

**GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE AZ91 TOZU
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**2017
DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Mehmet AKKAŞ

**GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE AZ91 TOZU
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Mehmet AKKAŞ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Kasım 2017

Mehmet AKKAŞ tarafından hazırlanan “GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE AZ91 TOZU ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 17/11/2017

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Adem KURT (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Serdar SALMAN (MÜ)

Üye : Doç. Dr. Serkan ISLAK (KÜ)



...../...../2017

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.

.....



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mehmet AKKAŞ

ÖZET

Doktora Tezi

GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE AZ91 TOZU ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Mehmet AKKAŞ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Kasım 2017, 146 sayfa

Bu çalışmanın amacı, gaz atomizasyon yöntemiyle AZ91 tozu üretimi ve karakterizasyonunun deneysel olarak araştırılarak, gaz basıncı, nozul çapı ve sıcaklık arasındaki değişimlerde optimum toz üretme parametrelerinin araştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda öncelikli olarak Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde gaz atomizasyon ünitesi tasarımı ve imalatı yapılmıştır. İmalatı yapılan bu gaz atomizasyonu ünitesinde, magnezyum alaşımı olan AZ91 tozunun üretilebilirliği araştırılmıştır. Üretilebilirlik parametreleri olarak AZ91 alaşımına benzerlik gösteren malzemelerde kullanılan parametreler ve literatür göz önünde bulundurulmuştur.

Deneysel çalışmalar üç farklı sıcaklık (770, 795, 820 °C), dört farklı nozul çapı (2, 3, 4, 5 mm) ve dört farklı gaz basıncı (5, 15, 25, 35 bar) uygulanarak yapılmıştır. Sıvı metal ergiyiği atomize etmek ve koruyucu gaz atmosferi oluşturmak için argon gazı

kullanılmıştır. Üretilen AZ91 tozlarının şeklini belirleyebilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM), üretilen tozların iç-yapılarında oluşan fazları ve bu fazların yüzde oranlarını belirleyebilmek için XRD, XRF ve SEM-EDX analizi, toz boyut analizi için ise lazer ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ayrıca üretilen tozların sertliklerinin tespiti amacıyla da mikrosertlik ($HV_{0,025}$) ölçümü yapılmıştır.

Tozların homojen dağılımını sağlayabilmek amacıyla, tozlar preslenmeden önce üç boyutlu hareket edebilen bir turbulada 30 dakika süresince karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar 300, 400, 500 ve 600 MPa basınçlarda preslenerek kütle haline getirilmiştir. Kütle haline getirilen numunelerin optimum sinterlenebilirlik değerlerini belirleyebilmek için 500, 550 ve 600 °C’de sinterleme işlemi yapılmıştır. Numunelerin sinterleme sıcaklıklarının ve sıcaklık değişimlerinin belirlenebilmesi amacıyla da TGA-DTA analizleri yapılmıştır. Bunun yanısıra, kütle haline getirilen malzemelerin sinterleme öncesi ve sonrasında yoğunluk değerleri tespit edilmiştir. Tespit edilen yoğunluk değerlerini doğrulamak amacıyla sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası numunelerin kırık yüzeylerinden SEM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca sinterleme sonrası mikroyapı görüntüsü için optik mikroskop ve SEM kullanılmıştır. Kimyasal bileşimin belirlenebilmesi amacıyla da XRD ve EDX analizi yapılmıştır. Bunlara ek olarak presleme basıncının ve sinterleme sıcaklığının sertlik üzerine etkisini belirleyebilmek amacıyla numunelerin baskı yüzeyinden mikrosertlik ($HV_{0,5}$) alınmıştır.

Deneysel çalışmaların sonucunda, gaz basıncının artması ve nozul çapının küçülmesi ile toz boyutunun küçüldüğü ve toz şeklinin ligament ve karmaşık şekilden damlamsı ve küresele doğru değiştiği tespit edilmiştir. Sıcaklığın toz boyutunda ve şeklinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Alınan XRD, XRF ve EDX sonuçlarında yapının, α (Mg ana matris) fazı ve β ($Mg_{17}Al_{12}$) arafazından oluştuğu tespit edilmiş ve çok az miktarda da MgO’ın varlığına rastlanmıştır. Üretilen tozların sertliğinin gaz basıncının artmasına bağlı olarak arttığı ve en yüksek toz sertliğinin 35 bar gaz basıncında 111 $HV_{0,025}$ olduğu kaydedilmiştir.

Kütle haline getirilen numunelerin yoğunlukları hem presleme basıncı hem de sinterleme sıcaklığının artmasıyla artmıştır. En yüksek sinterleme öncesi bağlı

yoğunluk değeri 600 MPa presleme basıncında % 92,40 olarak belirlenirken, sinterleme sonrası bağıl yoğunluk değeri ise 600 MPa presleme basıncında % 93,70 olarak belirlenmiştir. Presleme basıncının artması ile numunelerde oluşan gözeneklilik miktarlarının azaldığı ve var olan gözeneklerin hacimlerinin de küçüldüğü sinterleme öncesi kırık yüzey SEM görüntülerinden tespit edilmiştir. Düşük sinterleme sıcaklıklarında (özellikle 500 °C) kırılma taneler arası şeklinde meydana gelirken, sinterleme sıcaklığı arttıkça sünek kırılma şeklinde meydana geldiği belirlenmiştir. Sinterleme sonrası yapının toz tanelerinde olduğu gibi tipik dendiritik bir yapıya sahip olduğu ve yapıda α -Mg matris fazının yanı sıra, β ($Mg_{17}Al_{12}$) intermetalığı ve $\alpha+\beta$ fazı oluştuğu tespit edilmiştir. Numunelerin mikrosertlik değerleri ise sinterleme sıcaklığına bağlı olarak azalırken, en yüksek sertlik değeri 64,02 HV_{0,5} ile 300 MPa presleme basıncı ve 500 °C' sinterleme sıcaklığında ölçülürken, 600 MPa presleme basıncı ve 600 °C sinterleme sıcaklığında 54,86 HV_{0,5} ile en düşük sertlik değeri elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Gaz atomizasyonu, AZ91 alaşım tozu, gaz basıncı, nozul çapı.

Bilim Kodu : 915.1.195

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

AZ91 POWDER PRODUCTION AND CHARACTERIZATION BY GAS ATOMIZATION METHOD

Mehmet AKKAŞ

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa BOZ

November 2017, 146 pages

The aim of this study is to produce parameters of gas pressure, temperature and temperature differences optimum powder production by investigating AZ91 powder production and characterization with experiments using gas atmosphere method. For this purpose, gas atmosphere unit was designed and manufactured at Karabük University Faculty of Technology Department of Manufacturing Engineering. The manufacturability of AZ91 powder was investigated. As well as manufacturability parameters, departmental parameters and the literature were taken into account, showing similarity to AZ91 alloy.

Experimental studies were carried out using three different temperatures (770, 795, 820 °C), four different nozzle diameters (2, 3, 4, 5 mm) and four different gas pressures (5, 15, 25, 35 bars). Argon gas was used to atomize the melt and frame a protective gas atmosphere. X-ray diffraction (XRD), XRF and SEM-EDX analyzes were used to

determine the phases of the internals of the produced powders and the percentage of these phases, and a laser measurement device was used for powder size analysis to determine the shape of AZ91 powders. Microhardness ($HV_{0,025}$) measurements were also made to determine the hardness of the powders.

In order to provide homogeneous distribution of the powders, the powders were mixed for 30 minutes in a turbulent three-dimensional motion before pressing. The mixed powders made into bulky by pressing at 300, 400, 500 and 600 MPa. Sintering was carried out to determine the optimum sinterability values of the bulked samples at 500, 550 and 600 °C. TGA-DTA analyzes were also performed to determine the sintering temperatures and changes of the samples with temperature. In addition, density values were determined before and after sintering of the bulk material. SEM images were taken from the fractured surfaces of the samples before and after sintering in order to verify the determined density values. In addition, optical microscope and SEM were used for post-sintering internal structure. XRD and EDX analyzes were also carried out to determine the chemical composition. In addition, microhardness value ($HV_{0,5}$) was taken from the surface of the specimens to determine the effect of the pressing pressure and the sintering temperature on the hardness.

As a result of the experimental studies, it was found that the powder size decreased with the increase of the gas pressure and the nozzle diameter, and the powder shape changed to the dripping and the spherical in the ligament and complex form. It has been seen that the temperature has no significant effect on the powder size and shape. The XRD, XRF and EDX results show that MgO is formed from the $Mg_{17}Al_{12}$ interface, which is the α (Mg main matrix) phase and β phase, and the presence of MgO is found in very small amounts. It was noted that the hardness of the powders produced increased with increasing gas pressure and the highest powder hardness was 111 $HV_{0,025}$ at 35 bar gas pressure.

The densities of the bulk samples increased with both increasing pressing pressure and sintering temperature. The relative density value before sintering was determined as 92,40% at 600 MPa pressing pressure whereas the relative density value after sintering was determined as 93,70% at 600 MPa pressing pressure. The fracture surface prior to

sintering, where the amount of porosity in the specimens decreased and the volumes of the existing pores decreased with the increase of the pressing pressure, were determined from the SEM images. It has been determined that at low sintering temperatures (especially 500 °C), fracture occurs between intergranular cracks, while ductile fracture occurs as the sintering temperature increases. It has been found that the post-sintering structure has a typical dendritic structure and in addition to the α -Mg matrix phase, β ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$) intermetallic and $\alpha + \beta$ is formed in the structure. While the microhardness values of the samples decreased with the sintering temperature, the highest hardness values were measured with compression pressures of 64.02 $\text{HV}_{0.5}$ to 300 MPa and at a sintering temperature of 500 °C, while press pressures of 600 MPa and 54.86 $\text{HV}_{0.5}$ at 600 °C sintering temperature the lowest hardness value was obtained.

Key Word : Gas atomization, AZ91 alloy powder, gas pressure, nozzle diameter.

Science Code : 915.1.195

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu doktora çalıőmasının her aőamasında, üstün bilgi ve deneyimi ile bana yön veren ve pozitif yöndeki motivasyonlarıyla bu çalışmanın gerçekleşmesi için azami desteği sağlayan, ayrıca eğitim hayatım boyunca iőtirak ettiğim derslerinde her açıdan mesleki bilgi ve görgü düzeyimi artırma fırsatını bulduğum tez danışman hocam Prof. Dr. Mustafa BOZ'a en derin teşekkür ve őükranlarımı sunarım.

Doktora eğitime başladığım ilk günden itibaren her zaman desteğini benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak her konuda bana yol gösteren, karşılaőtığım sorunlarda bana pratik çözümler sunarak farklı bakış açıları kazanmamı sağlayan, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi öğretim üyesi değerli hocam Sn. Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK ve Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi öğretim üyesi değerli hocam Sn. Doç. Dr. Serkan ISLAK'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak doktora eğitimim boyunca bana gösterdiği sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı eşim Büőra Nur'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR TARAMASI.....	3
BÖLÜM 3	13
TOZ METALURJİSİ	13
3.1. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	13
3.1.1. Mekanik Yöntemler.....	14
3.1.2. Atomizasyon Yöntemleri.....	15
3.1.3. Kimyasal Yöntemler.....	17
3.1.4. Elektroliz Yöntemi.....	17
BÖLÜM 4	19
GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ.....	19
4.1. GAZ ATOMİZASYON SİSTEMLERİ	20
4.2. GAZ ATOMİZASYON SİSTEMİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ	22
4.3. ATOMİZASYON NOZUL SİSTEMLERİ	24
4.4. GAZ ATOMİZASYON NOZUL ÇEŞİTLERİ	26

	<u>Sayfa</u>
4.5. NEGATİF VE POZİTİF BASINÇ	29
BÖLÜM 5	31
TOZLARIN ÖZELLİKLERİ	31
5.1. TEKNOLOJİK ÖZELLİKLER	31
5.1.1. Toz Akıcılığı	31
5.1.2. Görünür Ve Titreşimli Yoğunluk	32
5.1.3. Sıkıştırılabilirlik	32
5.2. FİZİKSEL ÖZELLİKLER	33
5.2.1. Toz	33
5.2.2. Toz Şekli	34
5.2.3. Toz Boyutu Ve Dağılımı	35
5.2.4. Özgül Yüzey Alanı (Spesifik Yüzey Alanı)	35
5.2.5. Temizlik	36
BÖLÜM 6	37
TOZ METALURJİSİ İLE PARÇA İMLATI	37
6.1. KARIŞTIRMA VE HARMANLAMA	37
6.2. TOZLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ	38
6.2.1. Ekstrüzyon	38
6.2.2. Haddeleme	38
6.2.3. Presleme	39
6.2.3.1. Tek Yönlü Presleme	40
6.2.3.2. Çift Yönlü Presleme	40
6.2.3.3. Soğuk İzostatik Presleme	41
6.2.3.4. Sıcak İzostatik Presleme	42
6.3. SİNTERLEME	43
6.3.1. Katı Faz Sinterleme	47
6.3.2. Sıvı Faz Sinterleme	47
BÖLÜM 7	50
MAGNEZYUM ALAŞIMLARI	50

7.1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	51
7.2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	53
7.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI.....	53
7.3.1. AZ91 Magnezyum Alaşımının Özellikleri	55
7.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ	57
7.4.1. Alüminyumun Etkisi.....	57
7.4.2. Demirin Etkisi.....	58
7.4.3. Manganın Etkisi.....	58
7.4.4. Çinkonun Etkisi	59
7.4.5. Zirkonyumun Etkisi	59
7.4.6. Bakırın Etkisi.....	59
7.4.7. Nikelin Etkisi.....	60
7.4.8. Nadir Toprak Elementlerinin Etkisi.....	60
7.5. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI.....	60
7.5.1. Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı.....	60
7.5.2. Havacılık Endüstrisinde Kullanımı	61
7.5.3. Biyomalzeme Endüstrisinde Kullanımı.....	63
BÖLÜM 8	65
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	65
8.1. GAZ ATOMİZASYON ÜNİTESİ.....	65
8.2. ATOMİZASYON ÇALIŞMALARI	72
8.3. ATOMİZE TOZLARIN ANALİZİ.....	75
8.4. ÜRETİLEN TOZLARIN SİNERLENEBİLİRLİĞİ VE MALZEME İMALATI.....	79
8.4.1. Tozların Karıştırılması.....	79
8.4.2. Tozların Preslenerek Kütle Haline Getirilmesi.....	79
8.4.3. Kütle Haline Getirilen Tozların Sinterlenmesi	80
8.4.4. Yoğunluk Ölçümü	81
8.4.5. Sinterleme Sonrası Optik Ve SEM Görüntüleri	82
8.4.6. Sinterleme Sonrası Mikrosertlik Ölçümü	83

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 9	85
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	85
9.1. TOZ BOYUT ANALİZLERİ.....	85
9.2. TOZLARIN SEM-EDX ANALİZLERİ	90
9.3. TOZLARIN XRD VE XRF ANALİZLERİ.....	105
9.4. TOZLARIN MİKRO SERTLİK İNCELEMELERİ	107
9.5. ÜRETİLEN TOZLARIN SİNERLENEBİLİRLİĞİ VE MALZEME İMALATI	108
9.5.1. Sinterleme Öncesi Ve Sinterleme Sonrası Yoğunluk Analizi	108
9.5.2. Tozların Sinterlenmesi.....	112
9.5.2.1. Sinterleme Sonrası SEM-EDS Sonuçları.....	115
9.5.2.2. Sinterleme Sonrası Optik Mikroskop Görüntü Analizi	122
9.5.2.3. Sinterleme Sonrası Kırık Yüzey SEM Analizi	125
9.5.2.4. Sinterleme Sonrası Mikrosertlik Analizi	128
BÖLÜM 10	131
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	131
10.1. GENEL SONUÇLAR	131
10.2. ÖNERİLER	134
KAYNAKLAR	135
ÖZGEÇMİŞ	146

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Öğütme yönteminin şematik görüntüsü	15
Şekil 3.2. Gaz atomizasyon sistemi	16
Şekil 3.3. Üretim metotlarına göre toz şekilleri	16
Şekil 3.4. Kimyasal yöntemle demir tozu imalatı	17
Şekil 3.5. Elektroliz Yöntemi	18
Şekil 4.1. Yatay olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sistemi	20
Şekil 4.2. Düşey olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sistemi	21
Şekil 4.3. Ligamentlerin bölünmesiyle toz oluşumu	22
Şekil 4.4. Gaz atomizasyon sisteminde üç safhanın şematik gösterimi	23
Şekil 4.5. Metal tozu oluşum aşamaları	24
Şekil 4.6. Yakından eşlemeli nozul sisteminin şematik gösterimi	25
Şekil 4.7. Serbest düşmeli nozul sistemi şematik gösterimi	25
Şekil 4.8. Atomizasyon nozul çeşitleri	26
Şekil 4.9. Nozul geometrileri	27
Şekil 4.10. Sonik geometrili nozulda yüksek hızlı gaz jetinin gelişimi	27
Şekil 4.11. Süpersonik geometrili nozulda yüksek hızlı gaz jetinin gelişimi	28
Şekil 4.12. Sıvı metal akışlar için nozul geometrisi	28
Şekil 4.13. Nozul geometrisi tipleri.....	29
Şekil 4.14. Ergiyik metal akış borusu ucunda oluşan basınç	30
Şekil 5.1. Hall hunisi.	31
Şekil 5.2. Tozların tek yönlü sıkıştırılma işlemi	33
Şekil 5.3. Metal tozu genel görünümü.....	34
Şekil 5.4. Küresel şekilli gaz atomize kalay tozlarının genel yüzey görüntüleri ...	34
Şekil 5.5. Metal tozlarının genel görünümleri	35
Şekil 5.6. Oksitlenmiş toz yüzeyi ve temiz toz yüzeyi	36
Şekil 6.1. Toz karıştırma turbulası.	37
Şekil 6.2. Ekstrüzyon işleminin şematik gösterimi.	38
Şekil 6.3. Haddeleme sistemi.	39

Şekil 6.4. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve tek yönlü kalıbın şematik gösterimi	40
Şekil 6.5. Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve çift yönlü kalıbın şematik gösterimi	41
Şekil 6.6. Soğuk izostatik presleme şematik gösterimi	42
Şekil 6.7. Sıcak izostatik presleme şematik gösterimi	43
Şekil 6.8. Sinteleme işmenin aşamaları	44
Şekil 6.9. İki tanenin sinterleme profili	45
Şekil 6.10. İki tanenin sinterleme modeli	46
Şekil 6.11. Sinterleme sırasında gözenek yapısının değişiminin şematik resim	46
Şekil 6.12. Sinterleme faz diyagramı	47
Şekil 6.13. İki toz karışımı kullanarak sıvı faz sinterlemesinin aşamaları	48
Şekil 6.14. Sıvı faz sinterleme işleminde çökeltme ve tane büyümesi	48
Şekil 7.1. Mg-Al denge faz diyagramı	58
Şekil 7.2. Volkswagen beetle motoru alaşımı	61
Şekil 7.3. ATAK helikopterinin dişli kutusu üst gövdesi	62
Şekil 7.4. Kola giyilebilen led ekranlar	62
Şekil 7.5. Yüzey bozulması sırasında Mg esaslı malzemeler ile biyo-çevre arasındaki dinamik arayüz	64
Şekil 8.1. Gaz atomizasyon ünitesi.....	66
Şekil 8.2. Ergitme fırınının iç kısmının görüntüsü ve ergitme potası.	67
Şekil 8.3. Atomizasyon kulesi.	68
Şekil 8.4. Nozul tutucu ve nozul	68
Şekil 8.5. Toz toplama ünitesi.	69
Şekil 8.6. Argon gaz rampası.	70
Şekil 8.7. Manometre.	70
Şekil 8.8. Siklonlar.	71
Şekil 8.9. Kontrol paneli.....	72
Şekil 8.10. Gaz atomizasyon akış şeması.....	73
Şekil 8.11. Parçacık boyut ölçüm cihazı.	75
Şekil 8.12. Carl zeiss ultra plus gemini fesem SEM analiz cihazı.	76
Şekil 8.13. RIGAKU - Ultima IV XRD analiz cihazı.	76
Şekil 8.14. RIGAKU ZSX Primus II XRF analiz cihazı.	77
Şekil 8.15. HITACHI STA7300 TGA-DTA analiz cihazı.	77

Şekil 8.16. SHIMADZU HVM-G21 model mikrosertlik ölçüm cihazı.	78
Şekil 8.17. Külçe AZ91 malzemesi ve bakalite alınan tozlar.....	78
Şekil 8.18. Üç boyutlu turbula AZ91 tozlarının genel görünüşleri.....	79
Şekil 8.19. Kalıp ve Specac GS15011 pellet cihazı.	80
Şekil 8.20. Preslenen tozların genel görünümü.	80
Şekil 8.21. Atmosfer kontrollü ısıl işlem fırını (PTF 16/80/610).....	80
Şekil 8.22. Sinterleme işlemleri.....	81
Şekil 8.23. Bakalite alınan numunelerin genel görünüşleri.	82
Şekil 8.24. Nikon ters metalürjik mikroskop.....	83
Şekil 8.25. Q250-M Universal mikrosertlik ölçüm cihazı.	83
Şekil 9.1. Farklı basınçlar kullanılarak, 2 mm nozul çapı ve 820 °C sıcaklıkta üretile tozların boyutsal değişimleri.....	87
Şekil 9.2. Farklı sıcaklıklar, farklı nozul çapları ve farklı gaz basınçlarında üretile AZ91 tozlarının toz boyut değerlerinin gösterimi.....	89
Şekil 9.3. 2 mm nozul çapı ve farklı basınçlarda üretile AZ91 alaşım tozlarının SEM görüntüleri.....	92
Şekil 9.4. Üretile AZ91 tozunun genel görünüşlerini gösteren SEM görüntüsü. 93	
Şekil 9.5. 2 mm nozul çapı ve farklı basınçlarda üretile AZ91 alaşım tozlarının SEM görüntüleri.....	96
Şekil 9.6. 2 mm nozul çapı ve farklı basınçlarda üretile AZ91 alaşım tozlarının SEM görüntüleri.....	98
Şekil 9.7. 35 bar gaz basıncı ve farklı nozul çaplarında üretile AZ91 alaşım tozlarının SEM görüntüleri.....	101
Şekil 9.8. 820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 5 bar gaz basıncında üretile AZ91 tozunun SEM görüntüsü.	102
Şekil 9.9. 820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 35 bar gaz basıncında üretile AZ91 tozunun SEM görüntüsü.	103
Şekil 9.10. 820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 15 bar basınçta üretile AZ91 tozunun SEM görüntüsü.....	104
Şekil 9.11. 820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 15 bar basınçta üretile AZ91 tozunun EDS analizi.....	104
Şekil 9.12. AZ91 tozunun XRD sonucu.....	105
Şekil 9.13. Farklı basınçlarda üretile AZ91 tozlarının XRD sonuçları.	106
Şekil 9.14. AZ91 ana malzemesi ve üretile tozların ortalama sertlik değerleri. ...	107
Şekil 9.15. Presleme sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri.....	111
Şekil 9.16. AZ91 tozunun TGA-DTA analiz grafiği.....	112

Şekil 9.17. AZ91 alaşımlarının sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası yoğunluk değişimleri.....	114
Şekil 9.18. Sinterleme sonrası SEM görüntüleri	116
Şekil 9.19. AZ91 alaşımının sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası XRD sonuçları	118
Şekil 9.20. Sinterleme sonrası SEM-EDX görüntüsü.	119
Şekil 9.21. EDX analizleri.....	119
Şekil 9.22. Sinterleme sonrası SEM görüntüleri	122
Şekil 9.23. Sinterleme sonrası optik mikroskop görüntüleri	124
Şekil 9.24. Sinterleme sonrası (300MPa) kırık yüzey SEM görüntüleri	125
Şekil 9.25. Sinterleme sonrası (400MPa) kırık yüzey SEM görüntüleri	126
Şekil 9.26. Sinterleme sonrası (500MPa) kırık yüzey SEM görüntüleri	126
Şekil 9.27. Sinterleme sonrası (600MPa) kırık yüzey SEM görüntüleri	127

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 7.1. Magnezyumun özellikleri.	51
Çizelge 7.2. Magnezyum alaşımlarının standartlarla gösterimi	54
Çizelge 7.3. AZ91 alaşımının mekanik özellikleri.	55
Çizelge 7.4. AZ91 alaşımının kimyasal bileşimi.	56
Çizelge 7.5. Farklı biyomalzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri ve doğal kemik ile karşılaştırılması	63
Çizelge 8.1. Atomizasyon parametreleri.....	74
Çizelge 9.1. Üretilen tozların verileri.....	86
Çizelge 9.2. AZ91 külçesinin kimyasal bileşimi.	106
Çizelge 9.3. Üretilen AZ91 tozlarının kimyasal (XRF) analiz sonuçları.....	106
Çizelge 9.5. Numunelerin presleme sonrası yoğunlukları.	109
Çizelge 9.6. Numunelerin sinterleme parametreleri.	113
Çizelge 9.7. Sinterlenen AZ91 alaşımlarının yoğunluk sonuçları.	113
Çizelge 9.8. Sinterleme sonrası sertlik değerleri.....	129

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Magnezyum $1,74 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluk ile tüm yapısal metallerin en hafifi olduğu ve magnezyumun, alüminyumdan 1,5 kat, titanyumdan 3 kat ve demirden 4 kat daha az yoğun olduğu bilinmektedir. Magnezyum alaşımları yüksek özgül mukavemete, yüksek spesifik sertliğe, iyi dökülebilirliğe ve düşük işlenebilirliğe, hacim birimi başına düşen ısı içeriğine, yüksek sönümleme kapasitesine ve iyi bir elektromanyetik görüntüleme özelliğine sahip olduğu Duygulu vd. tarafından tespit edilmiştir. Magnezyumun kolay kaynak edilebilirliği, darbeye ve darbe direncine dayanıklı olduğu belirtilmiştir. Magnezyum dünya yüzeyinde altıncı en bol metal ve sekizinci elementtir ve kolayca geri dönüştürülebilir [1].

Magnezyum ve alaşımlarının imalat yöntemleri, şekillendirilebilirlik, korozyon direnci, çevreye olan etkileri ve mevcut kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Magnezyum ve alaşımları, genel olarak havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Magnezyum ve alaşımlarının yaygın olarak kullanılmadığını ve sanayicilerin magnezyum ve alaşımlarının yerine demir, çelik gibi malzemeleri tercih ettiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin ise magnezyum alaşımlarının pahalı olmasına bağlamıştır. Çelik ve dökme demirin yerini alabilecek en uygun malzemelerin Al, Mg ve Ti alaşımları olduğunu vurgulanmaktadır [2].

Atomizasyon, sıvı metalin hava, azot, argon veya helyum gibi yüksek hızlı bir gazla parçalanmasıyla oluşan damlacıkların katılaşıp toz haline gelme işlemine denir. Gaz atomizasyonunda toz tane büyüklüğü ve dağılımını etkileyen gaz basıncı, nozul çapı ve sıcaklık gibi işlem değişkenleri kullanılmaktadır [3].

Bu çalışmada, gaz basıncı, nozul çapı ve metal ergitme sıcaklığı gibi atomizasyon değişkenlerinin toz tane boyutu ve dağılımına, toz şekline ve mikroyapısına

olan etkileri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada literatür araştırmaları sonucu, gaz atomizasyon yöntemi ile AZ91 magnezyum alaşımı tozunun üretilebilirliği ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu amaçla, literatürdeki bu boşluğu doldurabilmek amacıyla AZ91 magnezyum alaşımı tozunun üretimi çalışılmıştır.



BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

Angers vd. AZ91 alaşımının santrifüj atomizasyonu sırasında düzensiz parçacıkların oluşumunu incelemiştir. Bu çalışmada, AZ91 magnezyum alaşımının dönen disk atomizasyonu sırasında üretilen düzensiz parçacıkların şekli ve mikroyapısı belirlenmiştir. AZ91 alaşımının dönen disk santrifüj atomizasyonu sırasında üretilen düzensiz parçacıkların morfolojisi ve mikroyapısı bu parçacıkların parçalanma mekanizması ile oluştuğunu teyit etmişlerdir. İçbükey bir diskle gerçekleştirilen atomizasyonlar sırasında daha düşük parçacıkların üretildiği tespit edilmiştir. Düzensiz parçacıkların oluşumu sırasında parçacıklar arasında Mg ve Al elementleri arasında intermetalik bir bağ oluşarak $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik bileşiğini oluşturduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada düzensiz parçacıkların, bir atomizasyon mekanizması ile değil, dönen diskin yüzeyinde katılaştıran atomize metalin bir tabakasının parçalanmasıyla oluştuğu, boyut dağılımlarının ise dönen diskin şekli ve açılma hızı bir fonksiyonu olarak ele alınması gerektiği belirtilmiştir [4].

Lagutkin vd. metal tozu için atomizasyon süreci üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada basınç ve gaz atomizasyonunu birleştiren yeni bir atomizasyon işlemi geliştirmişlerdir. Ergiyik, ince bir film konisi şeklinde delikten basınçlı olarak nozuldan akar. Film öncesi aşamadan sonra, ergiyik, bir halka nozul tarafından gönderilen bir gaz akımı ile atomize edilir. Bu araştırmanın amacı, geleneksel gaz atomizasyon tekniklerine kıyasla dar bir boyut dağılımı ve düşük spesifik gaz tüketimi elde etmektir. Kalay ve bazı alaşımlar bu teknikte başarıyla atomize edilmektedir [5].

Vasilieva vd. alüminyum alaşım tozlarının su atomizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Gelişmiş alüminyum alaşımlarının imalatı için ergiyiğin yüksek basınçlı su atomize edilmesine dayanan yeni hızlı katılma işlemi, bir deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Toz-su etkileşimi oranının, pH değerine bağlı olduğunu

gözlemlenmişlerdir. Oda sıcaklığı reaksiyonlarının hızı pH 3.0-4.0'da çok yavaş iken, pH'ın 6.0'a yükseltilmesi yoğun toz oksidasyonuna neden olmuştur [6].

Liu vd. inert-gaz atomizasyonu ile Fe-Si-Al-Ni-Ti yumuşak manyetik alaşım tozunun üretimi üzerine çalışmalar yapmışlardır. İnerit gaz atomizasyonu ile Fe - % 3 Si - % 0,5 Al - % 2 Ni - % 2 Ti yumuşak manyetik alaşım tozları üretmişlerdir. Üretilen tozların, X-ışını difraktometresi, lazer saçılımlı parçacık büyüklüğü dağılım analizörü ve elektron probu mikromanalizörü tarafından tozun bileşimi, faz yapısı, boyut dağılımı, yüzey morfolojisi ve kesitsel mikroyapısal analizleri yapmışlardır. Gaz atomizasyon basıncının ve sıcaklığının toz boyutu ve morfolojileri üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Gaz atomizasyon basıncı 5,5 MPa ve 1550 °C sıcaklıkta, pürüzlü yüzey ve düşük küreselli tozları 54.38 µm çapında elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Gaz atomizasyon sıcaklığı 1550 °C' de sabit, gaz atomizasyon basıncı 5,5'den 6,5 MPa kadar yükseltildiği zaman, toz boyutu, 54.38'den 35.51 µm'ye düşer ve yüzeyin uydu topu arttığını tespit etmişlerdir. Gaz atomizasyon basıncı 5,5 MPa sabit, gaz atomizasyon sıcaklığı 1550'den 1650 °C'ye yükseltildiği zaman, toz boyutu 54.38'den 36.63 µm'ye düşer, ancak tozlar pürüzsüz bir yüzeye ve yüksek küreselliğe sahip olduğu tespit etmişlerdir. Tozun faz yapısı tekli α-Fe fazıdır ve tozdaki katılma yapısı az miktarda dendritin yanı sıra ağırlıklı olarak eşit eksenli tanede olduğunu rapor etmişlerdir [7].

Kim ve Chae gaz atomize edilmiş Mg alaşım tozlarının sertleşmesini araştırmışlardır. Bu çalışmada, gaz atomizasyonu ile üretilen MgZn4.3Y0.7 alaşım tozlarının ekstrüzyon davranışı araştırılmıştır. Mg alaşımının zayıf mekanik özelliklerini iyileştirmek için, bileşim ve sürecin etkilerini birleştirmişlerdir. Ekstrüzyon oranı 10: 1'den 15: 1'e arttıkça, tozlar plastik olarak daha iyi deforme olmuş ve gerilme mukavemeti ve uzama gibi mekanik özelliklerin arttığını gözlemlenmişlerdir. Endüstriyel ölçekte bir gaz atomizörü kullanılarak atomize edilen MgZn4.3Y0.7 alaşım tozları neredeyse küresel morfolojiyi sunmuş ve birikmiş ortalama toz boyutları yaklaşık 55 µm çapındadır. Mg alaşım yüzeyinde oluşan magnezyum oksit tabakası yaklaşık 48 µm kalınlığa sahiptir. Plastik deformasyonun artmasından dolayı ekstrüzyon oranının artırılmasıyla hem dayanım hem de uzamanın geliştiğini gözlemlenmişlerdir [8].

Karagöz vd. metalik toz üretimi ve toz üretim parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bu çalışmada, tozların üretim yöntemleri ve ilgili toz boyutu ve toz boyut dağılımı, toz şekli, tozun yüzey kalitesi ile üretim için şekillendirme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve zamanını araştırmışlardır. Çalışmada atomizasyon yöntemiyle üretilen titanyum ve demir esaslı alaşım tozlarının incelemelerini yapmışlardır. Çalışmada dönel elektrod yöntemiyle üretilen tozlar kullanmışlardır. Üretilen tozları presleyip daha sonra sinterleme işlemi yapıp mikroyapı görüntülerini incelemişlerdir. Genel olarak toz metalürjisinde küresel tozların arzulandığı rapor edilmiştir. Küresel toz arzulanmasının en önemli sebebi presleme ve sinterleme aşamalarında toz-toz temasının homojen ve çok yönlü olması gerektiğinden istenmektedir. Toz metalürjisinde toz boyut dağılımı önemli bir parametre olduğu için, akışkanlık, sıkışma kabiliyeti, atomsal bağ oluşumu ve mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli bir kriter olduğu vurgulanmıştır [9].

