana toz olan demirin içerisine katılır ve karıştırılır. Karıştırma alaşımlama yönteminde esas sorun, ana toza katılan alaşım elementlerinin sinterleme sırasındaki yayınıdır. Bu yöntemle, iyi yayınının sağlanamadığı durumlarda heterojen yapılar elde edilmektedir. Diğer bir yöntem yayınımla alaşımlamadır. Bu yöntemde de alaşım elementleri ana toz olan demirin içerisine yayınırlar. Tam olarak yayınamayan alaşım elementleri heterojen yapılar oluştururlar. Bu yöntem sıkıştırılabilirliğin yüksek olması gereken uygulamalarda kullanılır. Üçüncü alaşımlama yöntemi olan ön alaşımlamada alaşım elementleri ergimiş demirin içerisine katılır ve ergiyik karışım atomize edilerek homojen bir yapı elde edilir. Böylelikle sertleşebilirlik özelliği parçanın her yerinde aynı olan yapılar elde edilmektedir. Son yöntem ise hibrid alaşımlamadır. İlk üç alaşımlama yöntemini de içerisinde barındıran bir alaşımlama yöntemidir [12]. Ön alaşımlama ve karıştırma yöntemleriyle alaşımlama işlemleri Şekil 2.12’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Alaşımlama yöntemlerinin şematik gösterimi [5].

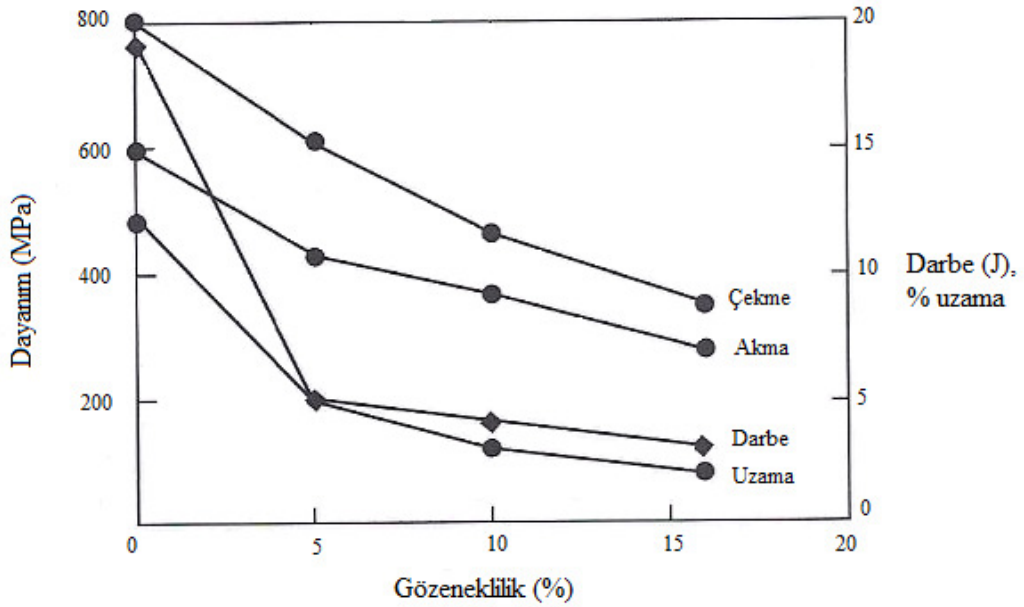
Alaşımlama yöntemlerinin tozun sıkıştırılabilirliği üzerinde de etkisi bulunmaktadır [32]. Karıştırma yöntemiyle alaşımlama işleminde tozların sıkıştırılabilirliği önemli ölçüde artırılmış olmaktadır. Sıkıştırılabilirliği yüksek olan parçalarda presleme

işlemi sonunda yüksek ham yoğunluğa ulaşılmakta ve sinterleme sonrasında parçalarda daha az çekme olmaktadır.

#### 2.4.5. Gözeneklilik

Sinterleme ile sertleştirme işlemi sonucunda mekanik özelliklerin yüksek olması için alaşım elementleri, soğutma hızı, östenit tane büyüklüğü, yapının homojenliği gibi unsurların yanı sıra parça geometrisi, ağırlığı ve yoğunluğu (gözeneklilik) gibi özelliklere de dikkat edilmesi gerekmektedir.

Toz metalurjisiyle üretilmiş parçalarda, gözeneklilik mekanik özellikleri etkilemektedir [13]. Şekil 2.13'te 1120°C'de 30 dakika sinterlenen Fe-2Ni-0,5 Mo-0,3C alaşımının akma, çekme dayanımları, darbe tokluğu ve % uzama özelliklerinin gözenek miktarıyla değişimi gösterilmiştir. Üretilen parçalardaki gözenek miktarı azaldıkça mekanik özelliklerde artışın olduğu görülmektedir. Bu nedenle tam yoğunluğa sahip malzemelerde yüksek mekanik özellikler elde edilmektedir.



Şekil 2.13. 1120°C'de 30 dakika sinterlenen Fe-2Ni-0,5Mo-0,3C alaşımı için gözenekliliğe bağlı mekanik özellik değişimi [6].

Toplam gözeneklilik miktarı ve parçanın nihai yoğunluğu gözeneklilik hakkında fikir vermektedir. Dikkate alınması gereken bir özellik de gözenek geometrisidir. Geniş

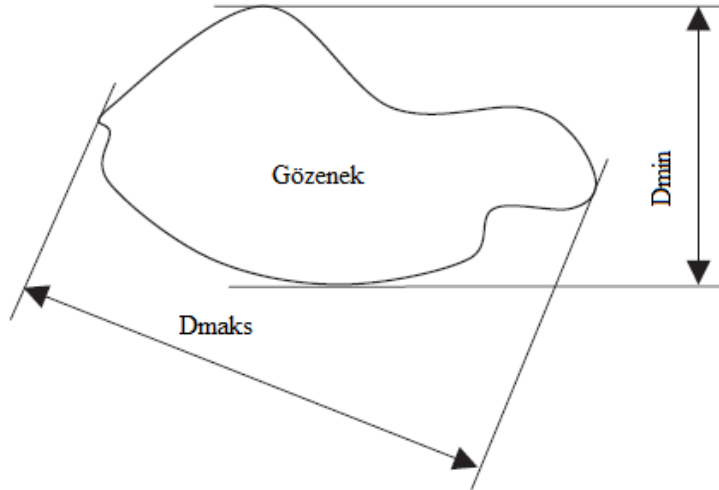
ve düzensiz gözenekler mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir [13]. Gözeneklerin şekli, Denklem (2.2)'de belirtilen şekil faktörü eşitliğiyle belirlenmektedir. Şekil faktörü 1 olduğunda tamamen yuvarlak gözenek, 0 olduğunda ise düzensiz gözenek geometrisini belirtmektedir [33].

$$F = \frac{4\pi xA}{p^2} \quad (2.2)$$

Bu denklemde; F şekil faktörünü, A gözeneğin alanını, p gözeneğin çevresini ifade etmektedir. Gözeneklerin geometrisini belirlerken kullanılan şekil faktörü (F)'nün yanı sıra gözeneklerdeki uzamayı belirten f faktörü de hesaplanabilmektedir. [34]. f faktörü hesabında kullanılan  $D_{maks}$  ve  $D_{min}$  değerleri Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Bu değerler bulunduktan sonra Denklem 2.3 kullanılarak f faktörü hesaplanır.

$$f = \frac{D_{min}}{D_{maks}} \quad (2.3)$$

Denklemde; f gözeneklerdeki uzamayı,  $D_{min}$  gözeneğin en küçük çapını,  $D_{maks}$  gözeneğin en büyük çapını ifade etmektedir.



Şekil 2.14. Gözeneğin en büyük ve en küçük çapları [34].

Gözenek uzamasını gösteren f faktörü de F şekil faktörü gibi 0-1 aralığında değişmektedir [34]. f değeri 0'a yakın olduğunda gözeneklerde çekmenin fazla olduğunu, 1'e yakın olduğunda ise çekmenin çok az olduğunu veya hiç olmadığını belirtmektedir.

Toz Metalurjisi ile üretilmiş parçalardaki gözeneklilik, parçaların dayanımını kısıtlayan bir parametre olarak göze çarpmaktadır. Sertliğin yüksek olması (>400-500 HV0,1) geniş, düzensiz ve keskin köşeli gözeneklerde bölgesel plastik deformasyon oluşturmaktadır. Bu bölgelerde oluşan plastik deformasyon, çatlak oluşumu ve ilerlemesine neden olmaktadır. Bu nedenle, düşük yük uygulansa dahi çatlaklar büyüyerek kırılmaya yol açmakta ve parçalarda yüksek sertliğe rağmen düşük dayanım değerleri elde edilmektedir [35,13]. Toz metal parçalardaki gözeneklilik ve dayanım (çekme dayanımı, çapraz kırılma dayanımı) arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde gösterilmektedir [36].

$$s = s_0 \exp(-kp) \quad (2.4)$$

Denklemde;  $s_0$  parçanın gözeneksiz dayanımı, p gözeneklilik miktarı ve k ise sabit bir sayıdır. Toz metal parçaların dayanımını arttırmanın iki yolu bulunmaktadır [36]. Bu yollardan ilki; kusurların miktarının ve boyutlarının azaltılması ikincisi ise parçaların kırılma tokluklarının arttırılmasıdır. Mikroyapıdaki karbür miktarının arttırılması kırılma tokluğunu arttırabilmektedir. Parçalara; sinterleme ile sertleştirme işlemi ve sonrasında menevişleme uygulamak yüksek dayanım değerleri elde edilmesini sağlayacaktır. Ayrıca yapıda oluşan çeşitli karbürler de yüksek dayanım değerleri için yardımcı unsurdur.

Toz metalurjisiyle üretilmiş parçalardaki gözenekler, karbon atomlarının yayınımları için ek yollar oluşturmaktadır [37]. Böylelikle yayınımları için gerekli olan aktivasyon enerjisi gözeneklilik arttıkça azalmaktadır. Ancak gözeneklilik (sinterlenmiş yoğunluk) ısı iletkenliğini, dolayısıyla soğutma sıvısının ve üretilen parçanın ısı dağılımını etkiler. Bu durum, sertleşebilirlik ve soğutma hızı gibi özellikleri doğrudan etkilemektedir [38,39]. Dolayısıyla tamamen yoğun parçaların ısı iletkenliği, gözeneklerin yalıtkan özellik gösterip ısı iletimini yavaşlatması düşünüldüğünde gözenekli parçaların ısı iletkenliğinden daha fazladır [10].



Howard ve Koczak'ın (1981) yaptığı bir çalışmada, aynı sinterleme şartlarında ortamdaki H<sub>2</sub> miktarının artırılıp N<sub>2</sub> miktarının azaltılmasıyla parçalardaki ısı iletiminin arttığı böylelikle ısının parçaların merkezlerine kadar ulaştığı görülmüştür [40]. Gözenekli parçalarda, gözeneklerin birbiriyle bağlantılı olup olmaması da düşünülmesi gereken unsurlar arasındadır [41]. Birbiriyle bağlantılı olmayan gözeneklerin olduğu parçalarda daha iyi mekanik özellikler elde edilmektedir. Gözenek miktarının %5'in altında olduğu parçalarda bağlantılı olmayan gözenekler, gözenek miktarının %5-%9 arasında olduğu parçalarda ise sıcak sıkıştırma, yüksek sinterleme sıcaklığı, uzun sinterleme süreleri gibi işlemlerle bağlantılı olmayan gözenekler elde edilebilmektedir. Daha yüksek gözenek miktarlarında ise gözenekler birbiriyle bağlantı kurup mekanik özellikleri düşürmektedir.

Sarıtaş ve diğerleri, gözenekliliğin malzemelerin sertleşebilirliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir [42]. Bu çalışmada; gözeneksiz SAE 4150 çeliğine ve Ancorsteel 85 HP tozundan üretilen numunelere Jomini sertleşebilirlik testi uygulanmıştır. Su verilen noktadan 5 mm'lik uzaklıktaki bölgede soğutma hızı 30°C/s olarak ölçülmüştür ve bu bölgedeki mikroyapı martensitten oluşmaktadır. Gözeneksiz SAE 4150 çeliğinde gözlemlenen soğutma hızının, gözenekli parçalarda elde edilen soğutma hızından daha düşük olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni olarak soğutma sıvısının birbirleriyle bağlantılı olmayan gözeneklere dolması ve soğutma hızını artırması gösterilmiştir. Soğutma noktasından 25 mm uzağındaki bölgede, soğutma hızı 3-10°C/s olarak hesaplanmıştır ve mikroyapıda martensit/beynit fazları gözlenmiştir.

Stiles bir çalışmasında, gözenekliliğin numunelerin soğutma hızına, sertliğine ve sertleşebilirliğine etkisini incelemiştir [43]. Bu çalışmada sinterlenmiş, bilyalı dövme (shot peening) yapılmış ve sıcak izostatik preslenmiş numunelere Jomini sertleşebilirlik deneyi uygulanmıştır. Su verilen noktadan 5 mm uzaklıktaki bölgede gözenekliliği yüksek olan sinterlenmiş numunedeki soğutma hızı yüksekken, ısı iletimi düşüktür. Ancak tüm numune dikkate alındığında gözenekliliği yüksek olan numunenin soğutma hızı daha düşük olmaktadır. Çalışmada, Ni ve Cu katkılı numunelerin sertleşebilirliği de incelenmiştir. Cu katkılı numunede sertlik değeri 75 HRA iken Ni katkılı numunede sertlik 68 HRA olarak ölçülmüştür. Ni' in alaşım

elementi olarak kullanıldığı numunede sertliğin daha düşük çıkması Ni'in sinterleme sırasında tam anlamıyla yayınamadığını göstermiştir.

Toz metalurjisiyle üretilen parçalarda gözenekliliği azaltmak ve daha iyi mekanik özellikler elde etmek için literatürde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Sıcak presleme bu yöntemlerden biridir. Tozların sıkıştırılması sırasında sıcak presleme yönteminin kullanılması gözenek miktarını azaltarak, yoğunluğun artmasını sağlamaktadır [28]. Sıcak presleme işlemi sonucunda; boyutsal olarak daha iyi toleranslar elde edilirken, dayanım değerlerinde de artış görülmektedir. Ayrıca sıcak sıkıştırma; ham dayanım değerlerinin artmasıyla, parçaların ham halde işlenmesini mümkün kılmaktadır.

Berg ve Maroli'nin yaptığı bir çalışmada; 600 MPa basınçta soğuk preslenmiş parçanın sinterlenmiş yoğunluğu  $6,92 \text{ g/cm}^3$  iken, aynı basınçta sıcak preslenmiş parçanın sinterlenmiş yoğunluğu  $7,12 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüştür [28]. 800 MPa basınçta soğuk preslenmiş tozların sinterlenmiş yoğunluk değeri  $7,14 \text{ g/cm}^3$  iken, aynı basınçta sıcak preslenmiş tozun sinterlenmiş yoğunluk değeri  $7,28 \text{ g/cm}^3$  olarak hesaplanmıştır.

Gözenekliliği azaltmak, sertleşebilirliği ve dolayısıyla mekanik özellikleri arttırmak için kullanılan bir diğer yöntem ise yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemidir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan sinterleme işlemi; sinterleme sonucu yoğunluğu arttırmakta, gözeneklerin yuvarlaklaşmasını sağlamakta, alaşım elementlerinin yayılımını arttırmakta ve özellikle Mn ve Cr'un oksijenle tepkimeye girmesi sonucu oluşan oksitlerin indirgenmesine yardımcı olmaktadır [31].

Chagnon' un yaptığı çalışmada, içerisinde ağırlıkça 2Cu ve 0,7grafit içeren tozdan üretilen numunelerin  $1205 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sinterlendikten sonra; sinterlenmiş yoğunluğu  $6,93 \text{ g/cm}^3$ , çapraz kırılma dayanımı değeri 1904 MPa, çekme dayanımı 1081 MPa, akma dayanımı 945 MPa olarak ölçülmüştür [31]. Aynı toz alaşımı  $1120 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sinterlendikten sonra ise; sinterlenmiş yoğunluğunun  $6,9 \text{ g/cm}^3$ , çapraz kırılma dayanımı değerinin 1717 MPa, çekme dayanımının 981 MPa, akma dayanımının ise 878 MPa olduğu görülmüştür.

Capus'un yaptığı bir çalışmada, ön alaşımlanmış Cr-Mo-Ni'den oluşan toza ağırlıkça 2Cu ve iki farklı miktarda C eklendikten sonra 1120°C ve 1290°C'de sinterlenip mekanik özellikleri ölçülmüştür [44]. 0,65C içeren toz bileşimi 1120°C'de sinterlendikten sonra çekme dayanım değeri 753 MPa, 1290°C'de sinterlendikten sonra ise 877 MPa, akma dayanımı değeri 1120°C'de gerçekleştirilen sinterleme işlemi sonrası 649 MPa iken, 1290°C'deki sinterleme sonrası 813 MPa olarak ölçülmüştür. Numunelerin sertlik değerlerinde de değişimler gözlenmiştir. Düşük sıcaklıkta sinterleme sonrası sertlik değeri 22 HRC iken, yüksek sıcaklıkta sinterleme sonrası sertlik değeri 30 HRC olarak belirtilmiştir. Karbon oranı 0,8'e çıkarıldığında ise 1120°C'de sinterleme sonrası çekme dayanımı 702 MPa, akma dayanımı 582 MPa, sertlik değeri 27 HRC iken, sinterleme sıcaklığı 1290°C'ye çıkarıldığında çekme dayanım değeri 723 MPa, akma dayanımı 693 MPa, sertlik değeri ise 32 HRC olarak bulunmuştur.

Bergman ve Bengtsson, yaptıkları bir çalışmada 1120°C ve 1250°C'de yapılan sinterleme işlemlerinin bileşimi Astaloy CrL(Fe-1,5Cr-0,2Mo)-0,7C ve Fe-1,8Cr+0,7C olan numunelerdeki mekanik özelliklere etkisini incelemiştir [19]. Astaloy CrL tozunun 1120°C'de sinterlenmesi sonucu çekme dayanımı 714 MPa, yüzde uzaması %1,2 iken, 1250°C'de gerçekleştirilen sinterleme işlemi sonrası çekme dayanımı 892 MPa, yüzde uzaması ise %2,4 olarak hesaplanmıştır. Mikroyapıda beynit veya beynit/pörlit fazları görülmüştür. Fe-1,8 Cr içeren tozun 1120°C'de sinterlenmesi sonucu çekme dayanımı 632 MPa, yüzde uzaması %2,2 iken, 1250°C'deki sinterleme sonrası çekme dayanımı 733 MPa, yüzde uzaması ise %3,2 olarak ölçülmüştür.

