

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖNALAŞIMLANMIŞ METAL TOZLARININ MİKROYAPILARI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE SİNER SERTLEŞTİRME PROSESİNİN
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

MEHMET GÜNER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ADEM BAKKALOĞLU**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖNALAŞIMLANMIŞ METAL TOZLARININ MİKROYAPILARI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE SİNER SERTLEŞTİRME PROSESİNİN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Mehmet GÜNEN tarafından hazırlanan tez çalışması 30 / 03 / 2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Serdar SALMAN

Milli Savunma Üniversitesi

ÖNSÖZ

Öncelikle yüksek lisans ve tez çalışmalarım süresince desteği, yardımları ve katkılarından dolayı değerli hocam ve danışmanım Prof. Dr. Adem Bakkaloğlu'na sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi iletirim.

Çalışmamın çapraz kırılma dayanımı deneylerinde ve SEM analizlerinde laboratuvar imkanlarını esirgemeyen Prof. Dr. Ahmet Ünal'a ve Prof. Dr. Ayşegül Akdoğan Eker'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deney numunelerinin preslenme ve sinterlenme işlemlerindeki desteklerinden dolayı Tozmetal Ticaret ve Sanayi A.Ş. ve Tozmetal Ticaret ve Sanayi A.Ş. Üretim Müdürü Sayın Cengiz Bozacı'ya, toz temini konusundaki yardımlarından dolayı Höganäs firmasına ve Eda Yilmaztürk Yüksekdağ'a, deneysel çalışmalarımdeki katkılarından dolayı Arş. Gör. Zekeriya Cömert'e ve bölümümüz teknisyenlerinden Mehmet Çalışkan'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Son olarak ise varlıkları ile daima güven veren, her zaman yanımda olan sevgili aileme, eşime ve tüm kıymetli dostlarıma her türlü desteklerinden ötürü sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Mart, 2018

Mehmet GÜNEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
TOZ METALURJİSİ	3
2.1 Toz Üretim Yöntemleri.....	4
2.1.1 Mekanik İşlemler ile Üretim	5
2.1.2 Kimyasal Reaksiyonlar ile Üretim	5
2.1.3 Elektrolitik Depozisyon (Elektroliz) ile Üretim.....	6
2.1.4 Atomizasyon ile Üretim	6
2.2 Toz Metalurjisindeki Alaşımlama Yöntemleri	7
2.2.1 Harmanlama	8
2.2.2 Difüzyon Alaşımlama (Kısmi Alaşımlama)	8
2.2.3 Önalaşımlama	9
2.2.4 Hibrit Alaşımlama	9
2.3 Tozların Preslenmesi	10
2.4 Sinterleme.....	11
2.4.1 Katı Faz Sinterlemesi.....	12

2.4.2	Sıvı Faz Sinterlemesi	14
BÖLÜM 3		
SİNER SERTLEŞTİRME		16
3.1	Sinter Sertleştirme Avantajları ve Dezavantajları	18
3.2	Sinter Sertleştirmeyi Etkileyen Faktörler	19
3.2.1	Üretim Koşulları	19
3.2.1.1	Sinterleme Sıcaklığı	19
3.2.1.2	Sinterleme Süresi	21
3.2.1.3	Sinter Fırını Atmosferi	21
3.2.1.4	Soğuma Hızı	22
3.2.1.5	Alaşımlama Yöntemleri	23
3.2.2	Malzeme Koşulları	23
3.2.2.1	Tane Boyutu	24
3.2.2.2	Tane Şekli	24
3.2.2.3	Yoğunluk	24
3.2.2.4	Gözeneklilik	25
3.2.2.5	Alaşım Elementleri	26
3.2.2.5.1	Molibden	27
3.2.2.5.2	Bakır	28
3.2.2.5.3	Karbon	30
3.3	Sinter Sertleştirme Prosesinin Kullanım Alanları	30
BÖLÜM 4		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		32
4.1	Kullanılan Tozlar ve Kimyasal Bileşimleri	32
4.2	Tozların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	34
4.2.1	Görünür Yoğunluk	34
4.2.2	Akıcılık Testi	34
4.2.3	Elek Analizi	35
4.3	Toz Karışımlarının Preslenmesi	36
4.4	Preslenen Numunelerin Sinterlenmesi	38
4.5	Sinterlenen Numunelerin Yoğunluk Ölçümleri	39
4.6	Sinterlenen Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri	39
4.7	Mekanik Testler	41
4.7.1	Çapraz Kırılma Deneyleri	41
4.7.2	Mikrosertlik Testleri	42
4.7.3	Çekme Deneyleri	43
BÖLÜM 5		
DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER		44
5.1	Akıcılık Testi	44
5.2	Elek Analizi	44
5.3	Görünür Yoğunluk	45

5.4	Yoğunluk	46
5.5	Boyutsal Değişim.....	46
5.6	Mikroyapı İncelemeleri	49
5.6.1	Parlak Yüzey Görüntüleri	49
5.6.2	Dağlanmış Yüzey Görüntüleri	52
5.6.3	SEM Görüntüleri	56
5.6.4	EDS Görüntüleri	57
5.6.5	Mikrosertlik Görüntüleri.....	70
5.7	Mikrosertlik Ölçümleri	72
5.8	Çapraz Kırılma Dayanımı Ölçümleri	76
5.9	Çekme Dayanımı Ölçümleri	77

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR.....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	88

SİMGE LİSTESİ

F	Uygulanan kuvvet
b	Numune kalınlığı
d	Yoğunluk
h	Numune boyu
L	Mesnetler arası mesafe
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
s	Saniye
dk	Dakika
W_h	Havadaki ağırlık
W_s	Sudaki ağırlık
T_{erg}	Ergime sıcaklığı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
M_s	Martenzit başlama noktası
HV0.1	Vickers biriminde mikro sertlik
J	Joule; enerji birimi
K	Kelvin; sıcaklık ölçüsü birimi
MPa	Megapascal; basınç birimi
N	Newton; kuvvet birimi
C	Karbon
Cu	Bakır
Fe	Demir
Mo	Molibden
Si	Silisyum
Ni	Nikel
SiC	Silisyum karbür
CH ₄	Metan
CO ₂	Karbondioksit
H ₂ O	Hidrojenioksit
O ₂	Oksijen
N ₂	Azot

KISALTMA LİSTESİ

EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağınlımlı X-ışınları Spektroskopisi)
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TSKB	Türkiye Sınai Kalkınma Bankası
TTT	Time Temperature Transformation (Zaman Sıcaklık Dönüşüm)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Toz metalurjisinin üretim aşamaları	3
Şekil 2. 2 Toz metalurjisinin kullanıldığı sektörlerin ağırlıkça dağılımı [1].....	4
Şekil 2. 3 Su atomizasyon yöntemi akış şeması [19]	7
Şekil 2. 4 Düşey gaz atomizasyonu ünitesi [19].....	7
Şekil 2. 5 Alaşımlama yöntemlerinin şematik gösterimi. (a) harmanlama, (b) difüzyon alaşımlama, (c) önalaşımlama, (d) hibrit alaşımlama	8
Şekil 2. 6 Toz preslemenin şematik gösterimi [16]	10
Şekil 2. 7 Katı faz sinterlemesinde gözenek yapısındaki değişim	12
Şekil 2. 8 İki küreli sinterleme modeli [20]	13
Şekil 2. 9 (a) Atomik boyutta sinter oluşumunun şematik gösterimi, (b) Vakum altında 1030°C'de 30 dk boyunca sinterlenmiş nikel kürelerin boyun oluşumunu gösteren SEM görüntüsü [20]	13
Şekil 2. 10 Sıvı faz sinterlemesinin aşamaları. (1) Başlangıç, (2) Tekrar düzenlenme, (3) Çözünme ve tekrar çökelme, (4) Katı faz bağlanması [20]	14
Şekil 2. 11 Sıvı faz sinterlemesi ile üretilen ve bileşimi %95 W, %3,5 Ni, %1,5 Fe olan bir ağır alaşımın mikroyapısı [20]	15
Şekil 3. 1 Sinter sertleştirme fırının şematik gösterimi [25].....	17
Şekil 3. 2 Sinterleme sıcaklığının görünür sertliğine olan etkisi [27].....	20
Şekil 3. 3 Sinterleme sıcaklığının maksimum çekme dayanımına olan etkisi [27]	20
Şekil 3. 4 Sinterleme sıcaklığının akma dayanımına olan etkisi [27]	20
Şekil 3. 5 Sinterleme süresi ve sıcaklığının yoğunluk üzerindeki göreceli etkisi [28] ..	21
Şekil 3. 6 Toz boyutunun yoğunluk üzerindeki bağıl etkisi [35]	24
Şekil 3. 7 Sinterlenmiş yoğunluktaki artışın mekanik özelliklerdeki etkisi [29].....	25
Şekil 3. 8 Toz metalürjik parçalarda porozitenin mekanik özelliklere etkisi [37].....	25
Şekil 3. 9 Bazı alaşım elementlerinin yapıdaki konsantrasyonlarına göre çarpım faktörleri [38]	27
Şekil 3. 10 %0,5 C ile harmanlanmış önalaşımlanmış tozların sıkıştırılabilirlikleri üzerinde alaşım elementlerinin etkisi [39]	27
Şekil 3. 11 Çeliklerde molibden ilavesinin, sürekli soğumadaki dönüşüme olan etkisinin TTT diyagramında gösterimi. T ₀ : Östenit sıcaklığı, T _M : Martenzit başlama sıcaklığı [41].....	28
Şekil 3. 12 Bakır içeriğinin, farklı karbon değerlerinde boyutsal değişime etkisi [29] ..	29
Şekil 3. 13 Bakır içeriğinin, farklı karbon değerlerinde çekme dayanımı ve uzama üzerindeki etkisi [29]	29
Şekil 3. 14 Sırasıyla %0,47 C ve %0,68 C içeren çeliklerin I-T diyagramları [45].....	30

Şekil 3. 15	(a) Yağ pompa rotoru, (b) Volan dişlisi, (c) Senkromeç dişlisi göbeği, (d) Krank mili dişlisi, (e) Burç yatağı, (f) Ara şanzıman dişlisi	31
Şekil 4. 1	Temin edilen tozların sertifikaları. (a) AC1, (b) AC2, (c) DH	33
Şekil 4. 2	(a) Akıcılık ve görünür yoğunluk deneylerinde kullanılan deney düzeneği, (b) ISO 4490 standardına göre deney düzeneği ölçüleri [48]	34
Şekil 4. 3	Elek analizinin gerçekleştirildiği düzenek.....	36
Şekil 4. 4	Stokes R-4 Press cihazı, numunenin şeklinde hazırlanmış zimba ve cihaz özellikleri	37
Şekil 4. 5	(a) BS EN ISO 2740:2009 standardı [49] gereğince numune ölçüleri, (b) presleme sonucu elde edilen çekme testi numunesi, (c) BS EN ISO 3325 standardı [50] gereğince numune ölçüleri, (d) presleme sonucu elde edilen çapraz kırılma testi numunesi	37
Şekil 4. 6	Mahler marka sinter sertleştirme fırını.....	38
Şekil 4. 7	Sinter sertleştirme işlemi tamamlanmış numuneler	38
Şekil 4. 8	Yoğunluk düzeneği	39
Şekil 4. 9	Leica – DM LS ışık mikroskobu ve Leica – DFC 280 dijital renkli kamera	40
Şekil 4. 10	Nikon - Eclipse MA100 ters metal mikroskobu.....	40
Şekil 4. 11	Jeol – JSM-5410LV taramalı elektron mikroskobu.....	41
Şekil 4. 12	PhenomWorld – Phenom XL taramalı elektron mikroskobu	41
Şekil 4. 13	(a) Mares - TST-SE-J-2T çekme deneyi cihazı, (b) BS EN ISO 3325 standardı gereği deney düzeneği [50].....	42
Şekil 4. 14	BMS - HVS-1000 mikrosertlik cihazı	43
Şekil 4. 15	Instron - 5982 statik basma ve çekme cihazı	43
Şekil 5. 1	Numunelerin soğuma hızlarına göre boyutsal değişim yüzdeleri. (-) boyut artışı, (+) boyut azalışı	48
Şekil 5. 2	AC1 numunelerine ait belirtilen soğuma hızlarındaki parlak yüzey görüntüleri	50
Şekil 5. 3	AC2 numunelerine ait belirtilen soğuma hızlarındaki parlak yüzey görüntüleri	50
Şekil 5. 4	DH numunelerine ait belirtilen soğuma hızlarındaki parlak yüzey görüntüleri	51
Şekil 5. 5	Numunelerin soğuma hızlarına göre gözeneklilik yüzdeleri grafiği	51
Şekil 5. 6	AC1 numunelerinin mikroyapı görüntüleri (a) 0,5°C/s – 200x, (b) 0,5°C/s – 500x, (c) 1,5°C/s – 200x, (d) 1,5°C/s – 500x, (e) 3°C/s – 200x, (f) 3°C/s – 500x.....	53
Şekil 5. 7	AC2 numunelerinin mikroyapı görüntüleri (a) 0,5°C/s – 200x, (b) 0,5°C/s – 500x, (c) 1,5°C/s – 200x, (d) 1,5°C/s – 500x, (e) 3°C/s – 200x, (f) 3°C/s – 500x.....	54
Şekil 5. 8	DH numunelerinin mikroyapı görüntüleri (a) 0,5°C/s – 200x, (b) 0,5°C/s – 500x, (c) 1,5°C/s – 200x, (d) 1,5°C/s – 500x, (e) 3°C/s – 200x, (f) 3°C/s – 500x.....	55
Şekil 5. 9	0,5°C/s soğuma hızındaki SEM görüntüleri. (a) AC1, (b) AC2, (c) DH	56
Şekil 5. 10	3°C/s soğuma hızındaki SEM görüntüleri. (a) AC1, (b) AC2, (c) DH	57
Şekil 5. 11	(a) AC1 - 0,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3.....	58
Şekil 5. 12	(a) AC1 - 1,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3.....	59
Şekil 5. 13	(a) AC1 - 2°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3.....	60

Şekil 5. 14	(a) AC1 - 3°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3.....	61
Şekil 5. 15	(a) AC2 - 0,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3.....	62
Şekil 5. 16	(a) AC2 - 1,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3.....	63
Şekil 5. 17	(a) AC1 - 2°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3.....	64
Şekil 5. 18	(a) AC1 - 3°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3.....	65
Şekil 5. 19	(a) DH - 0,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3	66
Şekil 5. 20	(a) DH - 1,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3	67
Şekil 5. 21	(a) DH - 2°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3	68
Şekil 5. 22	(a) DH - 3°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3	69
Şekil 5. 23	AC1 numunesinin iz görüntüleri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s.....	71
Şekil 5. 24	AC2 numunesinin iz görüntüleri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s.....	71
Şekil 5. 25	DH numunesinin iz görüntüleri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s.....	72
Şekil 5. 26	Soğuma hızına göre malzemelerin ortalama mikrosertlik değerleri	74
Şekil 5. 27	Bakır miktarının mikrosertlik üzerindeki etkisi	75
Şekil 5. 28	Üretim metodunun mikrosertlik üzerindeki etkisi.....	75
Şekil 5. 29	Soğuma hızının mikrosertlik üzerindeki etkisi	75
Şekil 5. 30	AC1, AC2 ve DH numunelerinin soğuma hızlarına göre çapraz kırılma dayanımları	77
Şekil 5. 31	AC1, AC2 ve DH numunelerinin soğuma hızlarına göre çekme dayanımları	78
Şekil 5. 32	AC1 numunelerinin soğuma hızlarına göre Yük-Uzama eğrileri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s.....	79
Şekil 5. 33	AC2 numunelerinin soğuma hızlarına göre Yük-Uzama eğrileri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s.....	80
Şekil 5. 34	DH numunelerinin soğuma hızlarına göre Yük-Uzama eğrileri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s.....	81

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Bazı metal ve alaşımların sinterleme sıcaklıkları ve süreleri [19]	11
Çizelge 3. 1 Soğuma hızının mikroyapıdaki faz miktarlarına etkisi. B: beynit, M: martenzit, A: artık östenit [33]	23
Çizelge 3. 2 Soğuma hızının sertlik, akma ve çekme dayanımı üzerindeki etkisi [33]	23
Çizelge 3. 3 Sinter sertleştirmenin uygulama alanlarından bazıları [45]	31
Çizelge 4. 1 Kullanılan tozların yüzdesel ağırlık bazında bileşimleri. ¹ Demir tozuyla önalaşımli, ² Astaloy Mo alaşımına difüzyon yoluyla bağlı	32
Çizelge 4. 2 Standart elek boyutları [19]	35
Çizelge 5. 1 Toz bileşimlerinin akıcılık testi sonuçları	44
Çizelge 5. 2 AC1 tozunun elek analizi sonuçları	44
Çizelge 5. 3 AC2 tozunun elek analizi sonuçları	45
Çizelge 5. 4 DH tozunun elek analizi sonuçları	45
Çizelge 5. 5 Toz bileşimlerinin görünür yoğunluk değerleri	45
Çizelge 5. 6 Sinterlenmiş numunelerin ortalama yoğunluk değerleri	46
Çizelge 5. 7 Numunelerin sinter sertleştirme işlemi öncesi boyutları	46
Çizelge 5. 8 Numunelerin sinter sertleştirme işlemi sonrası boyutları	47
Çizelge 5. 9 Numunelerin sinter sertleştirme sonrası yüzde boyutsal değişimleri	47
Çizelge 5. 10 Numunelerin soğuma hızlarına göre gözeneklilik yüzdeleri	51
Çizelge 5. 11 AC1 – 0,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri	58
Çizelge 5. 12 AC1 – 1,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri	59
Çizelge 5. 13 AC1 – 2°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri .	60
Çizelge 5. 14 AC1 – 3°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri .	61
Çizelge 5. 15 AC2 – 0,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri	62
Çizelge 5. 16 AC2 – 1,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri	63
Çizelge 5. 17 AC2 – 2°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri .	64
Çizelge 5. 18 AC2 – 3°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri .	65
Çizelge 5. 19 DH – 0,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri	66
Çizelge 5. 20 DH – 1,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri	67
Çizelge 5. 21 DH – 2°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri ...	68
Çizelge 5. 22 DH – 3°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri ...	69
Çizelge 5. 23 AC1 numunelerinin soğuma hızlarına göre mikrosertlik değerleri	73

Çizelge 5. 24	AC2 numunelerinin soğuma hızlarına göre mikrosertlik değerleri	73
Çizelge 5. 25	DH numunelerinin soğuma hızlarına göre mikrosertlik değerleri.....	74
Çizelge 5. 26	Test numunelerinin ortalama boyutları ile soğuma hızlarına göre uygulanan kuvvet ve çapraz kırılma dayanım değerleri.....	76
Çizelge 5. 27	AC1 numunelerinin farklı soğuma hızlarına göre çekme dayanımı verileri	79
Çizelge 5. 28	AC1 için soğuma hızlarına göre akma dayanımı verileri ve E modülü	79
Çizelge 5. 29	AC2 numunelerinin farklı soğuma hızlarına göre çekme dayanımı verileri	80
Çizelge 5. 30	AC2 için soğuma hızlarına göre akma dayanımı verileri ve E modülü	80
Çizelge 5. 31	DH numunelerinin farklı soğuma hızlarına göre çekme dayanımı verileri	81
Çizelge 5. 32	DH için soğuma hızlarına göre akma dayanımı verileri ve E modülü	81



ÖNALAŞIMLANMIŞ METAL TOZLARININ MİKROYAPILARI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE SİNER SERTLEŞTİRME PROSESİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet GÜNEN

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

Bu çalışmada sinter sertleştirme, Astaloy Mo (ağırlıkça %1,5 Mo ile önalışımlandırılmış Fe) bazlı toz metalurjik parçalar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda 3 farklı toz karışımı ile çalışılmıştır. Bunlar: difüzyon alaşımlandırılmış Distaloy DH (Astaloy Mo-2Cu) bazlı ağırlıkça %0,6 grafit içeren toz karışımı, Astaloy Mo bazlı ağırlıkça %0,6 grafit ve %1 bakır içeren toz karışımı ile Astaloy Mo bazlı ağırlıkça %0,6 grafit ve %2 bakır içeren toz karışımı şeklindedir. Toz karışımları 600 MPa basınç altında preslenmiş ve 1120°C'deki endüstriyel bir fırında, endogaz ortamında 25 dakika sinterlenmişlerdir. Numuneler, sinterleme işleminden sonra 0,5°C/s, 1,5°C/s, 2°C/s ve 3°C/s olmak üzere 4 farklı soğuma hızında soğutulmuşlardır. Üretim aşamasının ardından numune hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise numunelerin mikroyapıları farklı optik mikroskoplar ve taramalı elektron mikroskopları ile incelenmiş, mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla da sertlik testleri, üç noktadan eğme testleri ve çekme testleri yapılmıştır. Numunelerin sertlik ve dayanım değerleri ölçülmüş, mikroyapılarındaki fazlar belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular yorumlanmıştır.

Bu çalışmada, belirtilen tozların mikroyapıları ve mekanik özellikleri üzerinde farklı soğuma hızları, bakır miktarları ve alaşımlandırma yöntemlerinin etkisi incelenmiştir. Ayrıca, sinter sertleştirme prosesi geleneksel sinterleme yöntemiyle kıyaslanmış ve sinter sertleştirme yönteminin üstünlükleri gösterilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda artan

soğuma hızı ile beyritin martenzite dönüşümünün arttığı, dolayısıyla da sertlikte artışın olduğu, sinter sertleştirme ile daha yüksek mukavemetli parçalar elde edilebileceği görülmüştür. Bununla birlikte, Distaloy DH numunelerinin Astaloy Mo numunelerine kıyasla daha az gözenekli bir yapıda olup, gözeneklerinin de daha küçük çapta olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, Distaloy DH numunelerinin daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toz metalürjisi, önalaşımlandırılmış tozlar, Distaloy DH, Astaloy Mo, sinter sertleştirme



**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SINTER HARDENING PROCESS ON
MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF PREALLOYED
METAL POWDERS**

Mehmet GÜNEN

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

In this study, the effect of sinter-hardening process on Astaloy Mo (Fe prealloyed with 1,5 wt.% Mo) based powder metallurgical steels was investigated. In accordance with this purpose, 3 different powder mixes were studied. These are as follows: diffusion alloyed Distaloy DH (Astaloy Mo-2 wt.% Cu) with 0,6 wt.% C, Astaloy Mo with 2 wt.% Cu and 0,6 wt.% C, and Astaloy Mo with 1 wt.% Cu and 0,6 wt.% C powder mixes. The powder mixes were pressed under 600 MPa and were sintered at 1120°C under endogas atmosphere for 25 minutes in an industrial belt sintering furnaces. After the sintering process, 0,5°C/s, 1,5°C/s, 2°C/s and 3°C/s cooling rates were applied to the samples. Subsequent to production phase, sample preparation process was carried out to sinter-hardened samples. Thereafter, microstructures of the samples were analyzed under the optical and scanning electron microscopes. Three-point bending tests, tensile tests and microhardness tests were performed in order to determine the mechanical properties. Hardness and strength values of specimens were measured, phases of the specimens were determined. The findings obtained in consequence of experimental studies were discussed and concluded.

Due to this study, the effects of Cu amounts, cooling rates and prealloying methods on microstructure and mechanical properties of mentioned powders were examined. Also, sinter-hardening process and traditional sintering process were compared and the superiorities of sinter-hardening process were shown. In regard to the experimental studies, it was observed that increasing cooling rate led to

transformation of bainite to martensite and thereby an increase in the hardness values of the sinter-hardened samples. It was also observed that high strength parts can be produced by sinter hardening. Besides, it was determined that Distaloy DH specimens have less porous structure and have smaller pores in comparison to Astaloy Mo specimens. Therefore, it was concluded that Distaloy DH specimens have better mechanical properties.

Keywords: Powder metallurgy, prealloyed powders, Distaloy DH, Astaloy Mo, sinter hardening



1.1 Literatür Özeti

Ulaşımın önemli bir ihtiyaç olması sonucu, TSKB 2017 verilerine göre yaklaşık 4 trilyon dolar ile dünya ekonomisinin yaklaşık %5'ini oluşturan otomotiv sektörü, dünyanın en büyük 4. ekonomisine tekabül etmekle birlikte doğrudan ve dolaylı yollarla 80 milyon kişiye istihdam sağlayan bir sektör haline gelmiştir. Bu durum, daha kapsamlı araştırmalara ve daha büyük yatırımlara neden olmaktadır. Bu noktada ürün kalitesi, üretim maliyeti ve zamanı daha da önem kazanmaktadır. Dolayısıyla, yüksek performanslı toz metalürjik parçalar ve sinter sertleştirme işlemi dikkat çekmeye başlamıştır.

Sinterleme, toz halindeki malzemenin preslenerek katı bir kütle haline getirilip sivilaşma noktasının altındaki bir sıcaklıkta tutularak dayanımının artırılması işlemidir; ancak daha yüksek dayanımlar için genellikle ikincil işlemlere ihtiyaç duyar. Sinter sertleştirme ise sinterleme ve sertleştirme işlemlerini birleştiren, zaman ve maliyet açısından daha verimli bir üretim tekniğidir.

Bu çalışmada toz metalurjisi, sinterleme ve sinter sertleştirme hakkında bilgiler verilmiş olup, nihai üründe istenen özelliklere göre hangi alaşım elementlerinin ve üretim yöntemlerinin kullanılması gerektiği, üretim koşullarının (sıcaklık, süre, soğuma hızı vs.) sonucu nasıl etkilediği anlatılmıştır. Bu bilgiler ışığında, %0.6 grafit içeren Distaloy DH (Fe-2Cu-1.5Mo), ağırlıkça %0.6 grafit ve %1 bakır içeren Astaloy Mo (Fe-1.5Mo) ile ağırlıkça %0.6 grafit ve %2 bakır içeren Astaloy Mo (Fe-1.5Mo) tozları ile çeşitli deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar Bölüm 6'da verilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

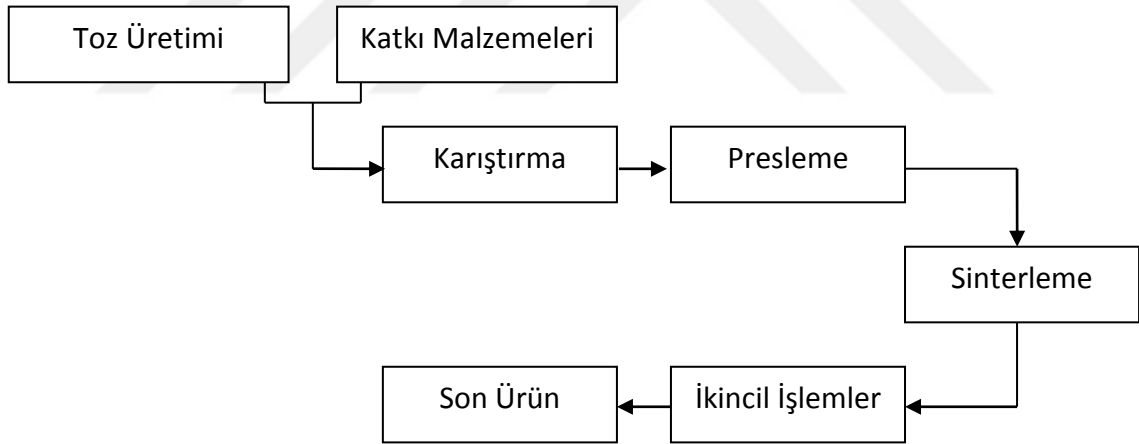
Bu çalışmanın amacı; Astaloy Mo tozlarına farklı oranlardaki bakır ilavesinin ve bakırın bu alaşıma difüzyon yöntemi ile eklenmesinin, 0,5°C/s, 1,5°C/s, 2,0°C/s ve 3°C/s soğuma hızlarında mekanik özelliklere ve mikroyapılara olan etkisini incelemektir. Ek olarak, sinter sertleştirme işleminin, geleneksel sinterlemeye kıyasla üstünlüklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Bir malzemedede daha yüksek sertlik elde edebilmek için daha yüksek hızda soğuma işlemi yapılabilir veya alaşım elementi ilave edilebilir. Yapılan çalışmada, Astaloy Mo tozuna karıştırma ve difüzyonla alaşımlama yöntemleri ile farklı miktarlarda bakır eklenip farklı soğuma hızlarında sertleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sertlik artırıcı etkisi olduğu bilinen bakırın miktarının ve soğuma hızlarının artmasıyla yapıdaki martenzit oranının artması beklenmektedir. Bu sayede, bu üretim yöntemi ile diğer yöntemlere oranla daha yüksek sertlikte malzeme elde edileceği varsayılmıştır. Ek olarak, infiltrant malzeme olarak kullanılan bakırın miktarının daha fazla olduğunda daha iyi bir doluluk oranı yakalanması gerektiğinden, ağırlıkça %2 bakır içeren numunelerin %1 bakır içeren numunelere kıyasla daha iyi dayanım değerlerine sahip olacağı düşünülmüştür. Ayrıca, Distaloy DH numunesinin ise difüzyon yöntemi ile üretilmesinden dolayı düzenli ve küçük gözenek dağılımına sahip olması gerektiği ve bu özelliği sayesinde deneyde kullanılan numuneler arasında en iyi mekanik özelliklere sahip numune olacağı öngörülmüştür.

TOZ METALURJİSİ

Toz metalürjisi, istenilen içeriğe uygun oranlarda metal tozlarının karıştırılıp preslenmesi ve takiben kontrollü atmosfer altında sinterlenerek mukavemet kazandırılması esasına dayanan parça üretme yöntemidir. Bu prosesin temel basamakları sırasıyla; toz üretimi, karıştırma, presleme ve sinterlemedir [1]. Malzemeden istenen özelliğe bağlı olarak sinterlemeden sonra ikincil ısıl işlemler uygulanabilir. Toz metalürjisinin genel hatları Şekil 2.1’de verilmiştir.

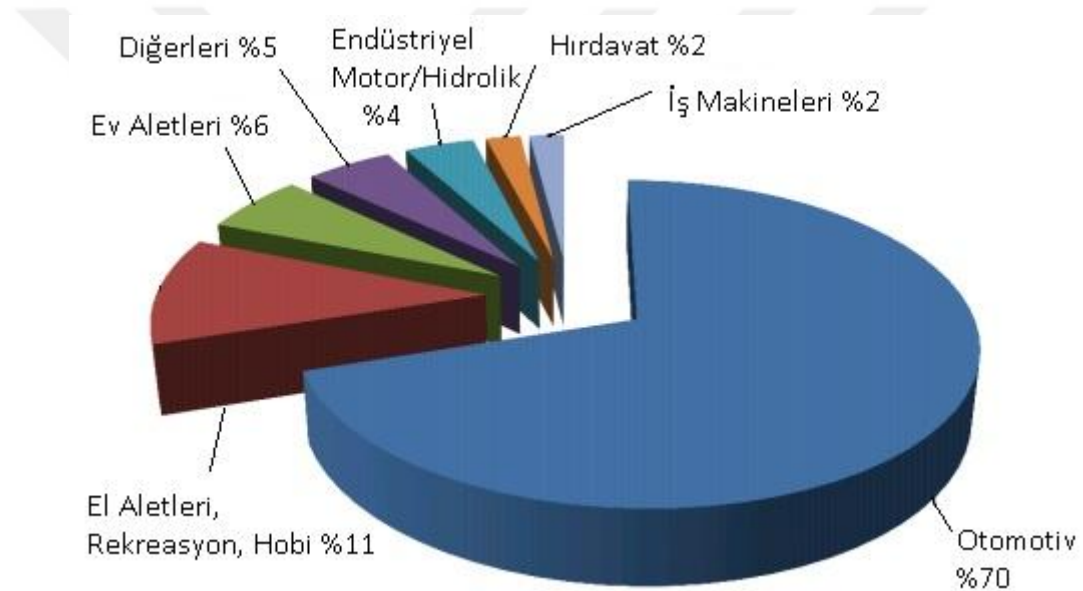


Şekil 2. 1 Toz metalurjisinin üretim aşamaları

Demir esaslı toz metalurjisi, talaşlı imalat, döküm ve diğer benzer üretim yöntemlerine kıyasla daha düşük üretim maliyetinin olması nedeniyle etkili bir üretim yöntemidir [2]. Ayrıca çevre dostu bir proses olması, karmaşık şekilde parça üretimine imkan vermesi, sıkı tolerans, daha iyi boyutsal hassasiyet ve iyi yüzey tesviyesi sağlaması, sıfır veya sıfıra yakın hurda çıkarması, bu yöntemi cazip kılmaktadır. Ayrıca toz metalurjisi ile üretilen parçalar yüksek saflıkta olup uzun hizmet ömrüne sahiptirler [3]. Bu avantajlara karşın, bazı dezavantajları da mevcuttur. Örneğin büyük çapta üretim

ekonomik olsa da tozların maliyeti kadar araç gereçlerin ve kapların maliyeti yüksektir. Ürünler de genel olarak porozdur. Tozların akışkanlığı sıvı metalden düşük olduğundan bu fark malzemede gözenekli bir yapıya sebep olmaktadır [3]. Gözeneklilik bazı durumlarda istenen bir özellik olsa da genel itibariyle malzeme özelliklerini negatif etkilemektedir.

Toz metalurjisinin en önemli pazarı otomotiv sektörüdür. Özellikle dişli takımlarında, piston kollarında ve mil yataklarının üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca, tungsten karbür ve titanyum karbür gibi sert metallerin üretiminde, kendinden yağlamalı yatakların yapımında ve çok sert kesme takımlarının üretiminde kullanılmaktadır [4]. Toz metalurjisinin kullanıldığı sektörlerin ağırlıkça dağılımı Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2. 2 Toz metalurjisinin kullanıldığı sektörlerin ağırlıkça dağılımı [1]

2.1 Toz Üretim Yöntemleri

Hemen hemen bütün malzemeler toza dönüştürülebilirler. Tozların üretim yöntemi, malzemenin özellikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir [5]. Ayrıca, tozların şekli, boyutu ve yüzey durumu da malzemenin özelliklerini ve karakteristiğini etkilemektedir. Bu nedenle, değişik üretim yöntemleri ile farklı fiziksel ve kimyasal özellikteki metal tozları elde edilmektedir. Bunlar; mekanik işlemler, kimyasal reaksiyonlar, elektrolitik depozisyon ve atomizasyon ile üretim yöntemleridir [3].

2.1.1 Mekanik İşlemler ile Üretim

Mekanik üretim yöntemleri, 4 temel proses altında sınıflandırılabilir: darbe, aşındırarak öğütme, kesme ve basmadır. Darbe prosesi, malzemenin darbeye maruz kalması sonucu malzemede çatlak oluşumu ve bunu takiben küçük parçalara ayrılması esasına dayanmaktadır. Aşındırarak öğütme, aşındırıcılardan birinin üzerinde sürtünme hareketiyle parçacıkların boyutunda küçültülmesi işlemidir. Kesme prosesinde malzeme klivaj tipi kırılma görülür. Kesme, malzeme çok sert olmadığında uygulanabilmektedir. Kesme ile üretilen tozlar kaba tanelidir. Basma prosesi ise malzemenin kırılmasıyla toz üretimi esasına dayanmaktadır. Basma yönteminin uygulanabilmesi için toz üretilecek olan malzemenin gevrek olması gerekir. Bu yöntemde elde edilen tozlar kaba tanelidir. 1-100 µm boyut aralığında toz üretimi için karıştırma bilyeli öğütücüler daha uygundur [6].

2.1.2 Kimyasal Reaksiyonlar ile Üretim

Bu yöntem, kimyasal indirgeme ve kimyasal ayrıştırmadan oluşmaktadır. Kimyasal indirgeme, metal bileşiklerinden metal tozu elde etmede oldukça etkili bir yoldur. Ürünün ergime sıcaklığının altında, atmosfer kontrollü fırında H_2 ya da CO ile indirgenerek metal üretilebilir. İndirgeme işleminden sonra, metal tozu elde etmek için kırma ve öğütme işlemleri uygulanır. Bakır, molibden, tungsten ve nikel tozlarının üretiminde, daha kolay ve düşük maliyette olmasından ötürü genellikle indirgeme prosesi kullanılır. Toz üretiminde diğer bir yol ise ayrıştırmadır. Ayrıştırma kendi içinde 2 gruba ayrılır: metal karbonillerin ayrıştırılması ve metal hidrürlerin ayrıştırılması. Metal karbonillerin ayrıştırılmasında en yaygın kullanım demir ve nikel tozlarının üretimindedir. Karboniller düşük kaynama noktasına sahiptirler ve normal sıcaklıklarda sıvıdırlar. Karbonillerin oluşumu, basınç altında $CO_{(gaz)}$ ve metalin reaksiyonu ile gerçekleşmektedir. Karbonil grubunu ayrıştırmak için atmosfer basıncı altında buhar ısıtılır. Metal tozu elde etmek için, ayrıştırma işlemi gaz fazında meydana gelmelidir, reaksiyon yüzeyinde değil [7]. Bu işlem ile metal tozları üretilebilmektedir. Metal tozları ayrıca hidrürlerin kimyasal ayrıştırılması ile de üretilebilmektedir. Metal hidrürler oda sıcaklığında kararlıdırlar ve makul derecede gevrekler [3]. Metal hidrürlerin bu karakteristiği, öğütülerek istenilen ayarda kolayca toz formuna dönüşmelerine olanak

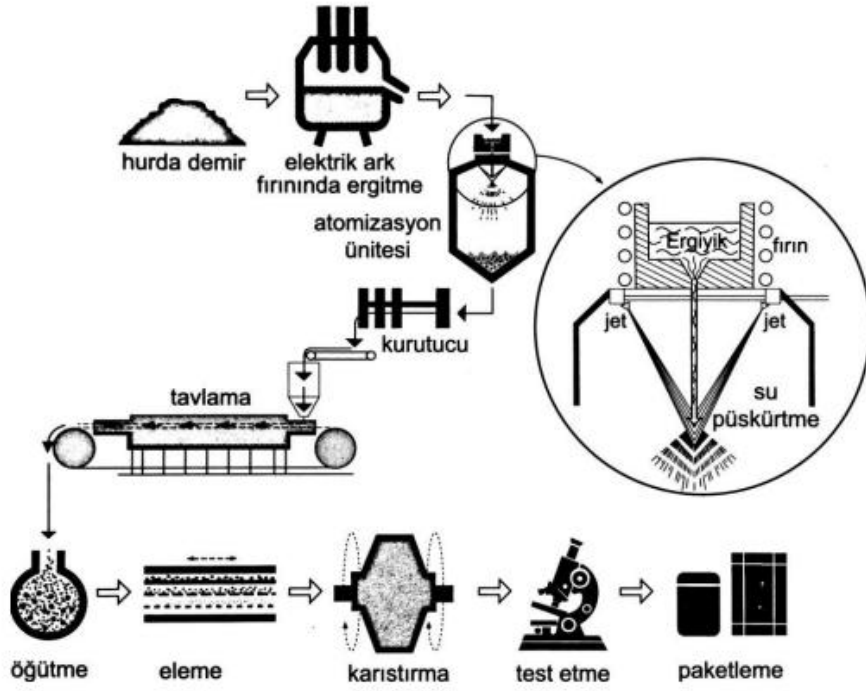
vermektedir. Bundan sonra, toz formundaki metal hidrürler, metal tozu elde etmek için ayrıştırılmalıdır. Ayrıştırma, hidrür tozlarının vakum atmosferinde ısıtılmasıyla meydana gelmektedir. Hidrürlerin ayrıştırılması esnasında dikkat edilecek en önemli nokta, O₂, N₂ ve C bulaştırmaktan kaçınmaktır. Bu yöntemle, titanyum, zirkonyum, vanadyum, toryum, uranyum gibi refrakter metaller ve tantalum, niyobyum gibi yüksek sertlikteki metaller üretilmektedir [7].

