

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HIZLI KATILAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ NİKEL-BAKIR
(MONEL 400) ALAŞIMI TOZLARIN PRESLEME VE SİNERLEME
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Müh. Fatih ERDEMİR

**HAZİRAN 2011
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HIZLI KATILAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ NİKEL-BAKIR
(MONEL 400) ALAŞIMI TOZLARIN PRESLEME VE SİNERLEME
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

Fatih ERDEMİR

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
" METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20.05.2011

Tezin Savunma Tarihi : 09.06.2011

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sultan ÖZTÜRK

Trabzon 2011

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Fatih ERDEMİR tarafından hazırlanan**

**HIZLI KATILAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ NİKEL-BAKIR
(MONEL 400) ALAŞIMI TOZLARIN PRESLEME VE SİNERLEME
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 24 / 05 / 2011 gün ve 1406 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından 09 / 06 / 2011 tarihinde yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof.Dr. Ekrem YANMAZ

Üye : Doç. Dr. Sultan ÖZTÜRK

Üye : Yrd.Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Hızlı katılaştırma teknolojisi ile metal veya alaşım tozları üretmek mümkündür. Döner disk atomizasyon yöntemi de hızlı katılaştırma yöntemlerinden birisidir. Bu yöntem ile üretilen tozların sinterlenmesi sonucunda yüksek mukavemet, tokluk, korozyon direnci, aşınma dayanımı ve magnetik özelliklere sahip parçalar elde edilmektedir. Bu parçalar özellikle otomotiv sanayi başta olmak üzere havacılık, denizcilik, elektronik, sağlık ve savunma sanayi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada su jeti soğutmalı döner disk atomizasyon yöntemi ile hızlı katılaştırılmış Monel 400 alaşımı tozlarının üretimi gerçekleştirilmiş, çift tesirli tek eksenli toz metalurjisi presinde preslenmiş ve yüksek saflıkta (% 99,999) hidrojen atmosferinde sinterlenmiştir. Presleme ve sinterleme parametreleri incelenmiştir.

Bu çalışmada bana birlikte çalışma fırsatını sunan, çalışmaların sonuçlanması için her aşamasında yakın ilgisini esirgemeyen kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Sultan ÖZTÜRK'e teşekkürü borç bilirim. K.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden Yrd. Doç .Dr. Bülent ÖZTÜRK'e, Araştırma Görevlisi çalışma arkadaşlarım ile Mustafa ZIVALIOĞLU'na ve diğer teknisyenlere, K.T.Ü. Makine Mühendisliği Bölümünden yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Onur SARAY'a, Maden Mühendisliği Bölümünden Arş. Gör. Ersin Y.YAZICI'ya, gösterdikleri özverilerinden dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek hep yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Fatih ERDEMİR
Trabzon 2011

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “*Hızlı Katılaştırma Yöntemi İle Üretilmiş Nikel-Bakır (Monel 400) Alaşımı Tozların Presleme ve Sinterleme Parametrelerinin İncelenmesi*” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım *Doç.Dr. Sultan ÖZTÜRK* ‘ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 20/05/2011

Fatih ERDEMİR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Döner Disk Atomizasyonu.....	5
1.3. Hızlı Katılaştırma.....	8
1.4. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Parça Üretimi.....	10
1.4.1. Toz Yüzey Oksitlerinin İndirgenmesi.....	10
1.4.2. Toz Karıştırma	13
1.4.3. Tozların Akış Hızı ve Görünür Yoğunluğunun Belirlenmesi.....	14
1.4.4. Ham Yoğunluk ve Ham Mukavemet	15
1.4.5. Tozların Sıkıştırılması.....	15
1.4.5.1. Kalıpta Eksel Sıkıştırma ile Presleme	16
1.4.5.2. Kalıpta Sıkıştırma İşlemine Etki Eden Parametreler	18
1.4.5.2.1. Presleme Basıncının Etkisi.....	18
1.4.5.2.2. Ortalama Toz Boyutu, Boyut Dağılımı ve Toz Şeklinin Etkisi	21
1.4.6. Tozların Sinterlenmesi	23
1.4.6.1. Katı Hal Sinterlemesi	24
1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	28
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
2.1. Kullanılan Alaşım	29
2.2. Atomizasyon Ünitesi.....	30
2.2.1. Ergitme ünitesi	32
2.2.2. Atomizasyon Odası.....	33
2.2.3. Kontrol Ünitesi.....	35

2.2.4.	Soğutma Ünitesi.....	36
2.3.	Ortalama Toz Boyutu Hesabı.....	37
2.4.	Üretilen Tozların ve Kompakt Parçaların Morfoloji ve Mikroyapı.....	37
	İncelemeleri	37
2.5.	Toz Yüzeylerindeki Oksit Tabakanın İndirgenmesi	38
2.6.	Tozların Karıştırılması	39
2.7.	Presleme İşlemi	40
2.8.	Sinterleme İşlemi	43
2.9.	Mekanik Özelliklerin İncelenmesi	43
3.	BULGULAR VE İRDELEME	44
3.1.	Üretilen Tozların Morfolojileri	44
3.2.	Üretilen Tozların Mikroyapı ve Sertlikleri	46
3.3.	Presleme İçin Toz Numune Hazırlanması	50
3.4.	Tozların Yüzey Oksitlerinin İndirgenmesi	52
3.5.	Tozların Preslenmesi.....	55
3.6.	Sinterleme İşlemi	65
4.	SONUÇLAR	79
5.	ÖNERİLER.....	81
6.	KAYNAKLAR	82
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

HIZLI KATILAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ NİKEL-BAKIR
(MONEL 400) ALAŞIMI TOZLARIN PRESLEME VE SİNERLEME
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Fatih ERDEMİR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Sultan ÖZTÜRK
2011, 85 Sayfa

Bu çalışmada Nikel esaslı (Ni-Cu) Monel 400 alaşımı su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu yöntemi ile atomize edilerek hızlı katılaştırılmış toz üretilmiş, üretilen toz tek eksenli çift etkili preste preslenmiştir. Yüksek saflıkta hidrojen atmosferinde sinterlenerek parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen tozlarda toz boyutuyla mikroyapı ve mikrosertlik değişimi incelenmiştir. Toz boyutunun azalmasıyla mikrosertlik değerinin arttığı; mikroyapının ise en küçük boyutlu tozlarda eş eksenli hücresel olduğu, artan toz boyutuyla hücresel-dentritik ve dentritik yapılara doğru değiştiği gözlenmiştir. Görünür yoğunluk % 38 olarak elde edilirken, 150, 270, 360, 480 ve 600 MPa basınçlarda yapılan preslemelerde ham yoğunluk artan presleme basıncıyla artarak, 600 MPa basınç için %83 değerine ulaşmıştır. 60, 75, 90 ve 105 dakika sürelerde ve 1100, 1140, 11180 ve 1200 °C sıcaklıklarda yapılan sinterlemede en yüksek yoğunluk ve mukavemet değerine 90 dakika sinterleme süresi ve 1200 °C sinterleme sıcaklığında ulaşılmıştır. Bu sıcaklık ve sürede yapılan sinterlemede % 94 yoğunluğa ve 258 MPa çekme mukavametine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Döner Disk Atomizasyonu, Hızlı Katılaştırma, Toz Üretimi,
Monel 400 alaşımı tozlar, Presleme, Sinterleme, Mekanik Özellikler

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF PRESSING AND SINTERING PARAMETERS OF
RAPIDLY SOLIDIFIED NICKEL COPPER (MONEL 400) ALLOYS POWDERS

Fatih ERDEMİR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Materials Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK
2011, 85 Pages

In this study, Nickel based alloys (Monel 400) was atomized with water jet cooled rotating disc atomization method and rapidly solidified powder was obtained. The produced powders were pressed for different pressures with uniaxial double effect pres. Finally the green parts were sintered in high purity hydrogen atmosphere. Variation of microstructure and microhardness with particle size was investigated. The results showed that the microhardness values increased with decreasing particle size. Fine grained and equiaxed microstructures were seen for small particles and changed to cellular dendritic and dendritic structure with increasing particle size. The produced powders were compacted in uniaxial double effect pres with pressures of 150, 270, 360, 480 and 600 MPa. Apperant density of the powders was measured as 38% and highest green density was obtained as 83% for 600 MPa pressure. Compacted parts were sintered at temperatures of 1100, 1140, 1180 and 1200°C for sintering times of 60, 75, 90 and 105 minutes. The highest sintering density and strength were obtained for 1200°C temperature and 90 minutes. The values were 94% and 258 MPa for 1200°C temperature and 90 minute sintering time, respectively.

Key Words: Rotating Disc Atomization, Rapid Solidification, Monel 400 Alloys Powder, Pressing, Sintering, Mechanical Properties.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Döner disk atomizasyon mekanizması	6
Şekil 1.2. Disk geometrileri, a) düz, b) kanatçıklı, c) konik kanatçıklı.....	7
Şekil 1.3. Değişik üretim yöntemlerinde ikincil dendrit kol aralığı ile soğuma hızının değişimi	10
Şekil 1.4. Su atomizasyonu yöntemi ile üretilen demir tozlarında bulunan oksijen miktarının ham mukavemete etkisi.....	12
Şekil 1.5. NiO'in hidrojen gazı atmosferinde indirgenmesinde indirgeme süresi ile indirgeme sıcaklığı arasındaki ilişki	12
Şekil 1.6. Üç farklı toz karıştırma yönteminin şematik olarak gösterimi, a)yayınma ,b)konveksiyon, c)kesme	13
Şekil 1.7. Hall akış aparatı	15
Şekil.1.8. Preslemede ham yoğunluğa ulaşma aşamaları, a) ilk aşama, b) ikinci aşama, c)son aşama.....	17
Şekil 1.9. Çift tesirli toz sıkıştırma işleminde ardışık hareketler	18
Şekil 1.10. Silindirik bir kalıpta sıkıştırılmış bakır tozlarında yoğunluk değişimi	20
Şekil 1.11. Toz şekli ve toz boyutunun ham mukavemete etkisi, (a) Toz şeklinin etkisi, b) toz boyutunun etkisi	22
Şekil 1.12. Toz boyut dağılımının paketlenme yoğunluğuna etkisi	23
Şekil 1.13. 1000 °C'de vakumda 30 dakika sinterlenen nikel tozları arasında oluşan sinter bağları, a) çok sayıda parçacık arasında bağ oluşumu, b) üç adet parçacık arasında bağ oluşumu.	24
Şekil 1.14. Katı hal sinterlemesi için şematik faz diagramları, a) ötektik faz diagramı, b)izomorfuz faz diagramı, c)sinterleme işlemi için zaman-sıcaklık diagramı .	25
Şekil 1.15. İki eş küresel toz arasında boyun oluşumu	26
Şekil 1.16. Katı hal sinterlemesinde difüzyon mekanizmalarının şematik gösterimi	26
Şekil 1.17. Sinterlemenin değişik aşamalarının şematik olarak gösterimi, a) gevşek toz, b) ilk aşama, c) ara aşama, d) son aşaması	27
Şekil 2.1. Ni-Cu alaşımı faz diyagramı.....	30

Şekil 2.2. Su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesi şematik resmi (1- Atomizasyon odası, 2- atomizasyon diski motoru, 3- atomizasyon diski, 4- saç koni, 5- grafit pota, 6- seramik tıkaç, 7- indüksiyon bobini, 8- indüksiyon ısıtma sistemi, 9- pota ve tıkaç motoru, 10- hidrolik piston-silindir, 11- disk soğutma suyu girişi, 12- disk soğutma suyu çıkışı, 13- soygaz girişi, 14- soygaz çıkışı, 15- toz toplama bölümü, 16- kontrol ünitesi, 17-soğutma ünitesi).....	31
Şekil 2.3. Su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesi fotoğrafı	32
Şekil 2.4. Ergitme ünitesi fotoğrafı.....	33
Şekil 2.5. a) Pota, b) tıkaç boyutları.....	33
Şekil 2.6. Atomizasyon diski	35
Şekil 2.7. Kontrol ünitesi , a) indüksiyon ısıtma sistemi ve hidrolik motor üniteleri b) döner disk motoru, hidrolik motor, pota ve tıkaç kontrol butonları ile disk hızı gösterge panosu	36
Şekil 2.8. Soğutma ünitesi	37
Şekil 2.9. İndirgeyici atmosferli sinter fırını.....	39
Şekil 2.10. Turbila türü toz karıştırma cihazı	40
Şekil 2.11. Çift tesirli tek eksenli presin şematik resmi. Pres elemanları; 1-Kauçuk ayak 2-kolonlar 3- klavuz silindir 4- üst silindir piston 5- alt silindir piston 6- pres tablası 7- alt zımba ve kalıp boşluğu 8- üst zımba 9- PLC kontrol ünitesi 10-hidrolik devre elemanları 11-motor 12- pompa 13-hidrolik yağ tankı.....	41
Şekil 2.12. Tek eksenli çift tesirli hidrolik toz kalıplama presi.....	42
Şekil 2.13. Preslenmiş ham haldeki çekme numuneleri.....	42
Şekil 3.1. Küçük boyutlu Monel 400 tozları, a) -25 µm/tava, b) -45 /25 µm c) -63 /45 µm, d)-90 /63 µm	45
Şekil 3.2. Büyük boyutlu Monel 400 tozları, a) -125/90 µm, b) -150/90 µm c) -250/125 µm, d) -355 / 250 µm	46
Şekil 3.3. Monel 400 alaşımı tozu mikroyapısı, a) 12 µm, b) 24 µm, c) 68 µm, d) 90 µm, e) 120 µm, f) 220 µm.....	48
Şekil 3.4. Monel 400 alaşım tozlarında toz boyutuna bağlı olarak hücre boyutunun değişimi.....	49
Şekil 3.5. Monel 400 alaşım tozlarında toz boyutuna bağlı olarak mikrosertliklerinin değişimi.....	49
Şekil 3.6. Farklı elek aralığı tozlardan oluşturulmuş örneklerin toz boyut dağılımı değişimi.....	51

Şekil 3.7. Monel 400 alaşımı tozlarının indirgenmemiş durumda ve değişik sıcaklıklarda hidrojen atmosferinde indirgenmesi sonrası elde edilen X-ışını kırınımı desenleri.....	53
Şekil 3.8. Presleme basıncıyla ham yoğunluğun değişimi.....	57
Şekil 3.9. Preslenmiş ham parçada presleme basıncıyla mikrosertliğin değişimi	58
Şekil 3.10. Presleme basıncıyla porosite ve parçacık deformasyonunun değişimi, a) küçük büyütmedeki görünüm, b) büyük büyütmede mikroyapı (Presleme basıncı 270 MPa).	59
Şekil 3.11. Presleme basıncıyla porosite ve parçacık deformasyonunun değişimi, a) küçük büyütmedeki görünüm, b) büyük büyütmede mikroyapı (Presleme basıncı 360 MPa).....	60
Şekil 3.12. Presleme basıncıyla porosite ve parçacık deformasyonunun değişimi, a) küçük büyütmedeki görünüm, b) büyük büyütmede mikroyapı (Presleme basıncı 480 MPa).....	61
Şekil 3.13. Presleme basıncıyla porosite ve parçacık deformasyonunun değişimi, a) küçük büyütmedeki görünüm, b) büyük büyütmede mikroyapı (Presleme basıncı 600 MPa).....	62
Şekil 3.14. 600 MPa basınç altında preslenmiş tozların mikroyapıları, a) Toz boyutu 10µm, b) Toz boyutu 45 µm	63
Şekil 3.15. 600 MPa basınç altında preslenmiş tozların mikroyapıları, a) Toz boyutu 90µm, b)Toz boyutu 110 µm	64
Şekil 3.16. Sinterleme süresinin sinter yoğunluğuna etkisi (Presleme basıncı 600 MPa)..	66
Şekil 3.17. Sinterleme süresi ile sertliğin değişimi (Presleme basıncı 600 MPa.).....	67
Şekil 3.18. Sinterleme süresi ile çekme mukavemeti değişimi.	68
Şekil 3.19. Sinterleme süresiyle çekme mukavemeti ile kopma uzamasında olan değişim (Sinterleme sıcaklığı 1180 °C).....	68
Şekil 3.20. Sinterleme süresiyle çekme mukavemeti ile kopma uzamasında olan değişim (Sinterleme sıcaklığı 1200 °C).....	69
Şekil 3.21. Sinterleme sıcaklığıyla çekme mukavemeti değişimi.	70
Şekil 3.22. Sinterleme sıcaklığıyla sinter yoğunluğunun değişimi (Sinterleme süresi 60 dakika)	71
Şekil 3.23. Sinterleme sıcaklığıyla sertliğin değişimi (Sinterleme süresi 60 dakika)	71
Şekil 3.24. 1200 °C sinterleme sıcaklığında sinterleme süresiyle iç yapının değişimi, a) küçük büyütmedeki görünüm, b) büyük büyütmede iç yapı (sinterleme süresi 60 dakika).....	73

- Şekil 3.25. 1200 °C sinterleme sıcaklığında sinterleme süresiyle iç yapının değişimi, a) küçük büyütmedeki görünüm, b) büyük büyütmede iç yapı (sinterleme süresi 75 dakika) 74
- Şekil 3.26. 1200 °C sinterleme sıcaklığında sinterleme süresiyle iç yapının değişimi, a) küçük büyütmedeki görünüm, b) büyük büyütmede iç yapı (sinterleme süresi 90 dakika) 75
- Şekil 3.27. 1200 °C sinterleme sıcaklığında sinterleme süresiyle iç yapının değişimi, a) küçük büyütmedeki görünüm, b) büyük büyütmede iç yapı (sinterleme süresi 105 dakika) 76
- Şekil 3.28. Sinterleme sıcaklığıyla iç yapının değişimi, a) 1100 °C’de sinterleme sonrası iç yapı, b) 1140 °C’ de sinterleme sonrası iç yapı (sinterleme süresi 60 dakika) 77
- Şekil 3.29. Sinterleme sıcaklığıyla iç yapının değişimi, a) 1180 °C’de sinterleme sonrası iç yapı, b) 1200 °C’ de sinterleme sonrası iç yapı (sinterleme süresi 60 dakika) 78

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Çeşitli metal ve alaşım tozları için basınç-ham yoğunluk ilişkisi	20
Tablo 1.2. Parçacık boyut oranı ve ağırlık yüzdesinin paketleme yoğunluğuna etkisi	23
Tablo 2.1. Monel 400 alaşımı kimyasal bileşimi (% Ağ.).....	29
Tablo 2.2. Monel 400 alaşımının bazı fiziksel özellikleri	29
Tablo 3.1. Hazırlanan toz numunelerin elek aralığı oranları ve ortalama toz boyutları.....	51
Tablo 3.2. Monel 400 alaşımı tozlarının indirgeme öncesi görünür yoğunluk ve akış hızı değerleri	54
Tablo 3.3. Monel 400 alaşımı tozlarının %99,999 saflıkta hidrojen atmosferinde indirgenme sonrası görünür yoğunluk ve akış hızı değerleri.....	54
Tablo 3.4. Ortalama toz boyutu ve boyut dağılımının ham yoğunluğa etkisi	55
Tablo 3.5. Sinterleme süresine bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi.....	69

SEMBOLLER DİZİNİ

T/M	:Toz metalurjisi
İDKA	:İkincil dendrit kol aralığı
MO	:Metal oksit
M	:Metal
D _o	:Görünür yoğunluk
D	:Ham yoğunluk
P	:Basınç
PM	:Sıkıştırma basıncı
U	:Kalıp duvar sürtünmesi
Z	:Basınç dağılımı
H/D	:Parça geometrisi
C _R	:Sıkıştırma oranı
V _L	:Gevşek toz hacmi
V _C	:Sıkıştırılmış toz hacmi
PLC	:Programlanabilir mantıksal kontrol
d ₅₀	:Ortalama toz boyutu
d ₁₀	:%10 kümülatif yüzdeye karşılık gelen toz boyutu
d ₉₀	:%90 kümülatif yüzdeye karşılık gelen toz boyutu
RSD-F	:Rockwell sertlik F değeri

1. GENEL BİLGİLER

1.1.Giriş

Toz metalurjisi (T/M), 19. yüzyılda tanışılan ve karmaşık parçaların üretimine olanak sağlayan malzeme biliminin önemli bir alanıdır. T/M, farklı özellikte metal ve alaşım tozlarının üretimini, bu tozların bir kalıp içinde preslenerek ham halde elde edilmesini ve sonrasında fırın ortamında sinterlenmesini içeren bir yöntemdir. T/M üretim yöntemi ile farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal ve alaşım tozları sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülür. Bu işlem tozların yağlayıcı vb. katkı maddeleri ile karıştırılması, oda sıcaklığında veya belirli bir sıcaklıkta hassas kalıplarda preslenerek şekillendirilmesi, toz tanecikleri arasındaki metalurjik bağların oluşturulabilmesi için belirli sıcaklıklarda koruyucu bir atmosferde sinterlenmesi ve parçalarda beklenen diğer özelliklere ulaşmak için sinterleme sonrası çeşitli işlemleri (infiltrasyon, yağ emdirme, çapak alma vb.) içerir [1-4].

Sunduğu çeşitlilik açısından en kapsamlı şekillendirme ve üretim süreçlerine sahip olan T/M teknolojisi ile genellikle karmaşık şekilli ve diğer üretim teknikleri ile üretimi mümkün olmayan mukavemet, aşınma ve korozyona karşı dayanımı yüksek parçalar, minimum toleransla ve diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha avantajlı bir şekilde imal edilebilir. Elde edilen yüzey kalitesi talaşlı işleme olan gereksinimleri ortadan kaldırmakta, malzeme ve zaman kaybını en aza indirmektedir. Bu açıdan T/M ekonomik bir üretim yöntemidir. T/M ile üretilen parçaların içeriğinin kontrol edilebilir olması, homojen mikroyapı dağılımı ve birim maliyetinin düşük kalması gibi faktörler nedeni ile TM üretim tekniği verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırır ve giderek döküm, kaynak, talaşlı imalat ve plastik şekil verme gibi geleneksel üretim yöntemlerinin yerini almaktadır. Yüksek ergime sıcaklığına sahip refrakter metallere parça üretiminin sadece T/M yöntemi ile yapılabilmesi, T/M yöntemini zorunlu kılan bir başka faktördür. Bu avantajlarının yanında T/M ile üretilmiş parçaların düşük mekanik özelliklere sahip olması, parça tasarımlarının sınırlı olması, parça kesiti boyunca özelliklerin değişim göstermesi, kullanılan teçhizatın maliyetinin nispeten yüksek olması bu yöntemin olumsuz taraflarını oluşturmaktadır [3, 5,6].

T/M uygulama alanları oldukça geniştir. Diğer sektörlerin yanında otomotiv sanayinde yoğun olarak kullanılması, toz metal endüstrisinin hızlı biçimde büyümesine neden olmuştur. T/M ürünlerinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Otomotiv güç aktarma dişlileri, zırh delici mermiler, tungsten lamba teli, diş dolguları, kendinden yağlamalı yataklar, mıknatıslar, ortopedik protezler, yüksek sıcaklık filtreleri, şarj edilebilir piller ve jet motoru parçaları, toz metal boyalar, patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtları, sert lehim bileşikleri ve katalizörler T/M uygulamalarına örnek olarak gösterilebilir [7,8]. Bunlara ek olarak takım çeliklerinin, sermetlerin (seramik+metal), sert metallerin, sürünme elemanlarının ve kesici uçların üretimleri de diğer T/M uygulamaları olarak sayılabilir [9-11].

T/M yönteminde ilk aşama toz üretimidir. Üretilen parçaların kalitesi presleme, sinterleme gibi işlemlerin yanında büyük oranda kullanılan tozların özelliklerine bağlıdır. Bu açıdan bakıldığında, istenilen kalitede parça üretimi için toz özelliklerinin bilinmesi büyük önem arzeder. Morfoloji (toz şekli ve yüzey yapısı), mikroyapı, ortalama boyut ve boyut dağılımı tozları karakterize eden önemli özellikleridir. Bu özellikler presleme ve sinterleme işleminde etkili parametreler olup nihai parça özelliklerini tayin eder. Değişik toz üretim yöntemleriyle bir mikrondan birkaç yüz mikrona kadar değişen boyutlarda tozlar üretilmektedir. Toz morfolojisi, üretim yöntemine bağlı olarak küresel, köşeli, yuvarlak, çubuksu (ligamental), yapraksı, göz yaşı damlası, pulsu, fiber, dendritik, düzensiz vb. şekilli olabilmektedir [12,13].

Çok farklı toz üretim yöntemleri olmakla beraber bunları dört ana grupta toplamak mümkündür. Temel olarak dört değişik toz üretim yöntemi vardır. Bunlar, bileşik formdaki malzemelerin indirgenmesi esasına dayalı kimyasal yöntemler, yine bileşik formdaki malzemenin ayrıştırılması esasına dayalı elektrolitik yöntemler, malzemenin katı fazda küçük parçacıklara ayrıştırılması esasına dayalı mekanik yöntemler ve ilgili malzemenin sıvı fazdan küçük parçacıklara ayrıştırılması esasına dayalı atomizasyon yöntemleridir. Belirtilen bu yöntemler kullanılarak farklı morfoloji ve mikroyapıda, üretim kapasitesi olarak günde birkaç gramdan yüzlerce kilograma kadar toz üretmek mümkündür. Dünyada üretilen tozların %80'den fazlası atomizasyon yöntemleri ile üretilmektedir [13].

Atomizasyon yöntemi; sıvı metale enerji verip farklı boyutlarda çok sayıda damlacıklara ayrılarak toz halinde katılaştırılması prensibine dayanmaktadır. Ergitilebilen her metal ve alaşıma uygulanabilir olduğundan diğer toz üretim yöntemlerinden daha üstündür. Üretim kapasitesinin yüksek oluşu atomizasyon yöntemini çekici kılan bir diğer

faktördür [13-15]. Atomizasyon yöntemlerinde sıvı metalin parçalanması çeşitli şekillerde yapılabilir. Yüksek basınçlı su veya gaz kullanılarak yapılan atomizasyon su veya gaz atomizasyonu olarak adlandırılır. Santrifüj kuvvet etkisiyle sıvı metalin parçalanması santrifüj atomizasyonu; sıvı metalin vakum ortamında parçalanması vakum atomizasyonu; parçalanma etkisi için ultrasonik enerji kullanılırsa ultrasonik atomizasyon olarak adlandırılır [16-18]. Belirtilen bu yöntemlerin her biri ayrı ayrı kullanılmakla beraber, son yıllarda yapılan çalışmalarda, her bir yöntemin avantajlı yönlerinden faydalanmak amacıyla farklı iki yöntemin bir arada kullanıldığı hibrid atomizasyonu yöntemlerine de rastlanılmaktadır.

Atomizasyon yöntemlerinde toz elde edilme işlemi üç aşamada gerçekleşir:

1. Alaşım veya metalin ergitilmesi
2. Atomizasyon (ergiyik metal damlalarını daha küçük boyutlara parçalamak)
3. Katılaşma ve soğuma [13, 19].

Ergitme aşamasında, metal veya alaşım uygun koşullarda ergime veya likidüs sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa aşırı ısıtılarak ergitilir. İkinci aşamada, sıvı metale enerji verilerek çok küçük boyutlarda damlacıklar haline getirilir. Üçüncü aşama, sıvı metal damlacıklarının yüzey enerjilerini minimize etmek için atomizasyon koşullarına bağlı olan geometriler (küresel, pulsü, düzensiz vb.) oluşturarak katılaşması ve soğumasıdır [19].

Santrifüj atomizasyonu yöntemi, özellikle kolay oksitlenen reaktif metallerin tozlarının üretimi için tercih edilmektedir. Bu yöntem sıvı metalin santrifüj kuvvet etkisiyle parçalanıp küçük tanecikler halinde savrulur katılaşması esasına dayanır [20]. Savrulan sıvı tanecikler ya toz toplama odasında ya da su veya soğutulmuş asal gaz gibi ortamlarda katılaşır. Santrifüj etki ile toz üretimi için döner disk, döner elek, döner kap, döner tekerlek, döner elektrot, vb. yöntemler geliştirilmiştir [15]. Santrifüj atomizasyonu tek veya iki aşamalı olarak gerçekleştirilir. Tek aşamalı işlemde, döner bir elektrot, santrifüj kuvveti sağlayacak ilave bir elemana gerek kalmadan, doğrudan ergitilip atomizasyon yapılır. İki aşamalı işlemde ise malzeme sabit bir fırında ergitilip santrifüj kuvveti sağlayan döner disk, döner elek veya döner kap üzerine dökülerek atomize edilir [21].

Döner disk atomizasyonu yönteminde üretim parametrelerinin kontrolü ile tozların katılaşma hızlarının kontrol edilebilmesi, bu yöntemin hızlı katılaştırılmış metal veya alaşım tozu üretilmesi için kullanılmasına imkan vermiştir. Bu yöntemle doğrudan toz üretimi yapılabildiği gibi, hızlı katılaşmış şerit üretimi de yapılarak, bu şeritlerin öğütülmesiyle de toz üretimi yapılabilmektedir. Atomizasyonu gerçekleştiren diskin su jeti

ile alt kısımdan soğutulması sebebiyle, döner disk atomizasyon yöntemi literatürde belirtilen hızlı katılaştırma yöntemlerinden “splat quenching (soğutulmuş alt yüzeye çarptırma ile soğutma)” grubuna girmektedir. Soğuma hızı atomizasyon parametrelerine ve toz boyutuna bağlı olarak 10^6 K/s mertebesine ulaşabilmektedir.

Döner disk atomizasyonu yöntemi ile Cu, Al, Sn, Fe, Pb, Zn, Mg ve Ni metallerinin ve bunların alaşımlarının hızlı katılaştırılmış tozları üretilmektedir. Ni-Cu esaslı Monel 400 alaşımı izomorfuz tek fazlı alaşımdır. Bu alaşım geniş bir sıcaklık aralığında yüksek tokluk ve mukavamete sahip olup, aynı zamanda pek çok korozif ortama karşı mükemmel korozyon direncine sahiptir. Monel 400 alaşımı farklı endüstri kollarında olmak üzere pek çok alanda kullanılmaktadır. Denizaltılardan elektronik parçalara, besin işleme makineleri parçalarından elektrik güç üreteçleri gibi farklı endüstri kollarında kullanılmaktadır. Valfler, pompalar, denizaltı pervaneleri, elektrik ve elektronik devreler, yaylar, kimyasal işleme ekipmanları, taze su tankları, ham petrol tankları ve ısı dönüştürücü elemanları uygulama alanlarından bazılarına örnek olarak gösterilebilir [22-24].

Bu çalışmada, T/M yöntemi ile parça üretim aşamalarının tümünü kapsayacak şekilde, toz üretimi, mekanik karıştırma, presleme ve kontrollü atmosferde sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Monel 400 alaşımı kullanılmış olup, bu alaşımdan su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu yöntemiyle üretilen tozların preslenme ve sinterlenebilme özellikleri incelenmiş, presleme ve sinterleme parametrelerinin akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertlik gibi mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Çalışmalar KTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu laboratuvarlarda mevcut bulunan su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesinde Monel 400 alaşımı atomize edilerek toz üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen tozlar morfoloji ve mikroyapı incelemelerinden sonra çeşitli boyutsal fraksiyonlara ayrılmıştır. Toz üretimi esnasında oksitlenmiş olan tozlar sinter fırınında yüksek saflıktaki hidrojen atmosferinde indirgenerek yüzeyleri temizlenmiş ve üç eksenli bir karıştırıcıda homojenlik sağlamak amacıyla mekanik olarak karıştırılmıştır. Takip eden aşamada tozlar, çift etkili ve PLC kontrollü hidrolik preste farklı presleme basınçlarında preslenerek ASTM standardında çekme numuneleri üretilmiştir. Preslenmiş ham haldeki parçalar sinterleme fırınında yüksek saflıktaki hidrojen atmosferinde farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenmişlerdir. Elde edilen numunelerin çekme ve sertlik ölçme deneyleri yapılarak ortalama toz boyutu, boyut dağılımı, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin çekme ve sertlik özelliklerine etkileri incelenmiştir.

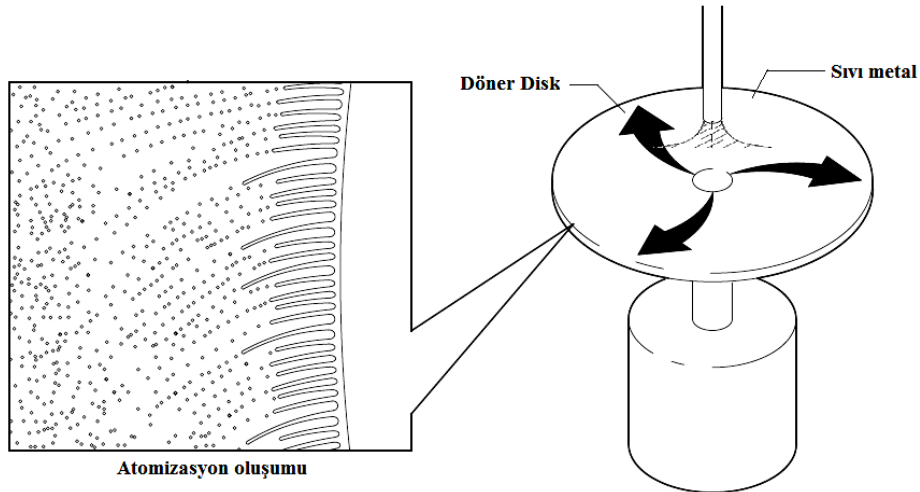
1.2. Döner Disk Atomizasyonu

Döner disk atomizasyonu, ergimiş haldeki sıvı metalin yüksek hızda dönmekte olan diskin santrifüj enerjisi ile parçalanıp toz haline getirilme işlemidir. Atomize olan sıvı metal damlacıkların katılaşması damlacık büyüklüğüne bağlı olarak disk üzerinde veya diskten savrulduktan sonra, disk ile atomizör duvarı arasındaki uçuş mesafesinde veya atomizör duvarına çarpma anında gerçekleşir. Uçuş mesafesinde katılaşmasını tamamlayamayıp atomizör duvarına çarpan tozlar pulsu şekil alırlar, bunlar nispeten büyük boyutlu olduklarından toz olarak değerlendirilemezler. Bu nedenle, pulsu toz miktarını azaltmak ve tozların katılaşmasını hızlandırmak amacıyla çeşitli tedbirler alınır. Atomizör çapının büyük tutularak disk ile atomizör duvarı arasındaki mesafenin artırılması tercih edilebilmektedir. Ancak, çok büyük çaplı atomizörlerin kullanım zorluklarından dolayı bu çözüm pratik değildir. Yapılan literatür incelemesinde, diskten savrulan metal damlacıklarının başka bir soğutma elemanı veya aracıyla soğutularak katılaşmalarının hızlandırıldığı tespit edilmiştir. Döner disk atomizasyonu yönteminde tozların katılaşmasını hızlandırmak veya ısının süratle uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç değişik soğutma ortamı kullanılmaktadır. Sıvı metal damlacıklarını, dönmekte olan ve soğutulan ikinci bir katı yüzeye çarptırarak yapılan soğutmada katı – sıvı ara yüzeyinde iletim ısı transfer katsayısı yüksek olduğundan soğuma hızı da yüksek olur. Ancak durumda elde edilen tozlar nispeten kaba boyutlu olur [25]. Gaz ortamında soğutma işleminde genellikle soygaz kullanılır. Ayrıca metal ve alaşımların oksitlenmesi de önlenmiş olur. En çok kullanılan gazlar He, N ve Ar'dur. Bu gazlar arasında He en yüksek ısı iletim katsayısına sahip olduğu için en hızlı soğumayı sağlar [26]. Döner disk atomizasyonunda tozları sıvı ortamda soğutma işleminde genellikle su kullanılır. Ancak, bu şekilde katılaştıran tozların yüzeylerinde yüksek oranda oksitlenme olur [27]. Döner disk atomizasyonu bir hızlı katılaştırma yöntemi olduğundan bu yöntem ile kontrollü atmosferde oksijen oranı düşük, çözünürlük sınırı artmış ve daha homojen mikroyapıda, yüksek kalitede tozlar düşük enerji maliyeti ve yüksek verimle üretilebilirler [15]. Şekil 1.1'de döner disk atomizasyonu şematik olarak gösterilmiştir.