Öztürk vd. su soğutmalı döner disk atomizasyon yöntemiyle AA 2014 alüminyum alaşımı tozlarının soğuma hızına etkileri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada, döner disk atomizasyonu kullanılarak alüminyum alaşım tozlarını üretmişlerdir. Bakır ve paslanmaz çelik disk malzemesi, bu disklerin hızı, metal ısınma oranı, soğutma suyunun derecesi, bu parametrelerin üretilen tozların mikroyapı ve soğutma hızı üzerinde etkileri incelenmiştir. Toz boyutunun küçülmesiyle ligamental, damlacık ve küresel tozların oranının arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada soğutma suyunun sıcaklığının artmasıyla toz tane boyutunun küçüldüğünü ayrıca disk hızının artırılmasıyla da toz boyutunun küçüldüğünü vurgulamışlardır [10].

Gürmen ve Ebin nanopartiküller ve üretim yöntemleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada nanoparçacıkların var olan üretimi ile metalik ve oksit esaslı nanoparçacıkların üretiminde kullanılan yöntemlerini incelemişlerdir. Çalışmada kimyasal buhar yoğunlaştırma metodu, hidrojen redüksiyon yöntemi, asal gaz yoğunlaştırma metodu, mikroheterojen sistemler, alev sentezi tekniği, mekanik aşındırma yöntemi, ultrasonik atomizasyon yöntemleri hakkında çalışmalar yapmışlardır [11].

Erarslan ve Akça AZ91 - SiC magnezyum matrisli kompozitinin aşınma davranışını incelemişlerdir. % 2, 4, 8 ağırlık oranlarında SiC parçacıklarını karıştırmalı döküm yöntemiyle AZ91D magnezyum alaşımına karıştırmışlardır. AZ91D magnezyum malzemesine SiC parçacıkları ilavesiyle oluşan kompozit malzemenin sertliğinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Aşınma testine göre 7 µm çaplı SiC takviyeli kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı 32 µm çaplı SiC takviyeli kompozitlerden daha kararlı olduğunu tespit etmişlerdir [12].

Bao vd. gaz atomizasyonu ile üretilen Al ve Ni tozlarının yapısal karakterizasyonunu incelemişlerdir. Bu çalışmada amaçları, yapıyı incelemek ve yüzeydeki ve tanelerin hacmindeki mevcut fazları tanımlamaktır. Ağırlık fraksiyonlarının değiştiği zaman üç ana faz elde edildiğini bu fazlar ise; Al_3Ni_2 , Al_3Ni ve alüminyum olduğunu tespit etmişlerdir. İncelenen tozların herhangi birinde $B_2 AlNi$ fazının olmadığını görmüşlerdir. Yaklaşık 200 µm'den daha küçük çaplı tanelerde azalan boyutla artan bir miktarda bir veya birkaç ek metastabil faz bulmuşlardır [13].

Zdujic ve Uskokovic dönen elektrod yöntemiyle metal ve alaşım tozlarının atomizasyonu üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada santrifüj atomizasyon yöntemi kullanmışlardır. Bu yöntemle refrakter metallerin atomize edilebileceği ve dahası üretilen tozların saf ve ince taneli olabileceğini rapor etmişlerdir. Çalışmada demir, nikel ve titanyum tozları üretmişlerdir. Soğutma işleminde argon ve helyum gazlarını kullanmışlardır. Parçacıkların ortalama boyut ve boyut dağılımını, dönen elektrodun hızını ve çapını değiştirerek kolayca ve doğru bir şekilde değiştirmişlerdir. Herhangi bir malzemede, ergime hızını arttırarak parçacık boyutu aralığını genişletmişlerdir. Santrifüjlü atomize tozlar, toz oluşumunda reaktif metallerin ve alaşımların üretiminde küresel bir parçacık şekliyle ve yüksek saflıkta karakterize edilebileceğini rapor etmişlerdir [14].

Ünal, eriyik iletim borusunun ucundaki basınç oluşumunun kalay tozu boyutu ve gaz atomizasyon yöntemindeki gaz / ergime oranı üzerine etkisini incelemiştir. Eriyik verme borusunun çıkıntı uzunluğunun eriyik ucundaki basınç oluşumu üzerindeki etkisini araştırarak kalay tozu üretmek için yeni tasarlanmış bir yakın bağlantılı nozul sistemi kullanmışlardır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, gözlemlenen metal akış

oranının daha önce varsaydığı gibi davranmadığını, yani daha derin emme metal akış oranının arttırdığını rapor etmişlerdir. Ergiyik akış hızını, atomize edici gaz basıncının artırılmasıyla azaltmıştır. Aynı çıkıntı uzunluğu için gazın, ergime kütle akış oranını arttırdığını ve bu oran artışının, daha ince toz parçacık boyutuna neden olduğunu gözlemlemişlerdir. 5 ve 15 mm çıkıntı uzunlukları için 1.0-3.5 MPa püskürtme gazı basıncında eriyik verme tütünün ucunda daima negatif basınç olduğu vurgusunu yapmışlardır. Öte yandan, 10 mm çıkıntı uzunluğu için 1.0-2.0 MPa basınç aralığında pozitif ve negatif değerler arasında eriyik borusu ucunda basınç dalgalanması olduğunu belirtmişlerdir. Atomizasyon süreci 5 mm ve 10 mm çıkıntı uzunluklarından 15 mm çıkıntı uzunluğu için daha kararlı olduğunu tespit etmişlerdir [15].

Aydın ve Ünal laval tipi yeni bir nozul tasarımı ile metal tozu üretimi ve üretim değişkenlerinin etkisinin incelenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada Dumlupınar gaz atomizasyon ünitesi kullanılarak kalay tozu üretilmiştir. Nozul olarak dairesel yarıkli süpersonik bir nozul tasarımı ve imalatı yapmışlardır ve toz üretiminde bu nozulu kullanmışlardır. Sıcaklık olarak 430 °C' ye kadar çıkmışlardır. Atomizasyon gazı olarak azot gazı kullanmışlardır. Çalışmanın genel amacı daha az gaz kullanarak daha ince ve daha küresel metal tozları elde etmek için yeni bir nozul tasarımı ve imalatı yaparak toz üretimi gerçekleştirmek istemişlerdir. Üretimden sonra toz boyut analizi, tozların şeklinin SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapılarının üretim parametrelerine etkilerini incelemişlerdir [16].

Sofuoğlu gaz atomize edilmiş alüminyum ve kalay tozlarının üretim parametrelerinin incelenmesi üzerinde deneysel ve nümerik çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada, gaz atomizasyonunun üretim parametreleri incelenmiştir. Çalışmada, gaz atomize edilmiş alüminyum ve kalay tozlarının toz parçacık boyutları için atomizasyon parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Gaz basıncı, nozul çıkış bölgesi, çıkıntı uzunluğu, ergiyik dağıtım tüp (nozül) çapı ve süper sıcaklık ısısı atomizasyon parametreleri olarak seçilmiştir. Atomizasyon nozulları, atomizasyon gazının ve ergimiş metalin konumuna göre serbest düşüş ve yakın bağlantılı olmak üzere iki temel türe ayrıldığı vurgulanmıştır. Gaz basıncı ve süper ısı sıcaklığı toz parçacık ortalama büyüklüğünü önemli ölçüde etkilediğini tespit etmiştir. Gaz basıncı ve süper ısı sıcaklığı arttığında, toz parçacık boyutu azaldığını tespit etmiştir. Çıkıntı uzunluğu ve

gaz basıncındaki artış kalay toz parçacık boyutundaki azalmaya neden olduğu rapor edilmiştir. Ergiyik dağıtım çapı, çıkıntı uzunluğu ve nozul çıkışı bölgesinin toz parçacık ortalaması üzerinde çok az etkisi olduğunu tespit etmiştir [17].

Akgün vd. döküm yöntemiyle üretilmiş AZ91 magnezyum alaşımının işlenebilirliğinin yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada, döküm yöntemiyle üretilen AZ91 magnezyum alaşımının üretimi ve işlenebilirlik özellikleri incelenmiştir. AZ91 magnezyum alaşımı ergitme ocağında eritilip metalik kalıplara dökülerek üretilmiştir. Üretilen magnezyum alaşımları kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği bakımından incelenmiştir. Artan kesme hızına göre yüzey pürüzlülük değerinin arttığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada; magnezyum ve alaşımlarının tüm yapısal malzemelerden daha yüksek işlenebilirliğe sahip olduğu rapor edilmiştir [18].

Persson vd. su atomize edilmiş metal tozları için parçacık boyutunun tahmini üzerine parametre çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada, atomizasyon parametrelerinin su atomize edilmiş metal tozlarının parçacık boyutuna etkisinin önemini araştırmışlardır. $D_v(50)$ tahmini için yayınlanmış modeller uygulanmış ve deney verileri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bazı önemli atomizasyon parametrelerinin parçacık boyutunu nasıl etkilediğini incelemek için Fe-C alaşımlarının model hesaplamaları ve atomizasyon testleri kullanılmıştır. Su basıncının ve viskozitesinin etkisi hem model hesaplamaları hem de atomizasyon deneyleri ile yapılmıştır. Model hesaplamalarında, su basıncı, ergiyik akış oranı, su püskürme açısı, sıvı metal viskozitesi ve yüzey gerilimini parametre olarak kullanmışlardır. Atomizasyonda % 0,5 - 4,4 C içeren sıvı demir demir deneyleri uygulamışlar ve karşılaştırmışlardır. D_v50 üzerindeki etkisi su basıncı için yüksek, viskozite için orta, ergiyik akış hızı ve yüzey gerilimi için düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Model hesaplamaları jet açısının D_v50 üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu ve ilave çalışmalarla doğrulanacağını rapor etmişlerdir [19].

Uslan ve Küçükarslan kalay tozu üretimine gaz atomizasyonu parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmada gaz atomizasyon yöntemi kullanılmış ve bu yöntemle kalay tozu üretmişlerdir. Deneyleri Gazi Üniversitesinde bulunan gaz atomizasyon ünitesinde yapmışlardır. Deneylerde yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozul

kullanmışlardır. Atomizasyon gazı olarak hava kullanmışlardır. Toz üretim parametreleri; sıcaklık olarak 400 °C de sabit, 5-30 bar basınç aralığında ve nozul çıkıntısı olarak 2-8 mm mesafelerde atomize etmişlerdir. En ince toz boyutu 68,50 µm olarak, 400 °C de, 3 mm nozul çapında, 8 mm çıkıntı mesafesinde ve 10 bar basınçta elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Tozların genel olarak karmaşık şekilli olduğunu tespit etmişlerdir. Gaz basıncı ve nozul çıkıntı yüksekliği arttırıldığı zaman toz boyutunun küçüldüğünü tespit etmişlerdir [20].

Duygulu vd. magnezyum levha alaşımlarının üretimi ve geliştirilmesi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmada ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile AZ31, AZ61, AZ91, AM50 ve AM60 magnezyum alaşımlarını levhalar halinde 4-8 mm kalınlıklarda 1500 mm eninde üretmişlerdir. Daha sonra üretilen bu alaşımlara homojenleştirme ısıl işlemi yapılmıştır. Isıl işlemden sonra optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve geçirimli elektron mikroskobu ile incelemeler yapmışlardır. Alaşımların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, alaşımlara çekme deneyi ve sertlik deneyleri uygulanmıştır. Magnezyum 1,74 gr/cm³ yoğunluk ile tüm yapısal metallerin en hafifi olduğu ve magnezyumun, alüminyumdan 1,5 kat, titanyumdan 3 kat ve demirden 4 kat daha yoğun olduğunu rapor etmişlerdir. Magnezyum alaşımları yüksek özgül mukavemete, yüksek spesifik sertliğe, iyi dökülebilirliğe ve işlenebilirliğe, hacim birimi başına düşen ısı içeriğine, yüksek sönümlenme kapasitesine ve iyi bir elektromanyetik görüntüleme özelliğine sahip olduğunu vurgulamışlardır. Magnezyumun kolay kaynak edilebileceğini, darbeye ve darbe direncine dayanıklı olduğunu belirtmişlerdir. Magnezyum dünya yüzeyinde altıncı en bol metal ve sekizinci elementtir ve dahası, magnezyum kolayca geri dönüştürülebilir, magnezyum alaşımlarının etkili bir ısı dağılımı olduğunu rapor etmişlerdir [21].

Dunkley atomları parçalayarak: metal tozu nasıl yapılır konusu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Toz metalürjisi, metal tozlarının tutarlı kalitesinin sağlanması ekonomikliğe bağlı olduğunu tespit etmiştir. Metal tozlarının çoğunluğu artık ergimiş metallerden atomizasyon yoluyla üretilmekte olduğunu vurgulamıştır. Su atomizasyonunda, erimiş metali parçalamak ve söndürmek için yüksek basınçlı su püskürtme jetleri kullanıldığını tespit etmiştir. Parçacık boyutunun basınçla yakından ilgili olduğunu vurgulamıştır. Birçok ünite 100-200 bar'da çalışıp ve yaklaşık 30-100 µm arasında toz

üretirken, Japonya'daki bazı özel üniteler 1500 bar'a kadar çıkıp ve tozları 10 µm kadar inceltildiğini rapor etmiştir. Tonaj açısından, su atomizasyonu tozlar, metal ve özellikle de demirden oluşan metaller için en önde gelen yöntem haline geldiğini öne sürmüştür. Genel olarak, su atomizasyon yöntemi, düşük maliyetli olması sebebiyle diğer yöntemlerden daha fazla kullanılmaktadır. Su atomizasyonunun temel sınırlamaları toz saflığı, parçacık şekli ve özellikle de daha reaktif metaller ve alaşımlar olduğunu rapor etmiştir. Gaz atomizasyonu, sıvı metalin hava, azot, argon veya helyum gibi yüksek hızlı bir gazla parçalanması işlemi olduğunu vurgulamıştır. Çalışma basınçları 5-100 bar aralığında olabileceğini tespit etmiştir. 15-60 bar aralığındaki basınçlarda, soy gaz ile atomize edilmiş demir, nikel ve kobalt alaşımları yapmak için kullanıldığını örneklemiştir. Gaz atomizasyonunun pek çok açıdan su atomizasyonundan farklı olduğunu vurgulamıştır. Su atomizasyonu basıncın önemli olduğunu ama gaz atomizasyonunda ise gaz akış hızı, parçacık boyutunu kontrol eden önemli bir faktör olduğunu tespit etmiştir. Gaz atomizerleri, su atomizerlerinden daha geniş bir tasarım yelpazesinde bulduklarını ve çoğunlukla kapalı veya serbest düşme nozul konfigürasyonları olarak sınıflandırıldığını rapor etmiştir [22].

Denigris yüksek kalite ve daha iyi proses ekonomisine sahip olan gaz atomizasyon proseslerini geliştirmek için kesintisiz parçacık boyutlandırma kullanımı üzerine çalışmalar yapmıştır. Gaz atomizasyon işlemleri, metal enjeksiyon kalıplama, düzenli şekillendirilmiş metal parçacıkları ve çoğalan üretim gibi diğer metalürji proseslerini yüksek kalitede üretmek için rutin olarak kullanıldığını vurgulamıştır. Atomizasyonun giderek daha sıkı piyasa gereksinimlerini karşılamak için sürekli olarak yakından tanımlanmış bir özelliğe sahip parçacıklar üretmek için kontrol edilmesi esası olduğunu vurgulamıştır. Sıralı veya bağlantılı analizör ile kesintisiz parçacık boyutlandırma hem ürün kalitesini hem de proses ekonomisini önemli ölçüde geliştiren ve süreç kontrolünü daha iyi mümkün kılan bir seçenek olabileceğinin tespitini yapmıştır. Bu çalışmada, metal tozu üretiminde kanıtlanmış değerlerin süreç analitik teknolojilerini ve kesintisiz parçacık boyutlandırma yönteminin benimsenmesinden elde edilen kazanımları araştırmıştır. Bu araştırmalara gelişmiş ürün kalitesi, daha yüksek verim ve artırılmış işlem verimliliği dahil edilmiştir. Bağlantılı lazer difraksiyon sistemlerini, metal tozu üretiminde kesintisiz parçacık boyutu analizi için kurduğunu rapor etmiştir [23].

Oğuz vd. gaz atomizasyonu yöntemi ile kalay tozu üretiminde gaz basıncının toz boyutu ve şekline etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada ilk olarak gaz atomizasyon ünitesi imalatı yapmışlardır. Gaz atomizasyon ünitesinin induksiyon fırını, nozul, atomizasyon kulesi ve toz tutma ünitesi olarak dört ana bölümden oluştuğunu rapor etmişlerdir. Ergitme için grafit pota kullanmışlardır. Nozul olarak yakından eşlemeli ve dairesel yarıklı nozul kullanmışlardır. Deneyler 500 °C sıcaklıkta, 3 mm nozul çapında ve koruyucu gaz olarak argon kullanmışlardır. Bu çalışmada; amaç gaz basıncının toz boyutuna etkisini araştırmak olduğu için gaz basıncı değişken olarak 2, 4, 6, 8, 11 bar kullanılmıştır. Yapılan deneylerde gaz basıncının artmasıyla toz boyutunun küçüldüğünü tespit etmişlerdir. Özellikle 8 ve 11 bar basınçlarında tozların neredeyse tamamının küresel olduğunu rapor etmişlerdir [24].

Öztürk ve Kaçar magnezyum alaşımları ve kullanım alanlarının incelenmesi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmada magnezyum ve alaşımlarının imalat yöntemleri, şekillendirilebilirlik, korozyon direnci, çevreye olan etkileri ve mevcut kullanım alanlarını araştırmışlardır. Magnezyumun genel olarak havacılık, uzay ve otomotiv sanayilerinde kullanımının her geçen gün arttığını bildirmişlerdir. Magnezyum ve alaşımlarının yaygın olarak kullanılmadığını ve sanayicilerin magnezyum ve alaşımlarının yerine demir, çelik gibi malzemeleri tercih ettiğini tespit etmişlerdir. Bunun sebebini ise magnezyum alaşımlarının pahalı olmasına bağlamışlardır. Çelik ve dökme demirin yerini alabilecek en uygun malzemelerin Al, Mg ve Ti alaşımları olduğunu vurgulamışlardır [25].

Ünal vd. AZ91 magnezyum alaşımının döküm ve mekanik özelliklerine silisyum ilavesinin etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada AZ91 serisi magnezyum alaşımına ağırlıkça % 0.2 ile % 2.0 oranlarında Si ilave edilmiş ve Si ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Si ilavesinin sonucunda silisyumun artmasıyla sıcak yırtılmada artma ve magnezyum alaşımının akışkanlığında yaklaşık % 25 oranında azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca Si ilavesinin artmasıyla çekme ve akma dayanımlarında arttırdığını vurgulamışlardır. % 0.4 Si ilavesinden sonra sertliğin arttığını gözlemlemişlerdir. SEM görüntülerinde Si ilavesiyle AZ91 tanelerinin incelendiğini vurgulamışlardır. Artan Si miktarı ile birlikte AZ91 alaşımlarında oluşan

$Mg_{17}Si_{12}$ intermetalik fazının incelerek değiştiğini ve ayrıca Mg_2Si fazının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Magnezyum ve alaşımlarının ergitilmesini atmosfer kontrollü ocağın içinde grafit bir potada yapmışlardır. Ergitme işlemi sırasında ortamın atmosferle etkileşimini engellemek için, ergitme sũresince ocağın içinde koruyucu gaz ortamı oluşturmuşlardır. Alaşım dũkũm sıcaklığına ulaştıktan sonra dũkũm işlemini yapmışlardır. Dũkũm işlemini kalıplara SF_6 koruyucu gazı vererek yapmışlardır [26].



BÖLÜM 3

TOZ METALURJİSİ

Metal imalat yöntemleri arasında yer alan toz metalürjisi, oldukça yaygın kullanım alanına sahip olan bir yöntemdir. Bu yaygın kullanımın nedeni, imalat kalitesinin yüksek olması ve ekonomik olarak çok karmaşık parçaların imalatının yapılmasının mümkün olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bu tür bir yöntem ile çeşitli malzemelerin üretimi zamanla artmakta ve geleneksel metal işleme yöntemlerinin yerini almaktadır [27,28].

Toz metalürjisi üretim yöntemi; metal ve metal olmayan tozlarının üretimi ve üretilen bu tozların harmanlanıp karıştırıldıktan sonra istenen geometriyi alacak şekilde bir kalıbın içinde preslenip daha sonrada sinterleme işlemi uygulanarak yapılan bir imalat yöntemidir [24,29]. Bu yöntem toz üretimi, üretilen tozların karıştırılması, tozların preslenmesi, tozların sinterlenmesi olmak üzere belirli aşamalardan oluşur [30]. Bir mm'den daha küçük boyuta sahip oldukça ince karakteristikte katı parçacıklar toz olarak nitelendirilebilir [31]. Tozlar genellikle metaliktir ve bir tozun en önemli özelliği hacminin yüzey alanına göre düşük olmasıdır [30]. Üretilen tozun belirgin özellikleri ise toz üretim yöntemlerine ve üretim parametrelerine bağlı olarak değişmektedir.

3.1. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Toz metalürjisinde metalik tozların üretim yöntemlerinin bilinmesi üretimi planlanan toz ve parçalar için son derece önemlidir. Tozların üretiminde kimyasal bileşimi ve saflığı ne kadar önemliyse, parçacık boyut dağılımı, parçacık şekli ve tozların yapıları da o kadar önemlidir [32].

Metal tozlarının üretiminde dört temel mekanizma vardır [33]. Bunlar;

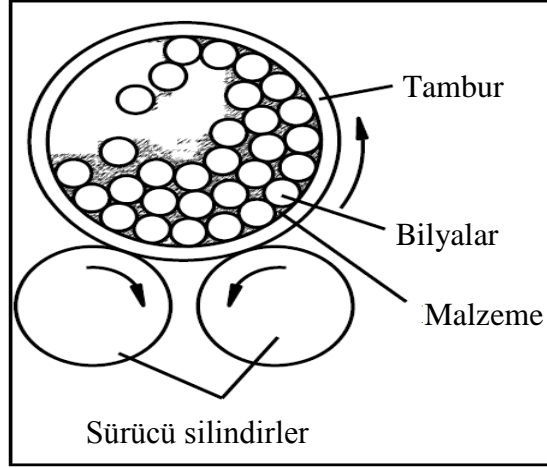
1. Mekanik yöntemler (Öğütme)
2. Atomizasyon yöntemleri
3. Kimyasal yöntemler
4. Elektroliz yöntemi

Genel olarak her malzeme toz haline getirilebilir. Toz üretimi genel olarak, mekanik, atomizasyon, kimyasal ve elektrolitik dört farklı yöntemle yapılmaktadır; atomizasyon, kimyasal ve elektrolitik. Atomizasyon, ergitilmiş metalin düşey veya yatay bir şekilde akıtılırken, gaz veya su püskürtülerek toz haline getirilmesi işlemidir [34,35].

Kimyasal yöntemle metalik toz üretimi, metalin elementel olarak toz haline indirgenmesi işlemidir. Elektroliz yöntemi ise, elektrik akımını kullanarak metalin çözülmesini sağlamak ve bu sayede toz haline getirilmesidir. Bu yöntemde elektrik aracılığıyla tozlar anottan katoda taşınır ve ince bir film üzerine yapıştırılmaktadır. Bu film üzerine yapışan tozlar kurutulularak arzu edilen tozlar üretilmektedir [33,36].

3.1.1. Mekanik Yöntemler

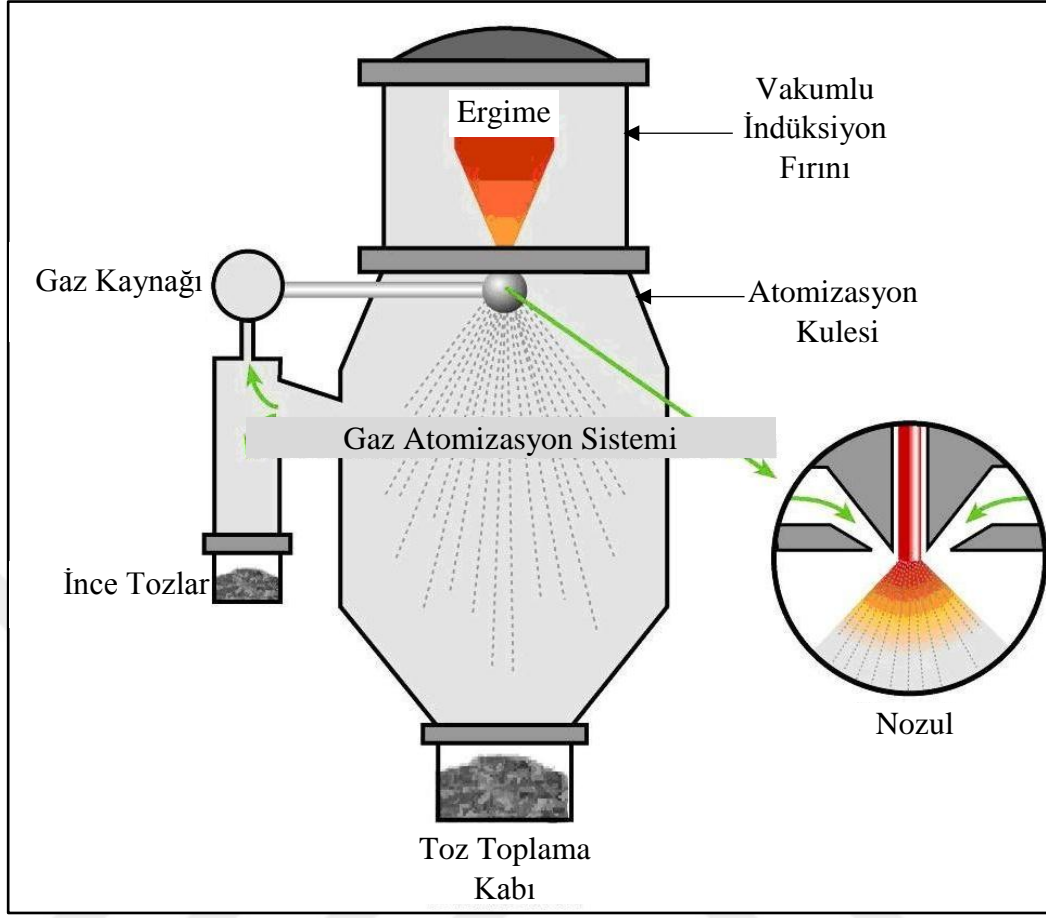
Bu yöntem toz üretim tekniklerinden en geleneksel olanıdır. Mekanik yöntemler metal parçacıkların birbiri arasında çarpışması sonucu darbe kuvveti ile kırılgan malzemelerin küçülerek toz haline gelme işlemi olarak tanımlanabilir. Bu teknik ile üretilen temel metal tozları bakır, alüminyum, pirinçtir. Bunların dışında demir, çinko, kobalt, mangan, kurşun, silisyum gibi metal tozlar üretilebilir. Ancak sünek metaller kolay kırılmadığı için mekanik yöntemler ile toz üretimi, bu metaller için uygun değildir. Mekanik yöntemlerle toz üretiminde kullanılan öğütme yönteminin şematik görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir.



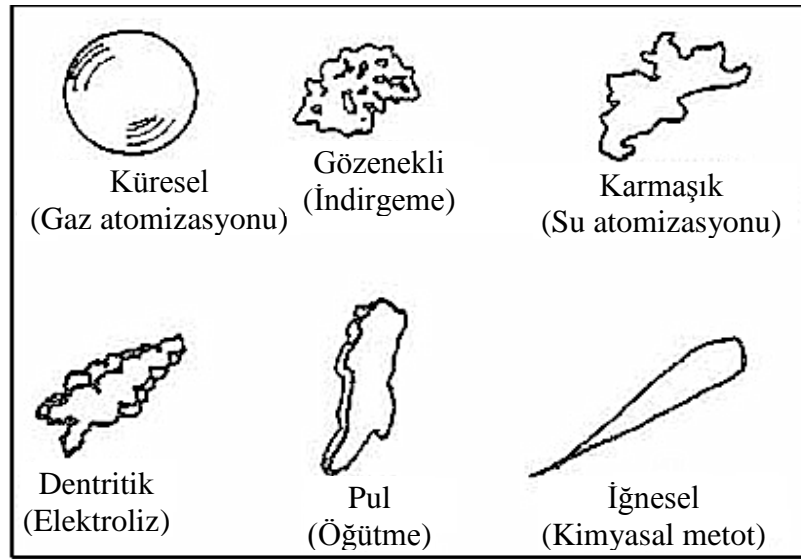
Şekil 3.1. Öğütme yönteminin şematik görüntüsü [37].

3.1.2. Atomizasyon Yöntemleri

Atomizasyon tekniğinde genel olarak ergitilebilen her türlü metal ve alaşımı toz haline getirilebilir. Bu teknik, bir ergiyiğin farklı boyutlarda çok küçük damlacıklara ayrılması işlemidir. Sıvı metalin azot, argon veya helyum gibi yüksek hızlı bir gaz ile parçalanmasıyla oluşan damlacıkların ani ve aşırı bir şekilde soğuması ile katılaşıp toz haline gelme işlemine atomizasyon denir. Düşey gaz atomizasyon sistemi Şekil 3.2’de verilmiştir. En yaygın olarak kullanılan atomizasyon yöntemleri; su, gaz, santrifüj, döner elektrot ve vakum atomizasyonudur. Toz üretiminde atomizasyon yönteminden önce tozların şekil ve biçiminin kontrol edilebilmesine imkân yoktu. Bu yöntemin en önemli özelliği toz şeklinin ve boyutunun kontrol edilebilmesidir. Yüksek kapasitede ve ucuz toz üretmek için genellikle su veya gaz atomizasyon yöntemi tercih edilmektedir. Üretim metotlarına göre toz şekilleri farklıdır. Bu farklılık, Şekil 3.3’de gösterilmektedir [20,38].



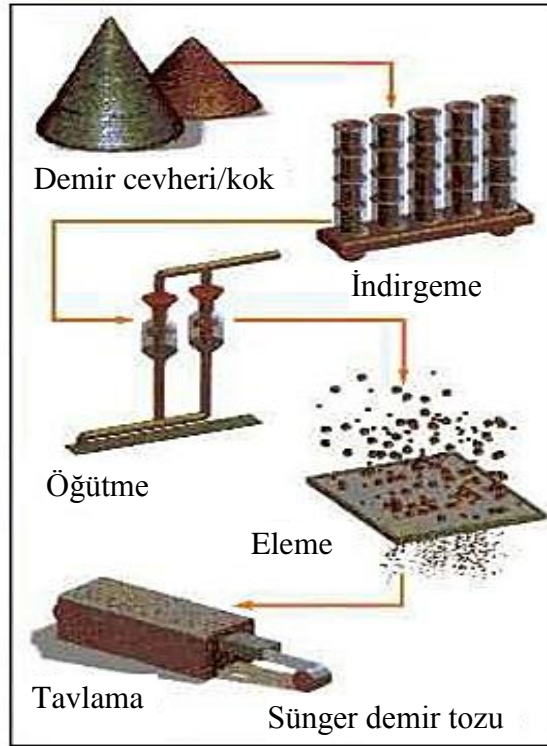
Şekil 3.2. Gaz atomizasyon sistemi [36].



Şekil 3.3. Üretim metotlarına göre toz şekilleri [39].

3.1.3. Kimyasal Yöntemler

Tüm metal tozları genellikle kimyasal yöntemlerle üretilebilirler. Bu yöntem ile metal tozlarının üretimi, metal oksitlerin karbon monoksit veya hidrojen gibi gazlarla oksitlerinden kimyasal yöntemlerle indirgenmesi işlemidir [40]. Bu teknikte istenilen demir cevheri öğütülür, kokla karıştırılır karışım sürekli fırının içinden indirgeme oluşturularak geçirilir ve kek şeklinde sünger demir üretimi gerçekleştirilir. Demir tozu imalatının gösterimi Şekil 3.4’de verilmiştir. İndirgemenin tamamlanması ile birlikte sünger demir elde edilmiş olur. Üretilen sünger demir malzemesi yaklaşık olarak 1260 °C sıcaklıkta birbiri içerisinde kaynamış tozlardan oluştuğu için öğütülme işlemi ile arzu edilen parçacık boyutuna getirilebilir [41].

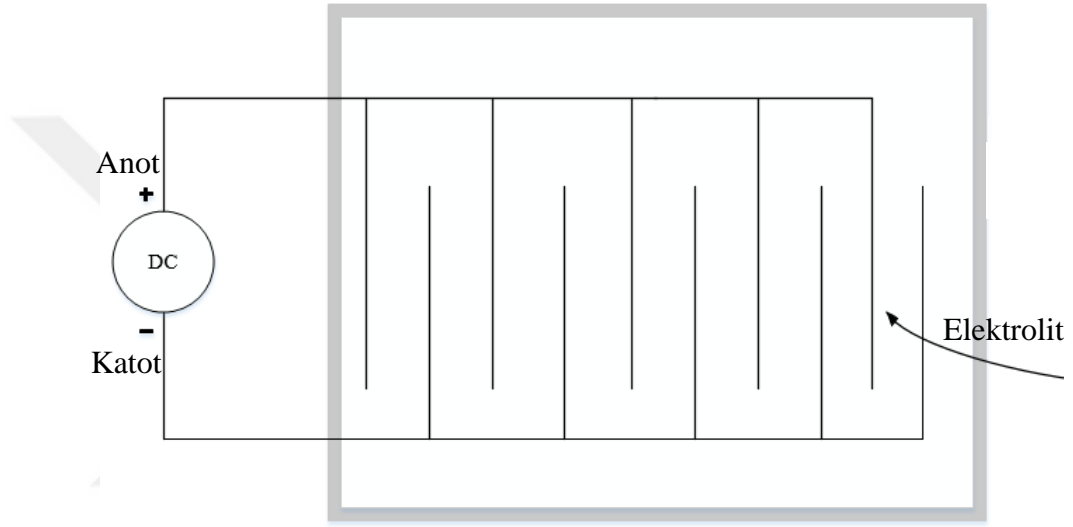


Şekil 3.4. Kimyasal yöntemle demir tozu imalatı [42].

3.1.4. Elektroliz Yöntemi

Genellikle iletkenliği yüksek olan metal tozlarının üretiminde elektroliz yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, elektrik akımı kullanılarak elektroliz bir hücrenin anottan katoda taşınması ve daha sonra metal tozlarının çöktürme işlemi olarak

tanımlanabilir. Bu tanımlamanın şekil olarak gösterimi Şekil 3.5’de verilmiştir. Elektroliz tekniği ile üretilen metal tozlarının en önemlilerinden birisi bakır’dır. Bu yöntem ile aynı zamanda demir, kobalt, kalay, çinko, kurşun tozlarının üretilmesi içinde uygundur. Bu yöntem ile üretilen tozlar çok saftırlar. Elektroliz yönteminde genellikle ortamdaki metal iyonlarının yoğunluğu, elektrotun iletkenliği, sıcaklık, gerilim değeri, akım yoğunluğu, sıvı banyonun özelliği ve parçacık ilavesi gibi temel değişkenler mevcuttur.