2.1.3 Elektrolitik Depozisyon (Elektroliz) ile Üretim

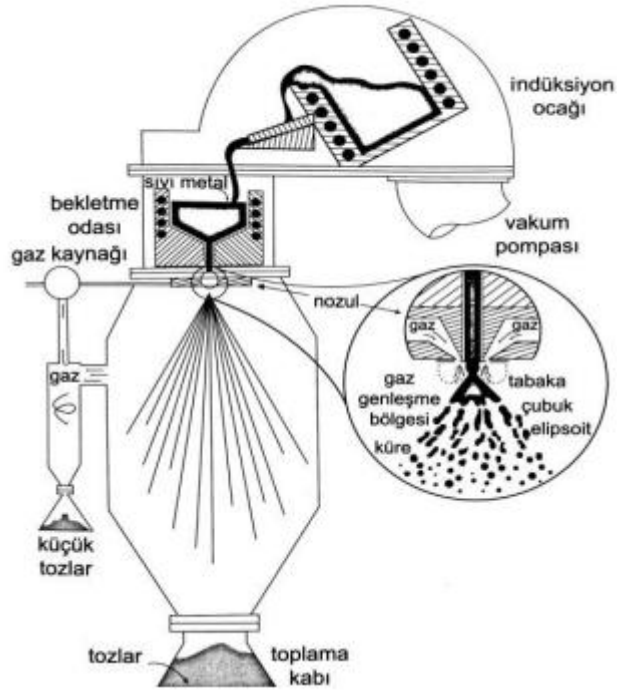
Elektrolitik hücrenin katodunda toz çökmesi oluşturma esasına dayanan üretim yöntemidir. İlk olarak anot, elektrolitik hücrede uygulanan voltaj altında çözünmeye başlar. Hem anot hem de katotta reaksiyonlar, reaksiyonlara bağlı olarak da elektron transferi meydana gelir. Toz üretiminin tamamlanması için katot birikintisi yıkanır, kurutulur, elenir ve tavlânır [8]. Elektrolit boyunca transferdeki amaç; katotta biriken tozları saflaştırmaktır. Bu yöntemin esas avantajı, üretilen tozların yüksek saflıkta olmasıdır. Bu nedenle, elektroliz yöntemi genellikle paladyum, bakır, demir, çinko, manganez ve gümüş tozu üretiminde tercih edilir [19].

2.1.4 Atomizasyon ile Üretim

Atomizasyon yöntemi, sıvı metalin basınçlı su veya gaz ile çok hızlı bir şekilde katılaştırılıp metal tozları halinde parçalanması esasına dayanır. Bu yöntemde, sıvı metal küçük bir delikten püskürtülür ve bu sıvı metal basınçlı hava, soygaz veya su ile parçalara ayrılır. Bu parçalara ayrılmış küçük sıvı parçalar hızla soğur [9]. Metal ve önalaşımlandırılmış tozların üretiminde en çok tercih edilen yöntemdir. Su atomizasyonu ve gaz atomizasyonu en yaygın kullanılan tekniklerdir. Su atomizasyonu yönteminde soğuma gaz atomizasyonuna göre daha hızlı olduğundan, elde edilen toz şekli düzensiz ve pürüzlüdür. Daha yüksek su basıncı, daha yüksek su hızına, dolayısıyla daha küçük boyutta parçacık elde edilmesine olanak sağlar [19]. Şekil 2.3'te su atomizasyonunun, Şekil 2.4'te ise gaz atomizasyonunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. 3 Su atomizasyon yöntemi akış şeması [19]

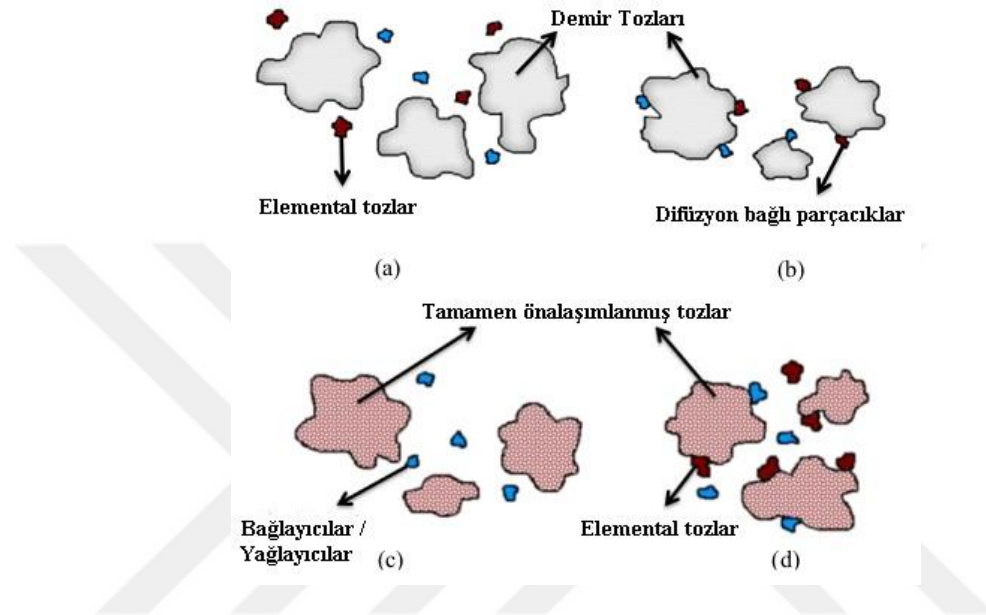


Şekil 2. 4 Düşey gaz atomizasyonu ünitesi [19]

2.2 Toz Metalurjisindeki Alaşımlama Yöntemleri

Toz metalurjisindeki ikincil ısıt işlemlerin (genellikle su vermeyle sertleştirme ve temperleme) amacı; kırılma tokluğu ve sertleşebilirlik gibi belirli malzeme özelliklerini

geliştirmektir. Sertleşebilirlik, soğuma esnasında malzemenin martenzitik mikroyapıya dönüşebilme yeteneğidir. Ayrıca, alaşım elementi ilavesi de sertleşebilirliği etkiler ve alaşım elementi ekleme prosedürü, mikroyapı, boyut, gözeneklilik dağılımı ve şekli gibi malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler [10]. Toz metalurjisinde birkaç alaşımlama yöntemi vardır; harmanlama, difüzyon alaşımlama, önalaşımlama ve hibrit alaşımlamadır. Şekil 2.5'te bu yöntemler şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. 5 Alaşımlama yöntemlerinin şematik gösterimi. (a) harmanlama, (b) difüzyon alaşımlama, (c) önalaşımlama, (d) hibrit alaşımlama

2.2.1 Harmanlama

Harmanlama yöntemi, alaşım elementlerinin saf demir tozu içine elementel halde eklenip, kimyasal bağ olmaksızın sadece fiziksel olarak karıştırılması ile alaşımlama esasına dayanır. Diğer alaşımlama yöntemlerine kıyasla çok daha düşük maliyeti nedeniyle en yaygın kullanılan yöntemdir. Ancak, sinter sıcaklığı, metal ve alaşım tozlarının difüzyonuna imkan sağlayacak kadar yüksek değildir. Bu nedenle, elde edilecek yapı heterojendir, bu da toz segregasyonuna neden olmaktadır [11].

2.2.2 Difüzyon Alaşımlama (Kısmi Alaşımlama)

Difüzyon alaşımlama (kısmi alaşımlama) yönteminde, esas toz ile alaşım elementleri birlikte tavlanaarak birbirleriyle bağ oluşumu sağlanır [12]. Alaşım tozları, tavlama esnasında esas tozun tane sınırlarına ilerler ve tanelerarası bağ oluşturarak

alaşımlanmış bölgeler oluştururlar. Bu durum heterojen bir yapıya neden olur [13]. Difüzyon alaşımlı tozlar genellikle yüksek sıkıştırılabilirliğe sahiptirler; çünkü esas tozun sıkıştırılabilirliği difüzyon alaşımlama işleminden sonra da hala korunmaktadır [13].

2.2.3 Önalaşımlama

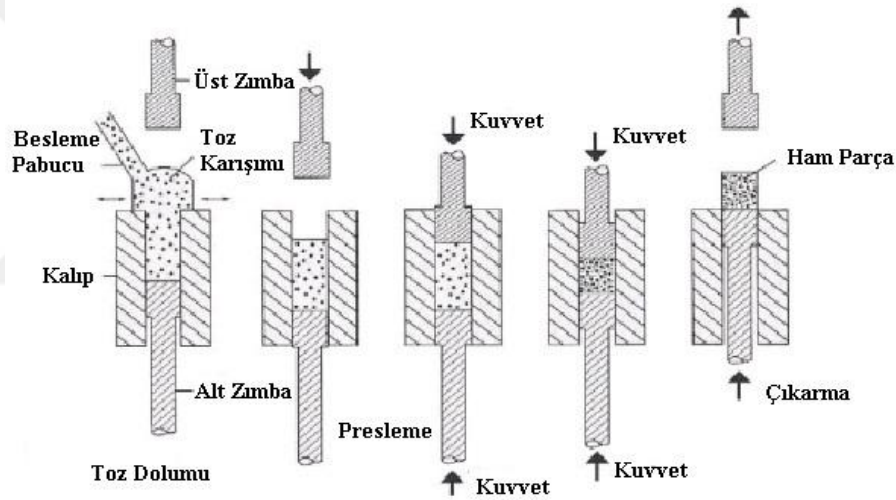
Önalaşımlama işlemi, atomizasyon işleminden önce sıvı metal içerisine alaşım elementinin eklenmesi ile gerçekleştirilen yöntemdir. Her bir partiküle alaşım içeriğinin üniform dağılımı atomizasyondan sonra sağlanabilir; çünkü her partikülün kimyasal kompozisyonu aynıdır [14]. Bu bilgilere dayanarak, önalaşımlama yöntemiyle homojen mikroyapılar elde edilebileceği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, önalaşımlama ile elde edilmiş tozların sertleşebilirlikleri yüksekken; sıkıştırılabilirlikleri, harmanlama ve difüzyon alaşımlama yöntemlerine kıyasla daha düşüktür; çünkü partikül içindeki alaşım elementleri üniform yapıdadır [13].

2.2.4 Hibrit Alaşımlama

Hibrit alaşımlama, diğer 3 yöntemin kombinasyonu şeklinde bir yöntemdir. Her yöntem, farklı avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Hibrit alaşımlama da genellikle sertleşebilirlik ve sıkıştırılabilirlik gibi son yapının belirli özelliklerini optimize etmek için kullanılmaktadır. Genellikle önalaşımlanmış tozlar sertleşebilirlik kabiliyetleri için, harmanlama ve difüzyon alaşımlama yöntemi ile elde edilen tozlar ise sıkıştırılabilirlik kabiliyetleri için tercih edilmektedir. Böylece hibrit alaşımlama yöntemi, önalaşımlanmış tozlar ile harmanlanmış veya difüzyon alaşımlanmış tozların kombinasyonu ile optimizasyonun sağlandığı bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır [13]. Sinter sertleştirme prosesi için esas toz olarak genellikle homojen ve üniform yapısı nedeniyle önalaşımlanmış tozlar tercih edilir. Grafit formundaki karbon ve bakır ise sinter sertleştirme prosesinde genellikle harmanlama yöntemi ile kullanılır; çünkü bu tür tozların önalaşımlama yönteminde ham yoğunluğa hem de sıkıştırılabilirliğe zarar verebilmektedir [14].

2.3 Tozların Preslenmesi

Tozlar genellikle akışkan özelliktedirler ve bu sayede gerilme altında şekil verme imkanı sunarlar [15]. Preslemedeki amaç, metal tozları, yağlayıcı ve bağlayıcılardan oluşan toz karışımını istenilen boyutta ve şekilde bir parça haline getirmektir. Genellikle %0,5-1,5 arası yağlayıcı eklenmektedir ve en yaygın kullanılan yağlayıcılar çinko stearat ve parafindir. Yağlayıcı kullanmadaki amaç, ham presin kalıptan daha kolay çıkmasını sağlamak ve kalıp duvarı arasındaki sürtünmeyi azaltmaktır. Bağlayıcı kullanmanın sebebi ise tozların birbirlerine tutunabilmelerini sağlamaktır. Farklı türlerde presleme yöntemleri mevcuttur. Bunlardan bazıları; presleme, santrifüj sıkıştırma, ekstrüzyon ve eşbasıncılı kalıplama şeklindedir. Şekil 2.6'da genel hatlarıyla tozların preslenmesi gösterilmektedir.



Şekil 2. 6 Toz preslemenin şematik gösterimi [16]

Zimbalar tarafından uygulanan basınç üniform olmalıdır; ancak yine de her bir metal tozunun presleme sonucunda ulaşılacak yoğunluğu, o malzemenin teorik yoğunluğundan farklı olacaktır. Bu durum, tozun üretim yöntemine, tane büyüklüğüne, şekil ve yüzey durumuna, gördüğü ön işlemlere bağlıdır.

Partiküller üzerine basınç uygulanmasıyla birlikte ilk anda noktasal temaslarda elastik deformasyon oluşur. Basınç arttıkça partiküller tekrardan düzenlenir ve kaymayla temas eden partikül sayısı artar, temas alanları genişler ve plastik deformasyon bölgeleri artar. Böylece gözeneklilik azalır ve gözenek boyutları da küçülür. Bu mekanik kaynama işlemiyle toz hale nazaran daha yüksek ham yoğunluk sağlanmaktadır.

Presleme yöntemlerini sıcak ve soğuk presleme olarak ikiye ayrılır. Soğuk presleme yöntemlerinde preslemeden sonra sıcaklık uygulanırken; sıcak presleme yöntemlerinde basınç ve sıcaklık aynı anda uygulanmaktadır. Soğuk veya sıcak izostatik preslemede, eksenel presleme yöntemlerine göre malzemenin ölçü hassasiyeti ve mekanik özellikleri daha iyi olmaktadır; çünkü basınç homojen olarak dağılır ve bu sayede daha yüksek yaş mukavemet ve yaş yoğunluk (ham yoğunluk) elde edilir [18].

2.4 Sinterleme

Presleme sonrası elde edilen malzeme, istenen mekanik özellikleri karşılayamaz. Bu nedenle kesinlikle bir ısıtma işlemi ihtiyaç duyulur: sinterleme. Sinterleme ile istenen kriterlere uygun malzeme elde edilir; çünkü tozların birbirine bağlanması, parçanın istenen son özelliklerini karşılamak adına kaçınılmaz bir gerekliliktir. Bu yüzden sinterleme işlemi toz metalurjisinin en önemli adımıdır [15]. Sinterleme, birbirini tutan ve sert bir yapı formunu elde etmek için yüksek sıcaklıklarda tozların birbirleri arasında kimyasal bağ oluşumuna yardımcı olur. Sinterleme işlemi, partiküllerarası bağ oluşumunu sağlayarak partiküllerin yüzey alanının düşmesine, dolayısıyla da yüzey enerjilerinin düşmesine neden olur. Bu bağlar, atomik düzeyde difüzyon mekanizmaları ile oluşur [15]. Bazı metal ve alaşımların sinterleme sıcaklıkları ve sinterleme süreleri Çizelge 2.1’de verilmiştir [19].

Çizelge 2. 1 Bazı metal ve alaşımların sinterleme sıcaklıkları ve süreleri [19]

Malzeme	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)
Bakır, Pirinç, Bronz	760-900	10-45
Demir	1000-1150	8-45
Nikel	1000-1150	30-45
Paslanmaz Çelikler	1100-1290	30-60
Alnico Alaşımları	1200-1300	120-150
Tungsten Karbür	1430-1500	20-30
Molibden	2050	120
Tungsten	2350	480
Tantal	2400	480

Sinterleme, genel olarak 2 gruba ayrılır; katı faz sinterlemesi ve sıvı faz sinterlemesi. Eğer tozlar, sinterleme sıcaklığında katı halde sinterleniyorsa buna katı faz sinterlemesi

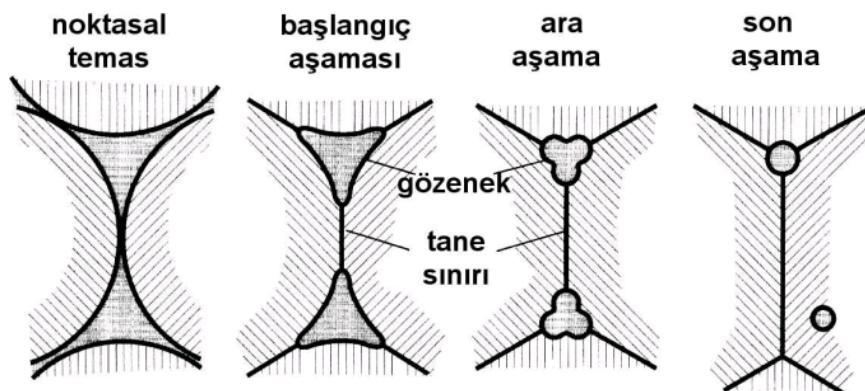
denir. Eğer sinterleme sıcaklığında herhangi bir sıvı faz mevcutsa, o zaman sıvı faz sinterleme mekanizması ortaya çıkar.

2.4.1 Katı Faz Sinterlemesi

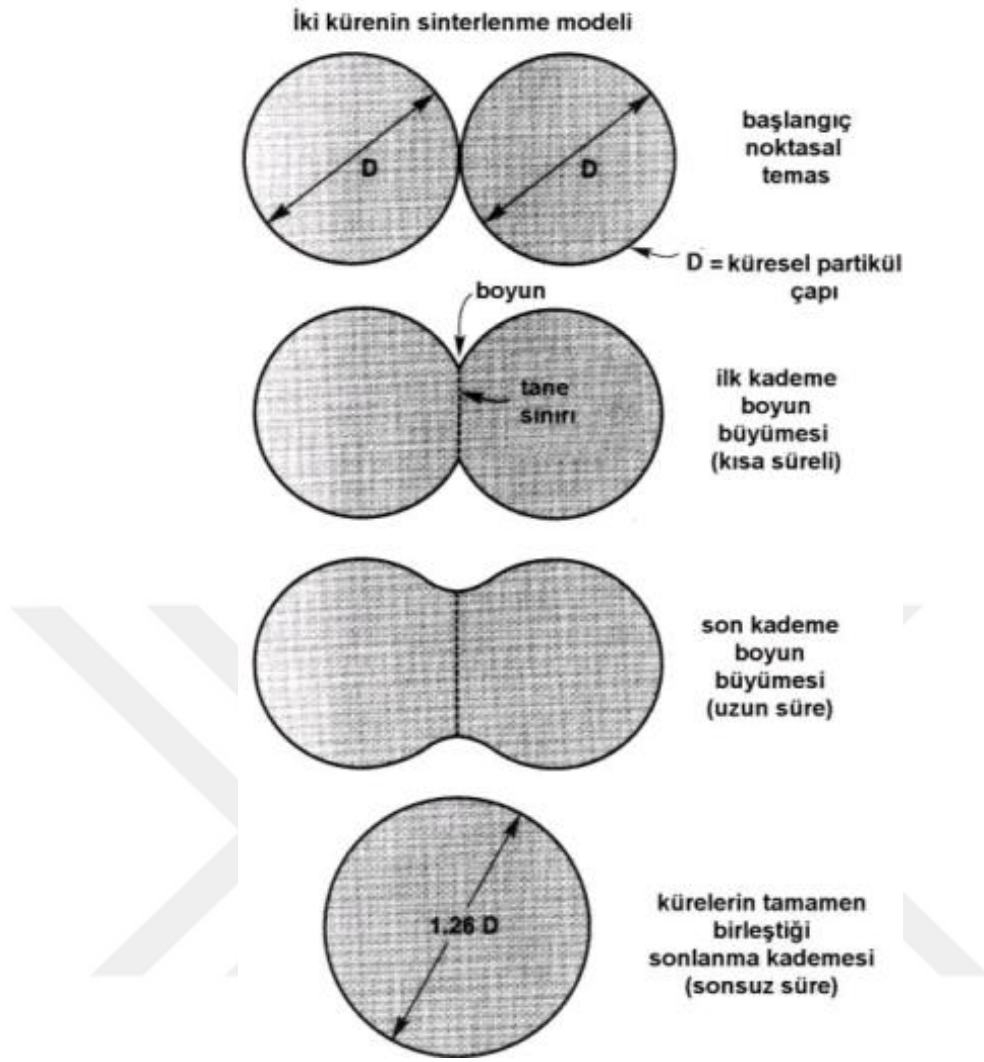
Katı faz sinterlemesi, tek bileşenli sistemlerde sinterleme işleminin ergime sıcaklığının altında yapılan sinterleme çeşididir. Tercih edilen sıcaklık, genellikle malzemenin ergime sıcaklığının %80'i olarak seçilir. Sinterleme esnasında malzemede boyutsal ve mikroyapısal değişimler gibi fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelmektedir. Katı faz sinterlemenin basamakları şu şekilde özetlenebilir:

- 1- Partiküller arasında bağ başlangıcı (boyun oluşumu)
- 2- Boyun büyümesi
- 3- Gözenek kanallarının kapanması
- 4- Gözeneklerin yuvarlaklaşması
- 5- Yoğunlaşma veya gözeneklerin daralması
- 6- Tane büyümesi [7].

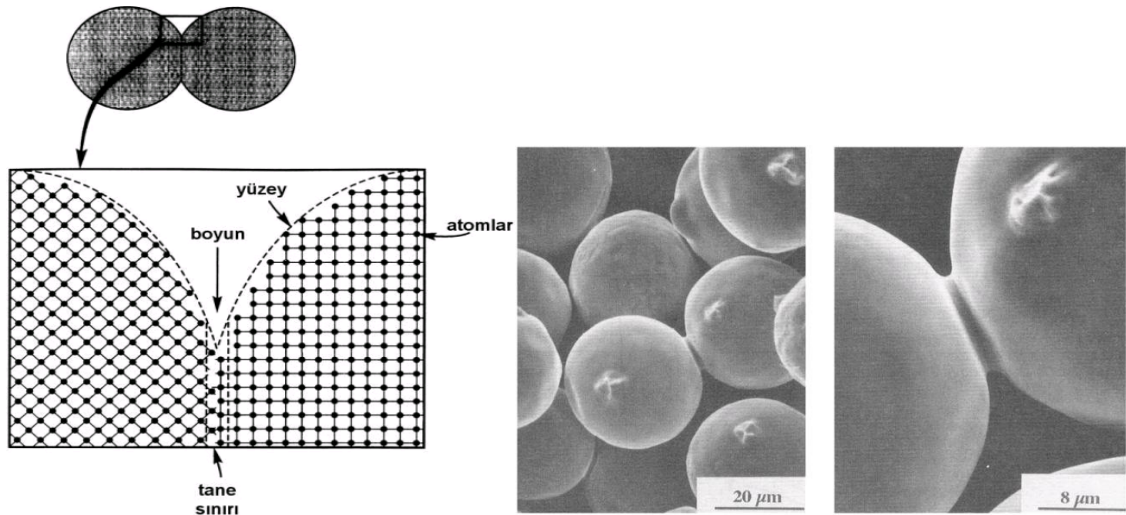
Partiküllerin noktasal temasıyla başlayan katı faz sinterlemesinin gözenek yapısındaki değişim Şekil 2.7'de, bir noktada temas ile başlayan partiküller arası bağ gelişiminde iki küreli sinterleme modeli Şekil 2.8'de, partiküller arası oluşan sinter bağlarının atomsal düzeyde gösterimi ve örnek olarak da vakum altında 1030°C'de 30 dakika boyunca sinterlenmiş nikel kürelerin boyun oluşumunu gösteren SEM görüntüsü Şekil 2.9'da verilmiştir [20].



Şekil 2. 7 Katı faz sinterlemesinde gözenek yapısındaki değişim



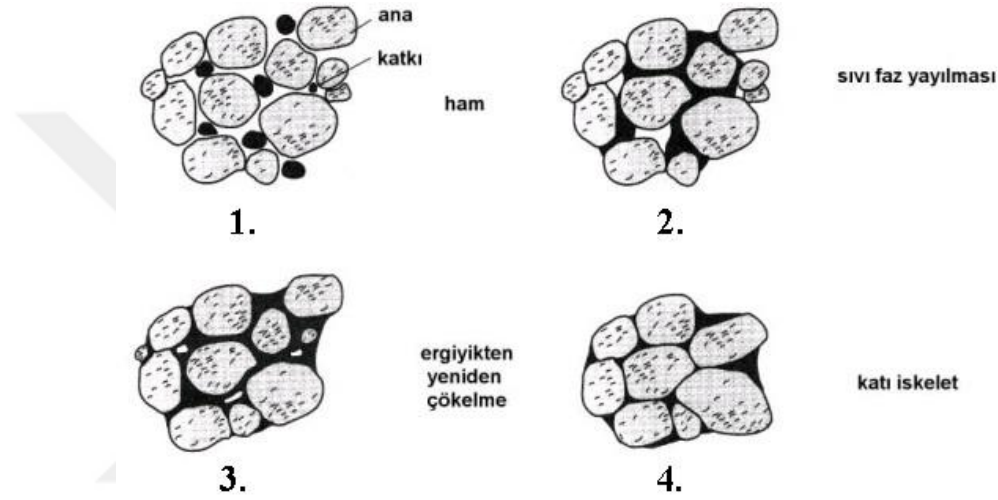
Şekil 2. 8 İki küreli sinterleme modeli [20]



Şekil 2. 9 (a) Atomik boyutta sinter oluşumunun şematik gösterimi, (b) Vakum altında 1030°C'de 30 dk boyunca sinterlenmiş nikel kürelerin boyun oluşumunu gösteren SEM görüntüsü [20]

2.4.2 Sıvı Faz Sinterlemesi

Sıvı faz sinterlemesi, birden fazla bileşeni olan sistemlerde, sinterleme işleminin bileşenlerden en az birinin ergime sıcaklığının üzerinde yapılmasıdır. Sinterleme esnasında oluşan sıvı faz taneleri birbirine bağlar ve içinde hızlı bir yayınma olur. Dolayısıyla sinterleme hızında büyük ölçüde artış görülür [21]. Sıvı faz sinterlemesi, daha hızlı atomsal difüzyon olduğundan katı faz sinterlemesine kıyasla daha hızlı gerçekleşen sinterleme türüdür. Sıvı faz sinterlemesinde temel mekanizma ısılatmadır. Sıvı faz sinterlemesinin basamakları Şekil 2.10'da gösterildiği gibidir.

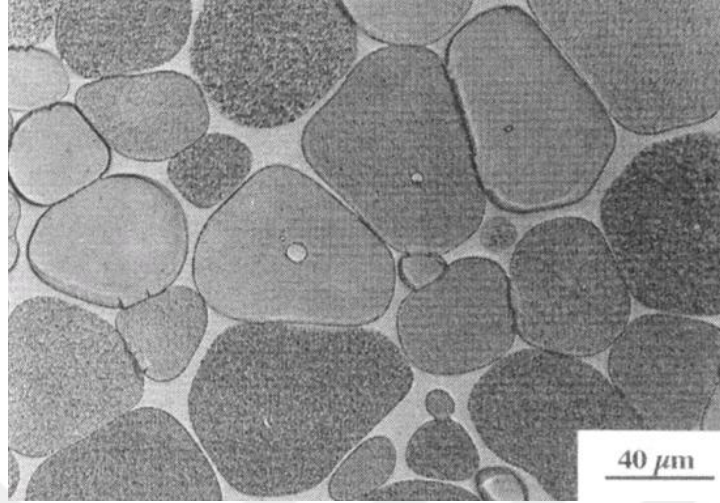


Şekil 2. 10 Sıvı faz sinterlemesinin aşamaları. (1) Başlangıç, (2) Sıvı akışı (tekrar düzenlenme), (3) Çözünme ve tekrar çökme, (4) Katı faz bağlanması [20]

Başlangıçta, ısıtma esnasında taneler birbirlerine katı hal sinterlemesi ile bağlı konumdadır. İlk sıvı oluşumu gerçekleştiğinde, sıvı faz taneler arasında yayılır ve hızlı bir yoğunluk artışı gözlemlenir. Sıvı faz, katıyı ısıtarak katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlemeyi sağlar. Bu aşamada, daha küçük tane kütleleri sıvı içinde çözünür, sıvı içinde yayılır ve daha sonra daha büyük tanelerin üzerinde çöker [19]. Zamanla tane sayısı azalır ve tane boyutu artar [22]. Katı çözünürlüğü, tane boyutuyla ters orantılıdır.

Sıvı faz sinterlemesi, normal sıvı faz sinterlemesi ve infiltrasyon olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilir. Normal sıvı faz sinterlemesi, sinterleme sıcaklığında en az bir bileşenin ergiyik oluşturmasıyla gerçekleşirken; infiltrasyon, ergime sıcaklığı, ana metalin sinterleme sıcaklığından düşük olan infiltrant malzemenin gözenekli yapının içine penetrasyonu ile gerçekleştirilir. İnfiltrasyon işlemi, parçaları sızdırmaz yapar ve

mekanik özelliklerinde artış sağlar; ancak boyut hassasiyetini azaltır [22]. Şekil 2.11’de sıvı faz sinterlemesi ile üretilmiş bir ağır alaşımın mikroyapısı görülmektedir [20].



Şekil 2. 11 Sıvı faz sinterlemesi ile üretilen ve bileşimi %95 W, %3,5 Ni, %1,5 Fe olan bir ağır alaşımın mikroyapısı [20]

Sıvı faz sinterlemesinin gerçekleşebilmesi için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır:

- Sinterleme sıcaklığında sıvı ve katı fazın beraberce uzun bir süre bulunması için kompozisyona uygun faz diyagramı göz önüne alınmalıdır.
- Katı fazın sıvı faz içinde çözünürlüğü olmalıdır.
- Sıvı faz miktarı boyutsal değişim minimum olacak kadar az fakat gerekli yoğunluğa ulaşabilmek için yeterince fazla olmalıdır.
- Katı faz tozları, hızlı yoğunlaşmayı sağlamak için oldukça küçük olmalıdır.
- Katı faz taneleri, sıvı faz tarafından tamamen çevrelenmelidir [20].

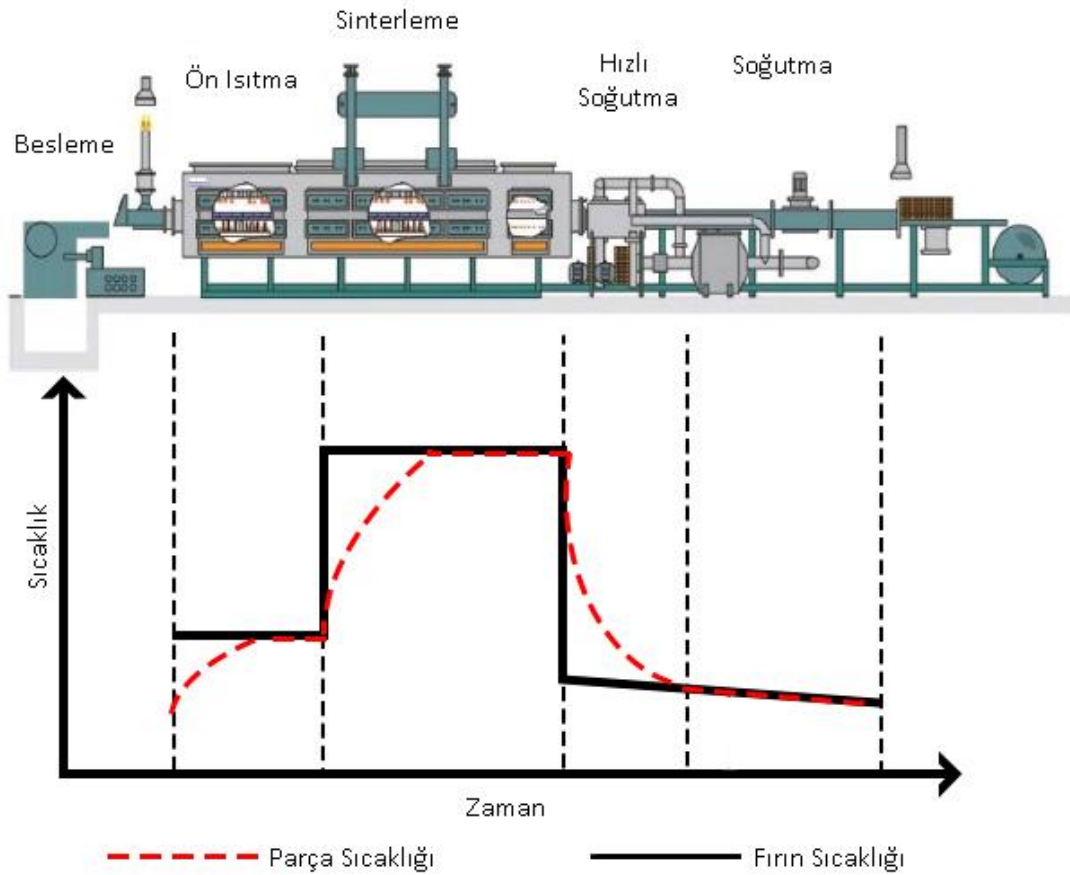
SİNER SERTLEŞTİRME

Sinterleme işleminden sonra elde edilen ürünlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi adına genellikle ikincil ısıtma işlemine ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle, uygulanan bu ısıtma işlemleri sinterleme olarak adlandırılabilir. Sinter sinterleme prosesi de bu iki işlemin, yani sinterleme ve sinterlemenin, kombinasyonu olarak ortaya çıkmıştır. Bu iki işlem, aşama aşama tek bir operasyonda, aynı sinterleme döngüsünde gerçekleştirilmektedir [23]. Geleneksel su verme ve temperleme yöntemlerine kıyasla birçok avantajı mevcuttur. Sinterlenmiş malzemeler, su verme yönteminde östenit faza çıkartılır ve genellikle ısıtma işlemi yağa daldırılır. Artık östenitlerin giderilmesi için de haricen temperleme veya gerilim giderme tavlama uygulanır. Bu şekilde, sinterleme sonucu elde edilmiş olan ferritik-perlitik yapı, soğuma hızına bağlı olarak martenzitik yapıya dönüştürülmüş olur [13]. Sinter sinterlemede ise parçaların sinterleme sıcaklığından, malzemelerin çekirdeğinin büyük bir kısmını martenzite dönüştürebilecek kadar hızlı soğutulmakta ve bunların hepsi tek bir döngüde gerçekleştirilmektedir. Bu hızlı soğuma işlemi, sinterleme fırınının devamına eklenen bir soğuma ünitesi ile yapılmaktadır. İkincil işlemlere gerek kalmaması ve zaman kaybının önlenmesi, maliyette düşüş meydana getirmektedir. Toz metalurjisi ile üretilen parçalar gözenekli yapıda olduklarından, su veya yağ verme işlemi malzeme yapısında büyük sorunlar oluşturabilir. Ayrıca su verme yöntemi, yüzey çatlaklarına ve çarpılmalara neden olabilmektedir. Bu sebeplerden ötürü sinter sinterleme prosesi çok daha cazip bir yöntem olarak görülmektedir.

Sinter sinterleme prosesi, endüstriyel ölçekli sürekli ızgara bantlı fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Bu fırınlar, bağlayıcı giderme işleminin gerçekleştirildiği ön

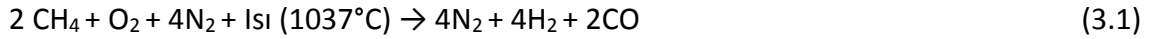
ısıtma bölgesi, sinterleme işleminin gerçekleştirildiği soğuma bölgesi ve yavaş soğuma bölgesinden oluşmaktadır [24]. Sinterleme süresi, bant hızıyla ayarlanmaktadır.

Sinter sertleştirme prosesinde fırına verilen parçalar, bağlayıcı ve yağlayıcılarının giderilmesi için öncelikle 500-600°C'de ısıtılırlar. Bu işlemten sonra fırın kademeli olarak sinterleme sıcaklığına ısıtılır. Sinterleme sıcaklığına ulaşıldığında, sinterleme bölgesinde sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Sinterleme fırınının hemen ardına yerleştirilmiş olan hızlı soğutma ünitesiyle de sinter sertleştirme işlemi gerçekleştirilir. Hızlı soğutma ünitesi, ortama yüksek hızda hava veya inert gaz (azot, argon vb.) verir. Martenzit oluşumu için soğumanın hızlı gerçekleşmesi gerekmektedir. Hızlı soğutma ünitesinden çıkan parçaların sıcaklıkları 200°C'ye kadar inmektedir [24]. Şekil 3.1'de sinter sertleştirme fırınının şematik gösterimi ve prosese bağlı olarak fırın ve parça sıcaklığının değişim grafiği verilmiştir [25].