Döner disk atomizasyonunda başarılı bir atomizasyon için atomizasyon diskinde olması gereken özellikler şunlardır:

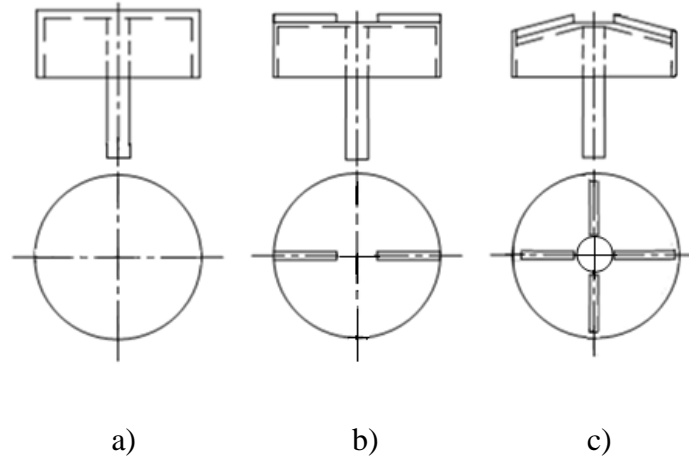
1. Yüksek sıcaklığa ve termal şoka dayanıklı olmalı,
2. Sıvı metal tarafından iyi ıslatılmalı,
3. Yüksek dönme hızına dayanabilecek mukavemete sahip olmalı,
4. Hafif olmalı,
5. Hızlı katılaştırma durumunda ısı iletkenliği yüksek malzemeden olmalı [28].

Döner disk atomizasyonunda diskten sıvı metale enerji aktarımı için disk ile sıvı metal arasında belirli bir sürtünmenin olması gerekir. Bunun olabilmesi için, sıvı metalin diski ıslatma kabiliyetinin iyi olması gerekir. Islatmanın yeterli olmaması durumunda sıvı metal disk üzerinde kayar ve diskin kenarındaki sıvı metal hızı diskin çevresel hızından çok daha düşük olur. Dolayısıyla, diskten sıvı metale enerji transferi tam olarak gerçekleşmez; yani diskin dönmesinin bir önemi kalmaz [15, 27, 29, 30]. Diskin ıslatma kabiliyeti, sıvı metal, disk ve atomizasyon ortamı arasındaki ara yüzey gerilmelerinin yanı sıra, disk sıcaklığı ve disk yüzey pürüzlülüğünden etkilenir [31,32]. Islatma kabiliyetinin artırılması için disk yüzeyleri kaplanabilir. Atomizasyon çalışmalarında genellikle bakır ve paslanmaz çelikten imal edilmiş, grafit, molibden ve seramik kaplı diskler kullanılmaktadır. Ancak, ısı iletim katsayısının yüksek olması dolayısıyla en başarılı atomizasyon bakır diskle yapılmaktadır [28].



Şekil 1.1. Döner disk atomizasyon mekanizması [33].

Döner disk atomizasyonunda disk şekli, disk hızı, disk çapı ve kullanılan soğutma ortamı gibi parametrelere bağlı olarak ortalama toz boyutu, boyut dağılımı ve toz mikroyapısı değişiklik gösterir. Bu parametreler içerisinde disk şekli en etkili olanıdır. Değişik geometriye sahip diskler kullanılarak atomizasyon yapılabilmektedir. Kanatçıklı veya kanatçiksüz düz, konik kanatçıklı veya çanak şekilli diskler en çok kullanılanlarıdır [29, 30]. Şekil 1.2’de bazı disk geometrileri gösterilmektedir. Kanatçıklı disk kullanılması durumunda sıvı metal kanatçık yüzeyinde sınırlanır, böylece sıvı metalin disk üzerinde kayması önlenerek disk kenarından maksimum hızla savrulur atomize olması sağlanır [29, 34]. Kanatçıkların profili ve sayısı değişik olabilir. Çanak şekilli disklerde santrifüj kuvvet, sıvı metal filmini diskin duvarına doğru baskı yapıp yönlendirdiği için düz disklerle kıyaslandığında sıvı metalin disk üzerindeki yayılması artar [35]. Islatma kabiliyeti iyileştiğinden sıvı metal disk kenarında maksimum hıza ulaşabilir [34].



Şekil 1.2. Disk geometrileri, a) düz, b) kanatçıklı, c) konik kanatçıklı [36].

Düz diskle atomizasyonda, sıvı metal disk yüzeyinde merkezden çevreye doğru gittikçe artan bir hızla hareket ederek en sonunda diski terk eder. Bu hız artışından dolayı sıvı metal tabakası parabolik olarak incilir ve sonunda atomize olur [37]. Düz diskte atomizasyonu etkileyen faktörler şunlardır:

- Sıvı metalin viskozitesi ve yüzey gerilmesi,
- Sıvı metalin disk kenarındaki ataleti,
- Diski terk eden sıvı tanecikleri ile çevreleyen ortam arasındaki sürtünme,
- Sıvı damlacıkları içinde oluşan kayma gerilmelerinin tekrar ayarlanması,

e) Sıvı metalin diski ıslatma durumu [27].

Yerçekimi ve santrifüj kuvvet dönen disk üzerinde oluşan sıvı metal filmini disk kenarından savurmaya; yüzey gerilmesi, viskozite ve sürtünmeden dolayı oluşan kuvvetler ise tutmaya çalışır. Santrifüj kuvvet, yüzey gerilmesi, viskozite ve sürtünmeden dolayı oluşan kuvvetlerin toplamını geçerse o noktada atomizasyon başlar. Santrifüj kuvvetin daha baskın olması durumunda sıvı metal disk üzerinde film oluşturur. Yüzey gerilimi kuvvetlerinin daha baskın olması durumunda ise sıvı metal disk kenarına ulaşmadan ligamentlere ve damlacıklara parçalanır. Düşük disk dönme hızlarında viskozite ve yüzey gerilmesi daha etkilidir. Ancak, yüksek hızlarda atalet ve sürtünme daha etkili olur. Aynı disk dönme hızında daha düşük sıvı metal akış debisinde atomizasyon diskin kenarına daha yakın yerde oluşur [31, 38].

1.3. Hızlı Katılaştırma

Geleneksel döküm yöntemleriyle elde edilemeyen faz ve mikroyapıları oluşturmak amacıyla sıvı metalin 10^2 K/s' den daha büyük hızla soğutulması işlemi hızlı katılaştırma olarak tanımlanabilir [39]. Hızlı katılaştırma işlemi ergiyik haldeki sıvı metalin termal iletkenliği yüksek bir alt yüzey veya ortam ile ani olarak temas ettirilerek ısısının hızla uzaklaştırılması işlemi ile gerçekleştirilir. Hızlı katılaştırmanın meydana gelebilmesi için asgari şartlar şöyledir [40, 41]:

(a) Katılaştıran malzeme en az bir yönde küçük boyuta veya büyük bir yüzey/hacim oranına sahip olmalıdır. Bu boyut bazen 10-50 μm kadar küçük olabileceği gibi, en az 10^2 K/s'lik soğuma hızını sağlayacak şekilde birkaç yüz mikron mertebesinde de olabilir.

(b) Katılaştıran malzemeden ısının çok kısa zamanda alınmasına imkan veren soğutma şartları olmalıdır.

Hızlı katılaştırma yöntemiyle üretilen ürünlerin sahip olduğu üstünlükler şunlardır [42]:

- Çekme ve akma dayanımı artar.
- Yorulma dayanımı artar.
- Korozyon dayanımı iyileşir.
- Manyetik özellikler iyileşir.
- Elastiklik modülü yükselir.

Hızlı katılaştırma işleminde soğuma hızı genellikle 10^3-10^6 K/s arasında olmakla beraber özel şartlar altında 10^9 K/s gibi yüksek soğuma hızına ulaşılabilir. Hızlı katılaştırma ile malzemenin iç yapısında meydana gelen değişimler şunlardır [14, 15, 45]:

1. Mikro ve makro segregasyon azalır. Normal soğuma hızlarında segregasyon sonucu oluşan fazlar ortadan kalkar.

2. Katı haldeki çözünürlük miktarları ve sınırları genişler. Bunun olabilmesi için katılaştırma hızının belli bir değerin üzerinde olması gerekir.

3. İç yapıda bulunan ikincil fazların büyüklüğü, şekli ve dağılımı değişir. Tane büyüklüğü, ikincil dendrit kol aralığı ve çökelen faz parçacıklarının ve dispersoidlerin boyutları küçülür.

4. İç yapıda yarı kararlı fazlar oluşur. Daha sonra uygulanan ısı işlemlerle bu fazlar başka kararsız, yarı kararlı veya kararlı fazlara dönüşürler. Bunun olması için katılaştırma hızının genellikle 10^4 K/s üzerinde olması gerekir.

5. Camsı yapıda veya nano boyutta tane yapısına sahip alaşımlar üretilebilir. Camsı yapıların oluşabilmesi için soğuma hızının 10^5 K/s' nin üzerinde olması gerekir. Camsı yapıda segregasyon oluşmaz.

Değişik üretim yöntemlerinde elde edilebilecek yaklaşık soğuma hızları aşağıda verilmiştir [43]:

(a) İngotlar ve büyük boyutlu döküm parçalar: $10^{-3} - 10^0$ K/s,

(b) Gaz atomizasyonu (subsonik): $10^0 - 10^2$ K/s,

(c) Gaz atomizasyonu (ultrasonik): $10^3 - 10^5$ K/s,

(d) Su ve yağ atomizasyonu: $10^3 - 10^6$ K/s,

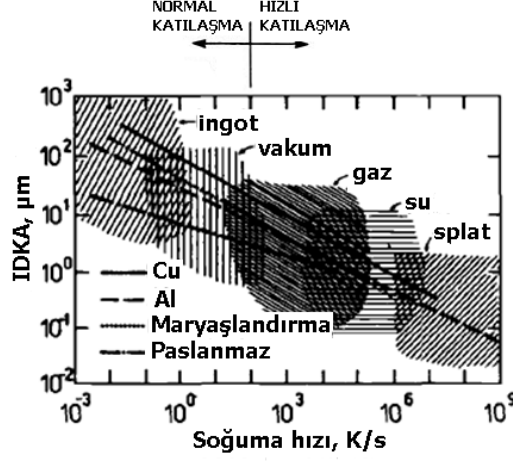
(e) Soğutulan metalik alt yüzeye çarptırma ($20 \mu\text{m}$ üzerinde parçacıklar):

$10^4 - 10^6$ K/s,

(f) Soğutulan metalik alt yüzeye çarptırma ($10 \mu\text{m}$ ve mikron altı kalınlıklarda şeritler): $10^6 - 10^{10}$ K/s

Değişik üretim yöntemlerinde ikincil dendrit kol aralığının (İDKA) soğuma hızıyla değişimi Şekil 1.3'de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, soğuma hızı arttıkça yani katılaştırma süresi azaldıkça ikincil dendrit kol aralığı azalmaktadır. En yüksek soğuma hızı, soğutulan metalik alt yüzeye çarptırma yöntemiyle elde edilmektedir. Soğutulan metalin

ısl iletkenliği de soğuma hızını etkilemektedir. Ayrıca toz boyutu arttıkça soğuma hızı yavaşlayacağından ikincil dendrit kol aralığı da artmaktadır [14, 41].



Şekil 1.3. Değişik üretim yöntemlerinde ikincil dendrit kol aralığı ile soğuma hızının değişimi [14].

1.4. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Parça Üretimi

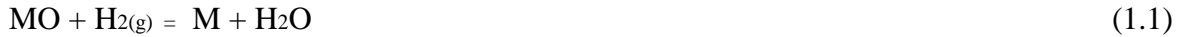
Toz metalurjisi (T/M) yöntemiyle parça üretimi; tozların bir kalıpta alt ve üst zımbalar aracılığıyla basınç uygulayarak sıkıştırılması ve sonrasında sinterlenmesi işlemidir. Sıkıştırma işleminden sonra parça elle tutulabilecek şekilde mukavemet kazanır, ancak esas mukavemet toz parçacıkları arasında bağ oluşumuna imkan veren sinterleme işleminde kazanılır. T/M yöntemiyle parça üretim işleminde tozlar hiçbir zaman üretim hattından geldiği veya satın alındığı şekliyle hemen kalıba doldurulup preslenmezler. Presleme öncesi yapılması gereken bir seri işlem vardır ve genellikle bu işlemler toz numune hazırlama olarak adlandırılır. Bu kapsamda; toz boyut analizinin yapılması, tozların akıcılık ve görünür yoğunluklarının belirlenmesi, toz yüzey oksitlerinin temizlenmesi ve yağlayıcı vb. katkıları ilave edilerek tozun karıştırılması, presleme öncesi yapılması gereken işlemler olarak kabul edilebilir.

1.4.1. Toz Yüzey Oksitlerinin İndirgenmesi

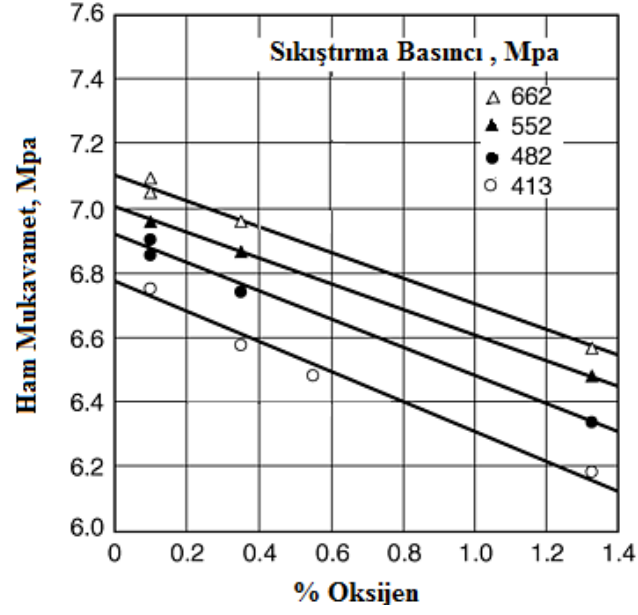
Toz yüzeyleri, toz üretimi esnasında hava atmosferi ile etkileşimden dolayı ince bir oksit tabakasıyla kaplıdır. Koruyucu atmosfer ortamlarında yapılan toz üretiminde dahi yüzey oksitlerinden kaçınabilmek mümkün olmamaktadır. Metal veya alaşım ergimiş

durumda veya toz olarak katılaşma anında difüzyonun hızlı olmasından dolayı tozlar kolaylıkla oksitlenebilmektedir. Toz yüzey oksit tabakasının kalınlığı toz üretim yöntemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Su atomizasyon yöntemiyle yapılan üretimde oksit miktarı 3.000 ppm'e kadar çıkabilmektedir. Gaz atomizasyonunda gazın koruyucu etkisinden dolayı oksit miktarı nispeten düşük düzeydedir. Yüzey oksitleri metal ile oksijenin yapmış olduğu bileşikler olup son derece sert bir tabakadır. İndirgenmemiş oksit tabakası tozlar arası sürtünmenin artmasına, dolayısıyla görünür yoğunluk ve paketlenme yoğunluğunun düşük olmasına sebep olur. Diğer taraftan, sert oksit tabakasından dolayı presleme esnasında tozlar plastik deformasyona uğramaz, neticede tozlar arasında temas yüzeyi oluşamayacağından mekanik kilitleme meydana gelmez ve ham parça elde edilemez. Yüzey oksitlerinin diğer bir negatif etkisi de sinterlemede görülür. Ana metal veya alaşıma göre çok yüksek ergime sıcaklığına sahip olan yüzey oksitleri parçacıklar arasında bağ oluşumunu engeller, sinterleme meydana gelmez [44,45].

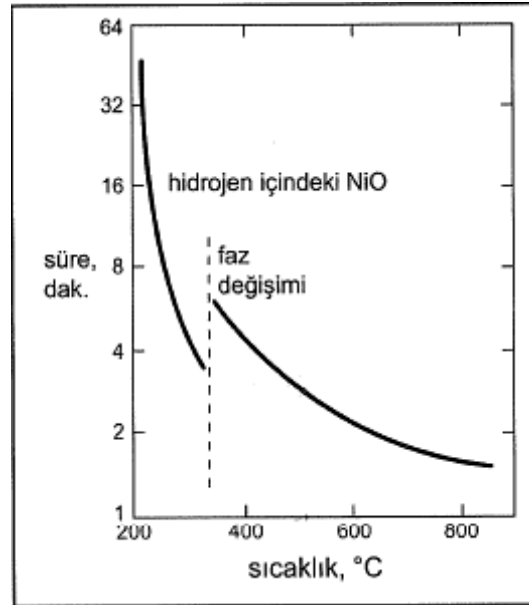
Yukarıda belirtilen olumsuz etkilerinden dolayı presleme ve sinterleme öncesi tozlardaki yüzey oksitlerinin temizlenmesi gerekir. Bu işlem indirgeyici gaz ortamında tozların tavllanmasıyla gerçekleştirilir. Tavlama işlemlerinin büyük bölümü metalin ergime sıcaklığının yarısının altındaki sıcaklıklarda yapılır. Hidrojen gazı ortamında yapılan indirgemedede Eşitlik 1.1'de verilen reaksiyon gerçekleşerek metal oksit (MO) metale (M) indirgenir [14,45].



Su atomizasyonu yöntemi ile üretilen demir tozlarında bulunan oksijen miktarının preslenebilirliğe etkisi Şekil 1.4'de [44,45] ve NiO'in hidrojen gazı atmosferinde indirgenmesinde indirgeme süresi ile indirgeme sıcaklığı arasındaki ilişki Şekil 1.5'de gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Su atomizasyonu yöntemi ile üretilen demir tozlarında bulunan oksijen miktarının ham mukavemete etkisi[46]

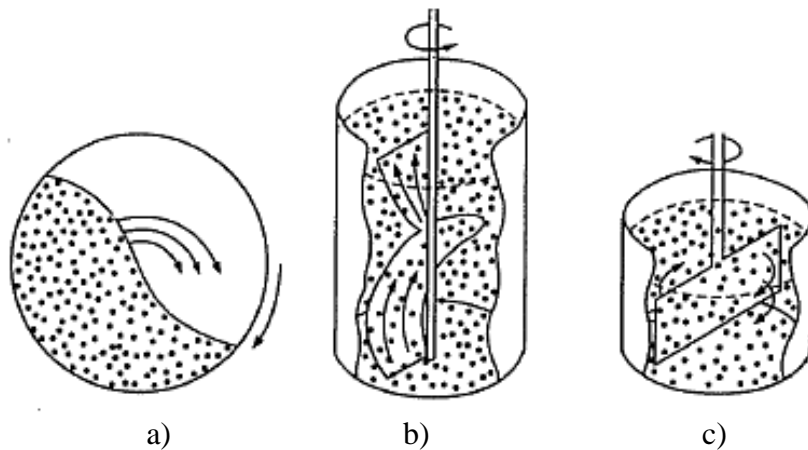


Şekil 1.5. NiO'nun hidrojen gazı atmosferinde indirgenmesinde indirgeme süresi ile indirgeme sıcaklığı arasındaki ilişki [14].

1.4.2. Toz Karıştırma

Toz karıştırma presleme öncesi uygulanan bir işlem olup, homojen bir toz-yağlayıcı karışımının elde edilmesi amacıyla uygulanır. Karıştırma işlemiyle ayrıca, farklı boyutlardaki toz taneciklerinin homojen dağılımı sağlanır. Kaba taneli tozlar arasındaki boşluklar ince taneli tozlarla doldurularak yoğunluk gradyanı minimuma indirilir. Hazırlanan toz numune içerisine belli oranlarda yağlayıcılar ilave edilir. Yağlayıcıların esas işlevi tozlar arası ve toz-kalıp sürtünmesini azaltmaktır. Yağlayıcı miktarları ağırlık olarak %0,5 – 1,5 arası oranlarda kullanılır. Yağlayıcı olarak parafin, stearik asit ve çinko stearat, lityum stearat gibi metal stearatlardır. Kullanılan yağlayıcılar sinterlemenin ilk aşamalarında parçadan uzaklaşır [47].

Toz karıştırma mekanizmaları; yayınma, konveksiyon ve kesmedir (Şekil 1.6). Yayınma ile karıştırma döner silindir içerisinde, konveksiyon ile karıştırma vidalı karıştırıcıda ve kesme ile karıştırma bıçaklı karıştırıcıda yapılmaktadır. Yayınma ile karıştırma her parçacığın toz kütlesi içinde hareketi ile oluşur. Sürekli dönen silindir taze tozları ve kesme düzlemlerini ortaya çıkarır ve bu durum parçacıkların birbiri içerisinde karışmalarını teşvik eder. Konveksiyonla karışım toz gruplarının bir yerden diğer bir yere taşınımı ile karışmalarını içerir. Vida, küçük toz grubunu alt yüzeyden keserek harman içerisinde üst kısma taşır. Kesme ile karıştırma sürekli ayrışma ve tozların kayma düzlemleri üzerinde akmaları ile oluşur [14].

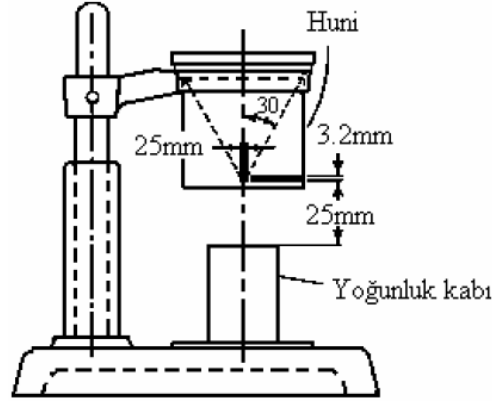


Şekil 1.6. Üç farklı toz karıştırma yönteminin şematik olarak gösterimi, a) yayınma, b) konveksiyon, c)kesme [14].

Karıştırma işleminde karıştırıcı hızı, karıştırma süresi ve doluluk oranı verimi etkiler. Karıştırıcının içi tozla dolduruldukça tozların göreceli hareketliliği azalır. Karıştırıcının doluluk oranı genellikle %30-40 arasında alınır[48]. Karıştırıcının dönme hızı karıştırıcı çapına göre belirlenir. Karıştırıcı çapı küçüldükçe dönme hızı artar. Çok düşük dönme hızı karıştırma süresinin uzamasına sebep olurken, yüksek dönme hızları toza merkezkaç kuvveti vererek toz akışını engeller. Karıştırma hızı ve süresi tozlarda aşınma, şekil ve mikroyapı değişimlerine yol açmayacak şekilde belirlenmelidir

1.4.3. Tozların Akış Hızı ve Görünür Yoğunluğunun Belirlenmesi

Tozlarda görünür yoğunluk ve akış hızı ASTM B212 standardına uygun olarak Hall akış ölçer aparatıyla ölçülür (Şekil 1.7). Bu aparat 2,5 mm çapında deliği olan 60° açılı bir huni ve tozların toplandığı yoğunluk kabından ibarettir. Akış özelliği düşük olan tozlar için 5 mm çapında deliği olan huni kullanılır. Görünür yoğunluk tozun sarsılmamış, gevşek durumdaki yoğunluğudur. Diğer bir ifade ile, toz ağırlığının kap hacmine bölümüdür. Akış hızı, 50 g ağırlığındaki toz kütlesinin Hall akış aparatından aktığı süre olarak ifade edilir. Gerek akış hızı ve gerekse görünür yoğunluk toz boyutu, toz yüzey pürüzlülüğü ve toz şekli arasında yakın bir ilişki vardır. Küresel şekle sahip tozlar en iyi akış özelliği sergilerler. Küresellikten uzaklaştıkça akış hızı azalır. Düzensiz, çubuksu, iğnemsu gibi toz şekilleri birbirlerini bağladıklarından çok düşük bir akış hızı gösterirler veya hiç akmazlar. Tozlar arası sürtünme görünür yoğunluk ve akış hızında esas etkili olan parametredir. Sürtünme, önemli ölçüde toz yüzey alanı ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Toz boyutu küçüldükçe yüzey alanı artar. Yüzey alanı arttıkça, birim toz kütlesindeki yüzey alanı ve dolayısıyla sürtünme miktarı artar. Sonuç olarak, tozlar daha yavaş hızda akar. Akış özelliği tozların karıştırma, harmanlama ve presleme özelliklerini etkiler.



Şekil 1.7. Hall akış aparatı [49]

1.4.4. Ham Yoğunluk ve Ham Mukavemet

Kalıpta sıkıştırılmış toza ham parça adı verilir. Presleme sonrası yoğunluk ham yoğunluk, presleme sonrası mukavemet ise ham mukavemet olarak adlandırılır. Ham mukavemet toz parçacıkların birbirini bağlamasından elde edilir. Tozların sertliği ham mukavemeti belirleyen esas parametredir. Yumuşak tozlar plastik deformasyona uğrayıp temas noktalarında sıvanarak bağ meydana getirirler. Sert tozlarda ise plastik deformasyon olmayacağından bağ oluşmaz. Böyle tozlarda ham mukavemet polimer esaslı bağlayıcı kullanılarak elde edilir. Toz şekli de ham mukavemet üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Düzensiz şekle sahip tozların ham mukavemeti küresel olanlara nazaran daha yüksek olur. Düzensiz yapıdaki tozlar yüksek ham yoğunluğa sıkıştırıldıkları zaman, parçacıklar soğuk kaynak olur ve mekanik olarak kilitlenir. Sıvanma ve kilitlenmenin her ikisi de ham mukavemete katkıda bulunur. Ham yoğunluk sıkıştırma sonrası parça hacmi kullanılarak belirlenir. Kullanılan toz ağırlığının parça hacmine bölünmesiyle elde edilir ve teorik yoğunluğun (gözeneksiz yoğunluk) yüzdesi olarak verilir.

1.4.5. Tozların Sıkıştırılması

Tozların basınçla deforme edilerek, aralarında bağ oluşturma işlemine toz sıkıştırma denir. Yoğunlaşma, yüksek basınçlarda toz parçacıklarını presleyerek elde edilir. Sıkıştırma sonrası elde edilen parçanın kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar bir yoğunluk kazandırılması gerekmektedir. Tam yoğunluk sinterleme sonrası elde edilir[50]. Tozlar basınç uygulandığında; önce parçacıklar birbiri üzerinden kayarak ve daha sonra da yüksek basınçlarda parçacıkların plastik deformasyonla şekil değiştirmeleriyle yoğunlaştırılırlar.

Sıkıştırma işleminin başlangıç aşamasında hızlı bir yoğunluk artışı olur. Gözenekler kapandıkça toz, yoğunlaşmaya karşı direnç gösterir. Sıkıştırma işlemi üç farklı yöntemle gerçekleştirilir. Bunlar;

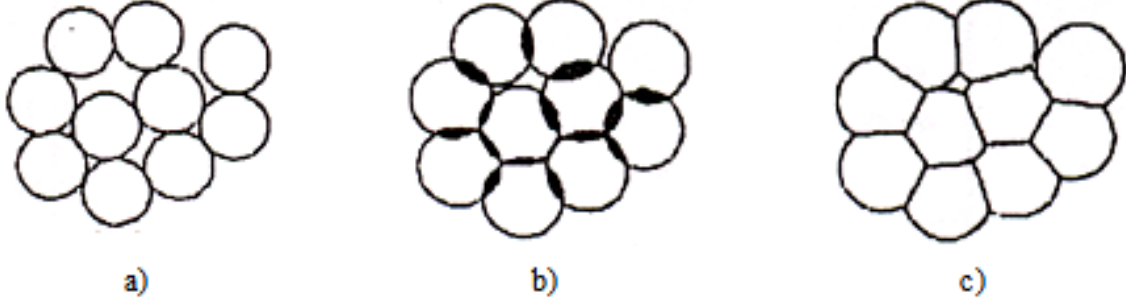
Eksenel sıkıştırma: Tozların sert bir metal kalıpta tek eksende basınç uygulayarak sıkıştırılmasıdır. Basıncın tek bir zimbardan uygulanması tek hareketli sıkıştırma olarak ifade edilirken; basıncın alt ve üst zimbaların her ikisinden aynı anda uygulanması işlemi çift hareketli sıkıştırma olarak adlandırılır. Aynı etki üst zımbanın basınç uygulaması sırasında kalıbın hareketli olması ile de elde edilebilir. Genellikle soğuk olarak uygulanmakla birlikte, ham yoğunluğun artırılması amacıyla ılık olarak da uygulanabilir. Ilık sıkıştırma, tozun ve kalıbın sıkıştırma öncesi ısıtılması işlemidir.

İzostatik sıkıştırma: Bu yöntem kademeli ve karmaşık şekilli parçalar ile boy-çap oranının büyük olduğu parçalarda kullanılır. Soğuk veya sıcak olarak uygulanabilir. İzostatik sıkıştırma işleminde toz lastik, lateks veya poliüretan gibi esnek bir kalıpta sızdırmaz hale getirilir. Daha sonra yağ veya su gibi bir sıvının olduğu haznenin içine konarak basınç uygulanır. Sıkıştırma her taraftan olduğu için nispeten homojen bir yoğunluk dağılımı elde edilir[51].

1.4.5.1. Kalıpta Eksenel Sıkıştırma ile Presleme

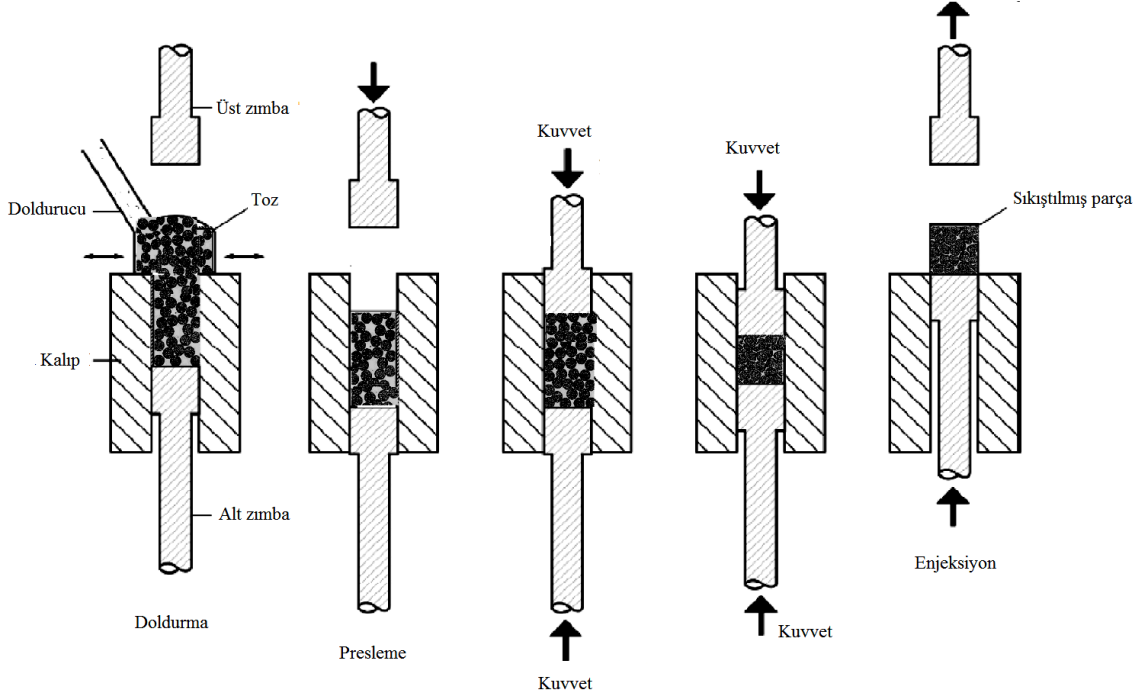
Tozların kapalı bir kalıpta tek eksende sıkıştırma ile kalıplanması, toz kalıplama yöntemleri arasında genellikle uygulanan yöntemdir. Çoğunlukla çift zımbalı sıkıştırma ile parçalar şekillendirilir. Kalıp içerisindeki toz başlangıç aşamasında görünür yoğunluktadır ve her bir toz tanesi ortalama olarak 4-6 arası komşusu ile temastadır (koordinasyon sayısı). Görünür yoğunluktan ham yoğunluğa geçişte etkili olan iki mekanizma; parçacıkların kayarak birbirleriyle kenetlenmesi ve plastik deformasyon mekanizmalarıdır. Presleme işleminin başlangıcından sonuna kadar olan safhaları üçe ayırmak mümkündür (Şekil 1.8). Presleme işleminin ilk aşamasında tozlar konumlarını değiştirerek gevşek durumdan sıkı paket durumuna geçmeye başlar. Bu aşamada parçacıkların elastik deformasyonu söz konusudur. İkinci aşamada yoğunlaşmada ani bir artış meydana gelir. Bu aşamada tozlar birbiri üzerinden kayarak yeniden konumlanırken, parçacıklar arasında kenetlenme meydana gelmiş olup geri dönüşü olmayan bir pozisyona girilmiş olur. Kenetlenen parçacıklar plastik deformasyona uğradıklarında son aşama başlamış olur. Basınç arttıkça tanecikler arası temas alanı artar. Son aşamada yoğunlaşma komşu

parçacıkların karşılıklı olarak bir araya gelmesiyle sağlanır. Başlangıçta 4-6 olan parçacık koordinasyon sayısı son aşamada 10-12 gibi rakamlara ulaşabilir. Sıkıştırma işlemi devam ettikçe parçacıklar arası temas alanı büyüyerek ham yoğunluğa ulaşılır. Son aşamada parçacıkların plastik deformasyonla sertleşmelerinden dolayı yoğunlaşma hızında bir azalma görülür [52,53].