Bergman'ın çalışmasında, Astaloy CrM-0,45grafit ve Astaloy CrL-0,8grafit içeren alaşımlar 1120°C'de ve 1250°C'de sinterlenmiştir [45]. Düşük hızda sinterlenen alaşımların yorulma dayanımları; Astaloy CrL için 261 MPa iken, Astaloy CrM için 287 MPa'dır. Yüksek hızda sinterleme işleminden sonra Astaloy CrL alaşımının yorulma dayanımı 320 MPa'a, Astaloy CrM'un ise 372 MPa'a yükselmiştir.

## 2.5. ASTALOY CrA ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Krom elementi; demir esaslı parçaların sertleşebilirliğini arttırmak için kullanılan, ucuz ve geri dönüşümü kolay olan bir alaşım elementidir [46]. Dünyanın büyük demir tozu üreticisi Högenas(İsveç) firmasının imal ettiği, Cr'un ön alaşımlanmış olarak kullanıldığı demir tozları Astaloy CrA, Astaloy CrL, Astaloy CrM'dir [47]. Krom, demir tozu ile ön alaşımlandıktan sonra genellikle karıştırma yöntemiyle içerisine alaşım elementleri eklenerek mekanik özelliklerde iyileştirmeye gidilmektedir. Astaloy CrA tozu, demir ve %1,8Cr elementinin ön alaşımlanması sonucu elde edilmiştir [47]. Astaloy CrL tozunda, ön alaşımlanmış %1,5Cr ve karıştırma işlemiyle toza karıştırılmış %0,2Mo elementi bulunmaktadır. Astaloy CrM tozu, CrA ve CrL tozlarıyla karşılaştırıldığında daha fazla alaşım elementi içermektedir. Bu tozda, ön alaşımlanmış %3Cr ve karıştırılarak alaşımlanmış %0,5 Mo bulunmaktadır. Düşük alaşım, Cr kullanılan tozlar; otomotiv ve uçak sanayilerinde yaygın kullanım alanlarına sahiptir [48]. Özellikle; güç iletim ve bağlantı elemanları, Cr ile alaşımlanmış tozların kullanım alanlarıdır.

Astaloy CrA toz alaşımı, genellikle orta ve yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılır [47]. Bu alaşım, nitrüleme ısıl işlemine uygun olduğu için tercih edilebilmektedir. Astaloy CrA tozuna Cu ve Ni gibi alaşım elementleri katılarak, alaşım sinterleme ile sertleştirme işlemine uygun duruma getirilmektedir [47]. Cr alaşım elementinin N ile tepkimeye girme isteği çok fazladır [49]. Bu nedenle azot içeren koruyucu atmosferlerde yapılan sinterleme ve ısıl işlemlerde, Cr miktarının düşük veya yüksek olmasına bağlı olarak CrN ve Cr<sub>2</sub>N bileşikleri oluşabilmektedir.

Engström ve arkadaşlarının bir çalışmasında, içerisinde ağırlıkça 1,8Cr-0,6grafit ve 1,8Cr-1Ni-0,6grafit olan numuneler 1120°C'de 30 dakika süre ile %90N<sub>2</sub>-%10H<sub>2</sub> ortamında sinterlenmiştir [50]. Sinterleme işlemi sonrasındaki yavaş soğutma (0,5°C/s) ve sinterleme ile sertleştirme (2°C/s) işlemlerinin alaşımların mekanik özelliklerine etkisi aşağıdaki Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Krom içerikli toz alaşımlarının sinterleme ve sinterleme ile sertleştirme işlemleri sonucu mekanik özellikleri.

Alaşım	Sertlik (HV10)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Darbe Tokluğu (J)
1,8Cr-0,6C (0,5°C/s)	165	610	2,8	22
1,8Cr-1Ni-0,6C (0,5°C/s)	182	641	2,2	23
1,8Cr-0,6C (2°C/s)	189	698	2,5	22
1,8Cr-1Ni-0,6C (2°C/s)	242	845	1,5	20

Nikel ile alaşımlanmış ve sadece C eklenmiş Astaloy CrA tozunda sinterleme ile sertleştirme işlemi sonrası martensit fazının oluşumuna bağlı olarak sertlik ve çekme dayanımı değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Nikel ile alaşımlanmış numunelerde sertlik değerleri ve çekme dayanımı ~%30 oranında artmıştır. Alaşımlama sonrası Astaloy CrA tozunda sinterleme ile sertleştirme işlemi ile yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir.

Berg ve diğerlerinin bir çalışmasında, Astaloy CrA-2Ni-0,6grafit toz alaşımı 700 MPa'da preslendikten sonra 1120°C'de %90N<sub>2</sub>-%10H<sub>2</sub> ortamında 30 dakika süre ile sinterlenmiştir [51]. Sinterleme işleminden sonra bazı numunelere sinterleme ile sertleştirme işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemde soğutma hızı 3-5°C/s olarak belirlenmiştir. Sinterleme ile sertleştirme işleminden sonra numunelere 200°C'de 60 dakika süre ile menevişleme işlemi uygulanmıştır. Mekanik özellikler aşağıdaki Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Astaloy CrA-2Ni-0,6grafit alaşımının mekanik özellikleri.

	SY (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik (HV10)	Uzama (%)
Sinterleme	7,10	859	240	1,1
Sinterleme ile sertleştirme	7,10	1162	369	0,88

Astaloy CrA tozunda alaşım elementi olarak ağırlıkça 2Ni kullanılması sinterleme ve sinterleme ile sertleştirme işlemleri sonrasında yüksek mekanik özellikler elde edilmesini sağlamıştır. Sinterleme ile sertleştirme işlemi sonrası mikroyapıda martensit fazı oluşumuna bağlı olarak sertlik değerleri ~%50, çekme dayanımı değerleri ise ~%35 artmıştır. Sinterleme ile sertleştirme sonrası oluşan sert ve gevrek martensit fazından dolayı % uzama miktarında ise ~%20 düşüş görülmüştür.

Larsson ve arkadaşları, Astaloy CrA içerisine katılan farklı miktardaki Cu ve Ni alaşımları üzerinde sinterleme ve sinterleme ile sertleştirme işlemlerinin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir [52]. Numuneler 620 MPa'da preslendikten sonra %90N<sub>2</sub>-%10H<sub>2</sub> ortamında 1120 °C' de 20 dakika süre ile sinterlenmiştir. Sinterleme işleminde soğutma hızı 1 °C/s iken sinterleme ile sertleştirme işleminde soğutma hızı 5 °C/s'dir. Sinterleme ile sertleştirilmiş numuneler 200 °C'de 60 dakika süre ile menevişlenmiştir. Elde edilen mekanik özellikler aşağıdaki Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Astaloy CrA alaşımlarının mekanik özellikleri.

	SY (g/cm <sup>3</sup> )	Sertlik (HV10)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Astaloy CrA-0,6C (1 °C/s)	7,02	154	605	2,8
Astaloy CrA-1Cu-0,6 C (1 °C/s)	7,00	187	703	1,3
Astaloy CrA-2Cu-0,6 C (1 °C/s)	6,95	211	757	0,9
Astaloy CrA-1Ni-0,6 C (1 °C/s)	7,06	201	746	1,7
Astaloy CrA-2Ni-0,6 C (1 °C/s)	7,07	241	859	1,1
Astaloy CrA-0,6C (5 °C/s)	7,02	301	985	0,3
Astaloy CrA-1Cu-0,6 C (5 °C/s)	7,00	320	1056	0,4
Astaloy CrA-2Cu-0,6 C (5 °C/s)	6,94	340	1028	0,3
Astaloy CrA-1Ni-0,6 C (5 °C/s)	7,05	366	1083	0,3
Astaloy CrA-2Ni-0,6 C (5 °C/s)	7,07	411	1066	0,3

Soğutma hızının 1 °C/s olduğu durumda; Astaloy CrA-0,6C alaşımında pörlit mikroyapısı, Cu ve Ni ile alaşımlanmış numunelerde beynit ve pörlit mikroyapıları elde edilmiştir. Numunelere sinterleme ile sertleştirme işlemi uygulandığında mikroyapıda martensit fazı elde edilmiş ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerde önemli artış elde edilmiştir [52].

Larsson ve arkadaşları, Astaloy CrA-1Cu-0,65 grafit alaşımında sinterleme ile sertleştirme işleminin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir [53]. Presleme

işlemleri 700 MPa basınçta yapılmıştır. Sinterleme işlemleri, bantlı fırınlarda 1120 °C’de 20 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Fırında, atmosfer olarak %90N<sub>2</sub>-%10H<sub>2</sub> gaz karışımı kullanılmıştır. Sinterleme sonrası sinterleme ile sertleştirme işlemi uygulanmış ve bu işlemde soğutma hızı 3 °C/s’dir. Sinterleme ile sertleştirme sonrası numunelere 200 °C’de 60 dakika menevişleme yapılmıştır. İşlemler sonucunda numunenin çekme dayanımı 1060 MPa, sertliği yaklaşık 370 HV10, yorulma dayanımı ise yaklaşık 280 MPa olarak ölçülmüştür.

Frykholm ve diğerleri, Astaloy CrA tozunu ağırlıkça %1Cu ve %1Ni ile alaşımlayarak mekanik özelliklerini incelemiştir [54]. Alaşımlara %0,6C eklenmiştir. Presleme basıncı Cu’lu numuneler için 600 MPa iken Ni’li numuneler için ise 400, 600 ve 800 MPa’dır. Sinterleme 1120 °C’de 30 dakika süre ile yapılmıştır. Bakırlı numunelerde atmosfer olarak %90N<sub>2</sub>-%10H<sub>2</sub>, Ni’li numunelerde ise %95N<sub>2</sub>-%5H<sub>2</sub> kullanılmıştır. Bakırlı numunelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.4’te, Ni’li numunelerin mekanik özellikleri ise Çizelge 2.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Astaloy CrA-1Cu alaşımlarının mekanik özellikleri.

	Sertlik (HV10)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Sinterleme	225	714	2,5
Sinterleme ile sertleştirme (3,5 °C/s)	337	1148	0,5



Çizelge 2.5. Astaloy CrA-1Ni içeren alaşımların mekanik özellikleri.

	Sertlik (HV10)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Sinterleme	182	641	2,2
Sinterleme ile sertleştirme (2°C/s)	242	845	1,5

Bakırın ve nikelin eklendiği Astaloy CrA-0,5C tozunda sinterleme ile sertleştirme işlemine bağlı olarak martensit fazı oluşmuştur. Buna bağlı olarak; sertlik değerlerinde ~%30-50, çekme dayanımı değerlerinde ise ~%30-60 arasında bir artış meydana gelmiştir. Nikelin mikroyapısında bakırdan farklı olarak nikelin yavaş yayılımına bağlı olarak kalıntı östenit oluşmuştur [54].

## 2.6. SİNERLENMİŞ VE SİNERLEME İLE SERTLEŞTİRİLMİŞ PARÇALARIN İŞLENEBİLİRLİĞİ

Toz metalurjisi ile üretilmiş parçalardaki gözeneklilik; işleme sırasında soğutucu kullanımını, dolayısıyla ısı iletimini zorlaştırdığı için bu yöntemle üretilmiş parçaların işlenebilirliği gözenekli olmayan parçalara kıyasla daha zordur [55].

Gözenekli parçalarda; işleme sırasında soğutucu akışkan kullanmak, gözeneklere akışkanın dolmasına ve ısı iletiminin yeterli düzeyde olmamasına neden olarak kesici takım ömrünü azaltmakta ve kaliteli olmayan yüzeyler elde edilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle toz metalurjisi ile üretilen parçaların işlenebilirliğini artırmak için sülfür, MoS<sub>2</sub> ve MnS gibi katkıları kullanılmaktadır [55]. Sülfür ve MoS<sub>2</sub> mekanik özelliklerin düşmesine, ölçülerde istenilen toleransların elde edilememesine neden olabilmektedir.

İşlenebilirliği artırmak için kullanılan MoS<sub>2</sub> sinterleme esnasında S'ü ayrıştırdığı taktirde mekanik özelliklerde olumsuz bir etki oluşturmamaktadır [55]. Sinterleme atmosferinde hidrojenin olması, H<sub>2</sub>S oluşturacaktır. Ancak sülfürün sistemden uzaklaştırılması mekanik özellikleri olumlu etkilerken, işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir. Tepkime sonucunda ortaya çıkan H<sub>2</sub>S gazı fırının parçalarını da olumsuz etkilemektedir. Bu problemleri ortadan kaldırmak amacıyla MnS daha yaygın olarak kullanılmaktadır [55]. MnS az miktarda kullanıldığında mekanik özelliklere ve ölçü toleranslarına olumsuz etki yapmamaktadır. Olumlu yönlerinin yanı sıra MnS'ün kullanımını kısıtlayan özellikleri de bulunmaktadır. Sinterleme atmosferinde nemin olması mangan oksit ve oksisülfürlerin oluşumuna neden olmaktadır.

Sinterleme ile sertleştirilmiş parçalarda martensitik yapıdan ötürü elde edilen yüksek sertlik değerleri talaş kaldırma esnasında kesici takımlarda aşınmaya neden olmaktadır [55]. Bu nedenle, ham halde veya ön sinterleme işleminden sonra talaş kaldırmak kesici takımın ömrünü uzatmaktadır. Tokluğu ve sertliği yüksek olan CBN ile işlem yapmak sinterleme ile sertleştirilmiş parçalarda kolaylık sağlamaktadır.

## BÖLÜM 3

### 3. DENEYSEL YÖNTEM

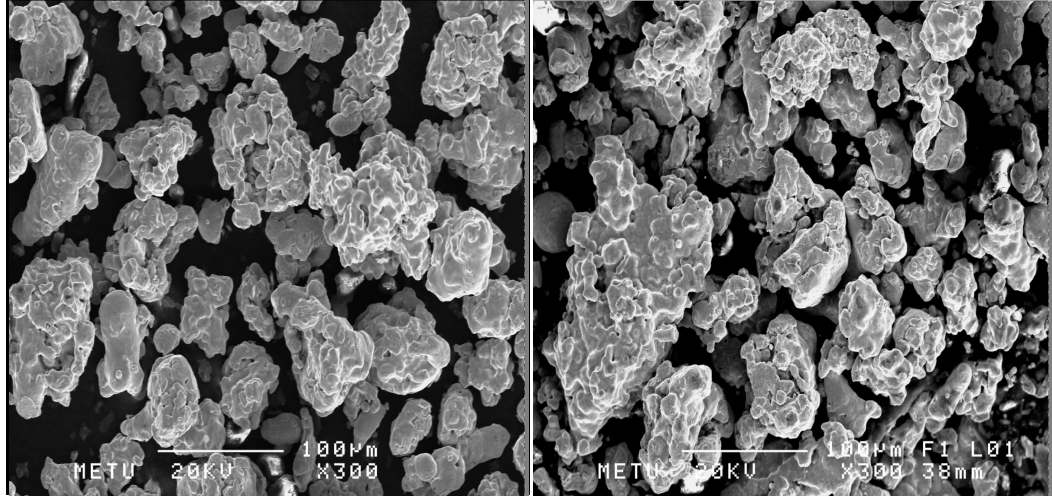
#### 3.1. Toz Alaşımlarının Özellikleri

Deneysel çalışmalarda, Höganäs firmasının su atomizasyon yöntemiyle ürettiği ön alaşımlanmış demir tozları kullanılmıştır. Saf demir tozuna ağırlıkça %1,8 oranında Cr, %1 oranında Ni, farklı oranlarda Cu ve %0,5 oranında grafit(UF4) ilave edilmiştir. Çalışmada kullanılan toz bileşimleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Demir esaslı tozlarda Ni ve Cu sinterleme ile sertleştirme işleminde sertleşebilirliği artırmak için kullanılırken, sinterlenmiş parçadaki boyutsal değişimi en aza indirmek için de Cu kullanılır [24]. Grafit ise hem sertliği arttırmak hem de yağlayıcı etkisi yaratmak için kullanılan bir alaşım elementidir.

Çizelge 3.1. Tez çalışmasında kullanılan tozların bileşimleri.

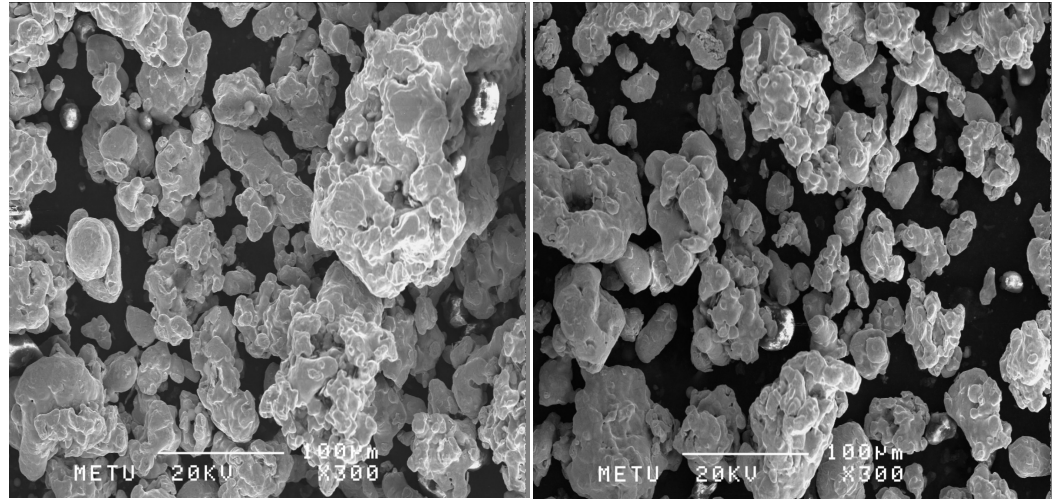
Ana Toz	Cr (%)	Cu (%)	Ni (%)	C (%)
Astaloy CrA	1,8	-	-	0,5
Astaloy CrA	1,8	-	1	0,5
Astaloy CrA	1,8	1	-	0,5
Astaloy CrA	1,8	2	-	0,5

Deney numunelerinin hazırlanması için kullanılan toz alaşımlarının taramalı elektron mikroskopunda incelenen morfolojileri Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Tozların ortalama tane boyutu 50-60 mikron ve morfolojileri ise düzensizdir.