Şekil 3. 1 Sinter sertleştirme fırının şematik gösterimi [25]

Demir esaslı alaşımlarda, atmosfer olarak endogaz kullanılmaktadır. Bu sayede, parçaların yüksek sıcaklıklarda havayla teması kesilerek oksitlenme ihtimali ortadan kaldırılmış ve mekanik özelliklerin olumsuz etkilenmesi engellenmiş olur [25]. Fırın atmosferi olarak kullanılan endogaz, fırının içerisinde elde edilmektedir. Sinter fırınına verilen metan gazı ile hava, ortam sıcaklığı ile birlikte tepkimeye girer ve endogaz elde edilir. Endogaz reaksiyonu teorik olarak aşağıdaki gibidir:



Endogazın bileşimi yaklaşık olarak şu şekildedir: H_2 (%40), N_2 (%40), CO (%19.5-19.8), CO_2 (0.2-0.5), H_2O (< %0.1), CH_4 (< %0.1).

3.1 Sinter Sertleştirme Avantajları ve Dezavantajları

Sinter sertleştirme prosesi, son dönemlerde giderek önem kazanan, düşük maliyetli ve yüksek performanslı parça üretiminde kullanılan bir imalat yöntemidir. Bilindiği üzere, geleneksel sinterleme işleminden sonra yüksek mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için ikincil ısı işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Sinterlenmiş parçaların dayanımlarının artırılabilmesi için uygulanan tekrar östenit sıcaklığı çıkartma ve hızlı soğutma işlemleri, üretim maliyeti olarak yansımaktadır. Geleneksel yöntemlerde dayanım arttırmak için yapılan ani soğutma işleminde kullanılan yağ, parçaların gözenekli yapıda olmasından ötürü korozyon gibi büyük sorunlar çıkartabilmektedir. Ayrıca bu yöntemlerdeki ani soğutma işlemi malzemede çarpılmalara neden olmaktadır. Sinter sertleştirme prosesinin tek bir döngüde ikincil işlemlere gerek kalmaksızın gerçekleştirilmesi, soğutma işleminin daha optimal seviyede yapılarak hem yeterli mukavemetin kazandırılıp hem de boyutsal değişimi en aza indirmesi, kullanılan endogaz sayesinde havayla temasın kesilerek mekanik özelliklerin korunması, düşük maliyetle yüksek performanslı ürün elde edilmesi gibi avantajları nedeniyle önem kazanmış bir yöntemdir.

Sinter sertleştirme yönteminin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Her ne kadar düşük maliyetle parça üretiliyor olsa da ilk yatırım maliyeti, diğer yöntemlere kıyasla daha yüksektir. Ancak, yüksek miktarda üretim yapıldığı takdirde ekonomik olmaktadır. Ayrıca, sinter sertleştirilmiş parçalar yüksek sertlikte olduklarından dolayı çok zor işlenebilirler.

3.2 Sinter Sertleştirmeyi Etkileyen Faktörler

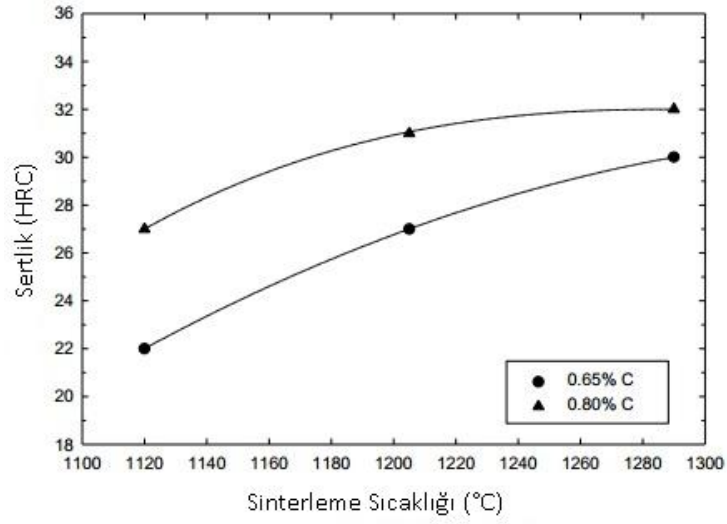
Genel olarak toz metalurjisinde amaç; istenilen mekanik özelliklerde malzeme elde etmektir. İstenen özellikleri sağlamak, nihai ürünün özelliklerini etkileyen parametrelerin kontrolünden geçmektedir. Bu parametreleri 2 grup altında toplayabiliriz: üretim koşulları ve malzeme koşulları.

3.2.1 Üretim Koşulları

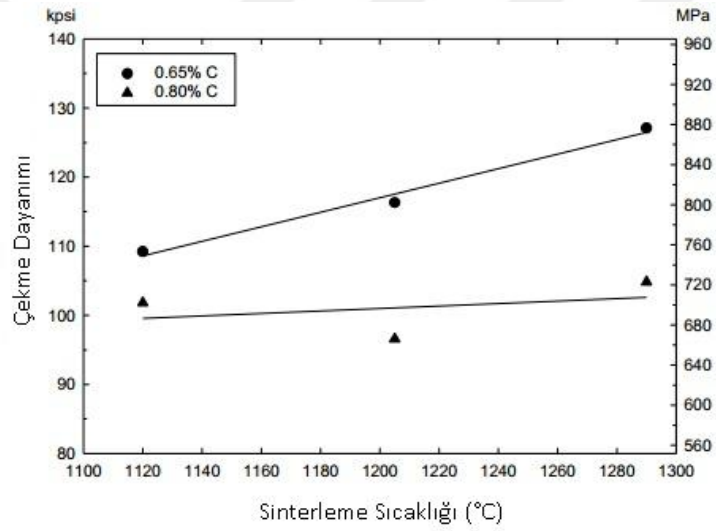
Üretim koşulları, son ürün için oldukça kritik öneme sahiptir. Genel hatlarıyla bu parametreleri, sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, sinter fırını atmosferi, soğuma hızı ve alaşımlama yöntemleri başlıkları altında toplayabiliriz.

3.2.1.1 Sinterleme Sıcaklığı

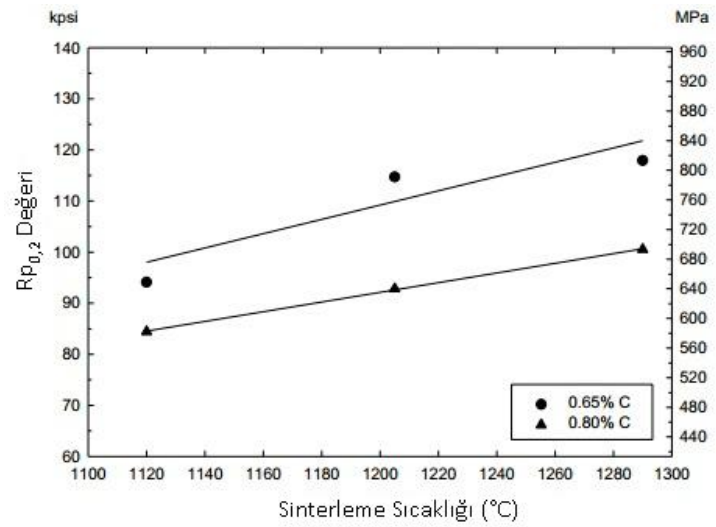
Sinterleme, tozları biraraya getiren bir ısı işlemidir ve tozları birbirine bağlanmasında etkili olan mekanizma kütle taşınım mekanizmasıdır. Atomik kütle taşınımı, sıcaklık arttıkça katlanarak artar. Bununla birlikte, kütle taşınım hacmi ve hızı da sinterleme sıcaklığı arttıkça artar [7]. Daha iyi sertleşebilirlik, alaşım elementlerinin daha iyi difüzyonuyla, daha iyi difüzyon da daha yüksek sinterleme sıcaklığı ile sağlanır [26]. Daha yüksek sinterleme sıcaklıkları, alaşım elementlerinin homojenizasyonu için faydalı olsa da ekonomik sebeplerden ötürü zararlı da olabilmektedir. Ayrıca, sinterleme sıcaklığının gelişigüzel arttırılması sorunlara neden olmaktadır. Eğer sinterleme sıcaklığı düşük seçilirse yetersiz sinterleme; yüksek seçilirse de aşırı sinterleme meydana gelir. Sinterleme sıcaklığının, 6.8 kg/m^3 yoğunluğa sıkıştırılmış, nitrojen atmosferinde sinterlenmiş ve 205°C 'de temperlenmiş çapraz kırılma dayanımı numunesinin görünür sertliği, maksimum çekme dayanımına ve akma dayanımına olan etkisi, sırasıyla Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te gösterildiği gibidir [27].



Şekil 3. 2 Sinterleme sıcaklığının görünür sertliğine olan etkisi [27]



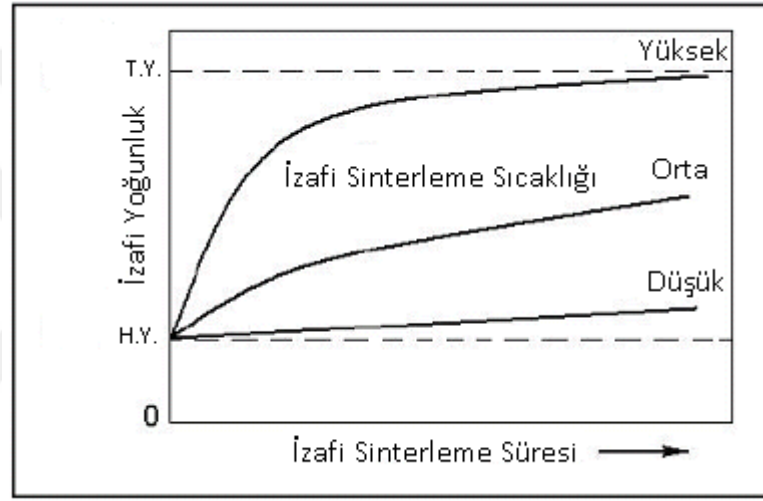
Şekil 3. 3 Sinterleme sıcaklığının maksimum çekme dayanımına olan etkisi [27]



Şekil 3. 4 Sinterleme sıcaklığının akma dayanımına olan etkisi [27]

3.2.1.2 Sinterleme Süresi

Sinterleme süresindeki artış, sinterlemeyi ve kütle taşınımını artırır. Nyberg ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar sinterleme ile oluşan boyunların, kısa sinterleme sürelerinde yeterince gelişemediğini göstermiştir [27]. Kang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da sinterleme süresi arttıkça yoğunlaştırmanın arttığı görülmüştür [21]. Ancak, daha uzun sinter süresinin etkisi, daha yüksek sinter sıcaklığının etkisinden daha düşüktür; çünkü kütle taşınım mekanizmasını asıl etkileyen şey sıcaklıktır. Sinterleme süresinin ve sıcaklığının yoğunluk üzerindeki göreceli etkileri Şekil 3.5'te gösterildiği gibi olup, "T.Y." teorik yoğunluğu, "H.Y." ham yoğunluğu ifade etmektedir.



Şekil 3. 5 Sinterleme süresi ve sıcaklığının yoğunluk üzerindeki göreceli etkisi [28]

Sinterleme süresindeki artış, yüzey dekarbürizasyonuna ve daha düşük sertliğe neden olabilmektedir [27]. Bu nedenle, daha sağlıklı sonuçlar için sinterleme süresi ve sıcaklığıyla ilgili optimizasyon yapılmalıdır. Endüstriyel uygulamalarda, ekonomik sebeplerden dolayı genellikle sinterleme döngüsü maksimum 30 dakika olarak seçilir [29].

3.2.1.3 Sinter Fırını Atmosferi

İstenen son özellikler için fırın atmosferi son derece kritik öneme sahiptir. Oksijen, su buharı ve CO₂, demir esaslı malzemelerin sinterlenmesi esnasında oksidasyon ve dekarbürizasyona neden olurlar. İyi bir sinterleme atmosferi için ham kompaktın sinterleme esnasında oksidasyon ve dekarbürizasyondan korunmasını sağlanmalıdır.

Bununla birlikte atmosferin, partiküller arası arayüzey temasının gelişmesi için redükleyici olması gerekmektedir. Partiküllerin yüzeyinde oluşacak olan oksit tabakası, sinterlemeyi geciktireceği gibi mikroyapıyı da olumsuz etkiler [30].

Atmosferin bileşimi, malzemeye ve gerek duyulan kimyasal tepkimelere göre seçilir. Genel olarak ideal bir atmosferden bahsedilemez. Örneğin; titanyum gibi metaller hidrojen gibi indirgeyici gazlarla tepkimeye girebilirken, aynı gaz, paslanmaz çelikler için uygun bir sinterleme atmosferidir [31].

Genel olarak sinterleme atmosferinin görevleri; yağlayıcı ve bağlayıcının giderilmesi, oksidasyon ve dekarbürizasyonun önlenmesi ve tozların yüzeyindeki oksit filmin indirgenmesi şeklindedir. Karbonlu çeliklerin sinterlenmesinde kullanılabilecek atmosferler; endotermik gaz (endogaz), sentetik endotermik gaz, saf hidrojen, ayrıışmış amonyak, vakum ve N_2/H_2 atmosferleridir [29].

3.2.1.4 Soğuma Hızı

Mekanik özelliklerin artışında, soğuma hızı önemli bir rol oynar. Soğuma hızı değiştirilerek elde edilmek istenen mikroyapıya ulaşılabilir. Sinter sertleştirirmede kontrollü bir soğutma gerekmektedir. Yüksek alaşımlı bazı bileşimler için hızlı soğutmaya ihtiyaç duyulmazken, yüksek soğutma hızları kullanılarak daha düşük alaşımlı toz bileşimleri de sinter sertleştirilebilir [32].

Uygun sinter sertleştirilmiş bir parçada, yüzeyde %90'dan ve merkezde %70'ten az olmayacak şekilde martenzitik dönüşümlerin sağlanmış olması gerekir. Böyle bir yapı, istenen yüzey sertliğini ve kırılma tokluğunu, yüksek gerilimlere gerek kalmadan sağlayacaktır [27].

Sinter sertleştirme prosesinde soğuma hızını etkileyen çeşitli faktörler mevcuttur. Bunlar; parça geometrisi, fırın tasarımı, soğutucu akışkanının ısı kapasitesi, parçadaki gözeneklilik miktarı şeklindedir.

Warga ve Lindberg tarafından Cu, Ni ve değişik oranlarda C eklenmiş ön alaşımlanmış Astaloy Mo tozlarında yapılan bir çalışmada 1120°C'de 30 dakika süre ile yapılan sinterleme işleminden sonra 1-8°C/s arasındaki hızlı soğutma hızlarında sinter sertleştirilmiş numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir [34]. Çalışmalar

sonucunda Astaloy Mo tozuna eklenen %2 Cu veya %2Ni ile %0,4-%0,6C'un sertleşebilirliği ve mekanik özellikleri önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Barbara Maroli ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmanın verileri ise Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de gösterilmektedir [33].

Çizelge 3. 1 Soğuma hızının mikroyapıdaki faz miktarlarına etkisi.

B: beynit, M: martenzit, A: artık östenit [33]

Malzeme	1-1,5°C			5-6°C		
	%B	%M	%A	%B	%M	%A
Astaloy Mo + 2 Cu + 0,6 C	≈70	≈30	0	0	≈100	0
Distaloy DH + 0,6 C	≈60	≈40	0	0	≈100	0

Çizelge 3. 2 Soğuma hızının sertlik, akma ve çekme dayanımı üzerindeki etkisi [33]

Malzeme	Sertlik (HV10)		Akma Dayanımı (MPa)		Çekme Dayanımı (MPa)	
	1-1,5°C/s	5-6°C/s	1-1,5°C/s	5-6°C/s	1-1,5°C/s	5-6°C/s
Astaloy Mo + 2 Cu + 0,6 C	≈310	≈430	≈690	≈910	≈830	≈1010

3.2.1.5 Alaşımlama Yöntemleri

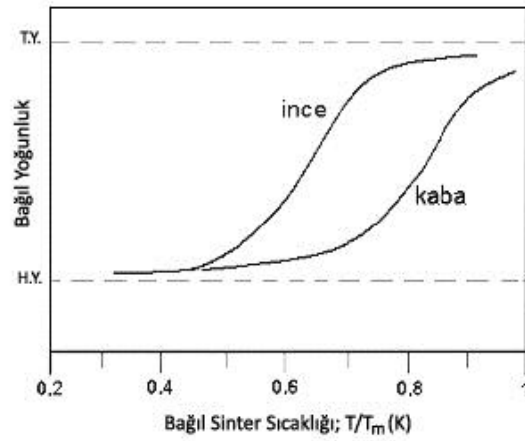
Alaşımlama yöntemleri, tozun yapısını oluşturmada birincil faktör olduğundan oldukça önemli bir konudur. Düşük maliyette oluşundan ötürü tercih sebebi olan harmanlama yöntemi sonucu heterojen bir yapı elde edilir ve bu yöntemde toz segregasyonu görülebilmektedir. Difüzyonla alaşımlama yönteminde de elde edilen yapı heterojendir; ancak bu yöntemle üretilen tozların sıkıştırılabilirlikleri gayet iyidir. Önalaşımlama yöntemiyle elde edilen tozların yapıları homojendir. Önalaşımlanmış tozların sertleşebilirlikleri, harmanlama ve difüzyon alaşımlama ile elde edilen tozlara göre daha yüksekken, sıkıştırılabilirlikleri daha düşüktür. Sertleşebilirlik ve sıkıştırılabilirliği optimum seviyede kullanabilmek içinse hibrit alaşımlama yöntemi kullanılır.

3.2.2 Malzeme Koşulları

Nihai ürün özellikleri, malzeme değişkenlerine doğrudan bağlıdır. Bu değişkenler; tane boyutu, tane şekli, tane yapısı, yoğunluk, gözeneklilik ve alaşım elementleri olarak sıralanabilir.

3.2.2.1 Tane Boyutu

Toz boyutları küçüldükçe daha iyi sinterleme gerçekleştirilir. Bunun nedeni, ince taneli tozların kaba taneli tozlardan daha yüksek oranda temas noktasına, dolayısıyla daha yüksek yüzey enerjisine sahip olmasıdır. Daha küçük partikül boyutları, daha fazla yüzey difüzyonu sağlayan daha büyük yüzey alanları ve daha fazla hacim difüzyonu sağlayan daha geniş partiküllerarası temas noktası oluşturarak atomik kütle transfer mekanizmalarını etkiler [7]. Dolayısıyla, daha küçük boyutlarda toz kullanımı, daha iyi sinterleme ve yoğunlaştırmayı beraberinde getirmektedir. Toz boyutunun yoğunluk üzerindeki bağıl etkisi Şekil 3.6'da gösterilmiştir [35].



Şekil 3. 6 Toz boyutunun yoğunluk üzerindeki bağıl etkisi [35]

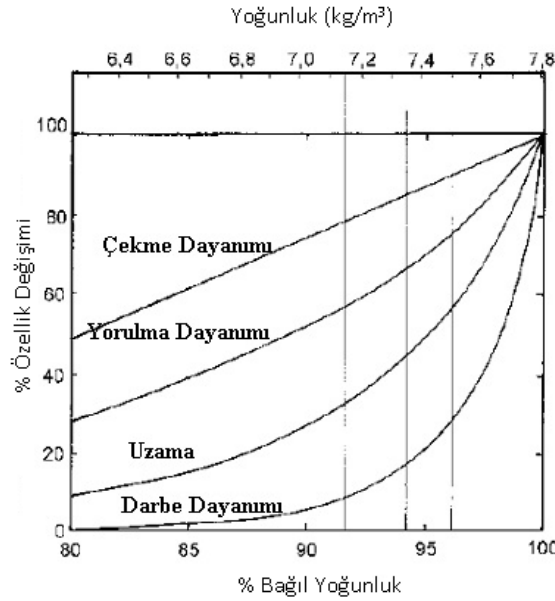
3.2.2.2 Tane Şekli

Sinterleme kinetikleri, partikül şeklinin değişikliklerinden doğrudan etkilenmektedir. Partikülün yuvarlaklığındaki azalma ve/veya partikülün yüzey pürüzlülüğündeki artış, sinterlemeyi pozitif yönde etkiler; çünkü bu durumlar daha geniş yüzey alanları ve daha büyük partiküllerarası temas noktaları oluşmasına neden olur [7].

3.2.2.3 Yoğunluk

Yoğunluk, mekanik özellikler açısından oldukça önemli bir parametredir. Yoğunluktaki değişim doğrudan boyutsal kararlılığı etkiler ve boyutsal kararlılık oldukça önemli bir durumdur; çünkü sinter sertleştirilmiş ürünler harici işlemler yapılmaksızın istenen son şekilde çıkmaktadırlar. Sinterlenmiş yoğunluktaki artış, çekme ve yorulma dayanımında doğrusal bir artışa neden olur. Ayrıca, uzama ve darbe dayanımı, sinterlenmiş

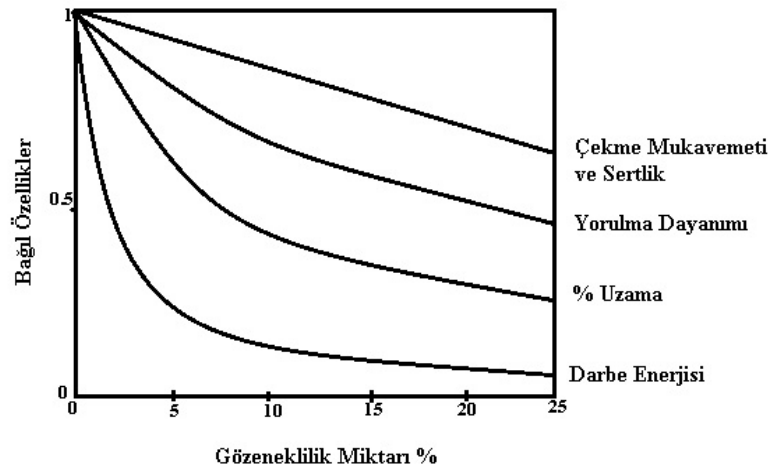
yoğunluğun artışıyla katlanarak artar. Sinterlenmiş yoğunluktaki artışın mekanik özelliklerde yarattığı değişim Şekil 3.7’de verilmiştir [29].



Şekil 3. 7 Sinterlenmiş yoğunluktaki artışın mekanik özelliklerdeki etkisi [29]

3.2.2.4 Gözeneklilik

Malzemelerin kimyasal bileşimleri aynı olsa dahi, mikroyapılarındaki ve yoğunluklarındaki farklılıktan ötürü farklı özellikte olabilirler. Malzemenin yoğunluğu ve gözenek dağılımı, mekanik özellikleri doğrudan etkiler. Düzensiz, küresel olmayan, keskin kenarlı ve büyük gözenekler, martenzit gibi sert malzemelerde çentik etkisi yapar [36]. Toz metalürjik parçalarda porozitenin mekanik özelliklere etkisi Şekil 3.8’deki gibidir [37].



Şekil 3. 8 Toz metalürjik parçalarda porozitenin mekanik özelliklere etkisi [37]

3.2.2.5 Alaşım Elementleri

Sinterleme kinetikleri ve doğal olarak mekanik özellikler, toz metalin içerisindeki alaşım katkılarından ve empüritelerden etkilenmektedir. Empüriteler, dağılımlarına ve esas malzeme ile reaksiyonlarına bağlı olarak yararlı veya zararlı olabilmektedirler [10]. Yüzey kirliliğine neden olan empüriteler istenmezler. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda matris fazla yaptığı reaksiyonlar zararlıdır.

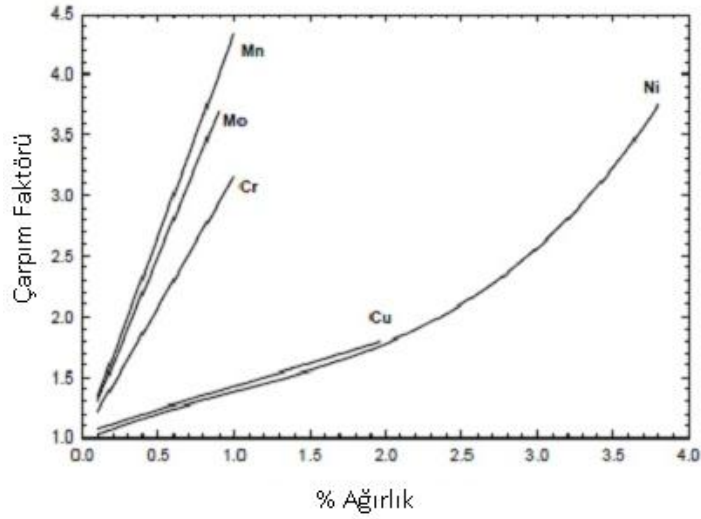
Alaşım elementlerinin eklenmesindeki amaç; istenen mikroyapıya dolayısıyla istenen mekanik özelliklere ulaşmak için malzemenin sertleşebilirliğini arttırmaktır. Genellikle alaşım elementlerinin etkisi, geleneksel çeliklerle toz metalürjik çeliklerde aynıdır [29]. Sertleşebilirliği artırmak için kullanılan alaşım elementleri Mn, Cr, Si, Mo, Ni, C, Cu olarak gösterilebilir. Ni, Mo, Cu elementlerinin oksijen ile tepkimeye girme eğilimleri az olduğu için sertleşebilirliği arttırması açısından en yaygın kullanılan elementlerdir.

M. A. Grossman'ın sertleşebilirlik üzerine yaptığı bir çalışmada, %50 martenzit içeren malzemenin kritik tane boyutuna sahip olduğu, bu ideal değerin altında tane çapına sahip malzemelerin merkezinde yeterli sertliğin elde edilemeyeceği belirtilmiştir [38]. Yani tane boyutu arttıkça sertleşebilirlikte, dolayısıyla da sertlikte düşüş olacaktır. Çünkü tane boyutu azaldıkça tane sınırı artacağından, sınırlarda çekirdeklenen perlit fazı sayısında artış olacak ve sertlikte düşüş olacaktır. Kompozisyonu bilinen bir çelik için ideal tane boyutunun hesabı şu formül ile yapılabilmektedir:

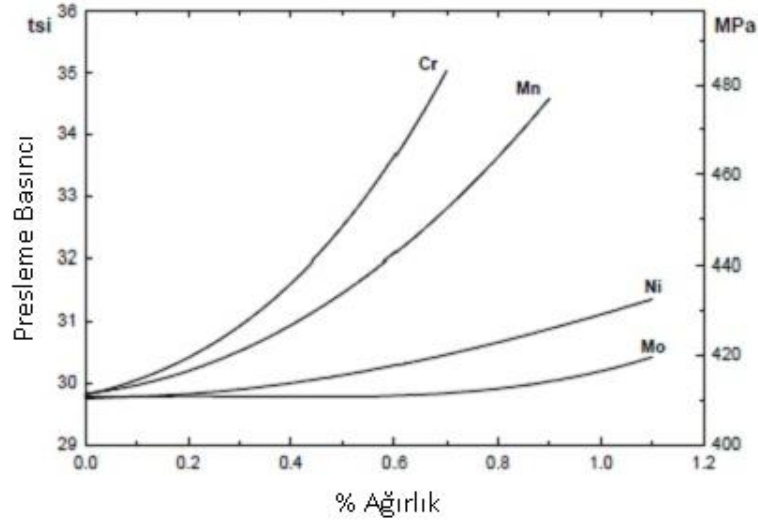
$$DI = DI_{\text{taban}} \times \text{CF}_{\text{Mn}} \times \text{CF}_{\text{Si}} \times \text{CF}_{\text{Ni}} \times \text{CF}_{\text{Cu}} \times \text{CF}_{\text{Mo}} \times \text{CF}_{\text{Cr}} \times \text{CF}_V \quad (3.2)$$

Burada DI ideal çapı, CF çarpım faktörünü, DI_{taban} ise karbon içeriğine göre standart haline getirilmiş taban ideal çapı simgelemektedir. Çarpım faktörleri ve DI_{taban} değerleri ASTM A255-10 standardınca [54] belirlenmiş verilerdir.

Bazı alaşım elementlerinin yüzde ağırlıklıklarına göre ideal tane çapını etkileyen çarpım faktörleri Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Yine bazı alaşım elementlerinin sıkıştırılabilirlik üzerindeki etkileri, %0,5 C içeriğine sahip önalaşımlanmış bir çelik üzerinde örnek olarak Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3. 9 Bazı alaşım elementlerinin yapıdaki konsantrasyonlarına göre çarpım faktörleri [38]



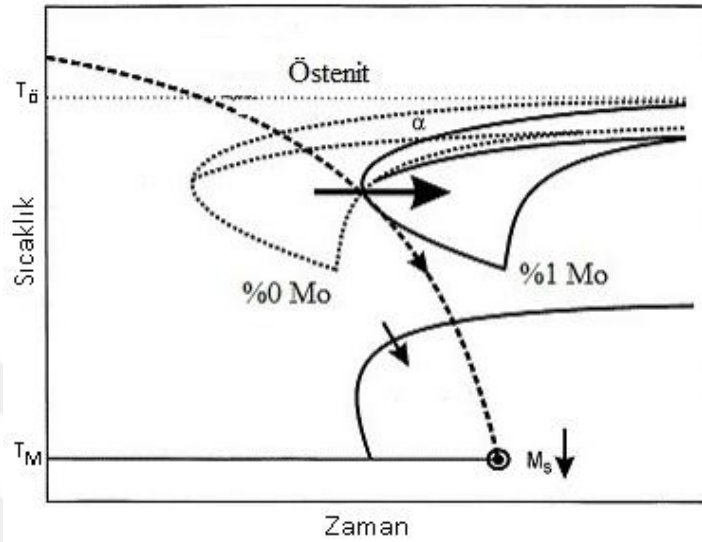
Şekil 3. 10 %0,5 C ile harmanlanmış önalaşımlanmış tozların sıkıştırılabilirlikleri üzerinde alaşım elementlerinin etkisi [39]

Karbon ilavesi, sadece oluşan martenzitin sertliğini artırır. Yüksek oranlarda alaşım elementinin konulması, tozun preslenebilirliğini azaltırken maliyetini de artırır. Nikel ve mangan, östenit fazını kararlılaştırıp, ferrite dönüşmeye direnmesini sağlayarak preslenebilirliği düşürür [40].

3.2.2.5.1 Molibden

Alaşım elementi olarak molibden kullanma eğilimi günden güne artmakta; çünkü molibden sertleşebilirliği çok iyi artırırken sıkıştırılabilirliğe etki etmez. Üstelik sinterleme döngüsü, temperleme ve atomizasyon esnasında oksidasyon gibi bir

problem çıkarmaz [39]. Mukavemetin ve kırılma tokluğunun artmasında önemli rol oynar. Çeliklerde molibdenin sertleşebilirliğe etkisi Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Molibden, ferriti teşvik eden bir alaşım elementi olduğundan sertleşebilirliği nikel ve mangana göre daha az etkiler.



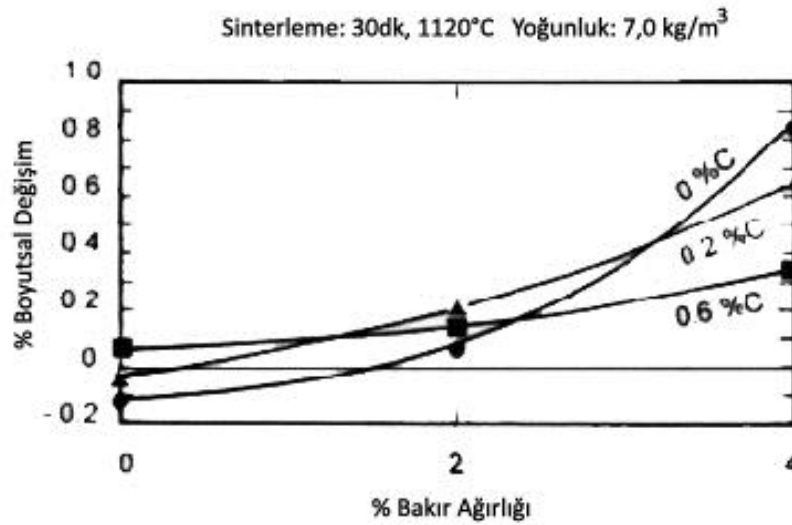
Şekil 3. 11 Çeliklerde molibden ilavesinin, sürekli soğumadaki dönüşüme olan etkisinin TTT diyagramında gösterimi. T_0 : Östenit sıcaklığı, T_M : Martenzit başlama sıcaklığı [41]

Molibden demir tozuna harmanlanarak da kullanılabilir fakat molibdenin demire difüzyonu çok yavaş gerçekleştiği ve heterojen bir mikroyapıya neden olacağı için bu yöntem çok sık tercih edilmez [42]. Molibdenin yoğunluğu, tungstenin yoğunluğundan yaklaşık 2 kat kadar az olması sebebiyle molibden, yüksek hız çeliklerinde tungsten yerine kullanılır [1]. Molibden çoğunlukla kromla birlikte kullanılır. Krom ve nikel ile birlikte kullanıldığında ise akma ve çekme dayanımını artırır, kırılabilirliği azaltır. Molibden ile karbon ve bakır birlikte kullanılarak daha iyi boyut kontrolü ve daha iyi sertleşebilirlik sağlanır. Molibden kuvvetli karbür meydana getirdiğinden, sıcak iş takım çeliklerinde östenitik paslanmaz çeliklerde kullanılır [39].

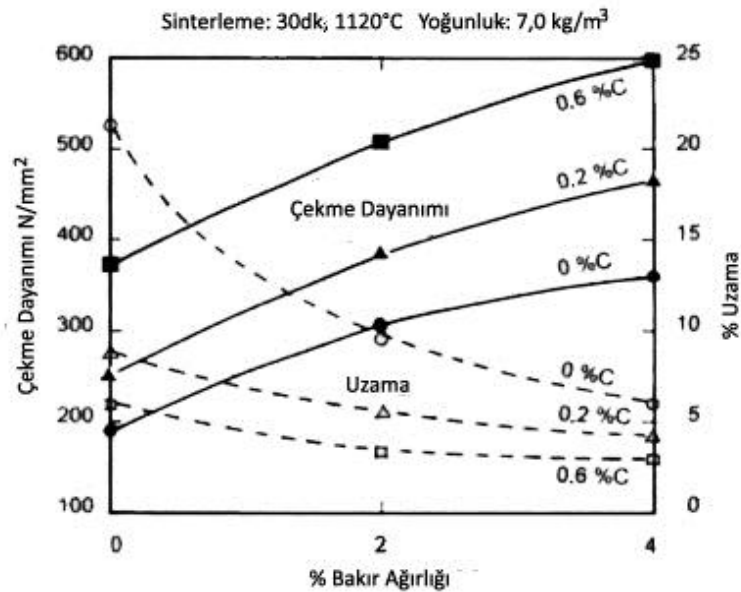
3.2.2.5.2 Bakır

Bakırın toz halde bulunabilmesi ve düşük maliyeti de onu yaygın kullanılan alaşım elementlerinden biri yapmıştır [43]. Bakır, ergime sıcaklığı 1083°C olduğundan demir esaslı malzemenin sinterlenmesi sırasında sıvı faz oluşturarak sinterleme işlemini hızlandırır. Boşluklara yayılabilen bakır sıvı fazı, daha yoğun bir yapı sağlar, boyut

değişimini minimuma indirir. Aynı zamanda uygun oranlarda eklenen bakır hem görünür sertliği hem de çekme dayanımını artırır. Kırılma dayanımı ise optimum bir değere kadar artar, sonra ise düşüş gösterir. %2,5'ten fazla miktarda bakır kullanıldığında sinterleme esnasında büyümeyi tetikler ve boyutsal kontrol zorlaşır. Bu büyüme etkisini ortadan kaldırmak için grafit ilavesine ihtiyaç duyulur [44]. Sinterlenmiş demir-bakır malzemede bakır içeriğinin, boyutsal değişim üzerindeki etkisi Şekil 3.12'de, farklı karbon değerlerinde çekme dayanımı ve uzama üzerindeki etkisi ise Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3. 12 Bakır içeriğinin, farklı karbon değerlerinde boyutsal değişime etkisi [29]

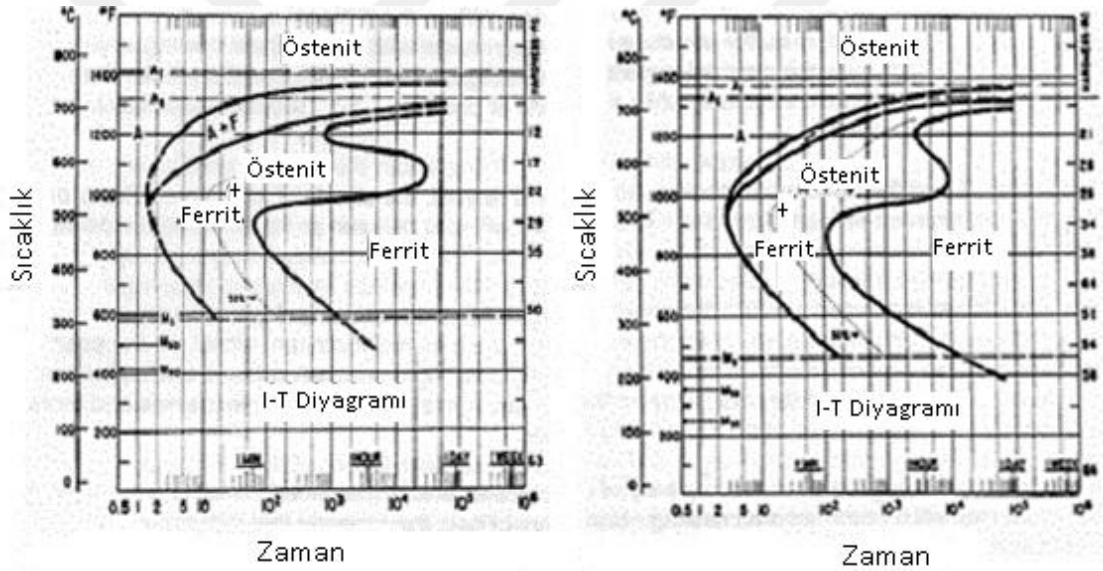


Şekil 3. 13 Bakır içeriğinin, farklı karbon değerlerinde çekme dayanımı ve uzama üzerindeki etkisi [29]

3.2.2.5.3 Karbon

Çeliklerde karbon oranı arttıkça, çekme dayanımı ve sertlik artar. Ötektoid kompozisyonu aşan karbon oranlarında gözenek ve tane sınırlarında kırılma ve dayanımın düşmesine neden olan karbür oluşumu gözlemlenir. Toz metalurjik çeliklerde optimum karbon oranı, alaşım elementlerinin ilavesi ile düşürülebilir. Karbon ilavesi mekanik özellikleri geliştirmek için verimli bir yol olsa da karbon içeren malzemelerin sinterlenmesi sırasında dekarburizasyonu önleyebilmek için kontrollü bir atmosfer gerekir [14].