Şekil.1.8. Preslemede ham yoğunluğa ulaşma aşamaları, a) ilk aşama, b) ikinci aşama, c) son aşama [52].

Presleme işlemi esnasında kalıpta oluşan ardışık hareketler Şekil 1.9'da gösterilmiştir. İşlemin başlangıç aşamasında üst zımba yukarıya çekilmiş durumda olup kalıp boşluğuna toz dolumu yapılır. Dolum sırasında alt zımbanın bulunduğu yer doldurma konumu olarak tanımlanır ve kalıbın içine ne kadar toz dolumu yapılacağını belirler. Toz kalıp boşluğuna doldurma pabucu ile doldurulur. Doldurma sırasında, tozun homojen olarak dolumunu sağlamak amacıyla alt zımba hareket ettirilebilir. Toz dolumu tamamlandıktan sonra doldurma pabucu geri çekilir ve ölçülü toz miktarı presleme konumuna çekilir. Üst zımba kalıba girer, alt ve üst zımbalar kalıp merkezine doğru ilerleyerek tozu sıkıştırır. Sıkıştırmadan sonra üst zımba geri çekilir ve alt zımba parçayı yukarı doğru iterek kalıptan çıkartır. Preslenmiş parça kalıbın içinde mekanik olarak kilitlemiş durumdadır. Parçayı kalıptan kolaylıkla çıkarabilmek için kalıbın yağlanması büyük önem taşır. Her bir parçanın kalıplanmasında bu çevrim tekrarlanır[50].



Şekil 1.9. Çift tesirli toz sıkıştırma işleminde ardışık hareketler [50].

1.4.5.2. Kalıpta Sıkıştırma İşlemine Etki Eden Parametreler

Preslemenin başlangıç aşamasında tozlar görünür mukavemete sahiptir. Presleme sonunda elde edilen mukavemet ise ham mukavemettir. Bir sonraki aşamada uygulanacak sinterleme işleminde maksimum mukavemete ulaşabilmek için sinterleme öncesi ham mukavemetin yüksek olması gerekir. Elde edilecek ham mukavemetin değeri presleme basıncı yanında esas itibariyle tozun birtakım özelliklerine bağlıdır. Bunlar; tozun kimyasal bileşimi, ortalama toz parçacık boyutu, boyut dağılımı, toz şekli ve tozun sertliğidir.

1.4.5.2.1. Presleme Basıncının Etkisi

Basınçla ham yoğunluk ilişkisini açıklamaya yönelik olarak bir çok araştırmalar yapılmış, çeşitli matematiksel eşitlikler kullanılmıştır. Bu eşitlikler arasında en yaygın kullanılanı Heckel eşitliğidir [13].

$$\ln \frac{1}{1-D} = k \times P + A \quad (1.2)$$

$$A = \ln \frac{1}{1 - D_0} \quad (1.3)$$

Burada;

D_0 :Tozun görünür yoğunluğu (gr./cm³)

D :Ham yoğunluğu (gr./cm³)

P : Presleme basıncı (MPa)

k :Sabit

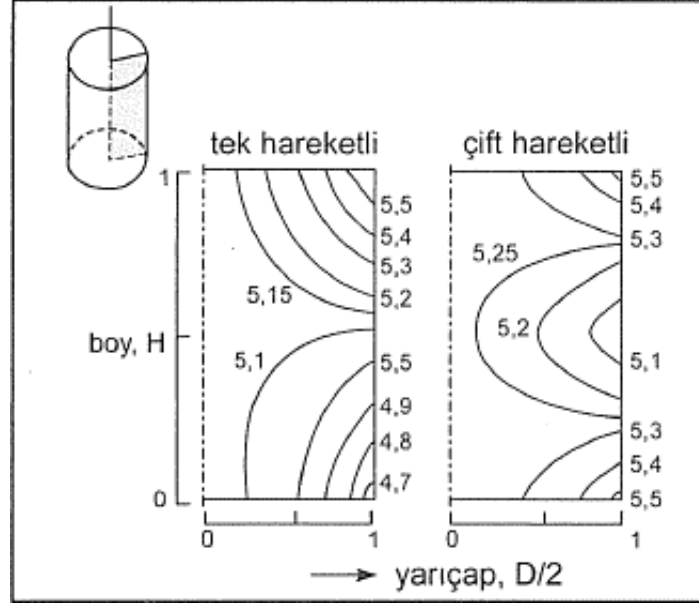
Çift tesirli presleme için ortalama sıkıştırma basıncı (PM) aşağıdaki gibi hesaplanabilir [14].

$$PM = P \times \left(1 - \frac{UZH}{D} \right) \quad (1.4)$$

Çeşitli metal alaşım tozlarının preslenmesinde basınçla ham yoğunluk arasındaki ilişki Tablo 1.1'de gösterilmiştir. Presleme işleminde tozlar deformasyonla birlikte sertleştikleri için hesaplanandan daha fazla basınç gerek duyulur. Yoğunlaşmaya sebep olan ortalama basınç her zaman uygulanan basınçtan daha azdır ve aşağıda verilen üç değişkene bağlıdır [50].

- H/D faktörünün temsil ettiği parça geometrisi,
- Z faktörünün temsil ettiği radyal basınç dağılımı,
- U faktörünün temsil ettiği kalıp duvarı sürtünmesi,

Yüksek ham yoğunluk kısa ve büyük çaplı parçalarda elde edilir. Karmaşık şekilli parçaların ortalama ham yoğunluk ve yoğunluk dağılımlarının iyi hesaplanması gerekir. Şekil 1.10'da tek ve çift tesirli presleme yoğunluk dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Silindirik bir kalıpta sıkıştırılmış bakır tozlarında yoğunluk değişimi [14].

Tablo 1.1. Çeşitli metal ve alaşım tozları için basınç-ham yoğunluk ilişkisi [50].

Malzeme Cinsi	Ortalama toz boyutu (μm)	Presleme basıncı (Mpa)	Ham yoğunluk (%)
Aluminyum	45	150-275	90-95
Pirinç	65	400-700	85-90
Bronz	85	200-300	85-90
Demir	110	480-820	85-92
Paslanmaz Çelik	65	700-840	85-88
Çelik	90	500-820	88-92
Tungsten	2	240-500	55-60
Tungsten karbür	1	200-350	60-62

Sünek tozlarda ham yoğunluk görünür yoğunluğun 2-3 katı olabilir. Sıkıştırma oranının (C_R) basınç altındaki yoğunluk değişimi şöyle ifade edilebilir;

$$C_R = \frac{V_L}{V_C} \quad (1.5)$$

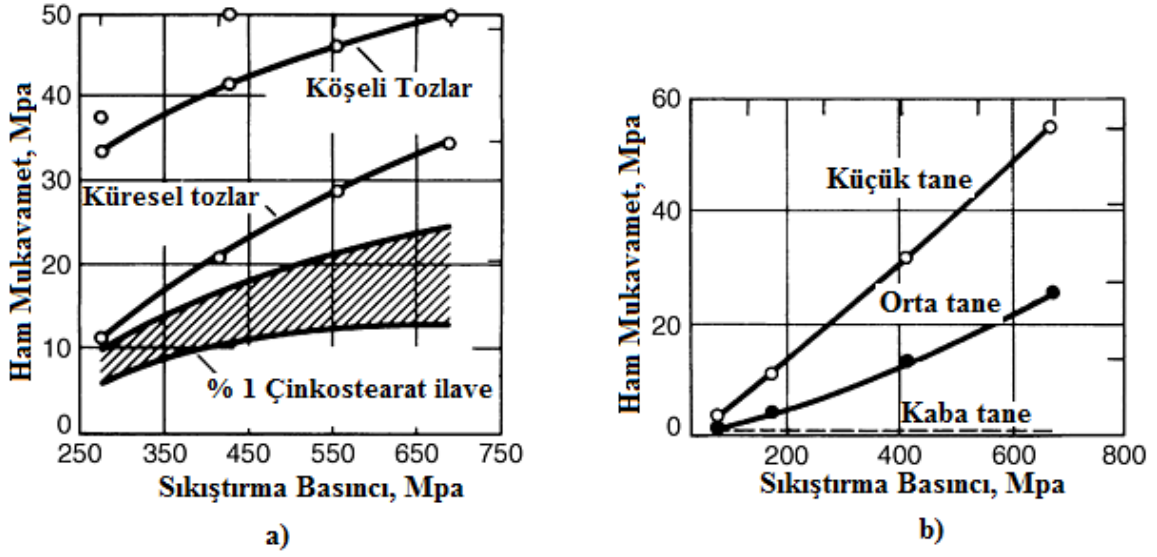
V_L gevşek toz hacmi, V_C sıkıştırılmış toz hacmi olmaktadır. Toz doldurma derinliğini hesaplamak için tek eksenli sıkıştırmada şu formülden faydalanır;

$$\text{Toz doldurma derinliği} = C_R \times h \quad (1.6)$$

Burada h; sıkıştırılmış yüksekliktir [14].

1.4.5.2.2. Ortalama Toz Boyutu, Boyut Dağılımı ve Toz Şeklinin Etkisi

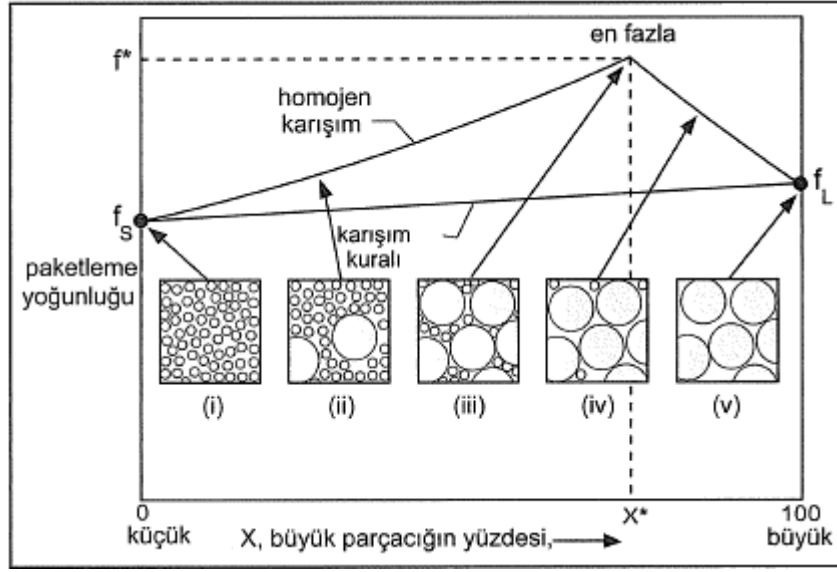
Toz boyutu ve toz şekli hem görünür yoğunluğa hem de preslenebilirliğe etki eder. Küçük ve küresel tozların görünür yoğunlukları büyük ve düzensiz tozlara göre daha yüksektir. Küresel tozların görünür yoğunlukları teorik yoğunluğun %60'ını bulurken, titreşime tabi tutulduklarında bu değer %64'e kadar çıkabilmektedir. Bu her parçacık için 6-7 temas noktası (koordinasyon sayısı) anlamına gelmektedir. Düzensiz şekilli tozlarda paketleme yoğunluğu teorik yoğunluğun %30'u olurken, düzensiz şekilli ve süngerimsi tozlarda çok daha düşük olmaktadır. Parçacıklar arasındaki sürtünme, kaymayı engellediğinde tozların paketlenme yoğunlukları düşer. Parçacıklar arası sürtünme, biri diğerini kayarak geçen parçacıkların sergilediği direnci ifade eder. Bu sürtünme, önemli ölçüde toz yüzey alanı, yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyin bileşimi tarafından belirlenir. Toz boyutu küçüldükçe (yüzey alanı arttıkça) parçacıklar arası sürtünme artar. Diğer taraftan, küresel tozların sıkıştırılabilme kabiliyetleri, köşeli yapıya sahip tozlarınkinden daha düşük olmaktadır. Şekil 1.11'de toz şekli ve toz boyutunun ham mukavemete etkisi gösterilmiştir [14].



Şekil 1.11. Toz şekli ve toz boyutunun ham mukavemete etkisi, (a) toz şeklinin etkisi, (b) toz boyutunun etkisi[46].

Toz parçacık boyutu ile sertlik arasında ters bir ilişki söz konusudur. Nispeten küçük parçacıklar hızlı soğuduklarından daha ince taneli bir mikroyapıya sahiptirler. İnce taneli mikroyapıların sertliği kaba tanelilere oranla daha yüksektir. Bu yüzden, nispeten küçük boyuttaki tozların preslenebilirlikleri kaba boyutta olanlara göre daha zordur [44]. 10 μm 'dan küçük parçacık boyutuna sahip tozlar presleme esnasında, dişi kalıp ve zımbanın rahat çalışabilmesi için bırakılan boşluklara dolabilir ve bir müddet sonra kalıbın çalışmasını engelleyebilir.

Ham yoğunluğa etki eden parametrelerden bir diğeri de toz boyut dağılımıdır. İki modlu (bimodal) dağılıma sahip tozların paketleme yoğunlukları tek modlu dağılıma sahip olanlardan daha yüksektir. Yüksek paketleme yoğunluğu aynı zamanda yüksek ham yoğunluk anlamına gelmektedir. Küçük parçacıklar seçilerek, büyük parçacıklar birbirinden ayrılmaya zorlanmadan, aralarındaki boşluklar doldurulur. Hatta daha küçük parçacıklar seçilerek kalan boşlukların içerisine yerleştirilmek suretiyle paketleme yoğunluğunda daha da yüksek değerlere ulaşılabilir. Bu durum Şekil 1.12'de gösterilmiştir. Yapılan deneyler; iki farklı boyutta tozların karışımı ile oluşan karışımda, büyük parçacık/küçük parçacık boyut oranınının 7/1 civarında en yüksek paketleme yoğunluğunun elde edildiğini; ağırlık oranı olarak da %73,4 oranında büyük parçacıklar ve %26,4 oranında küçük parçacıktan oluşan dağılımın %87 civarında paketleme yoğunluğuna ulaştığını ortaya koymuştur. Karışıma katılan boyut farklılığı sayısı arttıkça elde edilen paketleme yoğunluğu artmaktadır. Bu durum Tablo 1.2'de gösterilmiştir [14].



Şekil 1.12. Toz boyut dağılımının paketleme yoğunluğuna etkisi [14].

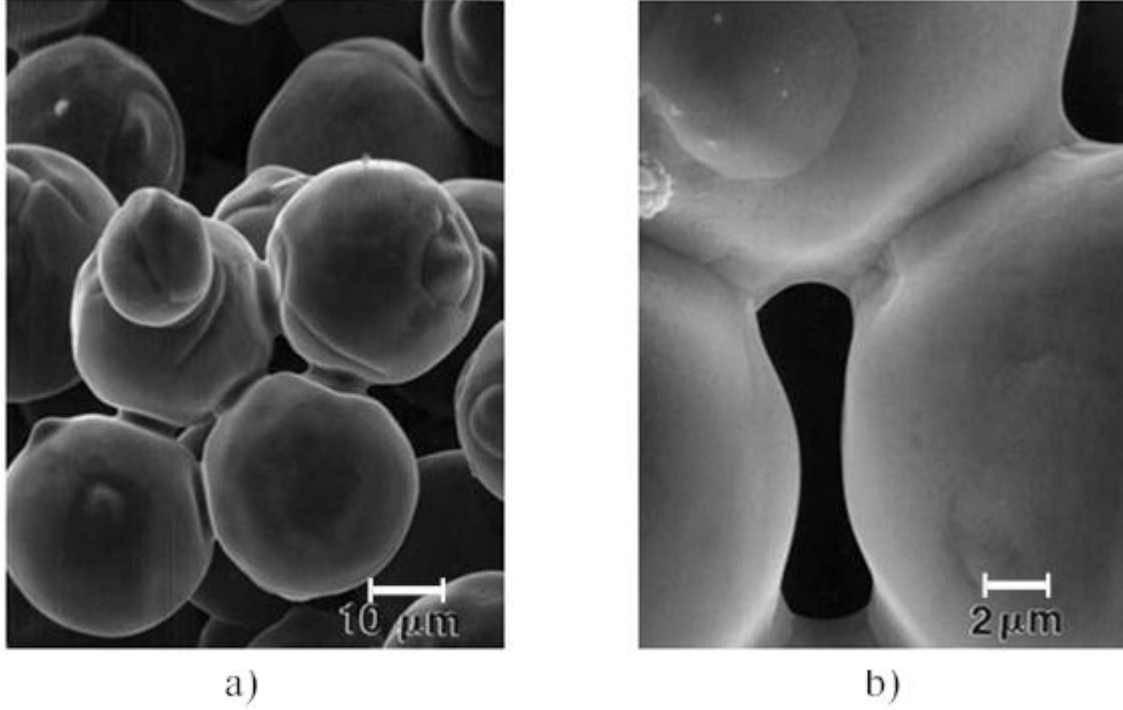
Tablo 1.2. Parçacık boyut oranı ve ağırlık yüzdesinin paketleme yoğunluğuna etkisi[14].

Bileşen Sayısı	Boyut Oranı	Ağırlık Yüzdesi	Paketleme Oranı
1	-	100	0,64
2	7/1	73/27	0,86
3	49/7/1	75/14/11	0,95
4	343/ 49/7/1	73/14/10/3	0,96

1.4.6. Tozların Sinterlenmesi

Sinterleme, preste sıkıştırılmış gözenekli yapıdaki ham parçadan gözeneksiz yapıda parça elde etmek amacıyla uygulanan ısıl işlemdir. Bu işlem, birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda birbirine bağlanmasını sağlar. Bu bağlanma, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleriyle oluşabilir. Bazı durumlarda sıvı faz oluşumu ile de gerçekleşebilir. Mikroyapı ölçeğinde bağlanma, temas eden parçacıklar

arasında boyun oluşumu ile gerçekleşir. Şekil 1.13'te verilen elektron mikroskobu görüntüsünde küresel tozlar arasında boyun oluşumu görülmektedir[54,55].

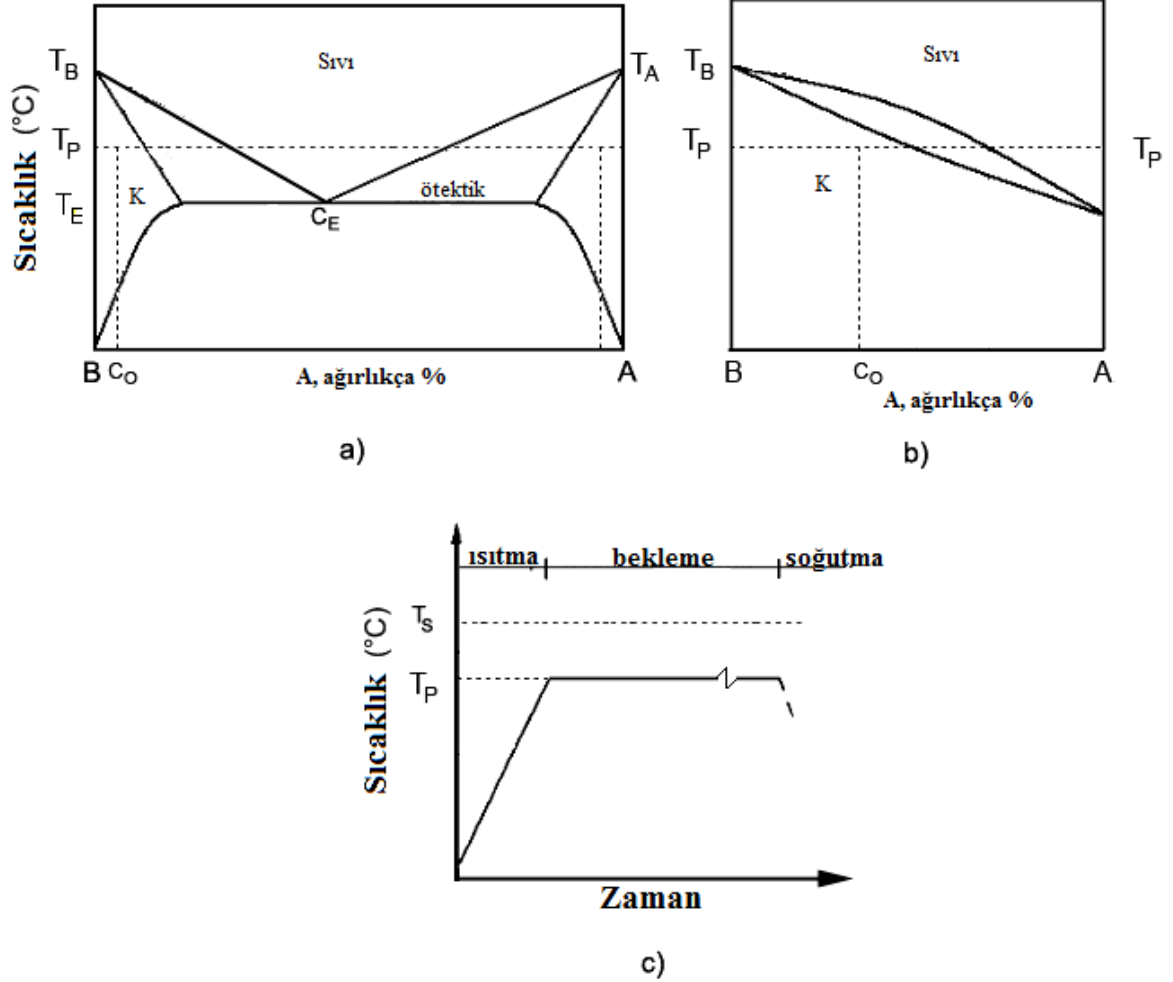


Şekil 1.13. 1000 °C'de vakumda 30 dakika sinterlenen nikel tozları arasında oluşan sinter bağları, a) çok sayıdaki parçacık arasında bağ oluşumu, b) üç adet parçacık arasında bağ oluşumu [55].

1.4.6.1. Katı Hal Sinterlemesi

Metal veya alaşımın ergime noktası altında bir sıcaklıkta yapılan sinterleme işlemidir. Şekil 1.14'de ötektik ve izomorfuz faz diyagramlarında gösterildiği gibi, c_0 bileşimindeki bir alaşımın sinterleme sıcaklığı T_p sıcaklığını aşmamalıdır. Sinterleme işlemi difüzyonla gerçekleşen bir kütle transferi olayıdır. Uygun sıcaklık ve sürede atomların yayınımları ile kütle transferi gerçekleşir ve tozlar arasında bağ oluşur. Bu açıdan sinterleme sıcaklığı ve süresi en önemli işlem değişkenleridir. Kullanılan tozun bileşimine ve ortalama boyutuna bağlı olarak bu değişkenler belirlenir. Küçük parçacıklar yüksek yüzey enerjisine sahip olduklarından, yüksek sıcaklıkta atomların yayınımları ve küçük parçacıkların yüzey enerjilerinin azalmasıyla sinterleme gerçekleşir. Tozlarda yüzey enerjisi toz boyutuyla ters orantılıdır. Küçük boyutlu tozlar, büyük boyutlu olanlara nazaran daha yüksek yüzey enerjisine sahiptirler ve daha hızlı sinterlenirler. Büyük boyutlu

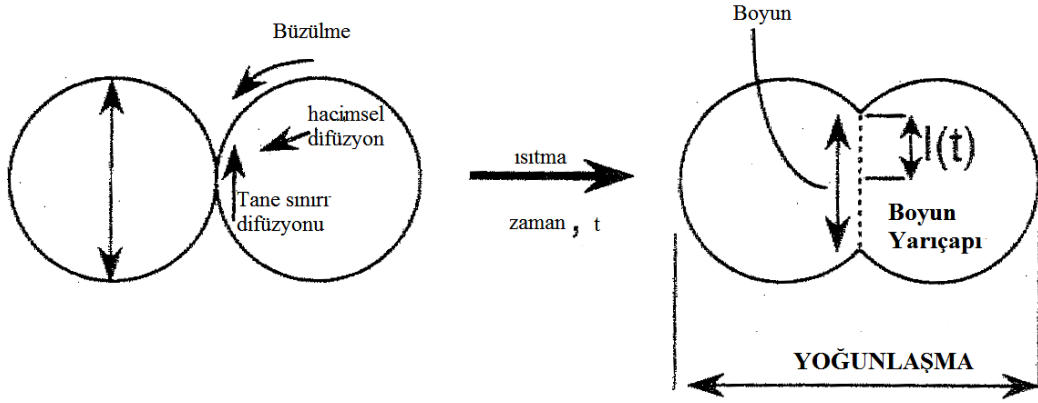
tozların sinterlenmesinde difüzyon mesafesinin uzamasından dolayı tam yoğunluğa ulaşmak için daha uzun süre sinterlemek gerekir[55].



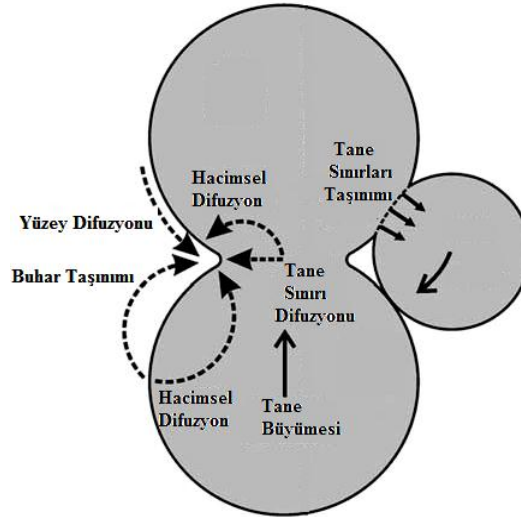
Şekil 1.14. Katı hal sinterlemesi için şematik faz diagramları, a) ötektik faz diagramı, b) izomorfuz faz diagramı, c) Sinterleme işlemi için zaman-sıcaklık diagramı [55].

Sinterleme başlangıcında tozlar birbirleriyle noktasal temas halindedirler. Sinterleme işlemi ilerledikçe birbirine temas eden parçacıklar arasındaki bağ büyür ve birleşir. İki parçacığın tamamen birleşmesiyle çapı başlangıç çapının 1,26 katı olan tek parçacık oluşur. Küresel tozların temas noktalarına boyun adı verilir. Boyun bölgelerinin büyümesi ile morfolojik değişimler başlar. Boyun büyümesi, birbiriyle temas eden tozlardan boyun bölgesine doğru atomların difüzyonu ile gerçekleşir. Tane sınırları kütle transferinin sağlandığı yerlerdir. İki eş küresel toz arasında boyun oluşumu şematik olarak Şekil 1.15.'de gösterilmiştir [54].

Sinterlemede bağ oluşumu, yüzey difüzyonu, tane sınırı difüzyonu ve tane içi hacim difüzyonu mekanizmalarıyla gerçekleşir (Şekil 1.16). Sinterlemede atomların hareket etmesi sıcaklıkla gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda atomlar komşularıyla bağlarını koparıp yeni yerlerine gidecek düzeyde enerjiye sahip olurlar. Atomların hareket edebilmesi için gerekli olan en düşük enerjiye aktivasyon enerjisi denir [56].



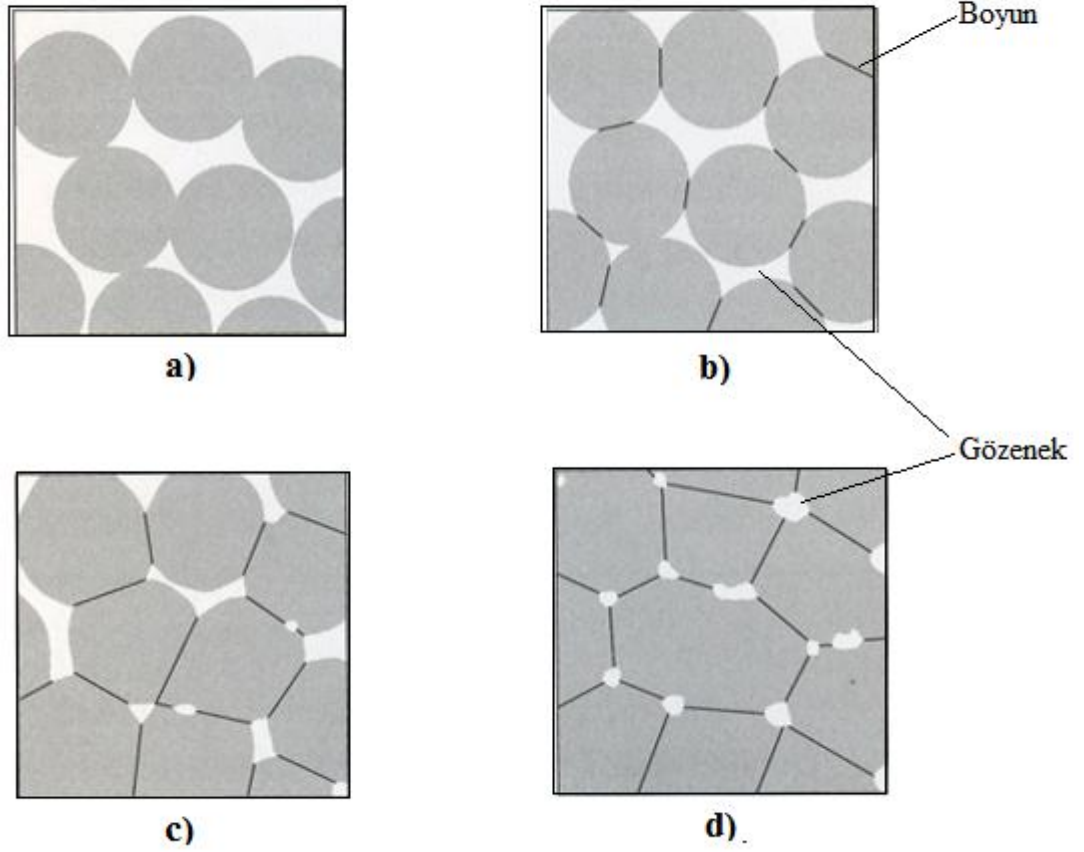
Şekil 1.15. İki eş küresel toz arasında boyun oluşumu [54].



Şekil 1.16. Katı hal sinterlemede difüzyon mekanizmalarının şematik gösterimi [56].

Katı hal sinterlemede ilk aşamasında birbirinden bağımsız olarak boyun büyümesi görülür. Sıkıştırılmamış tozlarda temas küçük noktalar ile başlar. Başlangıçta

gözenekler düzensiz ve köşeli şekillidir. Optimum sinterlemede gözenekler küçük ve yuvarlak biçimde olmalıdır. Tane sınırı difüzyonu mekanizması gelişirken gözenekler tane sınırlarında yoğunlaşır. Tane sınırlarına yerleşen gözenekler tane büyümesini engeller. Sinterlemenin ara aşamasında boyunlar birbiri ile etkileşerek büyürler. Gözenekler yuvarlak ve düzgün hale gelmeye başlarlar. Sinterlemenin ilerleyen aşamalarında taneler büyür, gözenekler küçülür. Tane sınırı alanlarını azaltan gözenekler nedeniyle sistem enerjisinde bir azalma olur. Tane sınırlarından daha yavaş hareket eden gözenekler tane büyümesi esnasında tane sınırları tarafından ya sürüklenir ya da yok edilirler [55,57].



Şekil 1.17. Sinterlemenin değişik aşamalarının şematik olarak gösterimi, a) gevşek toz, b) ilk aşama, c) ara aşama, d) son aşaması [55].

1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Yapılan literatür araştırmasında hızlı katılaştırma yöntemiyle üretilmiş tozların presleme parametreleri incelenmiş, toz boyutunun, boyut dağılımının ve presleme basıncının ham yoğunluğa etkileri ortaya konmuştur. Koruyucu gaz atmosferi kullanılarak yapılan sinterleme işleminde, sinterleme süresi ve sıcaklığı gibi sinterleme parametrelerinin sinterleme sonrası elde edilen içyapıya, sinter yoğunluğuna, sertlik ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmanın amacı, su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu yöntemiyle hızlı katılaştırılmış Nikel esaslı (Ni-Cu) Monel 400 alaşımı tozları üretmek, tek eksenli çift etkili pres kullanılarak yapılan presleme işleminde, ortalama toz boyutunun, toz boyut dağılımının ve pres basıncı gibi presleme parametrelerinin ham yoğunluk ve mikrosertlik değerlerine etkilerini araştırmak, çeşitli pres basınçlarında içyapı ve mikroyapıda olan değişimleri incelemek, %99,999 saflıkta hidrojen atmosferinde yapılan sinterleme işleminde, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi sinterleme parametrelerinin içyapıya, sinter yoğunluğuna, sertlik ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklere etkilerini ortaya koymaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Alaşım

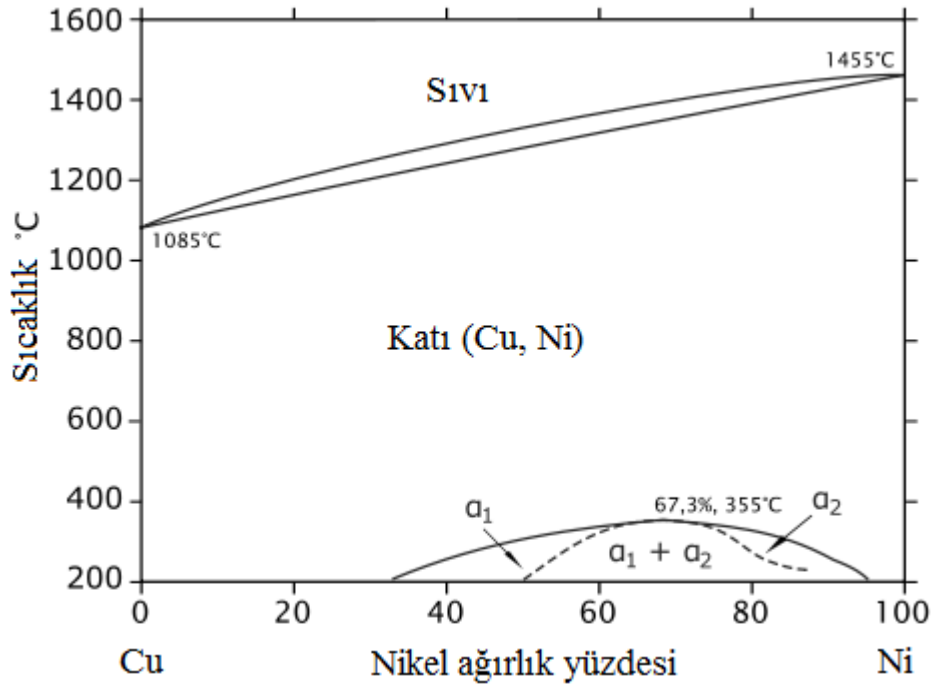
Bu çalışmada Ni-Cu alaşımı (Monel 400) kullanılmış olup, bu alaşımdan su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu yöntemiyle toz üretimi yapılmış, üretilen tozların preslenme ve sinterlenme özellikleri incelenmiş, presleme ve sinterleme parametrelerinin yoğunluk, sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı gibi mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Kullanılan Monel 400 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 2.1’de, bazı fiziksel özellikleri Tablo 2.2’de ve Ni-Cu esaslı ikili izomorfuz faz diyagramı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Monel 400 alaşımı kimyasal bileşimi (% Ağı.)