Şekil 3.5. Elektroliz Yöntemi.

BÖLÜM 4

GAZ ATOMİZASYON YÖNTEMİ

Metal toz üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerin başında atomizasyon gelir. Sıvı hale getirilen ergiyik metal akıtılırken argon, azot veya helyum gibi yüksek hızlı bir gaz püskürtülerek parçalanmasıyla oluşan damlacıkların ani ve aşırı bir şekilde soğuması ile katılaşıp toz haline gelme işlemine atomizasyon denir.

Gaz atomizasyonunda kullanılan gazın üç farklı görevi vardır. Birincisi, eritilen sıvı metal malzemeyi kesip parçalamak için gerekli olan kinetik enerjiyi damlacıklara iletme. İkinci olarak, bu oluşan damlacıkların atomizasyon kulesi içerisinde hızının ve yönünün belirlenmesini sağlar. Son olarak da toz oluşumunda uçan tozların soğumasına yol açar [44]. Gaz atomizasyon yönteminde karbondioksit, argon, azot ve helyum gibi gazlar kullanılmaktadır. Genel olarak küresel tozların üretiminde soy gazlar tercih edilir [45].

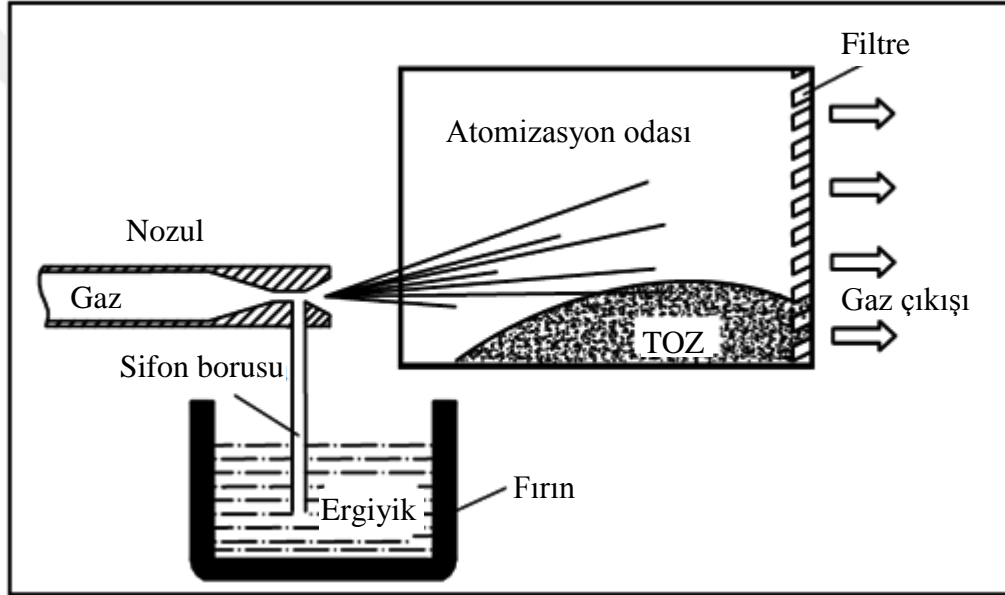
Gaz atomizasyon yöntemiyle üretilen tozların genel özellikleri;

1. Düzgün yüzeyli küresel toz şekli
2. Küçük çaplı tozlarda hızlı katılma
3. Seri üretime imkân sağlama
4. Eritilen metalin kimyasal bileşiminin değişmemesidir [46].

Yukarıda verilen özelliklerden dolayı gaz atomizasyonu ile toz üretimi çok fazla uygulama ve üretim için tercih edilmektedir. Ayrıca istenilen özelliklerde tozların üretimi için iyi bir gaz atomizasyon sistemi tasarımı önem arz etmektedir.

4.1. GAZ ATOMİZASYON SİSTEMLERİ

Gaz atomizasyon sistemleri malzemenin beslenme mekanizmaları, ergimiş malzemenin akışkanlık özelliği ve toz toplama haznesi bakımından farklı tasarımlarda bulunurlar. Ama bu sistemlerin temel amacı ergiyik hale getirilmiş metale enerji iletimini sağlayarak toz üretmektir. Yatay olarak imal edilen gaz atomizasyon sistemleri genellikle düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler için kullanılmaktadır [40]. Şekil 4.1’de yatay olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sisteminin şematik resmi verilmiştir.

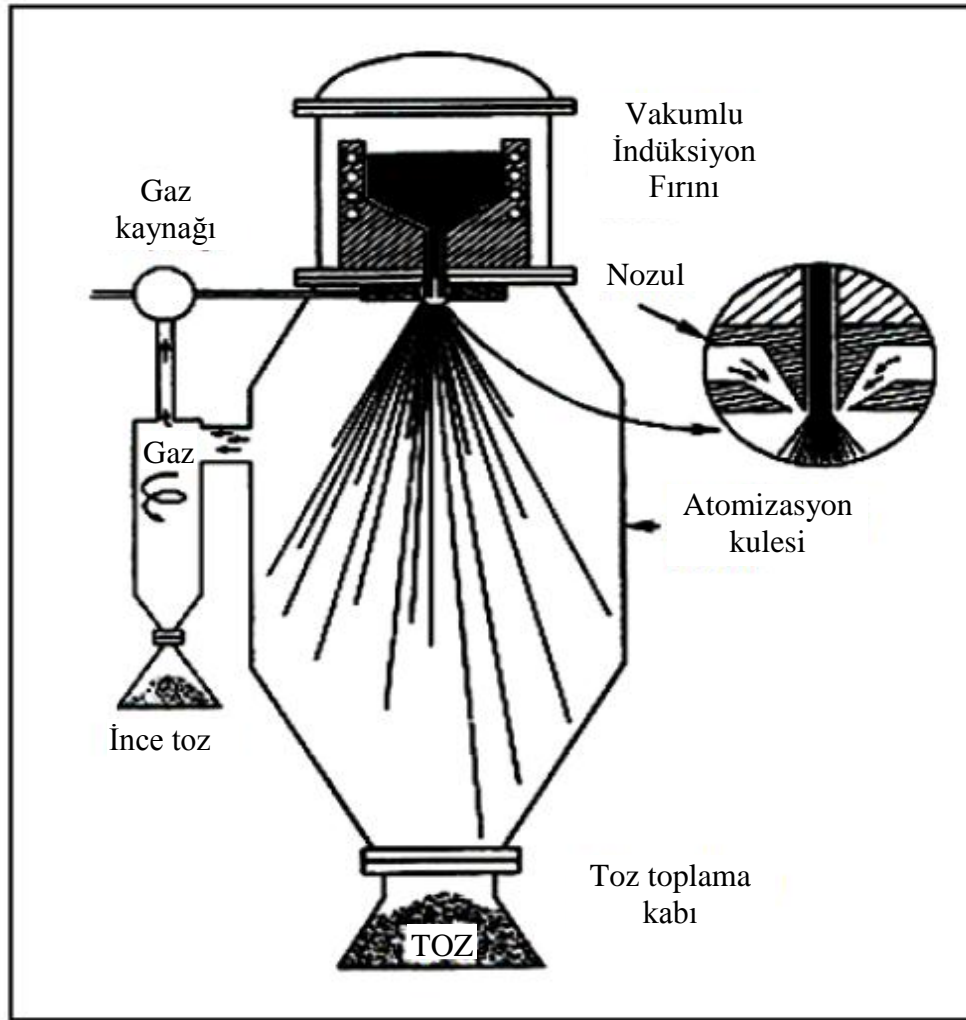


Şekil 4.1. Yatay olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sistemi [40].

Yatay olarak kurulmuş sistemde üretilen tozlar, düşey olarak kurulmuş sistemde üretilen tozlara nazaran parçacık boyutu daha büyük ve daha geniş toz dağılım aralığına sahiptirler [47].

Ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerin gaz atomizasyonunun da, soy gaz ile doldurulmuş kapalı bir atomizasyon kulesine sahip, düşey konumda kurulmuş gaz atomizasyon sistemi kullanılır. Böylece üretilen tozların oksitlenmesi engellenir. Düşey olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sisteminin şematik görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu tarz sistemlerde, malzemeler bir fırında ergitme potası içerisinde

ergime sıcaklığının belirli bir °C üstündeki sıcaklığa kadar çıkarılır ve ergimiş olan bu metal bir nozul içerisinden akıtılması işlemi yapılır. Atomizasyon sırasında oluşan damlacıkların hazne duvarına çarpmadan önce katılaşmasına olanak sağlayacak boyutlarda atomizasyon kulesinin olması gerekmektedir. Bu kulelerin üretiminde genellikle paslanmaz çelik malzeme kullanılır. Düşey olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sistemlerinde siklon olarak adlandırılan bir bölme kullanılır. Çünkü bu siklon toz üretiminde oluşan küçük boyuttaki tozları kendi bölmesinde toplar ve gaz çıkışına imkân sağlar. Bu sayede siklon, gazın atomizasyon kulesinde oluşturduğu basıncın yükselmesini engelleyerek tahliyesini sağlamaktadır [40].



Şekil 4.2. Düşey olarak tasarlanmış gaz atomizasyon sistemi [40].

Gaz atomizasyon sisteminde, ertitilmiş sıvı metali püskürterek parçalamak için genellikle gaz olarak azot, karbondioksit, helyum, argon veya hava kullanılmaktadır.

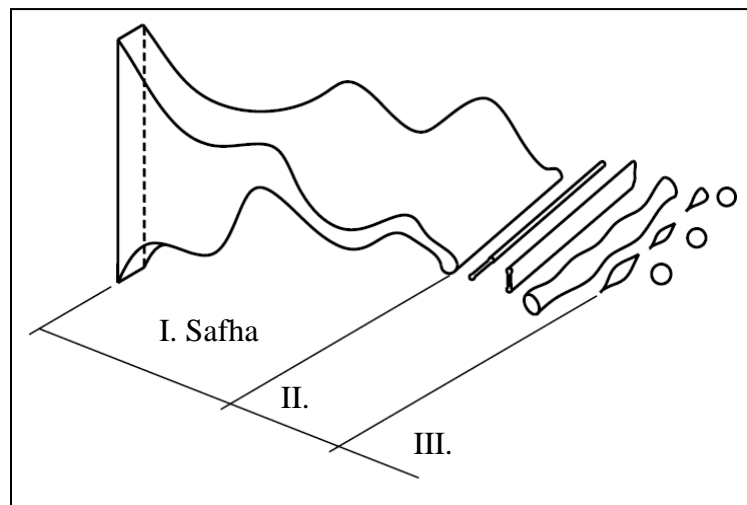
Küresel ve oksitlenmesi istenmeyen tozlar atomize edilirken, atomizasyon gazı olarak soy gazlar kullanılır. Karmaşık şekilli tozlar ise genellikle hava ile atomize edilir. Toz metalürjisi uygulamalarında küresel tozlar, karıştırılabilir ve gruplandırma kolaylığı sağladığı için tercih edilen bir toz şeklidir [47].

4.2. GAZ ATOMİZASYON SİSTEMİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Nozul içerisinden atomizasyon kulesine birden akan ergiyük sıvı metal, bu metali çevreleyen gazın fiziksel özelliklerine, atomizasyon gazının basıncına, nozul çapına ve atomizasyon ortamına bağlı silindirik, koni, plaka, ligament ve küresel bir toz şekli elde edilir. Bu şekillenmenin işleyiş biçimi üç safhada gerçekleşir. Bunlar [48,49];

1. Gazın ani genişlemesiyle sinüs dalgasının oluşumu
2. Oluşumun büyümesiyle ligamentlerin meydana gelmesi
3. Ligamentlerin bölünmesiyle küresel tozların oluşması

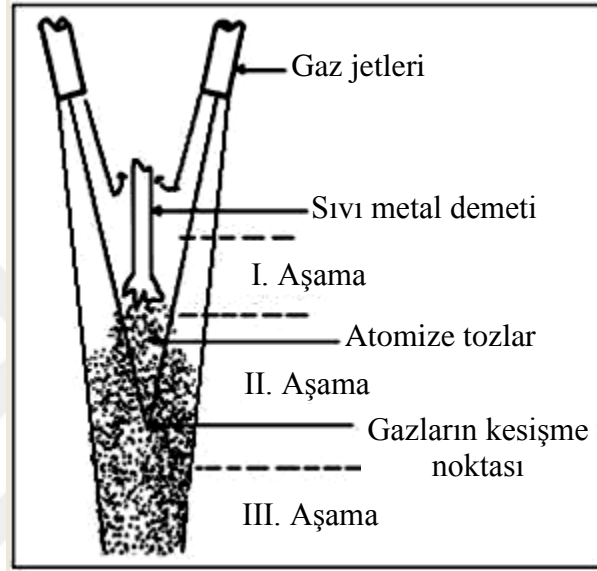
Gaz atomizasyon sisteminde parçacıkların katılması ve soğuması, toz parçacıklarının atomizasyon haznesi içerisinde uçurken meydana gelir. Dombrowski ve Johns [50] ligamentlerin bölünmesiyle tozların oluşma tasarımını Şekil 4.3'deki gibi göstermişlerdir.



Şekil 4.3. Ligamentlerin bölünmesiyle toz oluşumu [50].

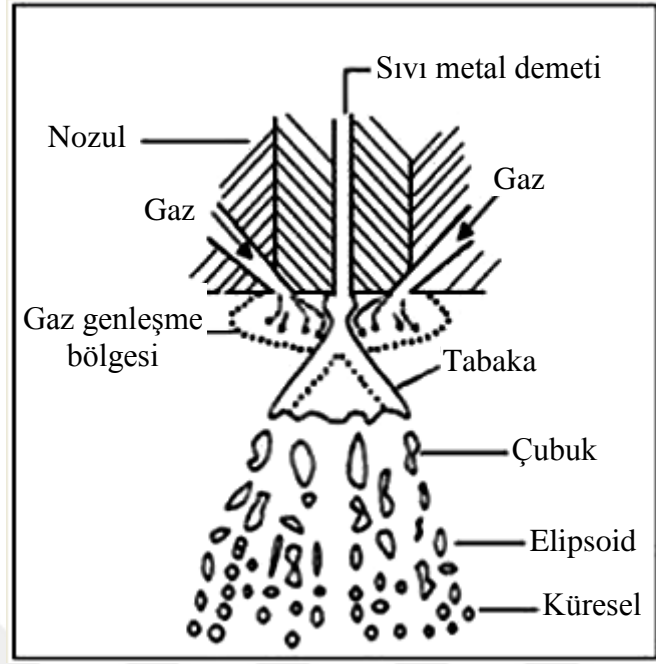
Atomizasyon sistemi ile ilgili mekanizmaların modellenmesi Şekil 4.4'te görüldüğü gibi üç farklı safhada meydana gelmektedir. Bunlar;

1. Birincil safha
2. İkincil safha
3. Katılma



Şekil 4.4. Gaz atomizasyon sisteminde üç safhanın şematik gösterimi [50].

Birinci safhada ergiyik sıvı metal, basıncın değiştiği yüksek hızlı gaz akış bölgesine girer. Artan basınç, sıvı metal demetinden kopmalara yol açar. Eğer basınç, yüzey enerjisinden kaynaklanan yeniden yapılanma enerjisini aşarsa, ikincil safha meydana gelir. Üçüncü safhada ise katılma ve zamana bağlı olarak küresel metal parçacıklar oluşmaya başlar. German [41] tarafından, See ve Johnston'un gaz atomizasyonu ile metal tozu meydana gelme safhaları net bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 4.5). Ergiyik, gazın genleşme bölgesindeki basıncı ile önce konik bir şekilde ve daha sonrada ligamen ve küresel şekilde görülmektedir.

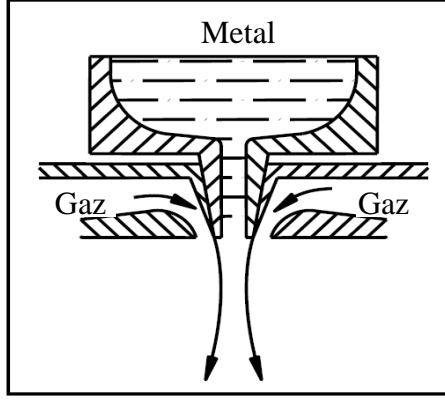


Şekil 4.5. Metal tozu oluşum aşamaları [49].

Literatürde yapılan çalışmaların çoğunda ortak nokta, gaz atomizasyonu işleminin birkaç aşamada meydana gelmesidir. Birincil aşamada ergiyik metal, tabaka veya ligamen yapıya dönüşüyor, ikincil aşamada ise bu oluşan yapıların bölünmesiyle elipsoid veya damlamsı meydana geliyor. En son aşamada ise damlacıkların soğuma ve katılaşması ile damlamsı veya küresel oluşuyor. Tozların soğuma ve katılaşma aşamaları atomizasyon kulesi içerisinde havada uçuşurken meydana gelmektedir. Katılaşma hızı tozların yapısını belirlediği için tozların katılaşma hızı önemlidir.

4.3. ATOMİZASYON NOZUL SİSTEMLERİ

Atomizasyon nozul sistemleri, yakından eşlemeli ve serbest düşmeli olarak ikiye ayrılmaktadır. Yakından eşlemeli sistemlerin çoğunluğu dairesel delikli gaz jetleri ile birlikte kullanılmaktadır. Bu tip sistemlerde ergiyik metal, metal akış borusunun hemen ucunda gaz jetleri ile karşılaşarak atomize olmaktadır [50]. Şekil 4.6'da yakından eşlemeli sistemin şematik gösterimi verilmiştir.

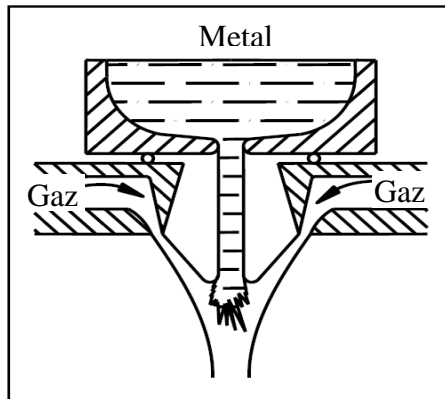


Şekil 4.6. Yakından eşlemeli nozul sisteminin şematik gösterimi [51].

Çok ince toz üretimi ve yüksek verimlilik elde etmek amacıyla yakından eşlemeli nozul sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemin en önemli iki unsuru vardır. Bunlar;

1. Ergiyik metale gaz jeti çok yakındır. Bu yakınlık maksimum kinetik enerjinin ergiyik metale aktarılmasını sağlar.
2. Gaz jetinin büyük açılarla gelmesi, ergiyiği atomize edebilmemize imkân sağlar. Bu sebepten dolayı, aynı şekilde daha fazla kinetik enerjinin ergiyik metale aktarılmasını sağlar.

Serbest düşmeli nozul sisteminde, ergiyik metal gaz jeti ile çarpışmaya kadar serbest olarak akar. Çarpışma olduğu anda ergiyik metal çok küçük damlacıklara ayrılır ve bu damlacıklar atomizasyon kulesi içerisinde uçuşurken katılışır. Şekil 4.7’de, serbest düşmeli nozul sistemi şematik gösterimi verilmiştir.

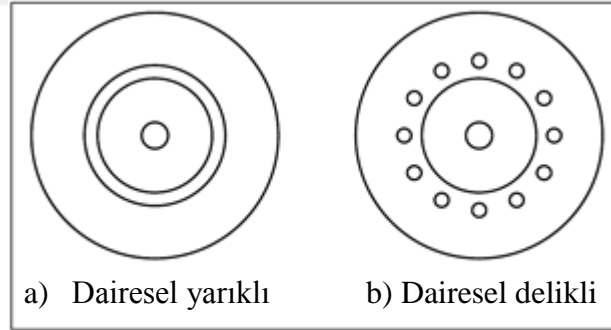


Şekil 4.7. Serbest düşmeli nozul sistemi şematik gösterimi [51].

Serbest düşmeli nozul ile çok ince boyutta toz üretimi çok pahalı ve ekonomik olmayan bir yöntem olduğundan dolayı bu yöntem sık kullanılmamaktadır. Çünkü ergiyik metali atomize etmek için gerekli olan enerjinin, gazdan ergiyik metale aktarılması problem olmaktadır. Gaz jeti açısının büyük olması verimsiz ve kararsız bir atomizasyona yol açmaktadır. Aynı zamanda, yüksek gaz basınçlarında çalışıldığında da gaz jetinin kararsızlığı ortaya çıkmaktadır [51].

4.4. GAZ ATOMİZASYON NOZUL ÇEŞİTLERİ

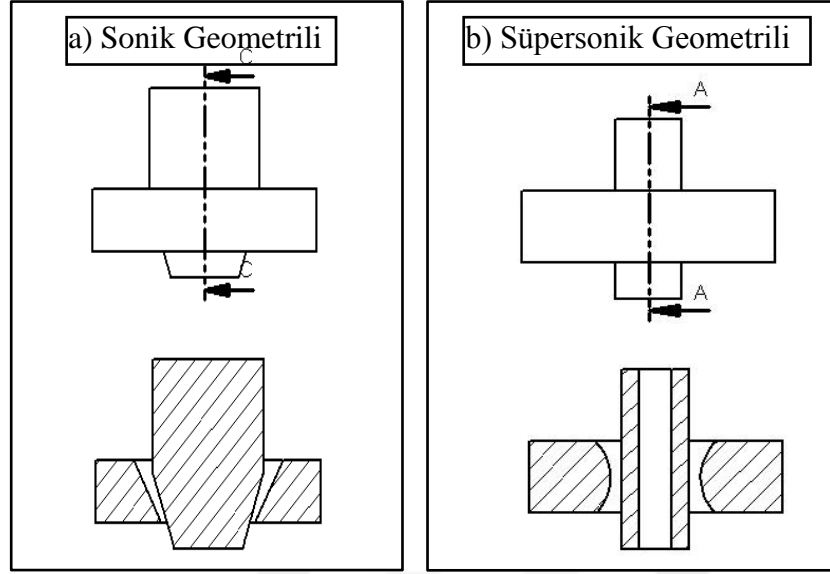
Bir atomizasyon sisteminde nozul, atomizasyon gazının ergiyik metal ile çarpışmasını sağlayarak, ergiyik metalin parçacıklara ayrılmasını sağlar. Bir başka deyişle, gaz basıncını kontrol ederek istenilen boyutta toz üretimini sağlayan geometrik bir parçadır. Nozul gaz atomizasyon ünitesine monte edildiği için atomizasyon ünitesinin sabit parçalarından bir tanesidir. Nozul çeşidi toz boyut ve şeklini önemli ölçüde etkilemektedir. Nozul sistemleri, Şekil 4.8’de gösterildiği gibi dairesel yarıklı ve dairesel delikli olmak üzere ikiye ayrılırlar.



Şekil 4.8. Atomizasyon nozul çeşitleri [51].

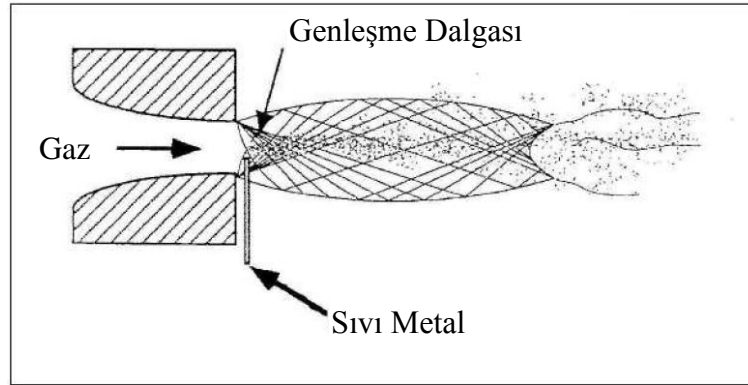
Nozul tipleri literatürdeki bilgilere göre genel olarak geometrik şekillerine göre ikiye ayrılırlar [52].

1. Sonik nozullar (Şekil 4.9a)
2. Süpersonik nozullar (Şekil 4.9b)

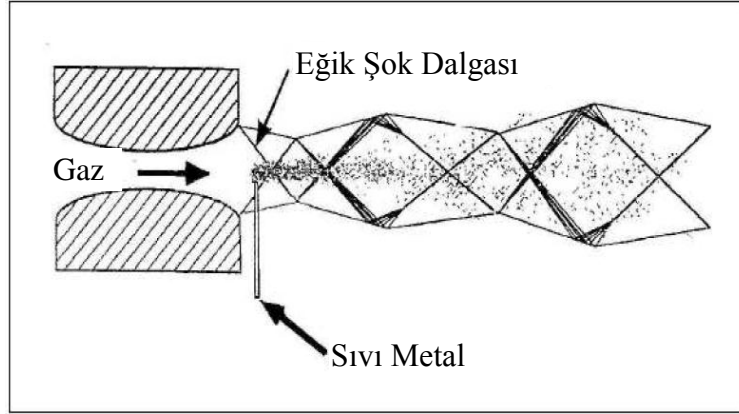


Şekil 4.9. Nozul geometrileri a) Sonik geometrilili b) Süpersonik geometrilili [52].

Gaz atomizasyon yöntemiyle toz üretiminin verimli olması için en önemli ölçütlerden biri, gereken koşullarda çalışabilecek bir nozul tasarımının yapılmasıdır. Bu yüzden nozul performansının iyi olması gerekir. Nozul performansının incelenmesi için nozula gaz gönderildikten sonra oluşan gaz akış bölgeleri incelenir [53]. Yapılan incelemeler sonucunda, yüksek hızlı gaz jetinin gelişimi sonik nozullar için Şekil 4.10'da, süpersonik nozullar içinde Şekil 4.11'de verilmiştir.



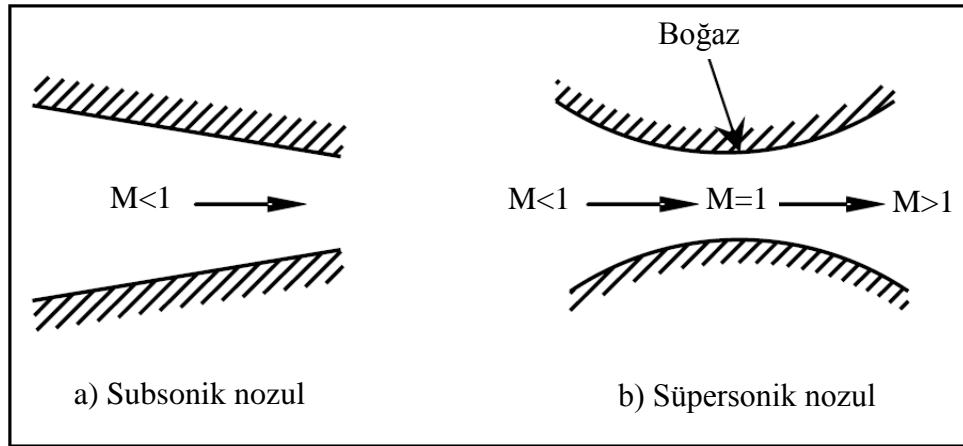
Şekil 4.10. Sonik geometrilili nozulda yüksek hızlı gaz jetinin gelişimi [46].



Şekil 4.11. Süpersonik geometrili nozulda yüksek hızlı gaz jetinin gelişimi [46].

Atomizasyon gaz akışını nozul geometrisi kontrol ettiği için, atomizasyon işlemi ile toz üretiminde son derece önemlidir [50]. Klar ve Fesko'ya [55] göre nozul geometrisi tasarımı, Şekil 4.12'de görüldüğü gibi iki şekilde olabilir. Bunlar;

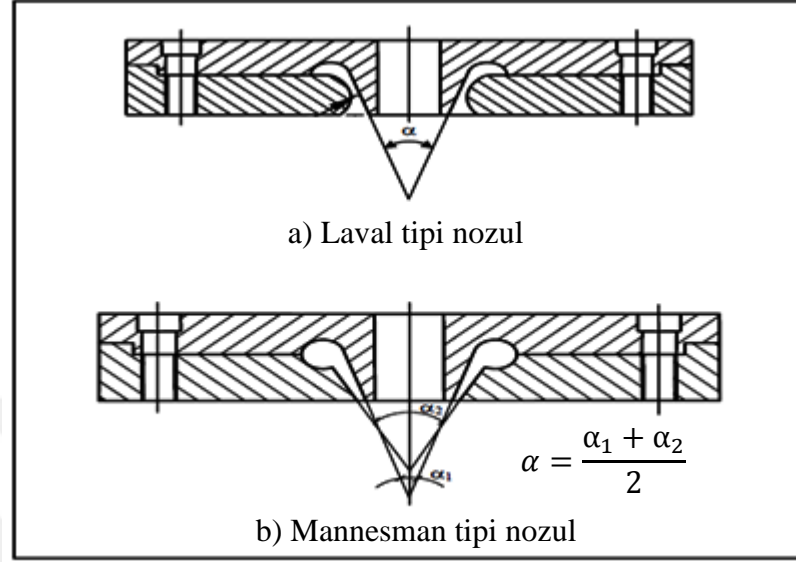
1. Gaz hızını ses hızının altındaki hızlarla ($M < 1$) sınırlayan daralan tasarım
2. Ses hızının üstündeki hızlarla ($M > 1$) ulaşmasına imkân veren daralan/genişleyen tasarım.



Şekil 4.12. Sıvı metal akışlar için nozul geometrisi [55].

Şekil 4.13a'da daralan/genişleyen şeklinde tasarlanmış nozullar Laval nozulu olarak adlandırılırlar [55]. Laval nozulunda en önemli kısım boğaz bölgesidir. Çünkü bu bölgedeki özellikler, sonik özellikler olarak adlandırılır. Şekil 4.13b'de görüldüğü

gibi, gaz çıkışı aynı merkezde olan daralan tasarım nozullar ise [54], Mannesmann nozulu olarak adlandırılır.



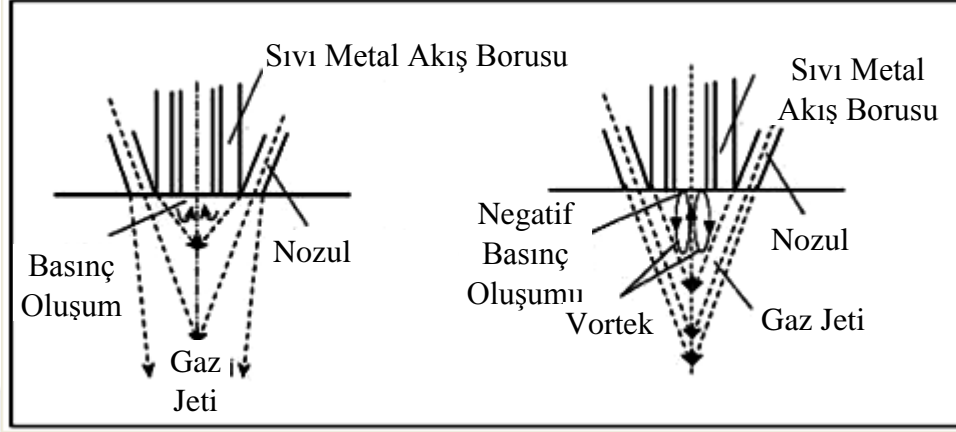
Şekil 4.13. Nozul geometrisi tipleri a) Laval b) Mannesmann [56].

4.5. NEGATİF VE POZİTİF BASINÇ

Ergiyik metal akış borusu ucunda oluşan gaz akışı ve negatif basınç meydana gelmesi gaz dinamiğine bağlıdır. Atomizasyon işlemi sırasında ergiyik metal akış borusunun ucundaki gaz basıncı atomizasyon parametrelerinin durumuna göre negatif veya pozitif olabilir. Negatif basınç meydana geldiği zaman ergiyik metal potadan akış borusuna doğru çekilir. Pozitif basınç meydana geldiği zaman ise ergiyik metal akışı gerçekleşmediği için pota içerisinde püskürme oluşabilir (Şekil 4.14). Bu olaylardan dolayı atomizasyon işlemiyle toz üretiminde negatif basınç, istenilen bir durumdur [57]. Ergiyik metale etki eden dolaşım bölgesindeki gaz akış kuvvetlerinin toplamı, metal akış borusu ucunda oluşan negatif basınca eşittir. Atomizasyon işleminde gaz akışı nozul yapısına bağlıdır. Cui ve arkadaşları [58], yaptıkları araştırmada süpersonik nozulların, sonik nozullara göre daha kuvvetli negatif basınç oluşumu meydana getirdiğini gözlemlemişlerdir.

Negatif basıncın oluşmasını sağlayan en önemli parametrelerden biri, metal akış borusunun nozul gaz çıkışına göre konumudur. Metal akış borusunun nozula olan

mesafesi arttıkça, daha etkili negatif basınç oluşumu meydana gelir. Ancak metal akış borusunun nozuldan uzaklaşması ergiyik metalin borunun içinde donmasına yol açmaktadır.



Şekil 4.14. Ergiyik metal akış borusu ucunda oluşan basınç [56].

BÖLÜM 5

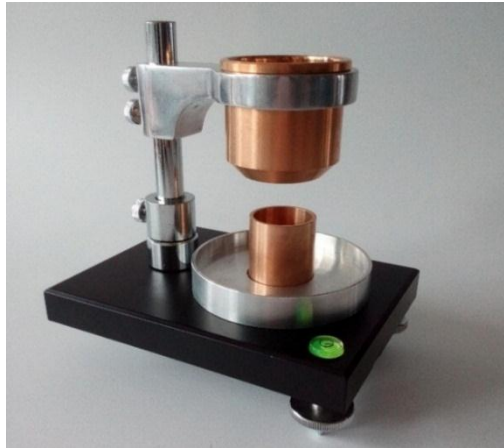
TOZLARIN ÖZELLİKLERİ

5.1. TEKNOLOJİK ÖZELLİKLER

Metal toz üretimi birçok yöntemle gerçekleştirilir. Fakat amaç, toz üretimini istenilen şekil ve boyut dağılımı aralığında ve herhangi bir kirlenme olmaksızın üretilmesidir. Üretilmesi planlanan parçaların istenilen özelliklerde üretilebilmesi için arzu edilen niteliklerde tozlara ihtiyaç duyulmaktadır.