Rutz ve arkadaşları tarafından karbon içeriğinin %0,47'den %0,68'e arttırılmasının I-T (izotermal dönüşüm) diyagramına etkisi araştırılmış ve Şekil 3.14'teki gibi bir değişimle karşılaşmışlardır. Ek olarak, martenzit başlama sıcaklığında düşüş görülmüştür.



Şekil 3. 14 Sırasıyla %0,47 C ve %0,68 C içeren çeliklerin I-T diyagramları [45]

3.3 Sinter Sertleştirme Prosesinin Kullanım Alanları

Hızla büyüyen otomotiv sektöründe daha seri ve daha ekonomik üretim istenmektedir. Parçaların yüksek mekanik özellik ve yüksek sertliğe en az işlem ile ulaşabilmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesi zorunludur. Sinter sertleştirme, günümüz otomotiv sektörünün ihtiyaçlarını karşılayabildiğinden giderek yaygınlaşan bir yöntemdir. Sinter sertleştirmenin uygulama alanlarından bazıları Çizelge 3.3'te verilmiştir. Şekil 3.15'te

de deneysel çalışmalarda kullanılan toz bileşenleri ile üretilen otomotiv parçalarına örnek ürünler gösterilmektedir.

Çizelge 3. 3 Sinter sertleştirmenin uygulama alanlarından bazıları [46]

Sistem	Parça Adı
Motor	Zamanlama dişlisi, Subap yatağı, Dişli tertibatı
Vites	Dişli tertibatı, Ara şanzıman dişlisi, Debriyaj parçaları
Şasi	Direksiyon parçaları
Çeşitli	Dişliler, Burç yatakları, Aşınma plakaları



Şekil 3. 15 (a) Yağ pompa rotoru, (b) Volan dişlisi, (c) Senkromeç dişlisi göbeği, (d) Krank mili dişlisi, (e) Burç yatağı, (f) Ara şanzıman dişlisi

DENEYSEL ÇALIŞMALAR**4.1 Kullanılan Tozlar ve Kimyasal Bileşimleri**

Deneyisel çalışmalarda kullanılan tozların ağırlıkça bileşimleri Çizelge 4.1’de verildiği gibidir.

Çizelge 4. 1 Kullanılan tozların yüzdesel ağırlık bazında bileşimleri. ¹ Demir tozuyla önalaşımli, ² Astaloy Mo alaşımına difüzyon yoluyla bağlı

Kod	Malzeme	Mo	Cu	Grafit	Fe
AC1	Astaloy Mo (Fe-1.5Mo)-1Cu-0.6C	¹ 1.5	1	0.6	Kalan
AC2	Astaloy Mo (Fe-1.5Mo)-2Cu-0.6C	¹ 1.5	2	0.6	Kalan
DH	Distaloy DH (Astaloy Mo-2Cu)-0.6C	¹ 1.5	² 2	0.6	Kalan

Toz karışımları, Höganäs firması tarafından su atomizasyonu yöntemiyle üretilmişlerdir. Temin edilen tozlara ait sertifikalar Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu karışımlar çapraz kırılma deneyi için BS EN ISO 3325 standardı [49] gereği 30 mm x 12 mm x 6 mm ölçülerinde; çekme deneyi için ise BS EN ISO 2740:2009 standardına [50] uygun olacak şekilde 600 MPa basınç altında kompaktlanmıştır. Toz bileşimine, preslenebilirliği ve kalıptan çıkartılabilirliği kolaylaştırmak amacıyla Lube-E yağlayıcısı eklenmiştir.

Lot number: 1576822
Print date: 2013-04-03
Order no: 0010159147
Delivery: 1429730
Shipment: 3155845

Item name: 02.69.171 Intralube E
Item number: 097736
EKSPEK

Customer: YILDIZ TEKNİK UNIVERSİTESİ
ATTN: PROF DR ADEM BAKKALOĞLU
KİMYA METALURJİ FAKÜLTESİ
MET VE MAZEME MUH BÖLÜMÜ DAVUTPAŞA
34120 YERLEŞKESİ ESENLER İSTANBUL TR

82162

Quantity: 5 Kg
Your reference: SAMPLES YILDIZ UNI

Production date: 2013-02-15
Produced qty: 20 Kg

Composition

Astalo Mo	BAL	%
Cu -100 mesh	1.00	%
Graphite UF4	0.60	%
Lube E	0.60	%

Test result	Unit	Specification MIN	Specification MAX	ISSUE 1
-------------	------	-------------------	-------------------	---------

CHEMICAL PROPERTIES

Cu	1.06	%	0.90	1.25	%
Mo	1.48	%	1.37	1.57	%
C-Graphite	0.57	%	0.54	0.66	%
Lube E	0.58	%	0.54	0.66	%
Fe is Base					

Approved by

Inspection certificate
EN 10 204 3.1

Quality Control Manager

Lot number: 1576825
Print date: 2013-04-03
Order no: 0010159147
Delivery: 1429730
Shipment: 3155845

Item name: 02.69.172 Intralube E
Item number: 097737
EKSPEK

Customer: YILDIZ TEKNİK UNIVERSİTESİ
ATTN: PROF DR ADEM BAKKALOĞLU
KİMYA METALURJİ FAKÜLTESİ
MET VE MAZEME MUH BÖLÜMÜ DAVUTPAŞA
34120 YERLEŞKESİ ESENLER İSTANBUL TR

82162

Quantity: 5 Kg
Your reference: SAMPLES YILDIZ UNI

Production date: 2013-02-19
Produced qty: 20 Kg

Composition

Astalo Mo	BAL	%
Cu -100 mesh	2.00	%
Graphite UF4	0.60	%
Lube E	0.60	%

Test result	Unit	Specification MIN	Specification MAX	ISSUE 1
-------------	------	-------------------	-------------------	---------

CHEMICAL PROPERTIES

Cu	2.18	%	1.80	2.35	%
Mo	1.46	%	1.36	1.55	%
C-Graphite	0.60	%	0.54	0.66	%
Lube E	0.60	%	0.54	0.66	%
Fe is Base					

Approved by

Inspection certificate
EN 10 204 3.1

Quality Control Manager

Lot number: 1576819
Print date: 2013-04-03
Order no: 0010159147
Delivery: 1429730
Shipment: 3155845

Item name: 02.69.168 Intralube E
Item number: 097733
EKSPEK

Customer: YILDIZ TEKNİK UNIVERSİTESİ
ATTN: PROF DR ADEM BAKKALOĞLU
KİMYA METALURJİ FAKÜLTESİ
MET VE MAZEME MUH BÖLÜMÜ DAVUTPAŞA
34120 YERLEŞKESİ ESENLER İSTANBUL TR

82162

Quantity: 5 Kg
Your reference: SAMPLES YILDIZ UNI

Production date: 2013-02-19
Produced qty: 20 Kg

Composition

Distaloy DH1	BAL	%
Graphite UF4	0.60	%
Lube E	0.60	%

Test result	Unit	Specification MIN	Specification MAX	ISSUE 1
-------------	------	-------------------	-------------------	---------

CHEMICAL PROPERTIES

Cu	2.03	%	1.83	2.12	%
Mo	1.49	%	1.38	1.52	%
C-Graphite	0.58	%	0.54	0.66	%
Lube E	0.57	%	0.54	0.66	%
Fe is Base					

Approved by

Inspection certificate
EN 10 204 3.1

Quality Control Manager

Şekil 4. 1 Temin edilen tozların sertifikaları. (a) AC1, (b) AC2, (c) DH

4.2 Tozların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

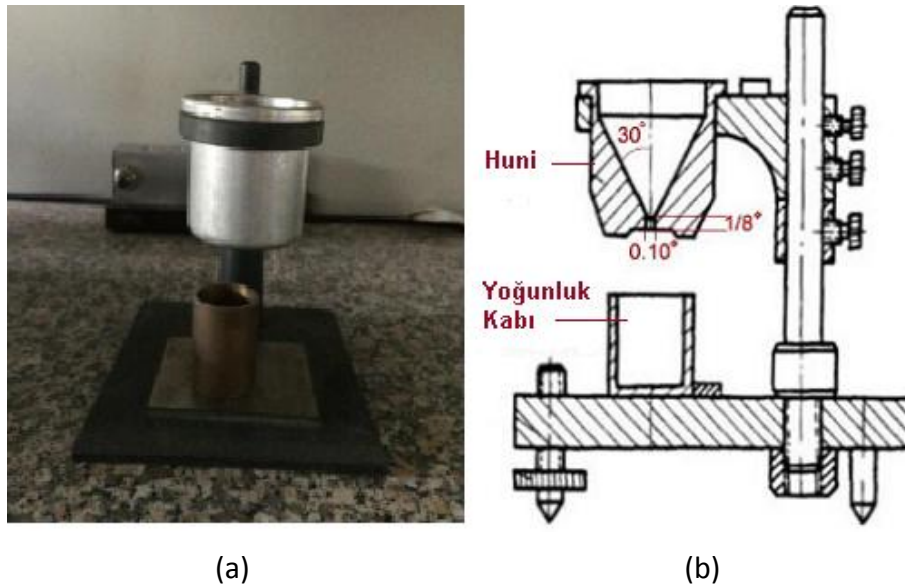
Bu bölümde tozların görünür yoğunlukları ölçülmüştür. Ardından akıcılık testi ve elek analizi gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 Görünür Yoğunluk

Görünür yoğunluk, tozun henüz preslenmemiş halindeki yoğunluğudur. Aynı tür tozların farklı üretim yöntemleri ile üretilmesi sonucu görünür yoğunlukları değişkenlik gösterebilmektedir. Bu aşamada, ISO 3923-1:2008 standardı gereğince boyutları ve şekli belirlenmiş olan huniden silindirik kaba serbest düşüm ile dolan metal tozlarının görünür yoğunluğu ölçülmüştür [47].

4.2.2 Akıcılık Testi

Bu testin amacı, tozların akıcılık değerini tespit etmektir. 50 gram tozun 2,54 mm'lik huniden geçmesi için gereken süreye akıcılık adı verilir. Akıcılık, tane büyüklüğüne ve şekline bağlıdır. Dolayısıyla, aynı tür tozların farklı üretim yöntemleri ile üretilmesi sonucu akıcılıklarında da farklılık görülebilmektedir. Toz tane boyutu azaldıkça veya toz tane şekli küresellikten uzaklaştıkça toz tanelerinin sürtünmesi artacağından akıcılık azalır. Metal tozlarının akıcılığı ISO 4490:2014 standardına göre ölçülmüş olup, Şekil 4.2'de deney düzeneği ve ISO 4490:2014 standardınca ölçüleri gösterilmektedir [48].



Şekil 4. 2 (a) Akıcılık ve görünür yoğunluk deneylerinde kullanılan deney düzeneği, (b) ISO 4490 standardına göre deney düzeneği ölçüleri [48]

4.2.3 Elek Analizi

Elek analizi, belirli orandaki kuru toz parçacıklarının şekillerine ve ağırlıklarına göre dağılımlarının hesaplanmasıdır. Elek düzeneği, eşit aralıklarla ve en üstte en geniş açıklığa sahip elek olacak şekilde alt alta dizilmiş ızgaralardan oluşmaktadır. Açıklık boyutu, elek boyutuyla ters orantılıdır. Yani büyük elek değeri, küçük açıklık değerine tekabül etmektedir. Bununla ilgili olarak, standart elek boyutu ve açıklıklar Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu yöntemde, en üstte kalından inceye doğru alt alta dizilmiş olan eleklerin en üstteki eleğe kuru, belirli ağırlıkta (100 gr) metal tozu konur ve eleklerden 15 dakika süre ile titreştirilerek her bir elek üzerinde bu süre sonunda kalan taneler hassas olarak tartılır ve tablo düzenlenir. Bir elekten geçen toz (-) işareti ile, eleğin üzerinde kalan toz ise (+) işareti ile belirtilir. Örnek olarak; -120/+270 eleklik toz, 120 boyutlu elekten geçmiş fakat 270 boyutlu elekten geçememiş demek olup, tablodan da görüleceği üzere bu tozların boyut aralığı 125 ile 53 μm arasında demektir. 45 μm ’den küçük, yani 325 elek boyutundan geçebilen tozlara genellikle elek altı tozu denir [19]. Elek analizinin gerçekleştirildiği düzene Şekil 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4. 2 Standart elek boyutları [19]

Elek Boyutu	Elek Açıklığı (μm)	Elek Boyutu	Elek Açıklığı (μm)
18	1000	120	125
20	850	140	106
25	710	170	90
30	600	200	75
35	500	230	63
40	425	270	53
45	355	325	45
50	300	400	38
60	250	450	32
70	212	500	25
80	180	635	20
100	150		



Şekil 4. 3 Elek analizinin gerçekleştirildiği düzenek

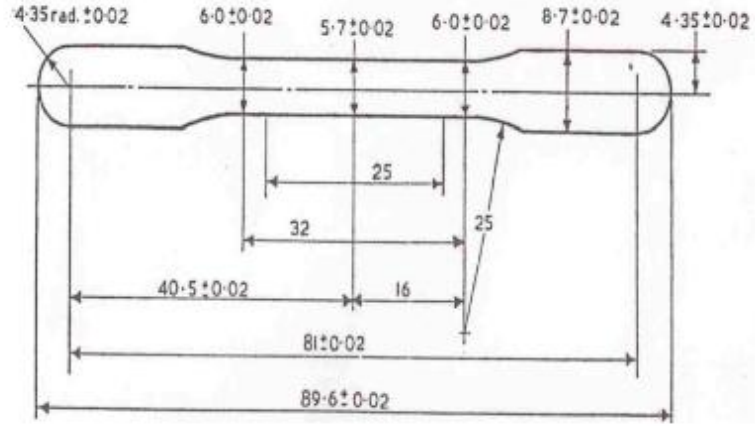
4.3 Toz Karışımlarının Preslenmesi

Presleme, imal edilecek parça için özel olarak tasarlanmış zimba ve kalıp kullanarak basınç altında gerçekleştirilen bir işlemdir. Numunelerin preslenmesi 600 MPa basınç altında Stokes R-4 marka tek zımbalı cihazda tek yönlü basma yapılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan cihaz ve özellikleri, Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Çapraz kırılma deneyi için preslenen numune boyutları BS EN ISO 3325 standardı [49] gereği 30 mm x 12 mm x 6 mm ölçülerinde; çekme deneyi için preslenen numune boyutları ise BS EN ISO 2740:2009 standardına [50] uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Elde edilen numune örnekleri ile üretim esnasında esas alınan standartları Şekil 4.5'te verilmiştir.

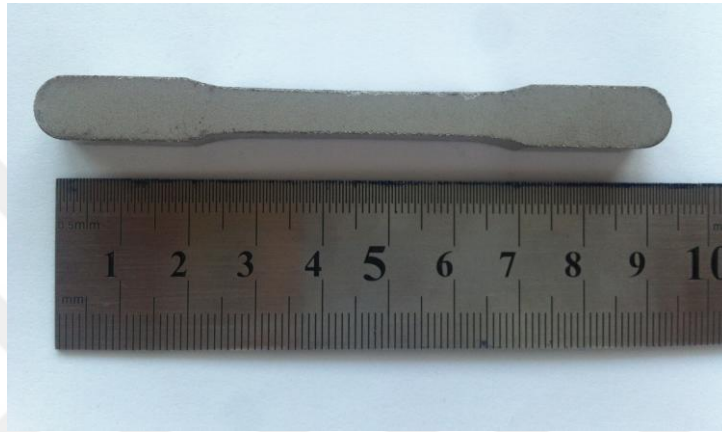


Şekil 4. 4 Stokes R-4 Press cihazı, numunenin şeklinde hazırlanmış zimba ve cihaz özellikleri

(a)

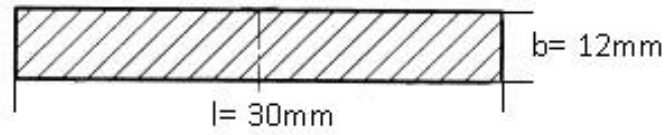


(b)

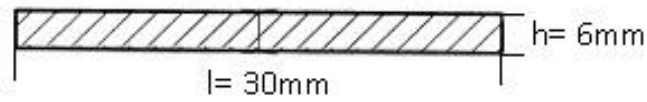


Üstten Görünüm

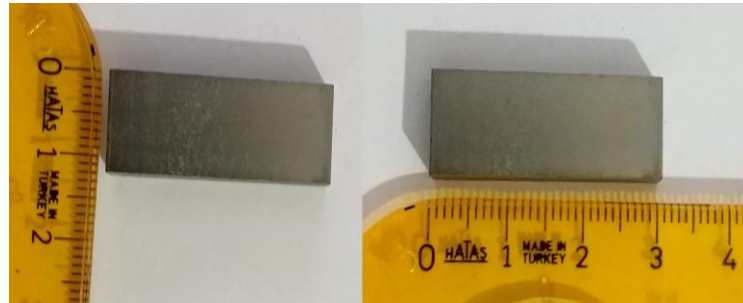
(c)



Yandan Görünüm



(d)



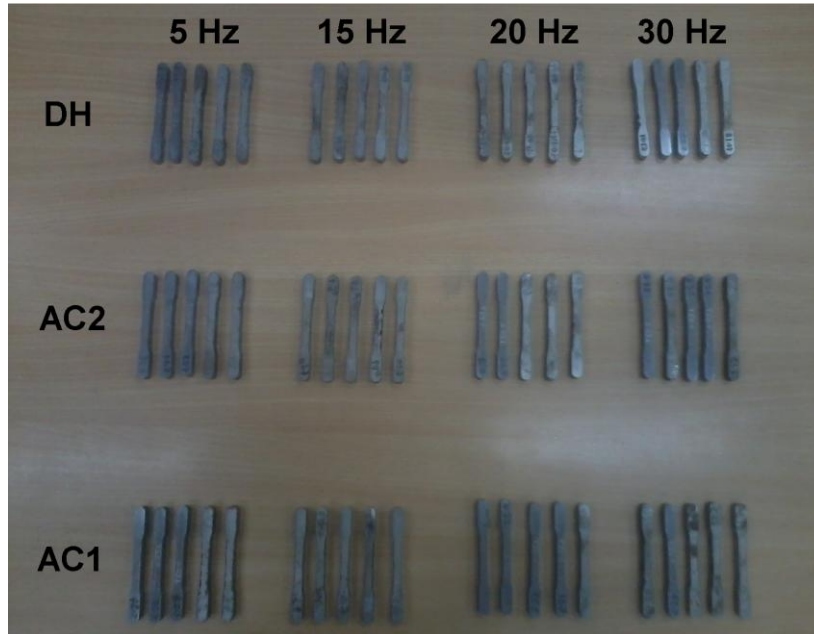
Şekil 4. 5 (a) BS EN ISO 2740:2009 standardı [49] gereğince numune ölçüleri, (b) presleme sonucu elde edilen çekme testi numunesi, (c) BS EN ISO 3325 standardı [50] gereğince numune ölçüleri, (d) presleme sonucu elde edilen çapraz kırılma testi numunesi

4.4 Preslenen Numunelerin Sinterlenmesi

Normal sinterleme ile sinter sertleştirmenin karşılaştırılabilmesi açısından soğuma hızlarından biri normal sinterlemeye karşılık gelen $0,5^{\circ}\text{C/s}$ olarak seçilmiştir. Sinter sertleştirme işlemi için ise $1,5^{\circ}\text{C/s}$, $2,0^{\circ}\text{C/s}$ ve $3,0^{\circ}\text{C/s}$ soğuma hızları kullanılmıştır. Sinterleme işlemleri endogaz atmosferi altında gerçekleştirilmiş olup, süre olarak 25 dakika ve sıcaklık olarak da 1120°C seçilmiştir. Sinter sertleştirme işleminin gerçekleştiği fırın, Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu işlem sonrası elde edilen numunelerin görüntüleri ise Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 6 Mahler marka sinter sertleştirme fırını



Şekil 4. 7 Sinter sertleştirme işlemi tamamlanmış numuneler

4.5 Sinterlenen Numunelerin Yoğunluk Ölçümleri

Numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibi esas alınarak ölçülmüştür. Ölçümlerde kullanılan formüller, aşağıda verildiği gibidir. Şekil 4.8’de ölçümlerde kullanılan yoğunluk düzeneği verilmiştir.

$$\text{Gerçek Yoğunluk} = \frac{\text{Havadaki Ağırlık}}{\text{Havadaki Ağırlık} - \text{Sudaki Ağırlık}} \quad (4.1)$$

$$\% \text{Doluluk} = \frac{\text{Gerçek Yoğunluk}}{\text{İdeal Yoğunluk}} \times 100 \quad (4.2)$$

$$\% \text{Gözeneklilik} = 100 - \% \text{Doluluk} \quad (4.3)$$

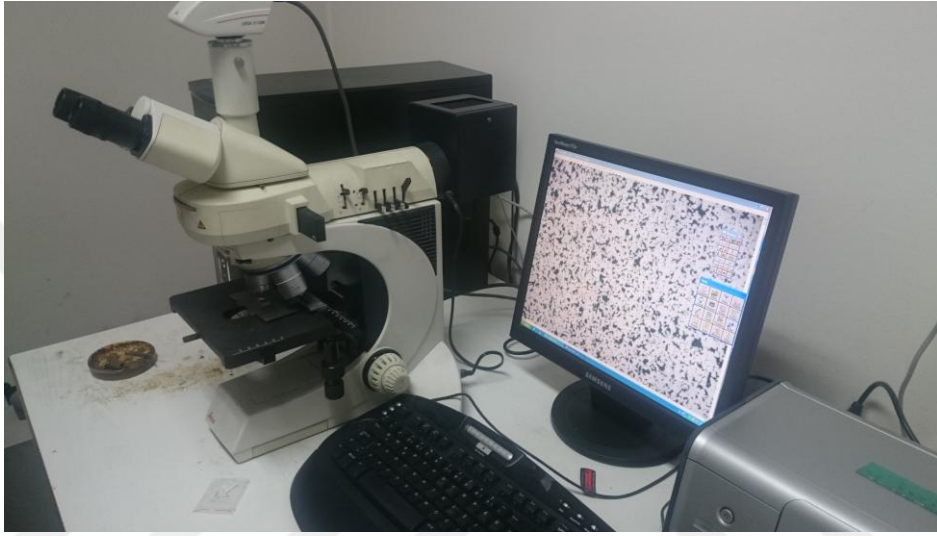


Şekil 4. 8 Yoğunluk düzeneği

4.6 Sinterlenen Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemelerinden önce numuneler 60, 120, 240, 400, 600, 800 ve 1200’lük SiC zımparalar ile zımparalanıp, ardından elmas pasta ile parlatılmışlardır. Dağlama işleminden önce, numunelerin gözeneklilik tespiti için parlak yüzey görüntüleri, Şekil 4.9’da gösterilen Leica marka DM LS model DFC 280 dijital kameralı ışık mikroskobu ile x50 büyütmede kaydedilmiştir. Bu işlemden sonra numuneler %2 Nital kullanılarak dağlanmış ve Şekil 4.10’da gösterilen Nikon marka Eclipse MA100 model ters metal mikroskop cihazıyla dağlanmış yüzey mikroyapıları x200 büyütmede incelenmiştir.

Optik mikroskoplardaki incelemelerin ardından numunelerin SEM görüntüleri alınmış ve her bir alaşım elementinin numune içindeki dağılımının incelenebilmesi için EDS nokta analizi yapılmıştır. Bu analizler Şekil 4.11’de gösterilen Jeol marka JSM-5410LV model taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Ardından daha kaliteli görüntü ve daha kolay martenzitik/beynitik mikroyapı incelemesi için numunelerin ve cihazın izin verebildiği maksimum büyütmelerde (x3800-4200 arası) Şekil 4.12’de gösterilen PhenomWorld marka Phenom XL model cihaz ile SEM analizi tekrar gerçekleştirilmiştir.



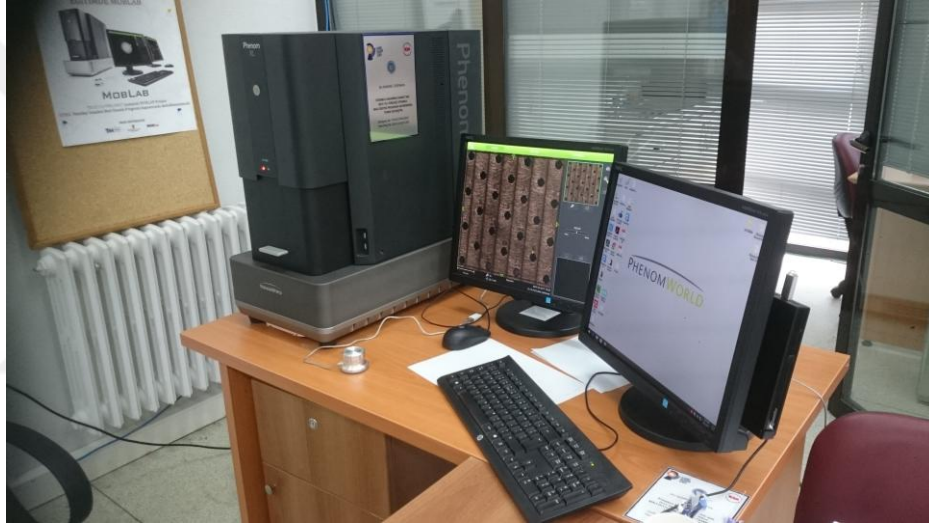
Şekil 4. 9 Leica – DM LS ışık mikroskobu ve Leica – DFC 280 dijital renkli kamera



Şekil 4. 10 Nikon - Eclipse MA100 ters metal mikroskobu



Şekil 4. 11 Jeol – JSM-5410LV taramalı elektron mikroskobu



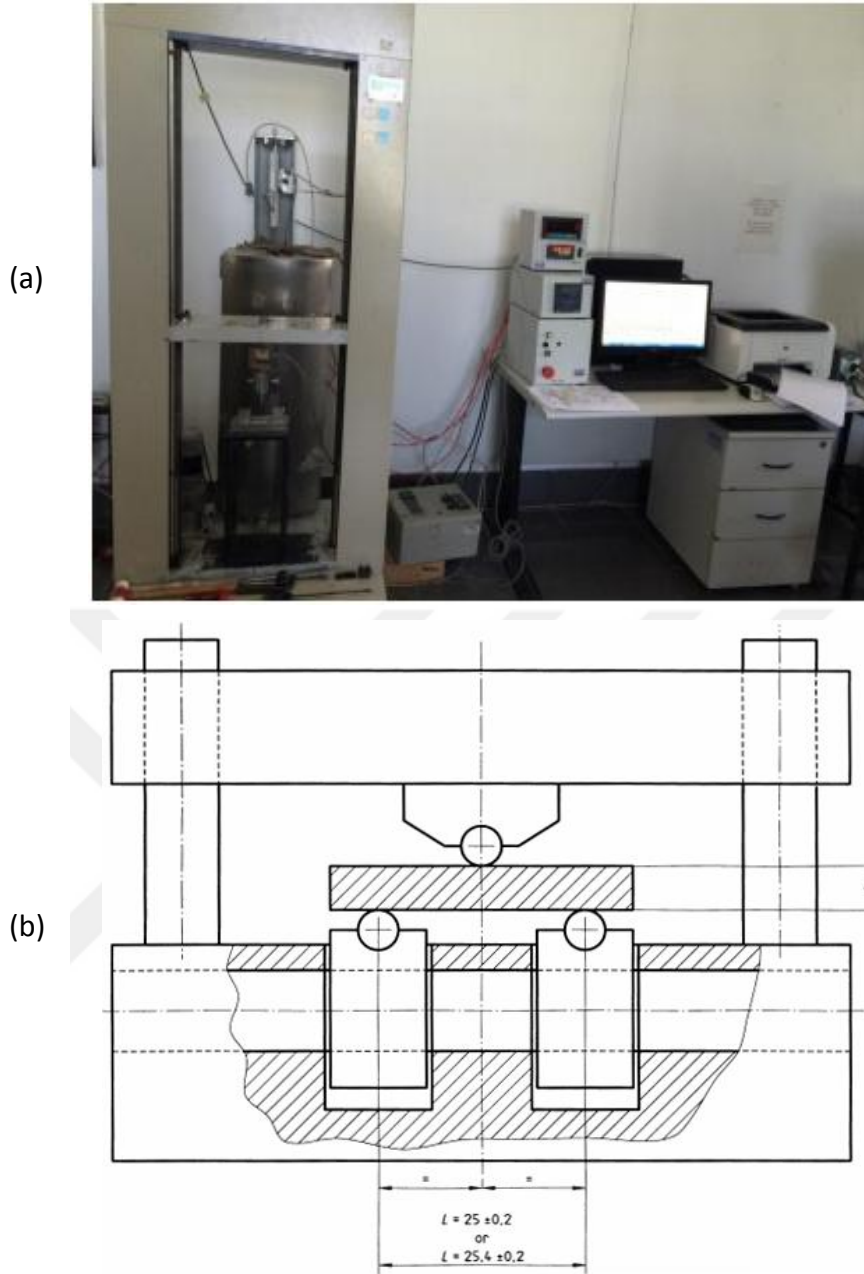
Şekil 4. 12 PhenomWorld – Phenom XL taramalı elektron mikroskobu

4.7 Mekanik Testler

Numunelere mekanik özelliklerinin belirlenmesi için mikrosertlik, çapraz kırılma ve çekme dayanımı testleri uygulanmıştır.

4.7.1 Çapraz Kırılma Deneyleri

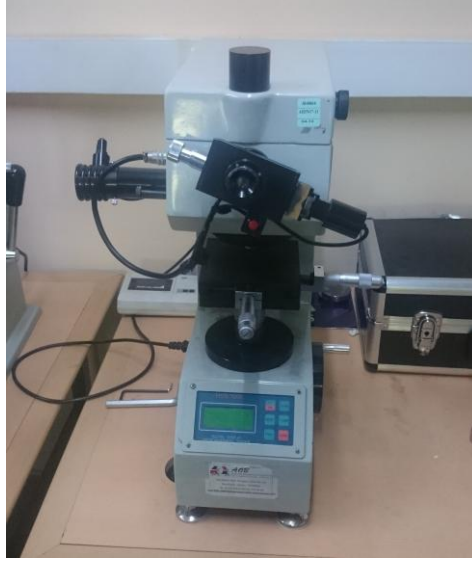
Numunelerin çapraz kırılma dayanımlarının belirlenmesi için Şekil 4.13'te gösterilen 20 kN yük kapasiteli Mares marka TST-SE-J-2T model universal çekme cihazında eğme başlıkları kullanılarak BS EN ISO 3325 standartlarına göre çapraz kırılma deneyi gerçekleştirilmiştir. BS EN ISO 3325 standardına göre [50] uyulması gereken deney düzeneğinin şematik görüntüsü Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4. 13 (a) Mares - TST-SE-J-2T çekme deneyi cihazı, (b) BS EN ISO 3325 standardı gereği deney düzeneği [50]

4.7.2 Mikrosertlik Testleri

Numunelerin mikrosertlik değerleri, HV0.1 mikrosertlik birimi üzerinden ölçülmüştür. Bu bağlamda numunelere, belirli aralıklarla 4'er kez 10 saniye süreyle 100 gram yük uygulanmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinde Şekil 4.14'te gösterilen BMS marka HVS-1000 model mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Sonuçlar tablo haline getirilmiş ve ölçümlerden elde edilen izlerin görüntüleri kaydedilmiştir.



Şekil 4. 14 BMS - HVS-1000 mikrosertlik cihazı

4.7.3 Çekme Deneyleri

Çekme deneyi, ebatları BS EN ISO 2740:2009 standardınca hazırlanan numuneler üzerinde, Şekil 4.15'te gösterilen Instron marka 5982 model 100 kN yük kapasiteli statik basma-çekme cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Çekme hızı olarak 5 mm/dk seçilmiştir. Bu deney ile her bir numune için elastik modülü, Yük-Uzama eğrileri, maksimum yük, maksimum çekme uzaması, maksimum çekme gerilimi ve gerinimi, akma noktasındaki çekme gerilimi ve gerinimi dökümantе edilmiştir.



Şekil 4. 15 Instron - 5982 statik basma ve çekme cihazı

DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde ilk olarak incelenmek üzere seçilmiş olan tozların fiziksel özellikleri saptanmış, daha sonra da preslenip sinter sertleştirme işlemi uygulanan bu tozların mikroyapısal analizleri ve mekanik testleri gerçekleştirilmiştir.

5.1 Akıcılık Testi

Deneyisel çalışmalarda kullanılan toz bileşimlerinin akıcılık testi sonuçları Çizelge 5.1'deki gibidir.

Çizelge 5. 1 Toz bileşimlerinin akıcılık testi sonuçları

Kod	Toz Bileşimi	Akış Hızı (sn/50gr)
AC1	Astaloy Mo-1Cu-0.6C	30
AC2	Astaloy Mo-2Cu-0.6C	31
DH	Distaloy DH-0.6C	31

5.2 Elek Analizi

Numunelerin elek analizi sonuçları, kullanılan elek göz açıklıklarına göre elek üstü toz hacmi, ortalama elek göz açıklığı ve ortalama tane boyutu şeklinde tablo haline getirilmiştir. AC1, AC2 ve DH tozlarının elek analizi sonuçları sırasıyla Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5. 2 AC1 tozunun elek analizi sonuçları

	Elek göz açıklığı (μm)	Elek üstü miktarı ΔR (%hacim)	Ortalama elek göz açıklığı (μm)	d_{ort} (μm)
AC1	125 +100	32,74	112,50	75,50
	-100 +75	19,07	87,50	
	-75 +63	12,00	69,00	
	-63 +40	20,54	51,50	
	-40	15,65	20,00	

Çizelge 5. 3 AC2 tozunun elek analizi sonuçları

	Elek göz açıklığı (μm)	Elek üstü miktarı ΔR (%hacim)	Ortalama elek göz açıklığı (μm)	d_{ort} (μm)
AC2	125 +100	31,07	112,50	74,06
	-100 +75	18,78	87,50	
	-75 +63	12,68	69,00	
	-63 +40	20,43	51,50	
	-40	17,04	20,00	

Çizelge 5. 4 DH tozunun elek analizi sonuçları

	Elek göz açıklığı (μm)	Elek üstü miktarı ΔR (%hacim)	Ortalama elek göz açıklığı (μc)	d_{ort} (μm)
DH	125 +100	32,38	112,50	81,40
	-100 +75	24,35	87,50	
	-75 +63	12,20	69,00	
	-63 +40	28,74	51,50	
	-40	2,33	20,00	

5.3 Görünür Yoğunluk

Deneysel çalışmalarda kullanılan toz bileşimlerinin sıkıştırılmamış haldeki yoğunluk değerleri Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5. 5 Toz bileşimlerinin görünür yoğunluk değerleri

Kod	Toz Bileşimi	Görünür Yoğunluk (kg/m^3)
AC1	Astaloy Mo-1Cu-0.6C	3.13
AC2	Astaloy Mo-2Cu-0.6C	3.11
DH	Distaloy DH-0.6C	3.15

5.4 Yoğunluk

Presleme işlemi sonrasında kompakt numunelere sinter sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Farklı soğuma hızlarına tabi tutulan sinterlenmiş numunelerin Arşimet prensibine göre ölçülen ortalama yoğunlukları ise Çizelge 5.6'daki gibidir. %1 bakırlı AC1 numunesinin, fark edilir şekilde daha düşük yoğunlukta olduğu görülmüştür.

Çizelge 5. 6 Sinterlenmiş numunelerin ortalama yoğunluk değerleri

Kod	Toz Bileşimi	Yoğunluk (kg/m ³)
AC1	Astaloy Mo-1Cu-0.6C	6.92
AC2	Astaloy Mo-2Cu-0.6C	7.01
DH	Distaloy DH-0.6C	7.02

5.5 Boyutsal Değişim

BS EN ISO 2740:2009 standardına uygun şekilde hazırlanan numunelerin, üretim esnasında çeşitli sebeplerle milimetrik farkların olma ve bu farkların hesaplamalarda küçük de olsa farklar yaratabilme ihtimalinden dolayı ebatları presleme sonrası sinter sertleştirme öncesi ölçülmüştür. Sinter sertleştirilmiş haldeki numunelerin ebatları tekrar ölçülmüş olup, elde edilen veriler sırasıyla Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5. 7 Numunelerin sinter sertleştirme işlemi öncesi boyutları

Soğuma Hızı	Ebatlar	AC1 (mm)	AC2 (mm)	DH (mm)
0,5°C/s	En	12,026	12,015	12,020
	Boy	30,051	30,036	30,031
	Kalınlık	6,035	6,035	6,007
1,5°C/s	En	12,095	11,984	12,055
	Boy	30,033	30,041	30,038
	Kalınlık	6,042	6,002	6,049
2°C/s	En	12,003	12,031	12,026
	Boy	30,051	30,035	30,033
	Kalınlık	5,996	6,034	6,001
3°C/s	En	12,010	12,033	12,021
	Boy	30,050	30,033	30,028
	Kalınlık	6,025	6,032	6,010

Çizelge 5. 8 Numunelerin sinter sertleştirme işlemi sonrası boyutları

Soğuma Hızı	Ebatlar	AC1 (mm)	AC2 (mm)	DH (mm)
0,5°C/s	En	11,931	12,004	11,972
	Boy	30,045	30,045	30,020
	Kalınlık	6,0330	5,994	6,043
1,5°C/s	En	12,040	11,972	11,983
	Boy	30,070	30,040	30,063
	Kalınlık	6,029	5,984	6,088
2°C/s	En	11,960	12,021	11,979
	Boy	30,041	30,066	30,070
	Kalınlık	5,991	6,019	6,024
3°C/s	En	11,980	12,018	12,011
	Boy	30,060	30,060	30,080
	Kalınlık	6,022	6,021	6,009

Önalaşımlandırılmış Astaloy Mo tozlarının farklı oranlarda bakır tozlarıyla harmanlanması sonucu oluşturulan AC1 ve AC2 numunelerinin sinter sertleştirme sonucu boyutlarında azalma meydana gelirken; bakır tozlarının önalaşımlandırılmış Astaloy Mo tozlarına difüzyonu ile elde edilen DH numunelerinin sinter sertleştirme sonucu boyutlarında çok düşük miktarda da olsa bir artış meydana gelmiştir. Numunelerin boyutsal değişimlerinin hesaplanmasında kullanılan formül aşağıdaki gibi olup, numunelerin boyutsal değişimleri Çizelge 5.9’da verilmiştir.