(a)

(b)



(c)

(d)

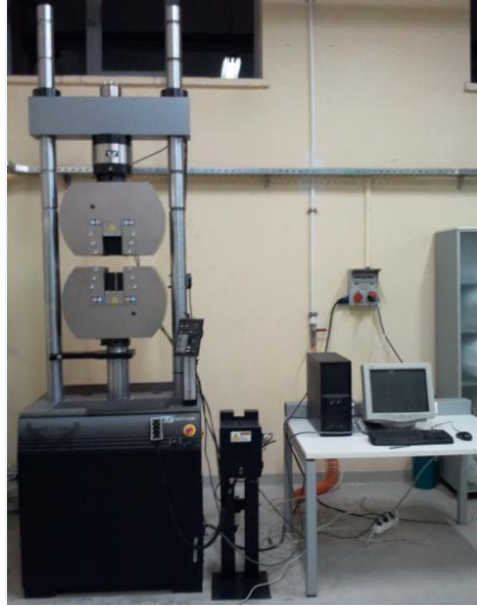
Şekil 3.1. Taramalı elektron mikroskopunda incelenen tozların morfolojileri (a) Astaloy CrA-0,5C, (b) Astaloy CrA-1Ni-0,5C, (c) Astaloy CrA-1Cu-0,5C, (d) Astaloy CrA-2Cu-0,5C.

### 3.2. Deneysel Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda üç farklı geometride numune preslenmiştir. Presleme işlemlerinin yapıldığı çekme-basma cihazı Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Bu numuneler; çapraz kırılma dayanımı deneylerinde kullanılmak üzere preslenen çubuk numuneler, çekme deneylerinde kullanılan çekme numuneleri ve makro sertlik, mikro sertlik ve mikroyapı çalışmaları için kontrol numunesi olarak preslenen pelet

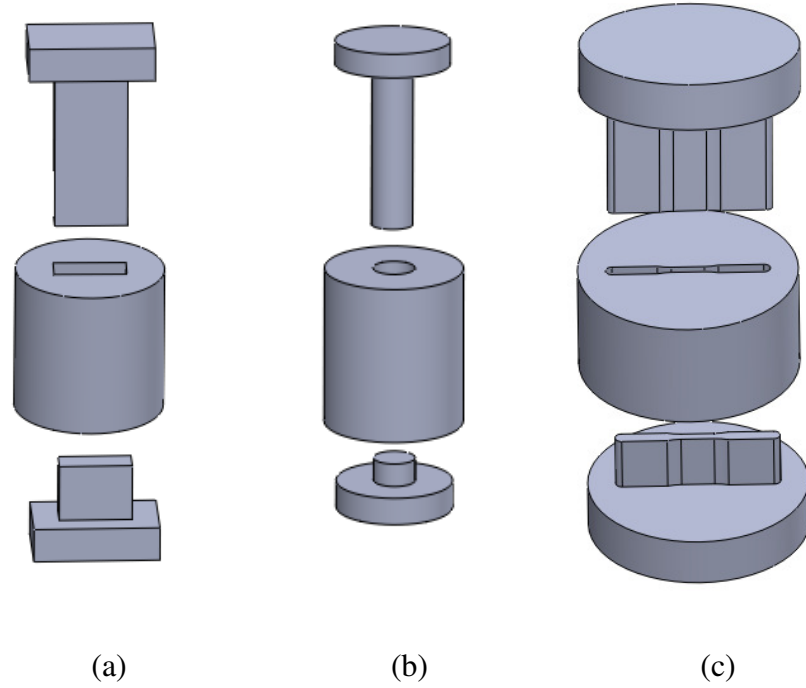
numunelerdir. 18 mm çaplı pelet numunelerde yaklaşık 10 gr toz kullanılırken çubuk numunelerde yaklaşık olarak 17 gr, çekme numunelerinde ise yaklaşık 20 gr toz kullanılmıştır.

Pelet numunelerden 3'er tane, çubuk numunelerden TS 4222 EN ISO 3325 standartlarına uygun olarak 5'er tane, çekme numunelerinden ise 5'er tane hazırlanmıştır. Isıl işlemlerde kullanılmak üzere 4 farklı alaşımdan havada soğutulmak ve suverilmek üzere 5'er tane çapraz kırılma dayanımı numunesi preslenmiştir.



şekil 3.2. 60 tonluk çekme-basma cihazı.

Numuneler 600 MPa basınç altında 60 tonluk Instron marka çekme-basma cihazında tek yönlü preslenmiştir. Pelet, ubuk ve çekme numunelerinin preslenmesi sırasında kullanılan kalıpların şematik gösterimleri şekil 3.3'te verilmiştir.



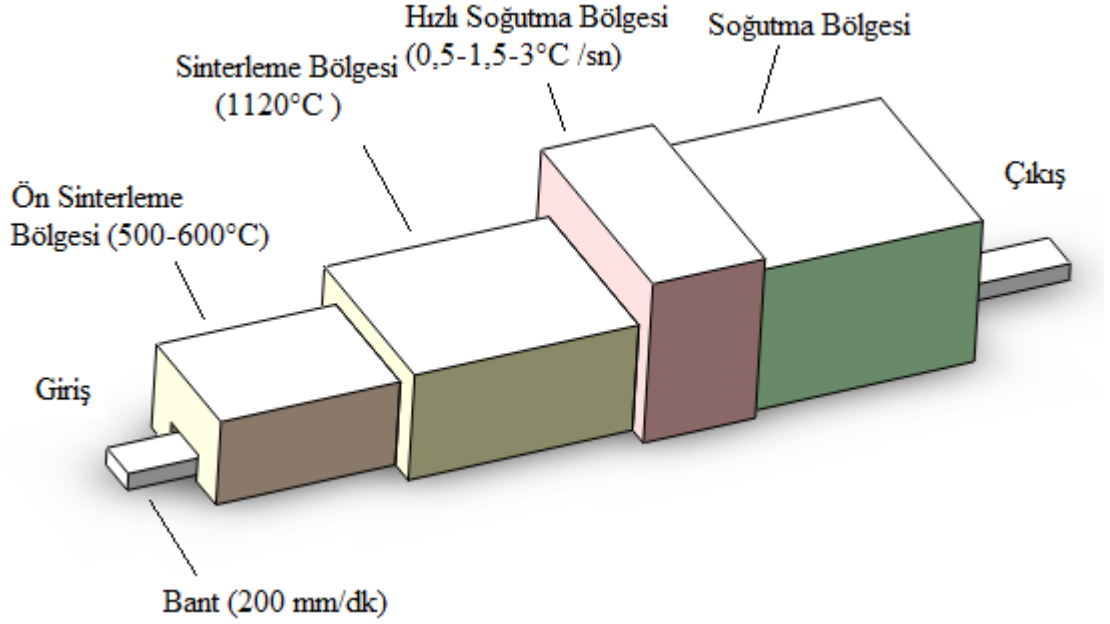
Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan kalıp ve zımbaların şematik gösterimi. (a) Çapraz kırılma dayanımı kalıp ve zımbaları, (b) Pelet kalıp ve zımbaları, (c) Çekme kalıp ve zımbaları.

### 3.3. Toz Alaşımlarının Sinterlenmesi

#### 3.3.1. Endüstriyel Fırında Sinterleme

Preslenen numunelerin bir kısmının sinterleme ve sinterleme ile sertleştirme işlemleri Tozmetal firmasındaki sürekli fırında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme ve sinterleme ile sertleştirme işlemlerinin yapıldığı fırının şematik gösterimi Şekil 3.4'te verilmiştir. Sinterleme işlemlerinde sinterleme ortamı olarak metan gazı kullanılmıştır. Fırında; ilk olarak 700°C'de yağlayıcı ve bağlayıcı giderme işlemi yapılmış, daha sonra numuneler 1000°C'ye, 1050°C'ye ve 1120°C'ye kademeli olarak ısıtılarak sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Numuneler 1120°C'de 20 dakika süre ile sinterlenmişlerdir. Fırının sinterleme bölgesinde ısıtma işlemleri dirençler kullanılarak yapılmıştır. Sinterleme işleminden sonra yavaş soğutma koşulları 5 Hz (0,5°C/s) olarak ayarlanmış, sinterleme ile sertleştirme işlemleri ise orta hızda soğutmada 15 Hz (1,5°C/s) ve hızlı soğutmada ise 30 Hz (3°C/s) olarak

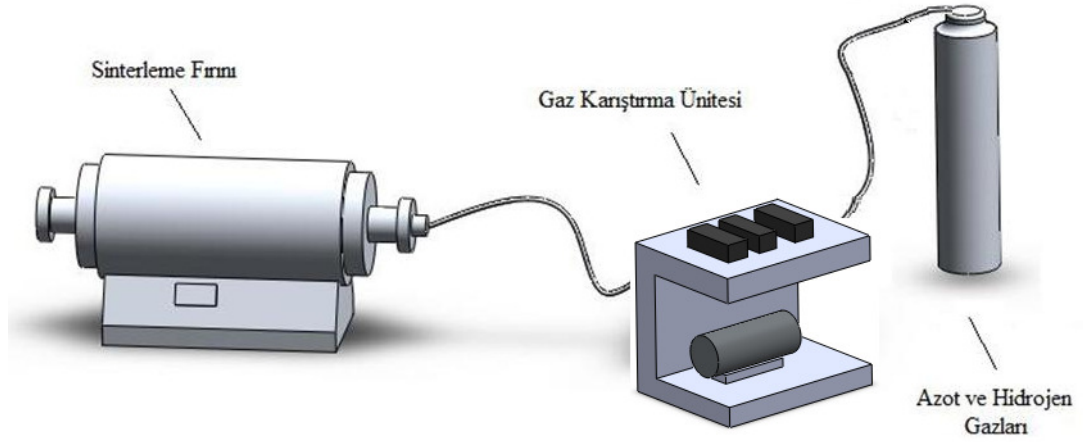
gerçekleştirilmiştir. Fırının bant hızı 200 mm/dak. olup her bir çevrim 1 saat 20 dakikada tamamlanmıştır.



Şekil 3.4. Bantlı fırının şematik gösterimi.

### 3.3.2. Laboratuvar Ölçekli Fırında Sinterleme ve Isıl İşlem Deneyleri

Çizelge 5.1.1'de verilen toz alaşımları 600 MPa basınç altında preslenmiş ve laboratuvar ölçekli fırında sinterlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan fırın şematik olarak Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Fırında ilk olarak 600°C'de bağlayıcı giderme işlemi yapılmıştır, daha sonra 1120°C'de 45 dakika süreyle sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterlenen numuneler fırında 25°C'ye soğutulmuştur. Sinterleme işleminde fırında redükleyici atmosfer olarak %90N<sub>2</sub>-%10H<sub>2</sub> gaz karışımı kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Laboratuvar ölçekli fırının şematik gösterimi.

Sinterleme işleminden sonra numuneler kutu tipi bir fırında 1070°C’de 20 dakika süre ile azot ortamında tavllanmış ve daha sonra havada soğutma, suverme ve 200°C’de 1 saat süre ile menevişleme işlemleri yapılmıştır. İkincil ısıl işlemlerin amacı; sinterleme sıcaklığına yakın bir sıcaklıktan 2 farklı soğutma hızı kullanılarak yapılan soğutma işleminin mekanik özelliklere etkisini incelemektir. Bu işlemlere ek olarak, su verilmiş numunelerin bir bölümüne 200°C’de 1 saat süre ile menevişleme işlemi yapılmıştır.

### 3.4. Toz Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

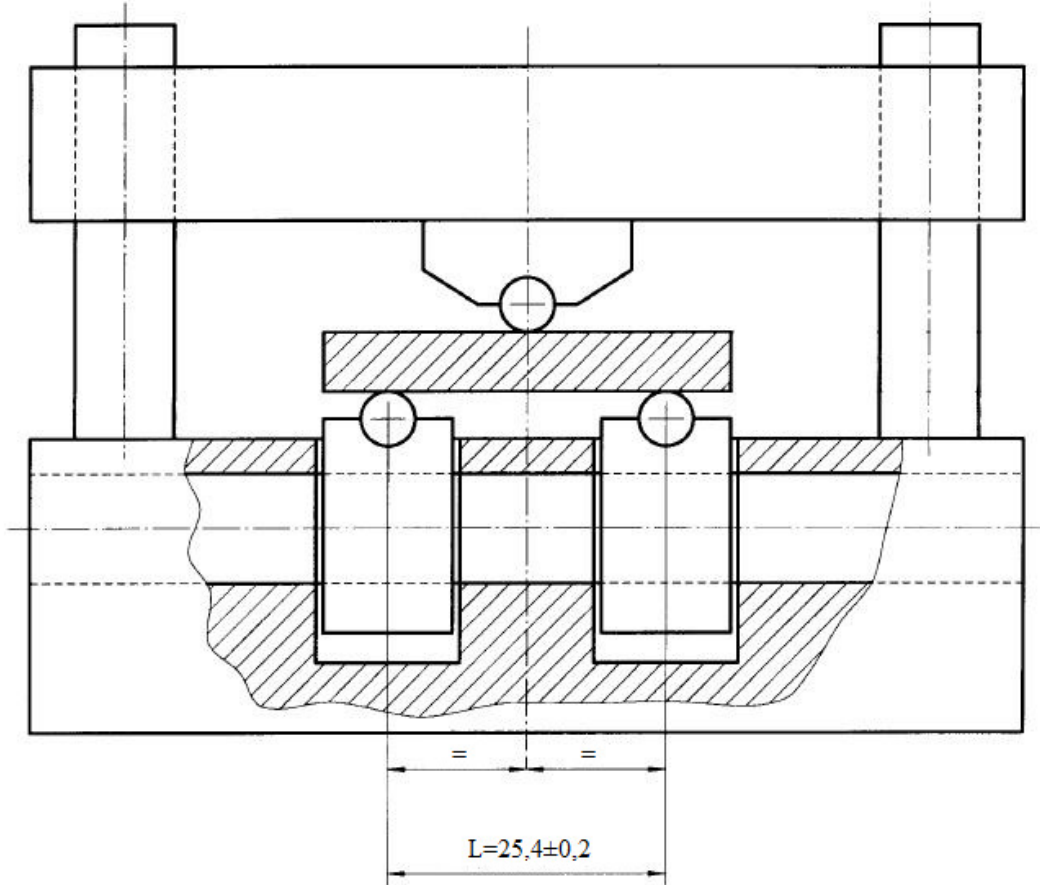
#### 3.4.1. Çapraz Kırılma Dayanım Ölçümleri

Sinterleme işlemlerinden sonra numunelerin çapraz kırılma dayanımları, makrosertlik ve mikrosertlik değerleri belirlenmiştir. Bu işlemler, 5 tonluk Instron çekme-basma cihazında TS 4222 EN ISO 3325 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Basma hızı olarak 1 mm/dak. kullanılmış, numune boyutları; 31,7x12,7x6 mm olarak belirlenmiştir. Çapraz kırılma dayanımı deney düzeneği Şekil 3.6’da belirtilmiştir. Deneyler sonrasında dayanım değerleri aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.



$$R_{tr} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3.1)$$

Bu formülde; F kırılma için gerekli yükü (N), L destekler arası mesafeyi (mm), b numunenin enini (mm), h numunenin kalınlığını (mm) ifade eder.



Şekil 3.6. Çapraz kırılma dayanımı test düzeneği [56].

### 3.4.2. Sertlik Ölçümleri

Makrosertlik ölçümleri Wilson-Wolpert cihazı kullanılarak Brinell yöntemi ile (HB), mikrosertlik ölçümleri Buehler cihazında Vickers yöntemi ile (HV0,1) yapılmıştır. Makrosertlik ve mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı cihazlar Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Çalışmalarda; makrosertlik için her bir numuneden 7'şer ölçüm, mikrosertlik için ise her 0,25 mm'den olmak üzere toplam 12'şer ölçüm alınmış ve standart sapmaları hesaplanmıştır.



(a)

(b)

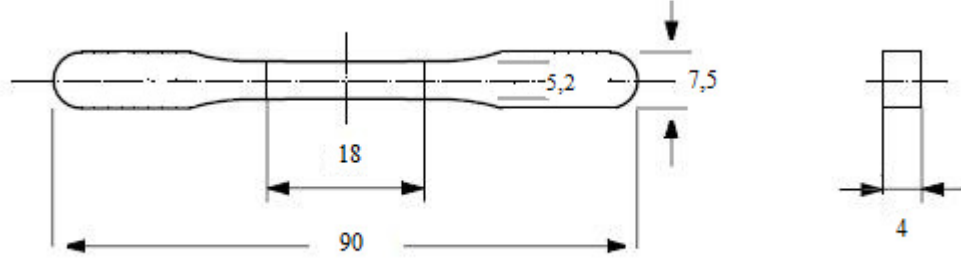
Şekil 3.7. Çalışmalarda kullanılan sertlik cihazları (a) makrosertlik, (b) mikrosertlik.

Numunelerin sinterlenmesi ve sonrasında yapılan soğutma işleminde farklı soğutma hızları uygulandığından dolayı farklı mikroyapılar oluşmuştur. Bu mikroyapıların belirlenmesinde mikrosertlik ölçümleri, numunenin soğutma işlemleri sonrası sertlik değişimlerini ölçmek için ise makrosertlik ölçümleri yapılmıştır.

### 3.4.3. Çekme Deneyleri

Deneyler Instron marka 10 ton kapasiteli çekme-basma cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyinde kullanılan numunelerin boyutları Şekil 3.8’de şematik olarak gösterilmiştir. Test hızı olarak 0,5 mm/dak seçilmiştir. Ölçümler, Astaloy CrA-1Cu-0,5C-UF4, Astaloy CrA-1Ni-0,5C-UF4 toz alaşımlarında 5’er numune üzerinden gerçekleştirilmiştir ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

Bu ölçümler sonucunda, iki farklı alaşım sisteminden elde edilen numunelerin çekme dayanımları belirlenmiştir.



Ölçüler mm olarak belirtilmiştir.

Şekil 3.8. Çekme deneyi numunelerinin şematik gösterimi [57].

#### 3.4.4. Mikroyapı Çalışmaları

Mikroyapı çalışmaları, Olympus marka optik mikroskopta yapılmıştır. Numuneler ilk olarak elmas testere ile kesilmiş daha sonra sırasıyla 100, 400, 600 ve 1000' lik zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Bu işlemden sonra numuneler 6  $\mu\text{m}$  ve 3  $\mu\text{m}$ 'lik elmas çözeltilerle parlatılmıştır. Parlatılan numuneler son olarak %4'lük pikral çözeltilisi ile dağlanmıştır.