Element	Ni	Cu	Mn	Fe	Si	C	P	S
	66.8	31.45	1.33	0.97	0.38	0.1	0.013	0.002

Tablo 2.2. Monel 400 alaşımının bazı fiziksel özellikleri

Solidüs-Likidüs sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavameti (MPa)	Akma Mukavameti (MPa)	% Uzama	Isıl iletkenlik (W/m.°K)
1300-1350	8,80	550	240	48	21,8



Şekil 2.1. Ni-Cu alaşımı faz diyagramı

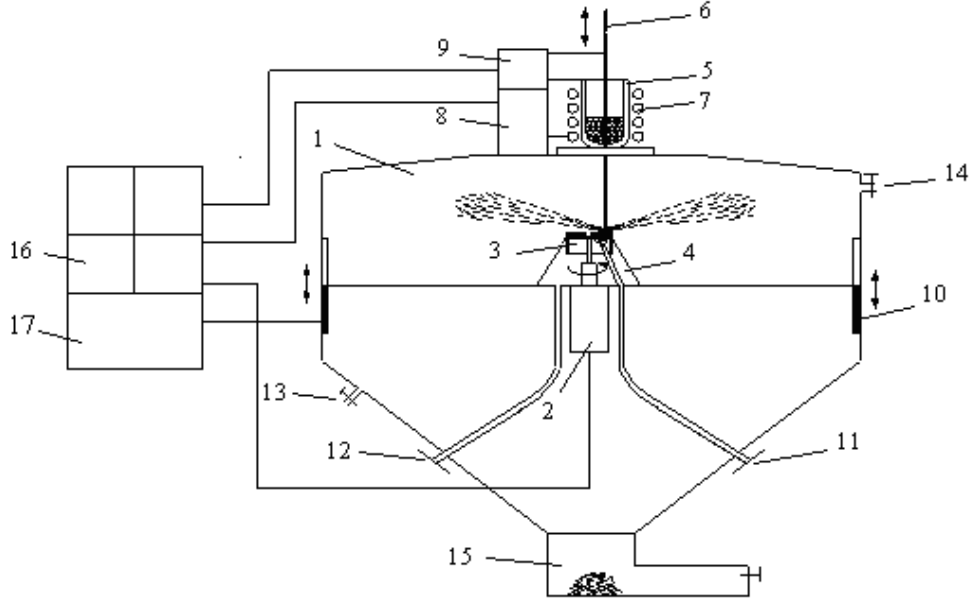
2.2. Atomizasyon Ünitesi

Monel 400 tozlarının üretimi KTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde mevcut bulunan su jeti soğutmalı döner disk atomizasyon ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Şematik resmi Şekil 2.2'de ve fotoğraf görüntüsü Şekil 2.3'de verilen atomizasyon ünitesinde, Monel 400 alaşımı indüksiyon ısıtma sistemiyle grafit bir potada ergitilmiş olup, potanın dip kısmındaki delikten serbest düşme ile yüksek hızda dönmekte olan su jeti soğutmalı bakır disk üzerine akıtılarak atomize edilmiştir. Buradan alınan tozlar eleme işlemine tabi tutulmuş ve 355 μm elek altına geçen tozlar bu çalışmada kullanılmıştır.

Atomizasyon ünitesi dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar:

1. Metal veya alaşımın ergitildiği ergitme ünitesi,
2. Atomizasyon odası,
3. Diskin dönme hızının ayarlandığı, hidrolik ve indüksiyon sisteminin kontrolünün sağlandığı, sıvı metalin akmasını sağlayan seramik tıkaç ve potanın aşağı-yukarı hareketinin sağlandığı kontrol ünitesi,
4. İndüksiyon bobini soğutma işleminin yapıldığı soğutma ünitesidir.

Bu üniteler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır



Şekil 2.2. Su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesi şematik resmi

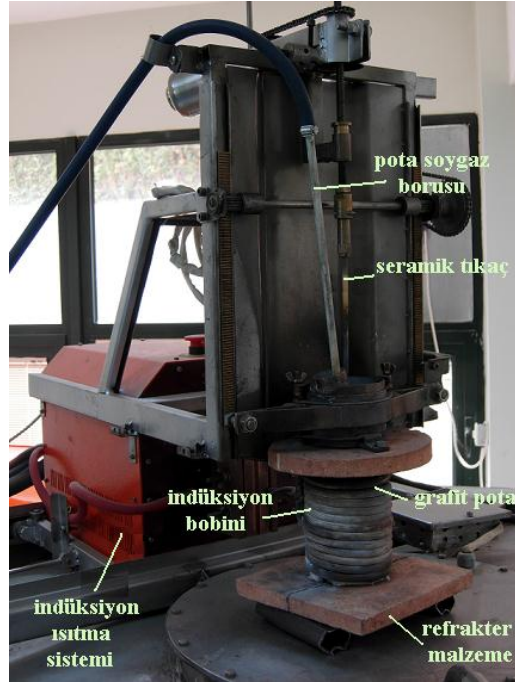
(1- Atomizasyon odası, 2- atomizasyon disk motoru, 3- atomizasyon disk, 4- saç koni, 5- grafit pota, 6- seramik tıkaç, 7- indüksiyon bobini, 8- indüksiyon ısıtma sistemi, 9- pota ve tıkaç motoru, 10- hidrolik piston-silindir, 11- disk soğutma suyu girişi, 12- disk soğutma suyu çıkışı, 13- sovgaz girişi, 14- sovgaz çıkışı, 15- toz toplama bölümü, 16- kontrol ünitesi, 17- soğutma ünitesi)



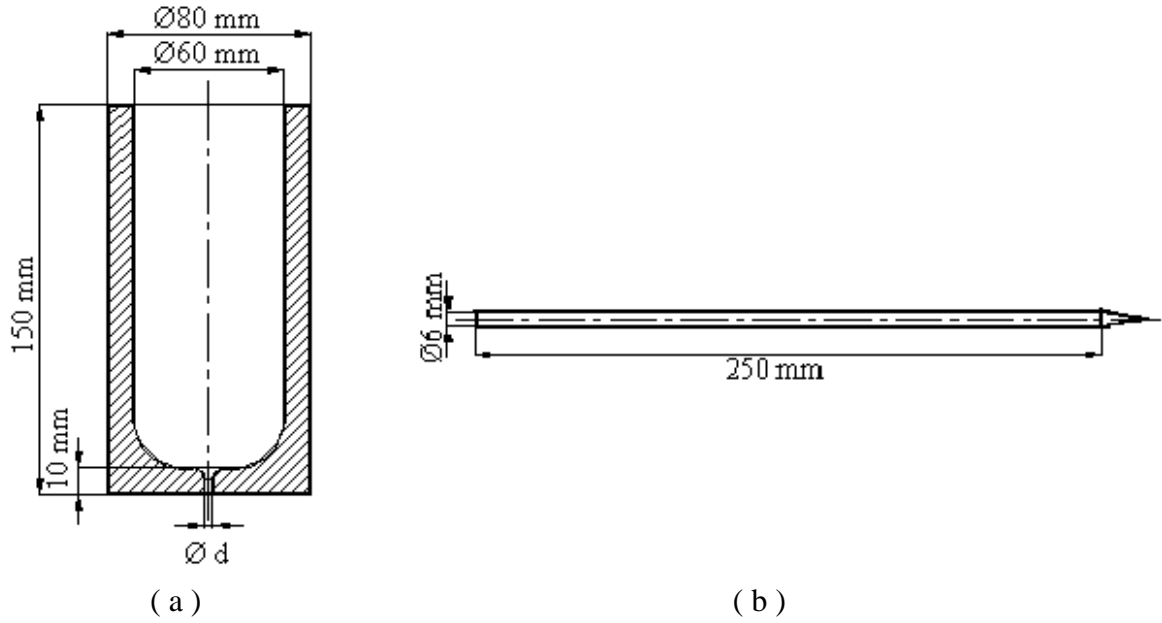
Şekil 2.3. Su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesi fotoğrafı

2.2.1. Ergitme ünitesi

Ergitme ünitesi, indüksiyon bobini, grafit pota, seramik tıkaç ve istenildiğinde pota içine soy gaz göndermeye yarayan seramik bir borudan oluşmaktadır (Şekil 2.4). İndüksiyon bobini olarak 10 mm çapında bakır boru kullanılmış olup, sarılmış haldeki iç çapı 95 mm ve yüksekliği ise 120 mm'dir. Alaşımı eritmek için 50 KW gücünde yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma sistemi kullanılmıştır. Ergitme işlemi, şematik resmi Şekil 2.5-a'da gösterilen grafit malzemeden imal edilen potada yapılmış olup, alaşımın sıcaklığı infrared sıcaklık kontrol cihazıyla kontrol edilmiştir. Potanın dip kısmına açılan delik (nozül) aracılığıyla sıvı alaşım disk üzerine akıtılmıştır. Ergitme işlemi süresince seramik tıkaç (Şekil 2.5-b) deliği kapatmakta olup, istenilen sıcaklığa çıkıldığında kontrol ünitesindeki butona basılarak tıkaç delikten kaldırılmakta ve sıvı metal disk üzerine akıtılmaktadır. Atomizasyon parametrelerinin toz özelliklerine etkileri daha önceden yapılan çalışmalarda incelenmiş olmasından dolayı, bu çalışmada herhangi bir atomizasyon parametresinin etkisi incelenmemiş, belirlenen sabit parametrelerle doğrudan Monel 400 alaşımı tozu üretilmiştir. Kullanılan potanın dip kısmındaki delik çapı 2,5 mm olup, alaşımın sıcaklığı infrared sıcaklık kontrol cihazıyla ölçülmüştür. Yapılan çalışmalarda, Monel 400 alaşımı 1500 °C sıcaklıkta atomize edilmiştir.



Şekil 2.4. Ergitme ünitesi fotoğrafı



Şekil 2.5. a) Pota, b) tıkaç boyutları

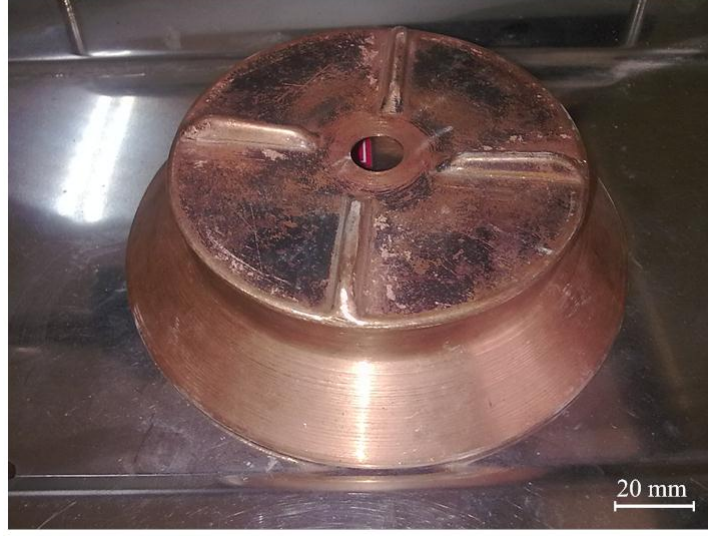
2.2.2. Atomizasyon Odası

Sıvı alaşımın toz halinde üretiminin gerçekleştiği bölüm, atomizasyon odası olarak adlandırılmaktadır. Atomizasyon odası iki bölümden oluşmaktadır; düzgün dairesel şekilde olan üst kısım ve aşağıya doğru daralan konik dairesel alt kısım. Düzgün dairesel olan üst

kısım 4 adet hidrolik piston-silindir mekanizması yardımıyla yukarı-aşağı hareket ettirilerek atomizasyon odası açılıp kapanmaktadır. Atomizasyon odasında atomizasyon disk, disk tahrik motoru, sac koni, disk soğutma suyu ile argon gazı giriş-çıkış boru ve hortumları mevcuttur.

Disk üzerine akıtılan sıvı alaşımın atomizasyon diskinde parçalanmasıyla oluşan damlacıklar atomizasyon odasında katılırlar. Katılma işlemi damlacık boyutuna göre hemen disk üzerinde, havada veya nispeten büyük boyutlu olanlar için atomizörün duvarına çarpma esnasında gerçekleşir. Atomizörün duvarına sıvı halde çarpan damlacıklar çarpmanın etkisiyle yassı şekilde ve büyük boyutlu olarak katılmaktadır. Bu tür tozların varlığı üretilen tozların ortalama boyutunu yükseltmekte ve verimi düşürmektedir. Bu durum göz önüne alınarak, atomizasyon odası dairesel formda ve nispeten büyük çaplı olarak üretilmiştir. Düzgün dairesel formda olan atomizasyon odasının çapı 2500 mm, yüksekliği 600 mm olup, alt kısmı konik olarak tasarlanarak atomize olan tozların kolaylıkla toz toplama bölgesine ulaşması amaçlanmıştır. Konik olan alt kısmın yüksekliği ise 1500 mm'dir. Üretilen tozlara herhangi bir kirliliğin bulaşmaması için atomizasyon ünitesinin tamamı AISI 304 paslanmaz çelik sacdan imal edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda, disk malzemesi olarak ısı iletim katsayısı yüksek olan elektrolitik bakır seçilmiş olup, disk çapı 100 mm et kalınlığı 0,5 mm'dir. Ayrıca, su ile soğutmanın yapılabilmesi için disk, ters kap şeklinde tasarlanmıştır. Diskin kanatçık sayısı 4 olup kanatçık profili dikdörtgen şekillidir (3×4 mm) (Şekil 2.6). Disk soğutma suyunun sıvı alaşım ile ve üretilen tozlarla temasını engellemek için metal sac koni kullanılmıştır. Atomizasyon esnasında sıvı metal disk merkezinden yaklaşık 35 mm uzağa akıtılarak disk kenarından maksimum hızla atomize olması sağlanmıştır.



Şekil 2.6. Atomizasyon diski

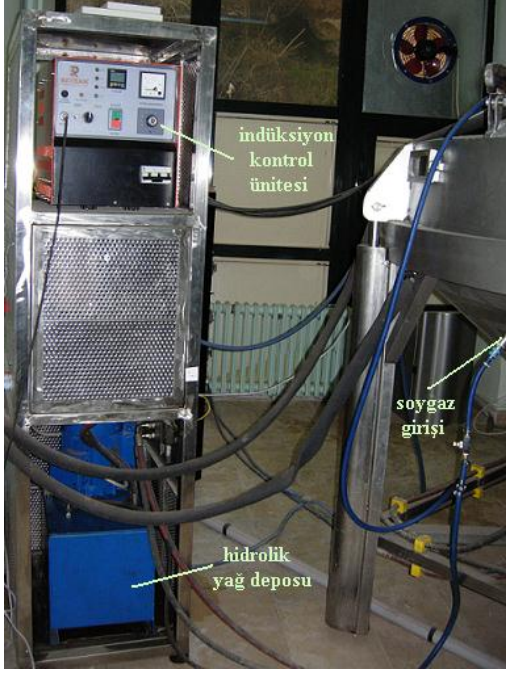
Atomizasyon diski, 3,2 KW gücünde ve 24000 d/d devir sayısına sahip bir AC elektrik motoru ile döndürülmektedir. Disk dönme hızı, kontrol ünitesinden 0-24000 d/d aralığında istenen devir sayısına ayarlanabilmektedir. Atomizasyon esnasında disk üzerine akıtılan sıvı alaşım diskin kenarında maksimum hıza ulaşarak atomize olmaktadır. Bu bakımdan, diskin çevresel hızı olarak en dış çapa (100 mm) karşılık gelen hız alınmıştır. Bu çalışmada, toz üretimi 14400 d/d disk devir sayısında yapılmış olup, bu devir sayısına karşılık gelen disk çevresel hızı 75 m/s'dir.

Atomizasyon diski su jeti ile beraber alttan soğutulmakta olup, soğutmanın etkin yapılabilmesi için disk ters kap şeklinde tasarlanmıştır. Diski soğutan suyun debisi dakikada 15 litre ve sıcaklığı 12 °C olarak ölçülmüş olup, 4 adet hortum yardımıyla tahliye edilmektedir. Böylece sac koni içinde suyun birikmesi önlenmektedir. Atomizasyon işlemi, tozların oksitlenmesini önlemek amacıyla soygaz atmosferi altında yapılmaktadır. Bu amaçla, atomizasyon odasına dakikada 20 litre akış debisinde, yüksek saflıkta (%99.999) argon gazı gönderilmektedir. Atomizasyon odasındaki havanın, daha yoğun olan argon gazı tarafından süpürülüp üst kısımda bulunan tahliye borusundan dışarı atılabilmesi amacıyla deney öncesinde atomizasyon odasına argon gazı gönderilmektedir.

2.2.3. Kontrol Ünitesi

Atomizasyon esnasında gerekli olan kumanda ve ayar işlemlerinin tamamı ayrı bir ünite olarak tasarlanmış olan kontrol ünitesinden yapılmaktadır. Kontrol ünitesi;

indüksiyon ısıtma sistemi, hidrolik kumanda, disk dönme hızı ayarı, tıkaç ve potanın aşağı-yukarı hareket kontrolü bölümlerinden oluşmaktadır (Şekil 2.7).



a)



b)

Şekil 2.7. Kontrol ünitesi , a) indüksiyon ısıtma sistemi ve hidrolik motor üniteleri, b) döner disk motoru, hidrolik motor, pota ve tıkaç kontrol butonları ile disk hızı göstergesi panosu.

2.2.4. Soğutma Ünitesi

Atomize edilecek alaşımın ergitildiği indüksiyon ısıtma sisteminde, indüksiyon bobininin soğutulması işlemi Şekil 2.8'de gösterilen soğutma ünitesi aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu ünite üzerinde, indüksiyon bobinine giren soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları okunabilmektedir.



Şekil 2.8. Soğutma ünitesi

2.3. Ortalama Toz Boyutu Hesabı

Atomizasyon deneylerinde her seferde ortalama 400 g Monel 400 alaşımı ergitilerek toz üretilmiştir. Deneyler sonrasında, toz toplama bölümünde biriken ve atomizörün iç duvarlarına tutunmuş olan tozlar toplanarak 355 μm elekten elenmiş, 355 μm elek altına geçenler değerlendirilmiş, diğerleri ise hurdaya ayrılmıştır. Ortalama toz boyutu ve boyut dağılımının hesaplanmasında Malvern Mastersizer 2000 model parçacık boyut analiz cihazı kullanılmıştır. Yapılan analiz neticesinde tozların ortalama boyutu (d_{10}), (d_{50}) ve (d_{90}) hesaplanmış ve boyut dağılımı grafikleri çizilmiştir. Bu işlem için her bir deneyde üretilen tozlardan konileme-dörtleme yöntemiyle yaklaşık 5-7 g numune alınmıştır. Ayrıca, tozların boyutlarına göre sınıflandırılması amacıyla Retch marka titreşimli eleme cihazı kullanılmıştır. Tozlar 25, 36, 45, 63, 90, 125, 180 ve 250 μm 'luk elek serisinde 20 dakika süreyle elenmiştir.

2.4. Üretilen Tozların ve Kompakt Parçaların Morfoloji ve Mikroyapı İncelemeleri

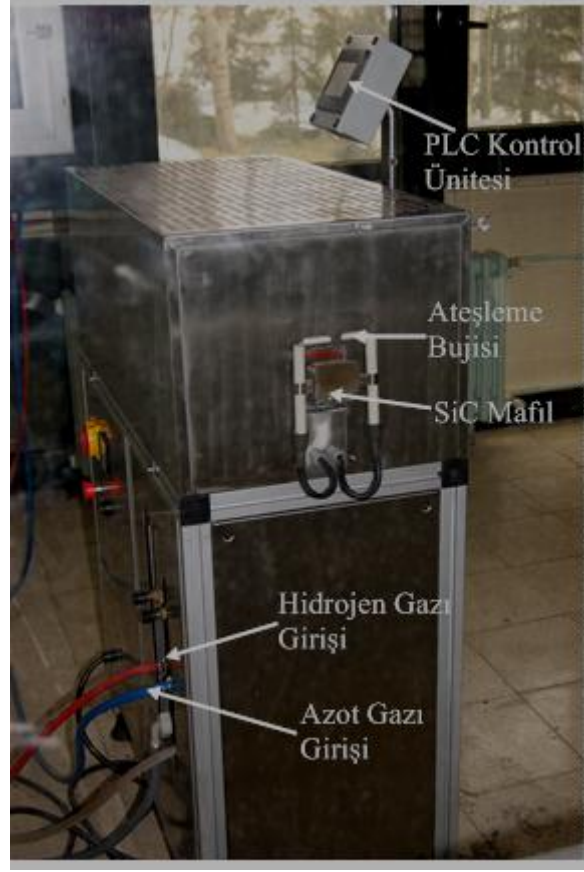
Üretilen Monel 400 alaşımı tozların morfoloji ve mikroyapıları ile tozlardan presleme ve sinterleme ile üretilmiş parçaların mikroyapı incelemeleri Zeiss EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yapılmıştır. Monel 400 tozlarının morfoloji incelemeleri çift taraflı yapışkan karbon bandı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yine aynı

tozların mikroyapı incelemeleri için tozlar, bir kalıp içerisinde soğuk sertleşen epoksi reçine ile yataklandırılmıştır. Daha sonra sırasıyla 800, 1000 ve 1200 numaralı zımparalarda sulu ortamda zımparalanmış; 1 µm altı boyutta alümina süspansiyonu kullanılarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi, taze hazırlanan 8 g FeCl₃, 25 mL HCl , 100 ml H₂O'dan oluşan dağlama ayırıcı kullanılarak 20 s süre ile dağlanmıştır. SEM incelemeleri öncesinde, reçine numuneye yataklanmış tozlar iletkenlik sağlanması amacıyla altın kaplanmıştır.

2.5. Toz Yüzeylerindeki Oksit Tabakanın İndirgenmesi

Monel 400 alaşımından toz üretme işlemi esnasında, tozlar yüksek sıcaklıkta olmalarından dolayı havada bulunan oksijenle tepkimeye girerek yüzeyleri ince bir oksit tabakasıyla kaplanmıştır. Bu oksit tabaka hem çok sert hem de yüksek sıcaklıkta ergiyen bir bileşiktir. Bu bileşiğin sert olması, presleme işleminde tozların plastik deformasyona uğrayarak şekil değiştirmesini, diğer bir ifade ile tozlar arasında mekanik kilitlemeyi engelleyerek presleme ile ham parça elde edilmesine mani olur. Oksit tabakanın yüksek sıcaklıkta ergiyen bir bileşik olması sinterlemeyi olumsuz etkiler, hemen hemen imkansız hale getirir. Belirtilen bu olumsuzluklardan dolayı toz yüzey oksit tabakanın presleme öncesi indirgenmesi gerekir.

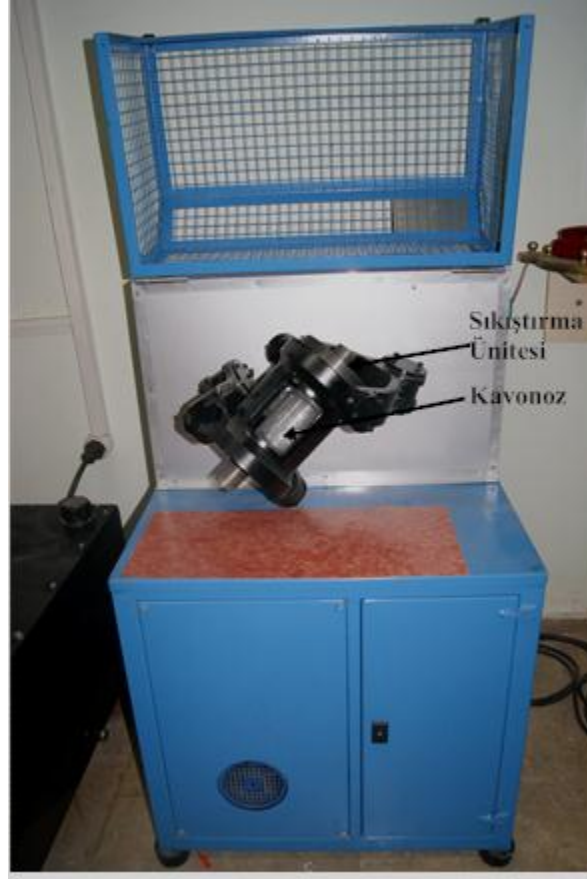
İndirgeme işlemi atmosfer kontrollü bir sinterleme fırınında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.9). Monel 400 alaşımı tozları PLC kontrollü sinterleme fırınında 550 °C'de, önce azot gazı ile fırın ortamı temizlenerek, sonra yüksek saflıkta (%99,999 saflıkta) hidrojen gazıyla 10 dak. süre ile indirgenmiştir. İndirgeme işleminin tam olarak gerçekleşip gerçekleşmediği XRD cihazıyla yapılan faz analizi ile kontrol edilmiştir.



Şekil 2.9. İndirgeyici atmosferli sinter fırını

2.6. Tozların Karıştırılması

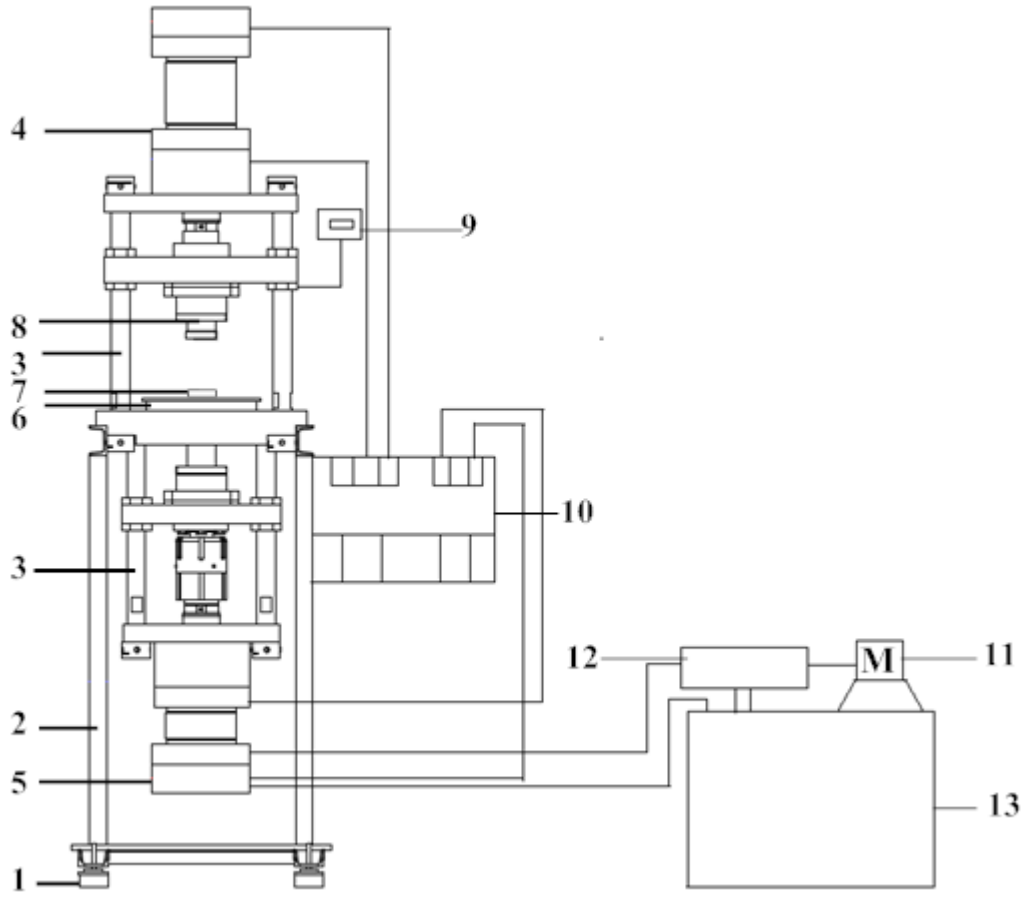
Presleme ve sinterleme numuneleri hazırlanması işlemi -125/tava, -180/125, -250/180 ve -355/250 μm elek aralıklarındaki tozlar kullanılmış olup, her bir elek aralığındaki toz miktarları ham yoğunluğa ve sinter yoğunluğa etki eden parametre olarak değişik oranlarda alınmıştır. Üretilen parçalarda yoğunluk gradyanının oluşmaması için presleme öncesi toz numuneler Turbila türü bir karıştırıcıda 30 dak. süre ile karıştırılarak homojen bir dağılım sağlanmıştır. Karıştırma işlemi Şekil 2.10'da gösterilen karıştırıcıda 55 d/d devir sayısında karıştırılmıştır.



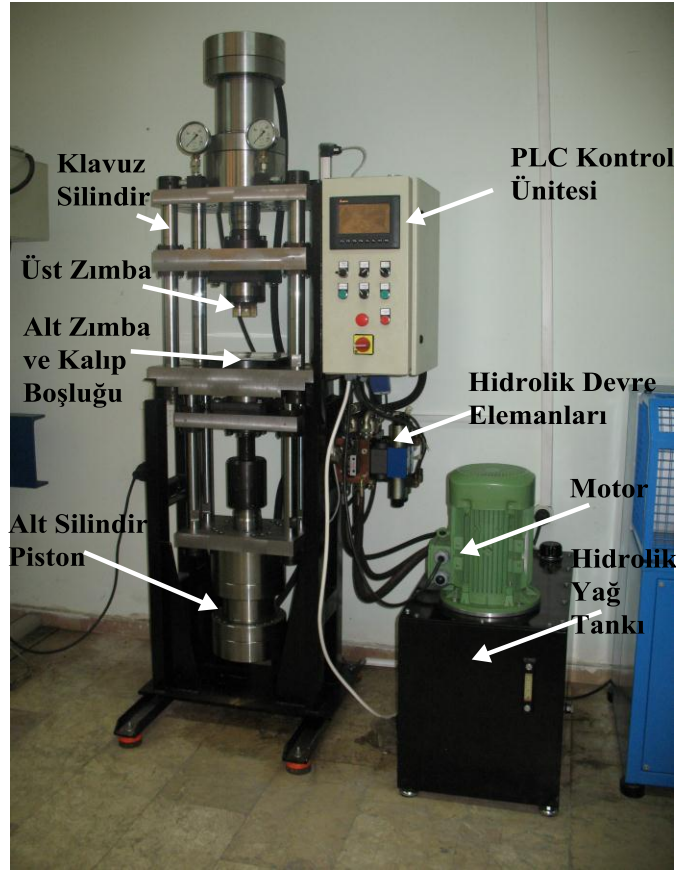
Şekil 2.10. Turbilla türü toz karıştırma cihazı

2.7. Presleme İşlemi

Hidrojen atmosferinde indirgenmiş ve elemeye tabi tutularak tasnif edilmiş tozlardan ham yoğunlukta parça üretmek amacıyla PLC kontrollü, tek eksenli ve çift etkili 50 ton kapasiteli hidrolik toz kalıplama presli kullanılmıştır. Preslenen tozlarla çekme numunesi ham parçası üretilmiş olup, numuneler ASTM 8M-04 standardında tel erozyon yöntemiyle hazırlanmış olan çekme numunesi kalıbında preslenmişlerdir. Presleme basıncının ham yoğunluğa etkisini incelemek amacıyla 150, 270, 360, 480 ve 600 Mpa basınçlarda presleme yapılmıştır. Tozlarla kalıp yüzeyi sürtünmesini en aza indirmek amacıyla presleme öncesi kalıp ve zımba yüzeyleri çinko stearat ile yağlanmıştır. Kullanılan presin şematik resmi Şekil 2.11’de, fotoğraf görüntüsü Şekil 2.12’de ve preslenmiş ham haldeki çekme numuneleri Şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Çift tesirli tek eksenli presin şematik resmi. Pres elemanları; 1-Kauçuk ayak, 2- kolonlar, 3- klavuz silindir, 4- üst silindir piston, 5- alt silindir piston, 6- pres tablası, 7- alt zımba ve kalıp boşluğu, 8- üst zımba, 9- PLC kontrol ünitesi, 10- hidrolik devre elemanları, 11- motor, 12- pompa, 13- hidrolik yağ tankı.



Şekil 2.12. Tek eksenli çift tesirli hidrolik toz kalıplama presi.



Şekil 2.13. Preslenmiş ham haldeki çekme numuneleri.

2.8. Sinterleme İşlemi

Preslenmiş ham haldeki parçaların sinterlenmesi amacıyla özellikleri Bölüm 2.5’de açıklanan ve fotoğrafı Şekil 2.9’da gösterilen atmosfer kontrollü sinterleme fırını kullanılmıştır. Sinterleme işlemi yüksek saflıkta hidrojen atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Fırın atmosferi bileşimindeki hidrojen gazı oranı %100 olarak alınmıştır. Ortama hidrojen gazı göndermeden önce azot gazıyla süpürme işlemi yapılmıştır. Sinterleme sıcaklığının etkisini incelemek amacıyla 1100, 1140, 1180 ve 1200 °C sıcaklıklarda sinterleme gerçekleştirilmiş olup, sinterleme süresi olarak 60, 75, 90 ve 105 dak. süreler kullanılmıştır.