5.1.1. Toz Akıcılığı

Toz maddelerin akıcılık değerini tespit etmek için, 50 gram tozun 2,54 mm'lik, Şekil 5.1'de görülen hall huniden geçmesi için gereken süre olarak belirlenmiştir. Bu ölçümlerde genellikle 50 gramlık toz, örneğinin huniden akış süresi ile belirlenir ve bu belirlenen değer tozun akıcılığı olarak kabul edilir. Tozun akıcılık özelliği ise, tozun bilhassa tane büyüklüğüne, spesifik yüzey alanına, toz tane şekline bağlıdır. Toz tane iriliği düştükçe tozun akıcılığı azalır. Toz tane şekli küresel geometriden uzaklaştıkça akıcılık da o oran da azalır [58].



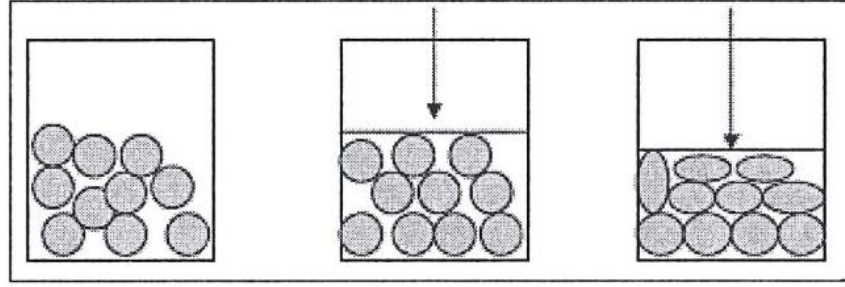
Şekil 5.1. Hall hunisi.

5.1.2. Görünür Ve Titreşimli Yoğunluk

Görünür yoğunluk, tozun gevşek (sıkıştırılmamış) haldeki yoğunluğudur. Presleme öncesi kalıba serbest hızla akan tozların yoğunluğu (görünür yoğunluk), kalıbın titreştirilmesiyle büyük miktarda arttırılmış olur. Titreşimle birlikte artan yoğunluk tozun şekli ve toz dağılımı ile bağlantılıdır. Karmaşık şekilli tozlarda küresel ve düzgün yüzeyli tozlara göre bu artış çok daha fazladır. Bunun sebebi ise; küresel şekilli tozların bağıl yoğunluklarının yüksek, karmaşık şekilli ve küçük toz boyut dağılımına sahip tozların ise bağıl yoğunluklarının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Tozların görünür ve titreşim sonrası yoğunlukları imalat süreci açısından son derece önemlidir. Küresel yapıdaki tozların kalıp içerisine akış hızları ile kalıp içerisinde paketlenme özellikleri diğer karmaşık şekilli tozlara göre daha iyi olmaktadır. Başka bir deyişle; küresel tozlar karmaşık şekilli tozlara nazaran kalıp içerisini daha hızlı doldururlar ve presleme öncesinde de daha yüksek görünür ve titreşim yoğunlukları verirler [59].

5.1.3. Sıkıştırılabilirlik

Sıkıştırma sırasında tozlar (Şekil 5.2), kalıp içerisinde bir kütle hareketi oluşturmaktadır. Sıkışma, genellikle presleme basıncı doğrultusunda ve kalıbın yan yüzeylerinde meydana gelmektedir. Yoğunluğu düşük olan tozlarda temas yüzeyi az olduğu için tozların kütle hareketi daha kolay olmaktadır. Sıkıştırma boyunca plastik deformasyonla beraber tozlardaki gözenek miktarı azalır ve yoğunluk artışı meydana gelir. Yoğunluk artışı, parça içerisindeki hava gözeneklerinin yerini toz tanelerinin alması sonucu gerçekleşmektedir. Artan basınç kuvveti ile birlikte parçanın içindeki havanın bir kısmı yapıyı terk etmeden gözenekler içerisinde kalır. Bu sebepten dolayı; gözeneklerin içerisinde kalan hava iç cephe hasarlarına yol açar ve yüksek basınçlarda artması gereken mukavemetin azalmasına neden olur [59].



Şekil 5.2. Tozların tek yönlü sıkıştırılma işlemi [60].

Sıkıştırma işleminde en önemli problem, toz ile kalıp duvarları arasındaki sürtünmedir. Tozun kalıp içerisindeki derinliği arttıkça, toz ile kalıp arasındaki sürtünme kuvveti de artar. Sıkıştırma işleminde meydana gelen toz tanecikleri arasındaki bağlanma ham mukavemeti ifade etmektedir [61].

5.2. FİZİKSEL ÖZELLİKLER

Tozların fiziksel özellikleri toz parçacık boyutu, toz tane morfolojisi, tozların spesifik yüzey alanı, görünür yoğunluk ve akış hızı gibi özellikleri kapsamaktadır. Tozların presleme ve sinterleme özellikleri de bu özelliklerle çok yakından ilişkilidir [62].

5.2.1. Toz

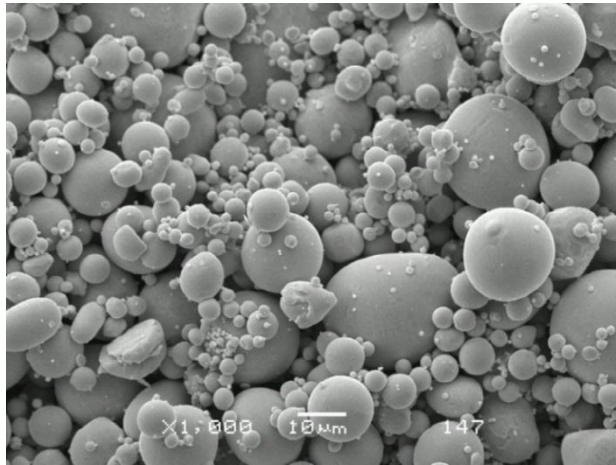
Toz parçacıkları tek bir taneden oluşur. Bu taneler düzenli kristal yapıda olabilecekleri gibi amorf yapıda da olabilirler. Aynı zamanda taneler tek kristalli olabileceği gibi çok kristalli tane yapısına da sahip olabilirler. Metal tozlarının üretim yöntemleri, tozlara ait birçok özelliğin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu nedenle kullanım alanlarına göre farklı yöntemlerle üretilen tozlar, parça imalatında kullanılabilirler [63]. Bir metal tozunun genel görünümü Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Metal tozu genel görünümü.

5.2.2. Toz Şekli

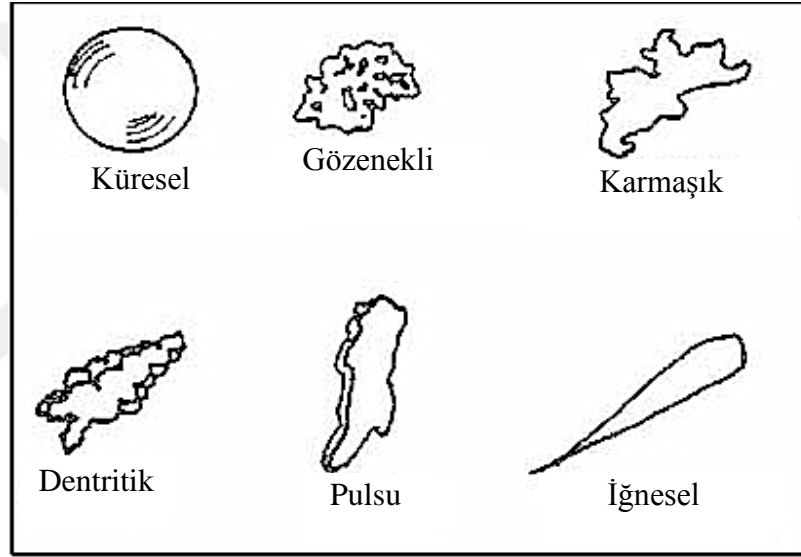
Toz üretim yöntemleri ile üretilen tozların şekilleri, birbirlerinden farklı olabilir. Atomizasyon yöntemi ile genellikle küresel şekilli tozlar üretilir. Küresel şekilli kalay tozlarının görünümü, Şekil 5.4’de verilmiştir. Tozların şekilleri tozların akıcılığında önemli rol oynar. Küresel şekilli tozlar, pulsu (flake) tozlara göre iyi akış özelliği gösterirken karmaşık şekilli tozların akıcılığı ise çok düşüktür. Ayrıca toz şekli tozların, görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik, ham mukavemet ve sinterlenebilirlik gibi özelliklerini de etkiler. En yüksek görünür yoğunluğa sahip olan toz ise, küresel tozlardır. Köşeli ve yüksek gözenekli tozlar ise, düşük yoğunluğa sahiptir. Düzgün şekilli tozların preslenebilirliği kolay olurken, karmaşık şekilli tozların preslenebilirliği daha zor olmaktadır [64].



Şekil 5.4. Küresel şekilli gaz atomize kalay tozlarının genel yüzey görüntüleri [65].

5.2.3. Toz Boyutu Ve Dağılımı

Tozların tamamının aynı boyutta olduğu kesinlikle söylenemez. Fakat ortalama tane boyutu ele alınabilir. Toz parçacıklarının şekli (Şekil 5.5) karmaşık hal aldıkça toz tane boyutu ölçüm teknikleri de değişmektedir. Genel olarak; küresel tozlar için sadece çap ölçümü yeterli iken; pulsu (flake) şeklindeki tozlar için hem kalınlık hem de boyunun uzunluğunun ölçülmesi gerekmektedir. Bu nedenle; toz parçacıklarının şekli karmaşığa doğru gittikçe, birkaç boyutunun ölçülmesi gerekir. Çok fazla karmaşık şekilli tozların tane boyutu yüzey alanından yola çıkılarak bulunabilir [38].



Şekil 5.5. Metal tozlarının genel görünüşleri [39].

5.2.4. Özgül Yüzey Alanı (Spesifik Yüzey Alanı)

Özgül yüzey alanı, bir toz parçacığının dış yüzeyinin ortalama bir ölçüsüdür. Bir tozun yüzey alanı, özelliklerdeki dağılım veya toz yapısı hakkında yorum yapabilmemizi sağlamamaktadır. Bu nedenle, tozun yüzey alanı tozun ayrıntılı bir şekilde tanımlanması için diğer parametrelerle birleştirilebilir. Özgül yüzey alanı, birim kütle başına alan (m^2/kg) olarak tanımlanır [58].

Birim ağırlık başına yüzey alanı: $S=A/w$ ile verilir. Bu denklemden

$$S=6/PM.D \quad (5.1)$$

eşitlik 5.1 denklemi çıkarılmaktadır. Burada;

S: özgül yüzey alanı

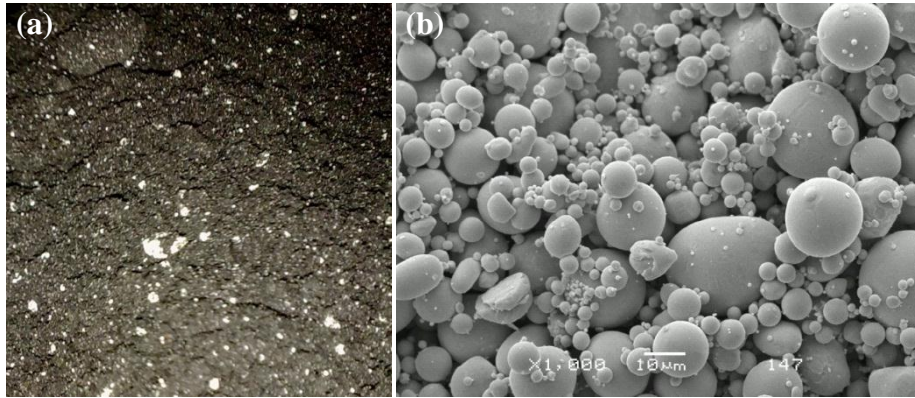
D: ortalama parçacık boyutu

PM: teorik malzeme yoğunluğu

w: parçacığın ağırlığı

5.2.5. Temizlik

Atomizasyon yöntemleri ile üretilen tozların yüzeylerinde oksit tabakası meydana gelmektedir (Şekil 5.6a). Özellikle oksit tabakası su atomizasyonu ile üretilen tozlarda oluşmaktadır. Bu oksit tabakası, tozlar kurutulduktan sonra indirgeyici atmosfer içerisinde yüksek sıcaklıklarda indirgenmelidir. Gaz atomizasyonu ile toz üretiminde böyle bir oksitlenme meydana gelmemektedir. Başka bir deyişle, gaz atomizasyonu ile temiz toz üretimi sağlanır (Şekil 5.6b).



Şekil 5.6. a) Oksitlenmiş toz yüzeyi b) Temiz toz yüzeyi [65].

BÖLÜM 6

TOZ METALURJİSİ İLE PARÇA İMLATI

6.1. KARIŞTIRMA VE HARMANLAMA

Tozların karıştırma işlemi, birden fazla bileşenli tozlar için uygulanan işlemdir. Harmanlama ise, genellikle tek bileşenli karışımlar için uygulanan işlemdir. En iyi karıştırma işlemi toz hacminin, karıştırıcı hacminin %50-60'ı kadar olduğunda meydana gelmektedir. Karıştırma süresi olarak da genellikle 5 - 30 dk. yapılan karışımlarda başarı elde edilmiştir [66,67].

Metal tozların karıştırılma işlemi genellikle V veya Y tipi karıştırıcılar vasıtasıyla çift borulu ve çift-koni karıştırıcılarda yapılmaktadır (Şekil 6.1). Karıştırma süresinin uzun tutulması toz taneciklerinin kırılarak küreselleşmesine ve plastik deformasyona uğramasına yol açmaktadır. Bunun gibi sebepler tozun sıkıştırılabilirlik özelliğini azalmaktadır. Karışımın en dikkat edilmesi gereken kısmı, bileşimin iyi ayarlanarak tozun her bölmesinde homojenliği sağlamaktır [68].



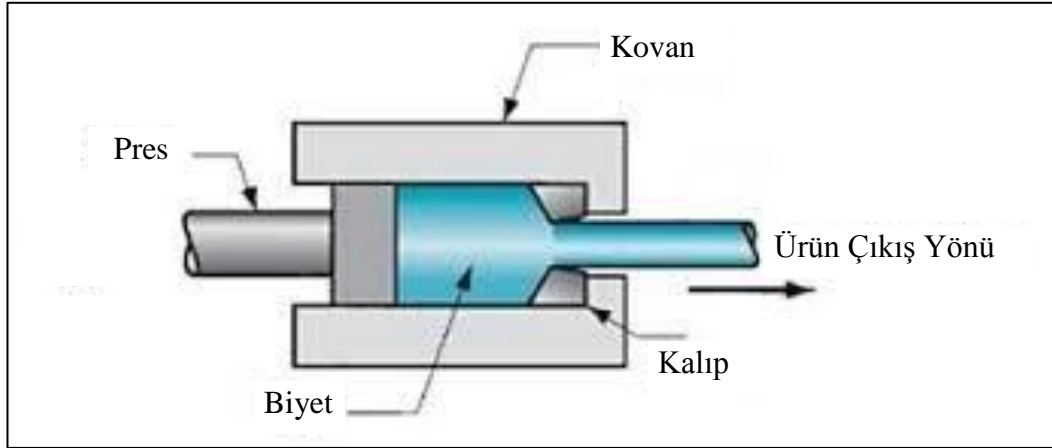
Şekil 6.1. Toz karıştırma turbulası.

6.2. TOZLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ

Tozların şekillendirme işleminde tozların yoğunluğu, yaklaşık olarak görünür yoğunluğa eşit kabul edilir. Tozlara uygulanan basıncın artırılması ile toz taneleri arası noktasal temas bozulur ve basıncın artmasına bağlı olarak gözeneklilik miktarı azalır. Ayrıca basıncın artmasına bağlı olarak plastik deformasyon ve yoğunluk artar [69]. Tozların parça halinde şekillendirilmesi genellikle ekstrüzyon, haddeleme ve presleme gibi işlemlerle yapılmaktadır.

6.2.1. Ekstrüzyon

Toz karışımlarının yüksek kuvvetlerde preslenerek dar kalıp ucundan çıkmak suretiyle yapılan şekillendirme işlemine ekstrüzyon denir (Şekil 6.2). Genel olarak, boru veya uzun çubuk şeklinde imal edilmesi gereken parçalarda periyodik olarak kesilmek suretiyle seri imalat yapılması gereken yerlerde uygulanan bir işlemdir [70,71]. Bunun yanısıra; toz karışımları enjeksiyon kalıplama tekniğiyle de farklı şekillerde kalıplara preslenerek işlem yapılabilir.

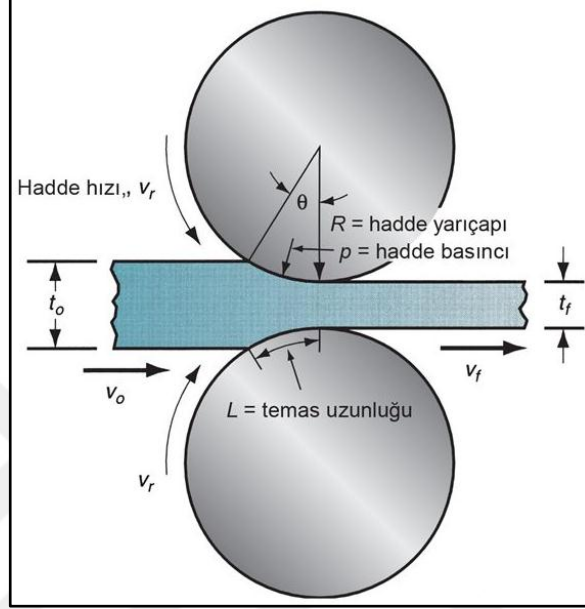


Şekil 6.2. Ekstrüzyon işleminin şematik gösterimi.

6.2.2. Haddeleme

Malzemenin eksenleri etrafında dönen iki merdane arasında geçirilerek yapılan yapılan plastik şekil verme işlemi haddeleme olarak adlandırılır. (Şekil 6.3).

Merdaneler aynı hızda ve birbirlerine zıt yönde dönerler. Malzemede; sıkıştırmayı sağlayan basma kuvveti ve malzeme ve merdaneler arasında sürtünme ile oluşan yüzey kayma gerilmesi ile deformasyon sağlanır. Bunun yanısıra sürtünme kuvveti aynı zamanda malzemenin ilerlemesini sağlar [58].



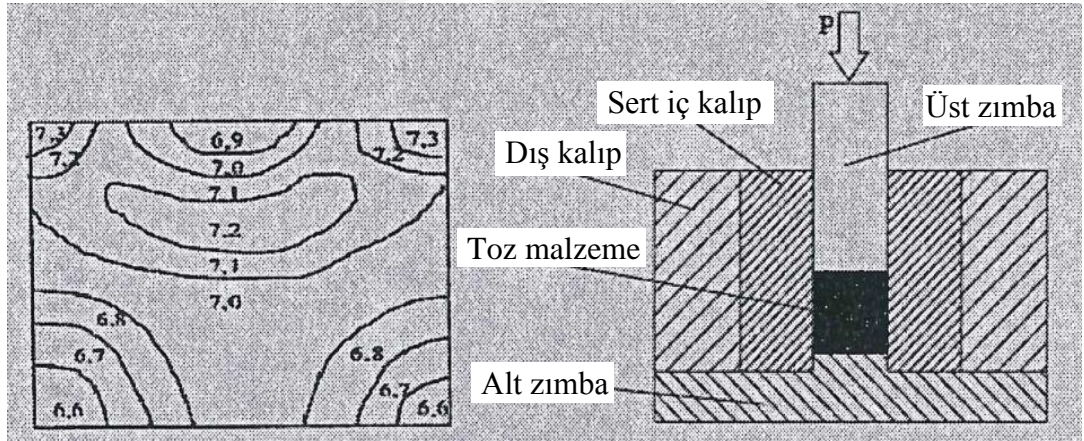
Şekil 6.3. Haddeleme sistemi.

6.2.3. Presleme

Presleme işlemi genel olarak; iki zımba arasındaki kalıba yerleştirilen tozların iki ekseninde yüksek basınç uygulanması ile tanımlanır. Presleme işlemi genellikle basit parçaların seri imalatında yaygın olarak kullanılır. Basınç uygulanarak elde edilen parça kütle olarak adlandırılır. Kütle terimi, henüz yeterince sıkıştırılmamış anlamına gelmektedir. Kütle halinde malzemenin dayanımı çok düşüktür. Ancak sinterleme işleminden sonra nihai ürünün dayanımı çok yüksektir. Bazı presleme uygulamalarında, presleme işlemi ile birlikte tozlara sıcaklık da uygulanarak sinterleme işlemi yapılmaktadır. Bu gibi uygulamalarda hem presleme hem de sinterleme işlemi yapılmış olduğundan dolayı tek seferde nihai ürün imal edilmiş olur [58].

6.2.3.1. Tek Yönlü Presleme

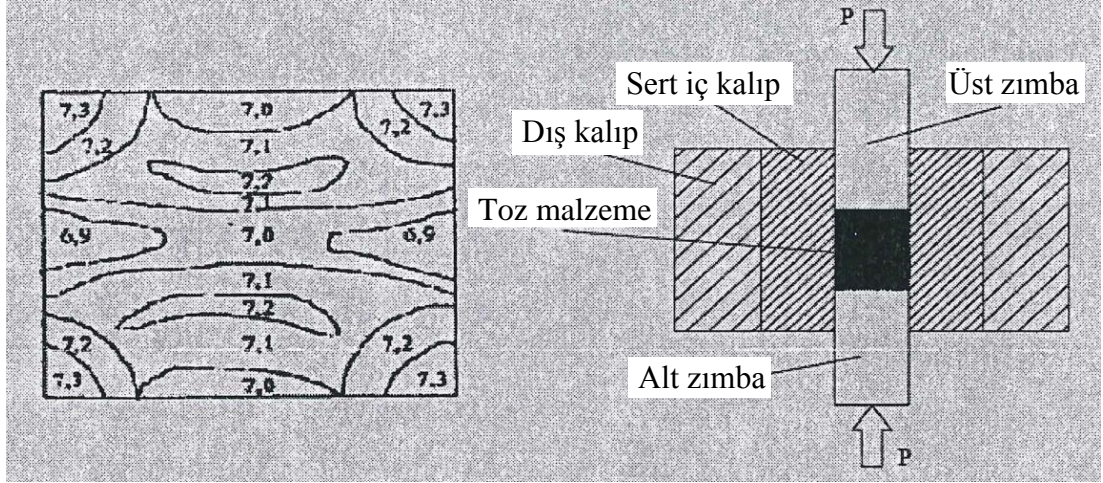
Tek yönlü presleme işleminde, deformasyon işleminin başlamasıyla birlikte, tozların kendi aralarında ve toz kalıbının iç kısmında oluşan sürtünme kuvveti dağılımında bir düzensizliğe yol açmaktadır. Bu düzensizlik uygulanan basıncın dağılımını önemli derecede etkilemektedir. Tozun yoğunluk miktarı, hareketli zımbanın olduğu bölgelerde yüksek olurken sabit zımbanın olduğu bölgelerde düşük olmaktadır. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı Şekil 6.4’de görüldüğü gibi dağılmaktadır. Yoğunluk miktarının bu şekilde azalması imal edilen parçanın boy/çap oranına bağlıdır. Tek yönlü preslemede, presleme işleminden önce kalıba doldurulan toz yüksekliğinin kalıp çapına oranı, presleme işleminden sonraki yoğunluk dağılımını önemli derecede etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı; yükseklik/çap ≤ 4 olması tavsiye edilmektedir [72].



Şekil 6.4. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve tek yönlü kalıbın şematik gösterimi [73,74].

6.2.3.2. Çift Yönlü Presleme

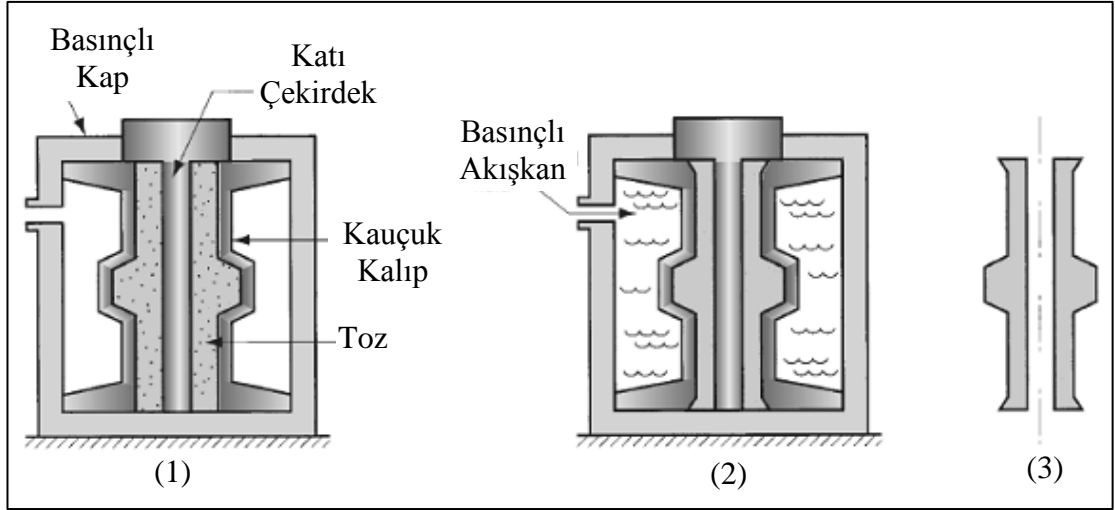
Çift yönlü preslemede tozun, karşılıklı olarak alttan ve üstten çalışan iki adet zımba tarafından aynı anda preslenmesi işlemidir (Şekil 6.5). Her iki yönden de eşit miktarda basınç uygulanır. Çift yönlü presleme ile kalıp içerisinde düzenli bir sıkıştırma meydana gelmektedir. Yoğunluk dağılımı ise, tek yönlü presleme ile imal edilen parçaların yoğunluk dağılımına kıyasla daha homojen olmaktadır [72].



Şekil 6.5. Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve çift yönlü kalıbın şematik gösterimi [73,74].

6.2.3.3. Soğuk İzostatik Presleme

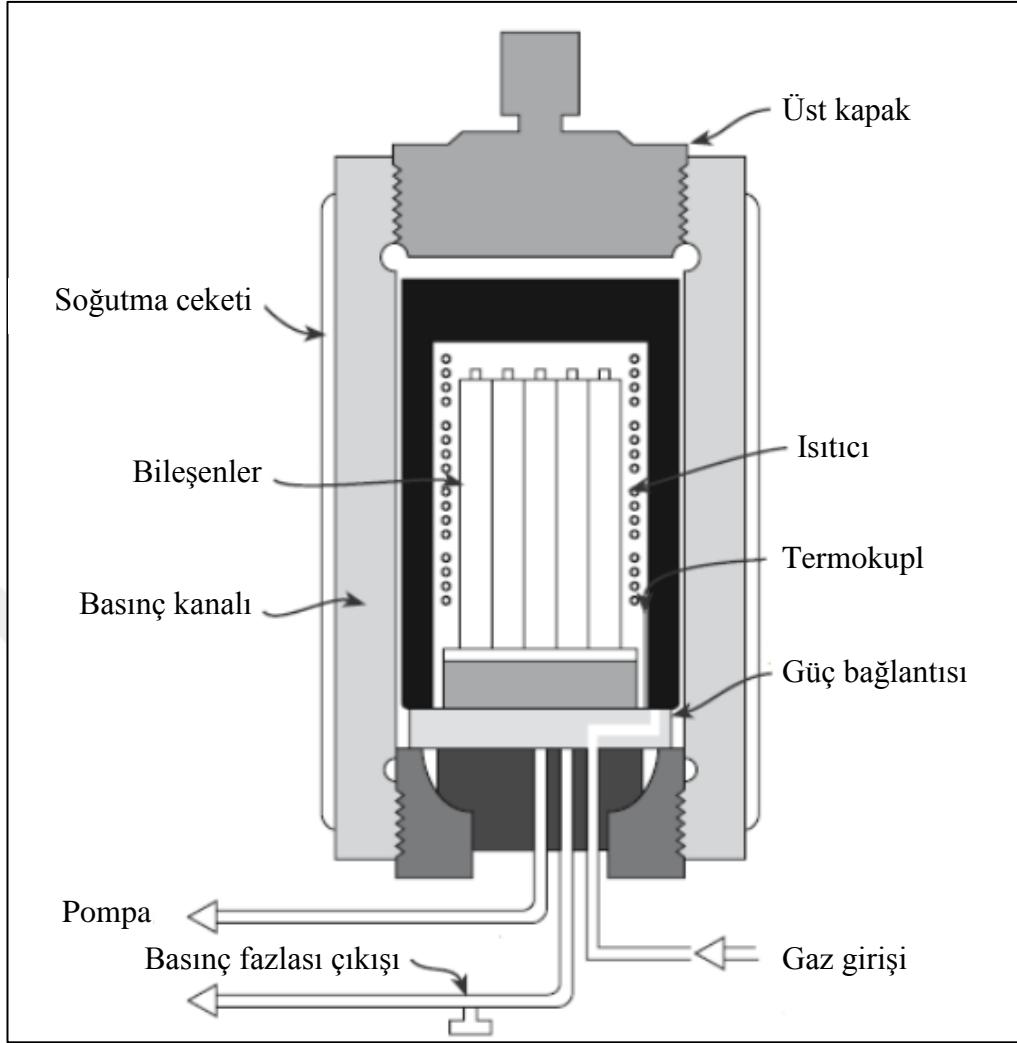
Toz presleme sırasında uygulanan basınçların her yönden eşit olarak uygulandığı bir yöntemdir (Şekil 6.6). Soğuk izostatik presleme genellikle karmaşık kademeli, boy ve çap oranının büyük olduğu parçalara uygulanmaktadır. Toz, kalıp olarak kullanılan sızdırmaz elastik bir kap içerisine konulur ve kapatılır. Kalıbın içerisinde hava presleme sırasında çıktığından dolayı önceden kalıp içerisinden boşaltılır. Boşaltma işlemi sonrasında kalıp, sıvı banyosu içerisindeki bir basınç kabına bırakılır. Sıvı içerisine yüksek basınç uygulanarak kalıp hidrostatik basınca maruz bırakılır. Kalıp sıvı banyosundan çıkarılır ve parçanın üzerindeki yumuşak kalıp alınır. Bu yöntemle preslenen parçalarda homojen bir yoğunluk dağılımı elde edilir [75].



Şekil 6.6. Soğuk izostatik presleme şematik gösterimi [73].

6.2.3.4. Sıcak İzostatik Presleme

Sıcak izostatik presleme, sadece aksenal basınç uygulanan sıcak presleme yöntemine kıyasla her yönden basıncın uygulandığı ve esnek kalıpların kullanıldığı bir yöntemdir (Şekil 6.7). Bu yöntemde tozların içinde bulunduğu kalıba üç eksenden eş aksenal olarak gaz aracılığıyla basınç uygulanırken aynı zamanda sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemin, soğuk izostatik presten tek farkı basınç uygulanan bölmenin ilave bir sistem vasıtasıyla ısıtılmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda basınç uygulanırken herhangi bir olumsuz reaksiyonun meydana gelmemesi için argon veya helyum gazı kullanılır. Sıcak izostatik preslemede, işlem sıcaklığı 2000 °C'ye kadar ulaşılabilirken basınç 30 ile 400 MPa arasında değişmektedir. Sıcak izostatik presin en önemli avantajı tane büyümesi olmadan yüksek yoğunlukta malzemeler üretilmektedir. Bu yöntemle arzu edilen özellikler için mikroyapının kontrolü zordur fakat parça şekil tutarlılığı oldukça yüksektir [75].



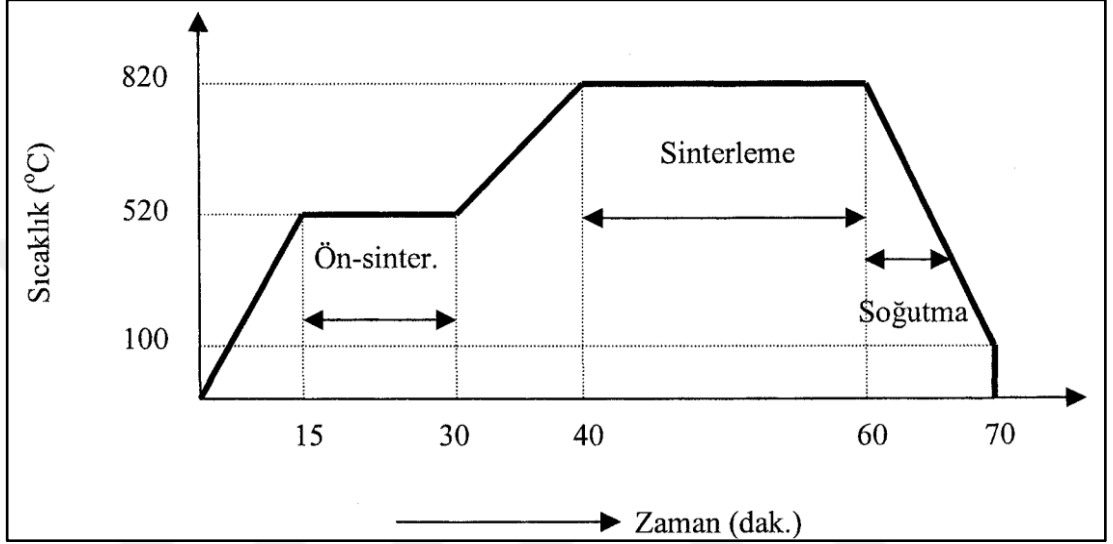
Şekil 6.7. Sıcak izostatik presleme şematik gösterimi [74].

6.3. SİNERLEME

Sinterleme, şekillendirilmiş toz metal parçaların birbirine bağlanmasını sağlayarak önemli ölçüde mukavemet artışı ve özelliklerin iyileşmesini sağlayan bir tür ısıtma işlemidir. Sinterlemenin etkili olabilmesi için tozların sıkı bir şekilde birbirleri ile temas halinde olması, en önemli etkidir. Bu bağlamda sinterleme işlemi, preslenmiş veya kalıplanmış tozlara uygulanır [76].