#### 3.4.5. Gözenek Miktarının ve Küreselliğinin Ölçülmesi

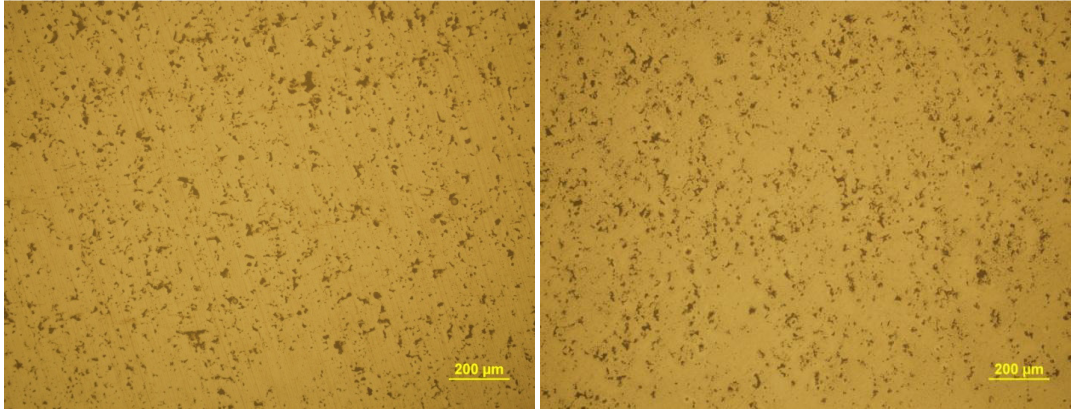
Dört farklı alarım sistemi ile üretilen numunelerin gözenek miktarları ve bu gözeneklerin küresellikleri Clemex adlı görüntü programı kullanılarak yapılmıştır. Programda kullanılmak üzere her bir numunenin farklı bölgelerinden Olympus marka optik mikroskopta 100x ile 3'er görüntü alınmıştır ve sonuçların ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

## BÖLÜM 4

### 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

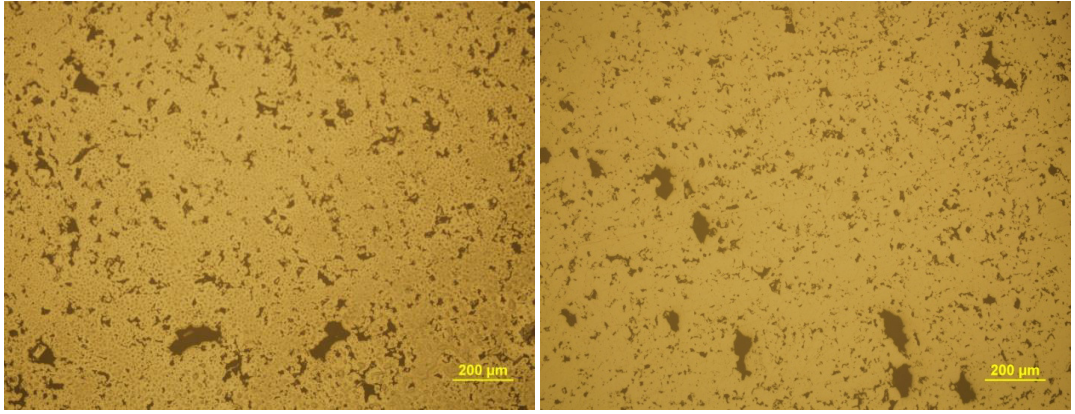
#### 4.1. Mikroyapı Çalışmaları

Mikroyapı çalışmaları; parlatılmış ve dağlanmış mikroyapı çalışmaları şeklinde iki kısımdan oluşmaktadır. Numunelerin 100x’de alınan parlatılmış görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu görüntülerde; Astaloy CrA-0,5C ve Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımlı numunelerin mikroyapılarında küçük gözenekler bulunurken, Cu’lı numunelerin mikroyapılarında ise daha büyük gözenekler gözlenmiştir. Bakırın sinterleme sırasında ergiyerek kısmi sıvı faz oluşturması ve tane sınırlarına yayınması sonucu oluşan bu büyük gözeneklerin büyüklüklerinin ortalama 70-100 mikron olduğu belirlenmiştir. Astaloy CrA-0,5C ve Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımlı numunelerdeki gözenek büyüklüklerinin ise yaklaşık olarak 5-20 mikron aralığında olduğu gözlenmiştir. Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımındaki büyük gözenek sayısı Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımına kıyasla daha fazladır.



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 4.1. Numunelerin parlatılmış yüzey görüntüleri (a) Astaloy CrA-0.5C (100 x) (b) Astaloy CrA-1Ni-0.5C (100 x) (c) Astaloy CrA-1Cu-0.5C (100 x) (d) Astaloy CrA-2Cu-0.5C (100 x).

Numunelerin gözenek miktarları ve gözeneklerin küresellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Numunelerdeki gözenek miktarının yaklaşık %10 olduğu, Cu’lu alaşımlarda büyük gözeneklerin oluşumuna bağlı olarak daha fazla gözenek miktarları belirlenmiştir. Astaloy CrA-1Cu-0,5C ve Astaloy CrA-2Cu-0,5C numunelerindeki gözenek miktarı ~%12’dir. Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımındaki büyük gözenek sayısı daha fazla iken, % gözenek miktarının 1Cu içeren alaşıma göre bir miktar düşük çıkması; Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımından elde edilen numunede, Cu miktarına bağlı olarak daha fazla yoğunlaşma olduğu ile açıklanabilir.

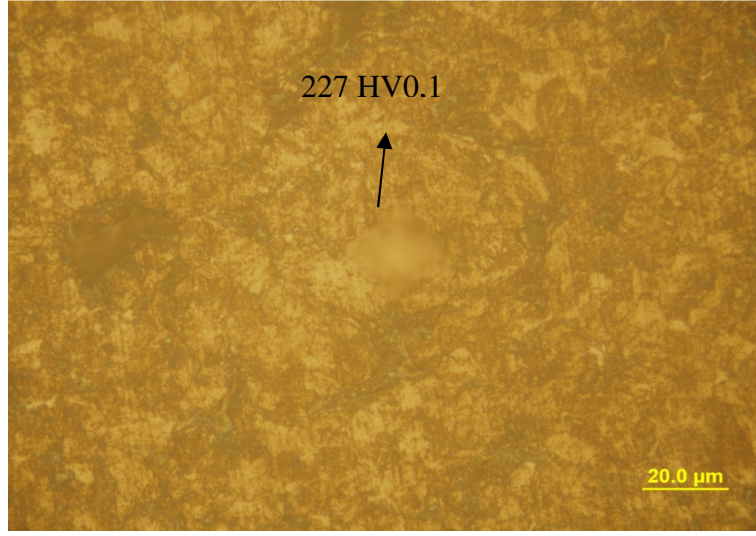
Çizelge 4.1. Numunelerin gözenek miktarları ve gözeneklerin küresellikleri.

Malzeme	(0.5°C/s)		(1.5°C/s)		(3°C/s)	
	Küresellik	Gözenek Miktarı (%)	Küresellik	Gözenek Miktarı (%)	Küresellik	Gözenek Miktarı (%)
Astaloy CrA-0.5C	0,88±0,01	9,7±0,9	0,89±0,01	9,1±0,5	0,88±0,02	9,1±0,9
Astaloy CrA-1Ni-0.5C	0,85±0,02	12,2±0,2	0,84±0,06	11,3±1,1	0,84±0,01	10,2±0
Astaloy CrA-1Cu-0.5C	0,78±0,02	11,9±0,6	0,78±0,02	11,2±0,4	0,79±0,01	12,2±0,5
Astaloy CrA-2Cu-0.5C	0,88±0,01	11,4±0,9	0,89±0,01	12,3±0,7	0,88±0,01	11,1±0,3

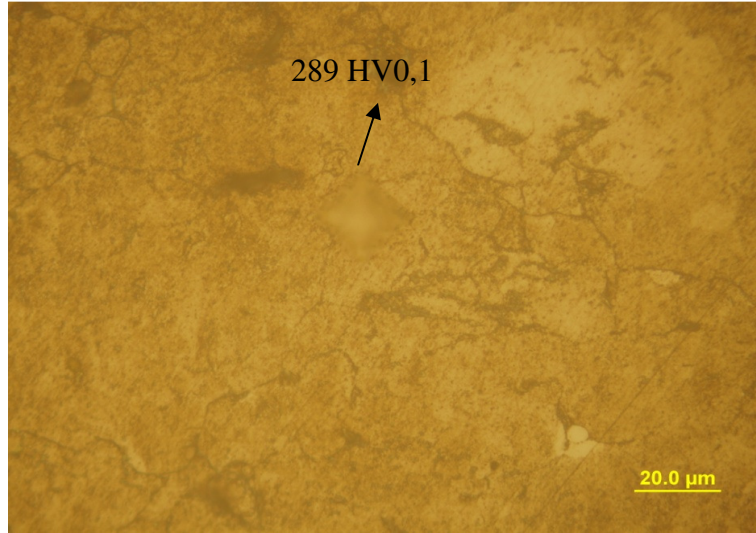
Puscas ve diğerlerinin Astaloy CrM(Fe-3Cr-0,5Mo) alaşımı üzerine bir çalışmada; 700 MPa basınç altında preslenen ve %90N<sub>2</sub>-%10H<sub>2</sub> atmosferinde 1120 °C'de 30 dakika sinterlenen numunelerdeki gözenek miktarları belirlenmiştir [34]. Numunelerdeki gözenekliliğin % 9,4-9,9 arasında değiştiği belirtilmiştir.

Literatür değerleri göz önünde bulundurulduğunda tez çalışmasındaki gözenek miktarları daha fazla çıkmıştır. Bunun nedeni olarak çalışmalarda kullanılan presleme basıncının(600 MPa) literatürde kullanılan presleme basıncına göre daha düşük olması gösterilebilir. Presleme basıncının düşük olması gözenek miktarını arttırmaktadır.

Parlatılmış yüzey görüntüsü çalışmalarından sonra, numuneler %4'lük pikral çözeltisiyle dağlanmış yüzey görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 4.2'de Astaloy CrA-0,5C alaşımının 0,5 °C/s ve 3 °C/s soğutma hızlarındaki dağlanmış mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



(a)



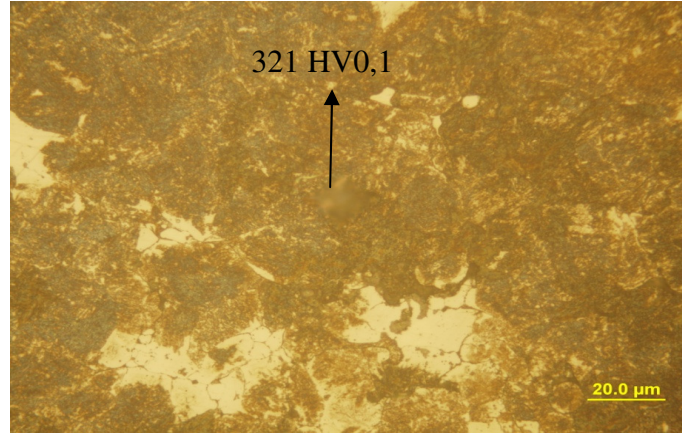
(b)

Şekil 4.2. Astaloy CrA-0,5C alaşımının dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) 0,5 °C/s (b) 3 °C/s.

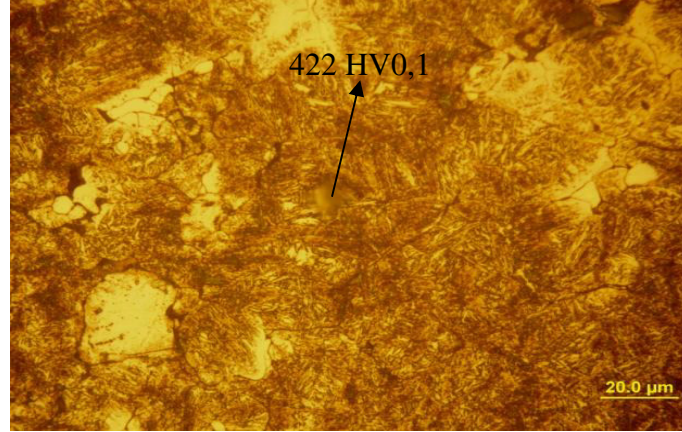
Astaloy CrA-0,5C alaşımında 0,5 °C/s ile soğutulmuş numuneden alınan mikroyapıdaki lamelli bölgenin sertliği 227 HV0,1 iken sinterleme ile sertleştirilmiş numunenin lamelli bölgesinden alınan sertlik değeri 289 HV0,1 olarak bulunmuştur. Gerosa ve diğerlerinin Cr içeren alaşımlar üzerine bir çalışmasında; % 0,5 C içeren Astaloy CrM alaşımının 0,8 °C/s ile soğutulması sonucunda mikroyapıda ~250 HV0,1 sertlik değerlerinde pörlit, ~400-450 HV0,1 sertlik değerlerinde beynit ve ~600-750 HV0,1

serliklerde ise martensit fazı gözlenmiştir [58]. Bu çalışma göz önünde bulundurulduğunda; 0,5°C/s ile soğutma sonrası kaba pörlit mikroyapısı elde edilirken soğutma hızı 3°C/s olduğunda kaba pörlit ve ince pörlit mikroyapısı elde edilmiştir.

Aşağıdaki Şekil 4.3'te Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımına ait dağlanmış mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



(a)



(b)

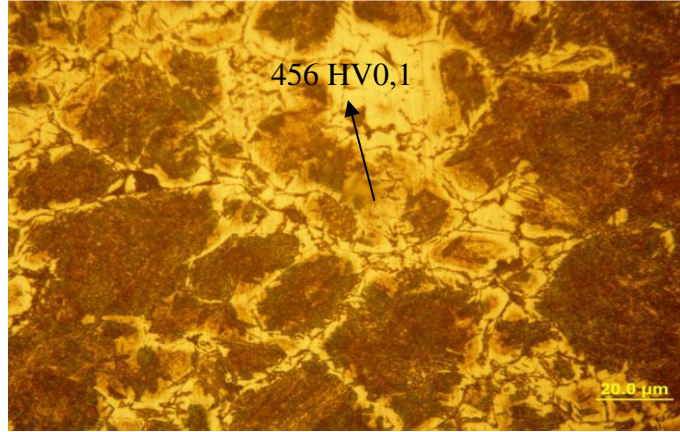
Şekil 4.3. Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımının dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) 0,5°C/s (b) 3°C/s.

Soğutma işleminin 0,5°C/s olduğu durumda mikroyapıda koyu bölgeden alınan sertlik değeri 321 HV0,1 bulunmuştur. Soğutma hızı arttırıldığında koyu bölgeden

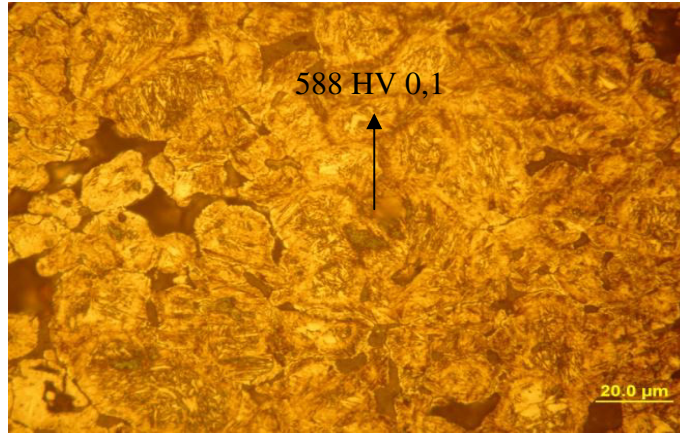


alınan sertlik değeri 422 HV0,1 olarak ölçülmüştür. Bu değerlere göre, yavaş soğutma koşullarında beynit ve ince pörlit mikroyapılarının ayrı olarak bulunduğu ve ayrıca iki mikroyapının birlikte bulunduğu bölgeler(kompozit bölgeler) gözlenmiştir. Beynit mikroyapısının bulunduğu bölgelerde ~350-400 HV0,1 sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Kompozit bölgelerde ise bu değerlerden daha düşük sertlikler bulunmuştur. Soğutma hızındaki artışa bağlı olarak beynit miktarında artış elde edilmiştir ve mikroyapı büyük oranda beynite dönüşmüştür. Hızlı soğutmada beynit miktarının, yavaş soğutmaya kıyasla daha fazla, pörlit miktarının ise daha az olduğu belirlenmiştir.

Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımından hazırlanan numunelerin dağlanmış mikroyapı görüntüleri Şekil 4.4'te verilmiştir.



(a)



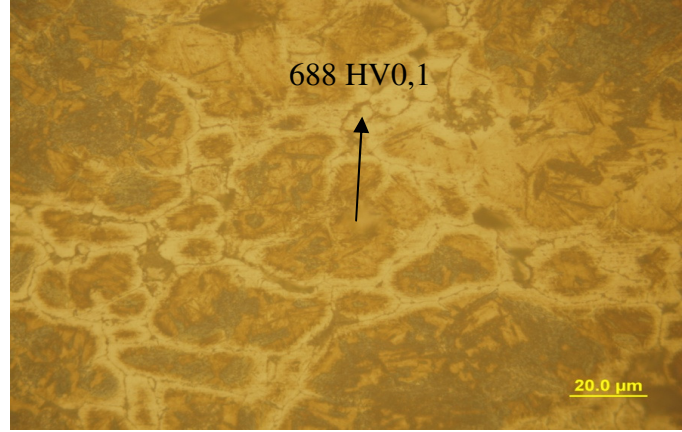
(b)

Şekil 4.4. Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımasının dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) 0,5 °C/s (b) 3 °C/s.

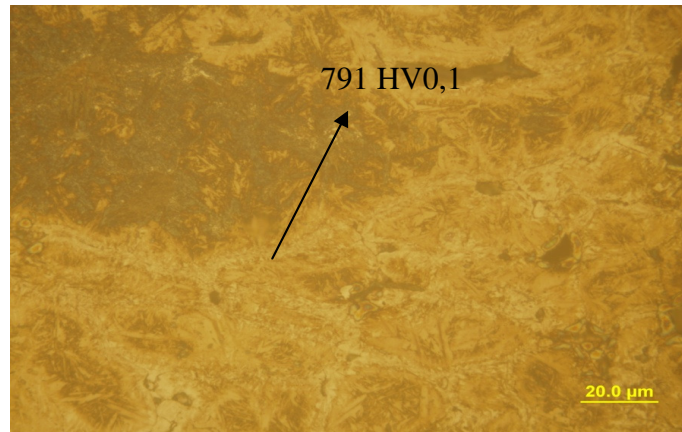
Yavaş soğutma sonrası kompozit bölgeden(açık+koyu bölge) alınan sertlik değeri 456 HV<sub>0,1</sub>'dir. Bu soğutma hızında mikroyapıda beynit ve ince pörlit görülmüştür. Mikroyapıda ayrıca sinterleme sonrası ergiyerek taneler arasına yayılan Cu fazı (açık renkli bölgeler) gözlenmiştir. Soğutma hızı 3 °C/s'ye çıkarıldığında açık renkli bölgeden alınan sertlik 588 HV<sub>0,1</sub> olarak belirlenmiştir. Bu soğutma hızında mikroyapıda beynit ve martensit fazı oluşmuştur. Bakırın sertliğinin düşük olması nedeniyle Cu ve diğer fazların oluşturduğu kompozit bölgelerden sertlik alınması sertliğin beklenenden düşük çıkmasına sebep olmuştur.