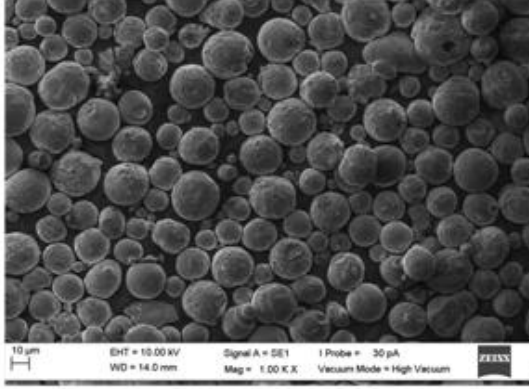
2.9. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Preslenmiş ve sinterlenmiş numunelerin sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı, elastiklik modülü ve yüzde uzama gibi mekanik özelliklerine ortalama toz boyutu, boyut dağılımı, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi parametrelerin etkilerini incelenmiştir. Bu amaçla Instron marka Çekme cihazında 0,01 mm/s. hızda çekme deneyleri yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri Struers Duramin marka cihazında en az 5 farklı noktaya 98,12 mN yük 10 sn süreyle uygulanarak yapılmıştır. Makro sertlik ölçümleri Rockwell sertlik ölçüm cihazında 1/16 inç bilya ile 10 kg ön yük ve 60 kg ana yük altında sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

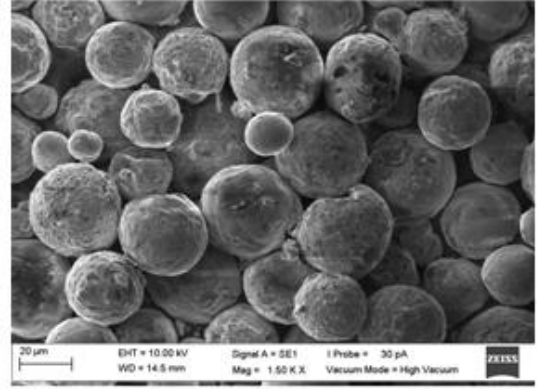
3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Üretilen Tozların Morfolojileri

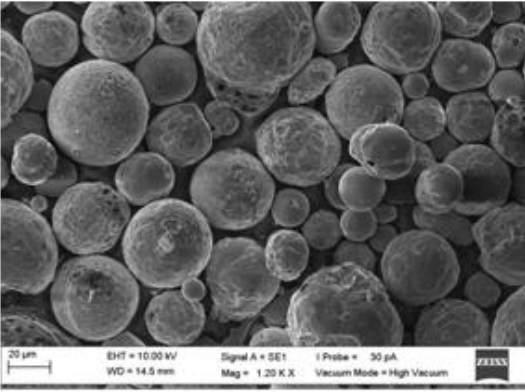
Bu çalışmada Ni-Cu alaşımı (Monel 400) su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu yöntemiyle atomize edilmiştir. Üretilen tozlardan değişik elek aralıklarına ait SEM fotoğrafları Şekil 3.1-2’de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, tozların tamamı küresel şekilli olup toz boyutuna bağlı olarak toz şekli değişmemiştir. Genellikle 90 µm’den büyük boyutlu olan tozlarda yüzeylerde çekilme boşluğu oluşmaya başlamıştır. Toz boyutu büyüdükçe çekilme boşluğu miktarının arttığı tespit edilmiştir. Çekilme boşluklarının nispeten büyük çaplı tozlarda daha fazla olması, toz boyutunun büyümesiyle soğuma hızının azalmasına işaret etmektedir. Disk hızı, disk geometrisi, sıvı metal akış debisi vb. atomizasyon parametrelerinin toz şeklini etkilemediği tespit edilmiştir. Ayrıca, tozların çarpışmasıyla oluşan uydulaşma, damlacık toz çarpışmasıyla oluşan sıvanmalar ve topaklanmalar görülmemiştir. Üretilen tozlarda yassı şekle sahip tozların olmaması, tozların tamamının boyutlarına bağlı olarak ya disk üzerinde veya diskten savrulduktan sonra, disk ile atomizör duvarı arasındaki mesafede katılaştığını göstermektedir. Başka bir ifade ile, atomizör çapının (2500 mm) tozların katılaşması için yeterli olduğunu göstermektedir.



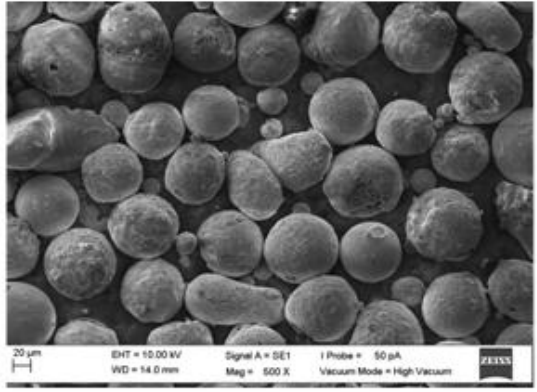
a)



b)

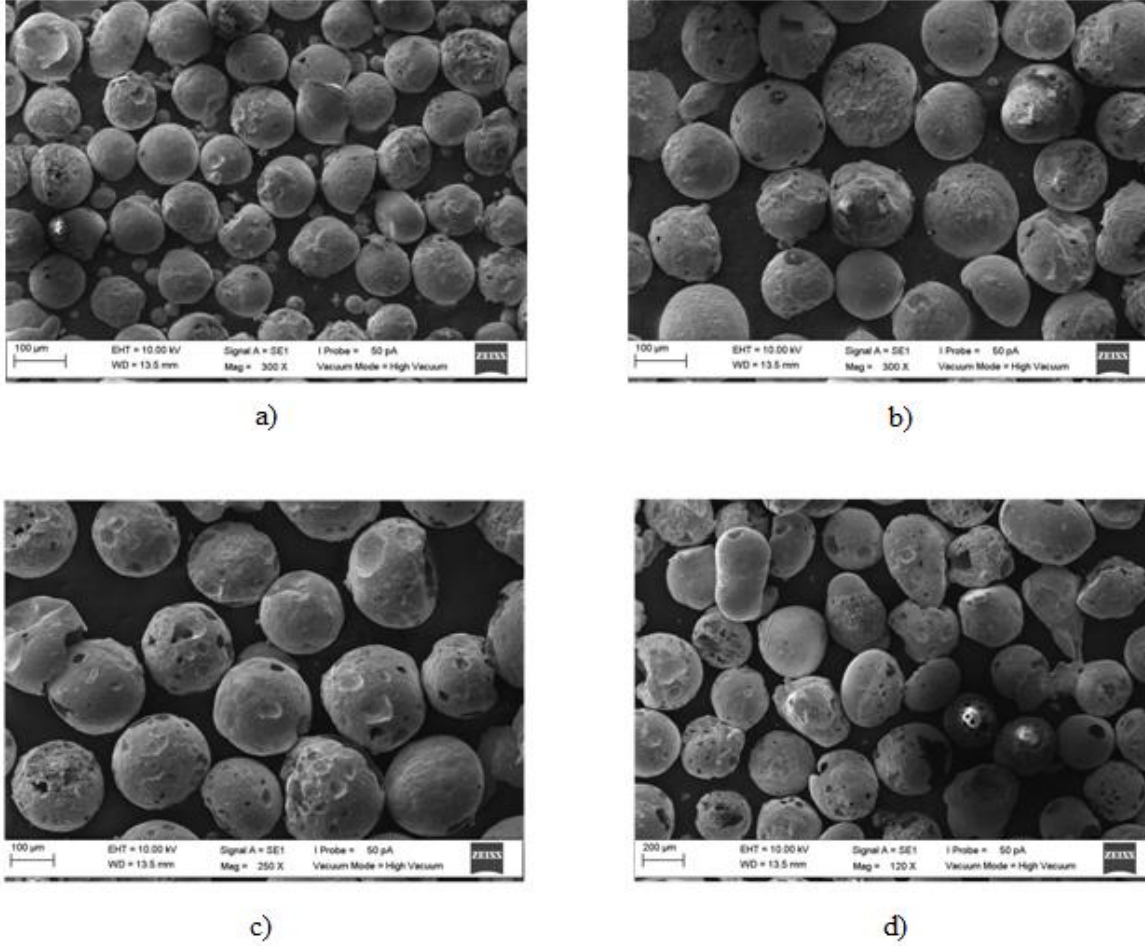


c)



d)

Şekil 3.1. Küçük boyutlu Monel 400 tozları, a) -25 µm/taşa, b) -45 /25 µm, c) -63 /45 µm d) -90/63 µm

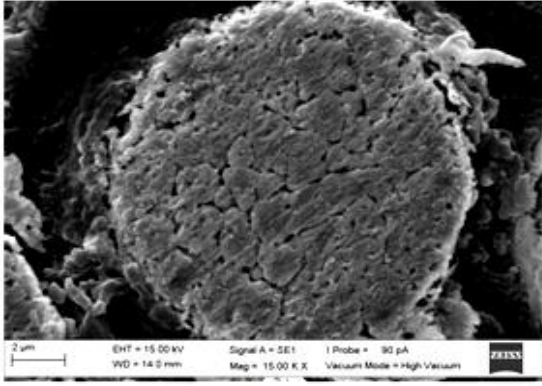


Şekil 3.2. Büyük boyutlu Monel 400 tozları, a) -125/90 µm, b) -150/90 µm, c) -250/125 µm, d) -355/250 µm

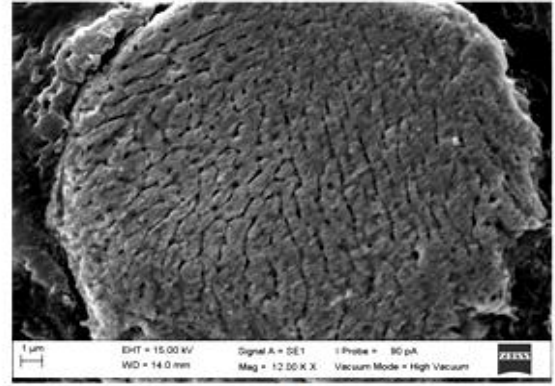
3.2. Üretilen Tozların Mikroyapı ve Sertlikleri

Üretilen Monel 400 alaşımı tozlarına ait SEM mikroyapı fotoğrafları Şekil 3.3'de verilmiştir. Mikroyapının toz boyutuna bağlı olarak değiştiği, nispeten küçük boyutlu olanların eş eksenli hücreli mikroyapıya sahip olduğu, toz boyutunun büyümesiyle eş eksenli hücreli yapıdan hücreli dendritik ve dendritik yapılara doğru değişim gösterdiği gözlenmiştir. Bu durumu soğuma hızındaki değişimle açıklamak mümkündür. Bilindiği gibi, toz üretme yöntemleri aynı zamanda hızlı katılaştırma (rapid solidification) ile malzeme üretme yöntemleri olarak kabul edilmektedir. Herhangi bir yöntemin hızlı katılaştırma olabilmesi için gerekli olan şartlar; üretilen malzemenin en az bir boyutunun

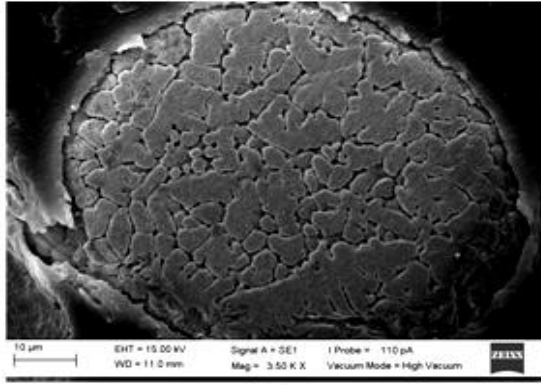
çok küçük olması (< birkaç yüz mikron) ve soğutma ortamının malzeme ısısının çok hızlı transferine imkan verecek şekilde olması sayılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan su jeti soğutmalı döner disk atomizasyon yöntemi her iki şartı da sağlamaktadır. Ergimiş haldeki sıvı metal yüksek hızda dönmekte olan disk üzerine akıtılmakta, diskin santrifüj enerjisi ile sıvı metal parçalanarak çok küçük boyutta toz elde edilmektedir. Sıvı metalin disk üzerine temas edip parçalanması anında ısısının çok büyük bölümü burada disk tarafından alınmaktadır. Kullanılan atomizasyon disk, ısı iletim katsayısı yüksek olan elektrolitik bakırdan üretilmiştir. Disk aynı zamanda ters kap şeklinde olup alt kısımdan 15 lt.dak^{-1} debideki su ile soğutulmaktadır. Atomizasyon esnasında su ile soğutmadan dolayı disk sürekli soğuk kalmaktadır. Bu şartlar altında disk üzerinde atomize olan sıvı metal damlacıkları çok hızlı soğumakta ve nispeten ince taneli bir mikroyapı elde edilmektedir. Üretilen Monel 400 alaşımına ait tozlardan 12-220 μm boyut aralığında değişen tozların SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 3.3'de verilmiştir. Tozların hücre boyutları SEM çalışması esnasında görüntü üzerinden hassas bir şekilde ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde, 12-220 μm boyut aralığındaki tozlarda, hücre boyutunun toz boyutuna bağlı olarak 1,5-8 μm arasında değiştiği bulunmuştur. Toz boyutuna bağlı olarak hücre boyutu değişimi Şekil 3.4'de gösterilmiştir. 12 μm tozlarda ortalama 1,4 μm hücre boyutu, 45 μm tozlarda 2,8 μm hücre boyutu, 90 μm tozlarda 4,1 μm hücre boyutu ve 220 μm tozlarda ise 7,4 μm hücre boyutu tespit edilmiştir. Üretilen tozlar soğuk katılaştırma reçine kalıbında kalıplanarak mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler Şekil 3.5'de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi azalan toz boyutuyla mikrosertlik değeri artmıştır. 24 μm tozlarda ortalama mikrosertlik değeri 215 Vickers, 68 μm tozlarda 190 Vickers, 120 μm tozlarda 110 Vickers sertlik değerleri ölçülmüştür.



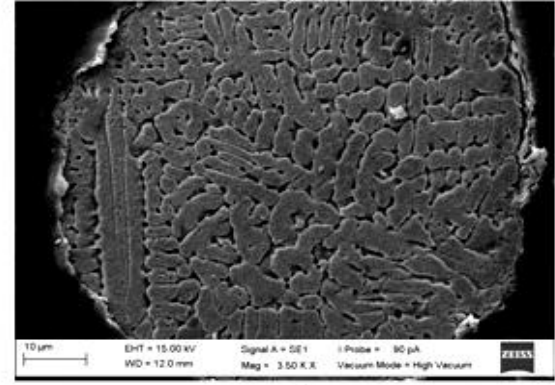
a)



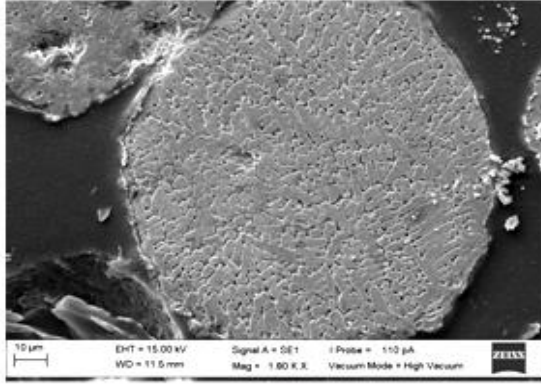
b)



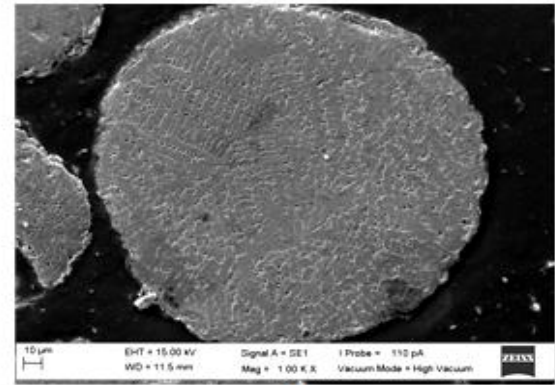
c)



d)

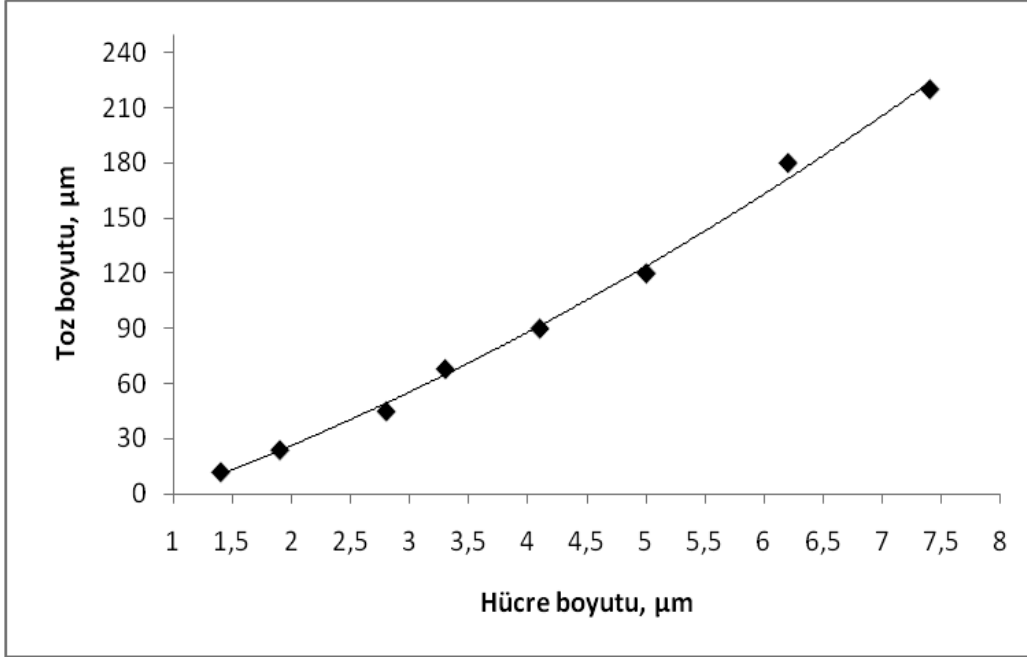


e)

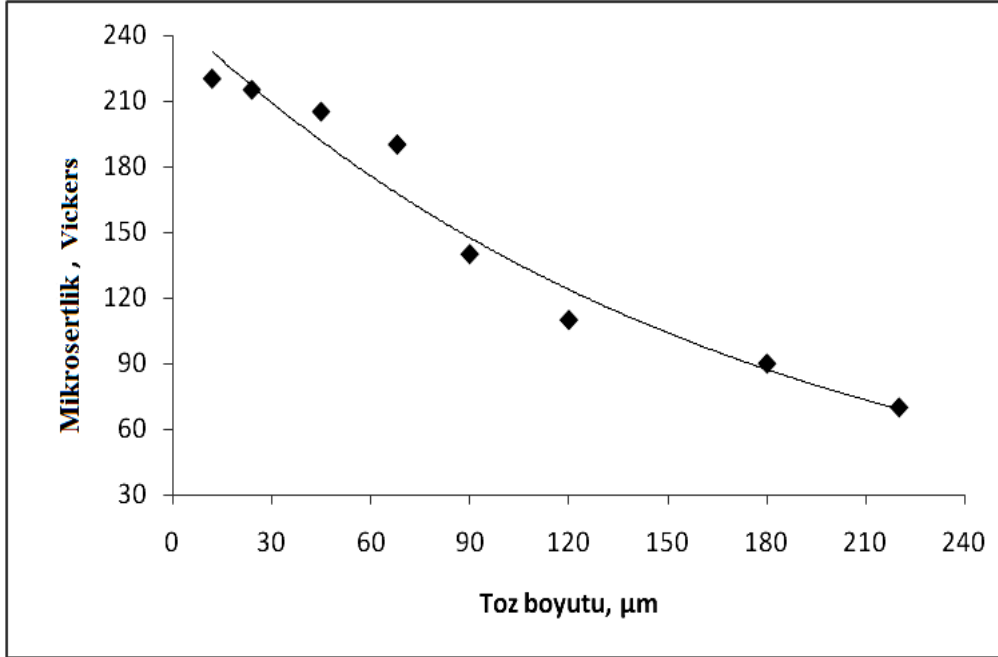


f)

Şekil 3.3. Monel 400 alaşımı tozu mikroyapısı a) 12 μm , b) 24 μm , c) 68 μm , d) 90 μm , e) 120 μm , f) 220 μm



Şekil 3.4. Monel 400 alaşım tozlarında toz boyutuna bağlı olarak hücre boyutunun değişimi



Şekil 3.5. Monel 400 alaşım tozlarında toz boyutuna bağlı olarak mikrosertliklerinin değişimi.

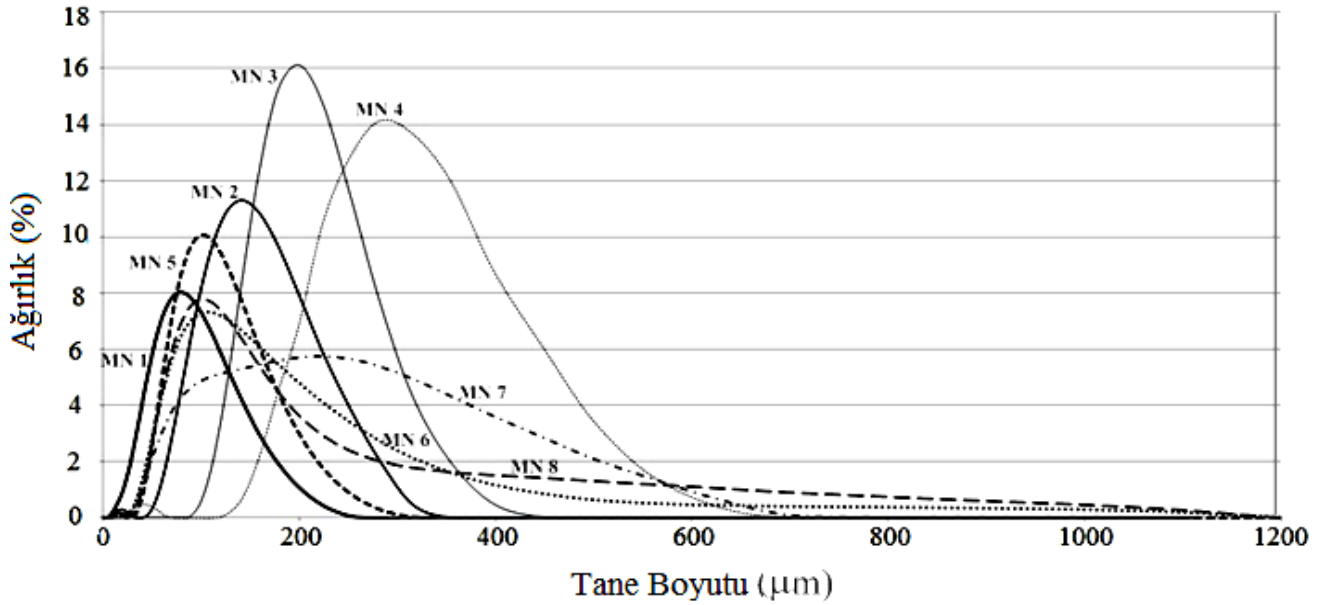
3.3. Presleme İçin Toz Numune Hazırlanması

T/M yöntemiyle parça üretimi aşamalarının birinci safhası toz üretimidir. Yapılan atomizasyon deneyleriyle bu işlem gerçekleştirilmiş, atomizasyon işlemiyle üretilen tozlardan 355 µm elek altına geçenler değerlendirilmiş, daha büyük boyutlu olanlar ise hurdaya ayrılmıştır. Toz üretiminden sonraki aşama, presleme öncesi yapılması gereken işlemleri kapsar. Bunlar; kullanılacak elek aralığı toz miktarları veya yüzdelerinin belirlenmesi, değişik elek aralığı tozlardan oluşan kütlenin ortalama toz boyutunun ve boyut dağılımının belirlenmesi, görünür yoğunluk ve akış yoğunluğunun ölçülmesi, tozların yüzeyleri oksit tabakası ile kaplanmış ise bu tabakanın indirgeyici atmosferde indirgenmesi ve son olarak tozlara yağlayıcı ilave edilerek karıştırma işleminin gerçekleştirilmesi işlemleridir.

Bu çalışmada presleme için hazırlanacak toz numune için tek bir elek aralığı toz kullanılmamış, değişik elek aralıkları tozlar farklı oranlarda katılarak sekiz farklı örnekler hazırlanmıştır. Böylece, preslenmiş numunenin ham yoğunluğuna ortalama toz boyutu ve boyut dağılımının etkisi araştırılmış, en optimum olanlar ortaya konmuştur. Bu amaçla, üretilmiş olan tozlar elenerek, -125/tava, -180/125, -250/180, -355/250 µm elek aralıklarındaki tozlar ayrılmıştır. Değişik elek aralıklarından farklı oranlarda katılarak oluşturulmuş sekiz farklı örnek Tablo 3.1'de, master sizer parçacık boyut cihazında elde edilen toz boyut dağılımları Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Hazırlanan toz numunelerin elek aralığı oranları ve ortalama toz boyutları

Örnek kodu	Elek aralığı (%)				Ortalama toz boyutu (μm)		
	-125/tava (μm)	-180/125 (μm)	-250/180 (μm)	-355/250 (μm)	d_{10}	d_{50}	d_{90}
MN 1	100				29,96	69,72	139,62
MN 2		100			74,75	128,605	207,81
MN 3			100		147,87	209,99	299,74
MN 4				100	199,81	305,99	457,81
MN 5	30	70			55,25	97,97	183,12
MN 6	30	30	40		52,45	110,79	267,45
MN 7	30		30	40	55,98	152	362
MN 8	30	30		40	53,35	107,61	342,27

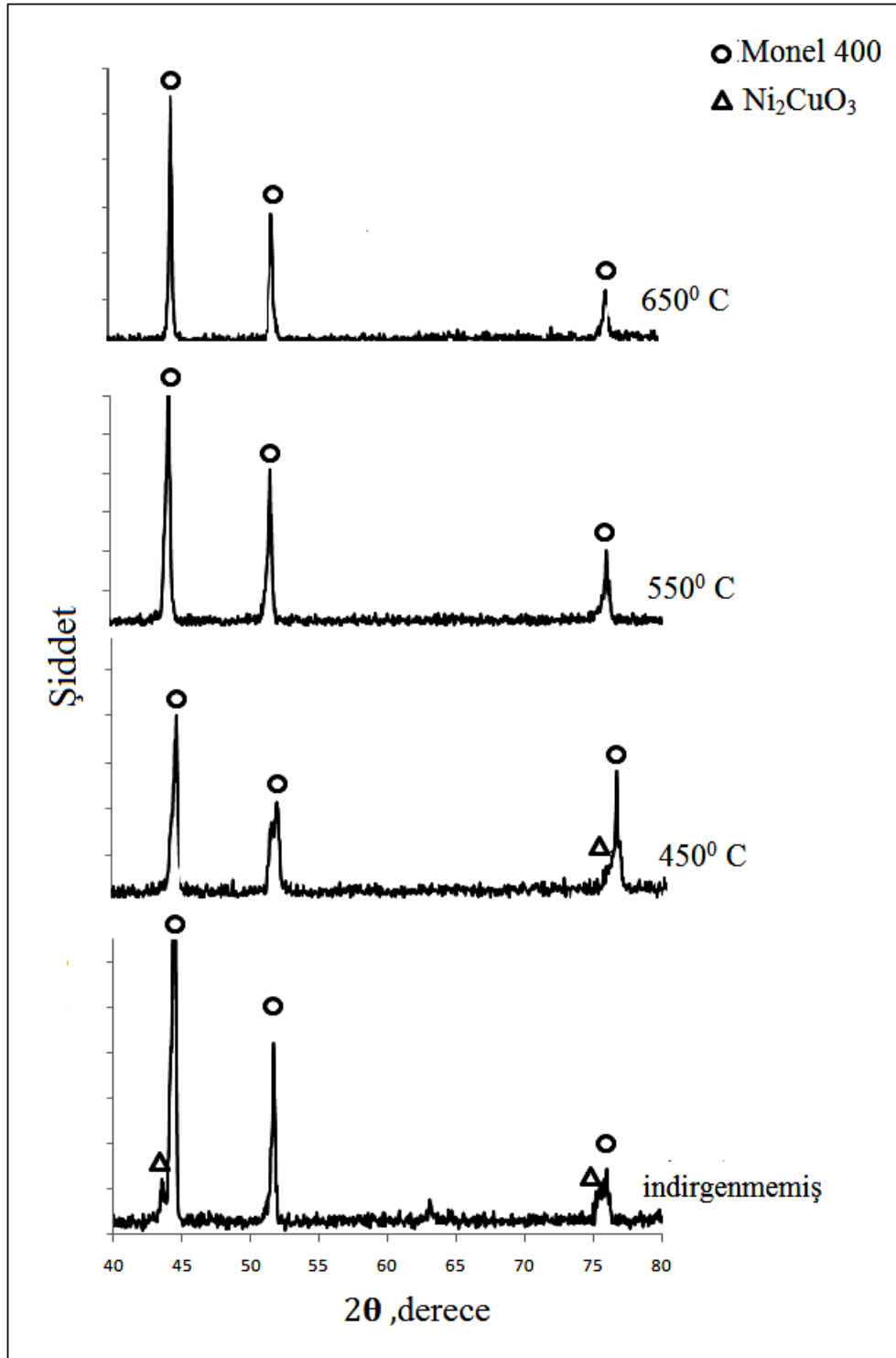


Şekil 3.6. Farklı elek aralığı tozlardan oluşturulmuş örneklerin toz boyut dağılımı değişimi.

3.4. Tozların Yüzey Oksitlerinin İndirgenmesi

Monel 400 alaşımından üretilen tozların yüzeyleri ince bir oksit filmiyle kaplanmış durumdadır. Oksit filminin, atomizasyonla toz üretiminin 1500 °C gibi yüksek sıcaklıkta yapılmasından dolayı, bu sıcaklıkta çok etkili olan atomik difüzyonla alaşımın havadaki oksijenle reaksiyona girmesi neticesinde oluştuğu düşünülmektedir. Bu oksit tabaka hem çok sert hem de Monel 400 alaşımına göre sinterleme sıcaklığı çok yüksek olan bir metal oksit bileşimidir. Tozların hem preslenme ve hem de sinterleme işlemlerini olumsuz yönde etkiler. Sert olması, presleme işleminde tozların plastik deformasyona uğrayarak şekil değiştirmesini, diğer bir ifade ile tozların preslenmesini engeller. Sinterlemeye olan etkisi ise, tozların çevresini bir nevi zırh tabakası gibi sarıp tozlar arasında difüzyonu, yani sinterlemeyi engellemesidir. Belirtilen bu olumsuzluklardan dolayı toz yüzeylerindeki oksit tabakanın presleme öncesi indirgenmesi gerekir.

İndirgeme işlemi, özellikleri Bölüm 2.5’de verilen atmosfer kontrollü fırında yüksek saflıkta (%99,999 saflıkta) hidrojen atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Farklı sıcaklıklarda yapılan indirgeme deneyleri sonrasında indirgeme işleminin tam olarak gerçekleşip gerçekleşmediği XRD cihazıyla yapılan faz analizi ile kontrol edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, Monel 400 alaşımı tozlarının hidrojen atmosferinde 550 °C sıcaklıkta 10 dak. süre içerisinde yüzey oksitlerinden temizlendiği anlaşılmıştır. İndirgeme ile ilgili XRD analiz sonuçları Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Monel 400 alaşımı tozlarının indirgenmemiş durumda ve değişik sıcaklıklarda hidrojen atmosferinde indirgenmesi sonrası elde edilen X-ışını kırınımı desenleri.

Yüzey oksit filminin tozların presleme ve sinterleme özelliklerine olan olumsuz etkisinin dışında, tozların görünür yoğunluk ve akış hızı özelliklerini de olumsuz yönde etkiler. Görünür yoğunluk ve akış hızı preslemeye doğrudan etki eden özelliklerdir. Bunların düşük olması, elde edilecek parçanın ham yoğunluğunun da düşük olmasına sebep olur. Bu çalışmada kullanılan Monel 400 alaşımı tozlarının oksit indirgeme öncesi ve sonrası Hall akış aparatıyla ölçülen görünür yoğunluk ve akış hızı ölçüm sonuçları Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de verilmiştir. Tablolardan da görülebileceği gibi, indirgeme sonrasında görünür yoğunlukta ve akış hızında önemli artışlar meydana gelmiştir.

Tablo 3.2. Monel 400 alaşımı tozlarının indirgeme öncesi görünür yoğunluk ve akış hızı değerleri.

Örnek kodu	MN 1	MN 2	MN 3	MN 4	MN 5	MN 6	MN 7	MN 8
Görünür yoğunluk (g/cm ³)	3,27	3,01	2,96	2,90	3,31	3,34	3,47	3,43
Akış süresi (s)	6,35	6,39	7,96	8,3	5,25	5,77	6,28	5,88

Tablo 3.3. Monel 400 alaşımı tozlarının %99,999 saflıkta hidrojen atmosferinde indirgenme sonrası görünür yoğunluk ve akış hızı değerleri.

Örnek kodu	MN 1	MN 2	MN 3	MN 4	MN 5	MN 6	MN 7	MN 8
Görünür yoğunluk (g/cm ³)	3,46	3,17	3,14	3,12	3,34	3,39	3,49	3,54
Akış süresi (s)	5,03	5,40	6,10	6,90	4,90	5,14	5,40	5,00

3.5.Tozların Preslenmesi

Presleme, gevşek haldeki tozların kapalı bir kalıpta basınç uygulayarak sıkıştırılması işlemidir. Sıkıştırma işlemi başlangıcında toz görünür yoğunlukta olup, her bir toz taneciği 4-6 arası parçacık ile temas halindedir. Basınç uygulandıkça parçacıklar yerleşir, şekil değiştirir ve aralarında bağ oluşur. Parçacık temas sayısı presleme basıncı ile artar, uygulanan basıncın değerine göre 10-12 sayısına ulaşabilir. Sıkıştırma sonrası elde edilen parçaya ham parça adı verilir; ham parçanın sahip olduğu yoğunluk ve mukavemete sırasıyla ham yoğunluk ve ham mukavemet adı verilir.

Bu çalışmada tozların preslenmesi için Bölüm 2.7’de ayrıntılı olarak açıklanan tek eksenli ve çift tesirli kalıplama presi ve kalıbı kullanılmıştır. Ortalama toz boyutu ve boyut dağılımının ham yoğunluğa etkisini incelemek amacıyla Tablo 3.1’de elek aralık oranları verilen MN 1-8 kodlu toz numuneleri 480 MPa basınçta preslenmiştir. Elde edilen ham yoğunluk değerleri Tablo 3.4’de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Ortalama toz boyutu ve boyut dağılımının ham yoğunluğa etkisi

Örnek kodu	MN 1	MN 2	MN 3	MN 4	MN 5	MN 6	MN 7	MN 8
Ham yoğunluk (%)	77	80	79	79	78	79	80	77

Presleme basıncının ham parçanın yoğunluğuna ve sertliğine etkisini incelemek amacıyla 150, 270, 360, 480 ve 600 MPa basınçlar kullanılmıştır. Presleme işleminde Şekil 3.6’da boyut dağılımı, Tablo 3.1’ de elek aralığı oranları ve Tablo 3.3’de görünür yoğunluk ve akış hızı verilen MN 6 örnek kodlu Monel 400 alaşımı tozu kullanılmıştır. Presleme öncesi farklı elek aralığındaki tozların homojen karışımını sağlamak ve yoğunluk gradyanı oluşumunu engellemek için toz numuneler türbilla tipi karıştırıcıda 30 dak. süre ile karıştırılmıştır.