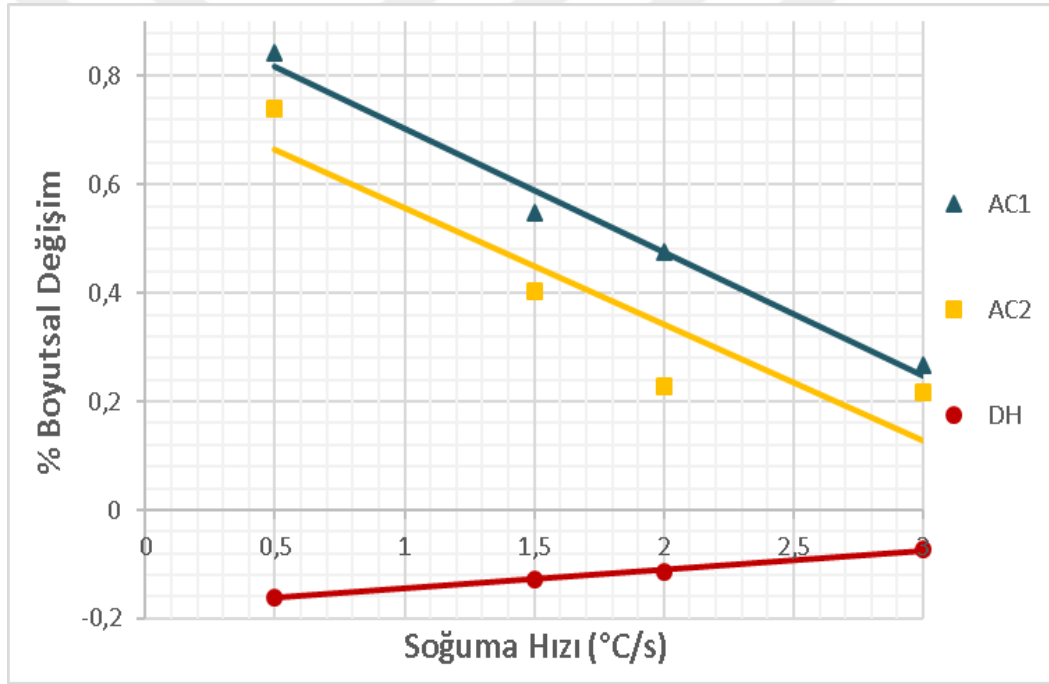
$$\text{Boyutsal Değişim} = \frac{V_{\text{sinter sonrası}} - V_{\text{sinter öncesi}}}{V_{\text{sinter öncesi}}} \quad (5.1)$$

Çizelge 5. 9 Numunelerin sinter sertleştirme sonrası yüzde boyutsal değişimleri

Soğuma Hızı	AC1	AC2	DH
0,5°C/s	0,842635	0,740567	-0,16087
1,5°C/s	0,546542	0,403049	-0,12689
2°C/s	0,474464	0,228633	-0,11414
3°C/s	0,266282	0,217165	-0,07319

Numunelerin yüzde boyutsal değişimlerinin kıyaslaması Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere artan soğuma hızı ile birlikte numunelerin boyutsal değişimleri,

tam anlamıyla lineer olmasa da her iki yöntem için de sifıra yaklaşılmaktadır. Bunun nedeni, yapı içerisindeki karbon ve bakırın demir içerisinde yayılmak için yeterince zaman bulamamasıdır [51]. Üç numune de her soğuma hızında göz ardı edilebilir oranda boyutsal değişim gösterse de, bütün soğuma hızları için en yüksek boyutsal hassasiyet gösteren malzeme Distaloy DH olmuştur. Dolayısıyla difüzyon ile alaşımlama yöntemi, harmanlamaya nazaran daha iyi sonuç vermiştir; çünkü daha yüksek homojenlik sağlamaktadır. Bu sayede harmanlama yöntemindeki durumun aksine bölgesel yoğunlaşmalar yerine malzeme geneline yayılarak, malzeme bütününde bulunan gözeneklere ulaşma ve bu boşlukları doldurma konusunda daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır. AC1 ve AC2 numunelerine bakılacak olursa, %2 bakırın %1 bakıra oranla beklendiği üzere daha iyi boyut hassasiyeti sağladığı söylenebilmektedir.



Şekil 5. 1 Numunelerin soğuma hızlarına göre boyutsal değişim yüzdeleri.
(-) boyut artışı, (+) boyut azalışı

Bakır da karbon da ayrı ayrı ele alınacak olursa, ikisi de sinterlenmiş parçalarda hacim artışına neden olan elementlerdir. Yapılan dilatometrik çalışmalar, karbonun demir içerisinde çözünerek hacim artışına neden olduğunu kanıtlamıştır [52]. Bakır ise demir esaslı malzemelerde sinterleme esnasında sıvı faz oluşturarak ya demir partikülleri arasındaki boşlukları doldurur ya da demir kafesleri içerisine girer. Berner ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar, bakırın tane sınırları boyunca penetrasyonu sonucu

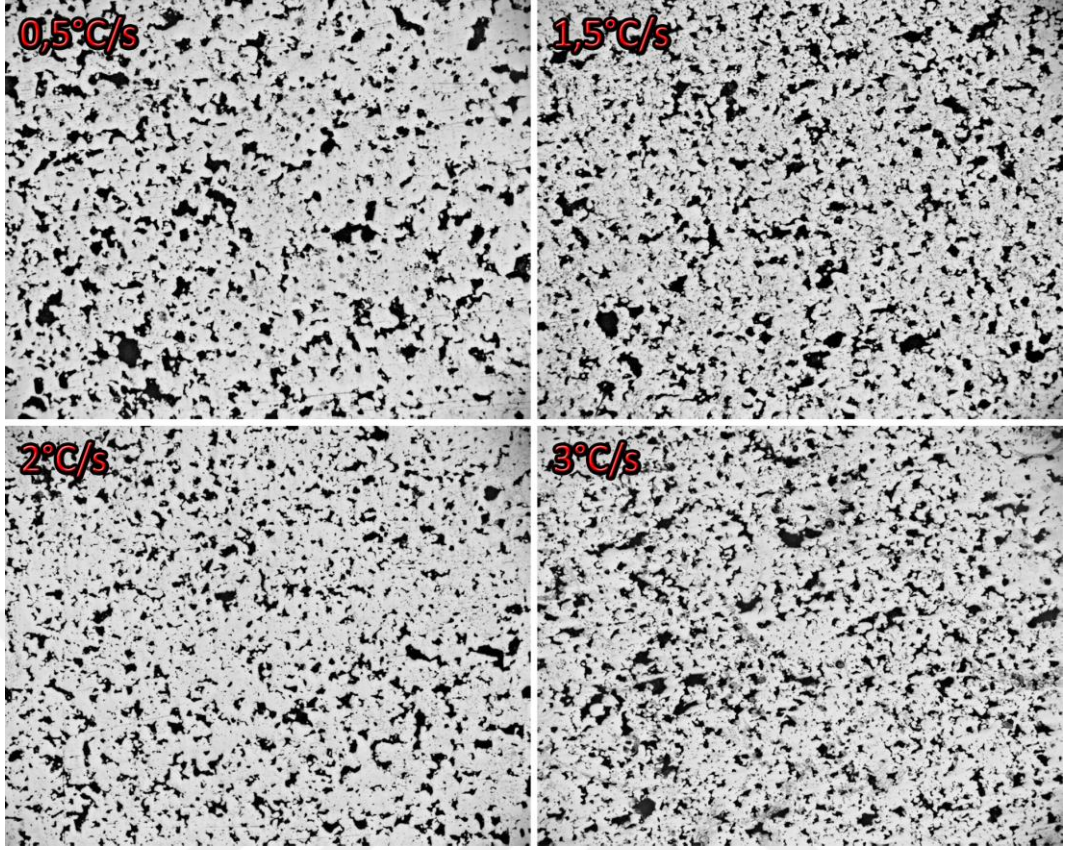
genleşme olayının sebeplerinden biri olduğunu göstermiştir [53]. Ancak bakır ve karbon tozları demir tozuna birlikte eklendiklerinde, bu iki alaşım elementi arasındaki etkileşim nedeniyle demir içerisinde ve tane sınırları boyunca bakır difüzyonu azalır. Bu nedenle bakırın harmanlama ile eklendiği numunelerde bakır boşlukları doldurmak zorunda kaldığı için boyutsal küçülme söz konusu olmaktadır. Ayrıca karbon nedeniyle normal şartlarda bulamadığı penetrasyon imkanını difüzyon ile alışımlandığında bulan bakır, boşlukları doldurmanın yanı sıra demir içerisine ve tane sınırları boyunca yayınarak boyutsal büyümeye sebep olmaktadır [50].

5.6 Mikroyapı İncelemeleri

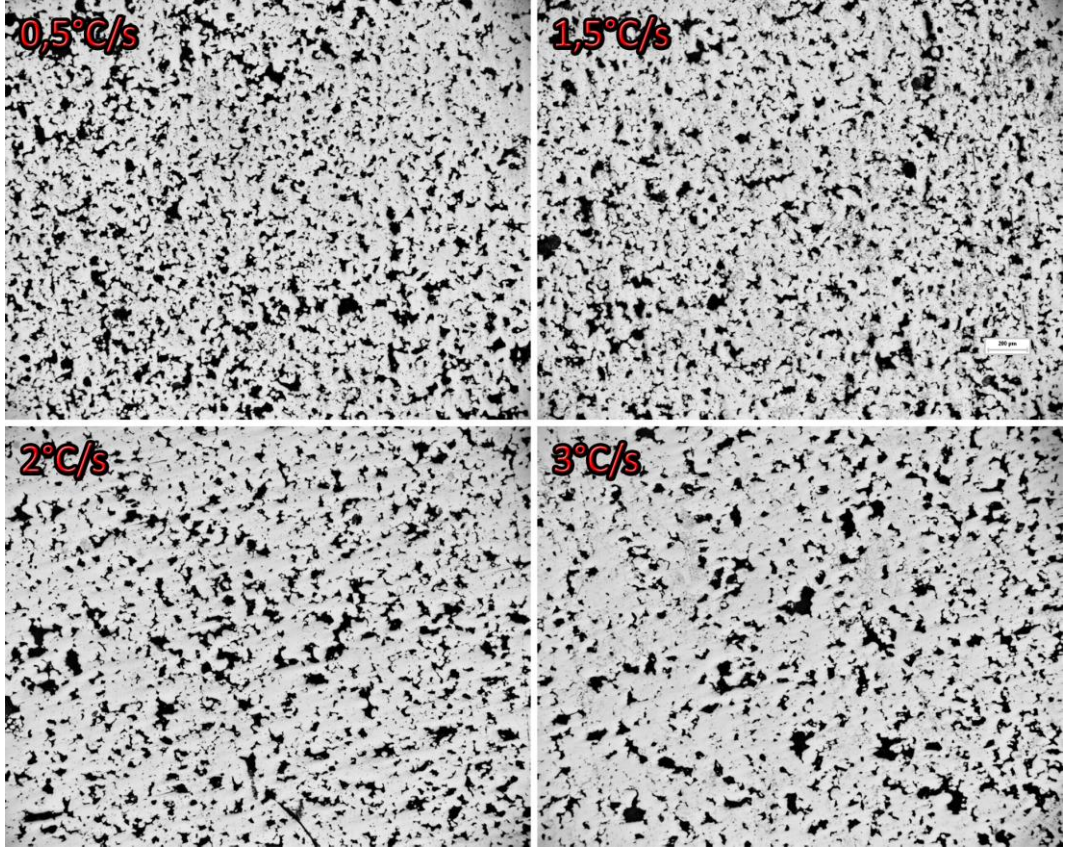
5.6.1 Parlak Yüzey Görüntüleri

Numuneler 60, 120, 240, 400, 600, 800 ve 1200'lük SiC zımparalar ile zımparalandıktan sonra elmas pasta ile parlatılarak hazırlanmıştır. AC1, AC2 ve DH numunelerine ait farklı soğuma hızlarındaki parlak yüzey mikroyapıları sırasıyla Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir. Ayrıca numuneler üzerinden ışık metal mikroskobu ile gözenek miktarı yüzdeleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler Çizelge 5.10'da verildiği gibi olmakla birlikte bu verilerin kıyaslaması Şekil 5.5'te grafik olarak gösterilmektedir. Yapılan mikroskobik incelemelerde genel olarak gözeneklerin homojen dağıldığı; fakat tüm gözeneklerin küresel olmadığı görülmüştür. Ek olarak, kullanılan tozlar arasından DH, her bir soğuma hızında diğer tozlardan çok daha az gözenekliliğe sahip olup, daha küçük çapta ve küresel forma daha yakın gözeneklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

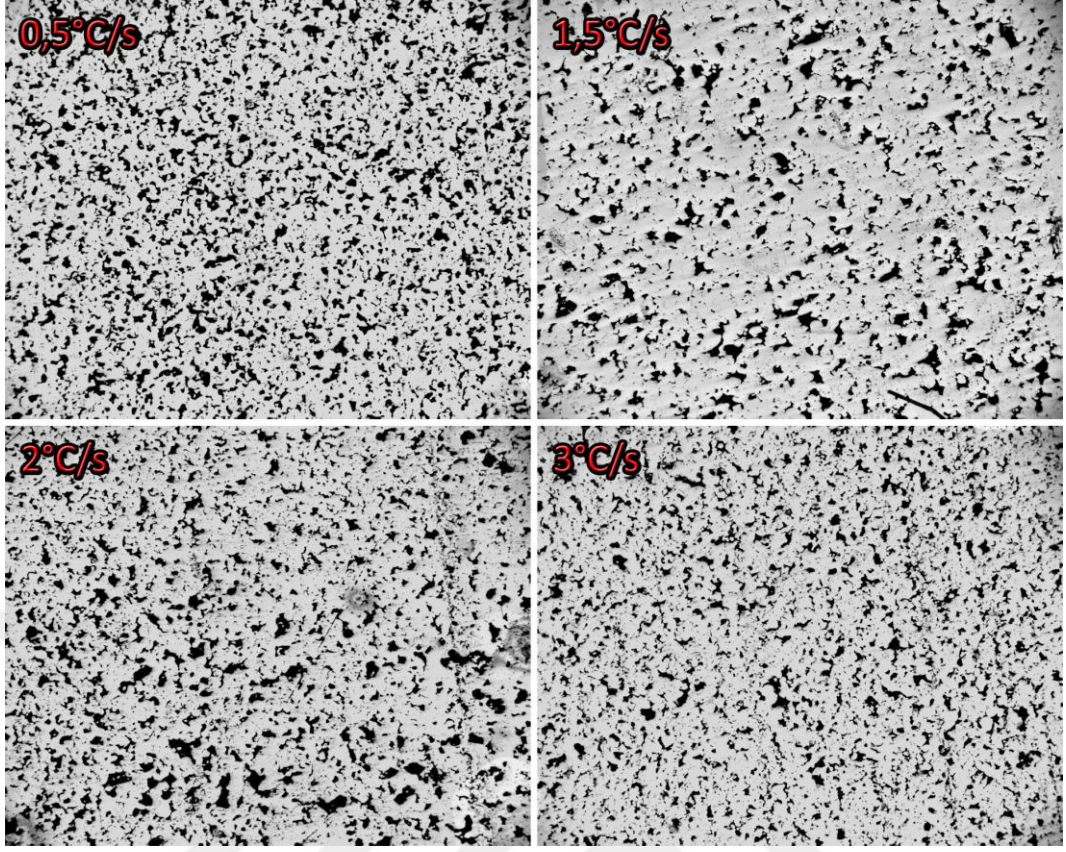
Şekiller, daha net anlaşılabilmesi için bir sonraki sayfadan itibaren başlatılmıştır.



Şekil 5. 2 AC1 numunelerine ait belirtilen soğuma hızlarındaki parlak yüzey görüntüleri



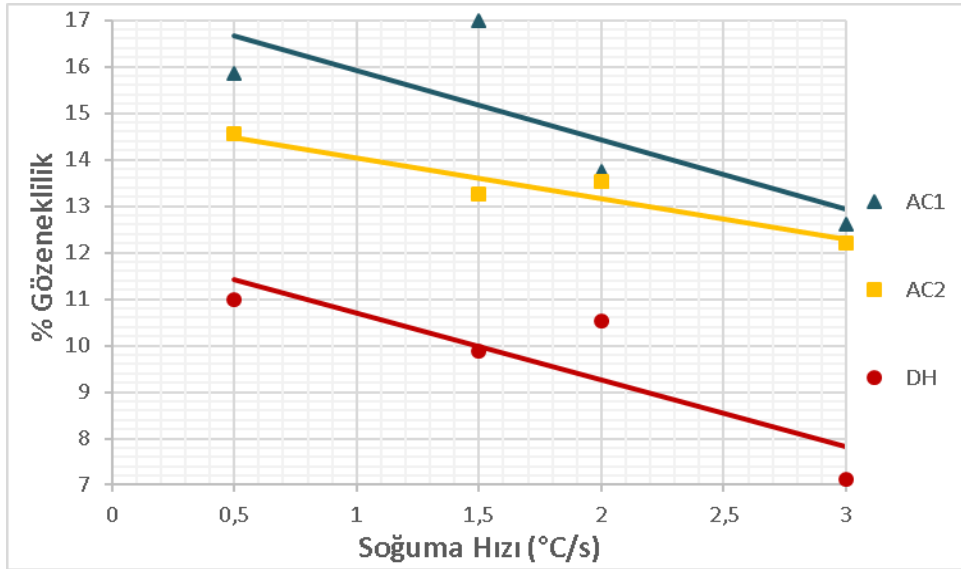
Şekil 5. 3 AC2 numunelerine ait belirtilen soğuma hızlarındaki parlak yüzey görüntüleri



Şekil 5. 4 DH numunelerine ait belirtilen soğuma hızlarındaki parlak yüzey görüntüleri

Çizelge 5. 10 Numunelerin soğuma hızlarına göre gözeneklilik yüzdeleri

Numune	% Gözeneklilik			
	0,5°C/s	1,5°C/s	2°C/s	3°C/s
AC1	15,85	16,98	13,75	12,62
AC2	14,55	13,25	13,53	12,21
DH	11,00	9,87	10,52	7,12



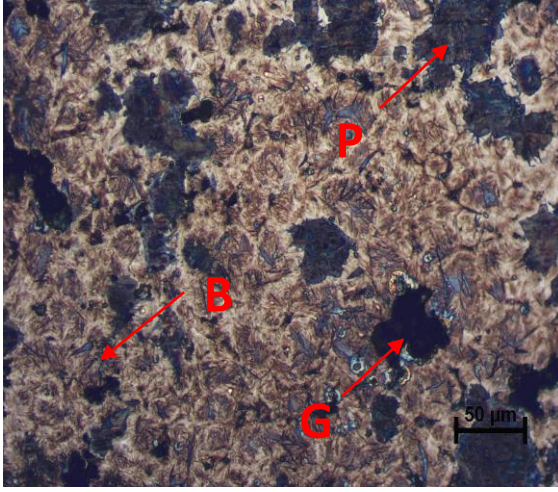
Şekil 5. 5 Numunelerin soğuma hızlarına göre gözeneklilik yüzdeleri grafiği

Yapılan parlak yüzey incelemelerinde genel olarak gözeneklerin homojen dağıldığı; ancak çoğunun küresellikten uzak olduğu görülmüştür. Artan soğuma hızıyla tüm numunelerde gözeneklilik oranı azalmıştır. Bunun nedeni, hızlı soğuma ile tane büyümesinin engellenmiş olması, dolayısıyla da taneler arasındaki boşlukların artmasının engellenmiş olmasıdır. Ayrıca AC1 ve AC2 numuneleri kıyaslandığında, infiltrant görevindeki bakırın miktarının artmasıyla gözeneklilik oranının düştüğü saptanmıştır.

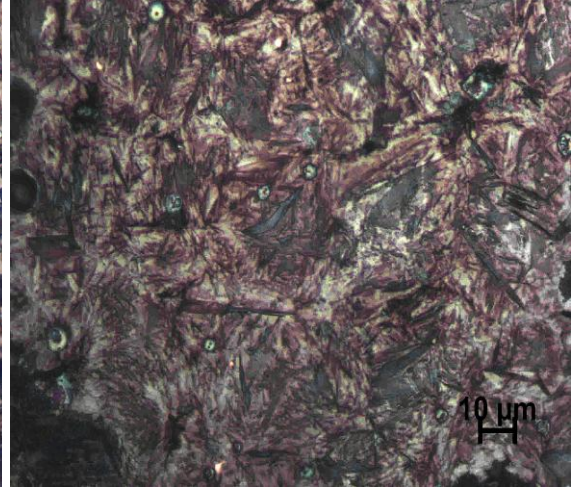
Her bir soğuma hızı baz alındığında AC1 numunelerinin küresellikten uzak formdaki gözenek miktarı ve oranının AC2 numunelerinden; AC2 numunelerinin küresellikten uzak formdaki gözenek miktarı ve oranının da DH numunelerinkinden daha fazla olduğu görülmüştür. Büyük, düzensiz ve küresel olmayan gözeneklerin özellikle martenzit gibi sertliği yüksek fazlarda çentik etkisi yaptığı, dolayısıyla çatlak ilerlemesini tetiklediği ve gevrek kırılmaya sebep olduğu bilinmektedir. Bu etki Bölüm 5.8’de verilen çapraz kırılma dayanımı ve Bölüm 5.9’da verilen çekme dayanımı testlerinin sonuçları ile birlikte ifade edilmiştir.

5.6.2 Dağlanmış Yüzey Görüntüleri

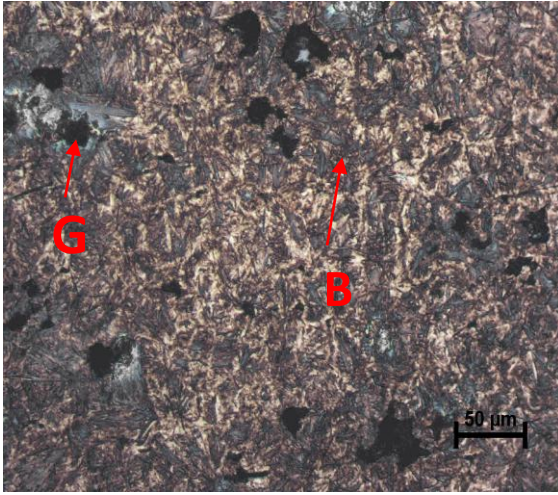
Farklı soğuma hızlarında hazırlanmış AC1, AC2 ve DH numuneleri metalografik işlemlerin ardından gözeneklilik görüntüleri alındıktan sonra Nital 2 ile dağlanmıştır. AC1, AC2 ve DH numunelerinin dağlanan yüzeylerinin 200 kat ve 500 kat büyütmedeki mikroyapılarına ait görüntüleri sırasıyla Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmiştir. Şekillerin üzerinde bulunan G, P, B ve M harfleri sırasıyla gözenek, perlit, beynit ve martenziti temsil etmektedir. AC1 ve AC2 numunelerine ait mikroyapıların birbirine çok benzediği görülmüştür. Genel olarak numunelerin farklı oranlarda olmak kaydıyla 0,5°C/s soğuma hızında beynit ve ince perlit, 1,5°C/s ve 2°C/s soğuma hızında beynit ve martenzit, 3°C/s soğuma hızında ise tamamen yakın martenzit yapı içerdiği görülmüştür. Beynit morfolojisinin ince perlit ve martenzit morfolojisinden ayrımı güç olduğundan, fazların tayini Bölüm 5.6.5’te mikrosertlik yüzey görüntüleri ve sertlik değerleri ile birlikte ele alınmıştır.



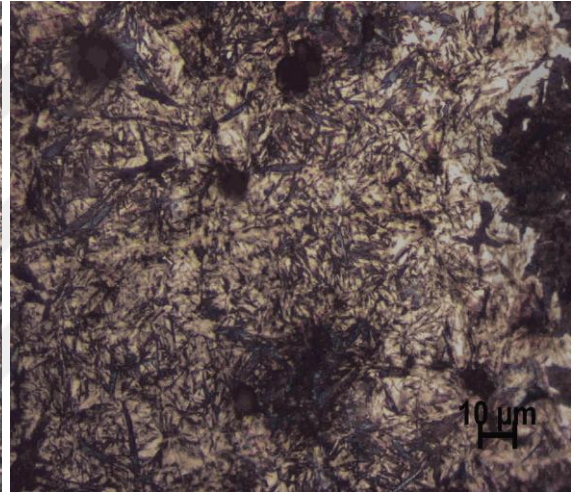
(a)



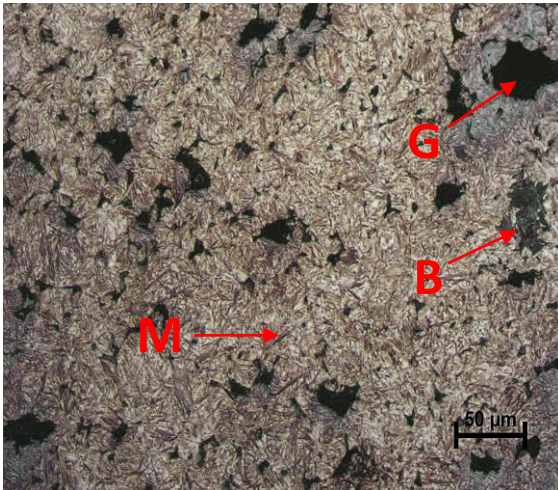
(b)



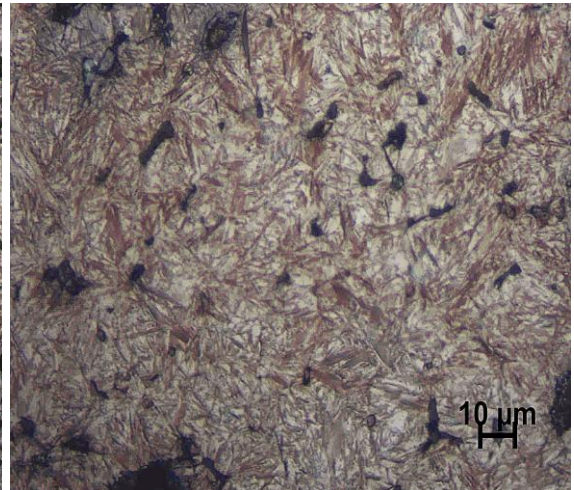
(c)



(d)

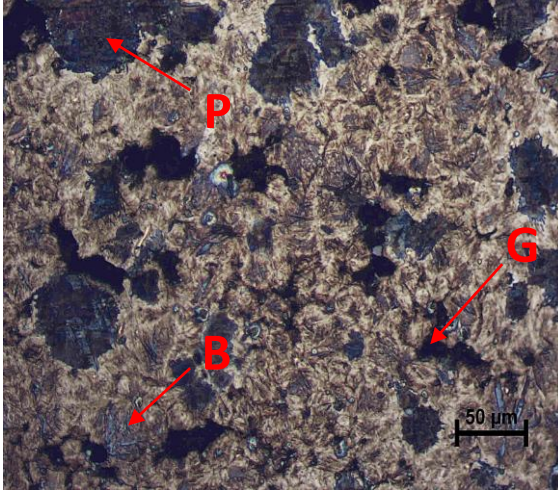


(e)

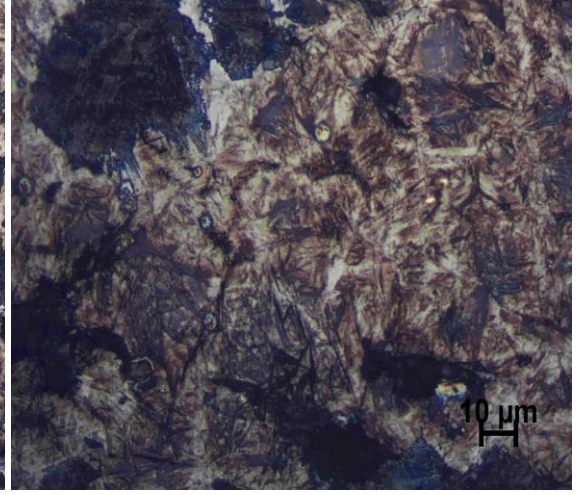


(f)

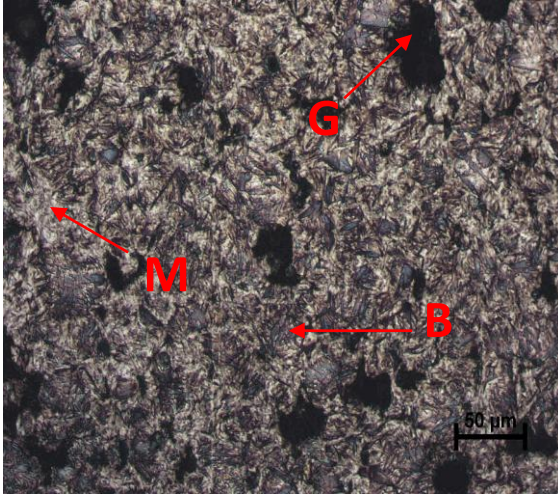
Şekil 5. 6 AC1 numunelerinin mikroyapı görüntüleri (a) 0,5°C/s – 200x, (b) 0,5°C/s – 500x, (c) 1,5°C/s – 200x, (d) 1,5°C/s – 500x, (e) 3°C/s – 200x, (f) 3°C/s – 500x



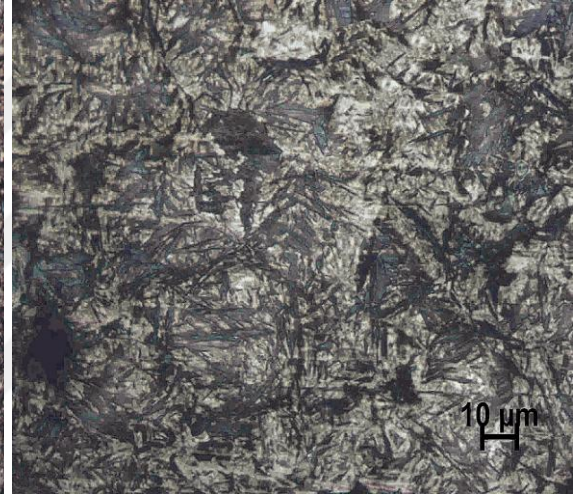
(a)



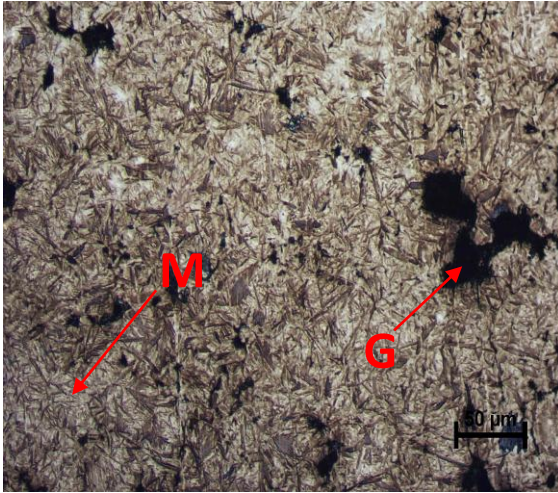
(b)



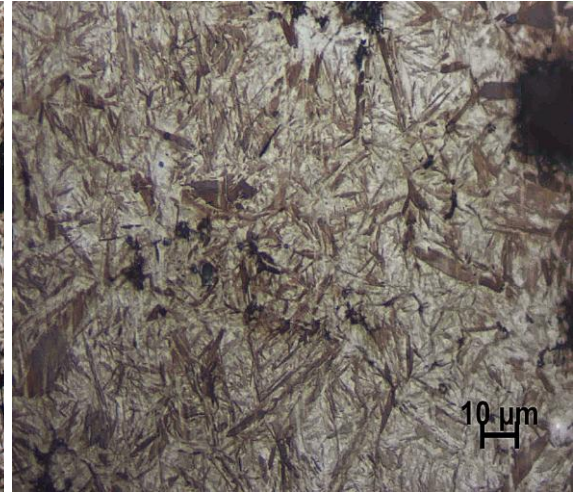
(c)



(d)

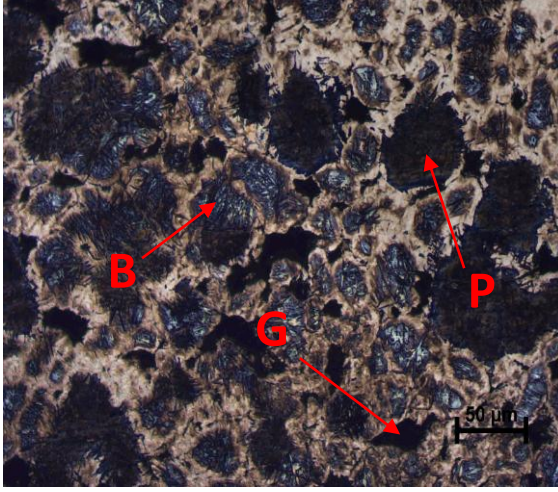


(e)



(f)

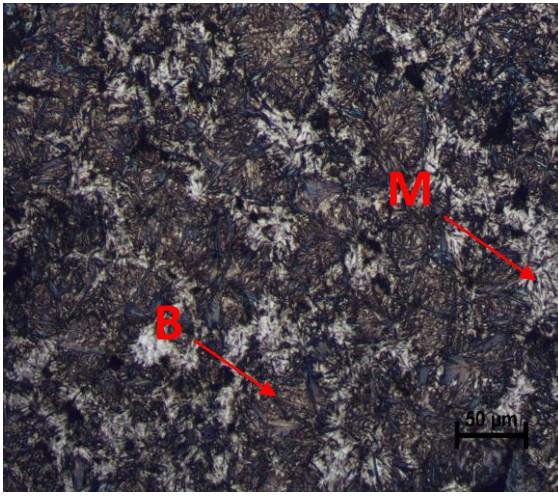
Şekil 5. 7 AC2 numunelerinin mikroyapı görüntüleri (a) 0,5°C/s – 200x, (b) 0,5°C/s – 500x, (c) 1,5°C/s – 200x, (d) 1,5°C/s – 500x, (e) 3°C/s – 200x, (f) 3°C/s – 500x



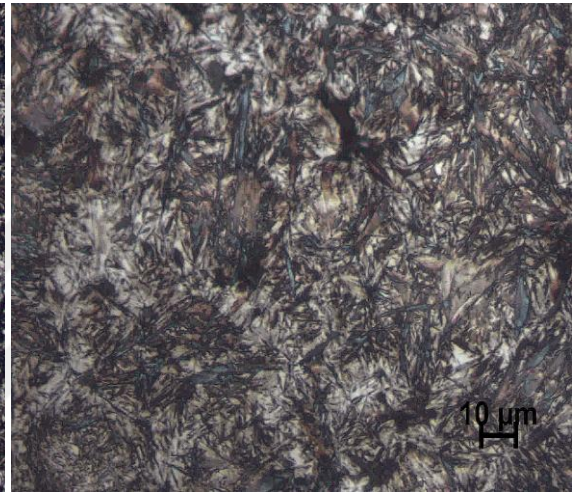
(a)



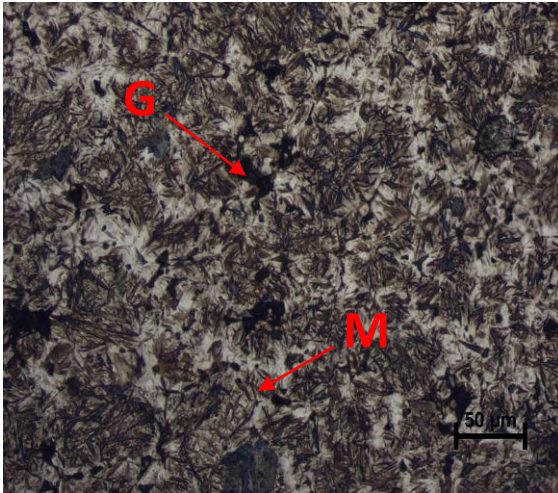
(b)



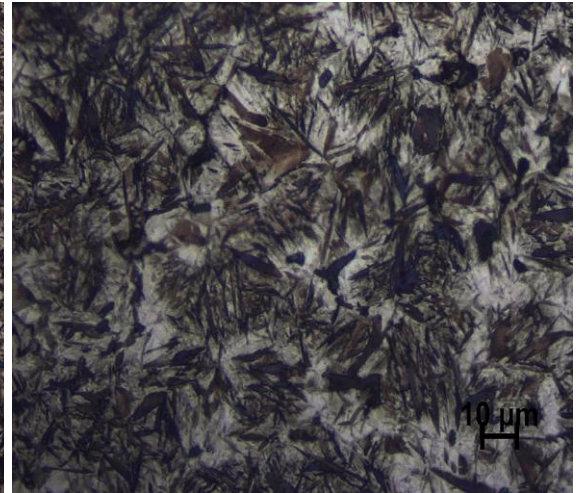
(c)



(d)



(e)

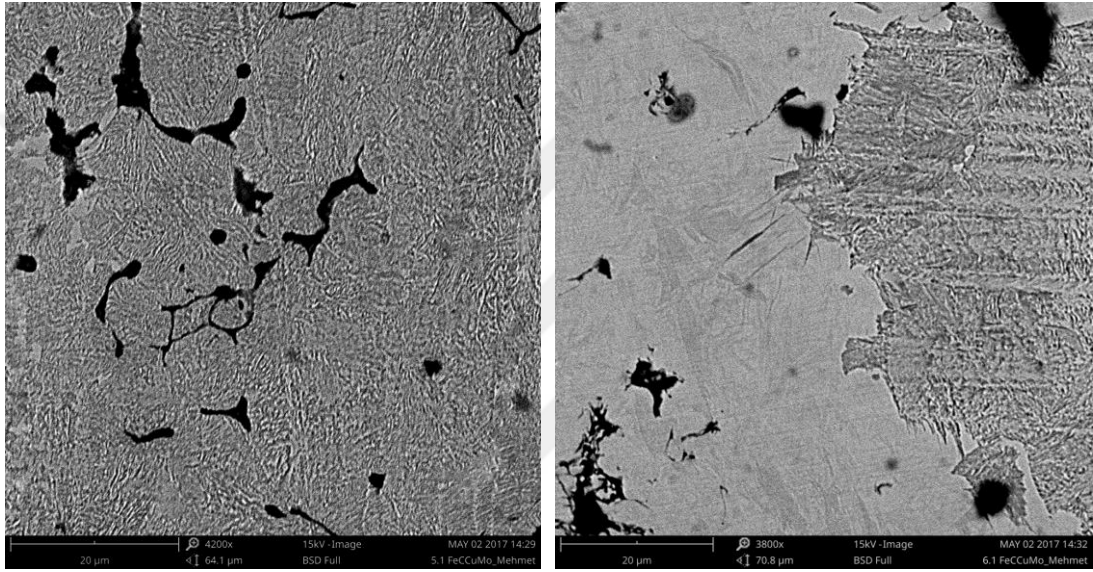


(f)

Şekil 5. 8 DH numunelerinin mikroyapı görüntüleri (a) 0,5°C/s – 200x, (b) 0,5°C/s – 500x, (c) 1,5°C/s – 200x, (d) 1,5°C/s – 500x, (e) 3°C/s – 200x, (f) 3°C/s – 500x

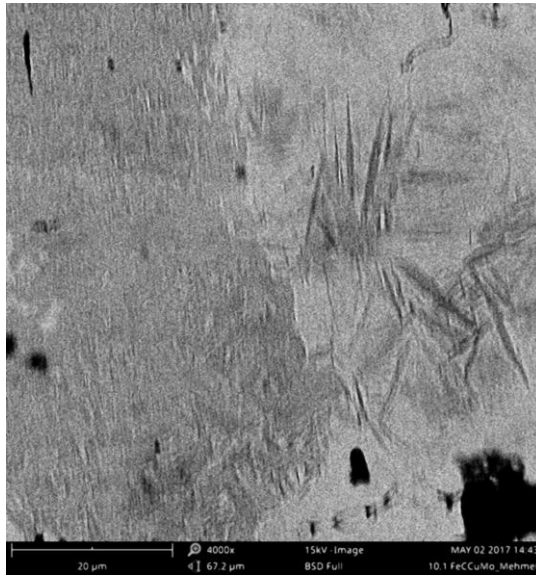
5.6.3 SEM Görüntüleri

Işık metal mikroskobu ile yapılan incelemelerde martenzit ve beynit fazları çok net ayırt edilemediğinden, numunelerin 3800-4200 arası büyütmelerdeki SEM görüntüleri alınmıştır. Numunelerin 1,5°C/s ve 2°C/s soğuma hızlarındaki SEM görüntüleri hemen hemen birbirinin aynısı gibi görüldüğünden, proses farkının daha net anlaşılabilmesi için numunelerin 0,5°C/s ve 3°C/s soğuma hızlarındaki görüntüleri sırasıyla Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilmiştir. 3°C/s görüntülerindeki iğneli formlar, yapının martenzit fazıyla kaplı olduğunun göstergesidir.