Numunelerde, soğutma hızının artmasına bağlı olarak mikroyapıda oluşan martensit ve beynit büyük gözeneklerde çatlak etkisine neden olmuştur. Bu nedenle, soğutma hızı arttıkça numune üzerine uygulanan yük düşük olsa dahi büyük ve düzensiz gözeneklerde çatlaklar oluşmuş ve ilerlemiş buna bağlı olarak kırılmalar gerçekleşmiştir [13].

Şekil 4.5'te Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımından hazırlanan numunelerin dağlanmış mikroyapıları verilmiştir. Numunelerde, Cu'nun sinterleme sırasında eriyerek belirli bölgelerde taneler arasına girmesi sonucu Cu fazı net bir şekilde görülmüştür. Bu faz mikroyapılarda açık renkli bölgeler olarak gözlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.5. Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımının dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) 0,5 °C/s (b) 3 °C/s.

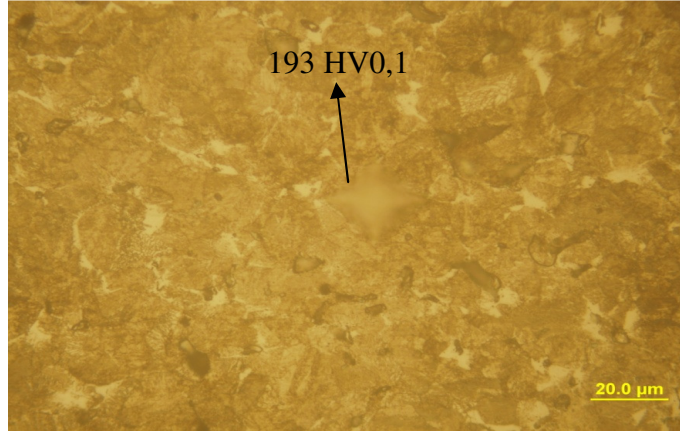
Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımı, dört farklı alaşım içerisinde sertleşebilirliği en fazla olandır. Soğutma koşullarına daha iyi cevap verdiğinden mikroyapıda düşük hızlarda dahi martensit ve beynit oluşumu görülmüştür. Yavaş soğutma koşulunda numunenin koyu bölgesinden alınan sertlik 688 HV<sub>0,1</sub> olarak llmştr. Numunede beynitin yoğun olarak bulunduğu martensit fazı ve beynit mikroyapısı elde edilmiştir. Bazı bölgelerdeki ölçümler beynit ve martensit kompozit bölgelerinden alındığı için sertlik değerleri beynit ve martensit sertliği arasında çıkmıştır. Soğutma hızı 3 °C/s olduğunda koyu bölgeden alınan sertlik 791 HV<sub>0,1</sub> değerindedir. Bu soğutma hızında mikroyapıda; çok büyük oranda martensitin, bazı bölgelerde ise beynitin ve kompozit bölgelerin olduğu belirlenmiştir.

Aşağıdaki izelge 4.2’de numunelere uygulanan sinterleme ile sertleştirme işlemleri sonucunda mikroyapıda oluşan fazlar verilmiştir.

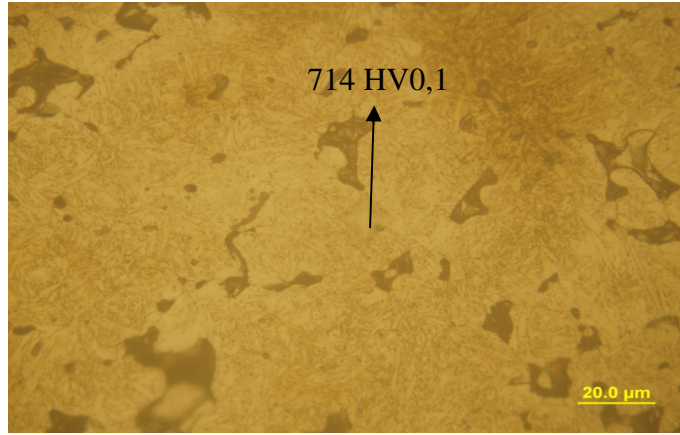
Çizelge 4.2. Astaloy CrA alaşımlarında sinterleme ile sertleştirme sonrası oluşan mikroyapılar.

Malzeme	0,5 °C/s	3 °C/s
Astaloy CrA-0,5C	Kaba Pörlit	Kaba+İnce Pörlit
Astaloy CrA-1Ni-0,5C	İnce Pörlit+Beynit	Beynit
Astaloy CrA-1Cu-0,5C	İnce Pörlit+Beynit	Martensit+Beynit
Astaloy CrA-2Cu-0,5C	Beynit+Martensit	Martensit+Beynit

İkincil ısıl işlem sonrası dağlanmış mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Bu görüntüler de sinterleme ile sertleştirme işlemi mikroyapı çalışmalarında olduğu gibi %4 pikral ile yapılmıştır. Astaloy CrA-0,5C alaşımının dağlanmış mikroyapı görüntüleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



(a)

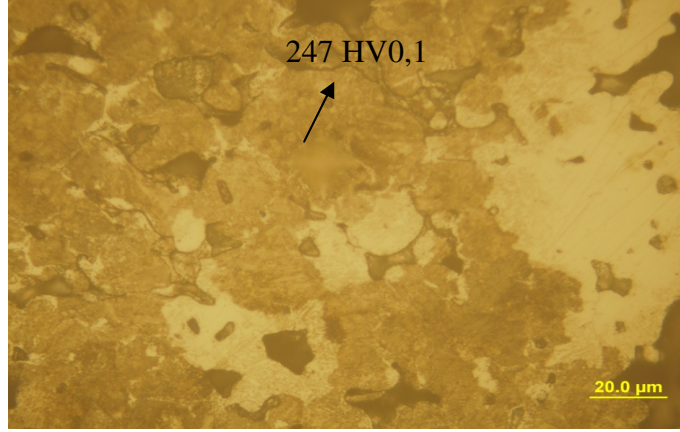


(b)

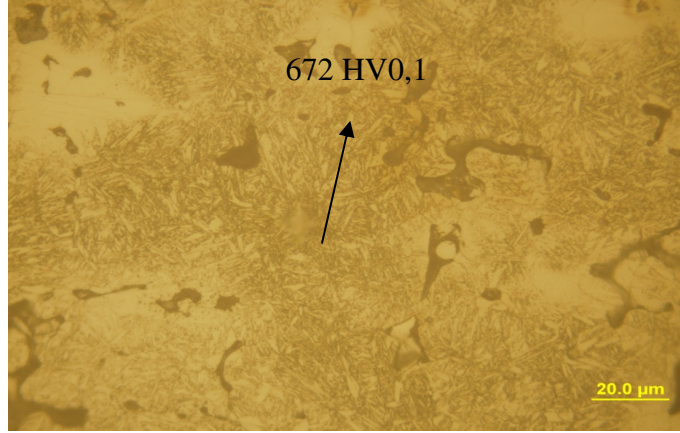
Şekil 4.6. Astaloy CrA-0,5 C alaşımının ısıl işlem sonrası dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) havada soğutma (b) suverme.

İkincil ısıl işlem sonrası numunelere iki farklı hızda soğutma işlemi uygulanmıştır. Havada soğutma işleminden sonra elde edilen mikroyapı görüntüsü incelendiğinde, lamelli bölgeden 193 HV<sub>0,1</sub> sertlik değeri ölçülmüştür. Bu soğutma hızında mikroyapı tamamen kaba pörlitten oluşmuştur. Su verme işleminden sonra açık bölgeden elde edilen sertlik değeri 714 HV<sub>0,1</sub>'dir. Sertleşebilirlik düşük olsa dahi soğutma hızının çok yüksek olmasından dolayı mikroyapıda %100'e yakın martensit fazı oluşmuştur.

Aşağıdaki Şekil 4.7'de Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımının ikincil ısıl işlemler sonrası elde edilen dağlanmış mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir.



(a)

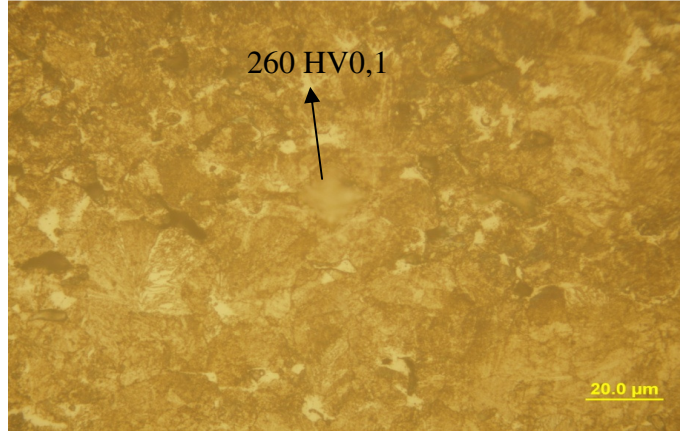


(b)

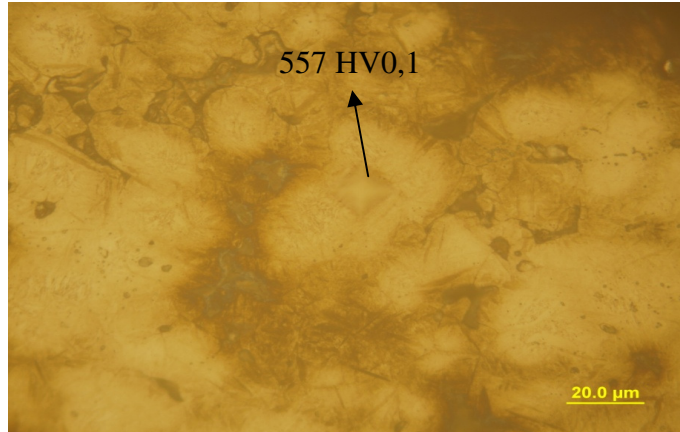
Şekil 4.7. Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımının ısıtılma sonrası dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) havada soğutma (b) suverme.

Havada soğutma sonrası koyu bölgeden alınan sertlik değeri 247 HV<sub>0,1</sub> suverme işleminden sonra ise 672 HV<sub>0,1</sub> olarak bulunmuştur. Havada soğutma işleminden sonra mikroyapıda çok miktarda ince ve az miktarda kaba pörlitin oluşturduğu kompozit bölgeler bulunurken, suverme işleminden sonra sertlik değerlerinde büyük bir artış görülmüş mikroyapı tamamen martensite dönüşmüştür.

Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımından elde edilen numunelerin ikincil ısıtılma sonrası dağlanmış mikroyapıları Şekil 4.8’de verilmiştir.



(a)



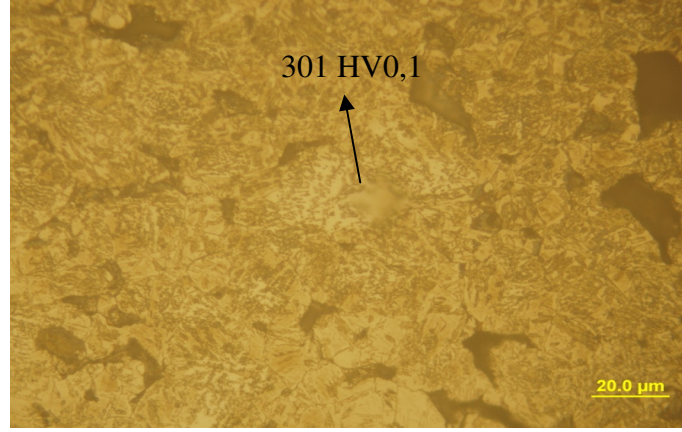
(b)

Şekil 4.8. Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımının ısı işlem sonrası dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) havada soğutma (b) suverme.

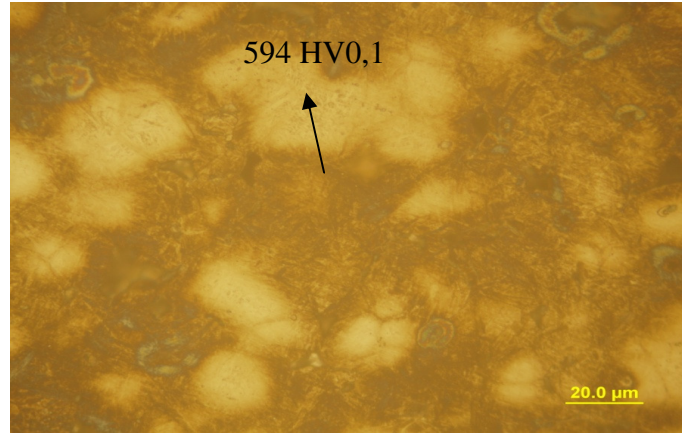
Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımının havada soğutma işleminin mikroyapı görüntüsü incelendiğinde açık bölgeden alınan sertlik 260 HV<sub>0,1</sub> olduğu görülmüştür. Suverme işleminden sonra açık bölgenin sertlik değeri 557 HV<sub>0,1</sub> olarak bulunmuştur. Havada soğutma sonrası mikroyapının ince ve kaba pörlitten oluştuğu görülmüştür. Ancak ince pörlit miktarı kaba pörlite göre çok fazladır. Suverme işlemi sonrası mikroyapının tamamen martensit fazından oluştuğu belirlenmiştir.

Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımının ikincil ısı işlemi sonrası elde edilen dağlanmış mikroyapı görüntüleri aşağıdaki Şekil 4.9'da verilmiştir. Havada soğutma işleminden sonra sertlik değeri(açık bölge) 301 HV<sub>0,1</sub> olarak bulunmuştur. Bu ısı işleminden

sonra mikroyapıda ince pörlit gözlenmiştir. Suverme işleminden sonra koyu bölgeden ölçülen sertlik değeri 594 HV<sub>0,1</sub>'dir. Mikroyapı tamamen sert faz olan martensitten oluşmuştur.



(a)

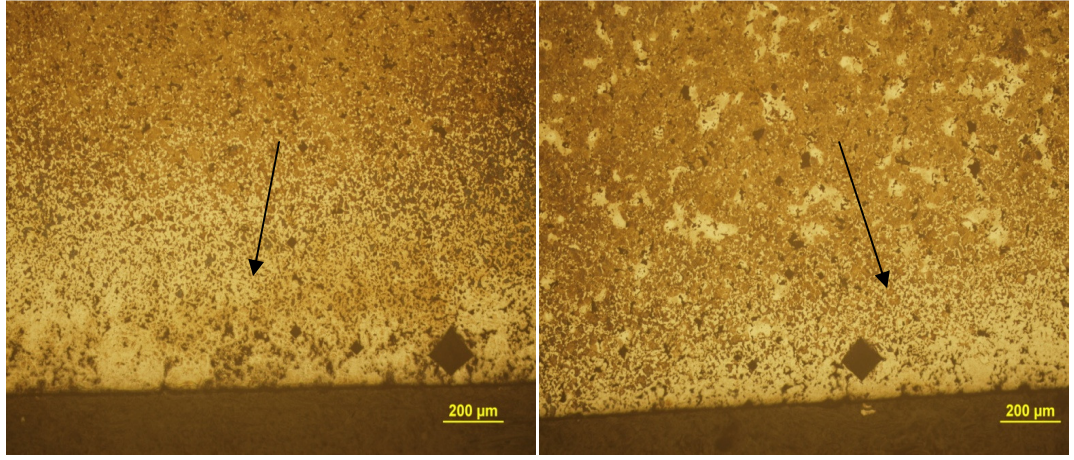


(b)

Şekil 4.9. Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımının ısı işlem sonrası dağlanmış mikroyapı görüntüleri (1000x) (a) havada soğutma (b) suverme.

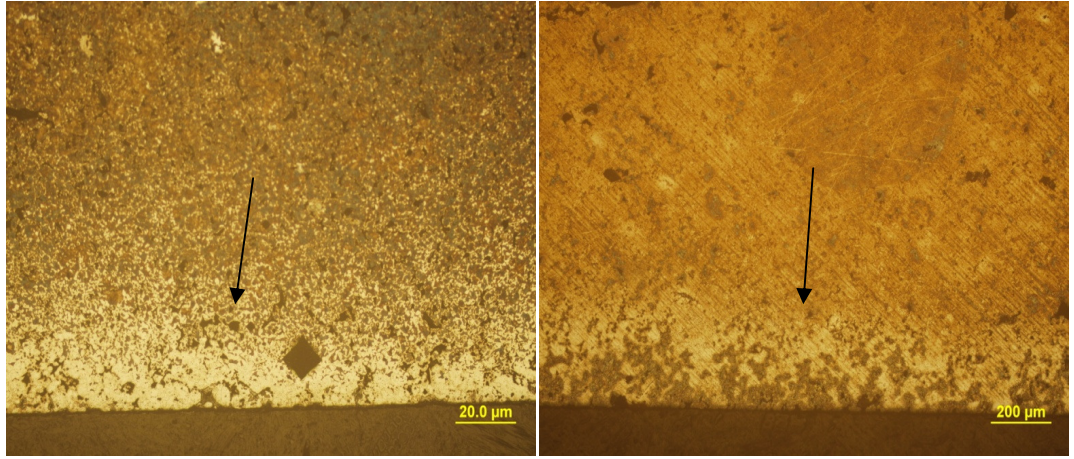
İkincil ısı işlemler sonrası yaptırılan kimyasal analizler sonucunda numunelerin C oranlarında önemli düşüşlerin gerçekleştiği görülmüştür. Bu düşüşler tüm numune boyunca gerçekleşmiş ve numunelerin kenarları boyunca da ferrit sünek fazı oluşmuştur. Şekil 4.10'da numunelerin kesitlerinden alınan ve ferrit tabakalarının ok işaretleriyle gösterildiği görüntüler verilmiştir.