Presleme basıncının ham yoğunlukla değişimi Şekil 3.8’de verilmiştir. Artan presleme basıncıyla parça yoğunluğunun arttığı açıkça görülmektedir. Presleme başlangıcında gevşek halde olan tozlar artan presleme basıncıyla birbiri üzerinden kayarak

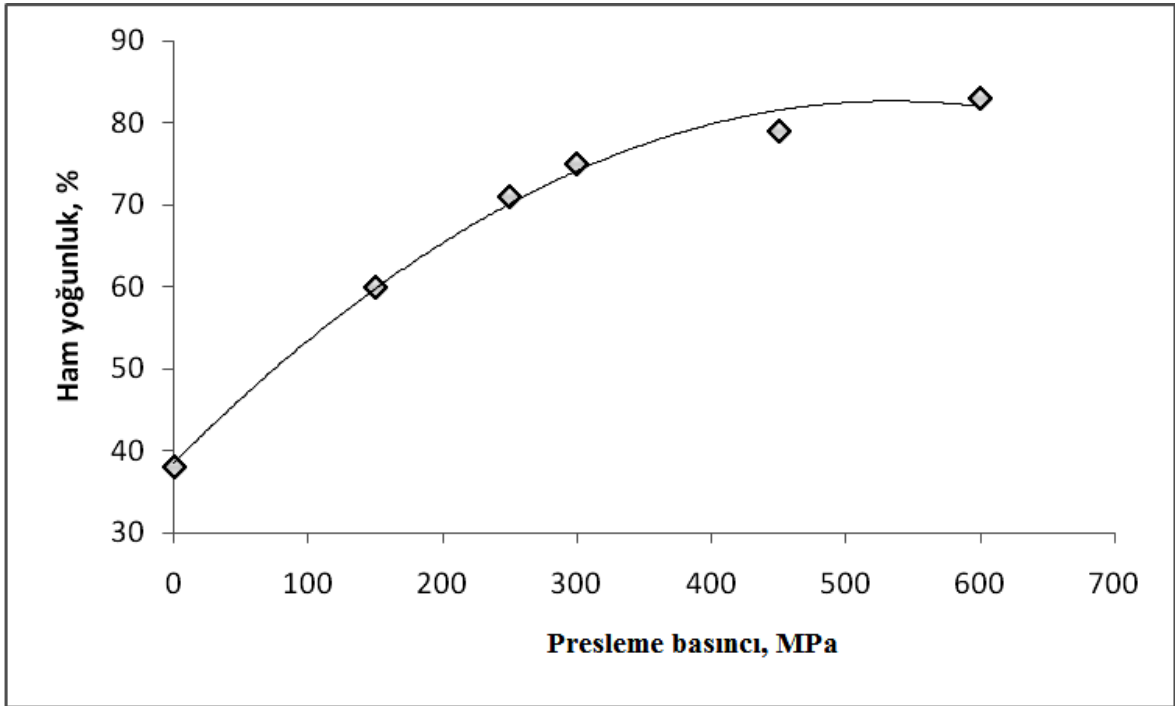
yeniden konumlanırlar. Basınç uygulaması devam ettikçe tozlar tozlar arasındaki boşluklar azalır ve tozlar arasında mekanik kilitleme meydana gelir. Tozlarda plastik deformasyonun başladığı aşama son aşamadır. Bu aşamada yoğunluk artışı tozların deformasyonu ile sağlanır; ancak tozlar plastik deformasyona uğrarken aynı zamanda sertleşerek mukavemet kazanırlar. Bu yüzden son aşamadaki yoğunluk artış hızı başlangıç ve ara aşamalara göre daha yavaştır. Şekil 3.8'deki veriler de bunu doğrulamaktadır. Görünür yoğunlukları teorik yoğunluğun %38'i olan tozlar 150 MPa basınçla preslendiklerinde, hızlı bir yoğunluk artışıyla ham yoğunluk %60'a yükselmektedir. 270 MPa presleme basıncında ham yoğunluk %71'e ulaşmaktadır. 270 MPa presleme basıncından sonra yoğunluk artış hızında bir yavaşlama ortaya çıkmaktadır. 360, 480 ve 600 MPa basınçlarda yapılan presleme işlemleri sonucu elde edilen ham yoğunluk değerleri sırasıyla %75, %79 ve %83 olarak elde edilmiştir. Bu durum, tozları plastik deformasyonla mukavemet kazandıklarını göstermektedir.

Preslenmiş numunelerde presleme basıncıyla mikrosertliğin değişimi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Mikrosertlik ölçme işlemi Struers Duramin mikrosertlik ölçme cihazında, 10 g yük 10 s süre ile tatbik edilerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.9'da verilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi, artan presleme basıncıyla Vickers sertlik değeri artmıştır. Toz parçacıklarının artan presleme basıncıyla daha sıkı paketlenmelerinin sertliği artırdığı anlaşılmaktadır. 150, 270, 360, 480 ve 600 MPa basınçlarda yapılan presleme işleminde elde edilen mikrosertlik değerleri sırasıyla 160, 180, 205, 255 ve 270 Vickers olarak bulunmuştur. Presleme basıncının tozların daha sıkı paketlenmesi sonucu sertlik artışına sebep olmasının yanında, yine presleme sonucu tozların plastik deformasyona uğrayarak sertliklerinin artması da ham parçalardaki sertlik artışının sebepleri arasındadır. Şekil 3.5'de preslenmemiş tozlar için ölçülen mikrosertlik değerleri toz boyutuna bağlı olarak 70 ile 220 Vickers arasında ölçülmüştür. Bu sonuçlar da, presleme esnasında tozların plastik deformasyona uğramasının ham parçaların sertliklerinde önemli artışlara sebep olduğunu ortaya koymaktadır.

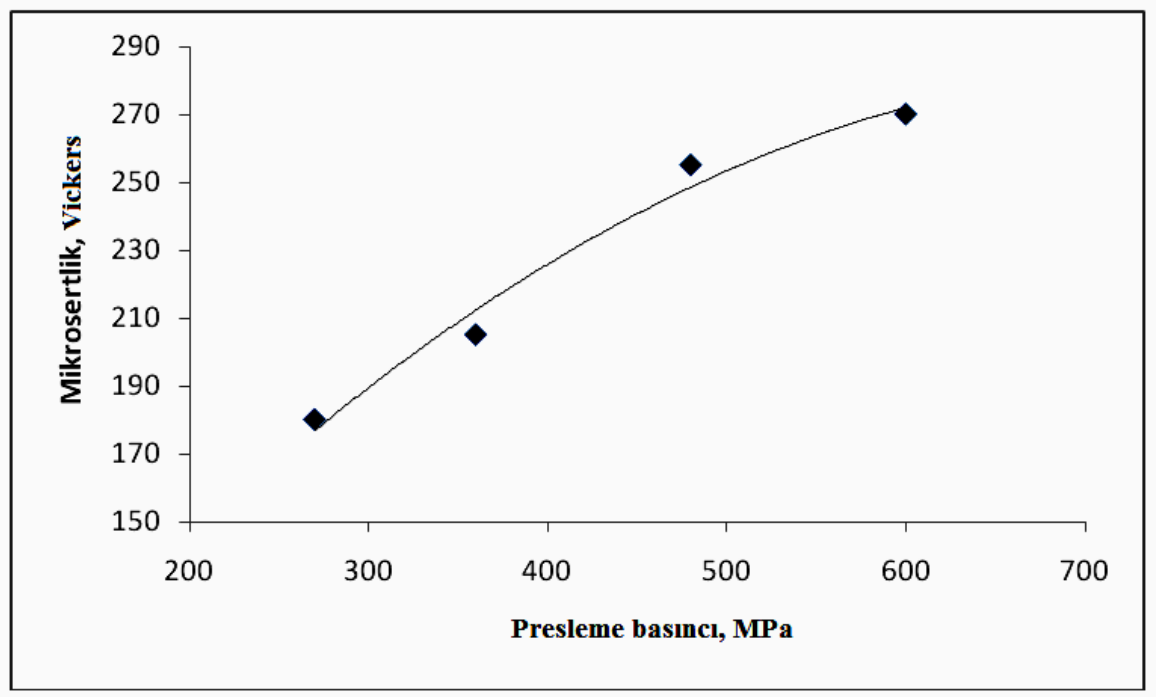
Preslenmiş ham haldeki parçalarda, presleme basıncına bağlı olarak porozite ve toz parçacık deformasyonu değişimi elektron mikroskobunda incelenmiş olup sonuçlar Şekil 3.10- 3.13'de gösterilmiştir. Her bir presleme basıncı için, ham parçalarda meydana gelen porozite ve toz parçacık deformasyonunun daha iyi görülebilmesi amacıyla SEM görüntüleri 100 ve 500 büyültmeler için ayrı ayrı sunulmuştur. Şekillerin incelenmesinden

artan presleme basıncıyla porozitenin azaldığı, tozlardaki plastik deformasyonun, parçacıklar arası temas alanının ve koordinasyon sayısının arttığı açıkça görülmektedir.

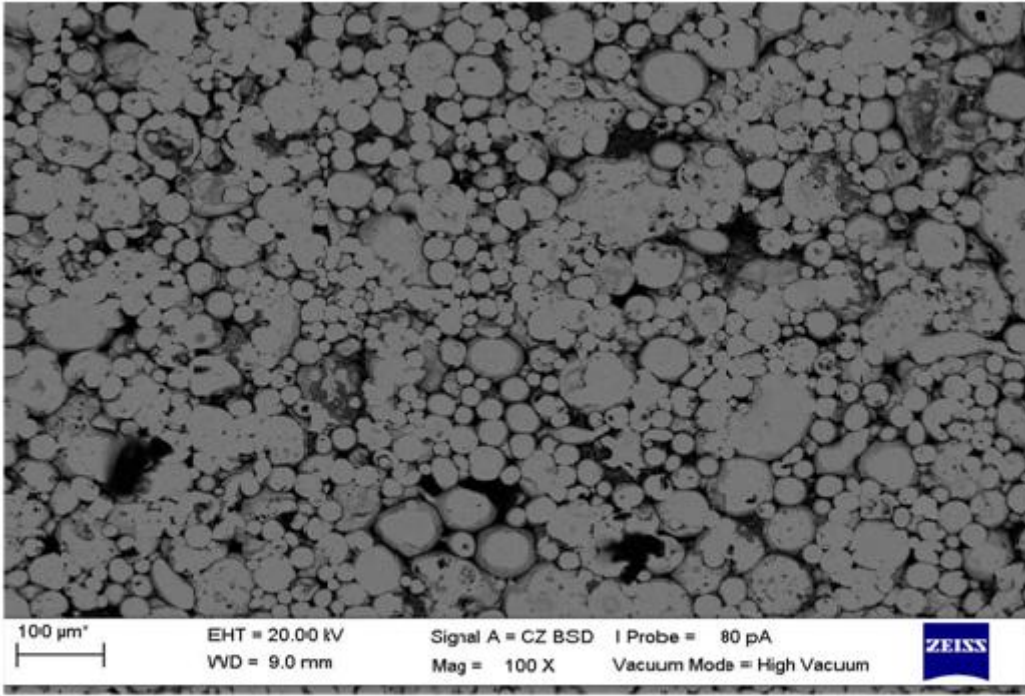
Presleme sonrasında tozların mikroyapılarındaki değişimi incelemek amacıyla ham haldeki parçalar zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri sonrası SEM’de incelenmiştir. Elde edilen görüntüler 10 ve 45 μm toz boyutları için Şekil 3.14 ve 90 ve 110 μm tozlar için de Şekil 3.15’de sunulmuştur. Şekillerden de görüldüğü gibi, presleme sonrası mikroyapıdaki tanelerde uzama ve yığılma meydana gelmiştir. Bu durum özellikle parçacık yüzeyine yakın tanelerde daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır.



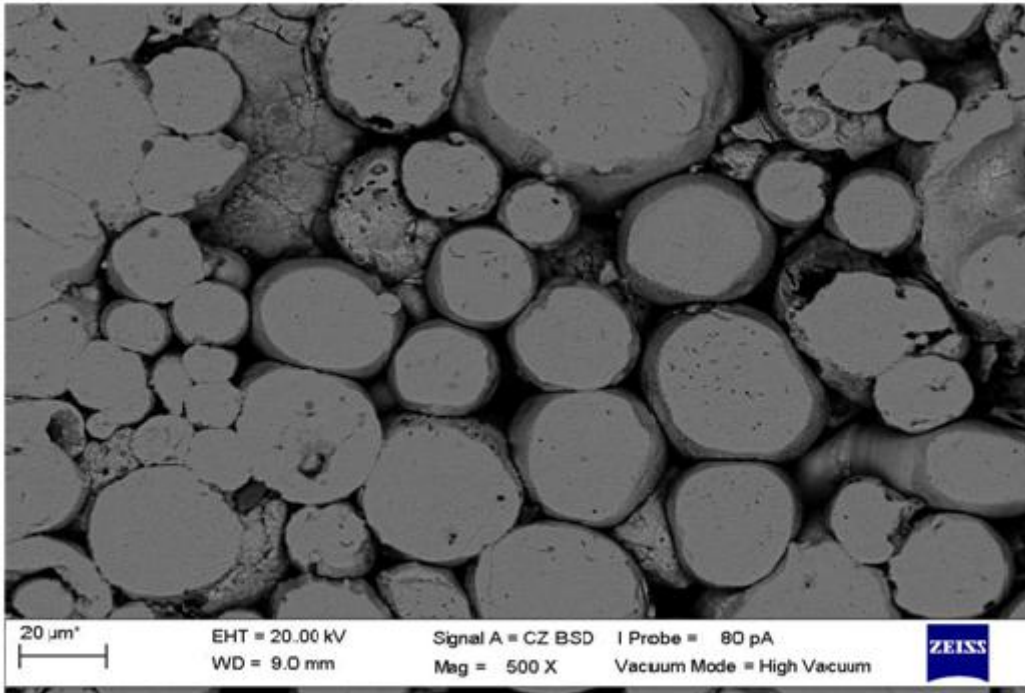
Şekil 3.8. Presleme basıncıyla ham yoğunluğun değişimi



Şekil 3.9. Preslenmiş ham parçada presleme basıncıyla mikrosertliğin değişimi

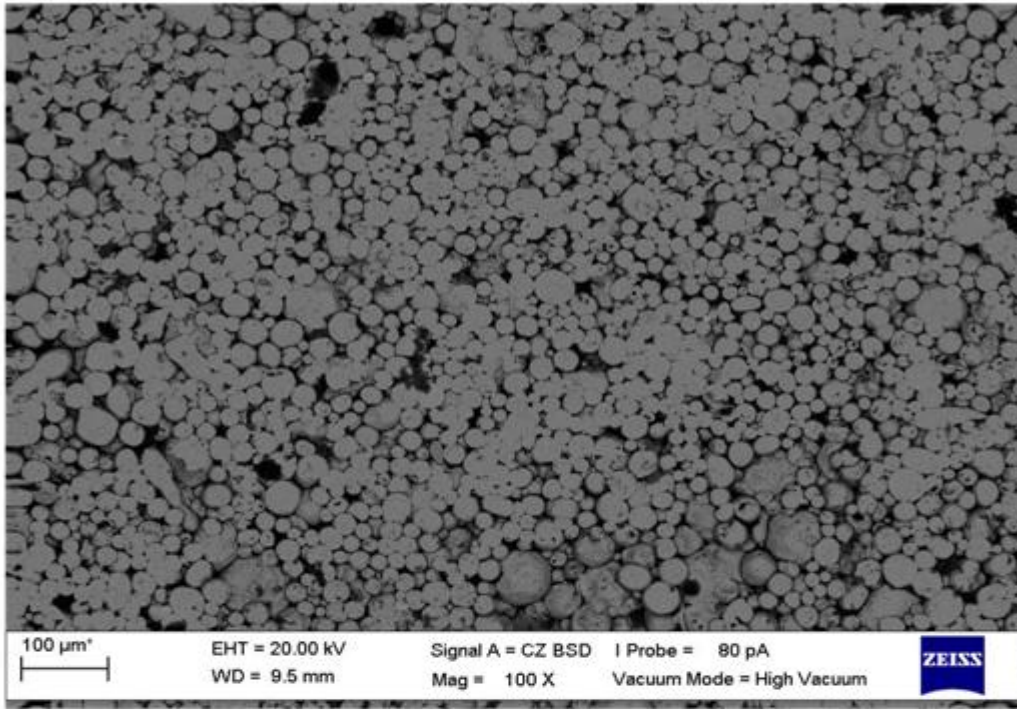


a)

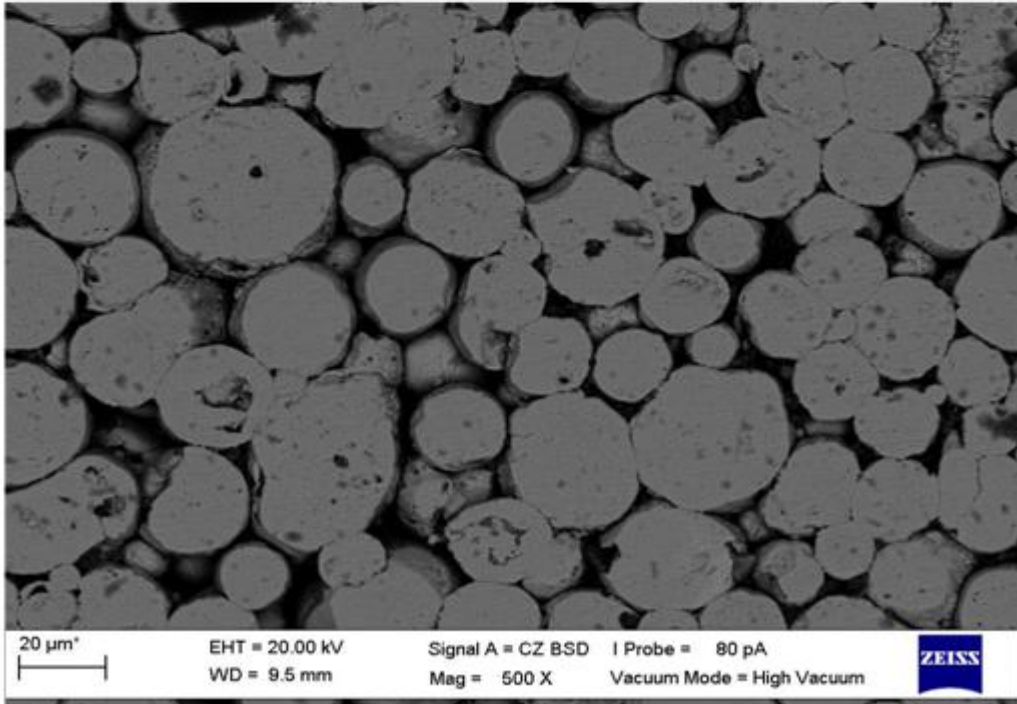


b)

Şekil 3.10. Presleme basıncıyla porosite ve parçacık deformasyonunun değişimi
a)küçük büyütmedeki görünüm ,b)büyük büyütmede mikroyapı
(Presleme Basıncı 270 MPa).

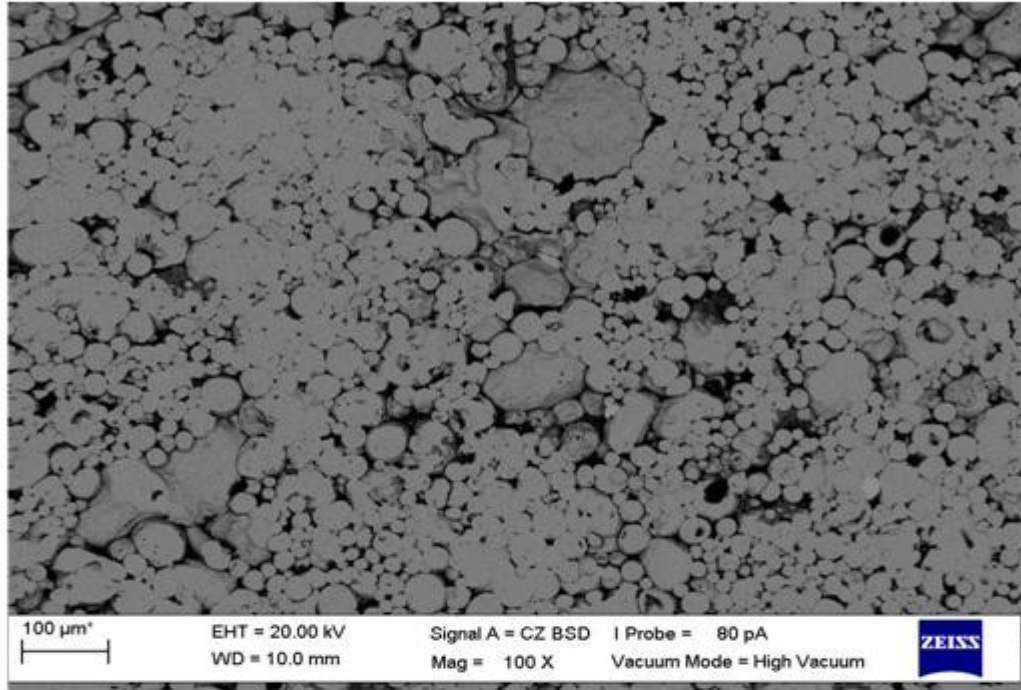


a)

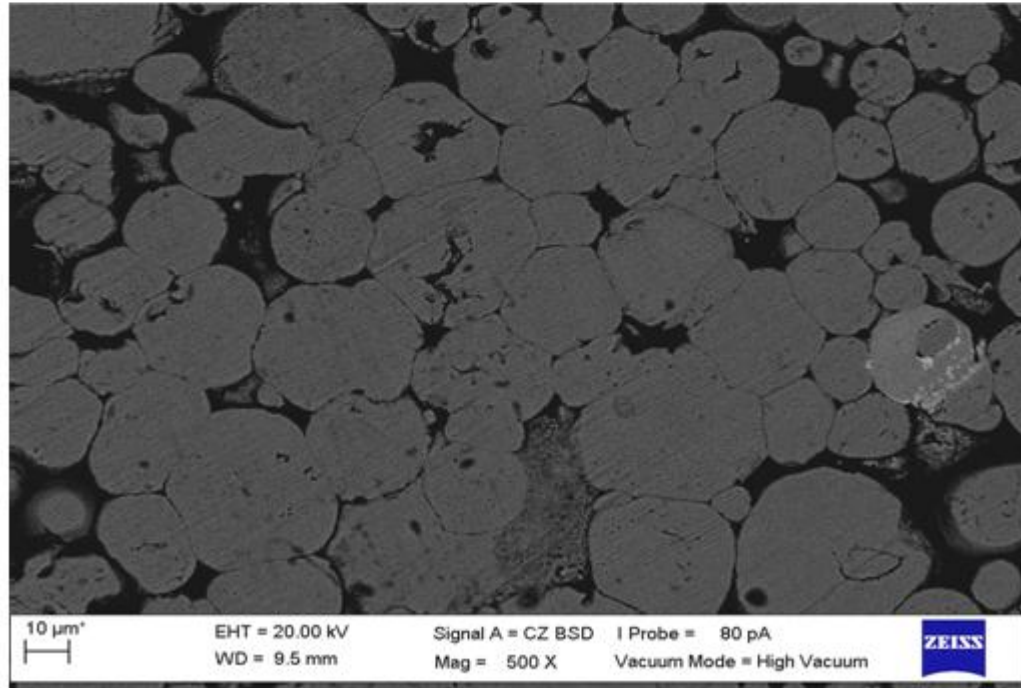


b)

Şekil 3.11. Presleme basıncıyla porosite ve parçacık deformasyonunun değişimi
a)küçük büyütmedeki görünüm ,b)büyük büyütmede mikroyapı
(Presleme Basıncı 360 MPa).

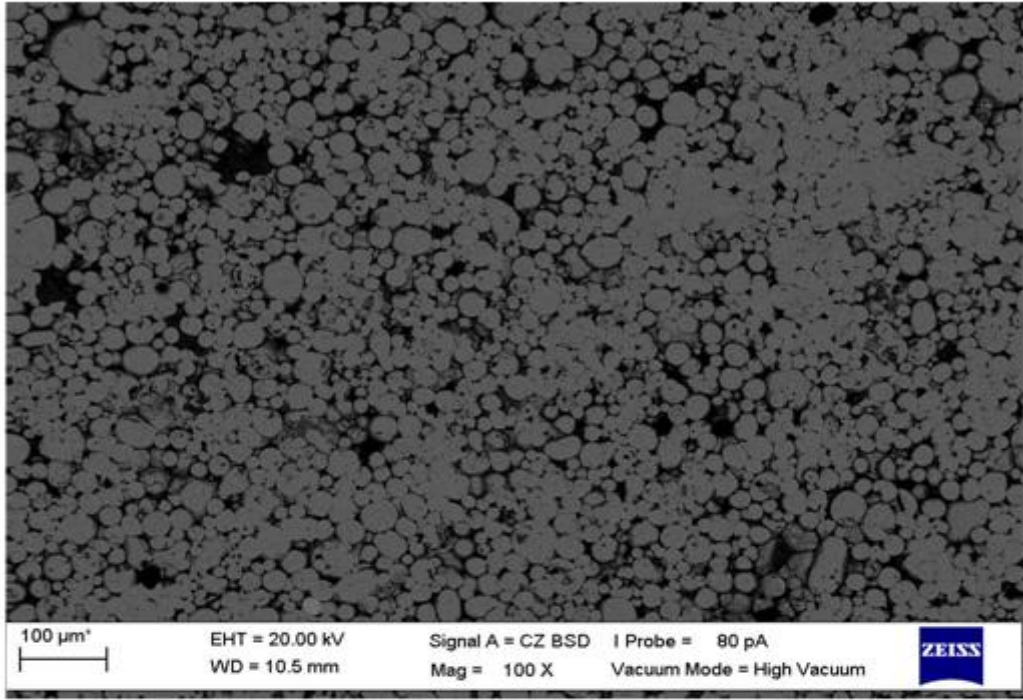


a)

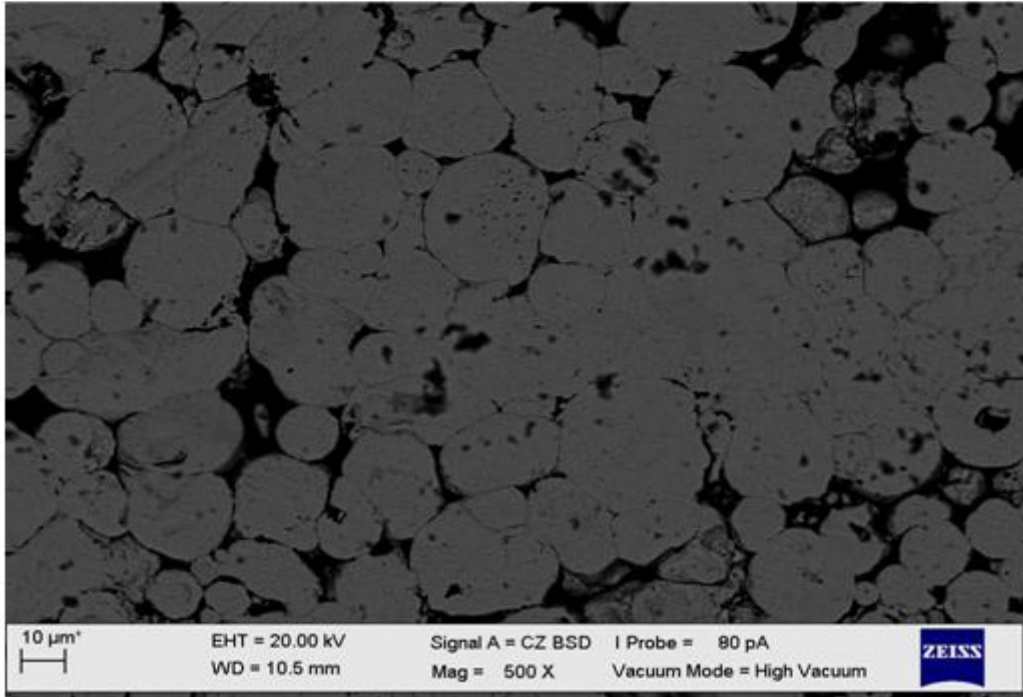


b)

Şekil 3.12. Presleme basıncıyla porosite ve parçacık deformasyonunun değişimi
a)küçük büyütmedeki görünüm ,b)büyük büyütmede mikroyapı
(Presleme Basıncı 480 MPa).

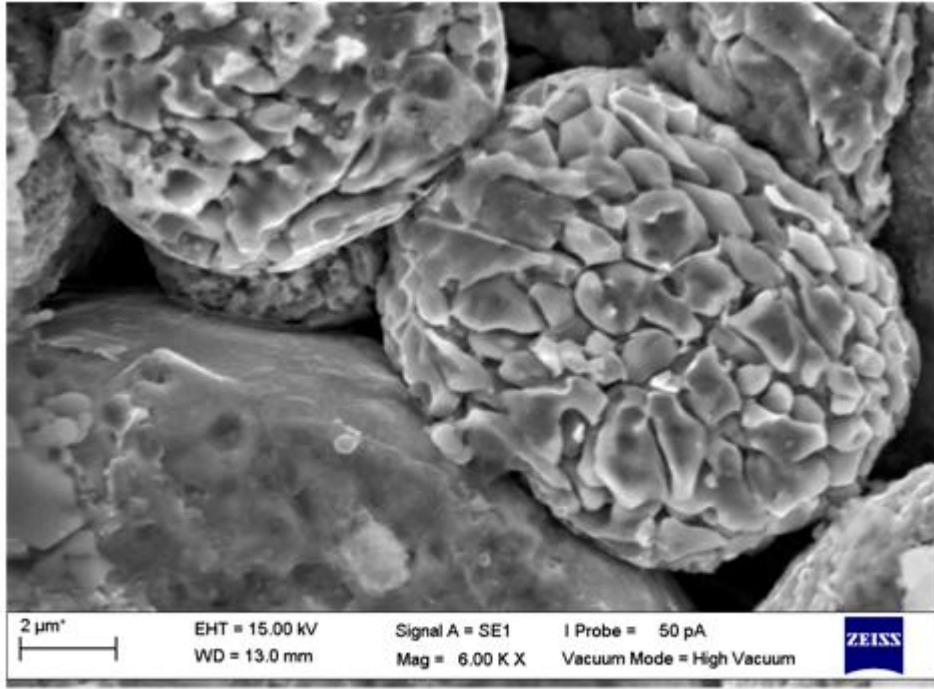


a)

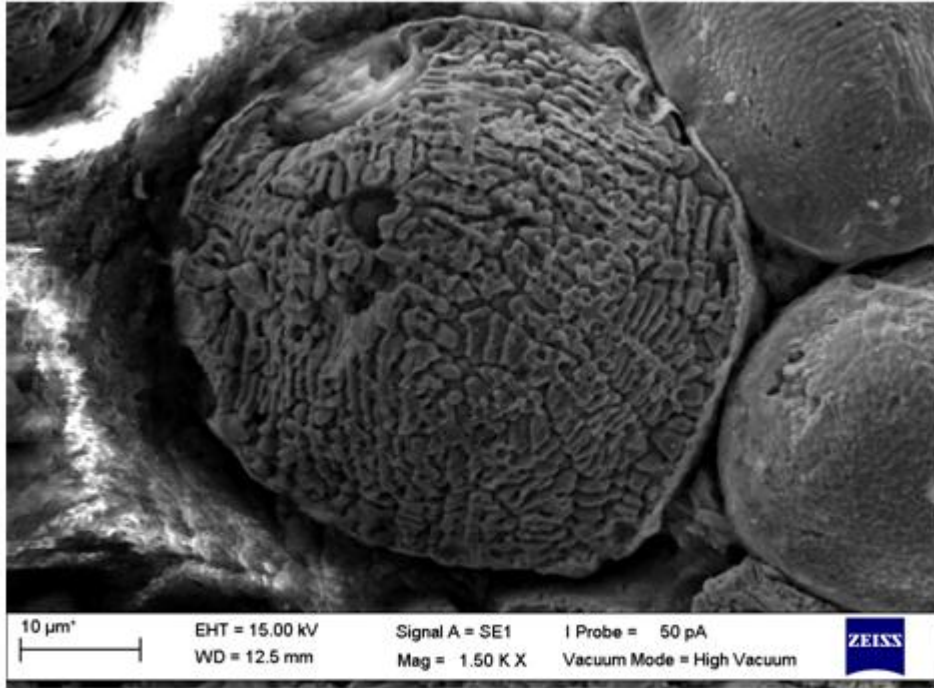


b)

Şekil 3.13. Presleme basıncıyla porosite ve parçacık deformasyonunun değişimi
a)küçük büyütmedeki görünüm ,b)büyük büyütmede mikroyapı
(Presleme Basıncı 600 MPa).