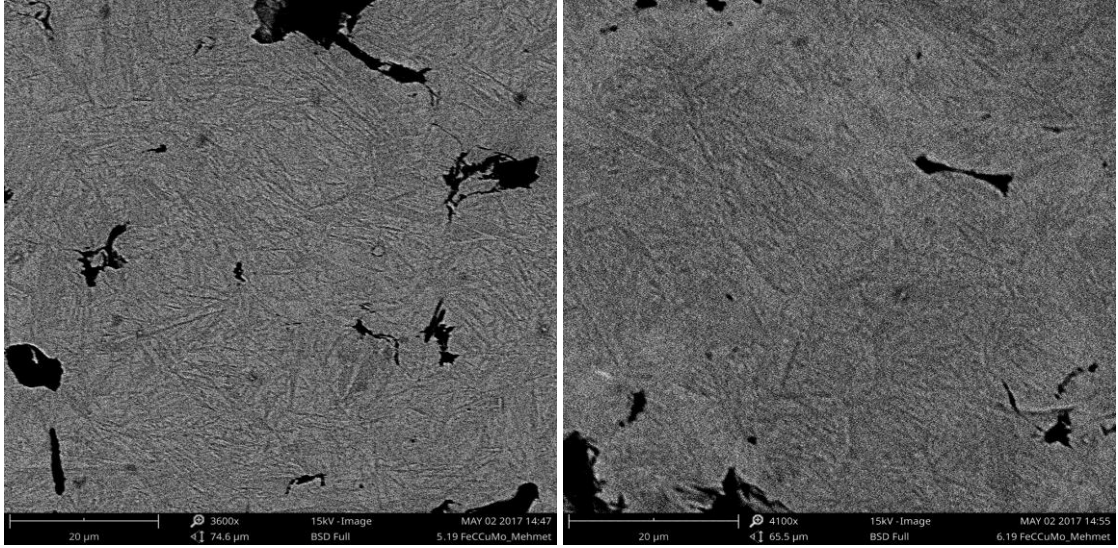
(a)

(b)



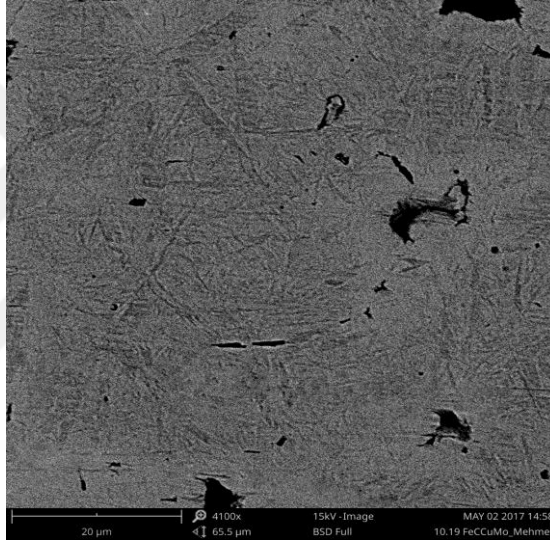
(c)

Şekil 5. 9 0,5°C/s soğuma hızındaki SEM görüntüleri. (a) AC1, (b) AC2, (c) DH



(a)

(b)

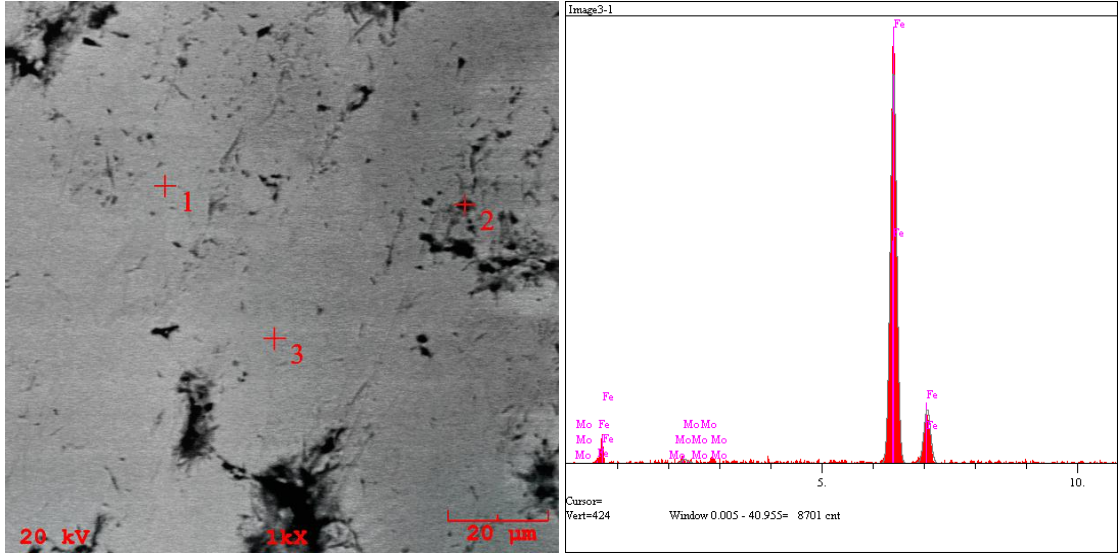


(c)

Şekil 5. 10 3°C/s soğuma hızındaki SEM görüntüleri. (a) AC1, (b) AC2, (c) DH

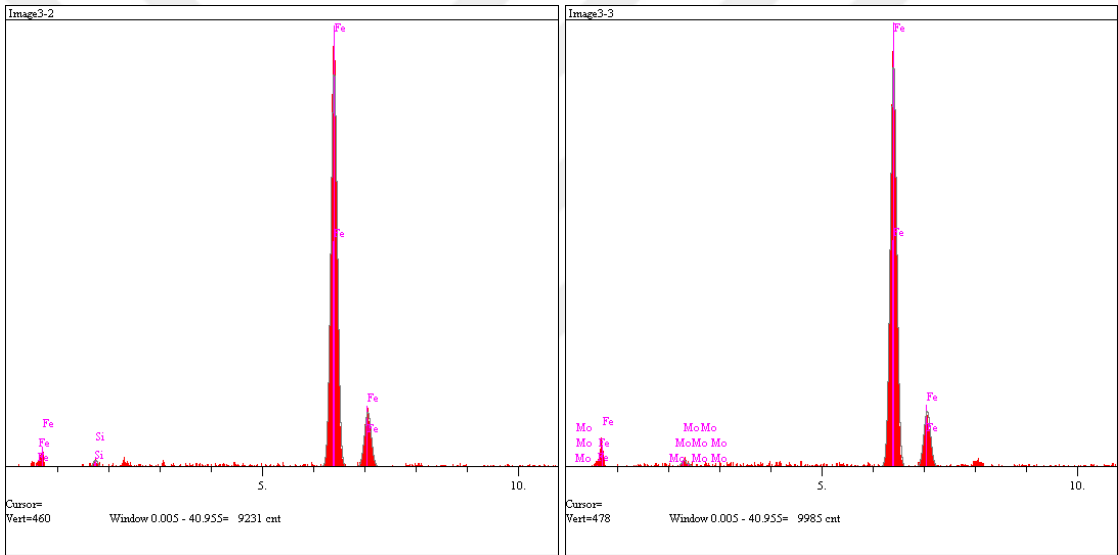
5.6.4 EDS Görüntüleri

AC1, AC2 ve DH numunelerine ait noktasal EDS analizleri, saptanan elementler ve bu elementlerin ağırlıkça yüzdeleri sırasıyla bu başlık içerisindeki şekillerde ve çizelgelerde verilmiştir. Nokta analizi grafiklerindeki elementlere ait pik yükseklikleri, bileşim içerisindeki yüzdeleriyle doğru orantılıdır.



(a)

(b)



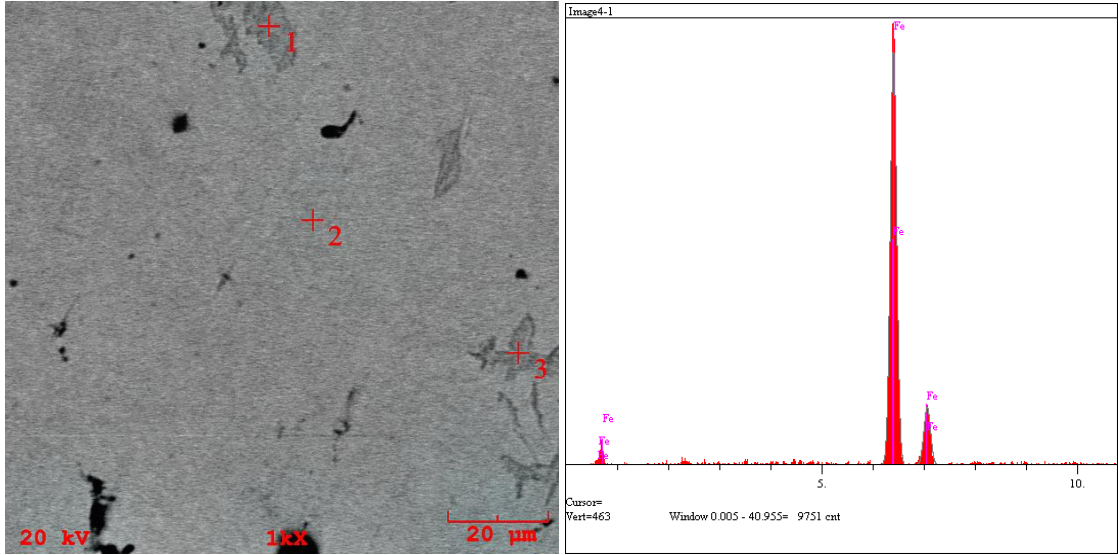
(c)

(d)

Şekil 5. 11 (a) AC1 - 0,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

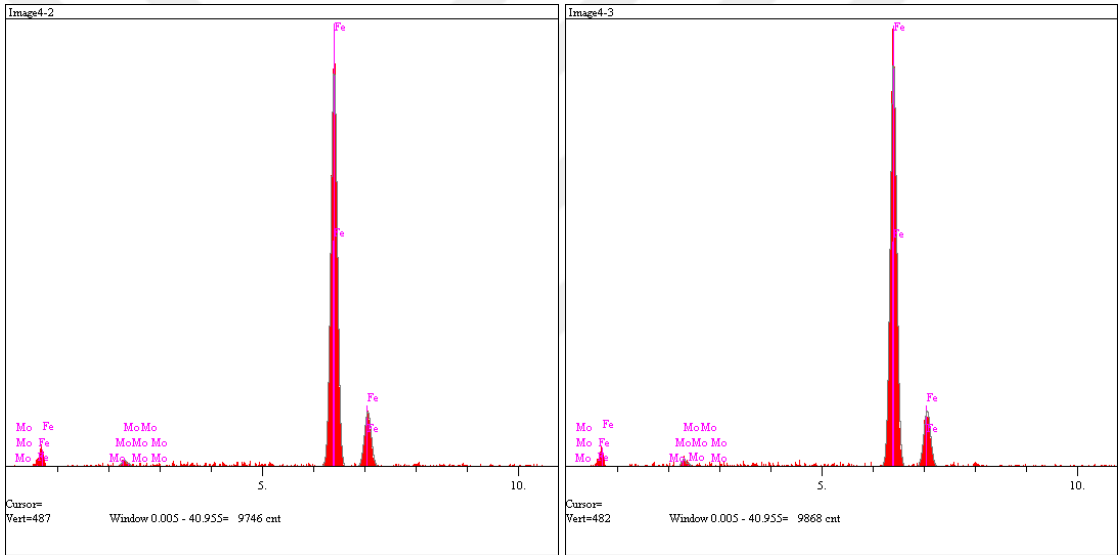
Çizelge 5. 11 AC1 - 0,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
AC1	0,5°C/s	1	Fe	98,940
			Mo	1,060
		2	Fe	99,365
			Si	0,635
		3	Fe	98,648
			Mo	1,352



(a)

(b)



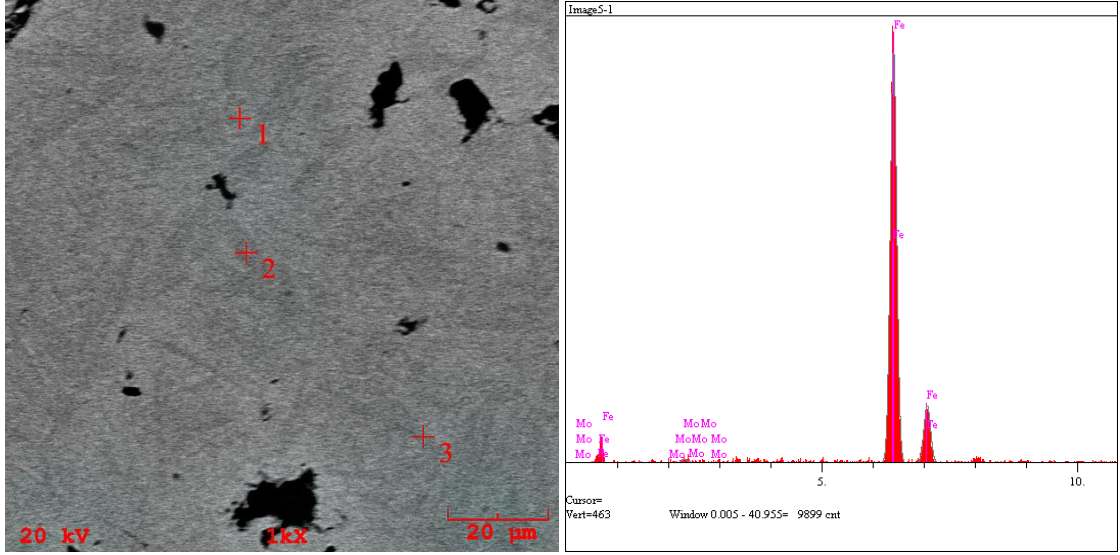
(c)

(d)

Şekil 5. 12 (a) AC1 - 1,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

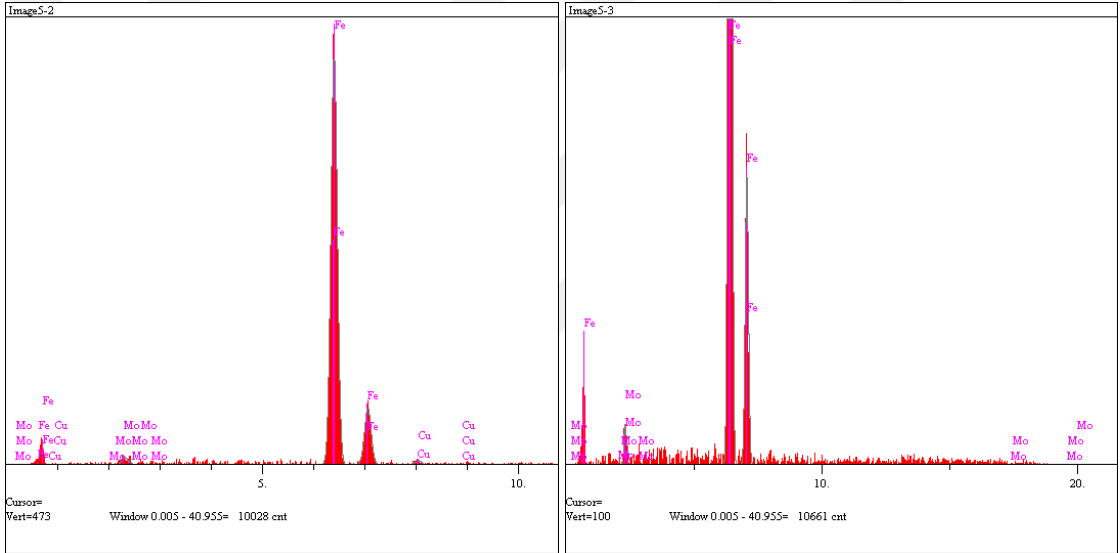
Çizelge 5. 12 AC1 - 1,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
AC1	1,5°C/s	1	Fe	100
		2	Fe	98,651
			Mo	1,349
		3	Fe	98,559
			Mo	1,441



(a)

(b)



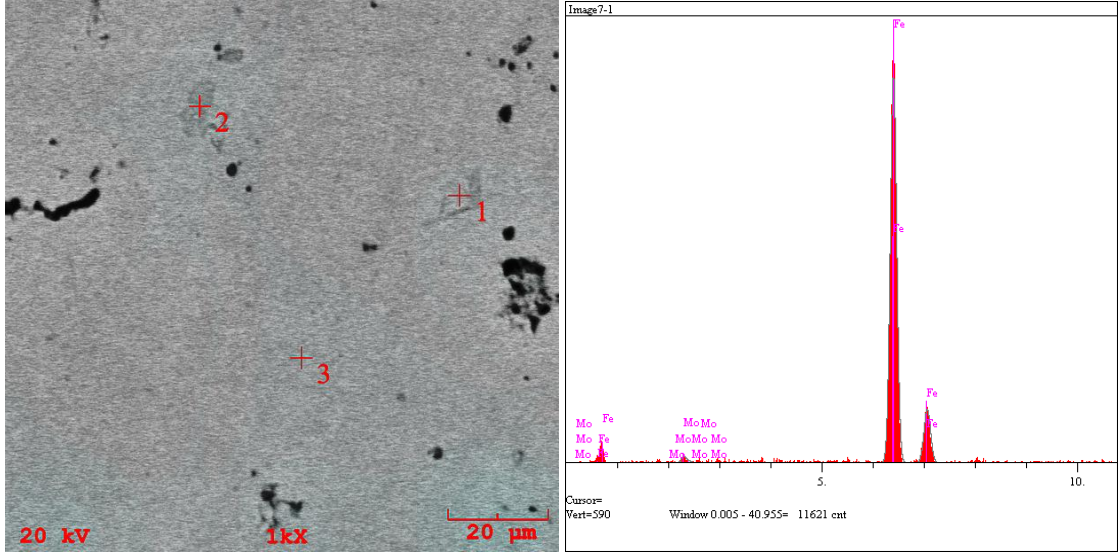
(c)

(d)

Şekil 5. 13 (a) AC1 - 2°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

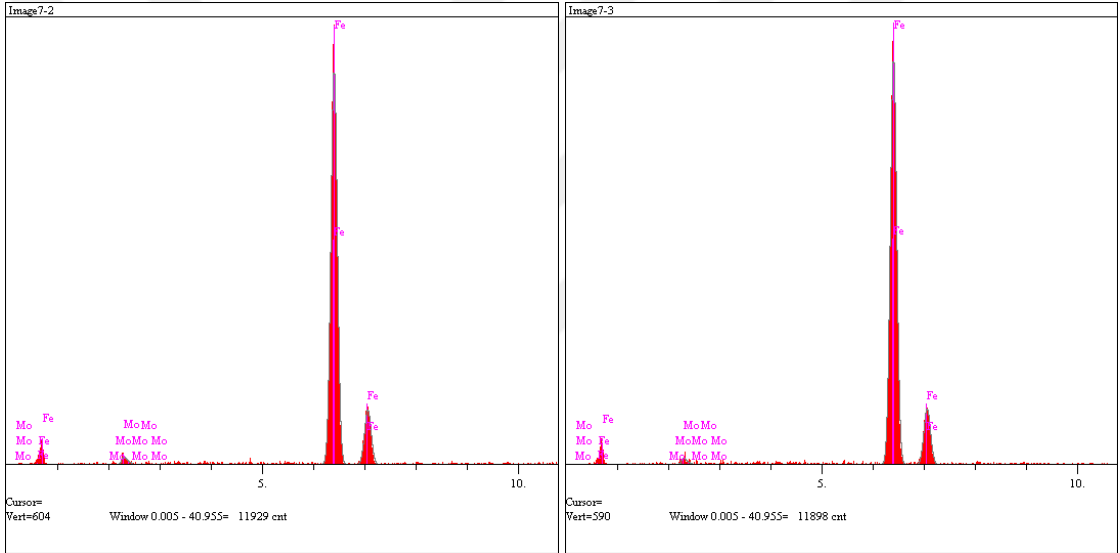
Çizelge 5. 13 AC1 - 2°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
AC1	2°C/s	1	Fe	99,086
			Mo	0,914
		2	Fe	96,191
			Mo	1,644
			Cu	2,165
		3	Fe	98,409
			Mo	1,501



(a)

(b)



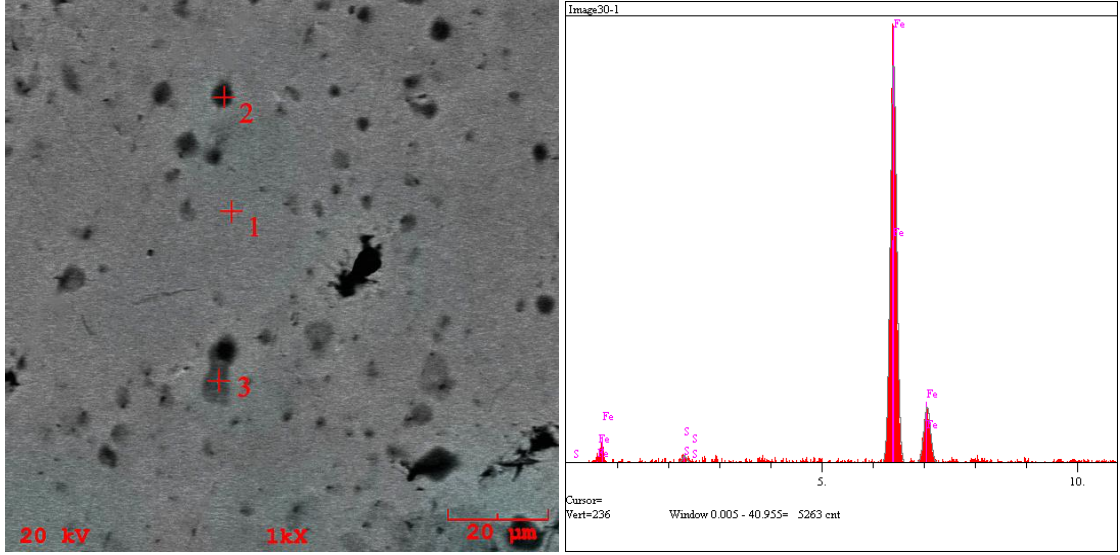
(c)

(d)

Şekil 5. 14 (a) AC1 - 3°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

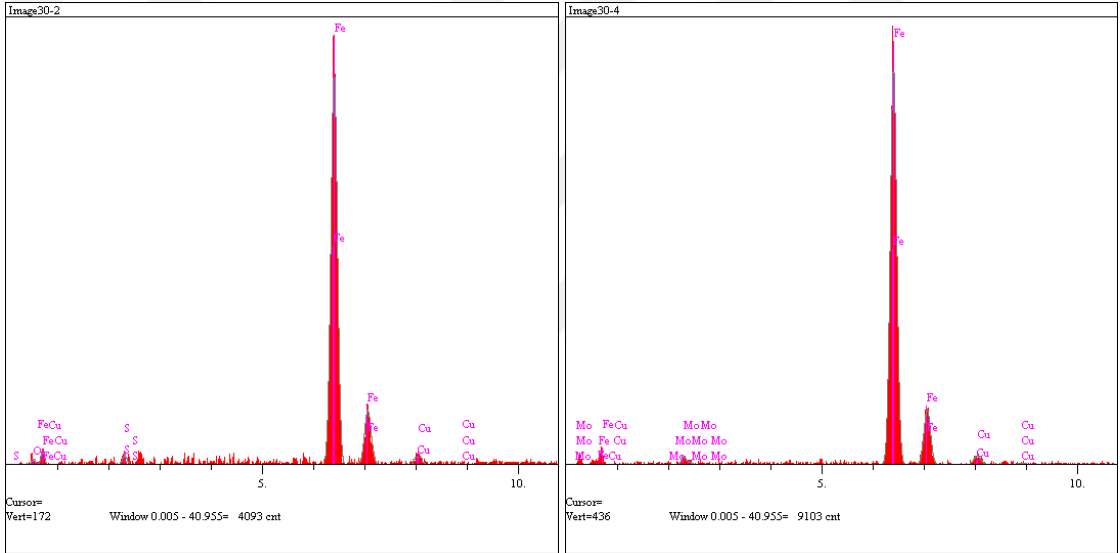
Çizelge 5. 14 AC1 - 3°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
AC1	3°C/s	1	Fe	98,591
			Mo	1,409
		2	Fe	98,303
			Mo	1,697
		3	Fe	98,590
			Mo	1,410



(a)

(b)



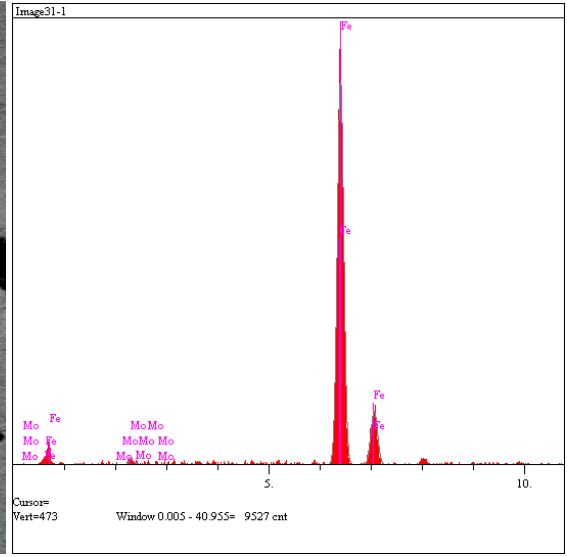
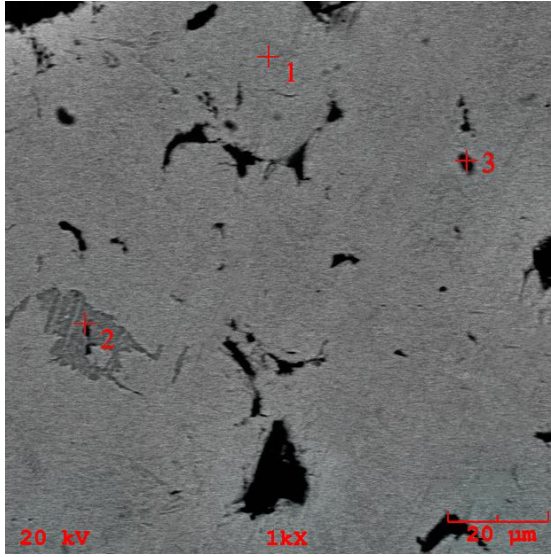
(c)

(d)

Şekil 5. 15 (a) AC2 - 0,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

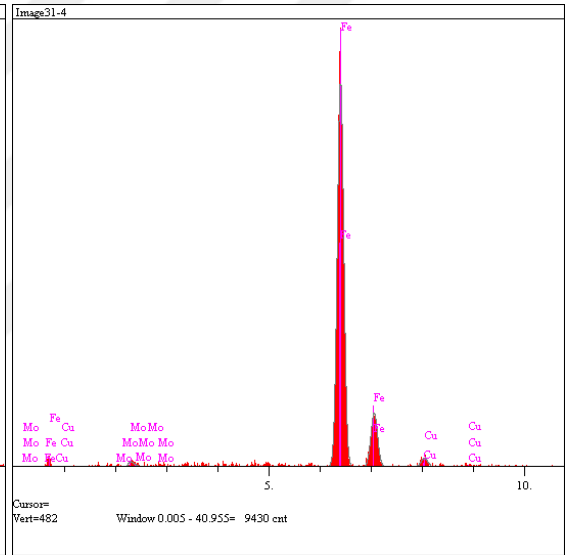
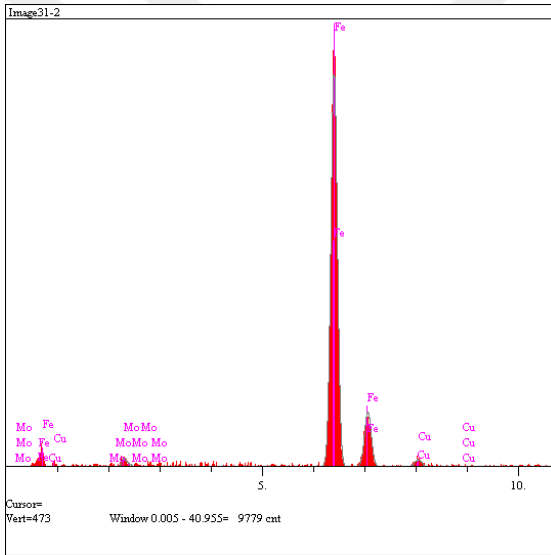
Çizelge 5. 15 AC2 - 0,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
AC2	0,5°C/s	1	Fe	99,464
			S	0,536
		2	Fe	93,769
			Cu	4,617
			S	0,730
			O	0,884
		3	Fe	94,221
			Mo	1,541
			Cu	4,238



(a)

(b)



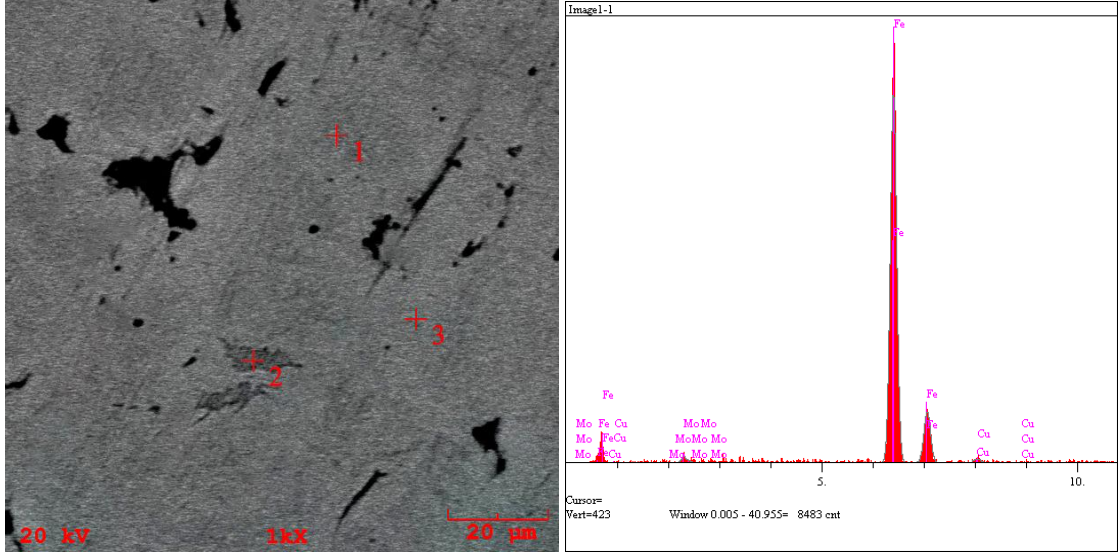
(c)

(d)

Şekil 5. 16 AC2 - 1,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

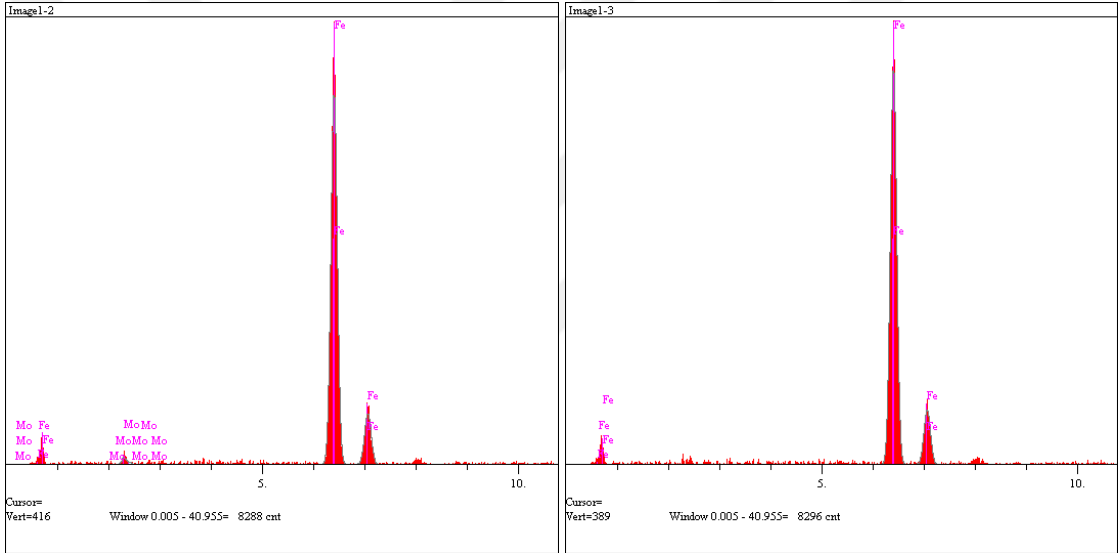
Çizelge 5. 16 AC2 - 1,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
AC2	1,5°C/s	1	Fe	98,770
			Mo	1,230
		2	Fe	94,595
			Mo	1,838
			Cu	3,597
		3	Fe	94,604
			Mo	1,132
			Cu	4,264



(a)

(b)



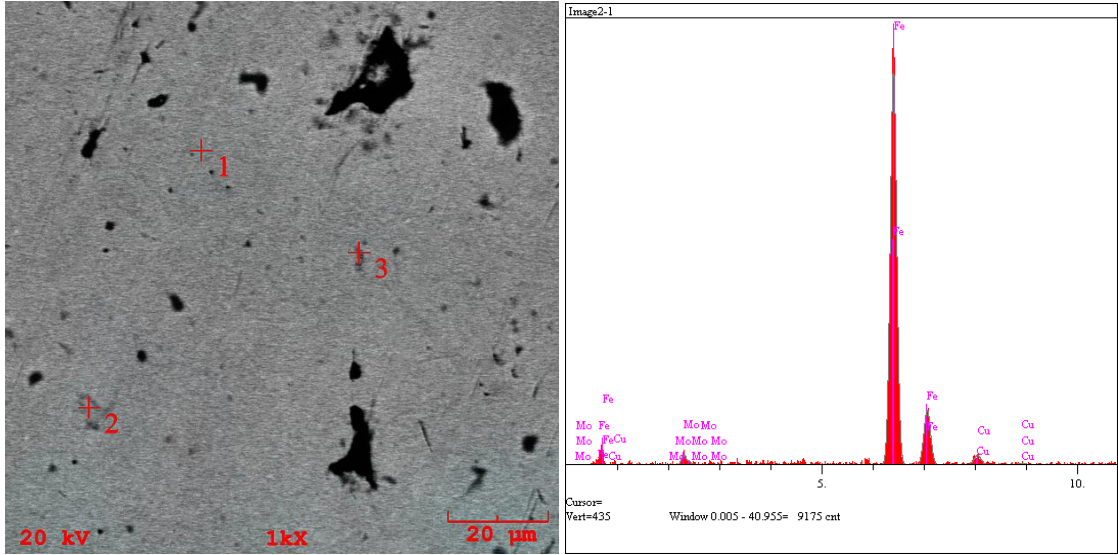
(c)