(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 4.10. İkincil ısıt işlem sonrası dört farklı alaşımdan elde edilen numunelerin ferrit tabakası görüntüleri (100x) (a) Astaloy CrA-0,5C (b) Astaloy CrA-1Ni-0,5C (c) Astaloy CrA-1Cu-0,5C (d) Astaloy CrA-2Cu-0,5C

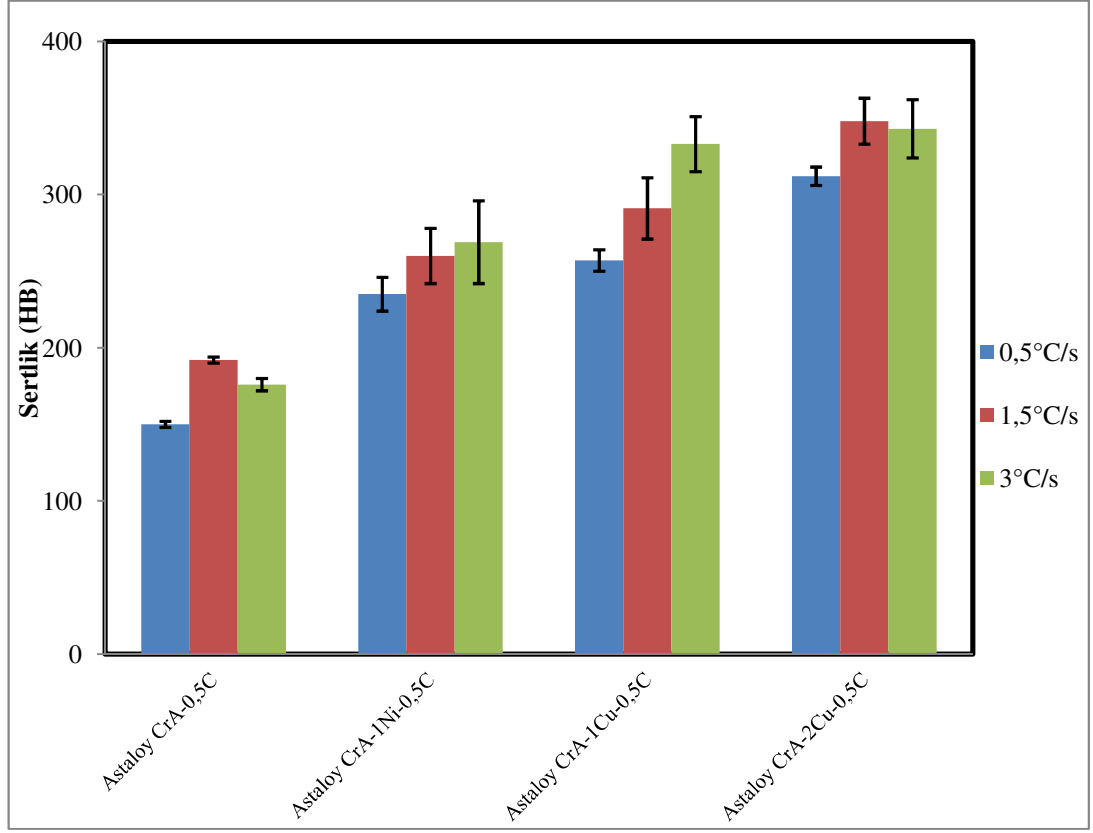
İkincil ısıt işlemlerde, havada soğutma ve su verme işlemleri %100N<sub>2</sub> ortamında gerçekleştirilmiştir. Havada soğutma ve su verme işlemleri sonrasında C kaybı gerçekleşmiştir. Havada soğutma sonrası numunelerin kenarları boyunca ferrit tabakası kalınlıkları; Astaloy CrA-0,5C alaşımlı numunede ~450 mikron, Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımlı numunede ~300 mikron, Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımından elde edilen numunede ~250 mikron, Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımlı numunede ise ~100 mikron olarak ölçülmüştür. Su verme işlemi sonrası numunelerin kenarları boyunca oluşan ferrit tabakalarının kalınlıkları; Astaloy CrA-0,5C alaşımlı

numunede ~150 mikron, Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımlı numunede ~200 mikron, Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımından elde edilen numunede ~150 mikron, Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımlı numunede ~250 mikron olarak belirlenmiştir. Bu sünek tabaka numunelere kaplama görevi görmüş ve uygulanan yüklemeler sırasında oluşan plastik enerjiiyi emerek kırılmaların gecikmesi sağlanmıştır [59]. Ayrıca numunelerdeki C oranının azalması, su verme sırasında oluşan martensitin sertliğini ve dolayısıyla gevrekliğini düşürerek çatlak oluşumuna bağlı kırılmaları geciktirmiştir [9].

## **4.2. Mekanik Özellikler**

### **4.2.1. Sertlik Ölçümleri**

Dört farklı alaşımda yapılan sinterleme ile sertleştirme işlemleri sonucunda elde edilen çapraz kırılma deneyi numunelerinde yapılan sertlik ölçümleri (Brinel sertliği HB) soğutma hızındaki artışa bağlı olarak sertliğin arttığını göstermiştir. Bu artış Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Deneyler, Tozmetal firmasının sinterleme ile sertleştirme yapılan fırınında iki bölümde gerçekleştirilmiştir. Birinci deneyde Astaloy CrA-1Cu-0,5C ve Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımlı numunelerle sinterleme ile sertleştirme işlemi gerçekleştirilirken, diğer deneyde ise Astaloy CrA-0,5C ve Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımlı numunelerle sinterleme ile sertleştirme işlemleri yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda; 1Cu ve 1Ni içeren numunelerde sertlik sinterleme sonrasındaki soğutma hızındaki değişime bağlı olarak artmıştır. Ancak Astaloy CrA-0,5C ve Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımlı numunelerdeki sertlikte 0,5°C/s’den 1,5°C/s’ye artış görölürken, 1,5°C/s’den 3°C/s’ye geğtikten sonra bir azalma gözlenmiştir. Bu değişimin, 2. deneyde, sinterleme ile sertleştirme işleminde kullanılan 3°C/s’lik soğutma hızında, yeterli soğutma hızına ulaşılamaması ile ilgili olduğu düşünölmüştür.



şekil 4.11. Astaloy CrA alaşımlarının soğutma hızlarına göre makrosertlik değerlerinin değişimi.

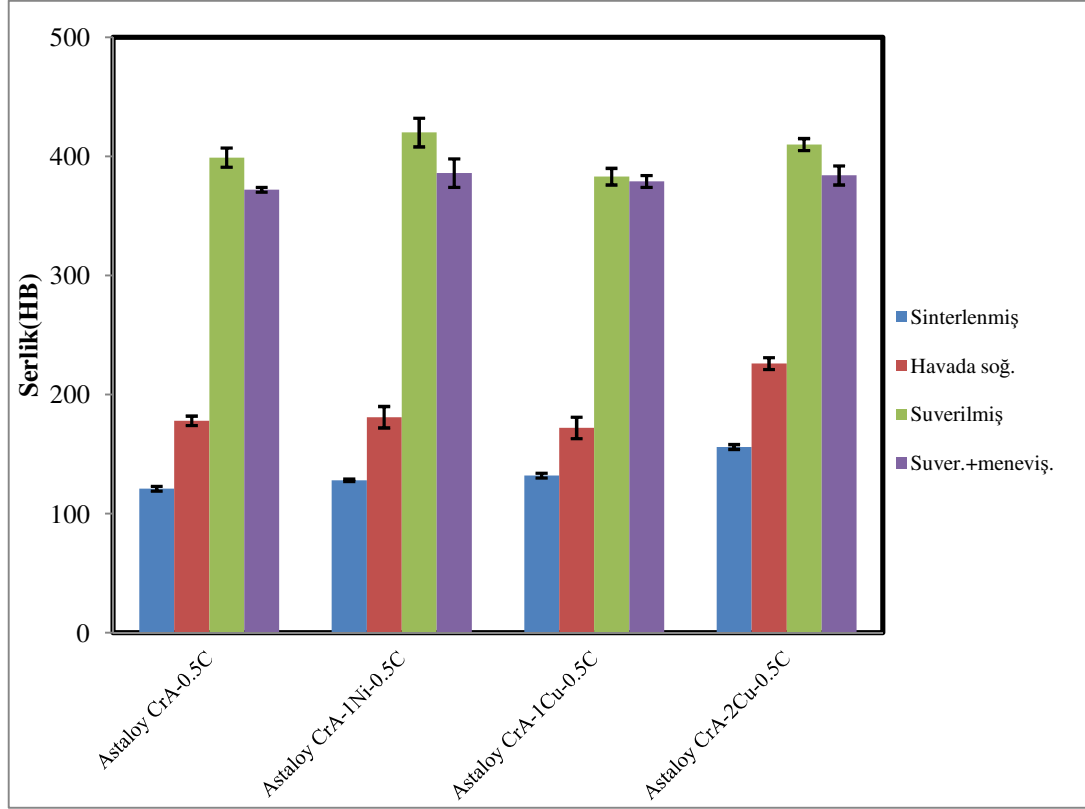
Sinterleme ile sertleştirme işlemi sonucunda elde edilen sertlik değerleri incelendiğinde; en fazla sertlik artışının yaklaşık %30 ile Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımında olduğu görülmüştür. Üç farklı soğutma hızında da en fazla sertlik değerinin 2Cu içeren numunede olduğu görülmüştür. Bakır, toz metal parçalarda sertleşebilirliği arttıran ve özellikle de sıvı fazlı sinterlemede sıvı fazı oluşturarak daha yoğun ve boyutsal toleranslar içerisinde parça imalatını sağlayan alaşım elementidir [24,1]. Bu nedenle Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımında bakır miktarına bağlı olarak diğer numunelere kıyasla sertleşebilirliği daha fazla ve katı fazlı sinterlemede belirli bölgelerde ergimesi sonrası daha yoğun yapılar elde edilmiştir. Yoğunluğun artması mekanik özellikleri arttırdığından, sertlik değerleri diğer alaşımlardan elde edilen numunelere kıyasla daha yüksektir.

Astaloy CrA-0,5C içeren numunenin sertlikleri, üç farklı soğutma hızında da en düşük değerlerdir. Alaşım elementi olarak sadece C'un olması bu numunelerde yeterli sertleşebilirlik özelliğinin elde edilememesine neden olmuştur.

Bakır ve nikel oranının %1 olduğu numunelerdeki sertlik değerleri, diğer alaşımdan elde edilen numunelere kıyasla birbirine en yakın değerlerdir. Ancak Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımındaki sertleşebilirlik ve buna bağlı olarak sertlik değerleri Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımına kıyasla biraz daha fazladır.

Astaloy CrA-1Cu-0,5C ve Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımlarının sertlikleri karşılaştırıldığında, 2Cu'lu numunenin sertlik değerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Katı fazlı sinterlemede bakırın ergimesi ile 2Cu'lu numunedeki yoğunlaşma, 1Cu'lu numunedeki yoğunlaşmaya kıyasla daha fazladır. Yoğunluğun ve alaşım elementi miktarının, 2Cu'lu numunede soğutma hızının artışına bağlı olarak daha fazla martensit elde edilmesini sağlamıştır.

Dört farklı alaşımın, 1070°C'den havada soğutma, suverme ve menevişleme işlemleri sonucunda sertlik değerleri Şekil 4.12'de verilmiştir. Bu işlemin amacı, sinterleme sıcaklığına yakın bir sıcaklıktan (1070°C) yapılan farklı soğutma işlemlerinin mekanik özelliklere etkisini incelemektir.



Şekil 4.12. Astaloy CrA alaşımlarına 1070°C’de 20 dakika uygulanan ikincil ısı işlemler sonucu elde edilen makrosertlik değerleri.

Havada soğutma işlemi sonrasında; dört alaşımdan elde edilen numunelerin mikroyapılarında ince pörlitin ve kaba pörlitin bir arada bulunduğu kompozit yapılar gözlenmiştir. Suverme işleminde soğutma hızının çok yüksek olması mikroyapıda %100’e yakın martensit fazının oluşumuna neden olmuştur. Sert martensit fazı, alaşımların sertlik değerlerinde ~%100 artış sağlamıştır. Suverilmiş numunelerin menevişlenmesi sonrasında menevişlenmiş martensit fazı elde edilmiş, sertlik değerlerinde %1-8 arasında düşüşler elde edilmiştir. En fazla azalma %8 ile Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımlı numunede gerçekleşirken en az azalma ise %1 ile Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımında gerçekleşmiştir.

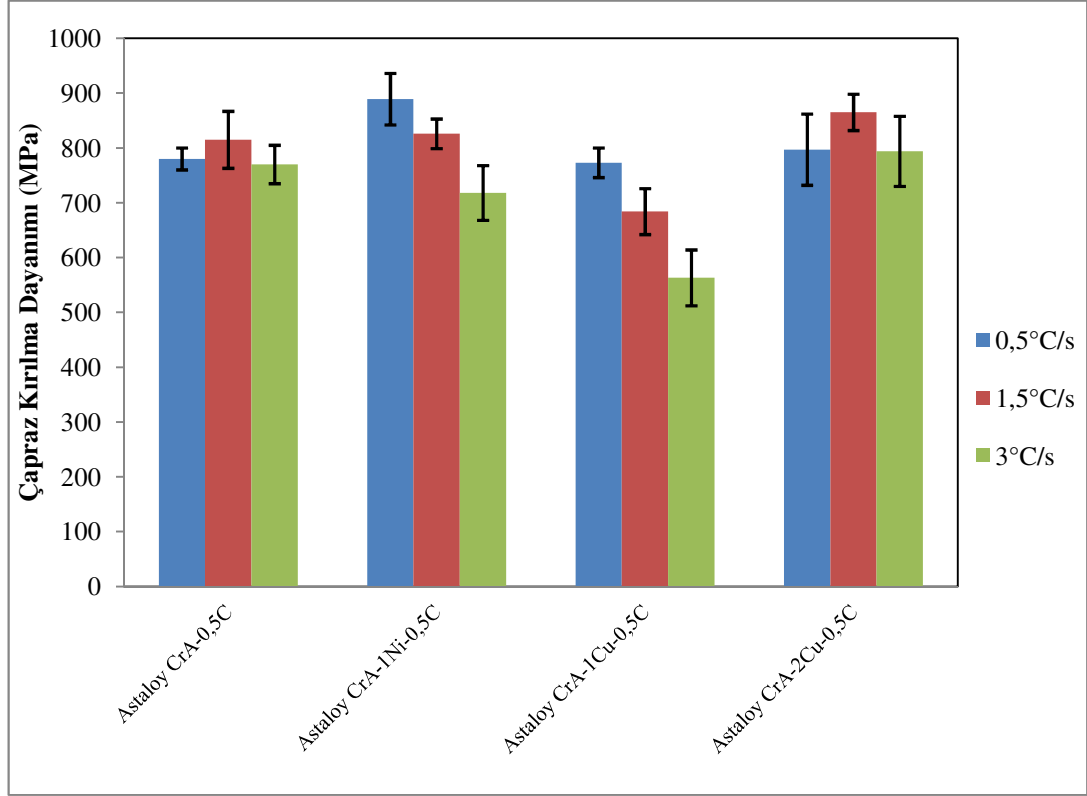
Frykholm ve arkadaşları, Astaloy CrA-1Cu ve Astaloy CrA-1Ni ile alaşımlayarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir [54]. Cu’lu numune 3,5°C/s ile soğutulduğunda sertliği 337 HV10 iken, 2°C/s ile soğutulan Ni’li numunenin sertliği 242 HV10’dur.

Larsson ve arkadaşları, Astaloy CrA içerisinde ağırlıkça 1 ve 2 oranlarında Cu ve Ni ve 0,5C katarak sinterleme ile sertleştirme işlemlerinin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir [52]. Soğutma hızları 1°C/s ve 5°C/s'dir. Yavaş soğutma sonrası sertlik değerleri; 1Cu'lu numune için 187 HV10, 2Cu'lu için 211 HV10, 1 Ni'li için 201 HV10 olarak elde edilmiştir. Hızlı soğutma sonrası ise sertlik değerleri; 1Cu'lu için 320 HV10, 2Cu'lu için 340 HV10, 1Ni'li için 366 HV10 şeklindedir.

Sinterleme ile sertleştirilmiş Astaloy CrA-1Ni-0,5C, Astaloy CrA-1Cu-0,5C ve Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımların sertlik değerlerinin literatürdeki değerlere yakın değerler olduğu görülmektedir. Ancak Astaloy CrA-0,5C alaşımında alaşım elementinin olmaması yeterli sertleşebilirlik sağlayamadığından sertlik değerleri diğer üç alaşıma göre düşük çıkmıştır.

#### **4.2.2. Çapraz Kırılma Dayanımı Ölçümleri**

Endogaz ortamında 20 dakika sinterlendikten sonra üç farklı soğutma hızında sinterleme ile sertleştirilmiş numunelerin çapraz kırılma dayanım değerleri ölçülmüştür. Bu değerler Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde değerlerin 600-900 MPa değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Çapraz kırılma deneyi de sertlik deneyinde olduğu gibi iki aşamada gerçekleşmiştir. Birinci aşamada; Astaloy CrA-1Cu-0,5C ve Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımlarından oluşan numuneler Tozmetal firmasında sinterleme ile sertleştirme işlemine maruz bırakılmıştır. İkinci aşamada ise; firmanın taşınması sonrası, aynı fırında Astaloy CrA-2Cu-0,5C ve Astaloy CrA-0,5C alaşımlı numunelere sinterleme ile sertleştirme işlemi uygulanmıştır.



şekil 4.13. Sinterleme ile sertleştirilmiş numunelerin çapraz kırılma dayanımı değerleri.