Sinterleme, preslenmiş parçaların kontrollü bir atmosfer ortamında ve yüksek sıcaklıkta arzu edilen son özelliklerin elde edilmesi amacıyla ısıl işleme tabi tutulmasıdır. Sinterleme sıcaklığı olarak ise; metallerin ergime sıcaklıklarının % 70 ile

%80'i alınırken, bazı refrakter malzemelerde sinterleme sıcaklığı, ergime sıcaklığının %90'ına kadar ulaşmaktadır. Birden fazla malzeme ile karıştırılıp ve preslenen parçalarda sinterleme sıcaklığı bazı bileşenlerin ergime sıcaklığı üzerinde olabilir. Bu gibi durumlarda düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler eriyerek yüksek ergime sıcaklığına sahip tozlar arasındaki gözenekleri doldururlar.



Şekil 6.8. Sinterleme işmenin aşamaları [28].

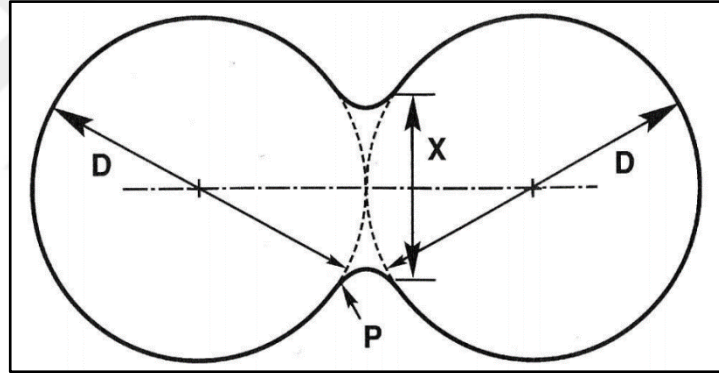
Sinterleme işlemi genellikle 3 aşamada meydana gelmektedir (Şekil 6.8). Bunlar;

1. Yanma veya temizlenme bölgesi
2. Yüksek sıcaklık bölgesi
3. Soğutma bölgesi

İlk olarak oluşan yanma ve temizlenme bölgesi, yağ ve bağlayıcıların hava ile yakılarak giderilme işleminin gerçekleştiği bölgedir. Malzeme içerisindeki yağlayıcı ve bağlayıcıların temizlenmesi, düşük ısıtma hızlarında meydana gelmektedir. Yüksek ısıtma hızlarında ise; genellikle gözeneklerde yanan bağlayıcı ve hava, iç basınç meydana getirerek parçanın parçalanmasına yol açmaktadır. Yüksek sıcaklık bölgesinde parçacıklar arasında bağlar oluşmaya başlar. Bu işlem katı hal difüzyonu aracılığıyla meydana gelmektedir. Metaller arası fazların ve katı çözeltilerin meydana gelmesi katı hal difüzyonu yardımıyla oluşur. Yüksek sıcaklıkta birbiri ile temas eden

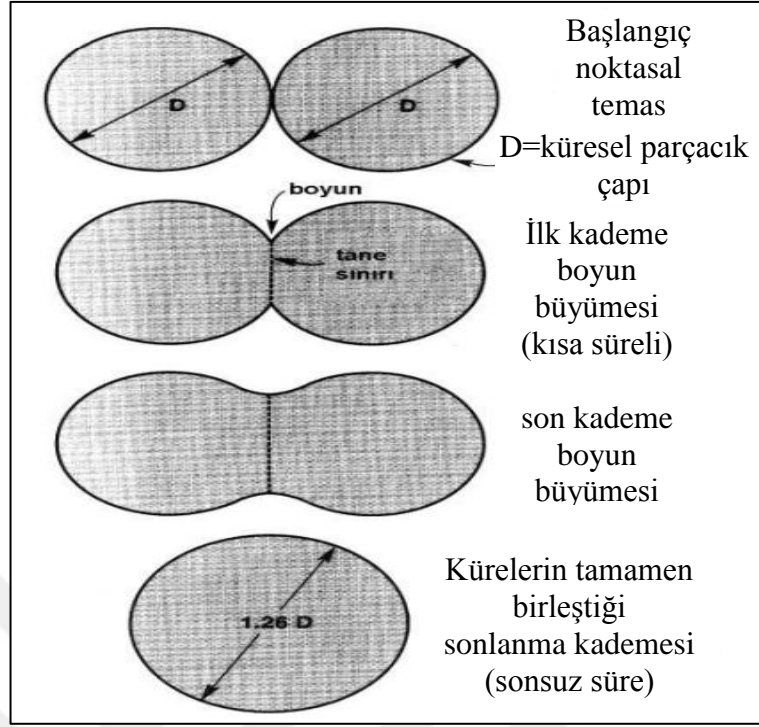
parçalar arasında bağ oluşur ve atomların karşılıklı transferi sayesinde bu bağ güçlenir. Bu bölgedeki bekleme süresi ise arzu edilen yoğunluk ve özelliklere göre değişkenlik gösterir. Bekleme süresi genellikle 10 dk. ile birkaç saat arasında olmaktadır. Soğutma bölgesi atmosfer kontrollünde yapıldığı için oksidasyon engellenmiş olur. İnce toz parçacıkları presleme sonrası tam temas sağlayamadığından ve kalıntı porozite içerdiklerinden dolayı bu üç aşamada da atmosfer kontrolü mutlaka olması gerekmektedir [58].

Sinterlemenin diğer bir ölçüsü de boyun çapının küre çapına olan oranı olarak belirlenir. (X/D) ve Şekil 6.9'da gösterildiği gibi boyun çapının küre çapına bölümü ile belirlenir. Şekilde P ile gösterilen bölge ise boyun dairesel profilinin yarıçapı olarak adlandırılır. Gerçekleşen boyun büyümesine ilaveten sinterlenen bir kütle büzülür (yani gözenekler atılır), yoğunlaşır ve mukavemeti artar.



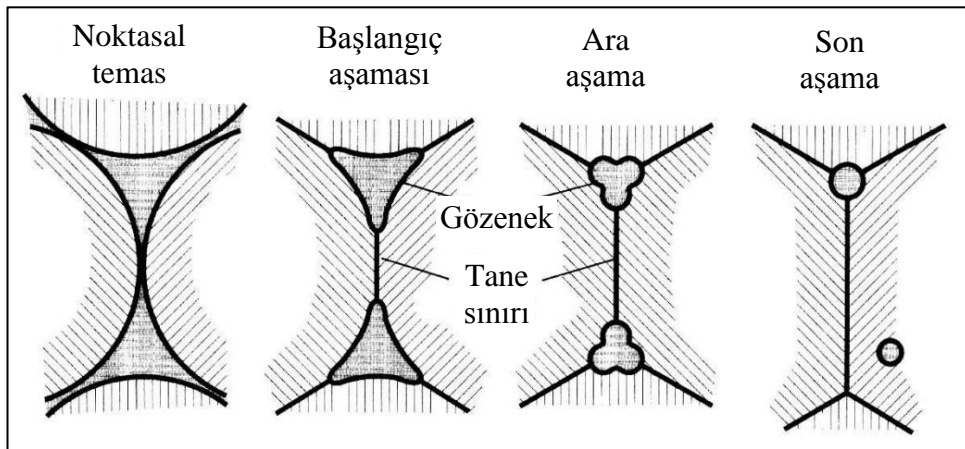
Şekil 6.9. İki tanenin sinterleme profili [60].

Şekil 6.10'da görülen birleşme halindeki iki tane ele alındığın zaman, sıkıştırılmış bir toz yığnında buna benzer birçok birleşme bölgesi vardır. Sinterleme işleminin ilerlemesiyle temas eden parçacıklar arasındaki bağlar genişler ve birleşir. Her bir birleşmede bir tane sınırı büyür. Şekil 6.10'da gösterildiği gibi uzun süreli bir sinterleme sonucunda iki parçacık tamamen birleşerek başlangıç çapının 1.26 katı büyüklüğünde tek bir küre şeklinde oluşmasına neden olur.



Şekil 6.10. İki tanenin sinterleme modeli [77].

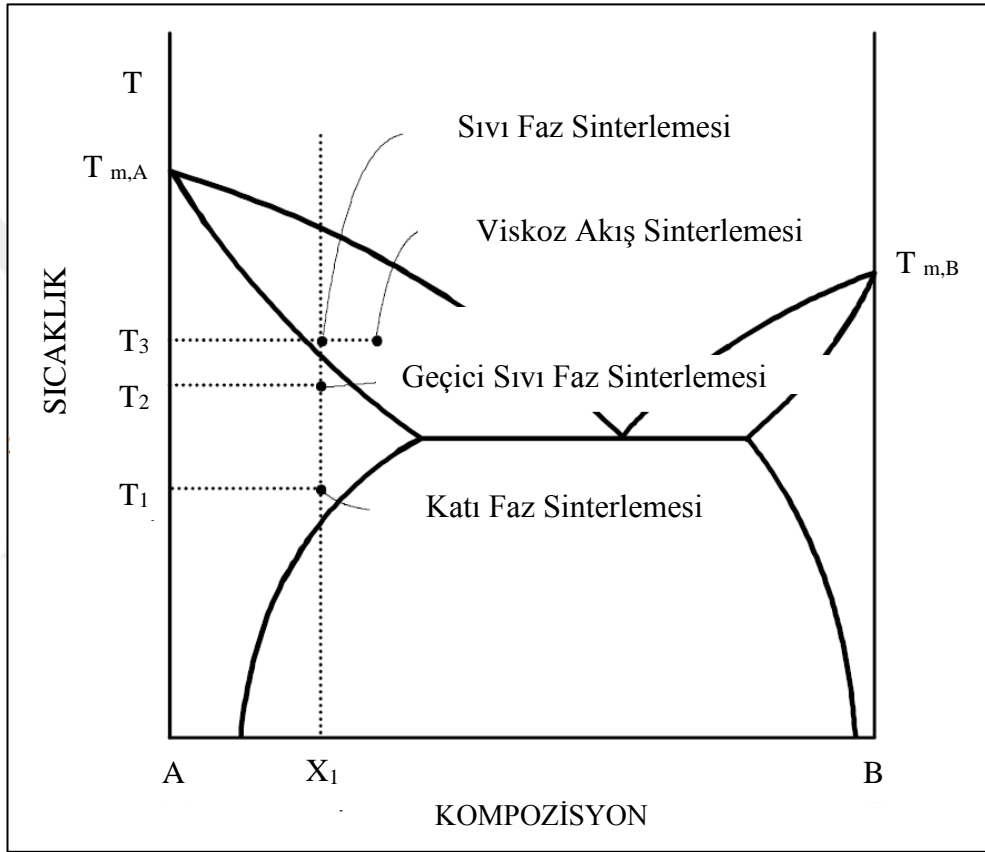
Şekil 6.11'de görüldüğü gibi parçacıkların noktasal temasıyla başlayan sinterleme sırasında gözenek yapısının değişimini gösteren şematik görüntüsü verilmiştir. Gözenek hacmi giderek azalır ve gözenekler daha küresel bir hale gelir. Gözenek küreselleşmesi oluşurken gözeneklerin yerini tane sınırları aldığı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6.11. Sinterleme sırasında gözenek yapısının değişiminin şematik resim [77].

6.3.1. Katı Faz Sinterleme

Katı faz sinterleme işlemi, toz parçacıklarının sinterleme sıcaklığına tamamen katı halde yoğunlaştırılması sonucu meydana gelir. Katı faz sinterleme işlemi Şekil 6.12’de verilen diyagramda gösterilmektedir. Diyagramda T_1 sıcaklığında A ile B arasında X_1 bileşiminde katı hal sinterlemesi meydana gelmektedir.

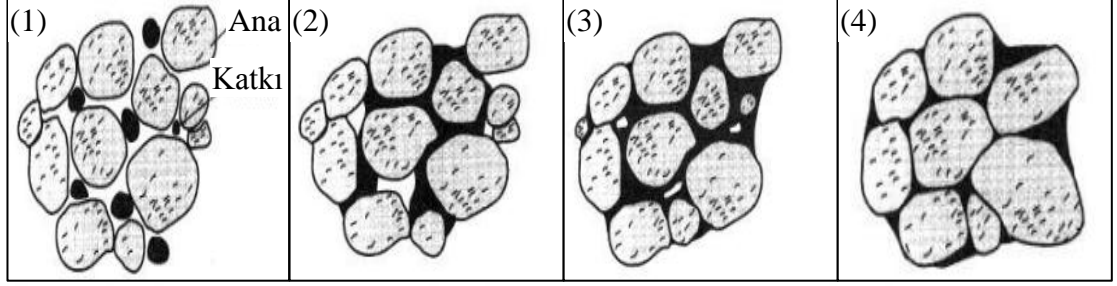


Şekil 6.12. Sinterleme faz diyagramı [79].

6.3.2. Sıvı Faz Sinterleme

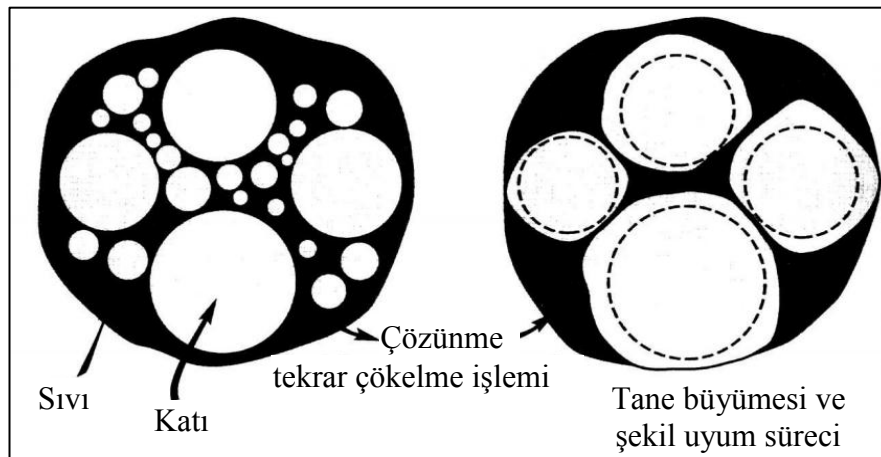
Sıvı faz sinterlemesi, preslenen toz karışımı sıvı fazın olduğu sıcaklıkta sinterlenir. Sıvı fazın oluşumu ile ani bir büzülme meydana gelir. Bu büzülme sırasında, katı parçacıklar sıvı faz içerisinde yeni bir düzene girer. Sıvı faz sinterlemesi, sinterleme sırasında toz içerisinde sıvı bir faz oluşması sonucu meydana gelmektedir. Sıvı faz sinterlemesini gösteren diyagram Şekil 6.12’de verilmiştir. Diyagramda T_3 sıcaklığında X_1 bileşiminde sıvı faz sinterlemesi meydana gelir. Sıvı faz

sinterlemesinde sıvı fazın miktarı % 20'yi geçemez. Sıvı faz sinterlemesinde, seramik tozların düşük sıcaklıkta ve kısa sürede sinterlenmesi mümkündür. Fakat sıvı faz sinterilmesi ile üretilmiş olan parçalar yüksek sıcaklıkta kullanıma elverişli değildir. [78].



Şekil 6.13. İki toz karışımı kullanarak sıvı faz sinterlemesinin aşamaları [77].

Matris, sinterleme sırasında katı olarak kalırken, katkı tozu sıvı faz oluşumunu sağlamaktadır. İki toz karışımı kullanarak sıvı faz sinterlemesinin aşamaları Şekil 6.13'de görüldüğü gibi dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tozlar ham olarak görünmektedir. İkinci bölümde, sıvı faz yayılması meydana gelmektedir. Üçüncü bölümde ise, ergiyikde çökme işlemi meydana gelmektedir. Son olarak dördüncü bölümde ise, sıvı faz sinterleme işleminin bittiğini ve malzemenin katı iskeleti görünmektedir.



Şekil 6.14. Sıvı faz sinterleme işleminde çökme ve tane büyümesi [77].

Şekil 6.14’de küçük boyutlu tanelerin büyük boyutlu taneler üzerinde çökelmeleri ile oluşan katı ergiyikten, tekrar çökmesi ile tane büyümesi gerçekleşir. Tane büyümesinin yanında sinterleme işlemi tane şekil uyum sürecini de verir. Böylece katı daha iyi paketlenir ve kalan herhangi bir gözenek sıvı ile daha iyi dolduğu düşünülmektedir.



BÖLÜM 7

MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

Son yıllarda, performans gelişiminde ağırlık tasarrufunun önemli olduğu mühendislik uygulamalarında yoğunluğu düşük olan malzeme kullanımının artması ile birlikte otomotiv, havacılık, haberleşme ve iletişim endüstrisinde magnezyum ve alaşımlarına olan önem artmıştır. Magnezyum alaşımlarının kullanımına olan talebin artmasıyla beraber toz metalürjisi ile üretilen kompozit malzemelere olan talepte büyük bir artış meydana gelmektedir. Al, Ti, Zn ve Fe gibi metallerle kıyaslandığında oldukça düşük yoğunluğa sahip magnezyum 1.74 g/cm^3 yoğunluğu ile yaklaşık olarak alüminyum alaşımlarından %35, titanyum alaşımlarından %65 daha hafiftir [79,80]. Magnezyum, oda sıcaklığında yüksek dayanım – yoğunluk ve yüksek elastiklik modülü – yoğunluk oranı ile alüminyum ve titanyum gibi malzemelere göre daha avantajlıdır. Bunun yanısıra, mükemmel dökülebilirlik, kaynak yapılabilme ve yüksek ısıl iletkenlik gibi avantajları vardır. Ancak, magnezyum kristali sadece üç kayma sistemi ile sıkı paket hegzagonal (sph) kafes yapısı, sınırlı süneklığe ve tokluğa sebep olmaktadır. Magnezyumda soğuk şekillendirme işlemlerinin yapılması zordur. Bu yüzden, şekillendirme işlemlerinin yüksek sıcaklıklarda yapılması gerekmektedir [81,82].

Magnezyum, düşük ergime sıcaklığına sahiptir ve bu yüzden yüksek sıcaklıklarda kullanım alanı oldukça zordur. Yaklaşık olarak $100 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık üstünde sürünme direnci düşer. Bunun yanısıra, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci azalır ve oluşan oksit tabakası oksitlenmeyi hızlandırır [83,84]. Ancak, magnezyum alaşımlarının, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda sürünme ve oksitlenme direncini arttırmak amacıyla mekanik özellikleri geliştirilmektedir. Magnezyum esaslı kompozit malzeme ürünleri, sağladığı birçok avantaj ile kullanım alanları giderek artmaktadır. Ticari saflıktaki magnezyum ve magnezyum alaşımları daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda daha kullanışlıdır. Bu nedenle magnezyum ve

magnezyum esaslı kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanım alanları her geçen gün genişlemektedir [85].

7.1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Magnezyum, hegzagonal kristal kafes (hsp) yapısına sahiptir ve $a=0.320$ nm, $c=0.520$ nm $c/a=1.624$ nm kenar uzunluklarına sahiptir. Magnezyum 1.74 g/cm³ yoğunluğa sahip olduğu için tüm mühendislik malzemelerinin en hafifidir. Çizelge 7.1’de saf magnezyumun özellikleri verilmiştir. Alüminyumdan yaklaşık olarak (2.7 g/cm³) iki kat, çelikten ise (7.86 g/cm³) dört kat daha hafiftir [86,87].

Çizelge 7.1. Magnezyumun özellikleri.

Atomik numara	12
Atomik kütle	24.31 g/g.mol
Renk	Gümüşümsü gri metal
Yoğunluk	20 °C’de 1.738 g/cm ³ 650 °C’de 1.58 g/cm ³
Ergime sıcaklığı	650 °C
Kaynama derecesi	1103 °C
Kristal yapısı	Sıkı paket hegzagonal
Yanma ısısı	25020 kJ/kg
Parlama sıcaklığı	2800 °C
Buharlaşma ısısı	5272 kJ/kg
Özgül ısısı	20 °C’de 1025 J/K.kg
Buhar basıncı	527 °C’de 20 Pa 650 °C’de 360 Pa 1727 °C’de 400 Pa
Viskozite	650 °C’de 1.25 cp
Isıl iletkenlik	27 °C’de 156 W/m K 527 °C’de 146 W/ m K

Magnezyum elementi reaktif bir metal olduğundan dolayı doğada metalik olarak bulunmaz. Doğada kalsiyum bileşikleri ve oksit, silikat ya da karbonat halinde

bulunur. Magnezyum yüksek reaktiviteye sahip olduğu için üretim sırasında yüksek enerjiye ihtiyaç duyulur. Bu yüzden magnezyum ucuz bir metal değildir [30,88]. Magnezyum ve alaşımlarının avantajları aşağıda verilmiştir;

1. Tüm mühendislik malzemeler içerisinde en hafif olması,
2. İyi bir elektromanyetik kalkan olması
3. Yüksek dayanım/yoğunluk oranı,
4. Titreşim ve darbe sönümlene kabiliyeti,
5. Mükemmel dökülebilirlik,
6. Yüksek hızlarda öğütülebilmesi,
7. Atmosfer kontrollü ortamda kaynak edilebilmesi,
8. Yüksek saflıktaki magnezyum kullanımında iyi korozyon direnci,

Polimer malzemeler ile karşılaştırıldığında;

1. Daha iyi mekanik özellikler,
2. Daha iyi yaşlanma süresi,
3. Termal elektrik iletkenliğinin yüksek olması,
4. Tekrar kullanılabilme özelliği,

Magnezyumun bazı zayıf yönlerinden dolayı, kullanım alanını sınırlayan özellikleri vardır [89]. Bu özellikler aşağıda verilmiştir;

1. Düşük elastisite modülüne sahip olması,
2. Sınırlı soğuk şekil değiştirme kabiliyeti ve tokluk,
3. Yüksek sıcaklıklarda düşük sürünme direncinin düşük olması,
4. Katılaşma sırasında çekme oranının yüksek olması,
5. Kimyasal reaktivite özelliğinin yüksek olması,
6. Düşük korozyon direnci.

Magnezyum alaşımlarının düşük ergime sıcaklığına (650 °C) sahip olması, kullanım alanını sınırlayan diğer bir dezavantajdır. Magnezyumun alüminyum, çinko, mangan, nadir toprak elementleri, toryum ve zirkonyum gibi elementlerle alaşımlandırılması, yüksek sıcaklıklarda sürünme direnci, mukavemet, ağırlığın azalması ve atalet

kuvvetlerin düşürülmesini sağlarlar [90,91]. Bu alaşımlandırılma özelliğinden dolayı çelik, bakır esaslı alaşımlar, dökme demirler ve hatta alüminyum alaşımlarının yerini almıştır [88]. Magnezyum ve magnezyum alaşımları yapısal uygulamalar olarak otomotiv, endüstriyel, malzeme taşınması, ticari ve uzay ekipmanlarını kapsamaktadır. Yapısal olmayan uygulamalar içinde organik kimyada kullanılmaktadır [92]. Son yıllarda magnezyum, ikili, üçlü ve çoklu magnezyum esaslı alaşım olarak çalışılmış ve farklı alaşım sistemleri elde edilmiştir. Bu alaşım sistemleri diğer alaşım sistemleri ile kıyaslandığında, mukavemet / ağırlık oranının yüksek olması ve fiyatlarının düşük olması gibi nedenlerden dolayı ele alınmıştır. Magnezyum düşük yoğunluğu, yüksek özgül ısı kapasitesi, yüksek ses absorpsiyonu ve ısıl iletkenliğinden dolayı birçok sektörde kullanılabilir bir metaldir [93].

7.2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Magnezyum alaşımları 160-300 N/mm² çekme dayanımı, 80-190 N/mm² % 0,2 akma dayanımı ve % 2-15 kopma uzaması gibi mekanik özelliklere sahip bir metaldir. Fakat sıcaklığın artmasıyla magnezyum alaşımlarının mukavemeti azalmaktadır. Oda sıcaklığında düşük süneklik göstermektedir. Akma ve çekme mukavemeti arasındaki fark yüksek sıcaklıklarda azalmaktadır. Hegzagonal kristal kafes yapısına ve üç adet kayma düzlem sayısına sahip magnezyum, yüzey merkezli kübik yapısı ve 12 adet kayma düzlemine sahip olan alüminyuma göre soğuk şekillendirilmesi daha zordur. Bir kristalde kayma sistemi sayısı arttıkça malzemenin şekil değiştirmesi kolaylaşır, yani sünekliği artar. Magnezyumda 210 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda etkin olmayan kayma düzlemleri devreye girmektedir. Bu yüzden sıcaklık arttıkça magnezyumun sünekliği de artmaktadır [94].

7.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Magnezyum alaşımları genel olarak döküm alaşımlar ve dövme alaşımlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Magnezyum döküm alaşımları, kum ve metal kalıba döküm alaşımları olarak, dövme alaşımlar ise, şerit, plaka, ekstrüzyonlar ve dövme alaşımlar olarak alt bölümlere ayrılabilir. Bazı magnezyum alaşım ürünlerine ısıl işlem uygulanamazken bazıları da ısıl işlem uygulanarak kullanılabilir [95,96].

Magnezyum alaşımları genellikle iki büyük harf ve bu harfleri takip eden iki veya üç rakam ile tanımlanmaktadır. Harfler, magnezyum alaşımındaki iki temel alaşım elementi hakkında bilgi vermektedir. İlk harf en yüksek konsantrasyona sahip elementi, ikinci harf ise, ikinci yüksek konsantrasyona sahip elementi temsil etmektedir. Harfleri takip eden ilk rakam, ilk harfle gösterilen elementin ağırlıkça yüzdesini (sadece iki rakam varsa) ve ikinci rakam ise ikinci harfle gösterilen elementin ağırlıkça yüzdesini temsil etmektedir. Bu rakamlardan sonra A, B gibi harfler takip ederse, bu durum genellikle impurite seviyelerinde alaşım için modifikasyonu göstermektedir. Bu harfler ve rakamlar bir standart içerisinde gruplandırılmıştır (Çizelge 7.2). Örneğin, AZ91D gösterimi. Bu tanım magnezyum alaşımının ağırlıkça % 9 alüminyum, % 1 çinko içerdiğini ve AZ91 alaşımının D modifikasyonu olduğunu göstermektedir [103].

Çizelge 7.2. Magnezyum alaşımlarının standartlarla gösterimi [103].

AE Serisi	Magnezyum, alüminyum ve nadir toprak alaşımları-Örn:AE42
AJ Serisi	Magnezyum, alüminyum ve stronsiyum alaşımları- Örn:AJ52 HP (Yüksek Basınç)
AM Serisi	Magnezyum, alüminyum ve mangan alaşımları-Örn:AM60B
AS Serisi	Magnezyum, alüminyum ve silisyum alaşımları-Örn:AS31
AZ Serisi	Magnezyum, alüminyum ve çinko alaşımları-Örn:AZ91D
EQ Serisi	Magnezyum, nadir toprakgümüş ve bakır alaşımları-Örn:EQ21
EZ Serisi	Magnezyum, nadir toprak ve çinko alaşımları-Örn:EZ33A
HM Serisi	Magnezyum, toryum ve mangan alaşımları-Örn:HM21A
HZ Serisi	Magnezyum, toryum ve zirkonyum alaşımları-Örn:HZ32A
QE Serisi	Magnezyum, gümüş ve nadir toprak alaşımları-Örn:QE22A
QH Serisi	Magnezyum, gümüş ve toryum alaşımları-Örn:QH21
WE Serisi	Magnezyum, itriyum ve nadir toprak alaşımları-Örn:WE43
ZC Serisi	Magnezyum, çinko ve bakır alaşımları-Örn:ZC71
ZK Serisi	Magnezyum, çinko ve zirkonyum alaşımları-Örn:ZK11
ZT Serisi	Magnezyum, çinko ve toryum alaşımları-Örn:ZT32

7.3.1. AZ91 Magnezyum Alaşımının Özellikleri

Magnezyum alaşımları içerisinde en yaygın kullanılan alaşım AZ91'dir. AZ91 alaşımı iyi mekanik ve fiziksel özelliklerle birlikte mükemmel dökülebilirlik ve tuzlu suda yüksek korozyon direncine sahip bir alaşımdır. AZ91 alaşımının mekanik özellikleri Çizelge 7.3'de verilmiştir. Mg-Al-Zn alaşımlarının herhangi birinde alüminyum oranının artması ile akma mukavemeti artmaktadır. Fakat süneklilik azalmaktadır [108]. Mukavemet değerinin yüksek olmasının istenmediği durumlarda çoğunlukla Mg-Al-Zn serisi alaşımlar kullanılır. Bu alaşımların mukavemeti alüminyum oranı arttıkça artış göstermektedir.

Çizelge 7.3. AZ91 alaşımının mekanik özellikleri.

Özellik	AZ91
Çekme Dayanımı	200 MPa
Akma Dayanımı	140 MPa
Basma Akma Dayanımı	160 MPa
Kırılma Uzaması	% 5
Elastiklik Modülü (Çekme)	45 MPa
Elastiklik Modülü (Kayma)	17 MPa
Brinell Sertlik	70
Darbe Dayanımı, (Çentiksiz)	6 J

Magnezyum, bilhassa Al, Zn ve Mn olmak üzere, toprak alkali metaller ve çok az miktarlardaki Si, Sn, Pb, Y, Ba, Sb, Ca, Sr ve Bi gibi elementlerle alaşım işlemi yapılarak, mekanik özellikleri iyileştirilmekte ve gösterdiği iyileştirme performansı ile kullanım alanını her geçen gün genişletmektedir. AZ91 (Mg-Al-Zn) alaşımları (Çizelge 7.4), genellikle otomobil parçalarının üretiminde kullanılır ve bu alaşımının dökülebilirlik özelliği oldukça iyidir [107]. Yüksek eğme direnci gerektiren kapı, kaput ve bagaj kapağı gibi dış yüzeyi geniş otomobil saclarında magnezyum alaşımlarının kullanımı çeliğe nazaran % 50, alüminyuma nazaran % 20 ağırlık avantajı sağlamaktadır. Magnezyum alaşımlarından Mg-Al-Zn alaşımları dayanım,

hafiflik ve kısmen iyi korozyon direnci gibi özelliklerinden ötürü endüstriyel öneme sahip bir malzemedir.

Çizelge 7.4. AZ91 alaşımının kimyasal bileşimi.

Element	Mg	Al	Zn	Mn	Fe	Ni
(%)	90,30	8,74	0,67	0,18	0,01	0,0062

Mg-Al alaşımlarına Zn ilavesi, katı eriyik mukavemetlenmesi ve çökeltme sertleşmesi ile dayanımı artırır. Magnezyum, Al-Zn ile yaklaşık olarak %10'dan fazla alaşımlandırılmaz, çünkü alaşımın sünekliği gevrek metaller arası bileşik oluşumundan dolayı azalır [105]. Magnezyum alaşımlarında Zn ilavesi, çökelti sertleşmesi sebebiyle oda sıcaklığında mukavemeti ve bununla birlikte ergiyiğin akışkanlığını arttırmaktadır, tane sınırlarına çökerek sıcak yırtılmaya sebebiyet verdiği için % 2 ile sınırlıdır. Malzeme, segregasyonun olduğu yerlerde ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda deformasyona uğradığı zaman, tane sınırları boyunca ayırır [106]. Mg alaşımlarında Al ilavesi, magnezyumun katı çökelti dayanımını, ergiyiğin dökülebilirliğini iyileştirir. Alaşımın dayanımını, sertliğini ve katılma süresini arttırmakta, öte yandan sünekliğini azaltmaktadır. Düşük sıcaklıklarda (≤ 120 °C), katı eriyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi ile oluşan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik bileşiği alaşımın dayanımını azaltmaktadır [104,106]. Magnezyum da diğer metaller gibi ender saf halde kullanılan elementtir. Malzemenin mekanik özelliklerinde istenilen geliştirmeler yapmak için magnezyuma alaşım elementleri eklenerek toz metalürjisi yöntemiyle yeni ürünler elde edilmektedir [95]. Hegzagonal sıkı paket (hsp) kafes yapısına sahip olan magnezyum, sahip olduğu tane çapı sayesinde çok fazla sayıda element ile katı çözünürlük oluşturabilir. Magnezyum, temel olarak Al, Zn, Mn, Be, Si, Ca, Cu, Fe, Ag, Sn ve Zr gibi ana elementler ile K, Na, Li alkali ve Y, Ce, Ln, Nd gibi toprak elementleri ilave edilerek alaşımlandırılabilir. Magnezyum, bu elementlerden bir veya daha fazlası ile alaşımlandırıldığında oluşan alaşımlar çoğunlukla yüksek mukavemet / ağırlık oranını arttırmalar [107].

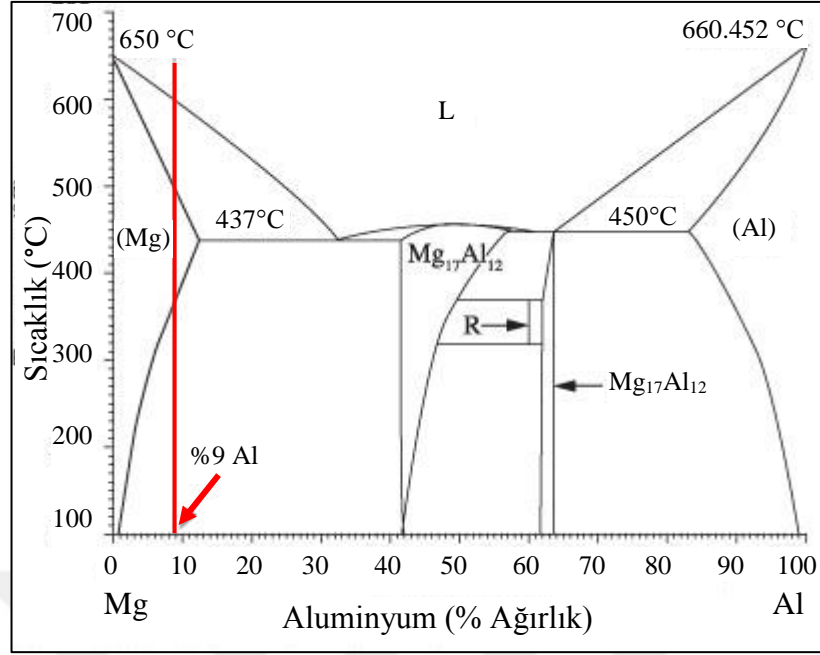
7.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

Magnezyum alaşımlarına mukavemet kazandırmak için farklı alaşım elementleri ile katı eriyik ve çökelme sertleşmesi uygulanmaktadır. Çoğunlukla alüminyum elementi çekme mukavemetini ve sertliğini artırmakta, dökülebilirliği geliştirmekte fakat gözeneklilik eğilimini arttırmaktadır. Kalsiyum, tane yapısını inceltir, sürünme direncini artırır bunun yanısıra yapışma ve sıcak yırtılma gibi dökülebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Mangan, çekme mukavemetini artırır, tane incelmelerini sağlar, kaynak kabiliyetini artırır [95,96]. Nadir toprak elementleri, sürünme direnci, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık mukavemeti gibi özellikleri geliştirir. Ancak bu olumlu özelliklerle birlikte maliyeti artırır. Silisyum, dökülebilirliği olumsuz yönde etkiler ancak sürünme direncini artırır. Çinko, çekme mukavemetini ve dökülebilirliği iyileştirir fakat mikro gözeneklilik ve sıcak yırtılma eğilimi artırır. Son olarak zirkonyum, çekme mukavemetini artırmakta ve tane inceltme işlemi için çok etkilidir fakat alüminyum ya da silisyum içeren alaşımlarda tercih edilmemektedir [93].