(d)

Şekil 5. 17 AC2 - 2°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

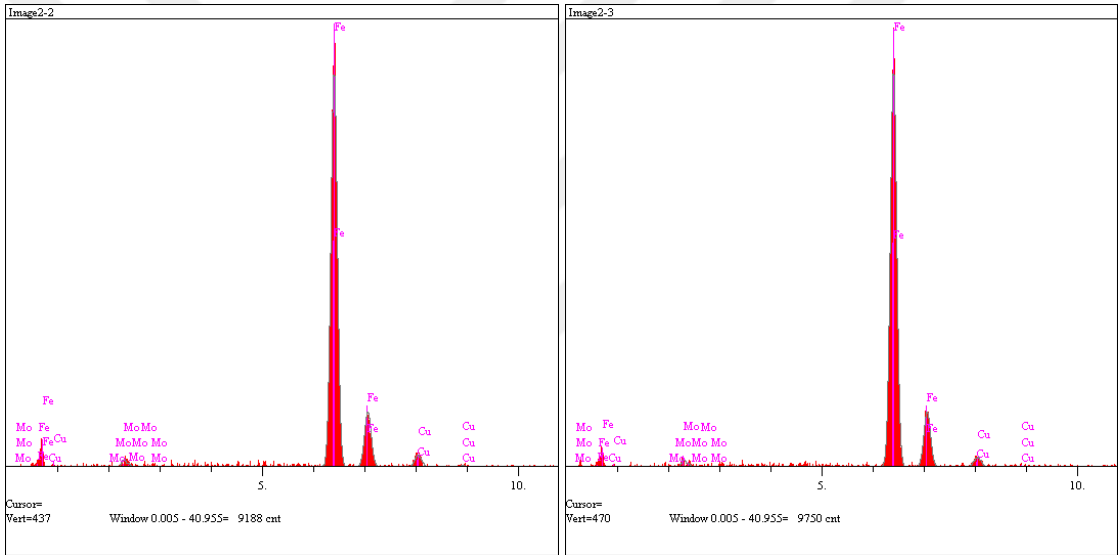
Çizelge 5. 17 AC2 - 2°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
AC2	2°C/s	1	Fe	96,562
			Mo	1,383
			Cu	2,055
		2	Fe	98,374
			Mo	1,626
		3	Fe	100



(a)

(b)



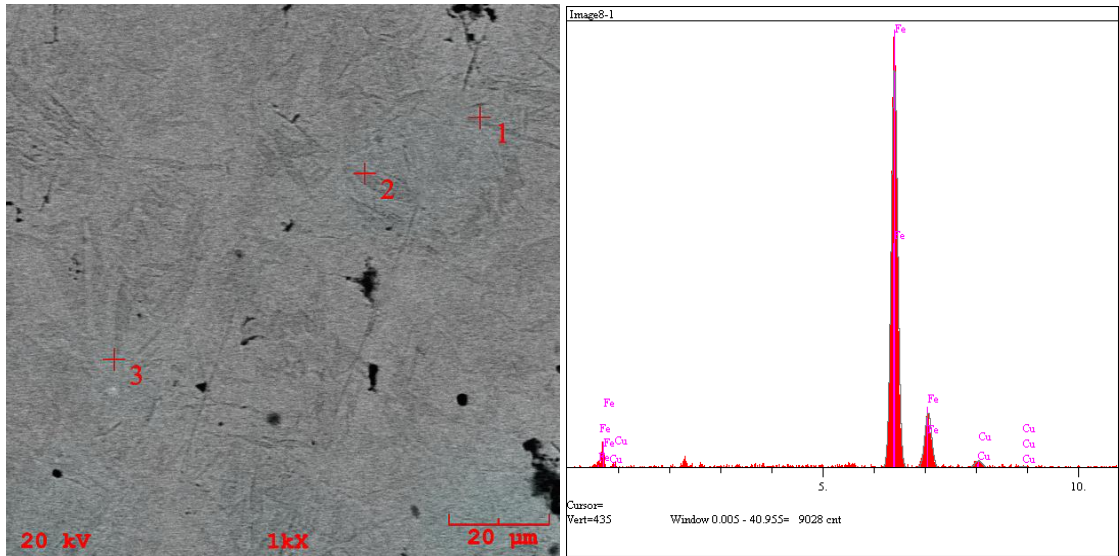
(c)

(d)

Şekil 5. 18 AC2 - 3°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

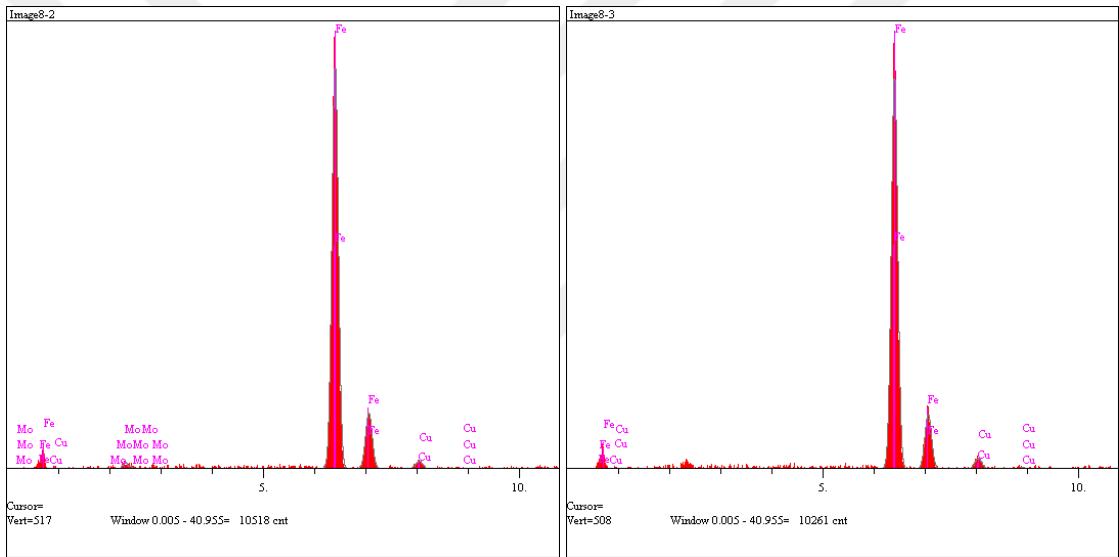
Çizelge 5. 18 AC2 - 3°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
AC2	3°C/s	1	Fe	93,477
			Mo	2,007
			Cu	4,516
		2	Fe	92,711
			Mo	1,495
			Cu	5,794
		3	Fe	93,845
			Mo	1,358
			Cu	4,797



(a)

(b)



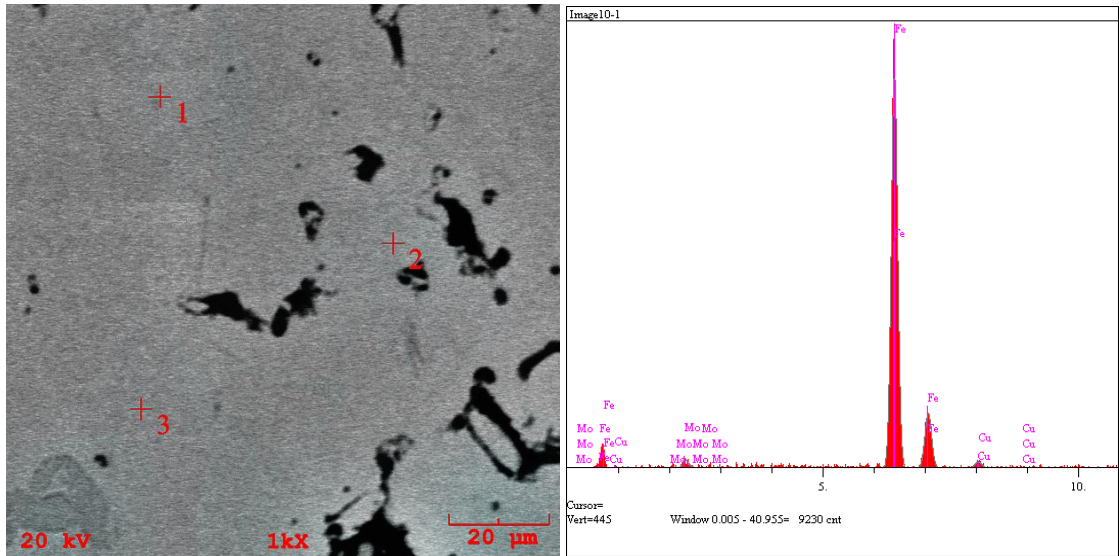
(c)

(d)

Şekil 5. 19 DH - 0,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

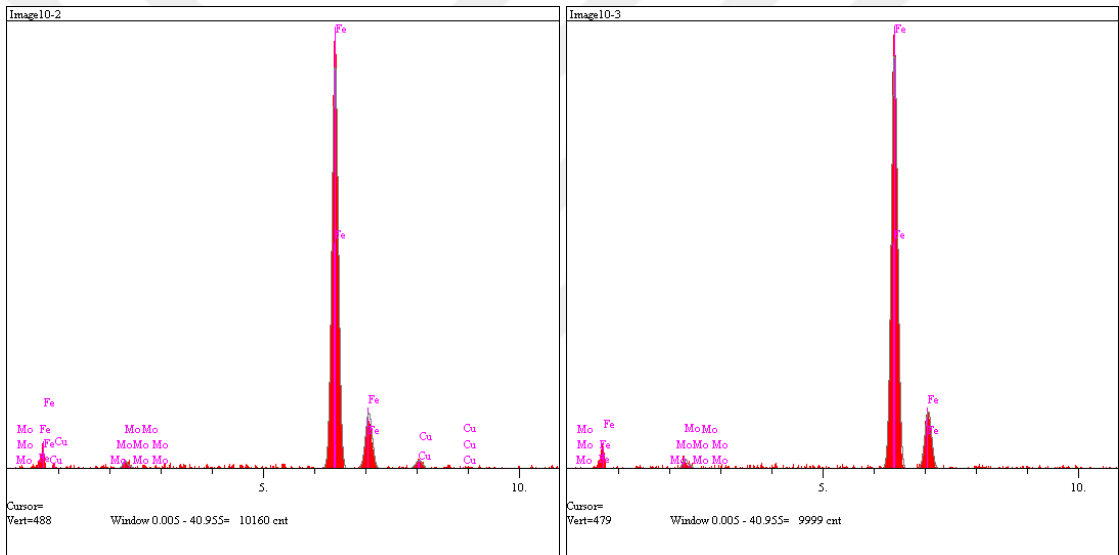
Çizelge 5. 19 DH - 0,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
DH	0,5°C/s	1	Fe	96,491
			Cu	3,509
		2	Fe	94,910
			Mo	1,224
		3	Cu	3,866
			Fe	94,744
			Cu	5,256



(a)

(b)



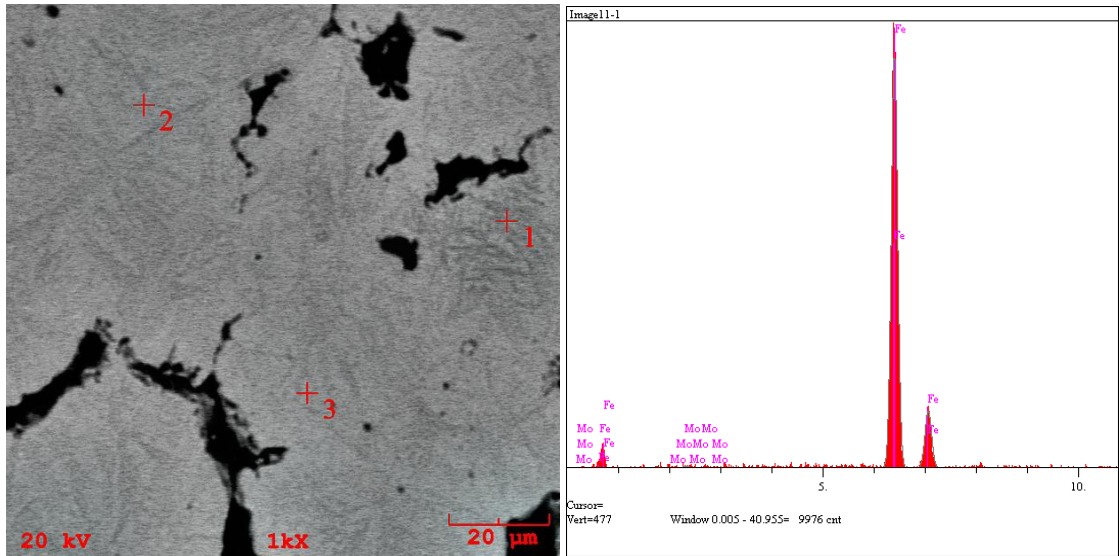
(c)

(d)

Şekil 5. 20 DH - 1,5°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

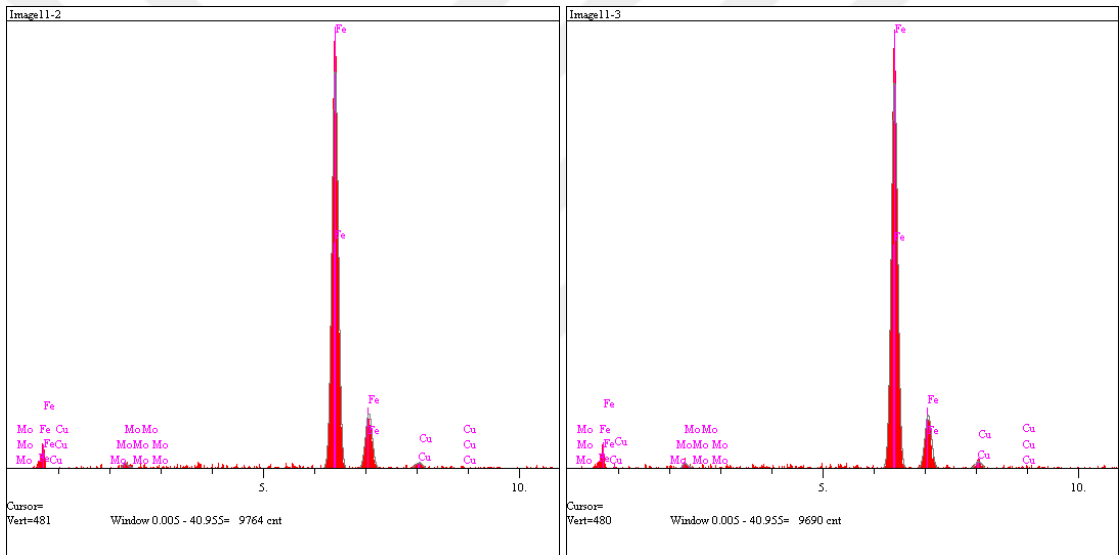
Çizelge 5. 20 DH - 1,5°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
DH	1,5°C/s	1	Fe	94,931
			Mo	1,760
			Cu	3,309
		2	Fe	94,423
			Mo	1,526
			Cu	4,052
		3	Fe	98,081
			Mo	1,919



(a)

(b)



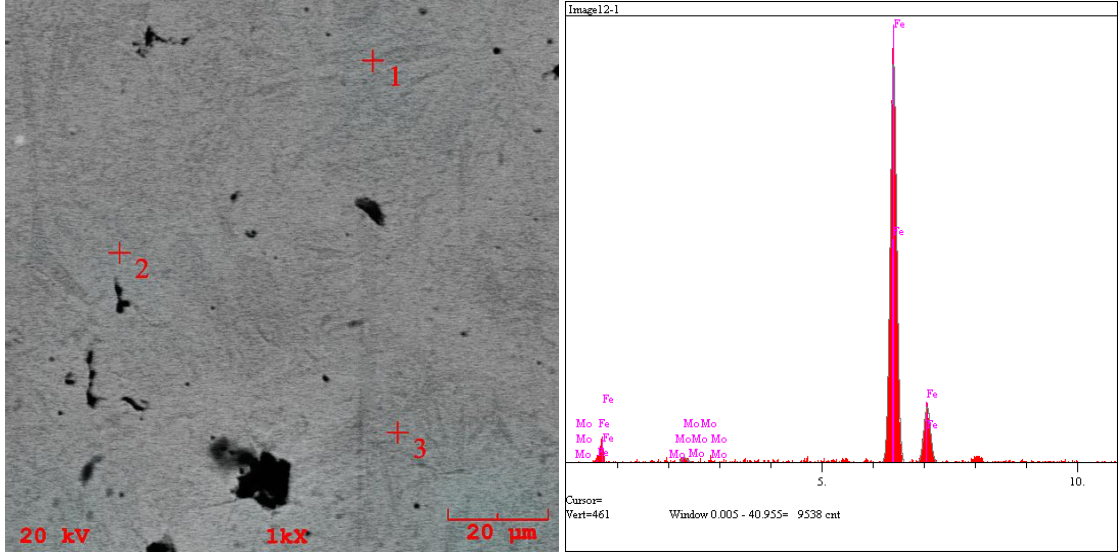
(c)

(d)

Şekil 5. 21 DH - 2°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

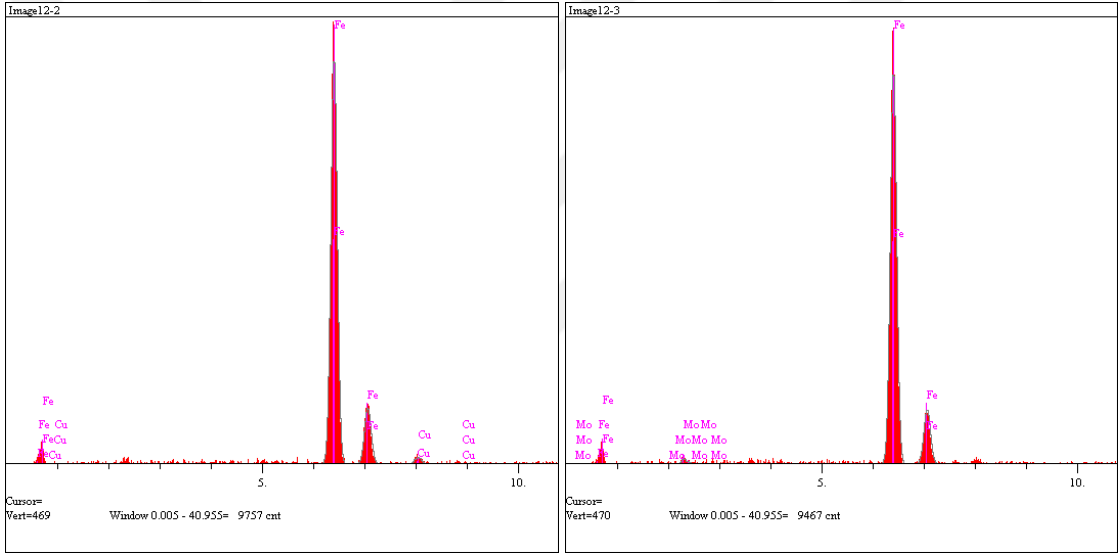
Çizelge 5. 21 DH - 2°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
DH	2°C/s	1	Fe	99,603
			Mo	0,397
		2	Fe	95,622
			Mo	1,217
			Cu	3,161
		3	Fe	95,144
			Mo	1,135
			Cu	3,720



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 5. 22 DH - 3°C/s için EDS analizi, (b) Nokta 1, (c) Nokta 2, (d) Nokta 3

Çizelge 5. 22 DH - 3°C/s numunesinde saptanan elementler ve ağırlıkça yüzdeleri

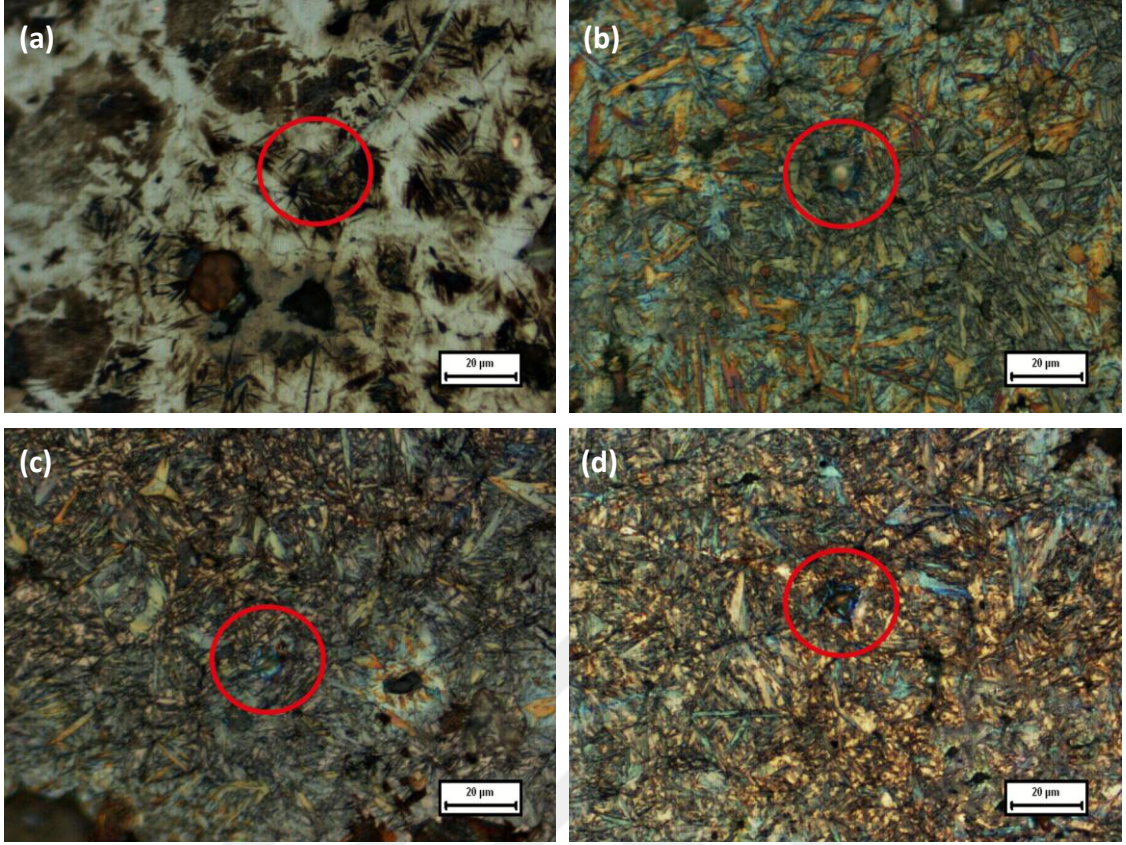
Numune	Soğuma Hızı	Nokta	Element	% Ağırlık
DH	3°C/s	1	Fe	98,821
			Mo	1,179
		2	Fe	96,731
			Cu	3,269
		3	Fe	98,881
			Mo	1,119

EDS analizi sonucunda numuneleri oluşturan toz karışımında bulunması gereken demir, karbon, bakır ve molibden dışında bazı noktalarda çok eser miktarda silisyum, kükürt ve oksijene rastlanmıştır. Bu durum cihazın hassasiyetiyle ilgili bir durum olabileceği gibi, numune üretim aşamaları esnasında dışarıdan sehven karışmış olabileceği şeklinde de yorumlanabilir. Ayrıca üç tip numune için de molibden önalaşımlandırıldığı için hemen her noktada görünürken, sadece DH numunelerinde bakır hemen her noktada görünebilmiştir. AC1 ve AC2 için bazı noktalarda bakır yüzdesinin bazen hiç olmayıp bazen çok olduğu görülmüştür. Bu durumdan, difüzyon alaşımlandırmanın harmanlamadan çok daha iyi homojenlik sağladığı sonucuna varılmıştır.

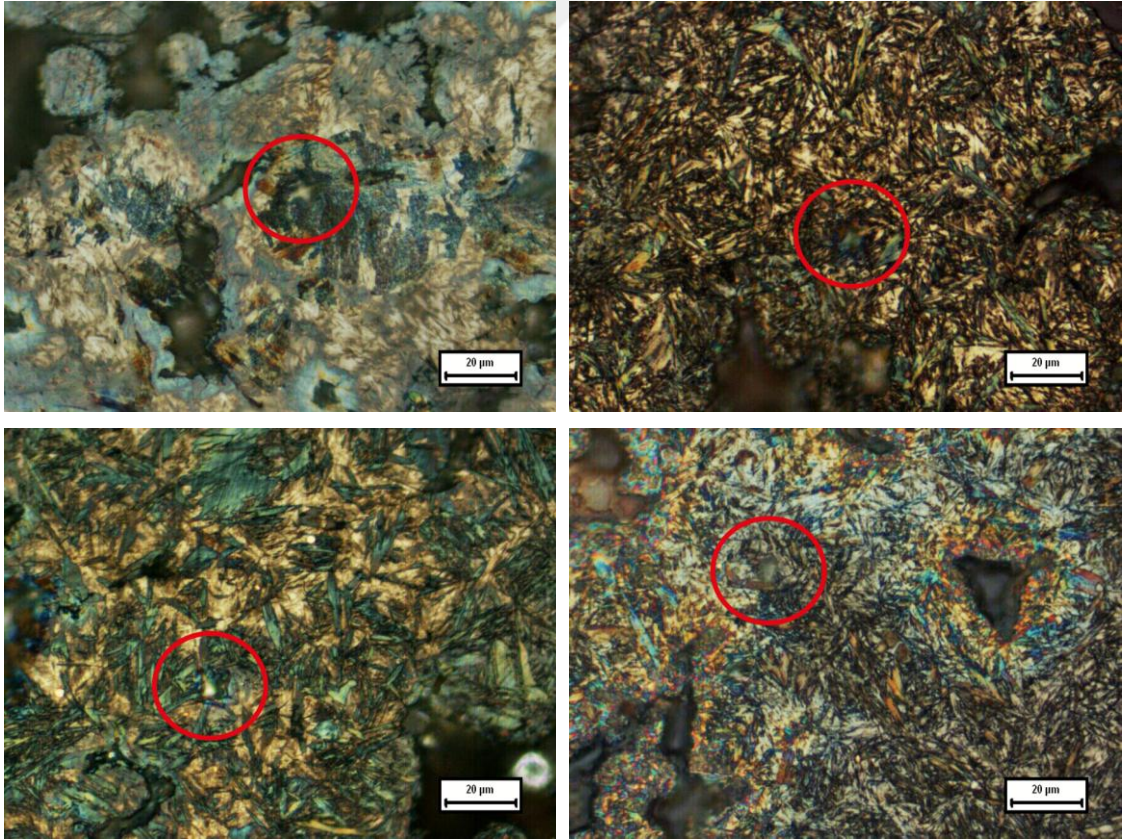
5.6.5 Mikrosertlik Görüntüleri

Bir önceki bölümde belirtildiği üzere her bir numune için numunelerin dağlanmış yüzeylerinden iki iz arası, iz köşegenleri toplamının 3 katından daha az olmayacak şekilde, geniş aralıklarla 4'er iz alınmıştır. Farklı soğuma hızlarında hazırlanan AC1, AC2 ve DH numunelerinin her biri için birer iz görüntüsü sırasıyla Şekil 5.23, Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmiştir. Mikrosertlik testi sonucu elde edilen izler 500 kat büyütmede kırmızı halka ile gösterilmiştir. Artan soğuma hızı ile numunelerin yapısındaki perlit/beynit fazları daha sert olan beynit/martenzit fazına dönüşerek, cihazın batıcı ucunun daha zor penetre etmesine neden olmuştur. Bu durum, mikrosertlik izlerinin giderek belirsiz bir hal almasına yol açmıştır.

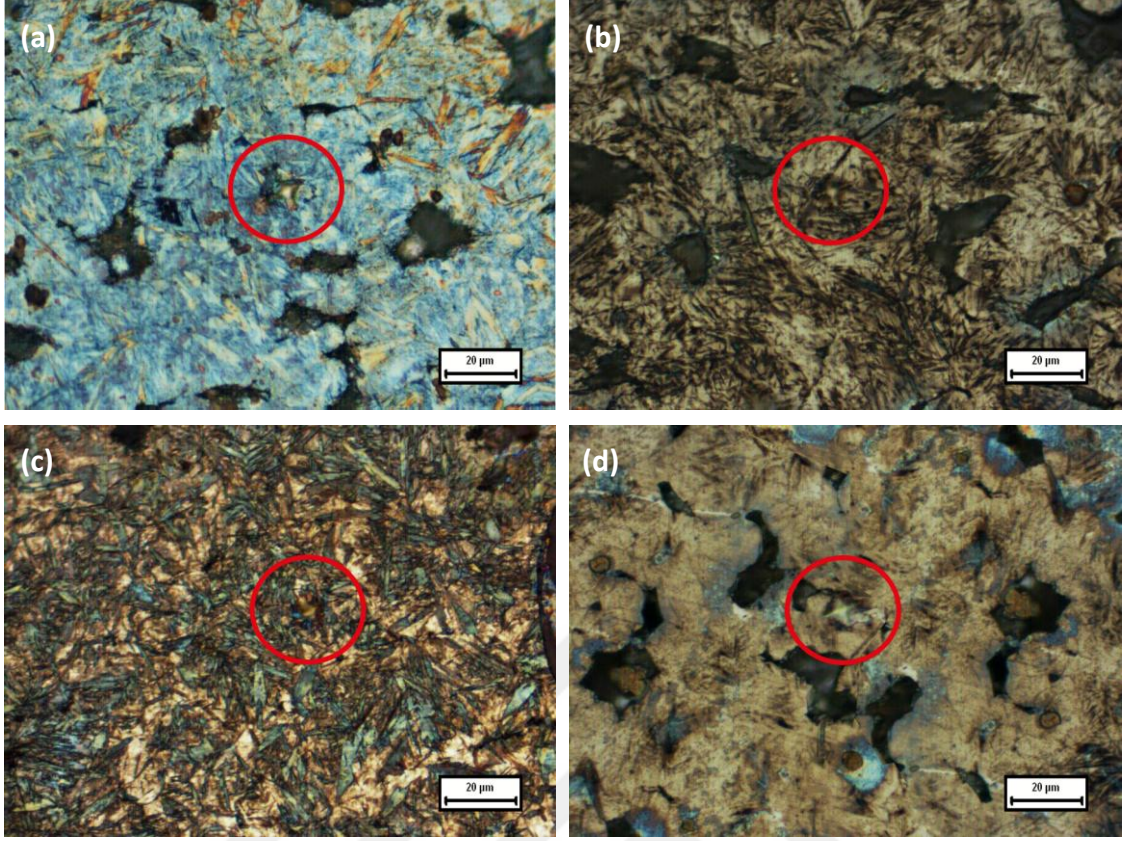
Bölüm 5.7'de verilen mikrosertlik sonuçları ışığı altında, numunelerin hemen hepsi 0,5°C/s için 400 HV0.1 değeri etrafında toplandığı görülmektedir. Buradan da geçerli soğuma hızı için yapıda beynitin hakim olduğu, 330 HV0.1 dolaylarında çıkan değerlerden de yer yer ince perlitin bulunduğu sonucu çıkmaktadır. Numunelerin 1,5°C/s için, beynit ve martenzit sertliğinin ayırım değeri olarak nitelendirilebilen 650 HV0.1 değeri etrafında toplanmış olması, yapılarının yarı yarıya beynit ve martenzit içerdiği şeklinde yorumlanabilmektedir. 2°C/s soğuma hızında da bu oran martenzit lehine arttığı görülmektedir. 3°C/s soğuma hızında ise tüm malzemelerin hemen hemen tamamen martenzitik yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Böylece yapıların içerisinde birden fazla fazın bulunduğu görüşü, mikroyapısal gözlemlerin yanı sıra mikrosertlik testleri ile de doğrulanmıştır.



Şekil 5. 23 AC1 numunesinin iz görüntüleri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s



Şekil 5. 24 AC2 numunesinin iz görüntüleri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s



Şekil 5. 25 DH numunesinin iz görüntüleri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s

5.7 Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik testleri, her bir numunenin dağlanmış yüzeyinden, iki iz arası mesafe iz köşegenleri toplamının üç katından daha fazla olması gerektiği prensibine bağlı olacak şekilde 4'er ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik hesaplamasında 5.2 no'lu formül kullanılmıştır. AC1, AC2 ve DH numunelerine ait HV0.1 mikrosertlik testi sonuçları sırasıyla Çizelge 5.23, Çizelge 5.24 ve Çizelge 5.25'te verilmiştir.

$$HV = \frac{1,8544.F}{d^2} \quad \begin{array}{l} F = \text{Uygulanan kuvvet} \\ d = \text{İz köşegenleri ortalaması} \end{array} \quad (5.2)$$

Distaloy DH numuneleri düşük soğuma hızlarında sertlik açısından diğer tozlardan biraz daha yüksek sertliğe sahip olsa da, yüksek soğuma hızlarında en düşük sertliğe sahip numuneler olmuştur. AC1 ve AC2 numunelerinin kıyasında, daha fazla bakır içeren AC2 numuneleri her soğuma hızında AC1 numunelerinden daha sert çıkmıştır. Soğuma hızının 0,5°C/s'den 3°C/s'ye çıkması, AC1 numuneleri için %143,72, AC2 numuneleri için %150,88 ve DH numuneleri için %110,01'lik sertlik artışına neden olmuştur.

Çizelge 5. 23 AC1 numunelerinin soğuma hızlarına göre mikrosertlik değerleri

Malzeme	Soğuma Hızı	F (gr)	d1 (μm)	d2 (μm)	HV0.1	Ortalama HV0.1
AC1	0,5°C/s	100	26,92	24,94	305,75	384,23
		100	20,37	19,19	434,99	
		100	24,54	22,68	332,56	
		100	19,50	20,50	463,60	
	1,5°C/s	100	16,65	15,47	718,97	641,11
		100	16,63	15,91	700,26	
		100	17,78	16,44	644,36	
		100	19,86	18,62	500,84	
	2°C/s	100	14,50	15,53	822,53	754,37
		100	14,72	15,56	809,01	
		100	15,60	14,22	833,12	
		100	21,47	15,16	552,83	
	3°C/s	100	14,50	13,84	923,56	938,44
		100	14,34	13,19	978,70	
		100	14,31	14,58	888,24	
		100	14,16	13,59	963,25	

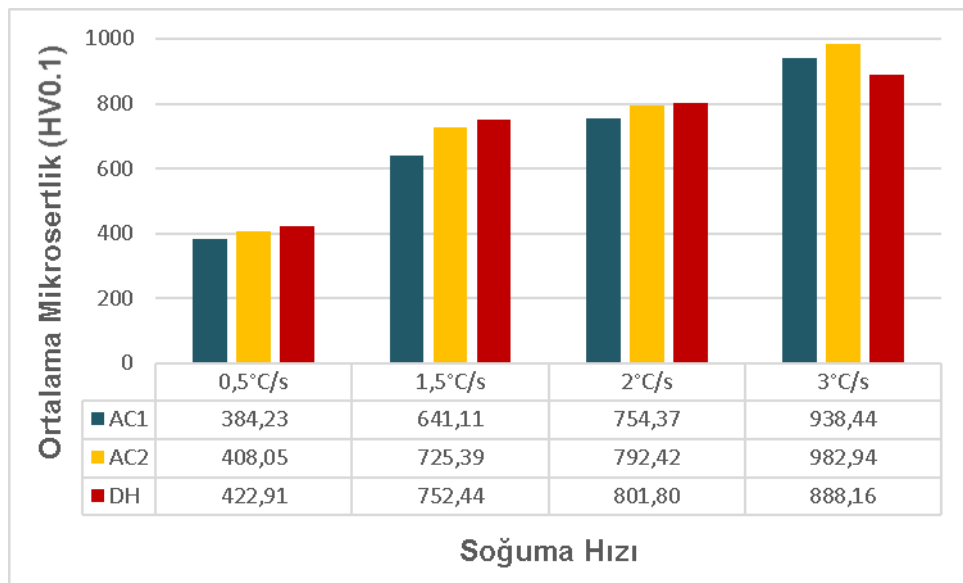
Çizelge 5. 24 AC2 numunelerinin soğuma hızlarına göre mikrosertlik değerleri

Malzeme	Soğuma Hızı	F (gr)	d1 (μm)	d2 (μm)	HV0.1	Ortalama HV0.1
AC2	0,5°C/s	100	24,5	26,21	288,35	408,05
		100	21,09	19,84	442,77	
		100	21,84	20,56	412,34	
		100	20,19	18,76	488,74	
	1,5°C/s	100	16,88	17,62	533,41	725,39
		100	16,19	15,13	756,17	
		100	14,58	15,65	811,46	
		100	15,41	15,03	800,52	
	2°C/s	100	19,41	18,25	623,11	792,42
		100	14,25	15,38	844,89	
		100	15,11	14,14	866,94	
		100	15,28	14,53	834,72	
	3°C/s	100	12,97	13,94	1024,32	982,94
		100	14,00	14,09	940,07	
		100	14,04	13,66	966,24	
		100	14,00	13,22	1001,12	

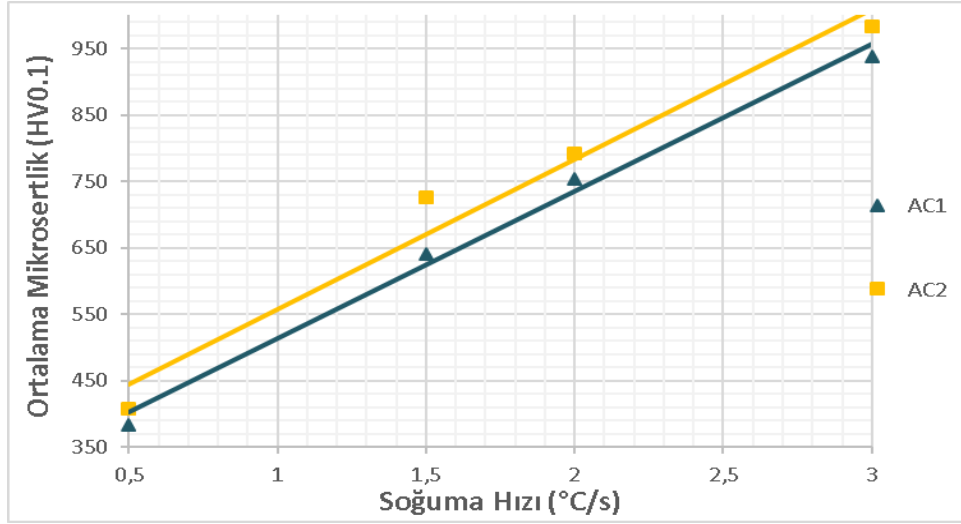
Çizelge 5. 25 DH numunelerinin soğuma hızlarına göre mikrosertlik değerleri

Malzeme	Soğuma Hızı	F (gr)	d1 (μm)	d2 (μm)	HV0.1	Ortalama HV0.1
DH	0,5°C/s	100	24,34	22,13	343,42	422,91
		100	20,85	19,29	460,11	
		100	19,82	20,58	454,27	
		100	21,37	19,97	433,82	
	1,5°C/s	100	15,91	15,97	729,84	752,44
		100	15,31	14,13	855,83	
		100	17,30	18,88	566,52	
		100	15,97	13,44	857,58	
	2°C/s	100	14,44	13,56	946,32	801,80
		100	14,66	15,79	829,15	
		100	15,36	14,98	805,74	
		100	16,56	17,84	626,00	
	3°C/s	100	14,03	14,38	919,01	888,16
		100	14,47	14,88	861,09	
		100	13,87	14,46	923,62	
		100	14,50	15,06	848,90	

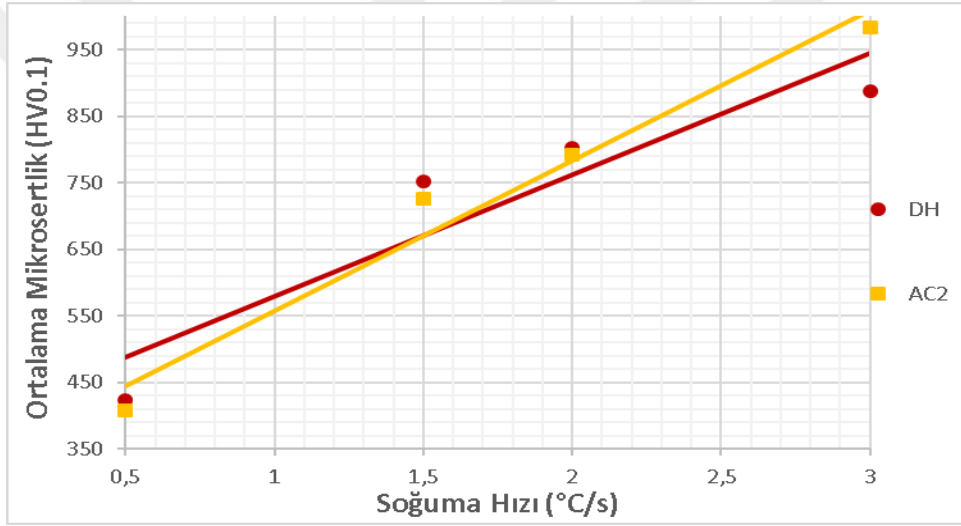
DeneySEL çalışmada kullanılan malzemelerin çeşitli soğuma hızlarındaki mikrosertlik değerlerinin kıyaslaması Şekil 5.26'da verilmiştir. Bakır miktarının ve üretim metodunun mikrosertlik üzerindeki etkileri ise sırasıyla şekil 5.27 ve 5.28'de gösterildiği gibidir. Bakır oranının fazla olmasının her soğuma hızı için sertlik açısından daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca soğuma hızının mikrosertliklerdeki standart sapmaya olan etkisi ise Şekil 5.29'da gösterilmiştir.