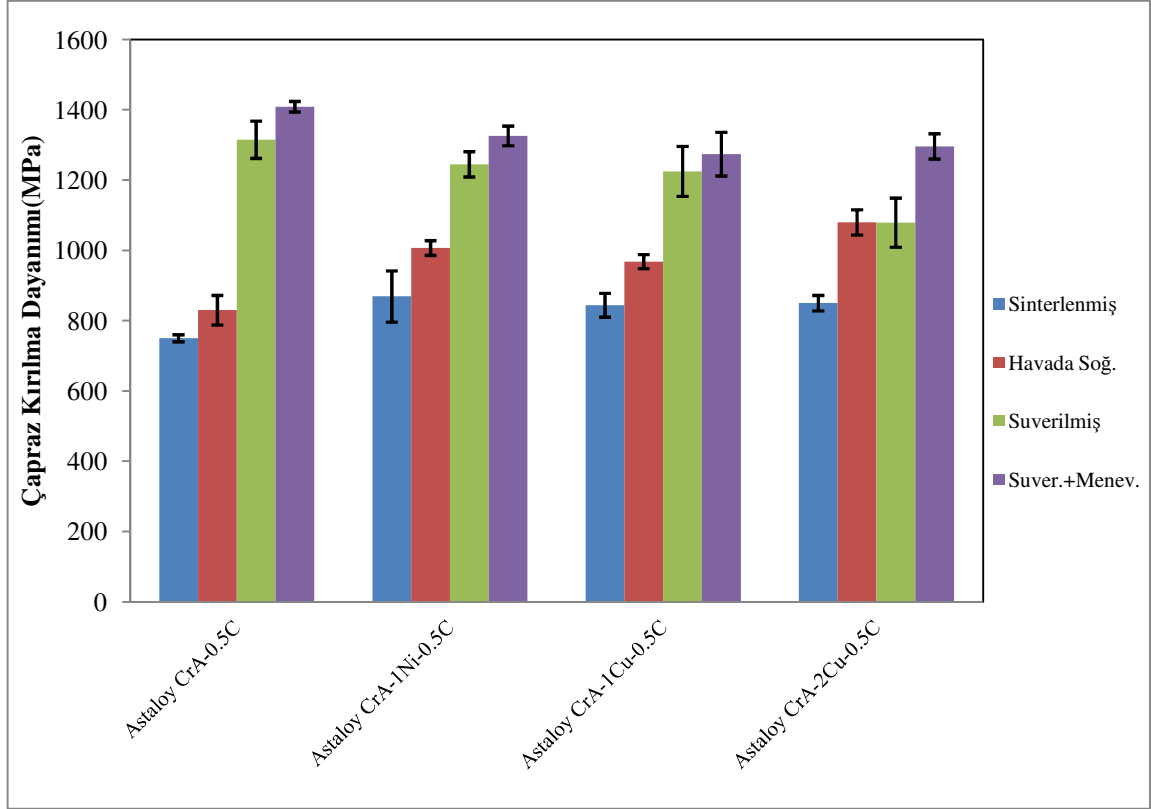
Astaloy CrA-1Cu-0,5C ve Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımlarında soğutma hızıyla orantılı sertlik artışına bağlı olarak çapraz kırılma değerlerinde dūřuř gerçekleşmiştir. Astaloy CrA-2Cu-0,5C ve Astaloy CrA-0,5C alaşımlarında 3°C/s soğutma hızıyla yapılan işlem sonrasında da çapraz kırılma dayanım değerlerinde bir dūřuř olduğu görülmüştür. Sertlik artışına bağlı olarak çapraz kırılma dayanımlarında gerçekleşen bu dūřuřün nedeni olarak, yüksek matris sertliğine (400-500 HV0,1) ulaşılan parçalarda dūřuk yüklemelerde dahi gerçekleşen çatlak oluşumu ve ilerlemesine bağlı olarak gerçekleşen kırılmalar (entik etkisi) gösterilmiştir [13]. Bu kırılma, gözenek geometrisine ve byklğine bağlı olarak değişmektedir. Büyük ve düzensiz gözenek çevrelerinde oluşan kırılınan gevrek fazlar bu gözeneklerde daha kolay çatlak oluşurmakta ve kırılmalara neden olmaktadır. Numunelerin apraz kırılma dayanımı değerleri incelendiğinde Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımında yaklaşık %27'lik, Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımında ise %19'luk bir dūřuř gerçekleşmiştir. Bakır içeren numunede nikel içeren numuneye göre dūřuřün daha

fazla olmasının nedeni, Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımında bakırın sinterleme sırasında ergiyerek büyük ve düzensiz gözenekler oluşturması ve buna bağlı olarak bu bölgelerde kırılmaların daha kolay gerçekleşmesidir. İkinci deneyde gerçekleştirilen sinterleme ile sertleştirme işlemi sonucunda Astaloy CrA-0,5C ve Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımlarında 1,5°C/s' de çapraz kırılma dayanımı değerlerinde bir artış görölmüştür. Bu iki numunede, soğutma sırasında oluşan martensit ve beynitin büyük ve düzensiz gözeneklerde gerçekleşen çatlak oluşumu ve ilerlemesine yetecek miktarda olmadığı görölmüştür.

Soğutma hızı 0,5°C/s olduğunda en yüksek çapraz kırılma dayanımı değeri Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımda elde edilmiştir. Soğutma hızı 1,5°C/s ve 3°C/s'ye çıkarıldığında en yüksek değerler Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımından ölçölmüştür. Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımında bakırın sinterleme sırasında daha yoğun bir mikroyapı oluşturması çapraz kırılma dayanımı değerlerinin diğer üç alaşıma göre daha yüksek olmasını sağlamıştır.

Bu alaşımların ikincil ısıl işlemleri sonucunda çapraz kırılma dayanımları elde edilmiştir. Su verilmiş numunelere 200°C'de 1 saat süre ile menevişleme yapılmış ve çapraz kırılma dayanımları ölçölmüştür. Ölçüm sonuçları Şekil 4.14'te belirtilmiştir. Değerler incelendiğinde sinterleme ile sertleştirme işleminde olduğu gibi bir düşüşün olmadığı, sertlik artışıyla doğru orantılı bir Şekilde apraz kırılma dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu görölmüştür.





Şekil 4.14. İkincil ısı işlem çapraz kırılma dayanımı değerleri.

İkincil ısı işlem uygulanan numuneler kesit olarak incelendiğinde dış bölgelerini sünek ferrit tabakasının kapladığı belirlenmiştir. Bunun üzerine yapılan kimyasal analizlerde, bütün numunelerde numune boyunca karbon miktarında önemli bir düşüşün gerçekleştiği görülmüştür. Kimyasal analizler sonucunda numunelerdeki C miktarları Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Sinterlenmiş ve 1070°C’de 20 dakika süre ile tavlandıktan sonra havada soğutulmuş alaşımlardaki karbon miktarı.

Malzeme	Astaloy CrA-0.5C	Astaloy CrA-1Ni-0.5C
	Karbon (%)	Karbon (%)
Sinterlenmiş	0.51	0.53
Havada soğutulmuş	0.27	0.34
Suverilmiş	0.42	0.39

Havada soğutma ve su verme işlemleri azot ortamında gerçekleştiği için numunelerin C oranları önemli ölçüde düşmüştür. Bu düşüşün nedeni olarak; azot gazının %100 saflıkta olmaması, içerisinde hava kalması dolayısıyla numunelerdeki C’un oksijen ile tepkimeye girerek CO<sub>2</sub> oluşturması ve ortamdan uzaklaşması gösterilmiştir [7].

İkincil ısı işlemlerde numunelerin dış bölgelerinde, tüm kenarlar boyunca ferrit tabakası oluşmaktadır. Ferrit tabakası, sünek bir kaplama gibi tüm numuneyi kaplayarak numunenin yüzeyine uygulanacak normal kuvvetlerin oluşturduğu plastik enerjinin emilmesini sağlamaktadır [59]. Böylelikle, numuneler bu kuvvetlere daha fazla dayanarak düşük yüklerde ani kırılmamaktadır. Ayrıca numunelerde meydana gelen C kaybı, işlemler sonucunda oluşan martensitin sertliğinde ve dolayısıyla kırılabilirliğinde düşüşe neden olmuştur. Numunede C kaybı olmadığı durumlarda oluşan martensitin sertliği 650 HB iken, C kaybı ile birlikte matensitin sertliği yaklaşık 500-550 HB’ye düşmüştür [9]. Bu nedenlerden dolayı, ikincil ısı işlemler sonucu artan soğutma hızıyla oluşan martensit fazının artan miktarına rağmen numunelerde çatlak oluşumu ve ilerlemesine bağlı olarak kırılmalar gözlemlenmemiştir ve çapraz kırılma dayanımlarında bir artış meydana gelmiştir. Bu konu, mikroyapı çalışmaları kısmında görsel olarak da incelenmiştir.

Menevişleme sonrasında çapraz kırılma dayanımı değerlerinde yaklaşık %4-20 arası değişim gerçekleşmiştir. En fazla değişim Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımında numunede gerçekleşirken en az değişim ise Astaloy CrA-1Cu-0,5C'lı numunede gerçekleşmiştir. Menevişleme sonrası düşen sertliğe bağlı olarak çapraz kırılma dayanımı değerlerinde de artış meydana gelmiştir. Bu durum, düzensiz ve büyük gözeneklerde oluşabilecek çatlak oluşumu ve ilerlemesini ve devamında düşük yüklemelerde gerçekleşen kırılmaların engellenmesini sağlamıştır.

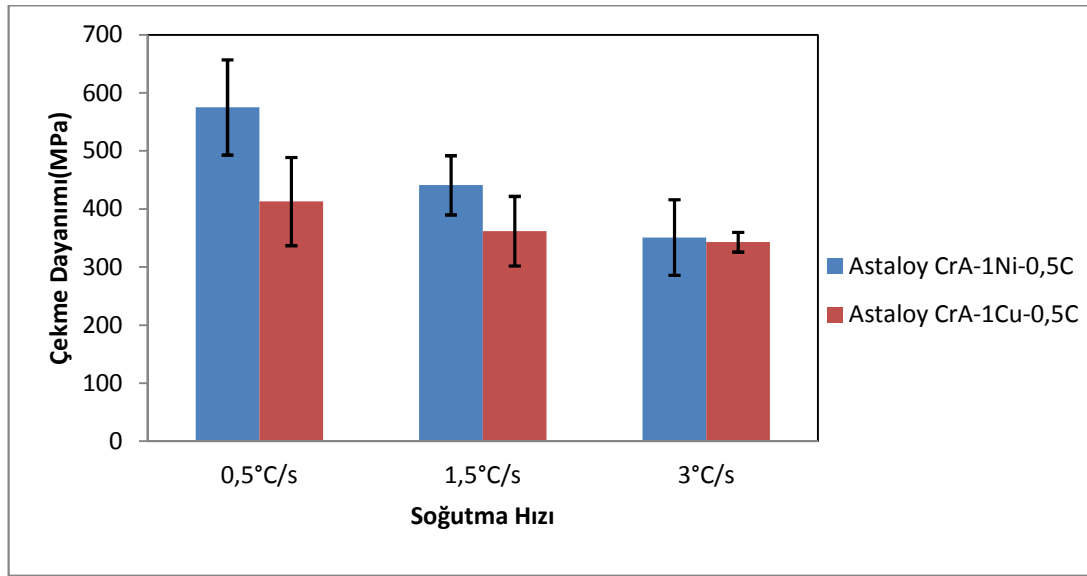
Çapraz kırılma dayanımı değerleri incelendiğinde, Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımının suverilmiş numunesinde bir artış olmadığı görülmüştür. Bakır alaşım elementleri sinterleme sırasında eriyerek büyük boşluklar bırakmıştır. Buna bağlı olarak, yükleme sırasında çok sayıdaki büyük ve düzensiz gözeneklerde sert fazlardan dolayı oluşan ve ilerleyen çatlaklar Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımının çapraz kırılma dayanımının artmasını engelleyerek dört alaşım içerisinde en düşük değerlerin elde edilmesine neden olmuştur. Menevişleme sonrasında ise en fazla artış, sertlik düşüşü ve kırılmaların azalmasıyla Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımında gerçekleşmiştir.

Engström ve arkadaşları; Astaloy CrM (3Cr-0,5Mo)-0,6 C alaşımında sinterleme ve soğutma hızlarının mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Soğutma hızları sinterleme için 0,25-0,8°C/s, ve sinterleme ile sertleştirme için 2-3°C/s'dir [29]. Sinterleme işlemi sonucunda numunenin çapraz kırılma dayanımı değeri 1650 MPa, sinterleme ile sertleştirme işlemi sonrasında ise çapraz kırılma dayanımı değeri 1818 MPa elde edilmiştir.

Sinterleme ile sertleştirme sonucu dört alaşımdan elde edilen çapraz kırılma dayanımları literatürdeki değerlere göre daha düşüktür. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan toz alaşımı tez çalışmasında kullanılan alaşımlara göre daha fazla alaşım elementi içermektedir. Bu durum, literatürdeki değerlerin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Yapılan ikincil ısıl işlemler sonrası da literatürdeki değerlere göre düşük değerler elde edilmiştir.

### 4.2.3. Çekme Dayanımı Ölçümleri

Çekme dayanımı ölçümleri, numune hazırlamadaki zorluklardan ve ölçümlerde oluşan büyük hata paylarından dolayı deneyler sadece Astaloy CrA-1Ni-0,5C ve Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımlardan oluşan sinterleme ile sertleştirilmiş numunelere uygulanmıştır. Deneysel ölçümlerin sonuçları Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Bu sonuçlardan, soğutma hızındaki artışa bağlı olarak çekme dayanımında çapraz kırılma dayanımında olduğu üzere bir düşüş gerçekleşmiştir. Soğutma hızındaki artış, mikroyapıda sert ve kırılman fazların artışını sağlamıştır. Bu artış ile birlikte büyük ve düzensiz gözeneklerde yük uygulanırken oluşabilecek gerilme yığılmaları çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile daha düşük dayanım değerlerine çıkmasına neden olmuştur.



Şekil 4.15. Soğutma hızına göre numunelerin çekme dayanımı değerleri.

Çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, üç farklı soğutma hızında da yüksek değerlerin Ni içeren numunelere ait olduğu görülmüştür. Bakır içeren numunelerde alaşıma sonradan eklenen Cu alaşım elementleri sinterleme sırasında ergidiği için büyük ve düzensiz boşluklar bırakmaktadır. Bu boşluklar çekme deneyleri sırasında daha düşük kuvvetlerde çatlak oluşturmuştur. Bu durum çatlak ilerlemesini beraberinde getirerek son aşamada Ni'li numuneden daha erken dayanım değerlerinde kırılmaya neden olmuştur.

Nikel içeren numunelerin çekme dayanımı değerleri 575-351 MPa aralığında değişmektedir. Soğutma hızı artışına bağlı olarak gerçekleşen bu düşüş %40 civarındadır. Bakır içeren numunelerin çekme dayanımı değerleri ise 413-343 MPa aralığında değişmektedir. Çekme dayanımındaki bu düşüş yaklaşık olarak %17'dir. Yüzde uzama miktarları ise iki alaşımda da yaklaşık olarak %2 olarak belirlenmiştir. Bakırlı numunelerdeki yüzde uzamalar Ni alaşımlı numunelere kıyasla yaklaşık %20 daha azdır. Bunun nedeni olarak Cu ile alaşımlanmış numunelerdeki büyük gözeneklerin varlığından dolayı gerçekleşen erken kırılmalar olarak gösterilmiştir.

Engström ve arkadaşlarının; Astaloy CrM (3Cr-0,5Mo)-0,6C alaşımını kullandıkları bir çalışmalarında soğutma hızı olarak 0,25-0,8 °C/s ve 2-3 °C/s kullanmışlardır [29]. Yavaş soğutma sonucunda numunenin çekme dayanımı 953 MPa, hızlı soğutma işlemi uygulandığında ise çekme dayanımı 1144 MPa elde edilmiştir.

Engström ve arkadaşlarının bir çalışmasında, içerisinde ağırlıkça 1,8Cr-0,6C ve 1,8Cr-1Ni-0,6C olan numuneler 1120 °C'de 30 dakika süre ile %90N<sub>2</sub>-%10H<sub>2</sub> ortamında sinterlenmiştir [50]. Numuneler, 0,5 °C/s ve 2 °C/s'de soğutulmuştur. Yavaş soğutma sonrası; 1,8Cr-0,6C alaşımının çekme dayanımı 610 MPa, 1,8Cr-1 Ni 0,6C alaşımının çekme dayanımı ise 641 MPa elde edilmiştir. Soğutma hızı arttığında ise sadece C içeren numunede çekme dayanımı 698 MPa iken, Ni'li numunede 845 MPa bulunmuştur.

Engström ve arkadaşlarının Astaloy CrA alaşımlarıyla yaptıkları bir çalışmada, 0,6 grafit ve 1Ni-0,6grafit katkılı numunelerde % uzama miktarları yaklaşık olarak %2 bulunmuştur [50].

Yapılan çalışmalar sonucu; Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımının 0,5 °C/s ile soğutulması sonrası çekme dayanımı literatür ile benzerlik gösterirken Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımında ise daha düşük değerler elde edilmiştir. Soğutma hızı 3 °C/s olduğunda ise her iki alaşımda da çekme dayanımı düşmüş ve literatürdeki değerlere kıyasla daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Numunelerin %uzama miktarları ise literatür değerleriyle uyumlu değerlerdir.

#### 4.2.4. Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri 100g yük altında yapılmıştır. Her numuneden kesit boyunca 0,25 mm aralıklarla 15 ölçüm alınmıştır. Sinterleme ile sertleştirilmiş numunelerin, 0,5 °C/s ve 3 °C/s soğutma hızlarında elde edilen mikrosertlik değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bu ölçümler sonucunda, soğutma hızının artışına bağlı olarak numunelerde beyrit ve martensit sert fazlarının miktarlarının ve numune boyunca mikrosertlik değerlerinin arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.4. Sinterleme ile sertleştirme sonrası numunelerin mikrosertlik değerleri.

Malzeme	(0,5°C/s)	(3°C/s)
Özellik	Mikrosertlik (HV0,1)	Mikrosertlik (HV0,1)
Astaloy CrA-0,5C	245±58	223±48
Astaloy CrA-1Ni-0,5C	333±55	390±86
Astaloy CrA-1Cu-0,5C	370±93	622±94
Astaloy CrA-2Cu-0,5C	500±102	608±122

Ölçümler incelendiğinde soğutma hızının artışına bağlı olarak sertlik değerlerinde en fazla artış yaklaşık %68 ile Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımli numunelerde görülmüştür. Soğutma hızının yavaş olduğu durumda ise en fazla sertlik değerleri 2Cu içeren numunelerde görülmüştür. Bunun nedeni; Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımın sinterleme işlemi sonrası daha yoğun bir yapı oluşturması ve diğer alaşımlara göre fazla olan alaşımlama elementinin sağladığı daha yüksek sertleşebilirliktir.

Literatürdeki Cr içeren alaşımlar üzerine yapılan çalışmanın [58] ışığında 0,5 °C/s ile soğutma işlemi sonucunda Astaloy CrA-0,5C alaşımli numunede kaba pörlit mikroyapısı bulunmaktadır. Astaloy CrA-1Ni-0,5C ve Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımlarında beyrit ve ince pörlit beraber bulunmaktadır. Bakır oranının %2 olduğu

numunede ise sertleşebilirliğin diğer alaşımlara göre daha yüksek olması, düşük soğutma koşullarında dahi martensit ve beynit oluşumuna yol açmıştır.