7.4.1. Alüminyumun Etkisi

Alüminyum, alaşım elementleri içinde en etkili elementlerden biridir. Magnezyuma alüminyum ilavesi alaşımın sertliği ve çekme mukavemetini artırmakta ve bunun yanında katılaşıma aralığını genişletmektedir. Alaşıma ağırlıkça % 6'nın üzerinde alüminyum ilave edildiği zaman ısıl işlem uygulanabilir hale gelir. Ancak endüstriyel alaşımlarda alüminyum ağırlıkça % 10'un altında tutulur. En uygun dayanım ve süneklik özellikleri ağırlıkça % 6 alüminyum içeren magnezyum alaşımlarında görülmektedir [93,109].

Şekil 7.1'deki Mg – Al denge faz diyagramında görüldüğü gibi, ötektik sıcaklıkta (437 °C) alüminyumun maksimum çözünürlüğü yaklaşık olarak ağırlıkça % 33'tür.



Şekil 7.1. Mg-Al denge faz diyagramı [110].

Ağırlıkça % 2'den fazla alüminyum içeren alaşımlarda soğutma hızlarına bağlı olarak genellikle bir miktar ötektik faz oluşmaktadır. Bu nedenle yaygın olarak AM50, AM60 ve AZ91 gibi magnezyum alaşımlarında önemli miktarda ötektik faz oluşumu görülmektedir. Ötektik altı magnezyum-alüminyum alaşımları ağırlıkça % bileşim ve soğuma hızına bağlı olarak geniş bir aralığa sahiptir [111].

7.4.2. Demirin Etkisi

Magnezyum alaşımlarında az miktarlarda bulunması bile korozyon direncinin önemli ölçüde azaltan elementlerden biridir. Ticari öneme sahip magnezyum alaşımlarında demir içeriği genel olarak ağırlıkça % 0.01 ile % 0.03 arasında olmalıdır. En iyi korozyon direnci için alaşım içerisinde demir içeriğinin üst limiti %0.005 olmalıdır [108].

7.4.3. Manganın Etkisi

Mangan, magnezyum alaşımlarının çekme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmakla birlikte akma mukavemetini de kısmen arttırmaktadır. Alaşım içerisinde

manganın en önemli özelliği Al ve Fe ile AlMnFe gibi ikinci faz parçacıklar oluşturarak demir içeriğini azaltmakta ve bu azalma sayesinde mikroyapı saflaştığı için korozyon direncini artırmaktadır. Ticari öneme sahip magnezyum alaşımları nadir olarak ağırlıkça % 1.5'in üzerinde mangan içerirler. Mg-Al alaşımlarında manganın çözünürlüğü ağırlıkça %0,3'e kadar düşebilmektedir [109].

7.4.4. Çinkonun Etkisi

Magnezyum alaşımlarında çinko, alüminyum ile birlikte alaşım elementi olarak kullanıldığı zaman etkisi yüksek olmaktadır. Çinko, alüminyum ile beraber kullanıldığı zaman düşük sıcaklıklarda (oda sıcaklığı) mukavemetinin artırılmasını sağlar. Buna ek olarak, çinkonun alüminyum ile birlikte kullanılması süneklikte azalma olmaksızın mukavemeti artırmak için de kullanılır. Ağırlıkça % 7 ile % 10 arasında alüminyum içeren magnezyum alaşımlarına, ağırlıkça % 1'den fazla oranlarda çinko ilave edilmesi yüksek sıcaklıklarda çekme mukavemetini artırmaktadır. Çinko bununla birlikte, nikel ve demir empüritelerinin zararlı korozyon etkisini engellemek amacı için de kullanılmaktadır [110].

7.4.5. Zirkonyumun Etkisi

Magnezyumun kafes parametresi ($a=0.320$ nm, $c=0.520$ nm) zirkonyumun kafes parametresine ($a=0.323$ nm, $c=0.514$ nm) çok yakın olmasından dolayı zirkonyumun magnezyum alaşımlarında önemli derecede tane inceltme etkisi vardır. Katılaşmanın başlangıcı sırasında zengin zirkonyumlu katı parçacıklar magnezyum tanelerinin katılaşması sırasında heterojen çekirdeklenmeyi sağlamaktadır. Alüminyum ya da mangan içeren alaşımlarda zirkonyum genellikle kullanılmaz, çünkü zirkonyum katı eriyikten uzaklaşarak bu elementler ile kararlı bileşik oluşturmaktadır [111].

7.4.6. Bakırın Etkisi

Magnezyum alaşımlarında, bakırın ağırlıkça % 0.05'den fazla ilave edilmesi durumunda korozyon direnci negatif yönde etkilenmektedir. Bakır, magnezyum içerisinde sınırlı oranda çözünebilirliğe sahiptir. Magnezyuma ilave edilen bakır oda

sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetini artırdığı gözlenmiştir. Ancak süneklik özelliğine taviz verilmiştir [108].

7.4.7. Nikelin Etkisi

Nikel, magnezyum alaşımlarında korozyon direncini kayda değer oranda azalmasını sağlayan empüritelere biridir. Ancak, magnezyum alaşımlarında korozyona karşı en iyi direnç sağlamak için ağırlıkça % 0.005'e kadar nikel elementinin ilavesine izin verilmiştir [106].

7.4.8. Nadir Toprak Elementlerinin Etkisi

Magnezyum alaşımlarına, nadir toprak elementleri sürünme ve korozyon direnci ile yüksek sıcaklıklarda mukavemetini arttırmak amacıyla ilave edilmektedir. Fakat bu elementler olabildiğince pahalı olduğundan dolayı genellikle ileri teknoloji alaşımları için kullanılmaktadır. Bu elementlerin alaşım içerisindeki varlığı alaşımın katılaşmasını hızlandırarak daha az gözenekli yapı oluşmasını sağlar ve kaynak çatlamlarını engeller [110].

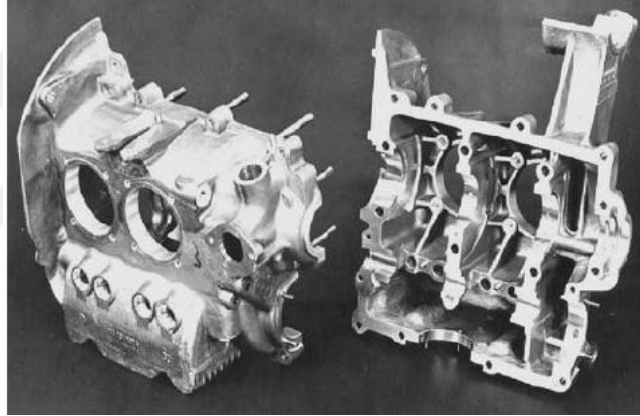
7.5. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI

7.5.1. Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı

Otomotiv sektörünün dünya genelinde amacı hafif, çevreye zarar vermeyen, güvenli ve ucuz araç üretmektir. Araç üreticileri, kullanıcı isteklerini ve çevre sağlığı için verilmiş kararları dikkate alarak araç ağırlıklarını azaltmayı ve bunun sayesinde araçlardan çıkan zararlı egzoz gazlarını azaltmayı hedeflemişlerdir. Bilindiği gibi araç ağırlığı arttıkça yakıt tüketimi de artmaktadır. Bunun yanı sıra, yakıt tüketimi arttıkça araçların çevreye verdiği CO₂ emisyonu artmaktadır. Otomotiv firmaları tarafından araç ağırlığını azaltmak için yüksek dayanımlı çelikler, alüminyum alaşımları ve kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Fakat bu tür malzemeler ile araç ağırlığında hedeflenen azalma olmamaktadır. Bu yüzden, özellikle son yıllarda otomotiv endüstrisinde yoğunluğu düşük olduğundan dolayı magnezyum kullanımında önemli

miktarda artış olmuştur. Diğer taraftan, düşük yorulma direnci, sürtünme direnci, alev alma tehlikesi, düşük korozyon direnci ve aşınma direncinin zayıf olması, magnezyumun yaygın olarak kullanımını etkilemektedir [92].

Otomotiv endüstrisinde magnezyum alaşımları hakkında birçok araştırmalar yapılmıştır. Örneğin, Volkswagen firması Beetle modeli (Şekil 7.2) aracında ilk olarak 22 kg magnezyum ve alaşımlarını kullanmıştır [97]. Motor yapımında Porsche firması 1928 yılında magnezyum ve alaşımlarını kullanmıştır [98]. 161 kg ağırlığında altı silindirli en hafif motoru, BMW firması R6 modelinde Mg-Al alaşımı kullanmıştır. Mg-Al alaşımı Al malzemesi kullanılmış motora göre % 24 hafiflik ve düşük yakıt tüketimi sağlamıştır. Audi firması V8 Quattro modelinin motorunda magnezyum kullanarak, diğer 8 silindirli motorlardan 5 kg hafiflik sağlanmıştır [99].

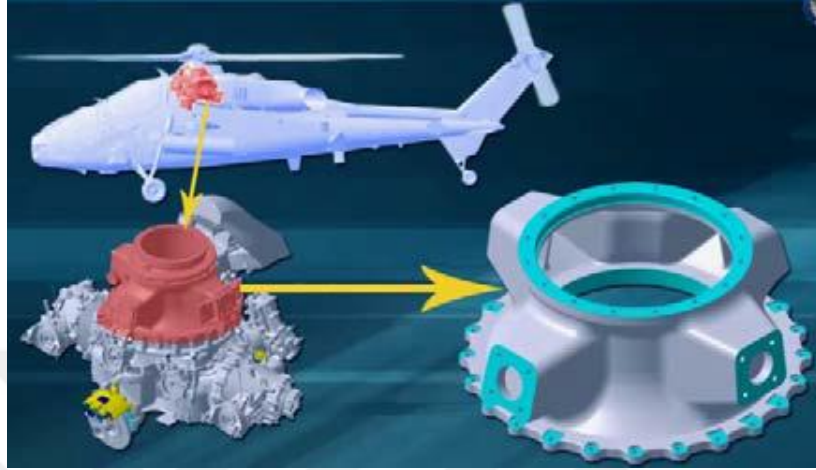


Şekil 7.2. Volkswagen beetle motoru alaşımı [112].

7.5.2. Havacılık Endüstrisinde Kullanımı

Magnezyum havacılık endüstrisinde, hava taşıtı yapımında 1900'li yıllardan beri kullanılmakta ve 1950'li yıllarda hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. 1950 yılından sonra askeri uçak ve hava taşıtı yapımında önemli ölçüde magnezyum kullanılmıştır. 1950 yılında Westland Aircraft tarafından yapılan Sikorsky S-56 modelinin yapımında 115 kg magnezyum kullanılmıştır. Avrupa uçak sanayisi tarafından, Convair B-36 Peacemaker modelinin yapımında, 8600 kg magnezyum kullanılmıştır. Uçak endüstrisinde 1990'lı yıllardan itibaren magnezyum kullanımı azalmıştır. Fakat helikopter endüstrisinde şanzıman ve vites kutusu gibi parçaların yapımında

kullanılması devam etmektedir [100]. Ayrıca, ATAK helikopterinin dişli kutusu üst gövdesi (Şekil 7.3) yerli tasarım ve magnezyum döküm sürecine ait tasarım parametrelerinin belirlenmesi ile Teknik Veri Paketi (TVP) hazırlanmıştır [113].



Şekil 7.3. ATAK helikopterinin dişli kutusu üst gövdesi [113].

Havacılık endüstrisinde magnezyum kullanımını özetlemek gerekirse, Mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek şok ve titreşim dirençleri magnezyumun avantajlarıdır. Fakat yüksek sıcaklıklarda alev alması ve korozyon direncinin düşük olması magnezyumun dezavantajıdır. Magnezyumun dezavantajları, kullanım alanını sınırlandırmaktadır, ancak diğer metallerle alaşımlandırma ve kompozit malzeme yapıldığında olumsuz etkileri önemli ölçüde arttırılabilmektedir [101].



Şekil 7.4. Kola giyilebilen led ekranlar [114].

Ayrıca; asker tarafından giyilen bilgi ekranı ve bilgisayar olarak kullanılan bu cihazlar (Şekil 7.4) az yer kaplamalı, hafif ve sağlam olmalı, az güç harcamalıdır. Bu cihazların çerçeveleri AZ91 magnezyum alaşımından üretilebilmektedir [114,115].

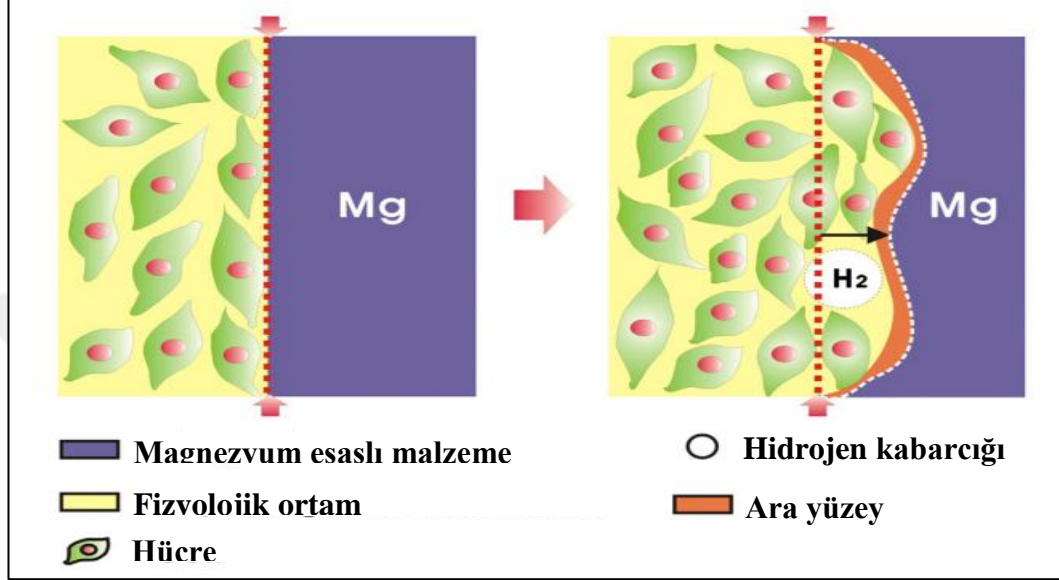
7.5.3. Biyomalzeme Endüstrisinde Kullanımı

İnsan vücudundaki organ ya da dokuların işlevlerini yerine getirmek veya desteklemek için kullanılan malzemeler, biyomalzeme olarak adlandırılır. Metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere 4 gruba ayrılırlar. İnsan vücudu biyomalzeme olarak kullanılan malzemeler için oldukça korozif bir ortamdır. Paslanmaz çelikler, titanyum ve alaşımları ile krom ve kobalt alaşımları günümüzde kullanılan metalik biyomalzemelerdir. Bu malzemeler korozyon ya da aşınmadan kaynaklanan zehirli iyon ya da parçacıklar, doku içerisine sızarak hücrelere zarar verebilir ve bu durum doku kaybına yol açabilir. Bunun yanısıra, kullanılan metalik biyomalzemelerin vücut yapısına uyumluluğu incelendiğinde, elastik modüllerinin kemik dokusu ile tam olarak uyumlu olmadığı görülmektedir. Bu uyumsuzluk, yeni kemik dokusunun oluşum hızını ve implantın kararlılığını etkilemektedir. Dahası, vücutta kullanılan plaka, vida ve çivi gibi metalik malzemeler kalıcı olduğundan ve doku iyileştikten sonra başka bir ameliyatla metallerin vücuttan çıkarılması sağlık giderlerini arttırmaktadır [101]. Magnezyum düşük yoğunluğuna ek olarak diğer seramik biyomalzemelere göre daha yüksek kırılma tokluğuna sahip olduğu, Çizelge 7.5'te görülmektedir.

Çizelge 7.5. Farklı biyomalzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri ve doğal kemik ile karşılaştırılması [101].

Özellikler	Kemik	Magnezyum	Titanyum alaşımları	Cr-Co alaşımları	Paslanmaz çelikler	Sentetik Hidroksiapatit
Yoğunluk gr/cm^3	1.8-2.1	1.74-2.0	4.4-4.5	8.3-9.2	7.9-8.1	3.1
Elastisite modülü, GPa	3-20	41-45	110-117	230	189-205	73-117
Akma dayanımı, MPa	130-180	65-100	758-1117	45-1000	170-310	600
Kırılma tokluğu, MPam ^{1/2}	3-6	15-40	55-115	-	50-200	0.7

Akma mukavemeti ve elastisite modülü, diğer metalik malzemelere nazaran kemiğe daha yakındır. Bunun yanısıra magnezyum insan vücudunda en çok bulunan dördüncü katyondur. Yetişkin bir bireyin vücudunda yaklaşık olarak 30 gr magnezyum bulunmaktadır. Bunun çoğunluğu kaslarda ve kemiklerde bulunur [101].



Şekil 7.5. Yüzey bozulması sırasında Mg esaslı malzemeler ile biyo-çevre arasındaki dinamik arayüz [116].

Magnezyum elementi vücut içinde zehirsizdir ve kolay bir şekilde çözünebilir. Çözünen magnezyum vücuttan kendiliğinden atılır. Ayrıca magnezyumun biyo-çevre ile uyumluluğunu gösteren arayüz, Şekil 7.5'de görülmektedir. Buna ek olarak, magnezyum kemik gelişimini hızlandırır. Sonuç olarak magnezyum ve alaşımları vücuda yerleştirildikten sonra 20-90 gün içinde yeni dokunun oluşmasına yardımcı olur ve doku oluşumunu tamamladıktan sonra başka bir ameliyata gerek kalmadan magnezyum vücutta çözünerek atılır. Magnezyumun biyomalzeme olarak kullanılmasındaki en büyük dezavantajı düşük korozyon direncinin olmasıdır. Fakat korozyon direncini arttırmak için koruyucu yüzey kaplaması yapılır ve vücut içinde uygun biyomalzeme olarak kullanılabilir [102].

BÖLÜM 8

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, öncelikle Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde gaz atomizasyon ünitesi tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Kurulan bu gaz atomizasyonu ünitesinde, metal tozu üretim yöntemlerinden gaz atomizasyon yöntemi ile magnezyum alaşımı olan AZ91 tozunun üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim parametreleri olarak AZ91 alaşımına benzerlik gösteren malzemelerde kullanılan parametreler ve literatür göz önüne alınmıştır. Deneysel çalışmalar üç farklı sıcaklık (770, 795 ve 820 °C), dört farklı nozul çapı (2, 3, 4 ve 5 mm) ve dört farklı gaz basıncı (5, 15, 25 ve 35 bar) uygulanarak yapılmıştır. Sıvı metal ergiyiği atomize etmek ve koruyucu gaz atmosferi oluşturmak için argon gazı kullanılmıştır. Üretilen AZ91 tozlarının şeklini belirleyebilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM), üretilen tozların iç-yapılarında oluşan fazları ve bu fazların % oranlarını belirleyebilmek için XRD, XRF ve SEM-EDX analizi, toz boyut analizi için ise lazer ölçüm cihazı kullanılmıştır. Üretilen tozların mekanik özelliklerini belirleyebilmek için sertlik testleri ve sıcaklık değişimi içinde TGA-DTA analizleri yapılmıştır. Ayrıca, üretilen tozların kullanılabilirliğini belirleyebilmek amacıyla 13 mm çapında 20 mm yükseklikte silindirik bir parça imal edilmiştir. Bu amaçla tek yönlü preste farklı presleme basınçlarında (300, 400, 500 ve 600 MPa) hazırlanan numuneler, farklı sıcaklıklarda (500, 550 ve 600 °C) sinterleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Hazırlanan numunelerin ham ve sinterleme sonrası yoğunlukları belirlenerek numune içerisindeki gözenek miktarı ve yüzde yoğunluğa yaklaşımı tespit edilmiştir.

8.1. GAZ ATOMİZASYON ÜNİTESİ

Atomizasyon çalışmaları, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde tasarımını ve imalatını yaptığımız Gaz Atomizasyon

Ünitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.1'de görülen Gaz Atomizasyon Ünitesi yedi temel bölümden oluşmaktadır. Bunlar;

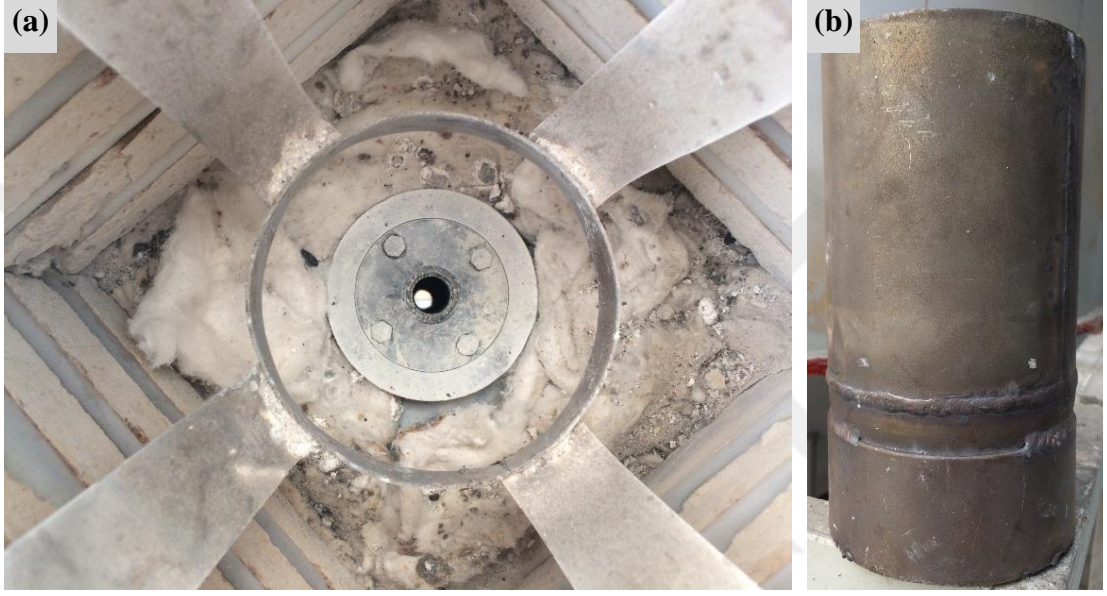
1. Ergitme fırını,
2. Atomizasyon kulesi,
3. Nozul ve nozul tutucu,
4. Toz toplama ünitesi,
5. Gaz basınç rampası,
6. Siklonlar,
7. Kontrol paneli,

olarak ifade edilebilir.



Şekil 8.1. Gaz atomizasyon ünitesi.

Ergitme fırını yaklaşık olarak 1200 °C’ de sürekli çalışabilecek şekilde tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Ergitme sırasında, atomizasyon gerçekleştiği anda ve sonrasında oksit oluşumunu engelleyebilmek için koruyucu gaz ortamı oluşturmak amacıyla ergitme fırınının yan kısımlarına gaz giriş ve çıkış birimleri konulmuştur. Pota (Şekil 8.2b) içerisinde ergitilmiş metalin akışını kontrol edebilmek için sonsuz vidalama sistemi ile grafit tıpa kullanılmıştır. Ergitme fırını Şekil 8.2a’da görülmektedir.



Şekil 8.2. a) Ergitme fırınının iç kısmının görüntüsü b) Ergitme potası.

Magnezyum alaşımı AZ91 malzemesinin ergime sıcaklığı 620 °C’dir. Malzemelerin dökülebilirlik sıcaklık aralığı, ergime sıcaklığının 150 ila 200 °C arasındadır. Bu sebepten dolayı, ergitme işlemi için 770 °C alt sınır, 820 °C üst sınır ve 795 °C ortalama sıcaklık olarak alınmıştır. Sıvı metal gerekli sıcaklığa ulaştıktan sonra bir saat bekletilmiş daha sonra sonsuz vidalama sistemli grafit tıpa manuel olarak yukarıya doğru çevrilmiş ve metal akışı sağlanmıştır. Metalin ergitme işlemi sırasında, ergitilen metali oksitlenme ve yanma reaksiyonun başlamasına karşı korumak amacıyla fırın içerisine düşük basınçta (yaklaşık olarak 2 bar) argon gazı verilmiştir.

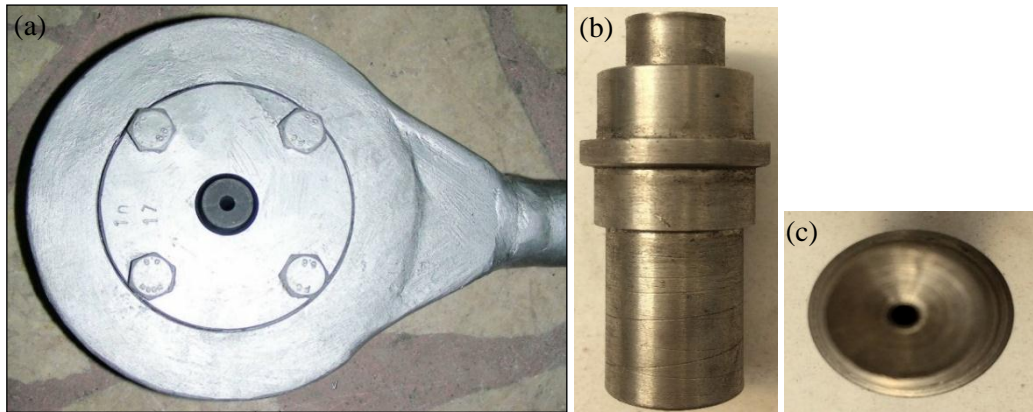
Gaz Atomizasyon Ünitesi’nin atomizasyon kulesi Şekil 8.3’de görülmektedir. Atomizasyon kulesi, tozların atomizasyonu sırasında kulenin duvarına çarpmayacak

şekilde paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Üretilen tozlar atomizasyon kulesinin en alt bölümünde bulunan toz toplama ünitesinde toplanmaktadır.



Şekil 8.3. Atomizasyon kulesi.

Sıvı metali atomize edebilmek için Şekil 8.4a’da verilen yakından eşlemeli ve dairesel delikli süpersonik bir nozul tutucu kullanılmıştır. Nozul tutucu ve nozullar paslanmaz çelik malzemedan imal edilmiştir.



Şekil 8.4. a) Nozul tutucu ve Nozul b) Önden görünüşü c) Üstten görünüşü.

Nozul (Şekil 8.4. a ve b) ise, fırın içerisinde bulunan nozul tutucu üzerine yerleştirilmiştir. 2, 3, 4 ve 5 mm çaplarında dört farklı nozul kullanılmıştır. Yakından eşlemeli sistemlerde nozulun da ısıtılması son derece önemlidir. Nozulun yeterli ısıtılmaması halinde ergiyik metalin, nozul ucundaki sıcaklığı düşecek ve sıvı metal debisinin azalmasına yol açacaktır. Uslan ve Küçükarslan [20], gaz atomize kalay tozu üretim parametrelerinin deneysel olarak araştırılması konusunda yaptıkları çalışmada, yüksek basınçlarda oluşan geri basıncın etkisiyle ergimiş metalin, nozul ucunda donması ve nozulun tıkanmasına sebep olacağını belirtmişlerdir. Bu yüzden, bu çalışmada kullanılan nozul tutucu ve nozul ergitme fırının iç kısmına yerleştirilerek sıvı metalin nozul içerisinde katılaşmasının önüne geçilmiştir.

Üretilen tozlar, atomizasyon kulesinin en alt bölümünde bulunan toz toplama ünitesinde ve birbirine paralel bağlı iki adet siklonun alt kısımlarında toplanmaktadır (Şekil 8.5).



Şekil 8.5. Toz toplama ünitesi.

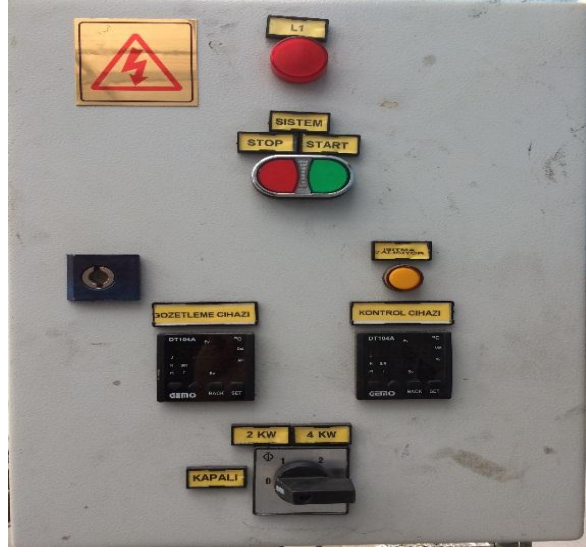
Toz toplama ünitesi ve siklonlar paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Toz toplama ünitesi 400 mm yükseklik ve 300 mm çapında silindirik olarak imal edilmiştir. Siklonlar ise; 800 mm yüksekliğinde 400 mm çapında silindirik olarak imal edilmiştir. Yapılan her deney sonrasında atomizasyon ünitesinin iç kısımları ve siklonlar temizlenmiştir. Üretilen tozlar, oksitlenmeye karşı korumak amacıyla desikatör içerisinde muhafaza edilmiştir.

Kullanılan gazın atomizasyon kulesinden tahliyesi ve ince tozların tutulması için birbirine paralel bağlı iki adet siklon kullanılmıştır. Siklonların görüntüsü Şekil 8.8’de verilmiştir. Ayrıca uçuşan ince tozları alabilmek için toz fanı kullanılmıştır. Toz fanı saatte 2500 rpm güce sahiptir. İlk olarak üretilen ve en kaba boyut olarak tabir ettiğimiz tozlar toz toplama ünitesine düşmektedir. İkinci olarak ise ortalama boyutta dediğimiz tozlar ortada bulunan siklona düşmektedir. Son olarak ise en ince tozlar toz fanı aracılığıyla en son siklona düşmektedir.



Şekil 8.8. Siklonlar.

Kontrol paneli üzerine yerleştirilen göstergeler sayesinde atomizasyon işlem değişkenlerinden, sıcaklık kontrolü yapılmaktadır. Kontrol panelinden alınan görüntü, Şekil 8.9’da verilmiştir.



Şekil 8.9. Kontrol paneli.

8.2. ATOMİZASYON ÇALIŞMALARI

Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde yapılan çalışmalar süresince yakından eşlemeli ve dairesel delikli süpersonik bir nozul sistemi kullanılarak, gaz atomize AZ91 tozu üretimi gerçekleştirilmiştir. Atomizasyon çalışmaları boyunca sıvı AZ91 ergime sıcaklığının (620 °C) üzerine aşırı ısıtılmıştır. Atomizasyon çalışmaları boyunca yapılan işlemler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. İlk olarak, deneyde kullanılacak nozul tutucu fırının tabanına monte edilmiştir.
2. Deneyde kullanılacak çaptaki nozul, pota ile nozul tutucu arasında akışı sağlamak üzere nozul tutucuya yerleştirilmiştir.
3. Paslanmaz çelik pota fırın içerisinde nozulun üzerine yerleştirilmiştir.
4. Fırının üst kapağı kapatılmıştır. Kapak kapatılırken ergiyik metalin akışını kontrol eden, paslanmaz çelikten imal edilmiş sonsuz vidalama sistemli grafit tpa fırın içindeki potanın merkezine sızdırmazlık sağlayacak şekilde monte edilmiştir.
5. Metalin ergitme işlemi sırasında, ergitilen metali oksitlenme ve yanma reaksiyonun başlamasına karşı korumak amacıyla fırın içerisine düşük basınçta (yaklaşık olarak 2 bar) argon gazı verilmiştir.

Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen AZ91 tozlarının deneyde kullanılan atomizasyon parametreleri, Çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Atomizasyon parametreleri.

Numune No	Sıvı Metal Sıcaklığı (°C)	Nozul Çapı (mm)	Gaz Basıncı (bar)
1	770	2	5
2			15
3			25
4			35
5		3	5
6			15
7			25
8			35
9		4	5
10			15
11			25
12			35
13		5	5
14			15
15			25
16			35
17	795	2	5
18			15
19			25
20			35
21		3	5
22			15
23			25
24			35
25		4	5
26			15
27			25
28			35
29		5	5
30			15
31			25
32			35
33	820	2	5
34			15
35			25
36			35
37		3	5
38			15
39			25
40			35
41		4	5
42			15
43			25
44			35
45		5	5
46			15
47			25
48			35

8.3. ATOMİZE TOZLARIN ANALİZİ

Toz boyut analizleri, Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Mastersizer 3000 model cihaz (Şekil 8.11) ile yapılmıştır. Cihazın çalışma prensibi, numune üzerine kırmızı ve mavi lazer ışığı gönderilir. Numuneden yansıyan ve kırılan lazer ışığı detektörler ile incelenir. Saçılan ışığın açısı ve şiddeti numunenin parçacık boyut dağılımını belirler.



Şekil 8.11. Parçacık boyut ölçüm cihazı.

Ölçümler sırasında taşıyıcı ortam olarak saf su kullanılmıştır. Parçacık içerisinden geçen lazer ışığının saçılma açısı parçacık boyutuna bağlıdır. Parçacık boyutu küçüldükçe saçılma açısı logaritmik olarak artar. Büyük parçacıkların saçılma açıları düşük, saçılan lazer ışığının şiddeti yüksektir. Küçük parçacıklarda ise saçılma açısı yüksek, saçılan lazer ışığının şiddeti düşüktür.

Üretilen AZ91 alaşım tozlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Araştırma Laboratuvarlarında bulunan “Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem” marka cihazdan (Şekil 8.12) alınmıştır. SEM’de alınan görüntüler için tozlar, ‘carbon tape’ üzerine dökülmüş ve altın ile kaplanmıştır.



Şekil 8.12. Carl zeiss ultra plus gemini fesem SEM analiz cihazı.