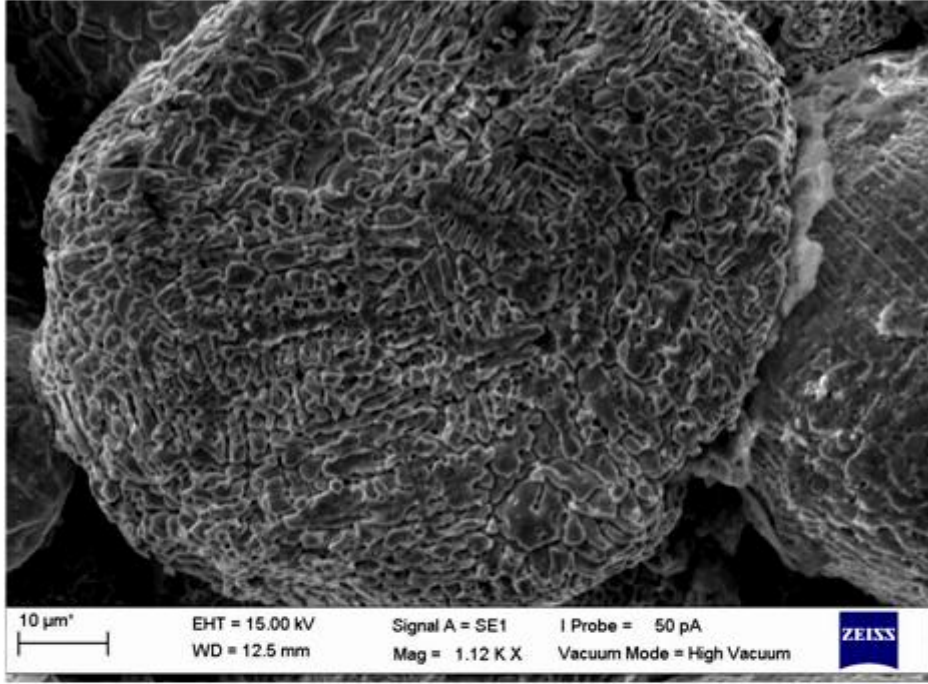


a)

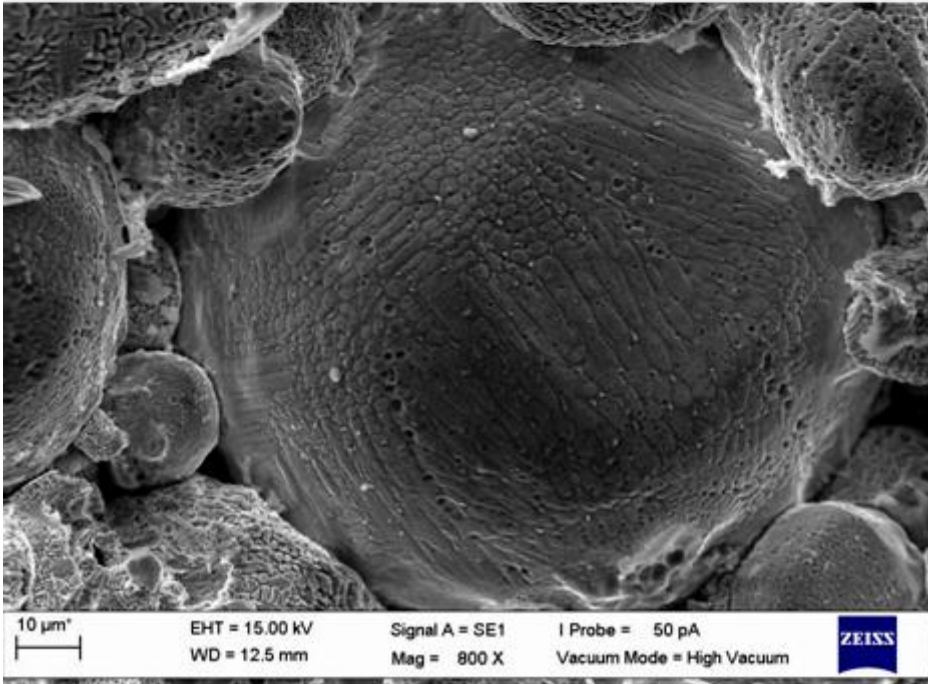


b)

Şekil 3.14. 600 MPa basınç altında preslenmiş tozların mikroyapıları,
a) Toz boyutu 10 µm, b) Toz boyutu 45 µm



a)



b)

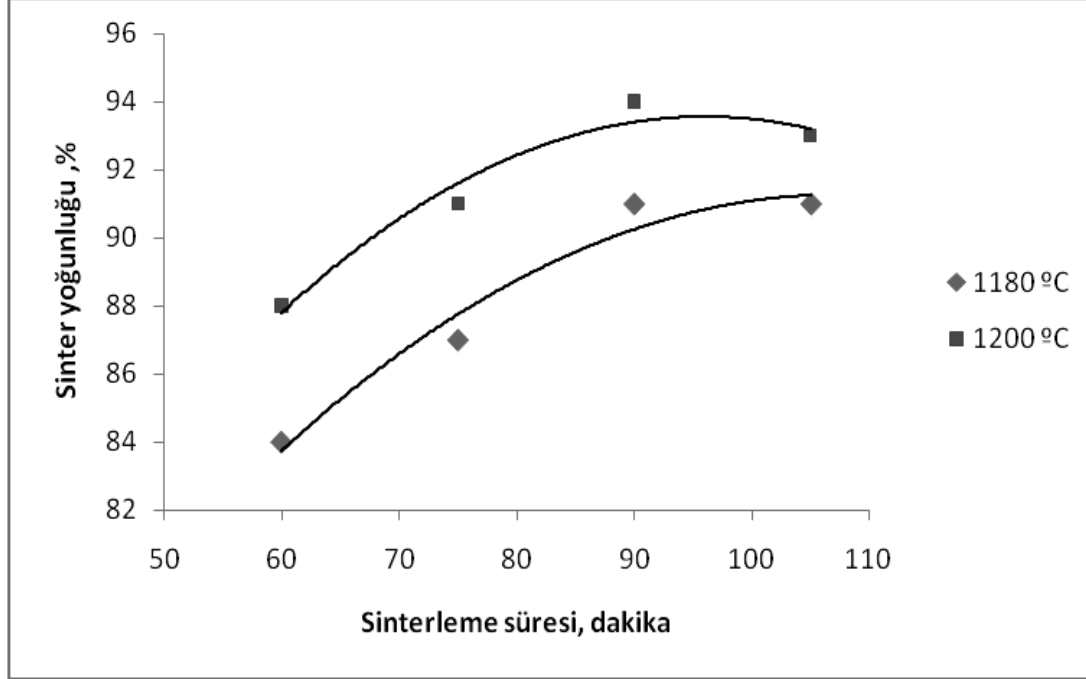
Şekil 3.15. 600 MPa basınç altında preslenmiş tozların mikroyapıları,
a) Toz boyutu 90 μm, b) Toz boyutu 110 μm

3.6. Sinterleme İşlemi

Sinterleme, preslenmiş ham haldeki parçalarda birbirine temas eden tozların aralarında bağ oluşturmak amacıyla yüksek sıcaklıkta uygulanan ısıtma işlemidir. Sinterleme işlemi sonrasında parçaların mukavemet değerlerinde önemli artışlar meydana gelir. Sinterleme işleminde tozlar arasında bağlanma katı halde, ergime sıcaklığının altında atomik difüzyon mekanizmasıyla gerçekleşir. Difüzyonda etkili olan en önemli parametreler sinterleme atmosferi, sinterleme sıcaklığı ve süresidir. Bu çalışmada, preslenmiş ham haldeki parçaların sinterlenmesi amacıyla özellikleri Bölüm 2.5’de açıklanan atmosfer kontrollü sinterleme fırını kullanılmıştır. Sinterleme işlemi yüksek saflıkta hidrojen gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Fırın atmosferi bileşimindeki hidrojen gazı oranı %100 olarak alınmıştır. Ortama hidrojen gazı göndermeden önce, azot gazıyla süpürme işlemi yapılmıştır. Sinterleme sıcaklığının etkisini incelemek amacıyla 1100, 1140, 1180 ve 1200 °C sıcaklıklarda sinterleme gerçekleştirilmiş olup, sinterleme süresi olarak 60, 75, 90 ve 105 dak. süreler kullanılmıştır. Sinterleme işlemi için hazırlanan numuneler Tablo 3.1’de belirtilen numunelerden MN 1 örnek kodlu, -125/tava aralığında, ortalama boyutu 69 µm olan tozlar kullanılmıştır. Numunelerin tamamı 600 MPa sabit basınçta preslenmiştir.

Sinterleme süresinin sinter yoğunluğuna etkisi, 1180 ve 1200 °C sıcaklıklar için Şekil 3.16’da verilmiştir. Artan sinterleme süresi ve sıcaklık şartlarında sinter yoğunluğunun arttığı gözlenmiştir. Ham yoğunluğu %80 olan parça için 1180 °C’de 60, 75, 90 ve 105 dak. sinterleme süreleri sonunda elde edilen ham yoğunluk değerleri sırasıyla % 84, %87, %91 ve %91 olarak elde edilmiştir. Aynı sürelerde 1200 °C ‘de sinterlenen %80 ham yoğunluktaki numunelerin sinterleme yoğunlukları sırasıyla %88, %91, %94 ve %93 olarak bulunmuştur. Artan sinterleme süresiyle atomik difüzyona daha fazla zaman tanınmakta ve yoğunluk artışı meydana gelmektedir. Ancak, sinterleme süresi sınırsız değildir. Belli bir aşamadan sonra çok uzatılan sinterleme süresinin yoğunluk artırıcı etkisi görülmemektedir. Son aşamada gerçekleşen bu olayda tane sınırı enerjisinin azalmasından dolayı sinterleme işlemi yavaşlar. Bazı durumlarda tane büyümesi gibi gözenek büyümesi de olur. Bu durumda gözenek sayısı azalırken ortalama gözenek boyutu artar. Bu yüzden gereğinden uzun tutulan sinterleme sürelerinde kayda değer bir yoğunluk artışı meydana gelmez. Şekil 3.16’daki veriler de bu şekilde elde edilmiştir. 1180 °C’de 90 ve 105 dak sürelerde yapılan sinterlemede elde edilen yoğunluklar sırasıyla %91 ve %91 olup, uzayan

sinterleme süresiyle yoğunlukta bir değişme meydana gelmemiştir. 1200 °C sinterleme sıcaklığında 90 ve 105 dak. sinterleme sürelerinde elde edilen yoğunluklar sırasıyla %94 ve %93 olmuştur. Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı artan süre ile birlikte yoğunlukta bir miktar azalma meydana gelmiştir.

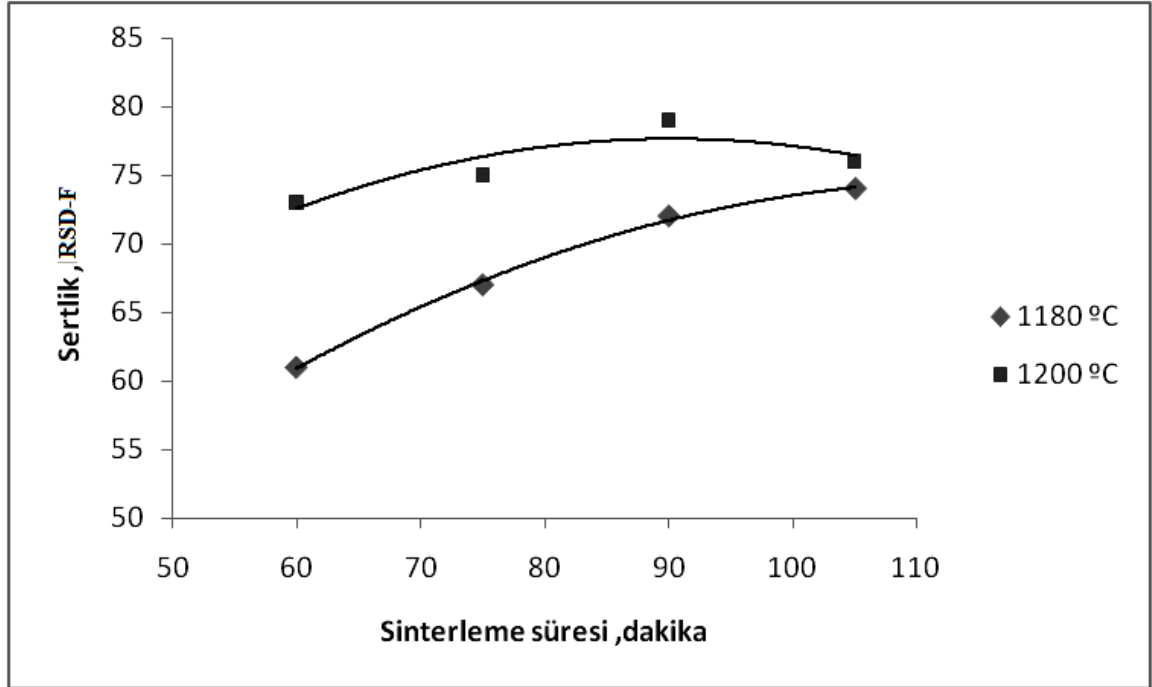


Şekil 3.16. Sinterleme süresinin sinter yoğunluğuna etkisi (Presleme basıncı 600 MPa.).

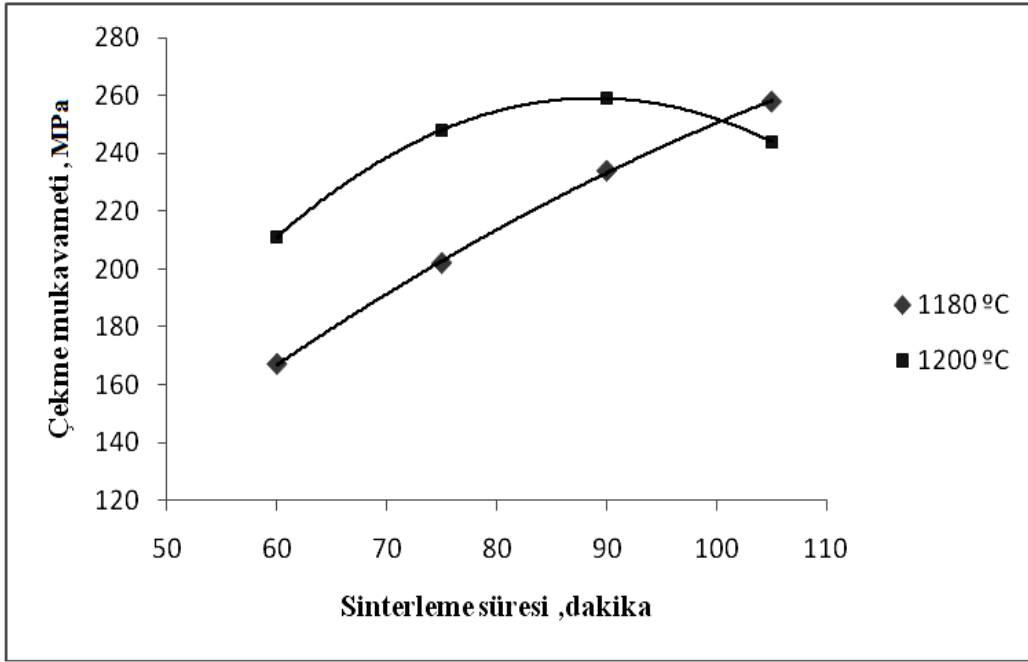
Sinterleme süresinin sertliğe etkisi, 1180 ve 1200 °C sıcaklıklar için Şekil 3.17'de gösterilmiştir. 1180 °C sıcaklıkta 60, 75, 90 ve 105 dak. sinterlenen numuneler için makro sertlik değerleri sırasıyla 61, 67, 72 ve 74 RSD-F sertlik değerleri elde edilmiştir. 1200 °C'de aynı sürelerde yapılan sinterlemede elde edilen sertlikler sırasıyla 73, 75, 79 ve 76 RSD-F olarak gerçekleşmiştir. Artan sinterleme süresiyle sertliğin arttığı açıkça görülmektedir.

Şekil 3.18 sinterleme süresi ile çekme mukavemeti değişimini göstermektedir. Üretilen çekme numuneleri, Bölüm 2.9'da özellikleri belirtilen çekme cihazında çekilerek akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve yüzde uzama gibi mekanik özellikler tespit edilmiştir. Buna göre; 1180 °C sıcaklıkta 60, 75, 90 ve 105 dak. sinterleme süresi için elde edilen çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 167, 202, 234 ve 258 MPa olarak elde edilmiştir. Aynı sinterleme sürelerinde 1200 °C'de sinterlenen numunelerin çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 211, 248, 259 ve 244 MPa olarak bulunmuştur. Artan

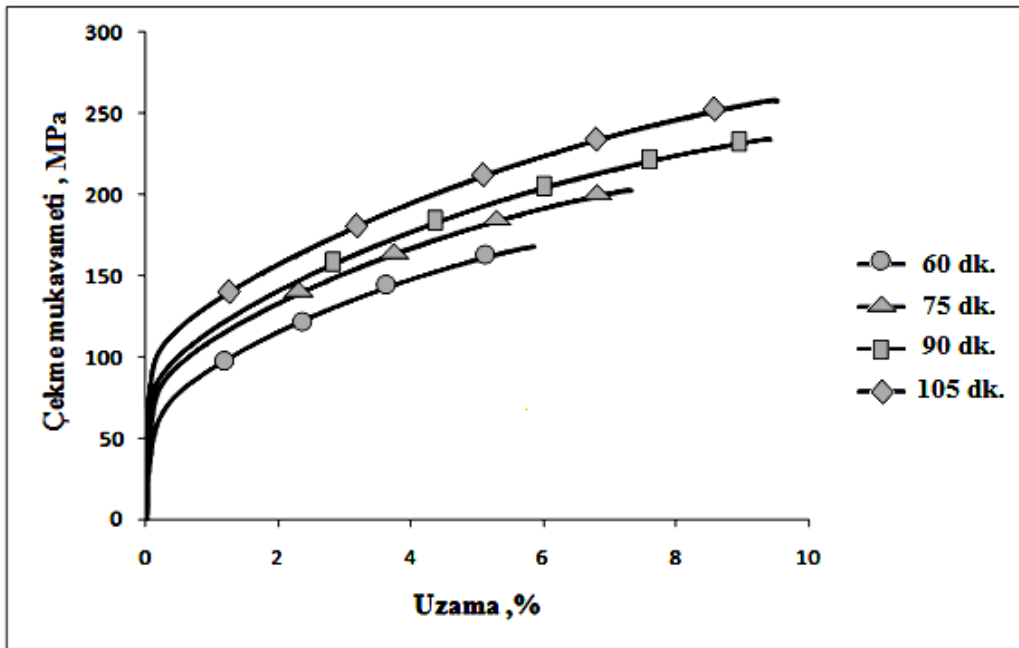
sinterleme süresiyle difüzyona daha fazla zaman sağlandığından tozlar arasında daha güçlü bağ oluşumu sağlanmış, gözenek sayıları ve boyutları azalmıştır. Diğer taraftan, gereğinden fazla sinterleme süresinin gözenek büyümesine yol açıp mekanik özellikleri olumsuz etkilemesi burada da ortaya çıkmıştır. 1200 °C’de 90 dakikalık sinterlemede 259 MPa çekme mukavemeti elde edilirken, 105 dak. sinterlemede ise bu değer 244 MPa olmuştur. Sinterleme süresine bağlı olarak elde edilen mekanik özelliklerin tamamı Tablo 3.5’de verilmiştir. Sinterleme süresiyle çekme mukavemeti ile kopma uzamasındaki değişim, 1180 °C sinterleme sıcaklığı için Şekil 3.19’da , 1200 °C sinterleme sıcaklığı için Şekil 3.20’de verilmiştir.



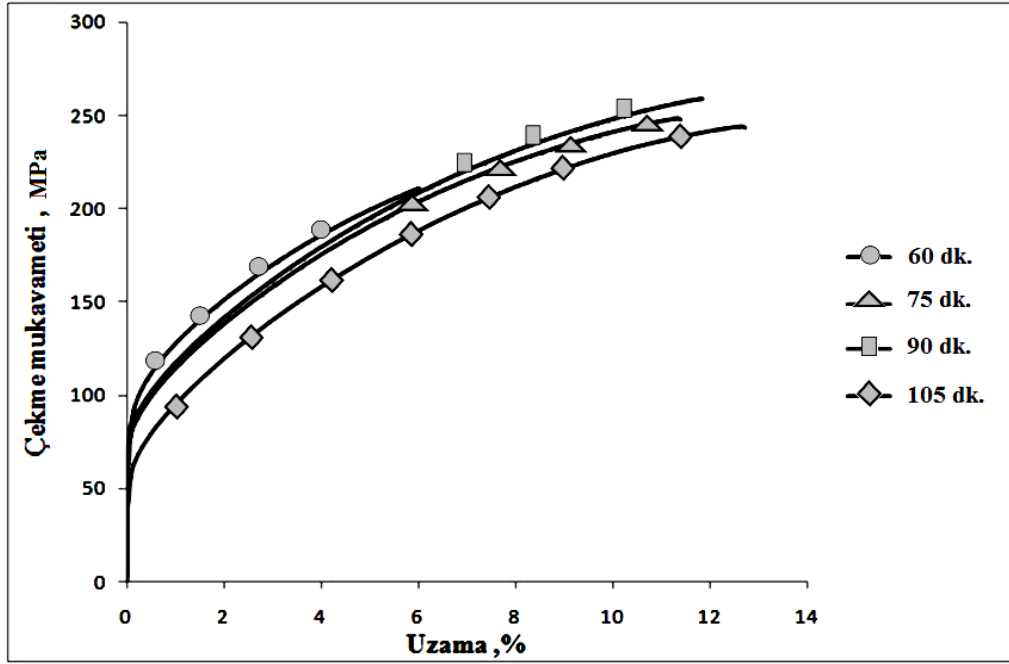
Şekil 3.17. Sinterleme süresi ile sertliğin değişimi (Presleme basıncı 600 MPa.).



Şekil 3.18. Sinterleme süresi ile çekme mukavemeti değişimi.



Şekil 3.19. Sinterleme süresiyle çekme mukavemeti ile kopma uzamasında olan değişim (Sinterleme sıcaklığı 1180 °C).



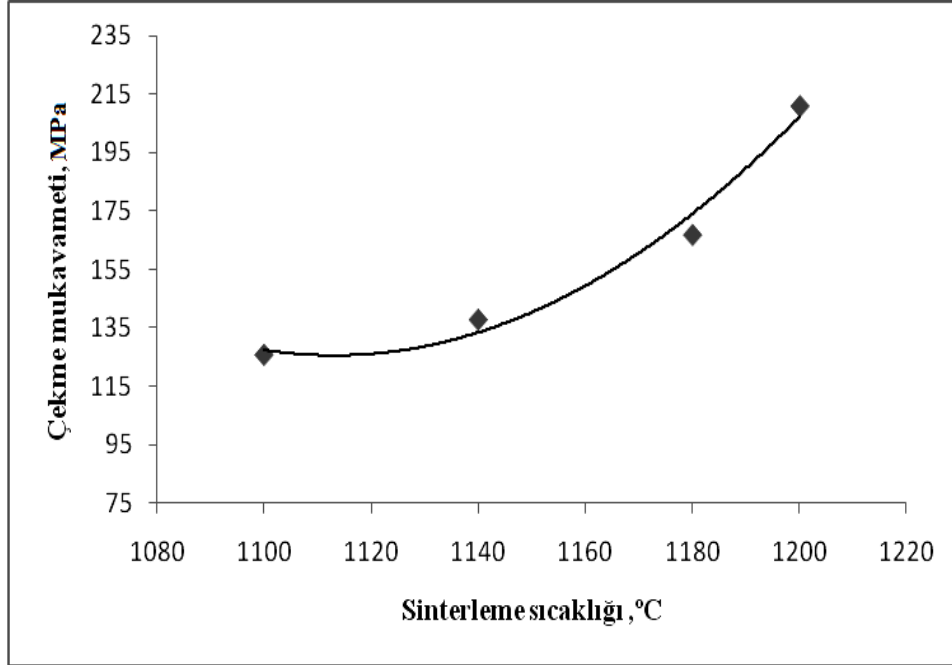
Şekil 3.20. Sinterleme süresiyle çekme mukavameti ile kopma uzamasında olan değişimi (Sinterleme sıcaklığı 1200 °C).

Tablo 3.5. Sinterleme süresine bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi.

Sinter. süresi (dak.)	Sinterleme yoğunluğu (%)		Akma mukavameti (MPa)		Çekme mukavameti (MPa)		Uzama (%)	
	1180 °C	1200 °C	1180 °C	1200 °C	1180 °C	1200 °C	1180 °C	1200 °C
60	84	88	74	102	167	211	5,7	6,0
75	87	91	89	90	202	248	7,2	11,3
90	91	94	92	92	234	259	9,3	11,7
105	91	93	108	71	258	244	9,4	13,2

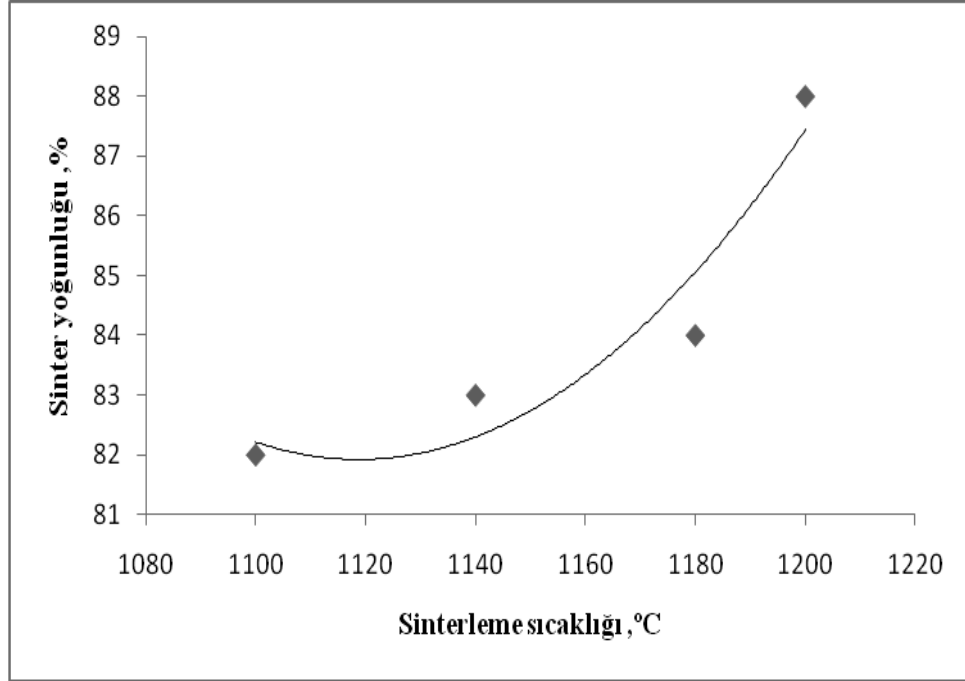
Sinterleme sıcaklığıyla çekme mukavemetinin değişimi, 60 dakikalık sinterleme süresi için Şekil 3.21’de verilmiştir. 1100, 1140, 1180 ve 1200 °C sıcaklıklarda yapılan sinterlemelerde elde edilen çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 126, 138, 167 ve 211

MPa bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, artan sinterleme sıcaklığıyla tozlar arasında daha güçlü bağ oluşumuna işaret etmektedir.

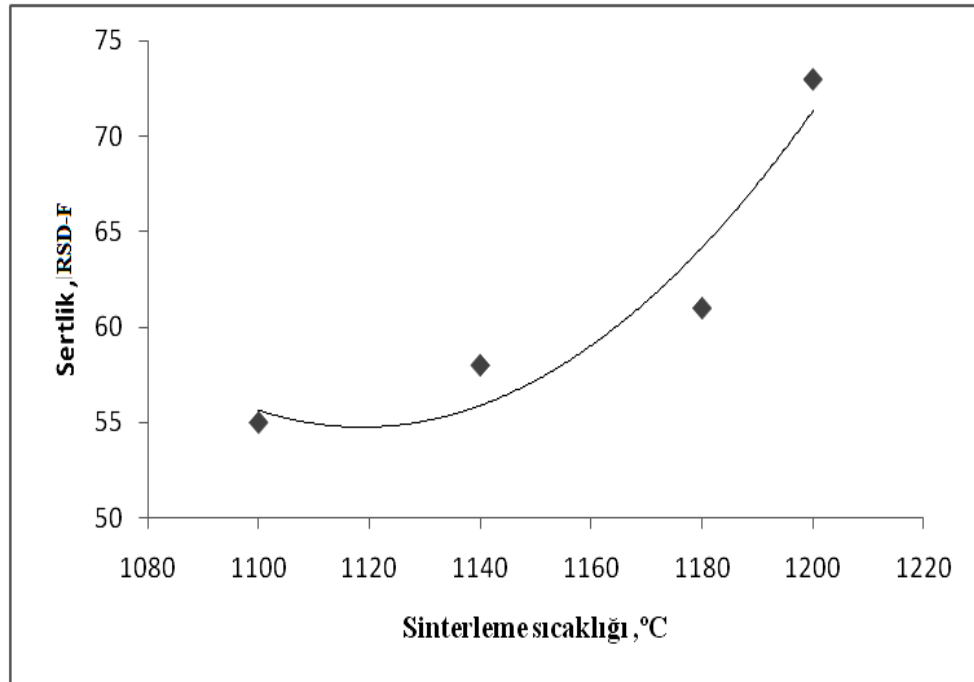


Şekil 3.21. Sinterleme sıcaklığıyla çekme mukavemeti değişimi.

Sinterleme sıcaklığıyla sinter yoğunluğunun değişimi, 60 dakikalık sinterleme süresi için Şekil 3.22’de verilmiştir. 1100, 1140, 1180 ve 1200 °C sıcaklıklarda 60 dak. sinterlenen numuneler için sinter yoğunlukları sırasıyla %82, %83, %84 ve %88 olmuştur. Şekil 3.23’de sinterleme sıcaklığıyla sertliğin değişimi, 60 dakikalık sinterleme süresi için verilmiştir. Aynı sıcaklıklarda 60 dak.süreyle yapılan sinterlemede elde edilen sertlikler sırasıyla 55, 58, 61 ve 73 RSD-F olarak gerçekleşmiştir. Artan sinterleme süresiyle sinter yoğunluğunda olan artışla birlikte sertliğin de arttığı açıkça görülmektedir.

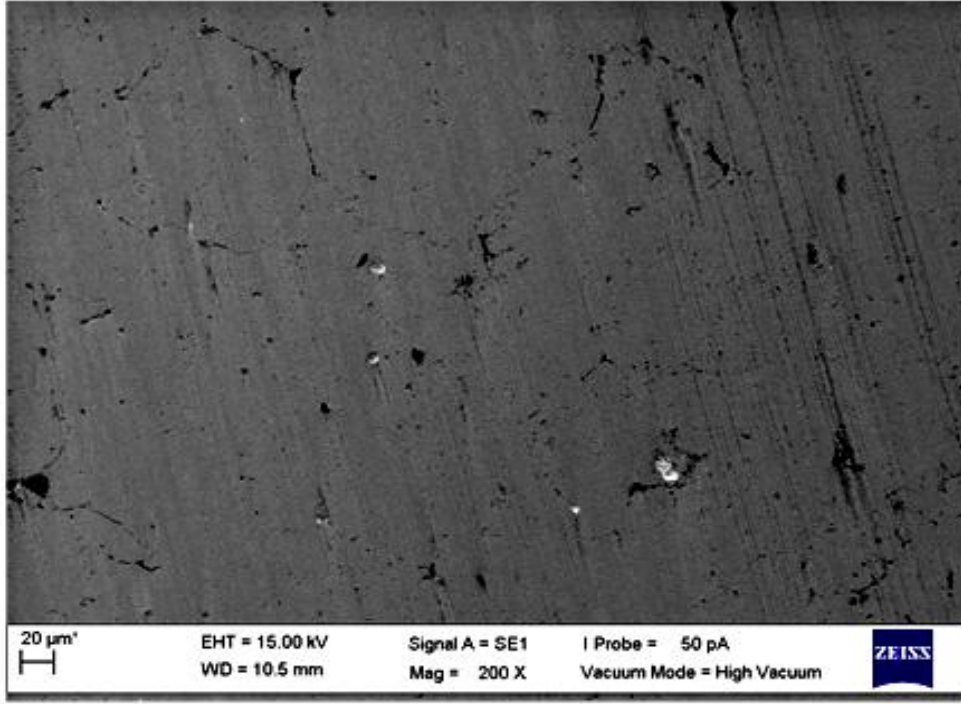


Şekil 3.22. Sinterleme sıcaklığıyla sinter yoğunluğunun değişimi (Sinterleme süresi 60 dakika).

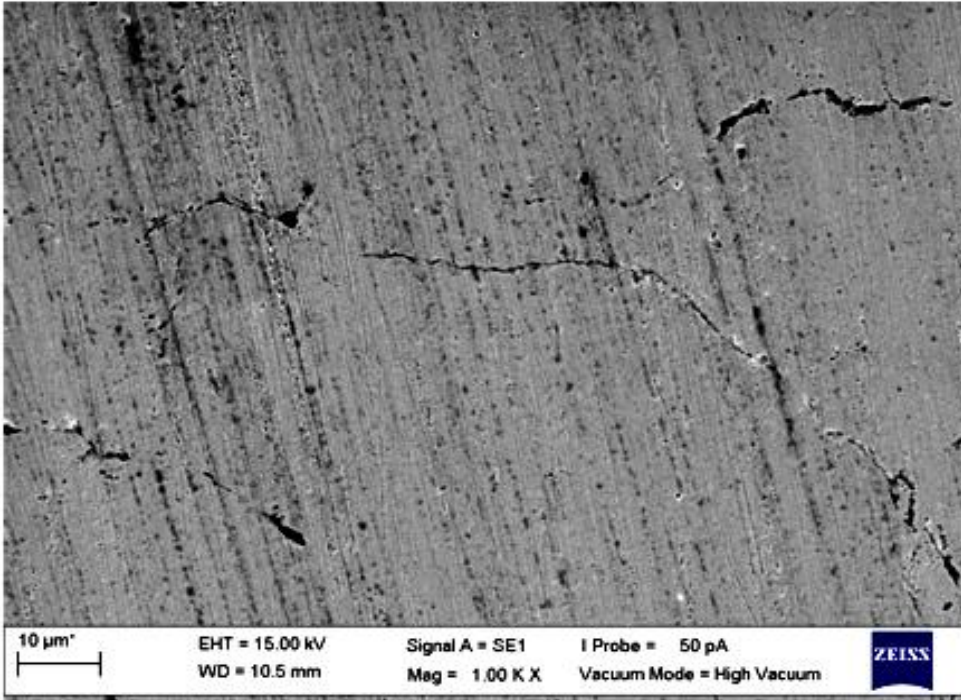


Şekil 3.23. Sinterleme sıcaklığıyla sertliğin değişimi (Sinterleme süresi 60 dakika).

Sinterlenmiş numunelerde, sinterleme süresine bağlı olarak iç yapı değişimi, 1200 °C sabit sinterleme sıcaklığında, 60, 75, 90 ve 105 dak. süreler için, Şekil 3.24-27'de sunulmuştur. İç yapıdaki değişimlerin tam olarak görülebilmesi için, her bir sinterleme süresi için iç yapılar küçük ve büyük büyültme olarak verilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi, 60 dakikalık sinterlemede iç yapıda gözenek sayısı yüksek olup, sinterleme süresinin yetersizliğinden dolayı toz parçacıkları arasındaki sınır belirgin durumdadır. Sürenin 75 dak. çıkartılmasıyla gözenek miktarında görülür bir azalma ve toz tanecikleri arasındaki sınır tam olarak yok olmasa da, çok büyük oranda azalmış durumdadır. 90 ve 105 dak. sinterleme sürelerinde elde edilen iç yapılarda ise tane sınırları tamamen ortadan kalktığı, gözeneklerin ise küreselleştiği görülmektedir. 90 dak. sinterlenen parçadaki gözenek miktarı 105 dak. sinterlenen parçaya göre daha fazla iken, 105 dak. sinterlenen numunedeki gözeneklerin, nispeten uzun olan sinterleme süresinden dolayı birleşerek büyüdüğü anlaşılmaktadır.