Soğutma hızı 3 °C/s' ye çıktığında, numunelerin yapılarında martensit oluşmuş ve miktarları artmıştır. Astaloy CrA-0,5C alaşımlı numunede alaşım elementlerinin azlığına bağlı olarak sertleşebilirliğin düşük olması dolayısıyla mikroyapıda büyük oranda kaba pörlit ve bir miktar ince pörlit oluşmuştur. Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımlı numunedeki sertlik değerlerinde bir miktar artış olmuştur ve mikroyapı beynitten oluşmuştur. Astaloy CrA-1Cu-0,5C alaşımında sertlik artışına bağlı olarak, mikroyapıda martensit fazı ve beynit oluşumu gerçekleşmiştir. Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımından elde edilen numunede martensit fazı ve beynitten oluşan bir mikroyapı oluşmuştur. Dört alaşım da göz önünde bulundurulduğunda martensit miktarının en fazla bu alaşımda olduğu görülmüştür.

Numunelere uygulanan ikincil ısı işlemler sonrası elde edilen mikrosertlik değerleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Bu işlem; sinterleme sıcaklığına yakın bir sıcaklıktan(1070 °C) yapılan 2 farklı soğutma işleminin mekanik özelliklere etkisini incelemek için yapılmıştır. Bu değerler incelendiğinde, soğutma hızıyla orantılı martensit fazı gözlemlenmiş, buna bağlı olarak da mikrosertliklerde özellikle suverme işleminden sonra önemli ölçüde artış elde edilmiştir. Sertlik değerleri; havada soğutma işlemi sonrası 205-285 HV0,1 aralığında değişmiş, suverme işlemi sonrası ise ortalama olarak yaklaşık 600 HV0,1'e yükselmiştir.

Çizelge 4.5. Sinterlenmiş ve 1070°C’de 20 dakika süre ile tavlandıktan sonra havada soğutulmuş, su verilmiş ve menevişlenmiş (200C, 1 saat) numunelerin mikrosertlik değerleri.

Malzeme	Sinterlenmiş	Havada soğutulmuş	Suverilmiş	Suverilmiş+ Menevişlenmiş
Özellik	Mikrosertlik (HV0,1)	Mikrosertlik (HV0,1)	Mikrosertlik (HV0,1)	Mikrosertlik (HV0,1)
Astaloy CrA-0,5C	154±21	205±47	602±96	547±154
Astaloy CrA-1Ni-0,5C	189±30	221±62	665±60	490±158
Astaloy CrA-1Cu-0,5C	176±24	231±47	628±104	552±116
Astaloy CrA-2Cu-0,5C	224±34	285±56	595±127	667±152

Havada soğutma işlemi sonrası numunelerde; Astaloy CrA-0,5C alaşımında kaba pörlit, diğer alaşımlarda ince pörlit ve kaba pörlitin bir arada bulunduğu kompozit mikroyapılar elde edilirken, martensit fazının oluşumu için gerekli sertleşebilirliğin sağlanamadığı görülmüştür. Bunun sonucu olarak sertlik değerlerinde sinterlenmiş numunelere kıyasla çok fazla bir artış meydana gelmemiştir. Ancak suverme işlemleri sonrası, mikroyapılarda %100’e yakın martensit fazı oluşmuş ve sertlik değerlerinde dramatik değişiklikler olmuştur. Menevişleme işlemi sonrasında; numunelerin mikroyapılarında menevişlenmiş martensit fazı elde edilmiş ve sertlik değerleri bir miktar düşmüştür.



## BÖLÜM 5

### 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ön alaşımlanmış Astaloy CrA tozlarında sinterleme ile sertleştirme işleminin mekanik özelliklere etkisi incelenmiş ve sonuçlar 1070°C'den uygulanan ikincil ısıtma işlemlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bileşimleri; Astaloy CrA-0,5C, Astaloy CrA-1Ni-0,5C, Astaloy CrA-1Cu-0,5C ve Astaloy CrA-2Cu-0,5C olan alaşımlar 600 MPa basınç altında preslendikten sonra endogaz ortamında 1120°C'de 20 dakika süre ile sinterlenmiştir. Sinterleme işleminden sonra aynı fırın içerisinde uygulanan 3 farklı soğutma hızıyla (0,5-1,5-3 °C/s) sinterleme ile sertleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. İkincil ısıtma işlem numuneleri de 600 MPa basınçta preslendikten sonra 1120°C'de 45 süre ile %90 N<sub>2</sub>-%10 H<sub>2</sub> ortamında sinterlenmiştir. Sinterleme işleminden sonra numuneler 1070°C'de 20 dakika süre ile tavlansın havada ve suda soğutulduktan sonra 200°C'de 1 saat süre ile monevişlenmiştir. Bütün numunelerin makro-mikro sertlikleri, çapraz kırılma dayanımları, çekme dayanımları belirlenmiştir ve birbiriyle kıyaslanmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- (1) Sinterleme ile sertleştirme işlemi; alaşımlarda soğutma hızıyla orantılı olarak sertlik artışı sağlamış ve mikroyapıda martensit ve beynit oluşumuna yol açmıştır. Astaloy CrA-1Cu-0,5C ve Astaloy CrA-1Ni-0,5C alaşımlarında martensit ve beynit oluşumuna bağlı olarak düzensiz gözenekler çevresinde gerilme yığılmaları oluşmuştur. Numunelerdeki sertlik artışına bağlı olarak gözenek çevrelerinden kırılmalar gerçekleşmiş çapraz kırılma ve çekme dayanımı değerlerinde düşüş görülmüştür.
- (2) Sinterleme ile sertleştirme işleminde alaşım elementlerinin sertleşebilirliği arttırdığı görülmüştür. En düşük sertlik değerleri Astaloy CrA-0,5C alaşımında, en yüksek değerler ise sertleşebilirliği en fazla olan Astaloy CrA-2Cu-0,5C alaşımlı numunede görülmüştür.
- (3) Alaşımlara uygulanan ikincil ısıtma işlemlerinden havada soğutma işlemlerinde yeterli sertlik artışı sağlanamazken, suverme işlemi sonrasında martensit oluşumuna bağlı olarak önemli sertlik artışı elde

edilmiştir. Azot ortamında sinterleme sıcaklığına yakın bir sıcaklıktan(1070°C) yapılan ikincil ısıl işlemler sonucunda numunelerde yüksek oranda karbonsuzlaşma görülmüştür. Bu durum sonucunda, sertlik artışına bağlı olarak çapraz kırılma dayanımı değerlerinde artış meydana gelmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Berg S., 'P/M Steel Suitable for Sinterhardening in Respect of Cost and Performance', PM<sup>2</sup>TEC 2001, in New Orleans, USA.
- [2] Giguere N., Blais C., 'Optimization of Compressibility and Hardenability by Admixing and Prealloying', International Journal of Powder Metallurgy Volume: 46, Issue: 1, pp.17-29, 2010.
- [3] Tozmetal A.Ş. ürünlere erişim adresi <http://www.tozmetal.com/tr/urunlerimiz.asp>  
Erişim Tarihi: 28.11.2011.
- [4] Saritas S., Ozdural H., Tanberk O., Demiray A., 'Powder Metallurgy in Turkey' The International Journal of Powder Metallurgy, Volume: 38, No:5, pp. 39-44, 2002.
- [5] Narasimhan K.S., 'Sintering of Powder Mixtures and the Growth of Ferrous Powder Metallurgy', Materials Chemistry and Physics, Volume: 67, pp. 56-65, 2001.
- [6] German R.M., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Editörler: S. Saritaş, M. Türker, N. Durlu, Ankara: Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, 2007.
- [7] German R.M., 'Powder Metallurgy of Iron and Steel', The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 1998.
- [8] Krauss G., 'Steels Processing, Structure, and Performance', ASM International, 2005 Edition.
- [9] Callister W.D., 'Materials Science and Engineering an Introduction', John Wiley&Sons, 7<sup>th</sup> Edition, 2007.
- [10] Hatami S., Malakizadi A., Nyborg L., Wallin D., 'Critical aspect of sinterhardening of prealloyed Cr-Mo steel', Journal of Materials Processing Technology 2010 1180-1189.
- [11] Warga D., Lindberg C., 'Efficient Sintering and Hardening in the Conveyor Belt Sintering Furnace', Höganäs.
- [12] James W. B., 'What is Sinter Hardening', International Conference on Powder Metallurgy&Particulate Materials, May 31-June 4, 1998, Las Vegas, Nevada, USA.
- [13] Straffelini G., Fontanari V., Hafez A., Benedetti M., 'Tensile and Fatigue Behaviour of Sinter Hardened Fe-1,5Mo-2Cu-0,6C Steels', Powder Metallurgy, Volume:52, No:4, 2009.
- [14] Rutz H.G., Graham A.H., Davala A.B., 'Sinter-Hardening P/M Steels', International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, June 29-July 2, 1997, Chicago, IL USA.
- [15] Xu W., Ferry M., Wang Y., 'Influence of Alloying Elements on as-cast Microstructure and Strength of Gray Iron', Materials Science and Engineering A, 390, pp.326-333, 2005.
- [16] Laumen C., Malas A., Wiberg S., Berg S., 'Advanced Carbon Control in Sintering Atmospheres', EURO PM2009, Copenhagen, Denmark, 2009.
- [17] German R.M., 'Powder Metallurgy&Particulate Materials Processing', Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1994.
- [18] Blais C., Serafini R. E., L'Esperance G., 'Effect of Hydrojen Concentration in Cooling Zone on Sinter Hardening', International Journal of Powder Metallurgy, Volume:41, No:4, pp. 33-41, 2005.

- [19] Bergman O., Bengtsson S., 'Influence of Sintering Temperature and Component Density on the Properties of Prealloyed PM Steel Grades Containing Cr, Mo and Mn', EURO PM2009, Copenhagen, Denmark, 2009.
- [20] Lindsley B., Rutz H., 'Effect of Molybdenum Content in PM Steels', Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 2008.
- [21] Bain E.C., 'Functions of the Alloying Elements in Steel' American Society for Metals, 1939.
- [22] Sokolowski P.K., Lindsley B.A., 'Influence of Chemical Composition and Austenitizing Temperature on Hardenability of PM Steels', International Journal of Powder Metallurgy, Volume:46, Issue:1, pp. 43-54, 2010.
- [23] Danninger H., Frauendienst G., Streb K.D., Ratzl R., 'Dissolution of Different Graphite Grades During Sintering of PM Steels', Materials Chemistry and Physics, Volume:67, pp. 72-77, 2001.
- [24] Çetinkaya Ş., 'Karbon Katkılı Alaşımli Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Özellikleri', Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi F.B.E., 2005.
- [25] Phadke V.B., 'Relation Between Transverse Rupture Strength and Hardness of P/M Fe-Cu Alloys', The International Journal of Powder Metallurgy&Powder Technology, Volume:17, No:1, pp.37-43, 1981.
- [26] Engström U., Yu Y., Bengtsson S., Frykholm R., 'Performance Characteristics of Cost Effective Sinter Hardening Materials', EURO PM2008, Mannheim, Germany, 2008.
- [27] Maroli B., Berg S., Larsson M., Hauer I., 'Performance of Sinter-Hardened P/M Steels', EUROMAT, Italy, 2001.
- [28] Berg S., Maroli B., 'Properties Obtained by Chromium-Containing Materials', Powder Metallurgy and Particulate Materials, 2002.
- [29] Engström U., McLelland J., Maroli B., 'Effect of Sinter-Hardening on the Properties of High Temperature Sintered PM Steels', Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 2002.
- [30] Dlapka M., Strobl S., Danninger H., Gierl C., 'Austenite Grain Size in Sinter Hardened Powder Metallurgy Steels', Prakt. Metallogr., Volume:47, Issue:12, pp. 686-699, 2010.
- [31] Chagnon F., 'Effect of Sintering Temperature on Static and Dynamic Properties of Sinter-Hardened PM Steels', International Journal of Powder Metallurgy, Volume:46, Issue:1, pp. 31-42, 2010.
- [32] Saccarola S., Belin G., Bueno S., Sainz S., Castro F., 'Novel High Performance, Dimensionally Controlled PM Steels for Sinter-Hardening', Powder Metallurgy, Volume:53, No:3, 2010.
- [33] Chawla N., Deng X., 'Microstructure and Mechanical Behaviour of Porous Sintered Steels', Materials Science and Engineering A, 390, pp. 98-112, 2005.
- [34] Puscas T.M., Signorini M., Molinari A., Straffelini G., 'Image Analysis Investigation of the Effect of the Process Variables on the Porosity of Sintered Chromium Steels', Materials Characterization, 50, pp. 1-10, 2003.
- [35] Straffelini G., Molinari A., Danninger H., 'Impact notch Toughness of High-Strength Porous Steels', Materials Science and Engineering A272, pp.300-309, 1999.
- [36] Cias A., Sulowski M., Frydrych H., Frydrych J., 'The Effect of Processing Variables on the Porosity of P/M Mn Steels', Advances in Powder Metallurgy&Particulate Materials, 2005.

- [37] Warke V.S., Sisson R.D., Makhlof M.M., 'The Effect of Porosity on the Austenite to Bainite Transformation in Powder Metallurgy Steels', *Materials Research Society*, Volume: 24, No:10, pp. 3213-3219, 2009.
- [38] Skena C., Prucher T., Czarnek R., Jo J., 'Hardenability Characteristics of P/M Alloy Steels', *The International Journal of Powder Metallurgy*, Volume: 33, No:7, pp.25-35, 1997.
- [39] Koh J.C.Y., Fortini A., 'Prediction of Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Porous Metallic Materials', *International Journal of Heat Transfer*, Volume:16, pp.2013-2022, 1973.
- [40] Howard P., Koczak M.J., 'How Porosity and Atmosphere Effect the Thermal Conductivity of P/M Parts', *The International Journal of Powder Metallurgy&Powder Technology*, Volume:17, No:1, pp.25-35, 1981.
- [41] Danninger H., Spoljaric D., Weiss B., 'Microstructural Features Limiting the Performance of P/M Steels', *The International Journal of Powder Metallurgy*, Volume:33, No:4, pp.43-53, 1997.
- [42] Saritas S., Doherty R.D., Lawley A., 'Effect of Porosity on the Hardenability of PM Steels', *International Journal of Powder Metallurgy*, 38, pp. 31-40, 2002.
- [43] Stiles D.J., 'Effect of Porosity on the Thermal Response, Hardness, Hardenability and Microstructure of Powder Metallurgy Steels', *Surface Engineering*, Volume:21, No:1, pp. 12-16, 2005.
- [44] Capus J.M., 'Sinter-Hardening Offers High Strength at Lower Cost', *PM TEC97*, Chicago, 1997.
- [45] Bergman O., 'Chromium-Alloyed PM Steels with Excellent Fatigue Properties Obtained by Different Process Routes', *European Powder Metallurgy Conference*, 2003.
- [46] Maroli B., Sigurd B., Peter T., Engström U., 'Sinter Hardening and Heat Treatment of Materials Based on Astaloy CrM', *PM<sup>2</sup>TEC*, Las Vegas, USA, 2003.
- [47] Högenas toz alaşımları <http://www.thogenas.com> Erişim Tarihi: 10.03.2013.
- [48] Dizdar S., 'High Performance Sintered Steel Gears for Use in Transmission and Machinery-A Critical Review', *The International Conference on Gears*, Germany, 2010.
- [49] Bergman O., 'Studies of Oxide Reduction and Nitrogen Uptake in Sintering of Chromium-alloyed Steel Powder', *Tez*, KTH Industrial Engineering and Management, 2008.
- [50] Engström U., Berg S., Frykholm R., 'High Performance Materials for Sinter Hardening Applications', *World PM2010*, Florence, Italy, 2010.
- [51] Berg S., Engström U., Larsson C., 'Material and Process Optimization for a Small Engine PM Connecting Rod', *Högenas*, 2012.
- [52] Larsson C., Engström U., 'High Performance Sinter Hardening Materials for Synchronizing Hubs', *Euro PM2011*, Barcelona, 2011.
- [53] Larsson C., Engström U., Berg S., 'Means to Lift Mechanical Properties to the Next Level, Enabling New Challenging Applications', *Euro PM2012*, Switzerland, 2012.
- [54] Frykholm R., Litström O., 'Influence of Composition and Processing Conditions on the Microstructure and Properties of Astaloy CrA', *World PM2012*, Japan, 2012.

- [55] Lindsley B., 'Machining of PM Steels:Effect of Additives and Sinter Hardening', International Journal of Powder Metallurgy, Volume:44, Issue:2, pp. 21-31, 2008.
- [56] TS 4222 EN ISO 3325, Sinterlenmiş Metal Malzemeler-Sert Metaller Hariç-Çapraz Kırılma Dayanım Tayini, 2004.
- [57] TS EN ISO 2740, Sinterlenmiş Metal Malzemeler-Sert Metaller Hariç-Çekme Deney Parçaları, 2008.
- [58] Gerosa R., Rivolta B., Tavasci A., Silva G., Bergmark A., 'Crack Initiation and Propagation in Chromium Pre-alloyed PM-steel Under Cyclic Loading', Engineering Fracture Mechanics, 75, 750-759, 2008.
- [59] Jurci P., Dlouhy I., 'Coating of Cr-V Ledeburitic Steel CrN Containing a Small Addition of Ag', Applied Surface Science, 257, 10581-10589, 2011.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : HAFIZOĞLU, Hakan

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 09.12.1986, Ankara

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0 (554) 615 05 89

e-mail : hhafizoglu@etu.edu.tr

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2013 (bekleniyor)
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2010

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010–2013	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2010	Eyup Sabri Tuncer Kozmetik Sanayi A.Ş.	Stajyer
2009	Eptim Elektrik Panoları İmalat Ltd.Şti.	Stajyer
2007	Üzümcü Tıbbi Cihaz ve Medikal Gaz Sistemleri A.Ş.	Stajyer

## **Yabancı Dil**

İngilizce (ileri düzeyde), Almanca (temel düzeyde)

### **Uluslararası Kongre Bildirileri:**

1. **Hafizoğlu H.**,Durlu N.,Ataş A.,Özdural H., DEMİR ESASLI TOZ ALAŞIMINDA SİNERLEME İLE SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ, 6thInternational Powder Metallurgy Conference and Exhibition, Ankara, Turkey, 2011.
2. **Hafizoğlu H.**,Durlu N.,Ataş A.,Özdural H., MECHANICAL PROPERTIES OF SINTER-HARDENED ASTALOY CrA POWDER ALLOYS, 16th International Metallurgy and Materials Congress (IMMC 2012), Istanbul, Turkey, 2012.
3. **Hafizoğlu H.**, Durlu N., ‘The Effect of Heat Treatment on the Properties of Astaloy CrA Powder Alloys ’, EURO PM 2013 International Powder Metallurgy Congress & Exhibition, Gothenburg, Sweden, 2013 (Değerlendirme aşamasında)