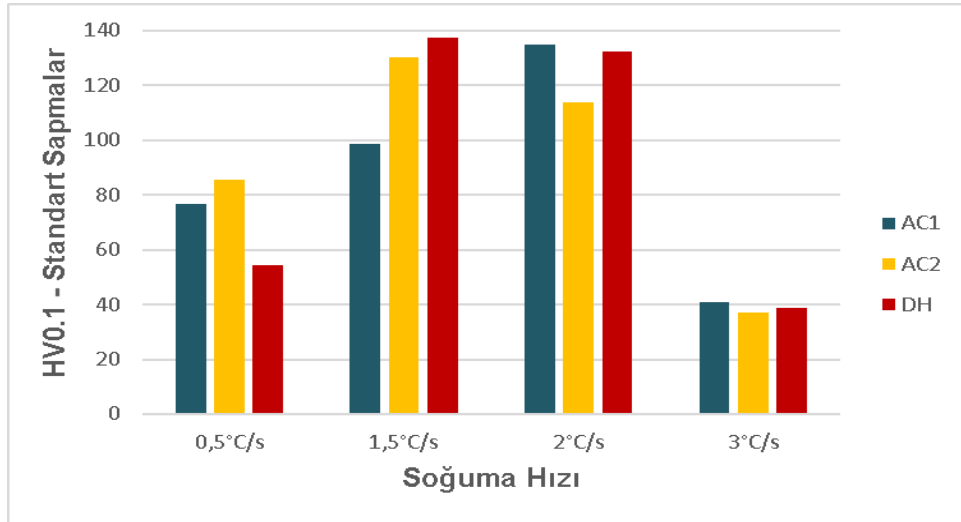
Şekil 5. 26 Soğuma hızına göre malzemelerin ortalama mikrosertlik değerleri



Şekil 5. 27 Bakır miktarının mikrosertlik üzerindeki etkisi



Şekil 5. 28 Üretim metodunun mikrosertlik üzerindeki etkisi



Şekil 5. 29 Soğuma hızının standart sapma üzerindeki etkisi

Çizelgelerdeki veriler ile standart sapma grafiği birlikte yorumlandığında 0,5°C/s, 1,5°C/s ve 2°C/s soğuma hızlarındaki farktan, mikroyapının birden fazla fazı birlikte bulundurduğu sonucu çıkartılmaktadır.

5.8 Çapraz Kırılma Dayanımı Ölçümleri

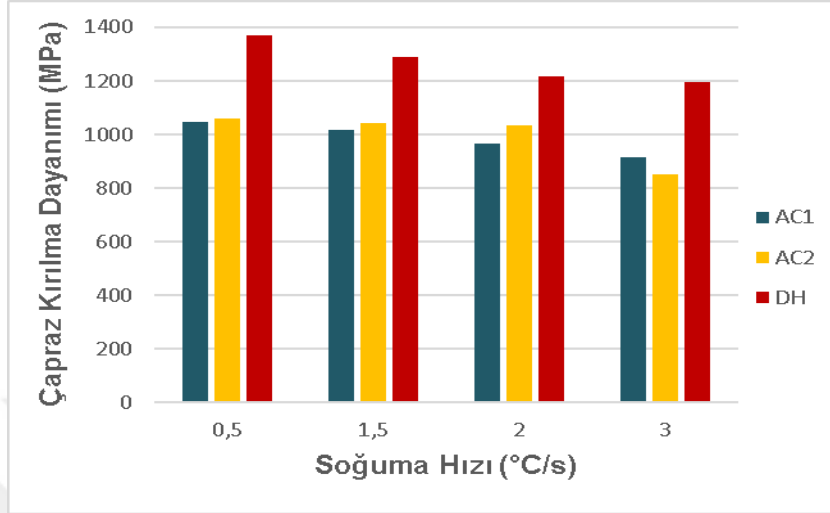
Çapraz kırılma dayanımı testinin detaylı sonuçları Çizelge 5.26’da verilmiş olup, numunelerin çapraz kırılma dayanımlarının hesaplanmasında kullanılan formül, 5.3 no’lu formülde gösterilmiştir. Çizelgede “b” ve “h” numunenin genişlik ve kalınlığını, “L” mesnetler arası mesafeyi, “F” uygulanan kuvveti, “Ç.K.D.” ise çapraz kırılma dayanımını belirtmektedir. Deneyde tüm toz bileşimleri için artan soğuma hızının, dolayısıyla artan sertliğin çapraz kırılma dayanımlarında düşüşe neden olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni Bölüm 5.9’un giriş paragrafında açıklanmıştır.

Çizelge 5. 26 Test numunelerinin ortalama boyutları ile soğuma hızlarına göre uygulanan kuvvet ve çapraz kırılma dayanım değerleri

Malzeme Kodu	Soğuma Hızı (°C/s)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	F (N)	Ç.K.D. (MPa)
AC1	0,5	11,93	6,03	25	12110,38	1046,92
	1,5	12,04	6,03	25	11860,81	1015,98
	2	11,96	5,99	25	11047,99	965,45
	3	11,98	6,02	25	10597,63	915,36
AC2	0,5	12,00	5,99	25	12184,50	1061,22
	1,5	11,97	5,98	25	11909,38	1043,34
	2	12,02	6,02	25	12006,72	1033,61
	3	12,02	6,02	25	9897,52	852,04
DH	0,5	11,97	6,04	25	15954,39	1370,07
	1,5	11,98	6,09	25	15267,89	1288,60
	2	11,98	6,02	25	11577,84	1218,77
	3	12,01	6,01	25	13838,28	1196,25

$$\text{Ç.K.D.} = \frac{3.F.L}{2.b.h^2} \quad (5.3)$$

Hesaplanan çapraz kırılma dayanımı değerlerinin numune ve soğuma hızı bazında kıyaslaması Şekil 5.30'da grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 5. 30 AC1, AC2 ve DH numunelerinin soğuma hızlarına göre çapraz kırılma dayanımları

Soğuma hızının 0,5°C/s'den 3°C/s'ye çıkartılması çapraz kırılma dayanımlarında, AC1 numuneleri için %12,56, AC2 numuneleri için %19,71 ve DH numuneleri için %12,68'lik düşüşe neden olmuştur.

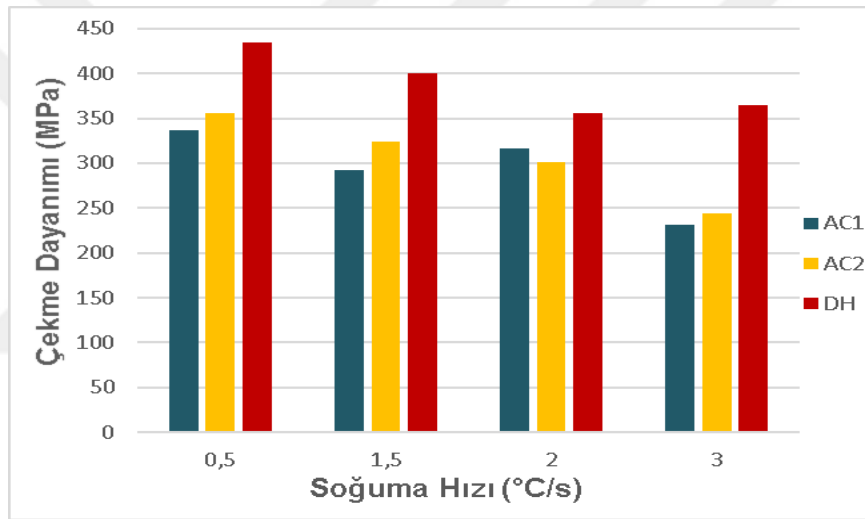
5.9 Çekme Dayanımı Ölçümleri

Uygulanan kuvvet, malzeme içerisindeki boşluklarda gerilme meydana getirerek çatlak başlangıcına, sonrasında ise çatlak ilerlemesi ve kırılma olayının gerçekleşmesine neden olur. Soğuma hızının artmasıyla yapının martenzit formuna geçiş yapması, dislokasyon kabiliyetinin kısıtlanmasıyla sonuçlanır. Dolayısıyla küresel formdan uzak, büyük ve/veya çok sayıda gözeneğin bulunması, sınırlı dislokasyon kayması yapabilen sert malzemelerde çatlak ilerlemesinin hızlı gerçekleşmesine sebep olarak bu malzemelerin gevrek kırılmasına, çekme ve çapraz kırılma dayanım değerlerinin düşmesine yol açar.

Bir önceki bölümde belirtildiği üzere standartlar çerçevesinde hazırlanan çekme numunelerinin 5 mm/dk hızla vertikal çekme kuvvetine tabi tutulmasıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler esnasında birkaç numunede erken safhada sıyrılmalar meydana gelmiş olup, bu hadiselerle ait veriler ortalamalara dahil edilmemiştir. Çekme

testi sonucunda bütün malzemelerde artan soğuma hızıyla dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenirken, difüzyon yöntemi ile üretilmiş olması sayesinde daha az, küçük ve küresel gözenek bulunduran DH numunelerinin her aşamada daha fazla dayanıma sahip ve 0,5°C/s – 3°C/s arasında en az değişkenlik gösteren, diğerlerine nazaran daha stabil bir malzeme olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin çekme dayanımlarının hesaplanmasında 5.4 no'lu formül kullanılmıştır. Çekme testi sonucunda elde edilen dayanım değerlerinin numune ve soğuma hızı bazında kıyaslaması Şekil 5.31'de gösterildiği gibidir.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad \begin{array}{l} P_{\max} = \text{Kopmaya neden olan maksimum kuvvet} \\ A_0 = \text{Başlangıçtaki çekme yönüne dik numune kesit alanı} \end{array} \quad (5.4)$$



Şekil 5. 31 AC1, AC2 ve DH numunelerinin soğuma hızlarına göre çekme dayanımları

Grafikte de görüldüğü üzere AC1 için 2°C/s noktasında ve DH için 3°C/s noktasında teorik olarak olması gerekenin aksine düşüş değil artış olmuştur. Ancak bu iki değer, önceki soğuma hızlarındaki değerlerden çok az bir miktar fazla olduğundan göz ardı edilebilir bir sapma olarak nitelendirilmiştir.

Soğuma hızının 0,5°C/s'den 3°C/s'ye çıkartılması çekme dayanımlarında, AC1 numuneleri için %31,30, AC2 numuneleri için %31,24 ve DH numuneleri için %16,11'lik düşüşe neden olmuştur.

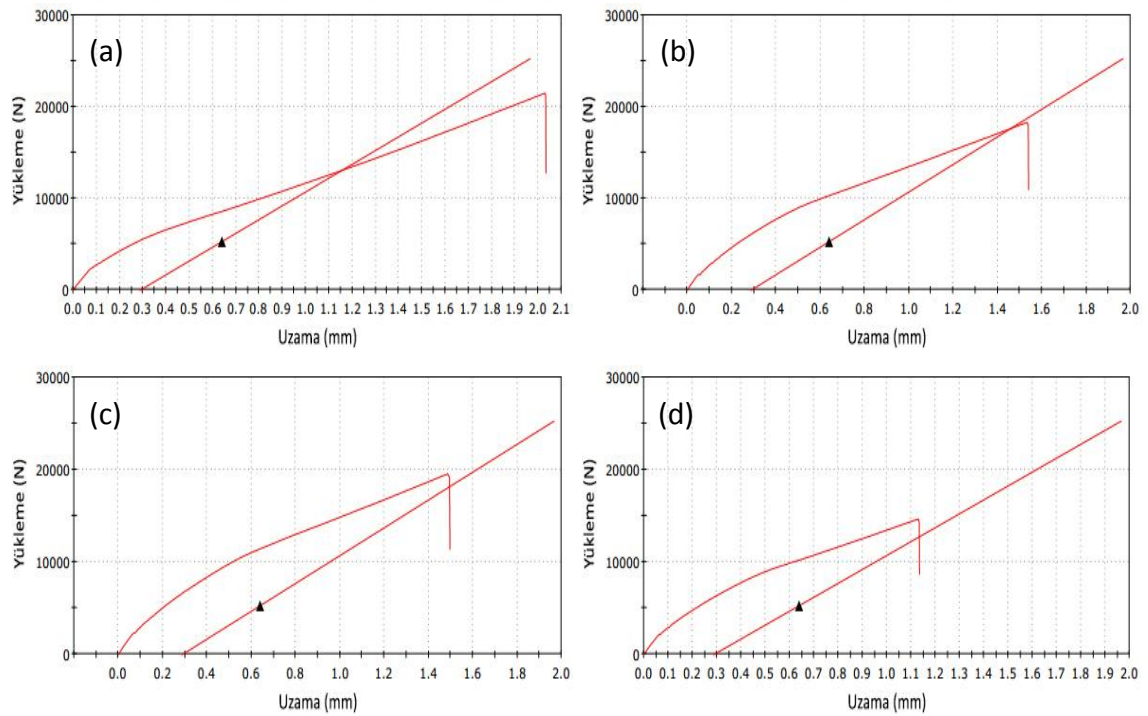
Başlık içerisinde bulunan diğer çizelge ve şekillerde ise sırasıyla AC1, AC2 ve DH numunelerine ait elastisite modülü, maksimumdaki ve akma sınırındaki gerilim, gerinim, yük ve uzama değerleri ile Yük-Uzama eğrileri verilmiştir.

Çizelge 5. 27 AC1 numunelerinin farklı soğuma hızlarına göre çekme dayanımı verileri

Soğuma Hızı (°C/s)	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Çekme Gerinimi (mm/mm)	Maksimum Çekme Uzaması (mm)	Maksimum Yük (kN)
0,5	337,08554	0,05199	2,03193	21,470
1,5	291,83456	0,03954	1,53862	18,287
2	316,14120	0,03848	1,49508	19,532
3	231,57256	0,02894	1,13466	14,650

Çizelge 5. 28 AC1 için soğuma hızlarına göre akma dayanımı verileri ve E modülü

Soğuma Hızı (°C/s)	Akma Sınırında Çekme Gerilmesi (MPa)	Akma Sınırında Çekme Gerinimi (mm/mm)	Elastisite Modülü (MPa)
0,5	99,69941	0,00959	9325,61599
1,5	119,5340	0,00982	10729,36039
2	123,0362	0,00900	11276,72774
3	98,54838	0,00741	10494,16653



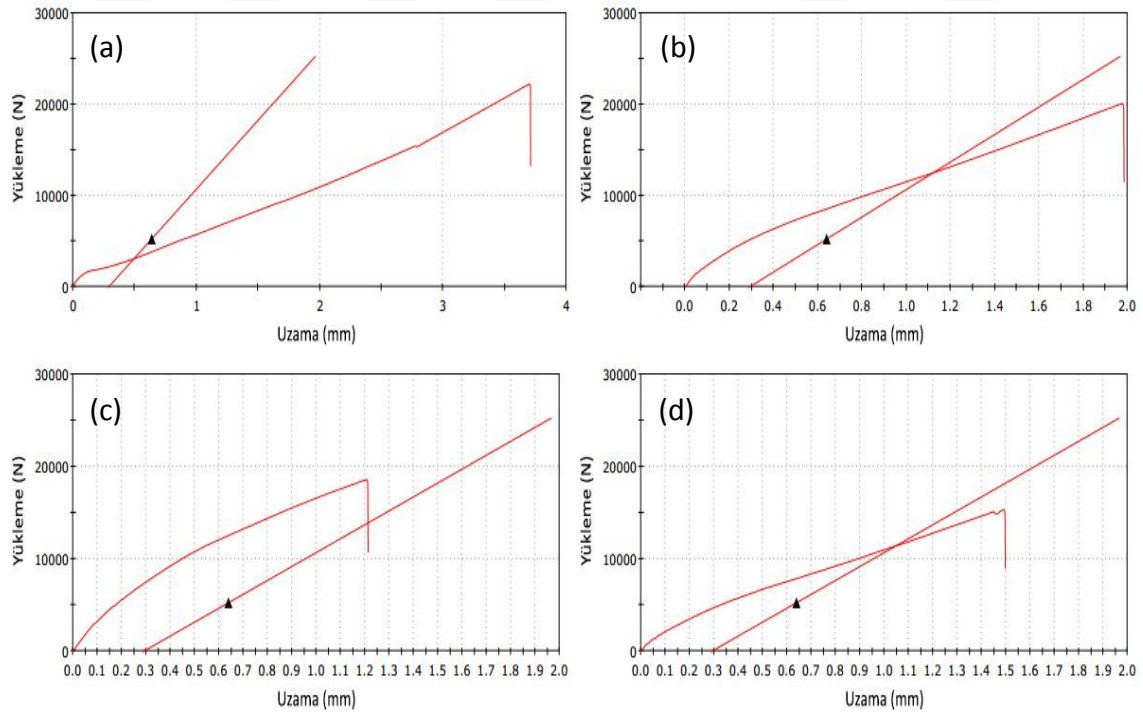
Şekil 5. 32 AC1 numunelerinin soğuma hızlarına göre Yük-Uzama eğrileri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s

Çizelge 5. 29 AC2 numunelerinin farklı soğuma hızlarına göre çekme dayanımı verileri

Soğuma Hızı (°C/s)	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Çekme Gerinimi (mm/mm)	Maksimum Çekme Uzaması (mm)	Maksimum Yük (kN)
0,5	355,77560	0,09531	3,70766	22,240
1,5	324,39529	0,05061	1,98220	20,112
2	300,55014	0,03101	1,21264	18,615
3	244,61792	0,03839	1,49646	15,329

Çizelge 5. 30 AC2 için soğuma hızlarına göre akma dayanımı verileri ve E modülü

Soğuma Hızı (°C/s)	Akma Sınırında Çekme Gerilmesi (MPa)	Akma Sınırında Çekme Gerinimi (mm/mm)	Elastisite Modülü (MPa)
0,5	347,10522	0,09527	6761,99280
1,5	105,04875	0,01050	8756,61741
2	126,76133	0,00815	12660,83853
3	89,74038	0,00979	7476,53485



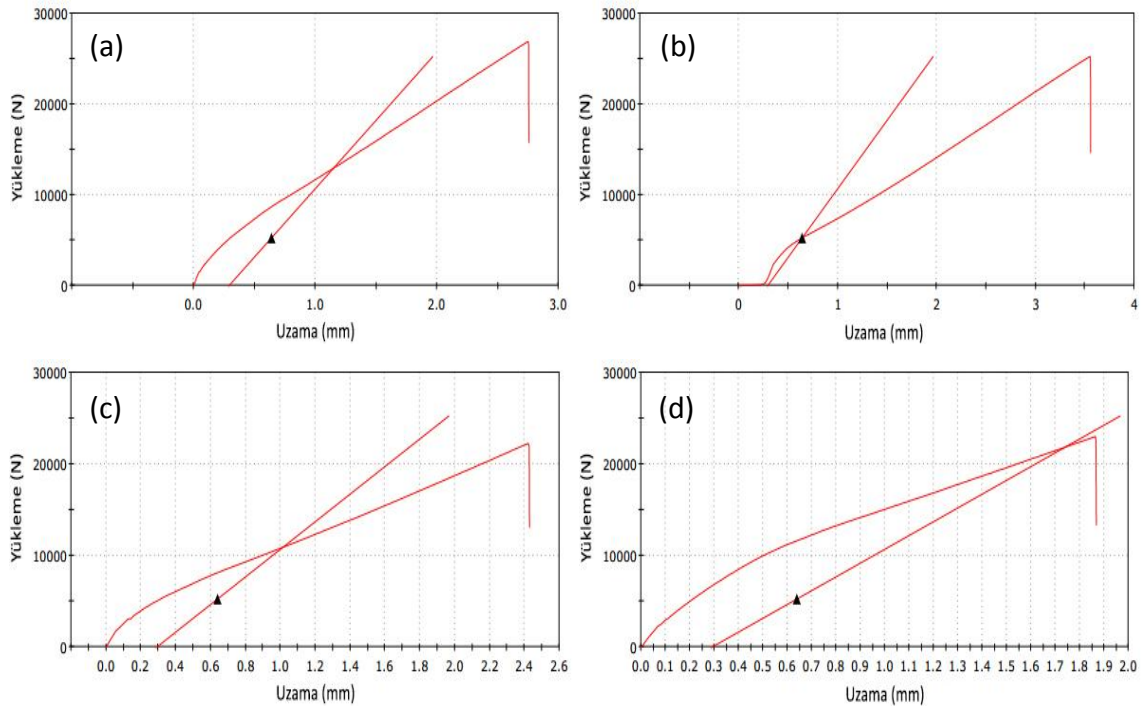
Şekil 5. 33 AC2 numunelerinin soğuma hızlarına göre Yük-Uzama eğrileri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s

Çizelge 5. 31 DH numunelerinin farklı soğuma hızlarına göre çekme dayanımı verileri

Soğuma Hızı (°C/s)	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Çekme Gerinimi (mm/mm)	Maksimum Çekme Uzaması (mm)	Maksimum Yük (kN)
0,5	434,1445	0,07037	2,75217	26,886
1,5	400,25027	0,09099	3,55510	25,231
2	355,12537	0,06221	2,42547	22,251
3	364,16998	0,04767	1,86640	22,992

Çizelge 5. 32 DH için soğuma hızlarına göre akma dayanımı verileri ve E modülü

Soğuma Hızı (°C/s)	Akma Sınırında Çekme Gerilmesi (MPa)	Akma Sınırında Çekme Gerinimi (mm/mm)	Elastisite Modülü (MPa)
0,5	113,86889	0,01199	7737,13667
1,5	84,06339	0,01637	10342,51948
2	95,79892	0,00992	8267,27123
3	140,8595	0,01082	11470,91713



Şekil 5. 34 DH numunelerinin soğuma hızlarına göre Yük-Uzama eğrileri. (a) 0,5°C/s, (b) 1,5°C/s, (c) 2°C/s, (d) 3°C/s

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sinterleme ile sinter sertleştirme prosesleri kıyaslandığında, ikincil işlemleri büyük ölçüde elimine eden ve tek aşamalı bir işlem olan sinter sertleştirmenin hem zaman ve ekonomiklik hem de mekanik özellikler açısından sinterlemeden daha üstün bir üretim yöntemi olduğu görülmüştür.

Üç numune tipi de her soğuma hızında göz ardı edilebilir oranda boyutsal değişim gösterse de bütün soğuma hızları için en yüksek boyutsal hassasiyet gösteren malzeme Distaloy DH olmuştur. Dolayısıyla difüzyon ile alaşımlama yönteminin harmanlamaya nazaran daha iyi sonuç verdiği; Astaloy Mo-Cu karışımı olan AC1 ve AC2 numunelerinden de %2 bakırın %1 bakıra oranla daha iyi boyut hassasiyeti sağladığı söylenebilmektedir.

Artan soğuma hızıyla tüm numunelerde gözeneklilik oranı azalırken, Distaloy DH numunelerinin her bir soğuma hızında diğerlerinden daha az gözenekliliğe ve küresel forma daha yakın küçük çaplı gözeneklere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca AC1 ve AC2 numunelerinin kıyasından, bakırın miktarının artmasıyla gözeneklilik oranının düştüğü saptanmıştır.

Dağlanmış yüzey incelemelerinden AC1 ve AC2 numunelerine ait mikroyapıların birbirine çok benzediği ve genel olarak numunelerin farklı oranlarda olmak kaydıyla 0,5°C/s soğuma hızında beynit ve ince perlit, 1,5°C/s ve 2°C/s soğuma hızında beynit ve martenzit, 3°C/s soğuma hızında ise tamamen yakın martenzit yapı içerdiği sonucu çıkartılmıştır.

EDS analizi sonuçlarından difüzyon alaşımlandırmanın harmanlamadan çok daha iyi homojenlik sağladığı sonucuna varılmıştır.

Üç numune tipinin de aynı soğuma hızında farklı oranlarda olsa da aynı fazlardan oluştuğu görülmüştür. Distaloy DH numuneleri düşük soğuma hızlarında sertlik açısından diğer tozlardan biraz daha yüksek sertliğe sahip olsa da yüksek soğuma hızlarında en düşük sertliğe sahip numuneler olmuştur. Daha fazla bakır içeren AC2 numuneleri her soğuma hızında AC1 numunelerinden daha sert çıkmıştır.

Tüm numuneler arasında DH numuneleri her soğuma hızı için diğer tip numunelerden daha yüksek dayanım değerleri sunmuştur. Ayrıca, üç tip numune içinde farklı soğuma hızlarında dayanım değerlerinde en az değişim görülenin, dolayısıyla en stabil olanın DH numunelerinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak elde edilen veriler ışığında sinter sertleştirme sürecinin sinterlemeden, difüzyon alaşımlandırma yönteminin harmanlama yönteminden, dolayısıyla da Distaloy DH numunelerinin diğer numunelerden daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Daha önceden belirtilmiş olan avantajları ve deneysel çalışmalar nihayetinde elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmanın esasını oluşturan sinter sertleştirme prosesi, kullanılması önerilen bir proses olarak nitelendirilmiştir. Ayrıca Distaloy DH tozunun tercih edilmesi, bu çalışmada kıyaslandığı diğer tozların tercih edilmesinden daha doğru olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] ASM International, (1998). ASM Handbook Powder Metal Technologies and Applications, 7, ABD.
- [2] Narasimhan, K.S., (2001). "Sintering of Powder Mixtures and the Growth of Ferrous Powder Metallurgy", Materials Chemistry and Physics, 67: 56-65.
- [3] Singh, R., (2006). Introduction to Basic Manufacturing Process and Workshop Technology, New Age International.
- [4] Avşar, E., (2009). Demir Esaslı Toz Metal Parçaların Sinterleme ile Birleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [5] German, R.M., (1994). Powder Metallurgy Science, Second Edition, Metal Powder Industries Federation, New Jersey.
- [6] Suryanarayana, C., (2008). "Recent Developments in Mechanical Alloying", Reviews on Advanced Materials Science, 18: 203-211.
- [7] Upadhyaya, G.S., (1997). "Powder Metallurgy Technology", Cambridge Int Science Publishing.
- [8] Karaman, Y., (2011). Toz Metalürjisi Yöntemi ile MgO Takviyeli Al Esaslı Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale.
- [9] Vara Prasada Rao, K., (2002). "Manufacturing Science & Technology: Manufacturing Processes and Machine Tools".
- [10] Dinçer, M., (2014). Sinter Hardening Studies Of Astaloy 85 Mo Powder With Varying Copper Contents, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, Department of Metallurgical and Material Engineering, Ankara.
- [11] Warzel, R.T. ve Neilan, A., (2013). "Effect of Composition and Processing on the Precision of Sinter Hardening Powder Metal Steels", Advances In Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1:05-62.
- [12] Marucci, M.L., Fillari, G., King, P. ve Narasimhan, K.S., (2004). "A Review of Current Sinter Hardening Technology", PM2004 World Congress, Vienna.
- [13] James, W.B., (1998). "What is Sinter-Hardening?", International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Las Vegas, Nevada.

- [14] Murphy, T.F. ve Baran, M.C., (2004). "An Investigation into the Effect of Copper and Graphite Additions to Sinter-Hardening Steels", PM²TEC 2004 International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials.
- [15] German, R.M., (1996). "Sintering Theory and Practice".
- [16] Groza, J.R., Shackelford, J.F., Lavernia, E. J. ve Powers, M.T., (2007). "Materials Processing Handbook", Second Edition, CRC Press, Florida.
- [17] Uzun, E. ve Boz, M., (2011). "Elektroliz Yöntemi İle Toz Üretiminde Anot Yüzey Alanının Toz Boyutu ve Şekline Etkisi", Sixth International Advanced Technologies Symposium 2011, Elazığ.
- [18] Özgün, Ö., (2007). Toz Metalurjisi ile Üretilen Alaşımlı Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Metal Eğitimi, Sakarya.
- [19] German, M.R., (2005). "Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing: The Processes, Materials, Products, Properties and Applications".
- [20] Zeren, M., (2012). Sinterleme Ders Notları, Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.
- [21] Kang, S-J.L., (2005). "Sintering, Densification, Grain Growth & Microstructure", 1.Baskı, Elsevier Publishing, England.
- [22] Bakkaloğlu, A., (2013). Toz Metalurjisi Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- [23] Hatami, S., Malakizadi, A., Nyborg, L. ve Wallin, D., (2010). "Critical Aspects of Sinter-Hardening of Prealloyed Cr-Mo Steel", Material Processing Technology, 210 (9): 1180-1189.
- [24] Öge, A.M., (2013). Demir Esaslı Astaloy Mo ve Distaloy DH Alaşımlarında Sinterleme ile Sertleştirme, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [25] Çavdar, U., (2009). Demir Esaslı Toz Metal Parçaların İndüksiyonla Sinterlenmesinde Parametrelerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- [26] Engström, U., McLelland, J. ve Maroli, B., (2002). "Effect of Sinter Hardening on the Properties of High Temperature Sintered PM Materials", PM²TEC 2002 International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials.
- [27] Nyberg, I., Schmidt, M., Thorne, P., Gabler, J., Feldbauer, S. ve Jesberger, T.J., (2003). "Effect of Sintering Time and Cooling Rate on Sinter Hardenable Materials", PM²TEC 2003 International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Las Vegas, Nevada.
- [28] Thümmeler, F. ve Oberacker, R., (1993). "Introduction to Powder Metallurgy", The Institute Of Materials Publishing.
- [29] Höganäs, (2013). Handbook for Sintered Components: Sintered Iron Based Materials, 45-91.

- [30] Kayış, V., (2005). Kısmi ve Ön Alaşımli Demir Tozları İçerisine Katılan B ve FeB İlavelerinin Sinterleme ve Sinterleme Davranışlarına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] Šalak, A., Selecká, M. ve Danninger, H., (2005). "Machinability of Powder Metallurgy Steels", First Edition, Cambridge International Science Publishing, Cambridge.
- [32] Totten, G.E, (2006). "Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies, Second Edition", CRC Press, Florida.
- [33] Maroli, B., Berg, S., Larsson, M. ve Hauer, I., (2001). "Performance Of Sinter-Hardened P/M Steels", EUROMAT 2001, Rimini, Italy.
- [34] Warga, D. ve Lindberg, C., (1993). "Efficient Sintering and Hardening in the Conveyor Belt Sintering Furnace", Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress, Part-2, 983-986.
- [35] Kurt, A.O., (2014). Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya.
- [36] Holm, T., Malas, A. ve Wiberg, S., (2011). "Furnace Atmospheres 8: Sintering of Steels", Linde Group, Munich.
- [37] Ünlü, B.S., Kurgan, N. ve Yılmaz, S.S., (2009). "Toz Metal Çeliklerin Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri", Mühendis ve Makine Dergisi, 50: 588.
- [38] Mackenzie, D., (2017). "Hardenability", Gear Solutions, February 2017, 20-21.
- [39] Lindsley, B. ve Rutz, H., (2008), "Effect of Molybdenum Content in PM Steels", Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials; Derleyen: Lawcock, R., Lawley, A. ve McGeehan, P., (2008). Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey.
- [40] Blais, C., Serafini, Jr. R. E. ve L'Esperance G., (2005). "Effect of Hydrogen Concentration in Cooling Zone on Sinter Hardening", International Journal of Powder Metallurgy, 41(4): 33-41.
- [41] American Society for Metals, (1977). "Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams", Ohio.
- [42] Baran, M.C. ve Winterton, P.J., (2000). "Application of Sinter-Hardenable Materials for Advanced Automotive Applications Such as Gears, Cams, and Sprockets", Society of Automotive Engineers, Detroit, Michigan.
- [43] Wong-Ángel, W.D., Téllez-Jurado, L., Chávez-Alcalá, J.F., Chavira-Martínez, E. ve Verduzco-Cedeño, V.F., (2014). "Effect of Copper on the Mechanical Properties of Alloys Formed By Powder Metallurgy", Journal of Materials & Design, 58: 12-18.
- [44] Karamchedu, S., (2010). Effect of Diffusion Bonded Cu and Ni on Sinter Hardening Response of Mo Prealloyed PM Steel, Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University of Technology, Department of Materials and Manufacturing Technology, Sweden.

- [45] Rutz, H.G., Graham, A.H. ve Davala, A. B., (1997). "Sinter-Hardening P/M Steels", PM²TEC'97 International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Chicago.
- [46] Habberger, T.E., Cornelio, T.J., Baran, M.C. ve Winterton, M.J., (2000). PM²TEC, New York.
- [47] ISO 3923-1:2008, (2008). Determination Of The Apparent Density Of Metallic Powders - Part:1 Funnel Method.
- [48] ISO 4490:2014, (2014). Specifies A Method For Determining The Flow Rate Of Metallic Powders, Including Powders For Hard Metals, By Means Of A Calibrated Funnel (Hall Flowmeter).
- [49] BS EN ISO 2740:2009, (2009). Sintered metal materials, excluding hardmetals. Tensile test pieces.
- [50] BS EN ISO 3325, (1999). Sintered Metal Materials, Excluding Hardmetals - Determination Of Transverse Rupture Strength.
- [51] Nabeel, M., (2012). Diffusion of Elemental Additives during Sintering, Yüksek Lisans Tezi, Royal Institute of Technology, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Stokholm, İsveç.
- [52] Dautzenberg, N. ve Dorweiler, H.J., (1985). "Dimensional Behavior of Cu-C Sintered Steel", Powder Metallurgy International, 17 (7): 279.
- [53] Berner, D., Exner, H.E. ve Petzow, G., (1973). "Swelling of Iron-Copper Mixtures During Sintering and Infiltration", Modern Developments in Powder Metallurgy, 6: 237.
- [54] ASTM A255-10, (2014). Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet GÜNEN
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.04.1992, Çanakkale
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : gunen.mehmet@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Sayısal	Çanakkale Milli Piyango Anadolu Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013	İÇDAŞ Çelik Enerji Tersane ve Ulaşım Sanayi A.Ş.	Stajyer Mühendis

YAYINLARI

Uluslararası Bildiri

1. Günen, M. ve Bakkaloğlu, A., (2017). “Investigation Of The Effects Of Sinter Hardening Process On Microstructures And Mechanical Properties Of Prealloyed Metal Powders”, International Conference On Energy And Thermal Engineering 2017, Proceedings Book, 660-665.