Tozların XRD ölçümleri RIGAKU - Ultima IV modeli cihaz (Şekil 8.13) ile yapılmıştır. XRF ölçümleri ise RIGAKU ZSX Primus II modeli cihaz (Şekil 8.14) yardımıyla alınmıştır. Ölçümler, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Araştırma Laboratuvarlarında yapılmıştır. X-ışını difraksiyonu (XRD), kristalin atomik ve moleküler yapısını incelemek için kullanılan bir yöntemdir. X-ışınları Floresans (XRF) spektroskopisi elementel kompozisyonu belirleme imkânı sağlar.



Şekil 8.13. RIGAKU - Ultima IV XRD analiz cihazı.



Şekil 8.14. RIGAKU ZSX Primus II XRF analiz cihazı.

Tozların TGA ve DTA analizleri, Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan HITACHI marka STA7300 model cihaz (Şekil 8.15) ile yapılmıştır. Termogravimetrik analizde kontrol edilen bir atmosferdeki bir numunenin kütlesi, sıcaklığın veya zamanın fonksiyonu olarak sıcaklığa (zamanla doğrusal olarak) karşı kaydedilir. Kütlelerin veya kütle yüzdesinin, zamana, sıcaklığa ve atmosferdeki değişime karşı grafiği, termogram veya termal bozunma eğrisi olarak adlandırılır. Termogravimetrik yöntemler, sıcaklık değişiminin numune kütlelerinde değişim oluşturması nedeni ile büyük ölçüde bozunma ve yükseltgenme (oksidasyon) reaksiyonları ile buharlaşma, süblimleşme gibi işlemlerde kullanılır.



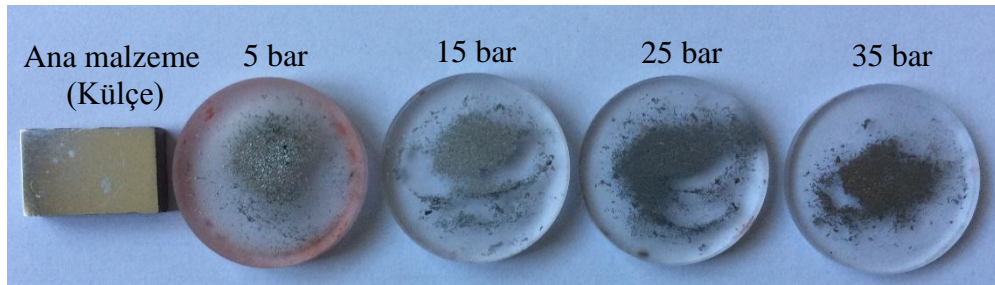
Şekil 8.15. HITACHI STA7300 TGA-DTA analiz cihazı.

820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve farklı gaz basınçlarında (5, 15, 25, 35) üretilen AZ91 tozların sertlik ölçümleri, HV_{0,025} kg yük altında SHIMADZU marka HMV-G21 model mikrosertlik ölçüm cihazı (Şekil 8.16) kullanılarak yapılmıştır. Bunun nedeni ise çok küçük toz boyutlarının makro sertlik cihazı kullanılarak sertlik ölçüm işleminin uygun bir şekilde yapılamayacağından, mikro sertlik ölçüm yöntemine başvurulmuştur. Üretilen tozlardan sertlik alınmasındaki amaç, tozun sertliğine atomizasyon gaz basıncının etkisini kıyaslamaktır.



Şekil 8.16. SHIMADZU HMV-G21 model mikrosertlik ölçüm cihazı.

Bu amaçla, sertlik ölçümü için farklı gaz basınçlarında (5, 15, 25 ve 35 bar) üretilen tozlar soğuk bakalite alınmıştır. Temin edilen AZ91 alaşımı ve bakalite alınan tozlar Şekil 8.17’de verilmiştir.



Şekil 8.17. Külçe AZ91 malzemesi ve bakalite alınan tozlar.

8.4. ÜRETİLEN TOZLARIN SİNERLENEBİLİRLİĞİ VE MALZEME İMALATI

8.4.1. Tozların Karıştırılması

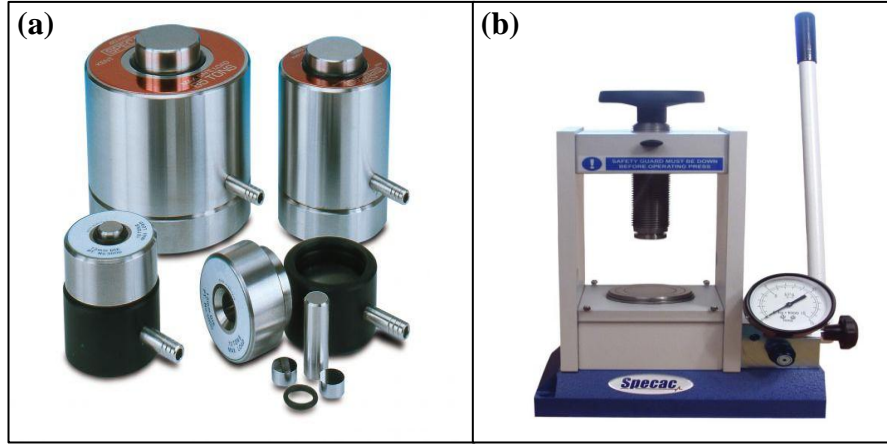
Gaz atomizasyon yöntemiyle üretilen tozlar Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan üç boyutlu turbula ile 30 dk. süre ile karıştırılmıştır. Gaz atomizasyon yöntemiyle üretilen tozlar elekten geçirilerek ortalama 100 µm altı tozlar seçilerek karıştırma ve presleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Üç boyutlu turbulada 30 dakika karıştırılan tozların genel görünümü Şekil 8.18'de verilmiştir.



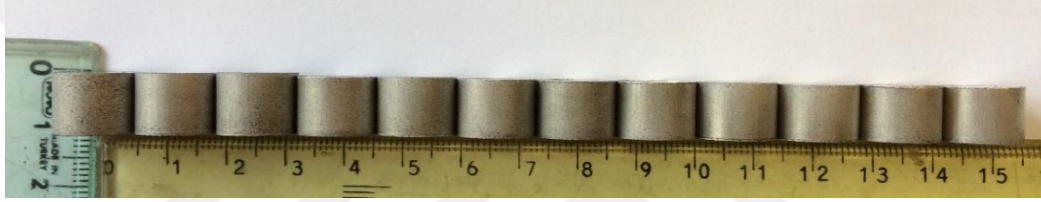
Şekil 8.18. Üç boyutlu turbula AZ91 tozlarının genel görünümü.

8.4.2. Tozların Preslenerek Kütle Haline Getirilmesi

Farklı parametrelerde üretilen ve daha sonra turbulada karıştırılan tozlar presleme işlemine tabi tutulmuştur. Presleme işlemi Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Specac marka GS15011 modeli hidrolik pellet presi (Şekil 8.19b) ile yapılmıştır. Presleme işleminde kalıp olarak, 13 mm çapında silindir şeklinde bir kalıp kullanılmıştır (Şekil 8.19a). Her numuneye yaklaşık olarak 2 gr toz koyularak presleme işlemi yapılmıştır. Presleme basıncı olarak 300, 400, 500 ve 600 MPa basınçlar uygulanmıştır. Farklı basınçlarda ham kütle haline getirilen mazlemelerin görüntüsü Şekil 8.20'de verilmiştir.



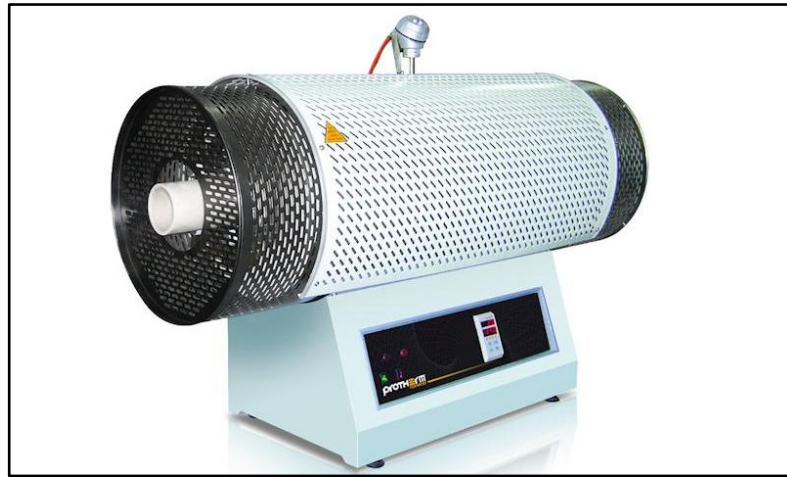
Şekil 8.19. a) kalıp b) Specac GS15011 pellet cihazı.



Şekil 8.20. Preslenen tozların genel görünümü.

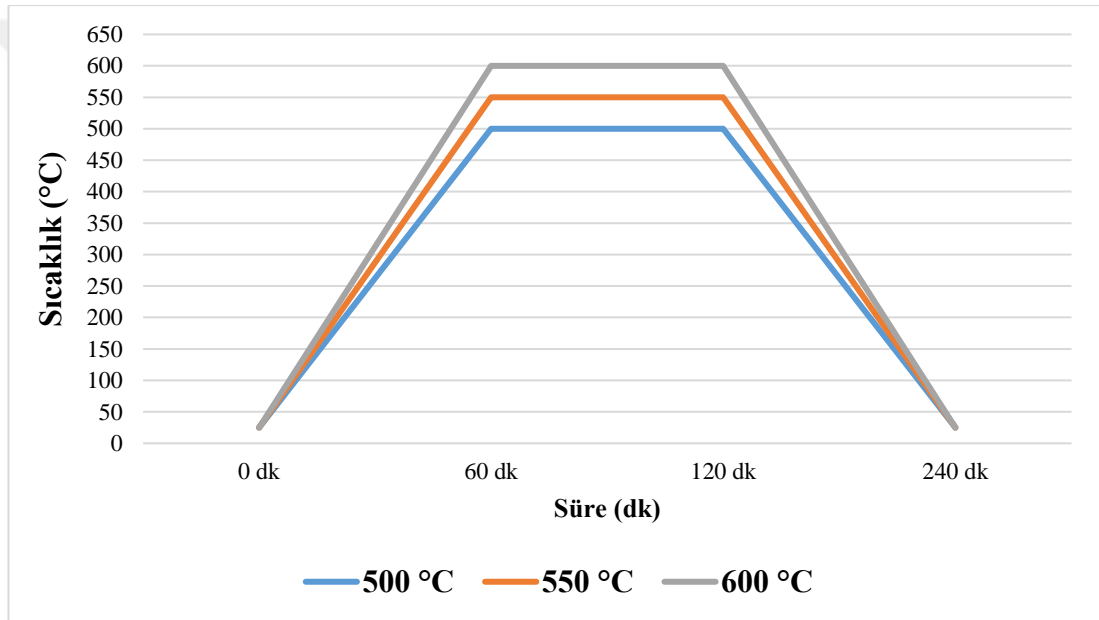
8.4.3. Kütle Haline Getirilen Tozların Sinterlenmesi

Tozların sinterleme işlemi Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Araştırma Laboratuvarlarında bulunan atmosfer kontrollü ısıl işlem fırını (PTF 16/80/610) (Şekil 8.21) ile yapılmıştır.



Şekil 8.21. Atmosfer kontrollü ısıl işlem fırını (PTF 16/80/610).

Dört farklı basınçta (300, 400, 500 ve 600 MPa) preslenenip kütle haline getirilen tozlar, üç farklı sıcaklıkta (500, 550 ve 600 °C) bir saat süre ile atmosfer kontrolü altında sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterleme işlemi toplam 180 dakikada tamamlanmıştır. Numunelerin içerisindeki yağ vb. atıkların dışarı atılması amacı ile 8 °C/dakika hızla sinterleme sıcaklığı olan 500, 550 ve 600 °C' ye 60 dakikada yükseltilmişlerdir. Sinterleme sıcaklıklarında 60 dakika sabit sıcaklıkta bekletilen numuneler, soğutma bölgesinde 120 dakikada oda sıcaklığına kadar atmosfer kontrolü altında soğutulmuşlardır. Numunelerin sinterleme işleminin bir örneği Şekil 8.22'de verilmiştir.



Şekil 8.22. Sinterleme işlemleri.

8.4.4. Yoğunluk Ölçümü

Farklı basınçlarda (300, 400, 500 ve 600 MPa) preslenen ve farklı sıcaklıklarda (500, 550 ve 600 °C) sinterlenen numunelerin optimum preslenebilirliği ve sinterlenebilirliğini tespit edebilmek amacıyla sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası yoğunlukları ölçülmüştür. Sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası yoğunluk değerleri, her numune için ayrı ayrı ölçülmüştür. Yoğunlukların belirlenmesi, üretilen numunenin ağırlığının (m) / numunenin hacimine (v) oranı ile hesaplanmıştır. Bu işlemlerden sonra numunelerin bağıl yoğunlukları (% yoğunluk) belirlenmiştir.

8.4.5. Sinterleme Sonrası Optik Ve SEM Görüntüleri

Sinterleme işlemi sonrasında deney numunelerinden optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntü alabilmek amacıyla standart metalografik işlemler uygulanmıştır. Bu uygulanan metalografik işlemler sırasıyla bakalite alma, zımparalama, parlatma ve dağlama olarak uygulanmıştır. Bakalite alma işlemi her numune için ayrı ayrı 100 °C sıcaklıkta uygulanmıştır. Bakalite alınan numuneler Şekil 8.23'te verilmiştir.



Şekil 8.23. Bakalite alınan numunelerin genel görüntüleri.

Bakalite alınan numunelerin yüzeylerine 220, 500, 1200, 2000 ve 4000 mesh zımparalar ile sırasıyla zımparalama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra numunelerin yüzeyleri sırasıyla 3 ve 1 µ elmas süspansiyonlar ile parlatılmıştır. Son olarak ise, aşağıdaki reaktife yaklaşık olarak 15 sn. daldırma yöntemiyle dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır.

Dağlama reaktifi: 5 ml asetik asit,
6 g pikrik asit,
10 ml su,
100 ml etanol.

Dağlama işlemi tabi tutulan numunelerin öncelikle optik mikroskop ile görüntüleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Araştırma Laboratuvarlarında bulunan Nikon ters metalürjik mikroskop ile alınmıştır (Şekil 8.24). Daha sonrada taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Araştırma Laboratuvarlarında bulunan “Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem” marka cihazdan alınmıştır (Şekil 8.12).



Şekil 8.24. Nikon ters metalürjik mikroskop.

8.4.6. Sinterleme Sonrası Mikrosertlik Ölçümü

Sinterleme sonrasında, deney numunelerine metalografik işlem basamakları sırasıyla uygulandıktan sonra, bu tez çalışmasında AZ91 Magnezyum alaşımı için uygulanan farklı presleme basınçları ve farklı sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak ortaya çıkan sertlik değerlerinin nasıl etkilendiği mekanik bir özellik olarak araştırılmıştır.

Numunelerin sertlik ölçümlerinde mikro sertlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Bu ölçümler, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Laboratuvarında bulunan ve Şekil 8.25'deki Q250-M Universal mikrosertlik ölçüm cihazında 0,5 kg yük altında 15 saniye yük uygulanarak mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 8.25. Q250-M Universal mikrosertlik ölçüm cihazı.

Numunelerde sertlik ölçümlerinin sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi için en az 5 noktadan ölçüm yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, numunelere presleme işleminin uygulandığı yüzeyinden yapılmak suretiyle, sertlik sonuçları açısından preslemeden dolayı ortaya çıkabilecek farklılıklar giderilmeye çalışılmıştır.



BÖLÜM 9

DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde; farklı sıcaklık, farklı nozul çapı ve farklı gaz basınçları uygulanarak üretilen AZ91 tozlarının parametrelere bağlı olarak toz boyutu ve şekli, yoğunluk sertlik, mikroyapı, preslenebilirlik ve sinterlenebilirlik özellikleri tartışılmıştır.

9.1. TOZ BOYUT ANALİZLERİ

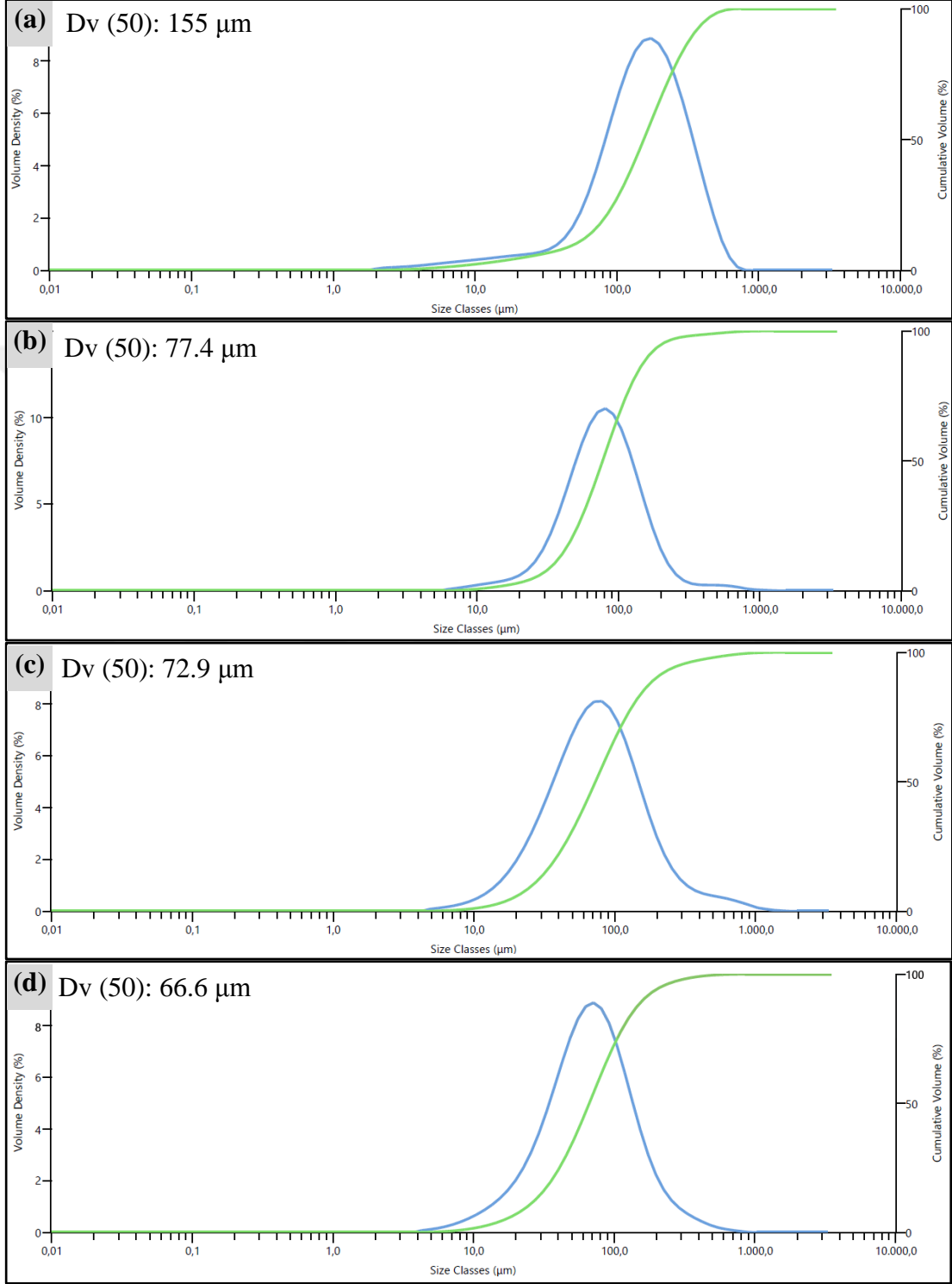
Mastersizer 3000 lazer boyut analiz cihazından elde edilen analiz sonuçlarında, üretilen tozlara ait $D_v(10)$, $D_v(50)$, $D_v(90)$, spesifik yüzey alanı, $D[3;2]$, $D[4;3]$ birikimli yüzde değerleri yer almaktadır. Ayrıca sonuçlarda, toz boyut dağılımı (frekans) ve birikimli (kümülatif) yüzde eğrileri de verilmiştir.

Farklı sıcaklıklarda (770, 795 ve 820 °C) üretilen tozların (atomizasyon ünitesinden alındığı şekliyle) $D_v(10)$, $D_v(50)$ ve $D_v(90)$ boyutları ve spesifik yüzey alanları, atomizasyon sıcaklığı, atomizasyon gaz basıncı ve nozul çapına göre değişimleri Çizelge 9.1’de verilmiştir. Çizelge 9.1’de verilen sonuçlara göre gaz basıncının artışı ve buna bağlı olarak nozul çapının küçülmesiyle toz boyutunun küçüldüğü görülmektedir. Sıvı metalin sıcaklık artışının ise toz boyutu üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca değişkenlere bağlı olarak toz şeklinin tespiti amacıyla da spesifik yüzey alanı Çizelge 9.1’de verilmiştir.

Çizelge 9.1. Üretilen tozların verileri.

Sıcaklık (°C)	Nozul Çapı (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Dv (10) (µm)	Dv (50) (µm)	Dv (90) (µm)	Spesifik Yüzey Alanı (m ² /kg)
770	2	5	72,2	220	461	41,27
		15	28,6	82,4	234	104,7
		25	26,9	76,4	200	112,7
		35	23,5	72,1	190	124,7
	3	5	80,6	225	597	38,2
		15	50,7	143	538	58,55
		25	43,6	120	335	72,53
		35	42,6	113	281	75,94
	4	5	90	283	805	32,22
		15	71,5	223	631	39,38
		25	64,8	191	558	44,94
		35	60,2	169	500	51,73
	5	5	225	641	870	13,77
		15	109	401	790	25,78
		25	78,9	212	524	39,24
		35	65,7	169	454	49,35
795	2	5	60,8	157	398	52,68
		15	35,1	79,2	162	98,39
		25	25,8	74,4	150	115,3
		35	24,2	71,8	140	122,3
	3	5	67,5	187	518	44,92
		15	39,2	128	437	86,31
		25	40,5	117	392	92,67
		35	26	110	314	117
	4	5	90	267	750	33,57
		15	73,9	223	620	40,01
		25	62,1	158	435	51,59
		35	44	127	412	72,12
	5	5	186	497	812	16,81
		15	130	382	780	23,55
		25	54,1	207	500	48,92
		35	67,2	142	452	50,59
820	2	5	50,5	155	344	85,18
		15	34,6	77,4	161	99,89
		25	25,9	72,9	156	115,9
		35	24,2	66,6	150	127,9
	3	5	58,7	156	432	53,55
		15	44,1	121	423	68,85
		25	37,6	115	413	76,97
		35	34,3	96,4	337	87,5
	4	5	73,3	233	743	39,17
		15	60,4	198	618	44,99
		25	35,9	168	434	94,18
		35	34,2	159	398	100,3
	5	5	150	467	810	19,12
		15	87,9	254	734	33,34
		25	74,6	194	581	42,17
		35	53,8	138	443	58,38

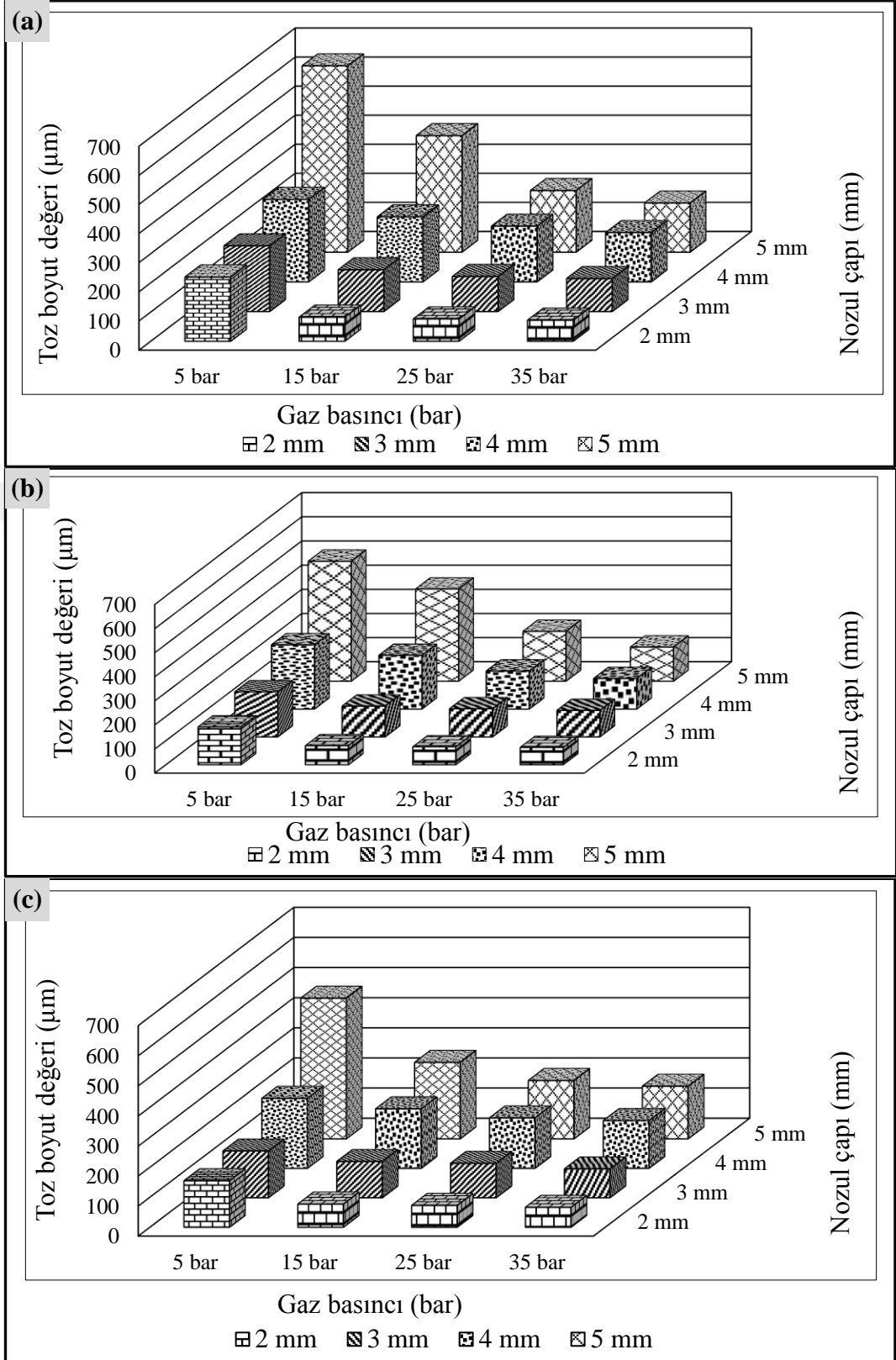
820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 5, 15, 25 ve 35 bar basınçta üretilen tozların, toz boyutsal değişimlerini gösteren grafikler Şekil 9.1’de örnek olarak verilmiştir.



Şekil 9.1. Farklı basınçlar kullanılarak, 2 mm nozul çapı ve 820 °C sıcaklıkta üretilen tozların boyutsal değişimleri. a) 5 bar b) 15 bar c) 25 bar d) 35 bar.

Şekil 9.1'den de anlaşıldığı gibi, yeşil çizgi ile toz boyutlarının kümülatif eğrisi ve mavi çizgi ile frekans değerleri verilmektedir. 820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 5 bar basınçta üretilen tozların ortalama toz boyutu ($D_v(50)$) 155 μm , 15 bar basınçta üretilen tozların $D_v(50)$ değeri 77.4 μm , 25 bar basınçta üretilen tozların $D_v(50)$ değeri 72.9 μm ve 35 bar basınçta üretilen tozların $D_v(50)$ değeri 66.6 μm olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 9.1'de görüldüğü gibi, üretilen tozların ortalama boyutuna ve spesifik yüzey alanına atomizasyon sıcaklığının çok az etkisi olmuştur. Örnek olarak deneysel çalışmalarda kullanılan bütün sıcaklıklar için 2 mm nozul çapı ve 35 bar gaz basıncında $D_v(50)$ sonuçları incelendiğinde; 770 °C atomizasyon sıcaklığı için 72.1 μm , 795 °C atomizasyon sıcaklığı için 71.8 μm iken 820 °C atomizasyon sıcaklığı için ise 66.6 μm olarak elde edilmiştir. Aynı parametreler için spesifik yüzey alanı ise; 770 °C'de 124.7 m^2/kg , 795 °C'de 122.3 m^2/kg ve 820 °C atomizasyon sıcaklığında ise 127.9 m^2/kg olarak belirlenmiştir. Farklı atomizasyon sıcaklıklarında üretilen tozların boyutuna, gaz basıncının ve nozul çapının etkisi, Şekil 9.2'de verilmiştir.



Şekil 9.2. Farklı sıcaklıklar, farklı nozul çapları ve farklı gaz basınçlarında üretilen AZ91 tozlarının toz boyut değerlerinin gösterimi. a) 770 °C b) 795 °C c) 820 °C.

Şekil 9.2’de verilen sonuçlar incelendiğinde, bütün sıcaklıklar için gaz basıncının artması ile toz boyutlarının küçüldüğü ve nozul çapının artmasına bağlı olarak da toz boyutlarının arttığı görülmektedir. Bunun sebebi; gaz basıncının artmasıyla ergiyik metalin parçalanması sağlanarak atomize olmuş parçacık boyunun küçülmesidir.

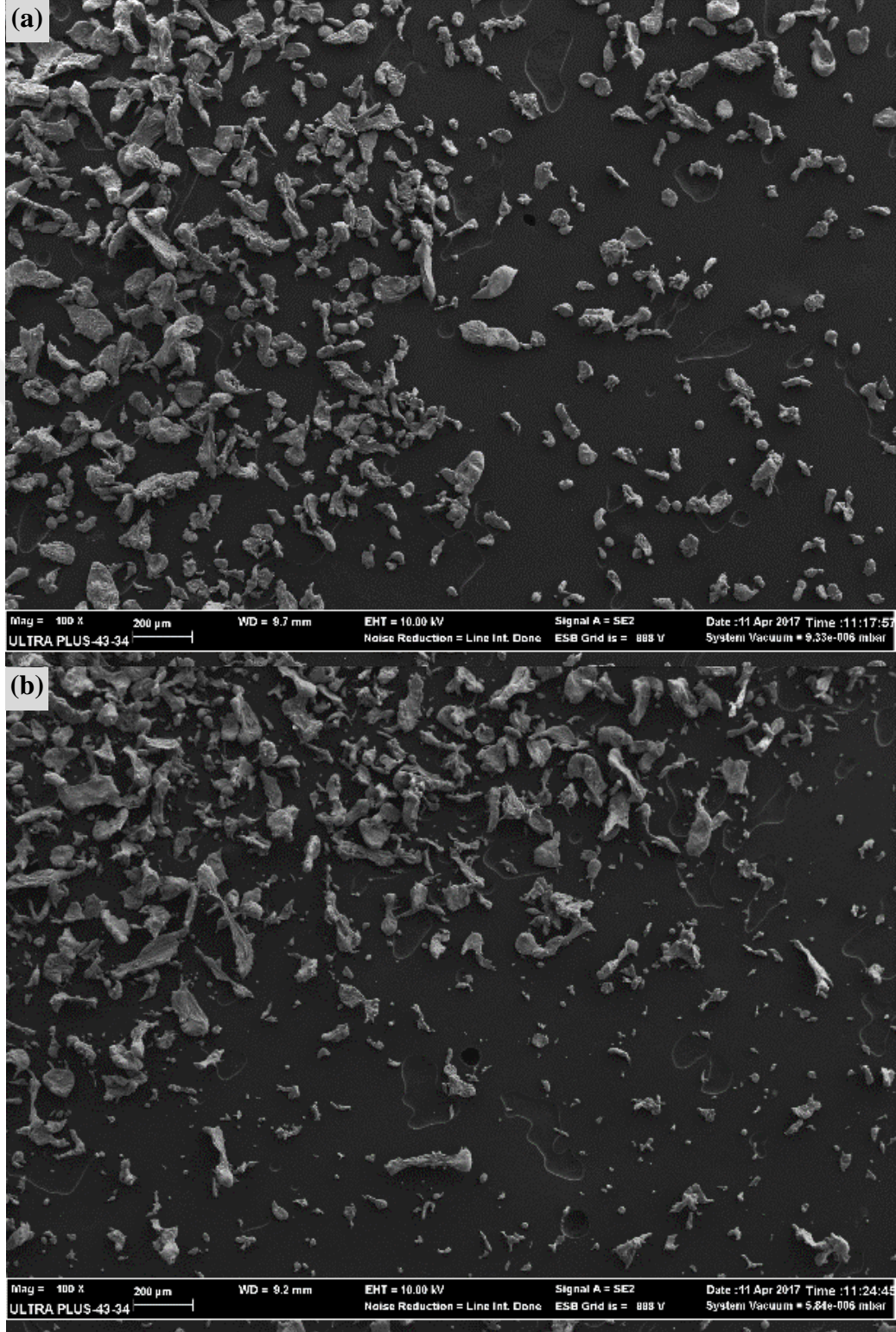
Gaz atomizasyon yöntemiyle toz üretiminde gaz basıncının toz boyutu ve şekli üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Deneysel çalışmalarda en yüksek gaz basıncı değeri 35 bar olarak alınmıştır. Bu basıncın üzerinde nozula şarj edilen gazın, nozul içerisinden sıvı metalin akış yönüne doğru ters basınç (pozitif basınç) oluşturmasından dolayı toz üretimi gerçekleştirilememiştir. Aydın ve Ünal [36] üretim değişkenlerinin metal tozu üretimine etkisi ile ilgili çalışmalarında atomizasyon işlemi sırasında akış borusunun ucunda oluşan basınç değerlerinin pozitif olması durumunda sıvı metal akışını yavaşlattığını, Gökmeşe ve Bostan [37] ise benzer bir çalışmada bazı durumlarda da sıvı akışının durduğunu ya da ters yönde akış özelliği gösterdiğini vurgulamışlardır. Fakat 35 bar gaz basıncının altında bu durumun olmadığı gözlemlenmiştir. Baram ve arkadaşlarının AZ91 alaşımının katılaşması boyunca Pb’un etkisi ile ilgili çalışmalarında 30 bar gaz basıncının altında nozul da hiçbir zaman geri basınç olmadığını vurgulamışlardır [112]. Gaz basıncının artmasıyla ve nozul çapının küçülmesiyle toz boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir.