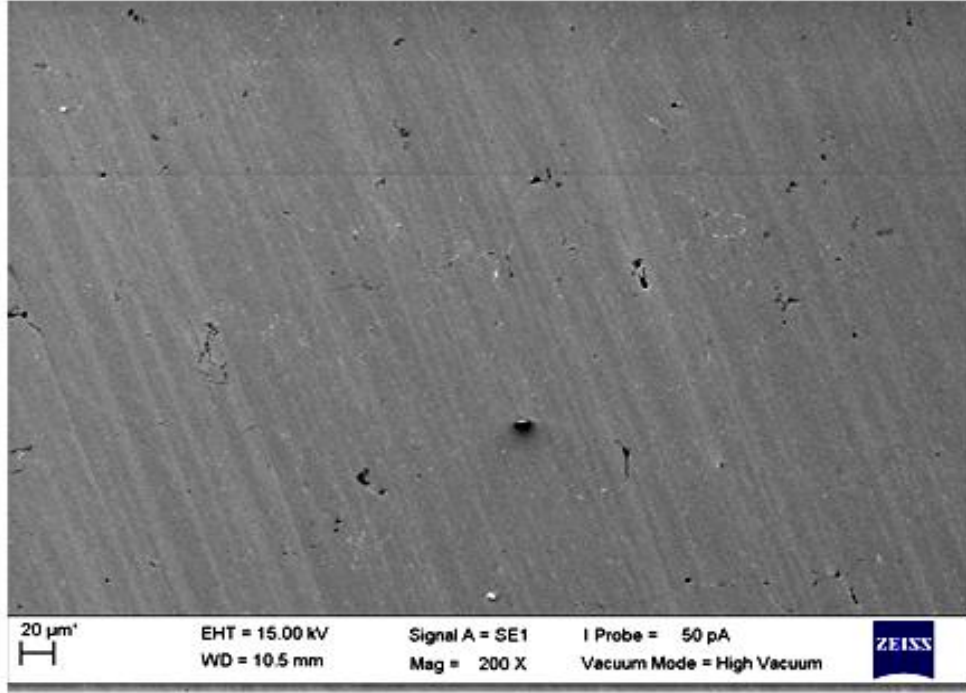


a)

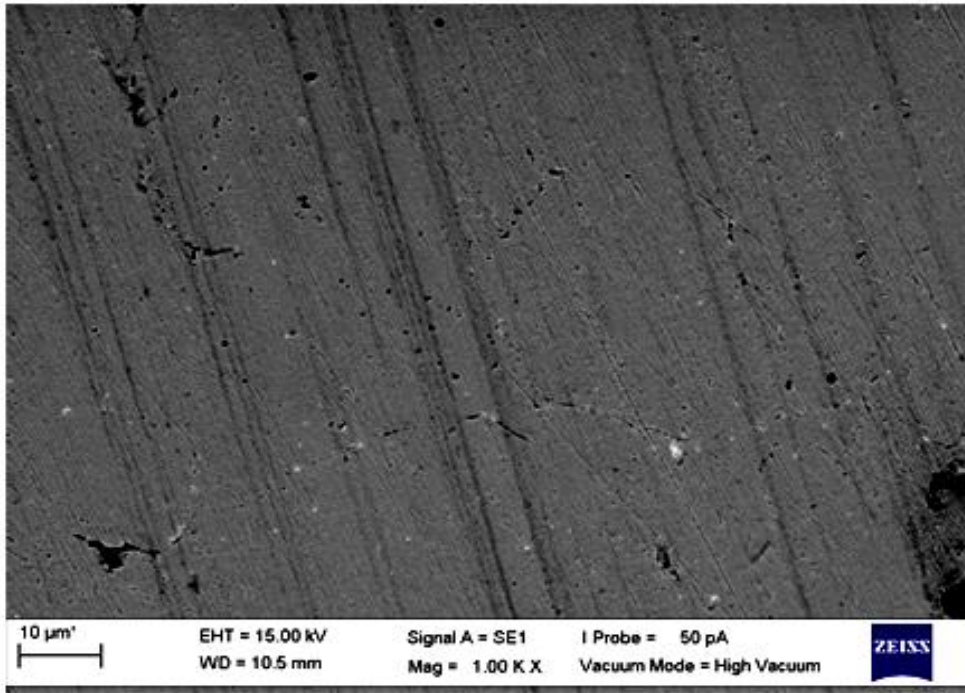


b)

Şekil 3.24. 1200 °C sinterleme sıcaklığında sinterleme süresiyle iç yapının değişimi, a)küçük büyütmedeki görünüm, b)büyük büyütmede içyapı (sinterleme süresi 60 dakika).

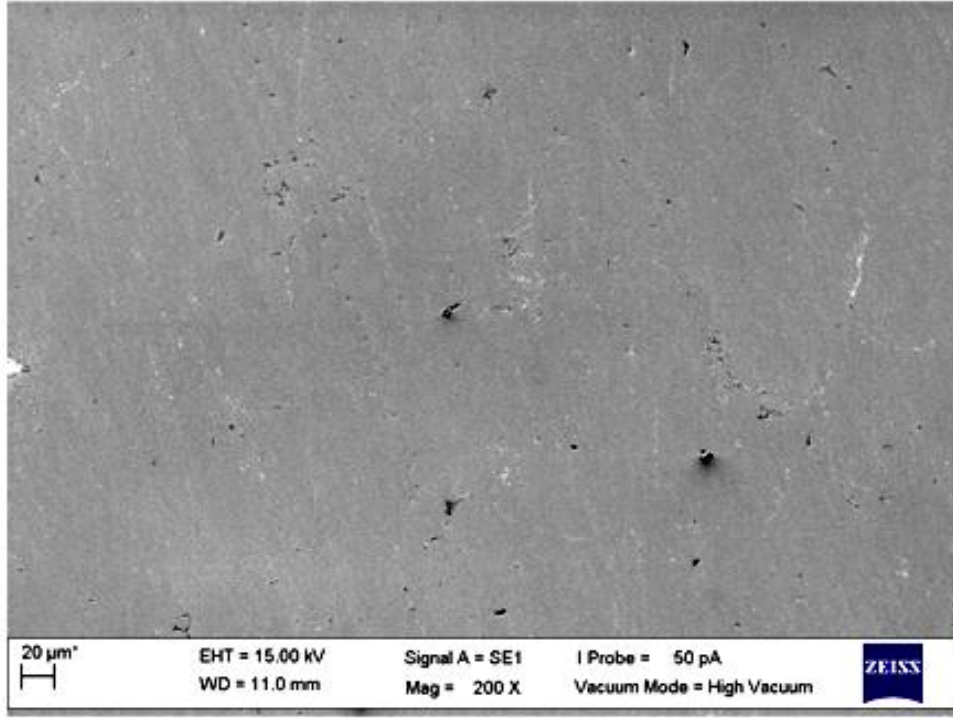


a)

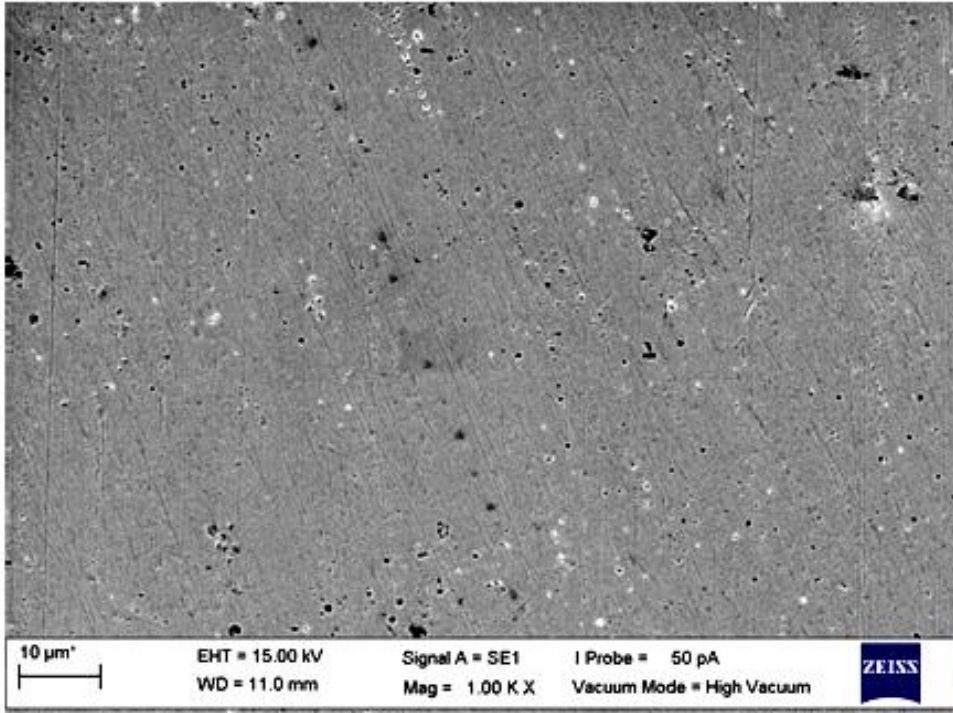


b)

Şekil 3.25. 1200 °C sinterleme sıcaklığında sinterleme süresiyle iç yapının değişimi, a)küçük büyütmedeki görünüm, b)büyük büyütmede içyapı (sinterleme süresi 75 dakika).

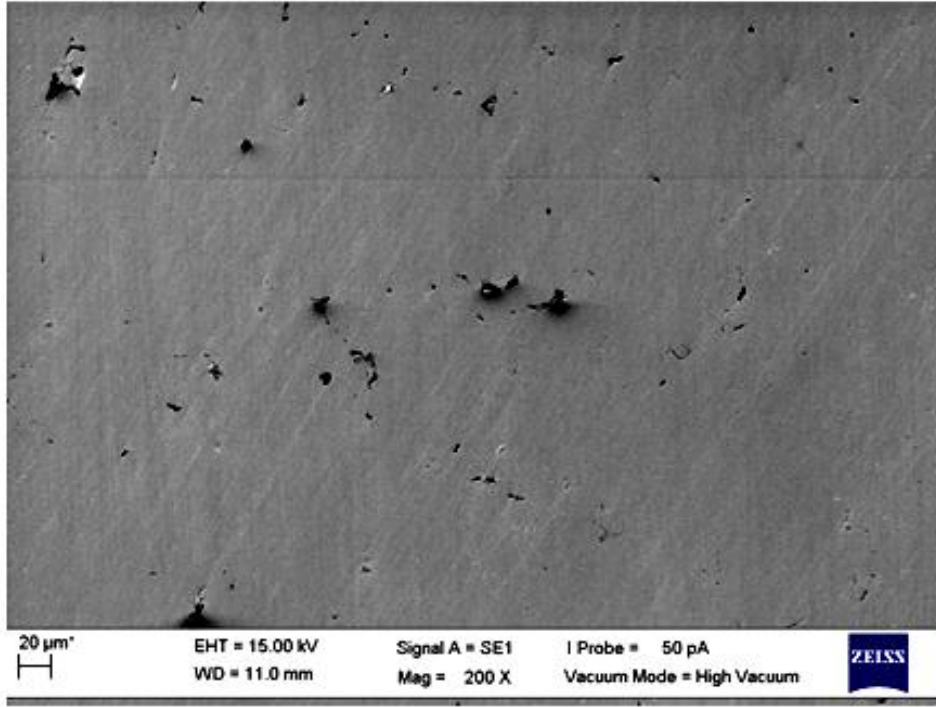


a)

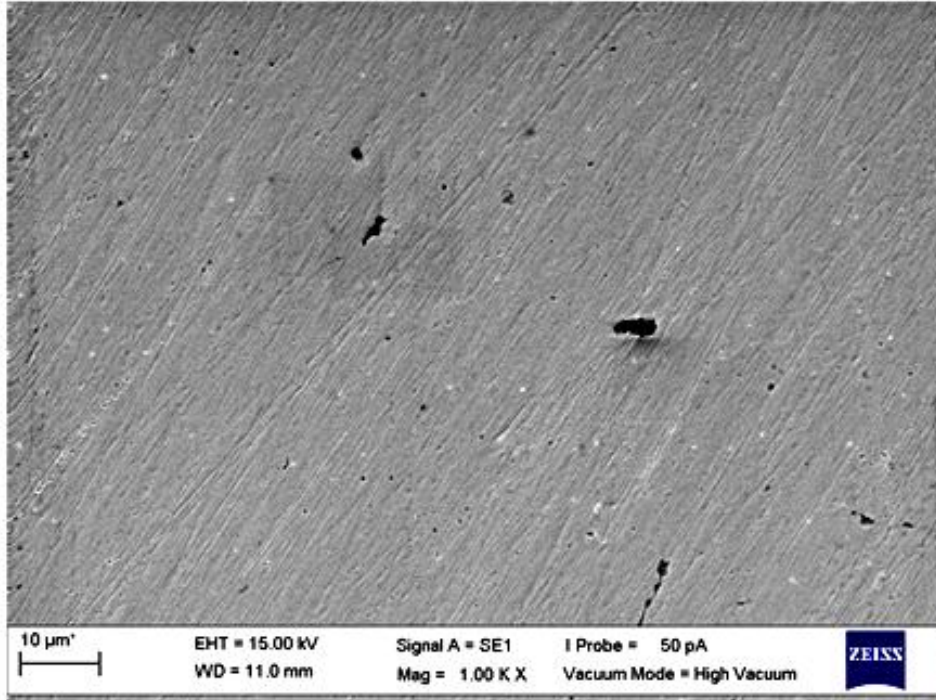


b)

Şekil 3.26. 1200 °C sinterleme sıcaklığında sinterleme süresiyle iç yapının değişimi, a)küçük büyütmedeki görünüm, b)büyük büyütmede içyapı (sinterleme süresi 90 dakika).



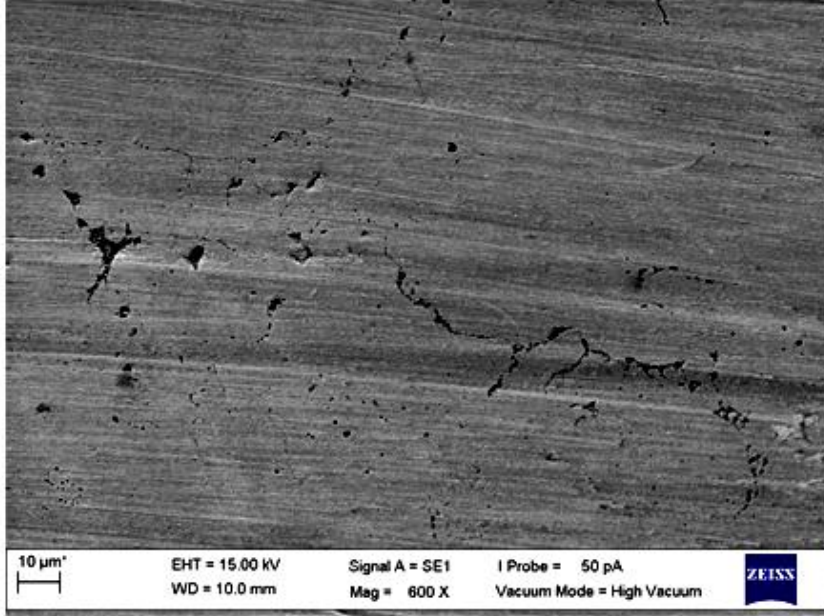
a)



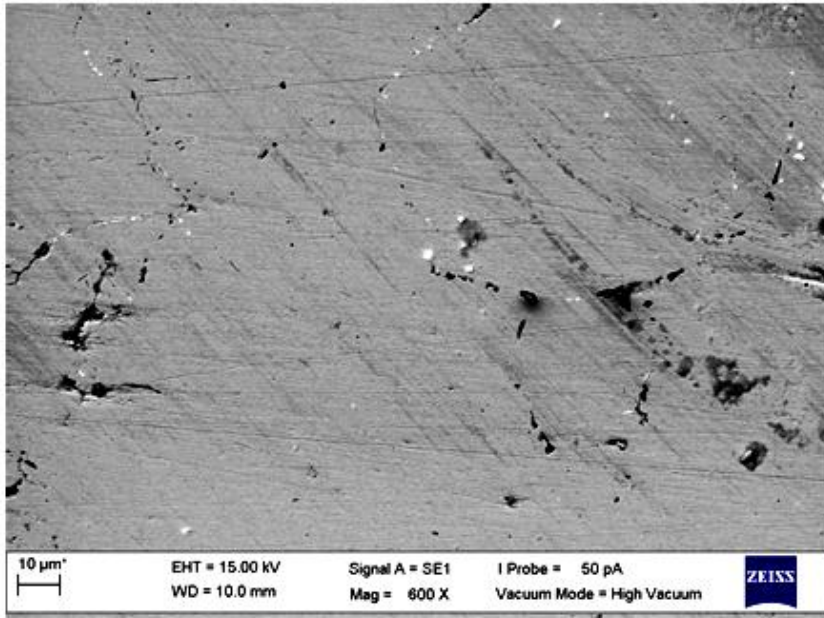
b)

Şekil 3.27. 1200 °C sinterleme sıcaklığında sinterleme süresiyle iç yapının değişimi, a)küçük büyütmedeki görünüm, b)büyük büyütmede içyapı (sinterleme süresi 105 dakika).

Sinterleme sıcaklığının parçaların iç yapısına etkileri, 60 dak. sabit sinterleme süresinde 1100, 1140, 1180 ve 1200 °C sıcaklıklar için Şekil 3.28-29'da verilmiştir.

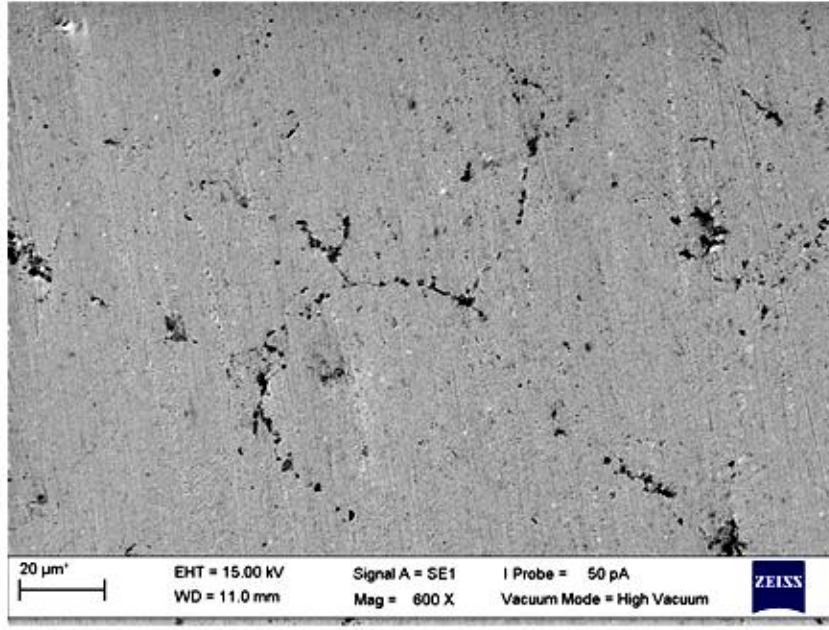


a)

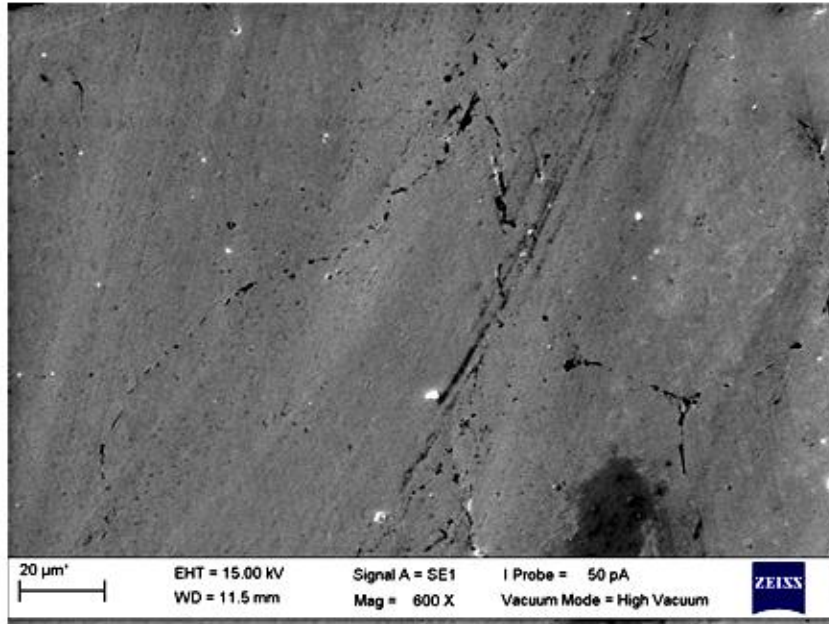


b)

Şekil 3.28. Sinterleme sıcaklığıyla iç yapının değişimi, a) 1100 °C'de sinterleme sonrası iç yapı, b) 1140 °C'de sinterleme sonrası iç yapı (sinterleme süresi 60 dakika).



a)



b)

Şekil 3.29. Sinterleme sıcaklığıyla iç yapının değişimi, a) 1180 °C’de sinterleme sonrası iç yapı, b) 1200 °C’de sinterleme sonrası iç yapı (sinterleme süresi 60 dakika).

4. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalardan ve elde edilen bulguların değerlendirilmesinden çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Üretilen Ni-Cu alaşımı (Monel 400) alaşımı tozların tamamı küresel şekilli olup toz boyutuna bağlı olarak toz şekli değişmemiştir. Toz boyutu 90 μm 'dan büyük boyutlu olan tozlarda yüzeylerde çekilme boşluğu olduğu gözlenmiştir. Toz boyutu büyüdükçe çekilme boşluğu miktarının arttığı tespit edilmiştir.
2. Disk hızı, disk geometrisi, sıvı metal akış debisi vb. atomizasyon parametrelerinin toz şeklini etkilemediği tespit edilmiştir
3. Küçük boyutlu tozlarda eş eksenli hücrel mikroyapı gözlenirken, toz boyutunun büyümesiyle eş eksenli hücrel yapıdan hücrel dendritik ve dendritik yapılara doğru değişim gösterdiği gözlenmiştir.
4. Azalan toz boyutuyla hücre boyutunda azalmalarla birlikte mikrosertlik değerlerinde artış gözlenmiştir.
5. Monel 400 alaşımından üretilen tozlarının yüzeylerindeki ince oksit film tabakasının yüksek saflıkta (%99,999 saflıkta) hidrojen atmosferinde 550 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 10 dak. süre içerisinde temizlendiği anlaşılmıştır.
6. İndirgeme sonrasında görünür yoğunlukta ve akış hızında önemli artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir.
7. Artan presleme basıncıyla parça yoğunluğunun arttığı açıkça görülmüştür. Numuneler 150 MPa basınçla preslendiklerinde, hızlı bir yoğunluk artışı gözlenmiş, görünür yoğunlukları teorik yoğunluğun %38'i olan tozlarda 600 MPa basınç sonrasında %83 ham yoğunluk elde edilmiştir.
8. Artan presleme basıncıyla Vickers sertlik değerlerinde artışlar gözlenmiş, porozitenin azaldığı, tozlardaki plastik deformasyonun, parçacıklar arası temas alanının ve koordinasyon sayısının arttığı tespit edilmiştir.
9. Artan sinterleme süresi ve sıcaklık şartlarında sinter yoğunluğunun arttığı gözlenmiştir. Artan süre ile birlikte yoğunlukta bir miktar azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. 1180 $^{\circ}\text{C}$ sinterleme sıcaklığında optimum sinter süresi olarak 105 dakika belirlenirken, 1200 $^{\circ}\text{C}$ için bu süre 90 dakika olarak tespit edilmiştir.

10. Artan sinterleme süresiyle Rokwell sertlik değerlerinde ve çekme mukavemeti değişimlerinde artışlar gözlenmiştir. Sertlik değerlerinde ve çekme mukavemeti değişimlerinin sinter yoğunluğuyla doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.
11. 90 ve 105 dakika sinterlenen numunelerden elde edilen iç yapılarda tane sınırları tamamen ortadan kalktığı, gözeneklerin ise küreselleştiği tespit edilmiştir. Gözeneklerin, 105 dakikalık sinterlemede nispeten uzun olan sinterleme süresinden dolayı birleşerek büyüdüğü gözlenmiştir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada belirlenen parametrelerle optimum sonuçlara ulaşıldığından çalışma tam amacına ulaşmıştır. Herhangi bir öneri sunmaya gerek yoktur.

6. KAYNAKLAR

1. Bozkurt, Ç. ve Ünal, R., Gaz Atomizasyon Yöntemi ile Metal Tozu Üretiminde Gaz Akış Modelleri, 1. Ulusal Metalürji ve Malzeme Günleri, Mayıs 2004, Eskişehir, Bildiriler Kitabı, 125-142.
2. Öveçoğlu, M.L., Toz Metalürjisi: Tarihsel Gelişimi, Üretim Aşamaları ve Yeni Eğilimler, 9. Uluslararası Metalurji ve Makine Kongresi, Haziran 1997, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 449-475.
3. <http://www.turktoz.gazi.edu.tr/makale.htm>, TTMD-Türk Toz Metalürjisi Derneği Online Yayını, Toz Metalürjisi, Türk Toz Metalürjisi Derneği, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. 1 Mart 2011.
4. Turhan, H., Yıldız, T. ve Gülenç, B., Toz Metalurjisi ile Üretilen CuFeMn ve CuFeCr Metal Matrisli Kompozitlerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 19, 4(2007), 569-574.
5. Özdural, H., Toz Metal Ticaret ve Sanayi A.Ş., 1. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı, Eylül 1996, Ankara, Bildiriler Kitabı, 725-729.
6. Baksan, B., Gürler, R., Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması, Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir, 2003.
7. Turan, H., Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara. 1993.
8. Narasimhan, K.S., Sintering of powder mixtures and the growth of ferrous powder metallurgy, Materials Chemistry and Physics, 67 (2001) 56-65.
9. German, R.M., Powder Metallurgy Science, Second edition, Metal Powder Industries Federation, USA, 1994.
10. Sarıtaş, S., PM Gathers Pace in Turkey, Metal Powder Report, 54, 9 (1999) 34-37.
11. Özgün, Ö., Toz Metalürjisi ile Üretilen Alaşımli Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
12. Verlinden, B., Froyen, L., Aluminium Powder Metallurgy European Aluminium Association, 1994, 26-9.
13. Kurt, A.O., Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, <http://www.sakarya.edu.tr/~aokurt/dersler>, 21 Mart 2011.
14. German, R.M., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, ed: Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N., Birinci Basım, Türk Toz Metalürjisi Derneği Yayınları:05, Ankara, 2007.

15. Öztürk, S., Su Soğutmalı Döner Disk Atomizasyon Yöntemiyle Toz ve Şerit Üretiminde İşlem Parametrelerinin Etkisi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.
16. Kaysser W.A., and Rzesnitzek, K., 1990, Principles of atomization, Science of Sintering, Ed. D.P. Uskokovic, Plenum Press, 157 – 174.
17. Klar, E., and Fesko, J.W., Atomization, Metals Handbook, 9th ed., Ohio, 1984, 25-39.
18. Dunkley, J. J., Atomization of Metal Powders, Powder Metallurgy: An Overview, 1991, 2-21.
19. Antony, L.V.M. ve Reddy, R.G., Process for Production of High-Purity Metal Powders, JOM, March (2003) 14-18.
20. Putting Some Spin Into Atomisation, Metal Powder Report, 60,12 (2005) 28-30.
21. Matei, G., Matei, D. ve Moraru, V., Studies on the Metal and Alloys Atomization Methods, 1. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı, Eylül 1996, Ankara, Bildiriler Kitabı, 67 - 87.
22. [http:// specialmetals.com/MONEL alloy 400](http://specialmetals.com/MONEL%20alloy%20400). 12 Mart 2011.
23. [http:// doc.tms.org/JOM/JOMDepartment- A Century of metal : 1996-2006](http://doc.tms.org/JOM/JOMDepartment-A%20Century%20of%20metal%20%3A%201996-2006). 12 Mart 2011.
24. Dutta R.S., Corrosion aspects of Ni–Cr–Fe based and Ni–Cu based steam generator tube materials, Journal of Nuclear Materials, 393 (2009) 343–349.
25. Doğan, C. ve Sarıtaş, S., Döner Disk Atomizasyon Yöntemiyle Kurşun Tozu Üretimi, 4. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, Eylül 1990, Ankara, Bildiriler Kitabı, 307-316.
26. Patterson, R.J., Rotating Disc Atomization, Metals Handbook, 9th ed., Ohio, 1984, 45-47.
27. Shue, K.Y. ve Yeh, J.W., The Characterization of the Al-12 wt Pet Si Flake Powder Produced by a Double - Disk Process, Metallurgical and Materials Transactions A., 26A (1995) 1571-1581.
28. Mackaplow, M.P., Zarraga, I.E. ve Morris, J.F., Rotary Spray Congealing of a Suspension: Effect of Disk Speed and Dispersed Particle Properties, Journal of Microencapsulation, 23,7 (2006) 793-809.
29. Teunou, E. ve Poncelet, D., Rotary Disc Atomisation for Microencapsulation Applications-Prediction of the Particle Trajectories, Journal of Food Engineering, 71 (2005) 345-353.

30. Doğan, C. ve Sarıtaş, S., Metal Powder Production by Centrifugal Atomization, The International Journal of Powder Metallurgy, 3, 4 (1994) 419-427.
31. Angers, R., Tremblay, R. ve Dube, D., Formation of Irregular Particles During Centrifugal Atomization of AZ91 Alloy, Materials Letters, 33 (1997) 13-18.
32. Fukai, J., Shiiba, Y., Yamamoto, T., Miyatake, O., Poulikakos, D., Megaridis, C.M. ve Zhao, Z., Wetting Effects on the Spreading of a Liquid Droplet Colliding with a Flat Surface: Experimental and Modeling, Phys. Fluids, 7, 2 (1995) 236-247.
33. Ho, K.H., Zhao, Y.Y., Modelling thermal development of liquid metal flow on rotating disc in centrifugal atomization, Materials Science and Engineering A, 365 (2004) 336-340.
34. Xie, J.W., Zhao, Y.Y. ve Dunkley, J.J, Effects of Processing Conditions on Powder Particle Size and Morphology in Centrifugal Atomisation of Tin, Powder Metallurgy, 47,2 (2004) 168-172.
35. Zhao, Y.Y., Considerations in Designing a Centrifugal Atomiser for Metal Powder Production, Materials & Design, 27 (2006) 745-750.
36. Öztürk, S. ve Arslan, F., Production of Rapidly Solidified Metal Powders by Water Jet Cooled Rotating Disc Atomisation, Powder Metallurgy, 44, 2 (2001) 171-176.
37. Sahu, S.N., Harikishore, S. ve Korla, S.C., Solidification Behaviour of Droplets In Spray Deposition, Powder Metallurgy, 48,3 (2005) 270-276.
38. Satoh, T., Okimoto, K. ve Nishida, S., Material of Rotating Disk in Centrifugal Atomization Method, Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress, 730 - 733.
39. Öztürk, S. ve Arslan, F., Su Soğutmalı Döner Disk Atomizasyonu Yöntemiyle Hızlı Katılaştırılmış Metal Tozu Üretiminin İncelenmesi, Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı, Eylül, 1999, Ankara, Bildiriler Kitabı, 409-415.
40. Suryanarayana, C., Froes, F.H. ve Quist, W.E., Non - Equilibrium Processing of Powder Alloys for Aerospace Applications, Advances in Powder Metallurgy, 6 (1991) 15-29.
41. Koch, C.C., Nanostructured Materials - Processing, Properties, and Applications Structure Formation and Mechanical Behavior of Two-Phase Nanostructured Materials, 2nd Edition, William Andrew Publishing, 2007.
42. Singh, R.P., Lawley, A. ve Friedman, S., Microstructure and Properties of a P/M Processed Cu-Zr Alloy, Proceedings of the 1989 Powder Metallurgy Conference & Exhibitron, June, 1989, San Diego, Calif.
43. Lee, S.M., Handbook of Composite Reinforcements: Metal Matrix Composites, Rapid Solidification Processing, John Wiley & Sons, 1993.

44. Hyoung, S., K., Yield and compaction behavior of rapidly solidified Al–Si alloy Powders, Materials Science and Engineering A, 251 (1998) 100–105.
45. Gimenez, S., Vagnon, A., Bouvard, D., Van der Biest, O., Influence of the green density on the dewaxing behavior of uniaxially pressed powder compacts, Materials Science and Engineering A, 430 (2006) 277–284.
46. Price, P., ASM Handbook, Powder Metal Technologies and Applications, vol:7, 1998.
47. Nutku, F., Toz Metalurjisi İle Üretilen Parçaların Tahribatsız Muayenesi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
48. German, R.M., Powder Metallurgy Science, MPIF, 203-335, USA, 1989.
49. Somunkıran I., Kobalt Esaslı Alaşımların Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi, Mikro yapı ve Mekanik Özelliklerin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
50. German, R.M., Materials Processing Handbook Powder Processing, 2007
51. Ünlü, N., Çavusoglu, L., Toz Metalurjisinin Yaygın Kullanım Alanları, Metal Dünyası, Teknik Yazı, sayı: 11-12, İstanbul, 1995.
52. Fischmeister, H.F., Arzt, E., Densification of powders by particle deformation, Powder Metallurgy, vol:26, no:2, 1983.
53. Poquillon, D., Lemaitre, J., Carles, V., Tailhades, Ph., Lacaze J., Cold compaction of iron powders relations between powder morphology and mechanical properties Part I: Powder preparation and compaction, Powder Technology 126 (2002) 65–74.
54. Okuyama, K., Sintering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Japan, 2007.
55. R.M. German, Sintering Theory and Practice, Wiley-Interscience Publications, New York, (1996).
56. Wang, Y., U., Computer modeling and simulation of solid-state sintering: A phase field approach, Acta Materialia, 54 (2006) 953–961.
57. Ji, C.H., Loh, N.H., Khor, K.A., Tor, S., B., Sintering study of 316L stainless steel metal injection molding parts using Taguchi method: final density, Materials Science and Engineering A, 311 (2001) 74–82.

ÖZGEÇMİŞ

Fatih ERDEMİR 1984 yılında Giresun'da doğdu. 2002 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2006 yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 2007 yılında Çanakkale'nin Gelibolu ilçesinde kısa dönem asker olarak askerlik hizmetini tamamladı. 2007 -2009 yılları arasında yüksek basınçlı alüminyum döküm yapan bir firmada Üretim Mühendisi olarak çalıştı. 2009 yılında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Aynı yıl K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü 50/d kadrosuna Araştırma Görevlisi olarak atanmış olup halen görevine devam etmektedir. İyi derecede İngilizce bilmektedir.