820 °C sabit sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve farklı gaz basınçlarında en küçük ortalama toz boyutu 66,6 µm ile 2 mm nozul çapı ve 35 bar gaz basıncında elde edilmiştir. Genel olarak bu değişkenler için üretilen tozların %10’unun boyutu 24,2 µm altı iken, %90’ının boyutu ise 160 µm altıdır. Üretilen tozların en az %10’unun ise 10 µm altı tozlardan oluştuğu tespit edilmiştir. Ancak bu tozlar gerek atomizasyon kulesi ve siklonlara gerekse tozların depolandığı kaplara sıvandığı için toz boyutu ölçümleri mümkün olmamıştır.

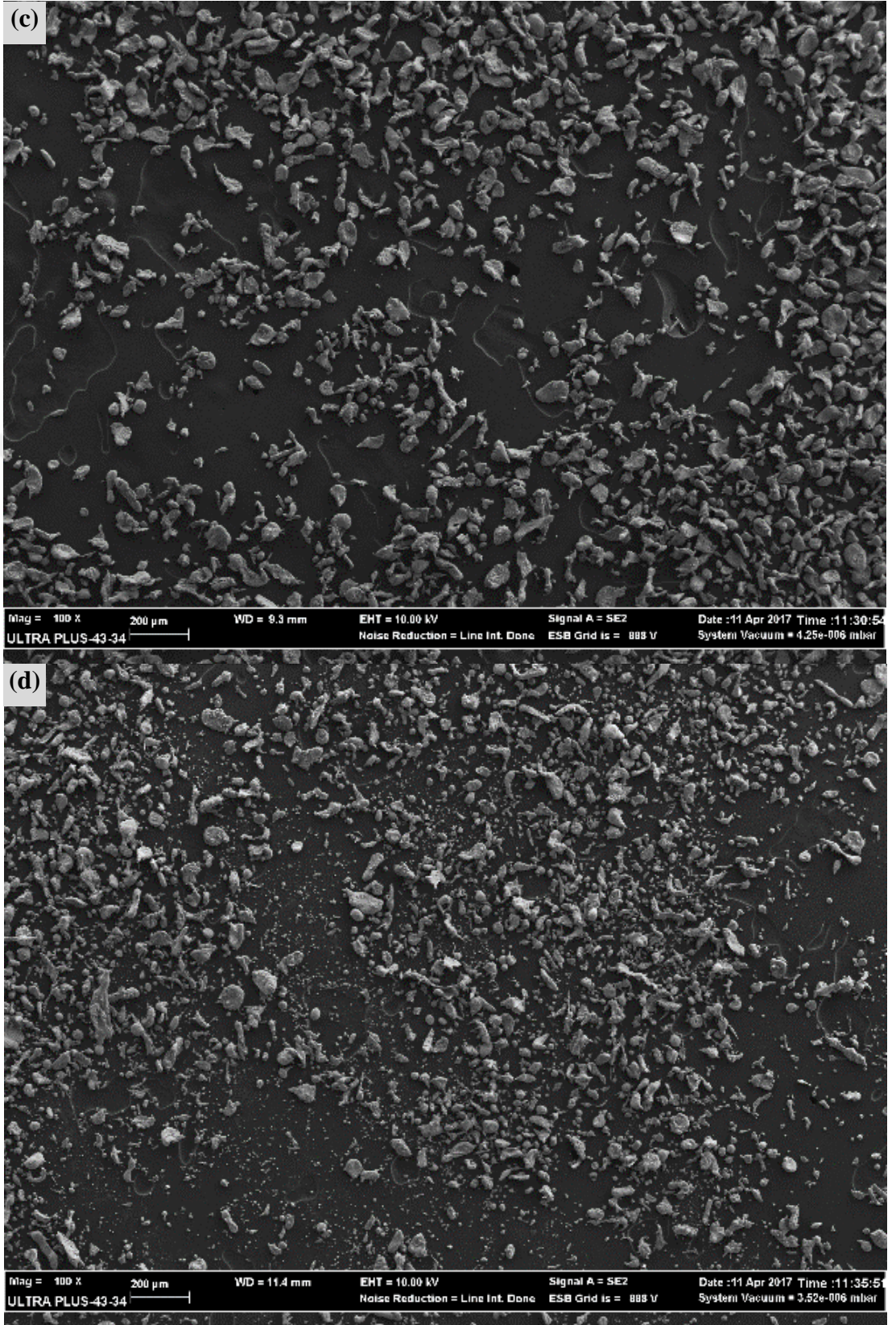
9.2. TOZLARIN SEM-EDX ANALİZLERİ

Gaz atomizasyonu yöntemi ile AZ91 tozu üretiminde yapılan deneyler sonucunda, gaz basıncının etkisi açıkça görülmüştür. Gaz basıncı arttığı zaman üretilen tozların tane

boyutunun küçüldüğü Şekil 9.3’de verilen SEM görüntülerinden de açıkça anlaşılmaktadır.

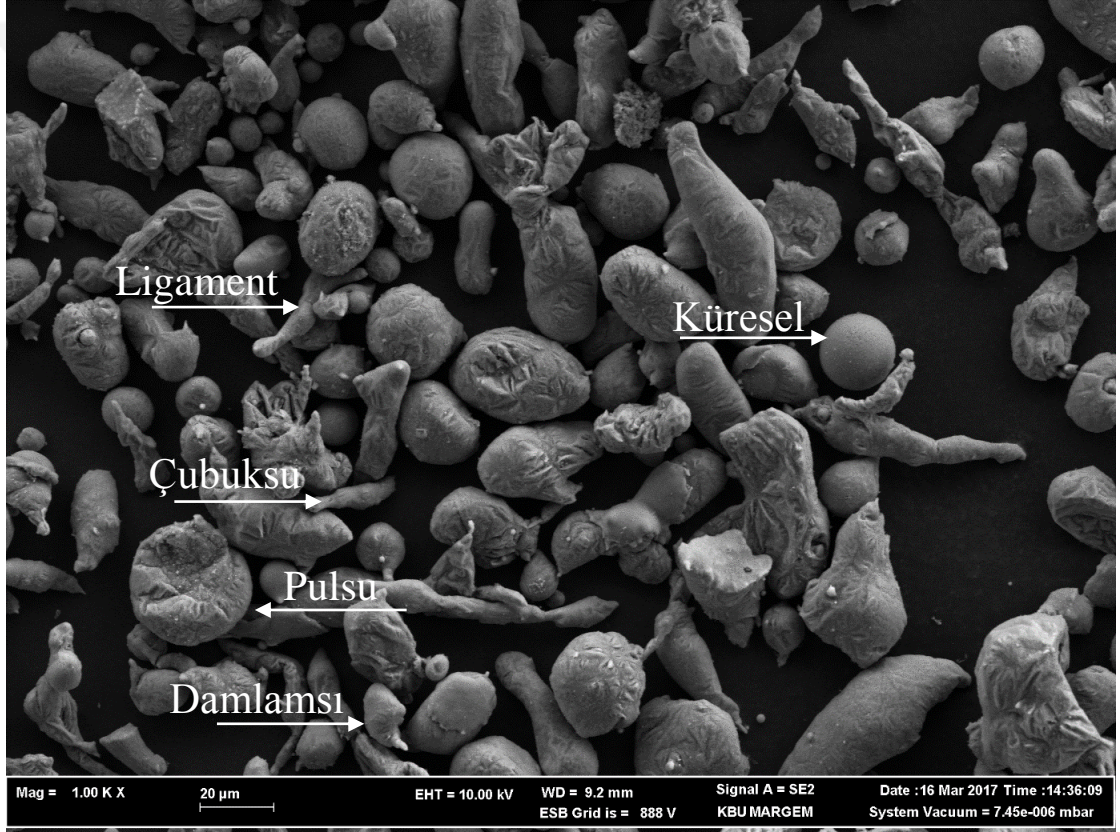


Şekil 9.3. 2 mm nozul çapı ve farklı basınçlarda üretilen AZ91 alaşım tozlarının SEM görüntüleri. a) 5 bar b) 15 bar c) 25 bar d) 35 bar.



Şekil 9.3. (devam ediyor).

Bu konudaki literatür çalışmalarında, gaz basıncının artmasına bağlı olarak toz tane boyutunun küçüldüğü belirtilmiştir [3,8,16,20,35]. Salord ve arkadaşları [118] alüminyum tozu üretiminde 4, 9 ve 14 bar gaz basınçlarında deneyler yapmışlar ve deney sonuçlarında 4 barda üretilen tozun ortalama toz boyutunu 59 μm , 14 bar'da üretilen tozun ortalama tane boyutunu ise 44 μm olarak belirlemişlerdir. Basınç artışı ile ergiyik metale daha yüksek enerji aktarılması sağlandığı için metal tozu üretiminde ortalama toz boyut değerinin küçüldüğü vurgulanmıştır. Ortalama toz boyutunun gaz basıncının artmasına bağlı olarak küçüldüğü ve bu çalışmanın da literatürle paralellik gösterdiği Şekil 9.3 incelendiğinde görülebilir.

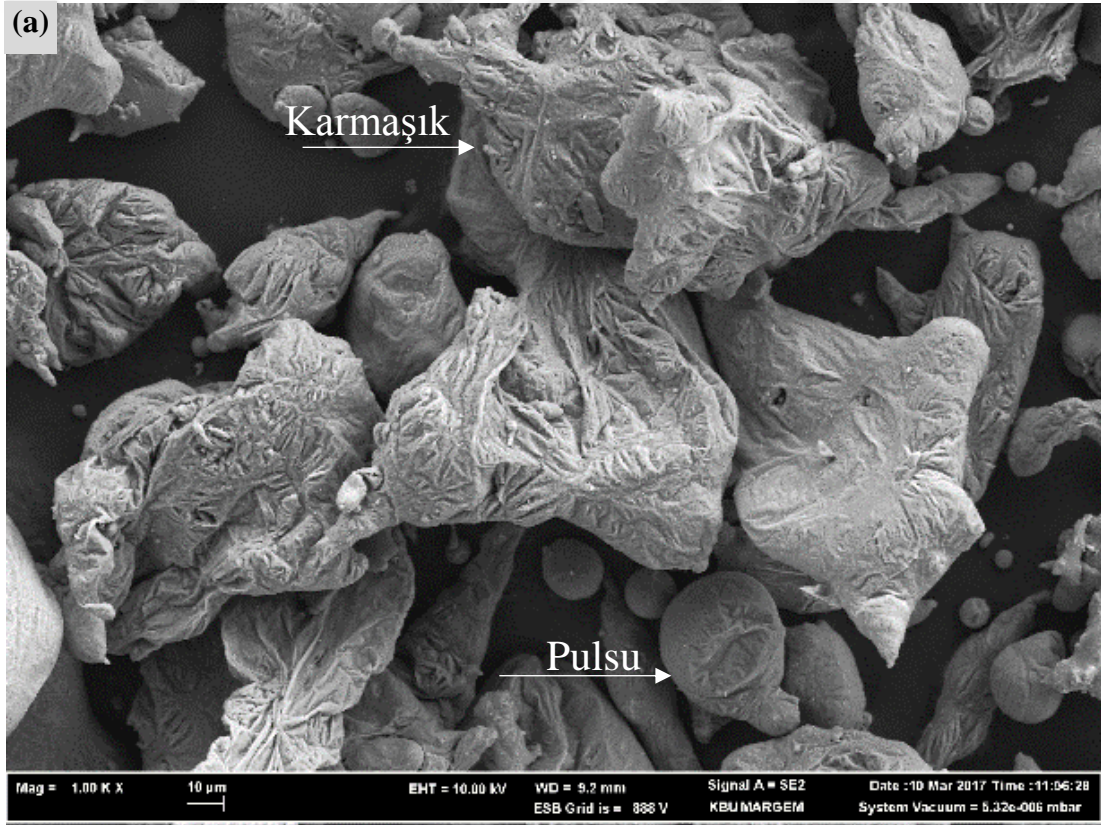


Şekil 9.4. Üretilen AZ91 tozunun genel görünümünü gösteren SEM görüntüsü.

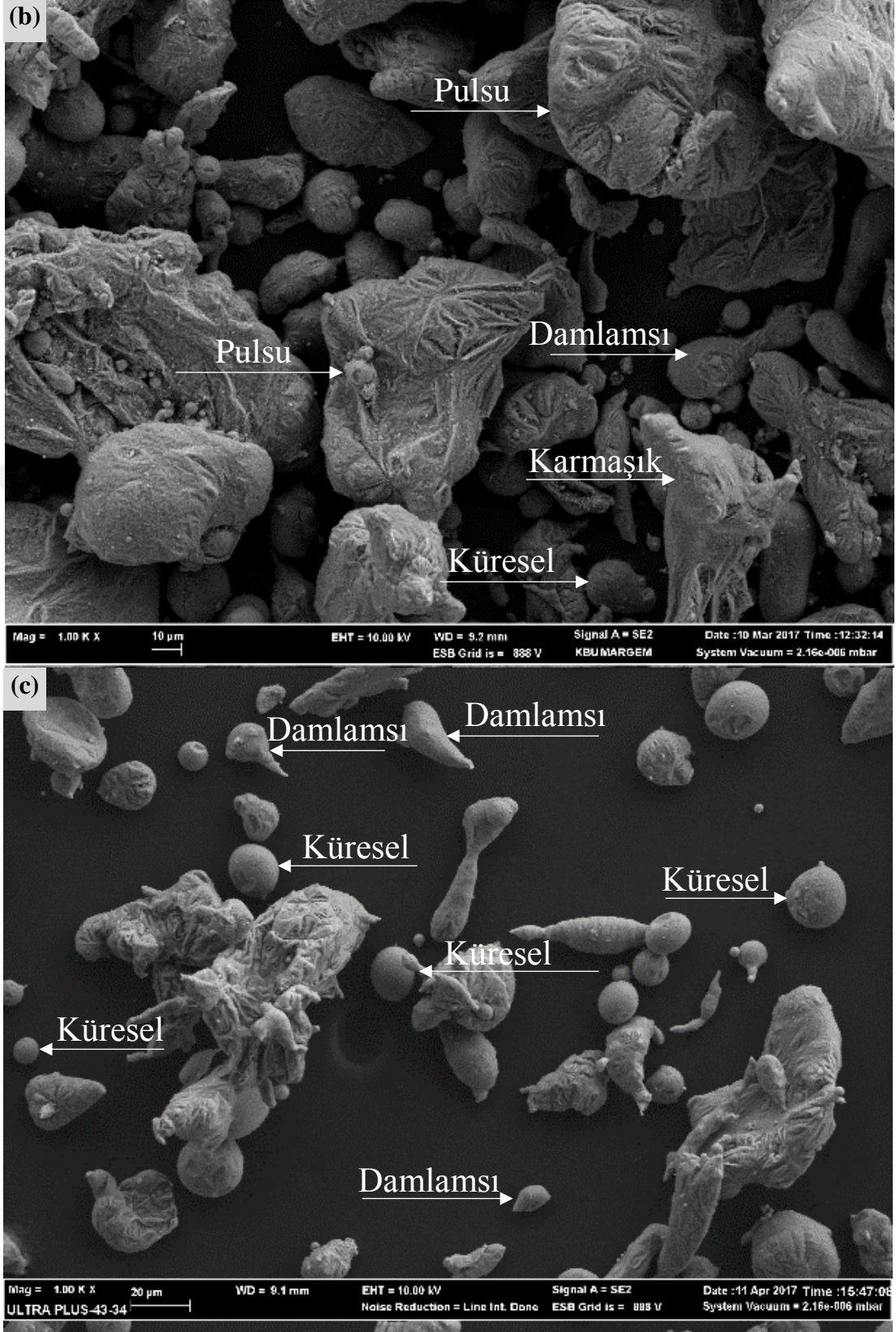
Üretilen tozların genellikle ligament, damlamsı, çubuksu, pulsü ve küresel şekilde olduğu Şekil 9.4'den anlaşılmaktadır.

Şekil 9.5'de verilen SEM görüntülerinden ise gaz basıncının artmasına bağlı olarak toz şeklinin ligament, çubuksu ve karmaşık şekilden, pulsü, damlamsı ve küresel'e doğru

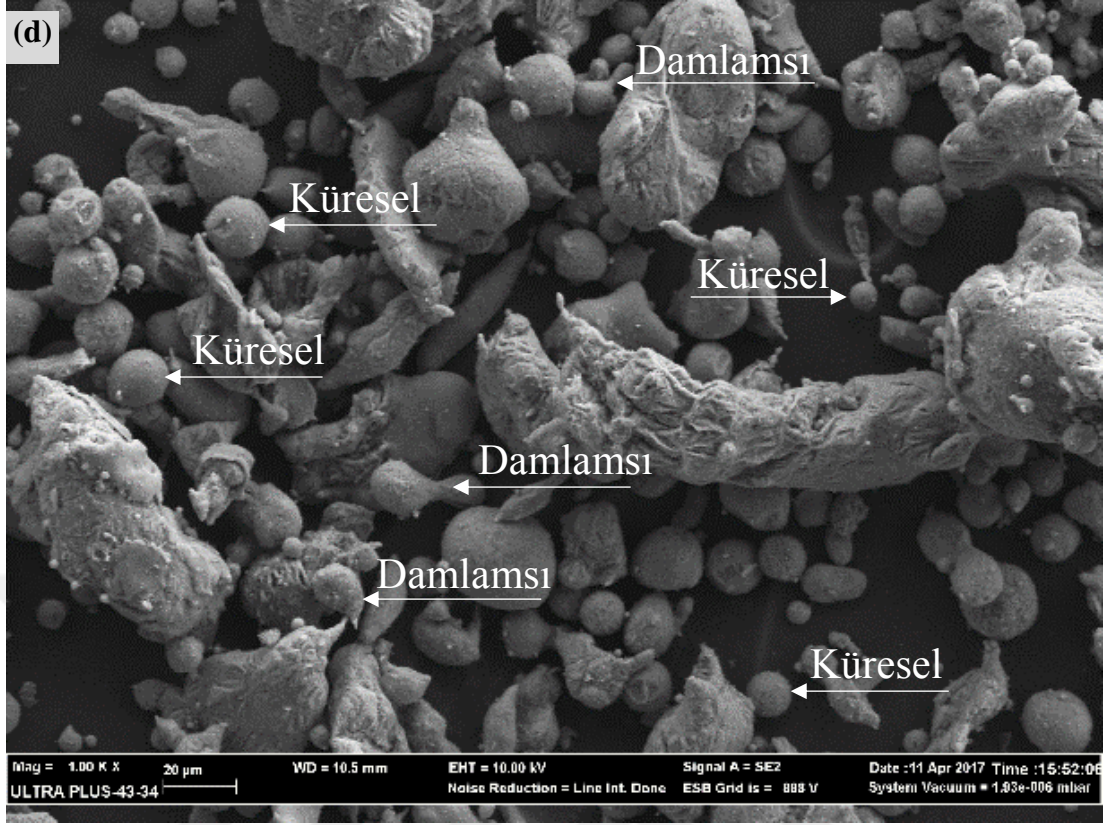
değiştii gör÷lmektedir. Özellikle 35 bar gaz basıncında üretilen ve Şekil 9.5d'de SEM görüntüsü verilen tozların ciddi anlamda küçüldüğü, şeklinin ise damlamsı ve küresel olduğu belirgin bir şekilde gör÷lmektedir. Fischmeister ve arkadaşları [119] gaz atomize yüksek hız çeliklerinin katılaşması üzerine yaptıkları çalışmada bir sıvı damlacığını küreselleşmeye zorlayan en önemli parametrenin yüzey gerilimi olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 9.5a incelendiğinde tozların az bir kısmının küresel olduğu gör÷lmektedir. Bunun en önemli sebebinin atomizasyon gaz basıncının düşük olması ve atomizasyon kulesinin yeterli yükseklikte olmaması olarak düşünülmektedir. Zira toz parçacıkları küreselleşebilecek zamanı bulamadan atomizasyon kulesinin tabanına çarparak katılaşmışlardır.



Şekil 9.5. 2 mm nozul çapı ve farklı basınçlarda üretilen AZ91 alaşım tozlarının SEM görüntüleri. a) 5 bar b) 15 bar c) 25 bar d) 35 bar.

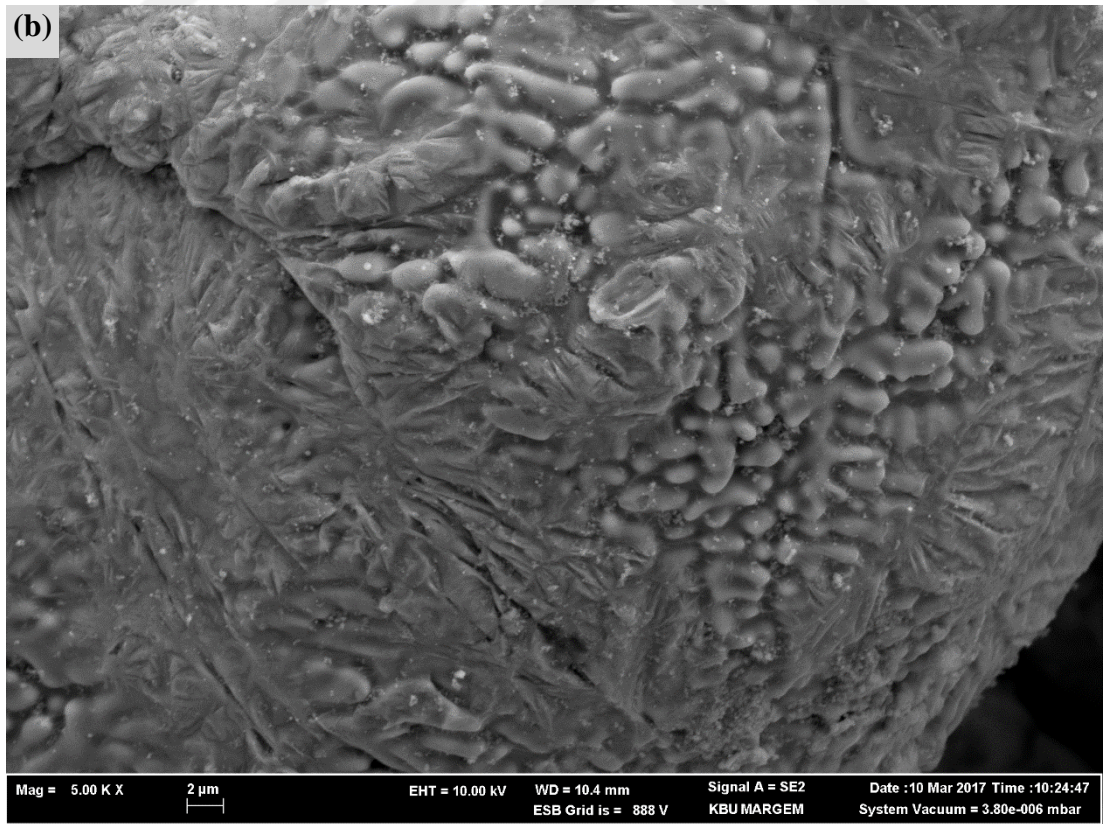
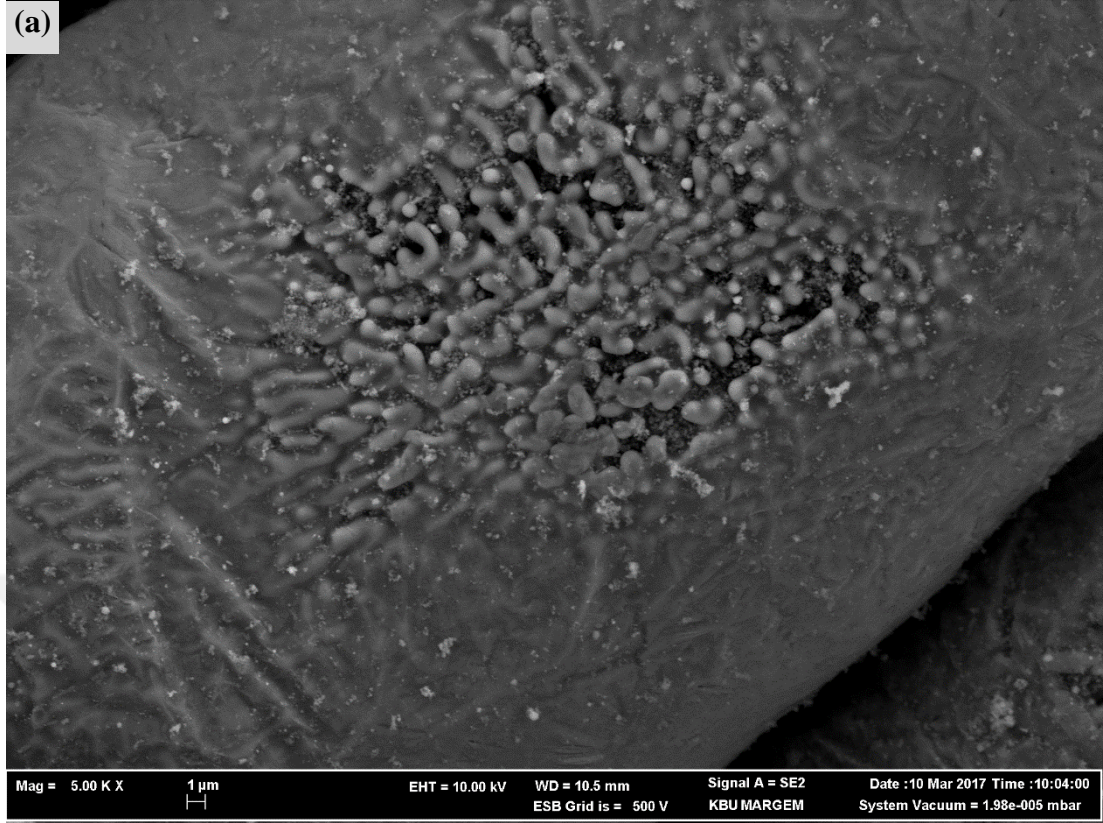


Şekil 9.5. (devm ediyor).

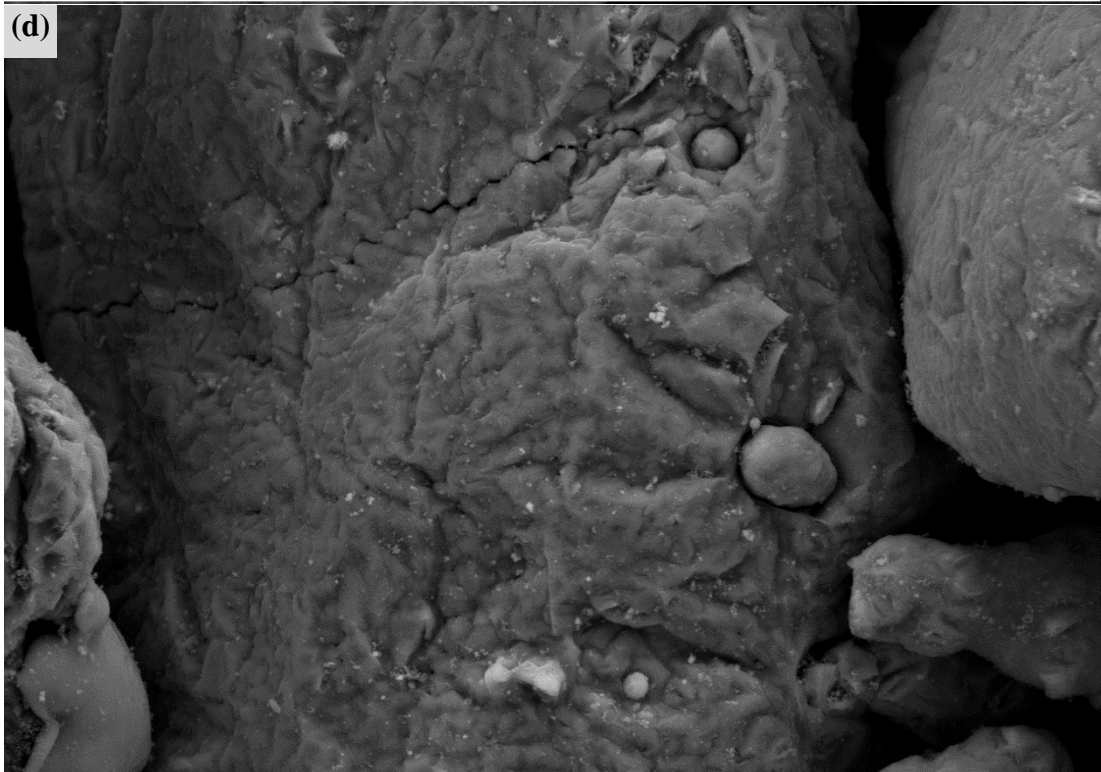
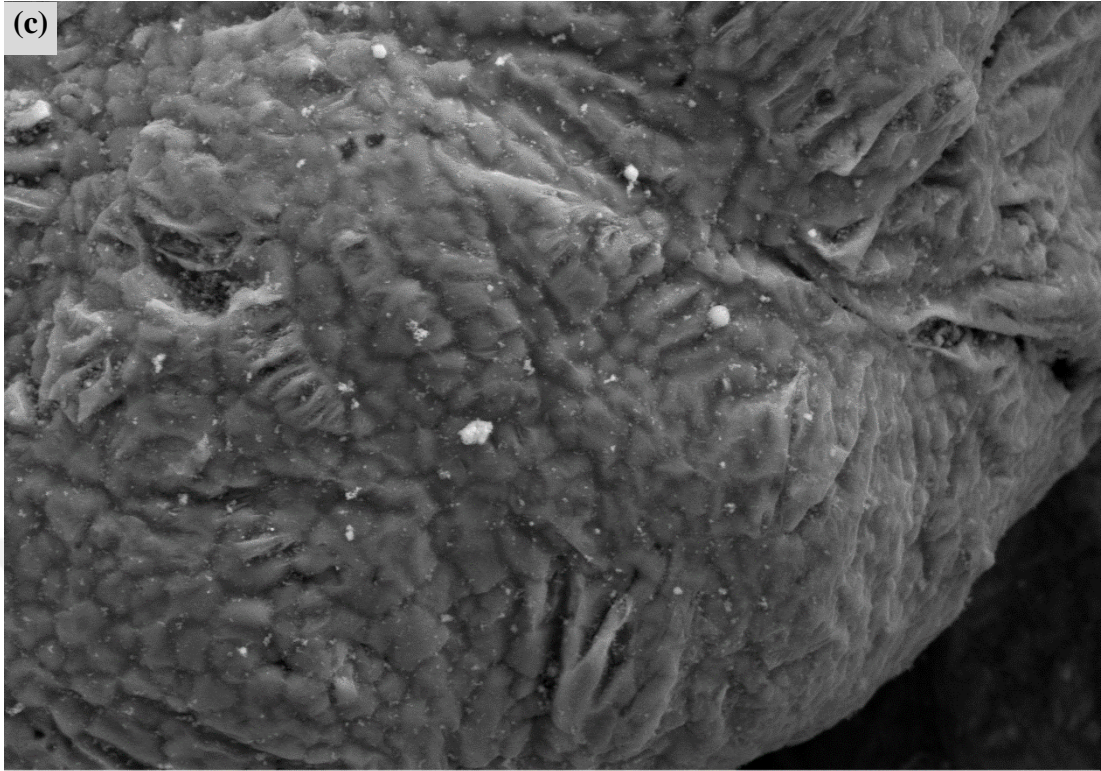


Şekil 9.5. (devam ediyor).

2 mm nozul çapı ve 5, 15, 25 ve 35 bar basınçlarda üretilen AZ91 tozlarının 15000 büyütme ile alınan SEM görüntüleri Şekil 9.6'da verilmiştir.



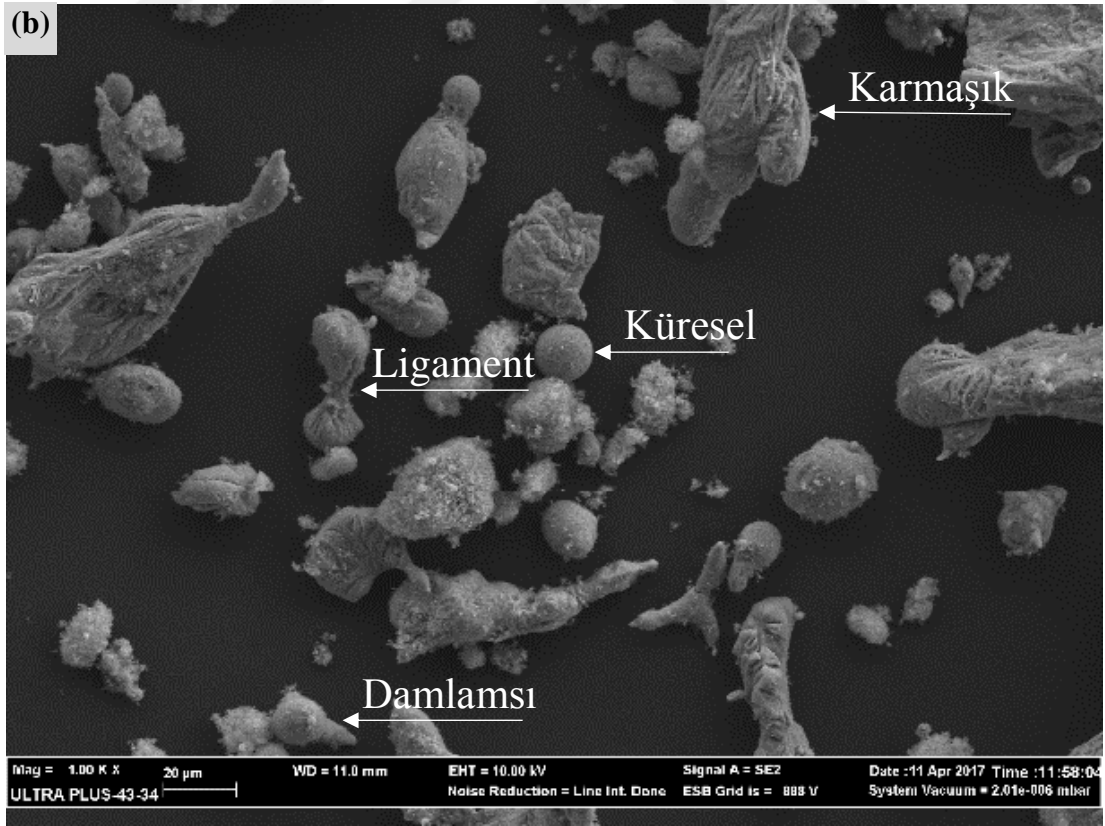
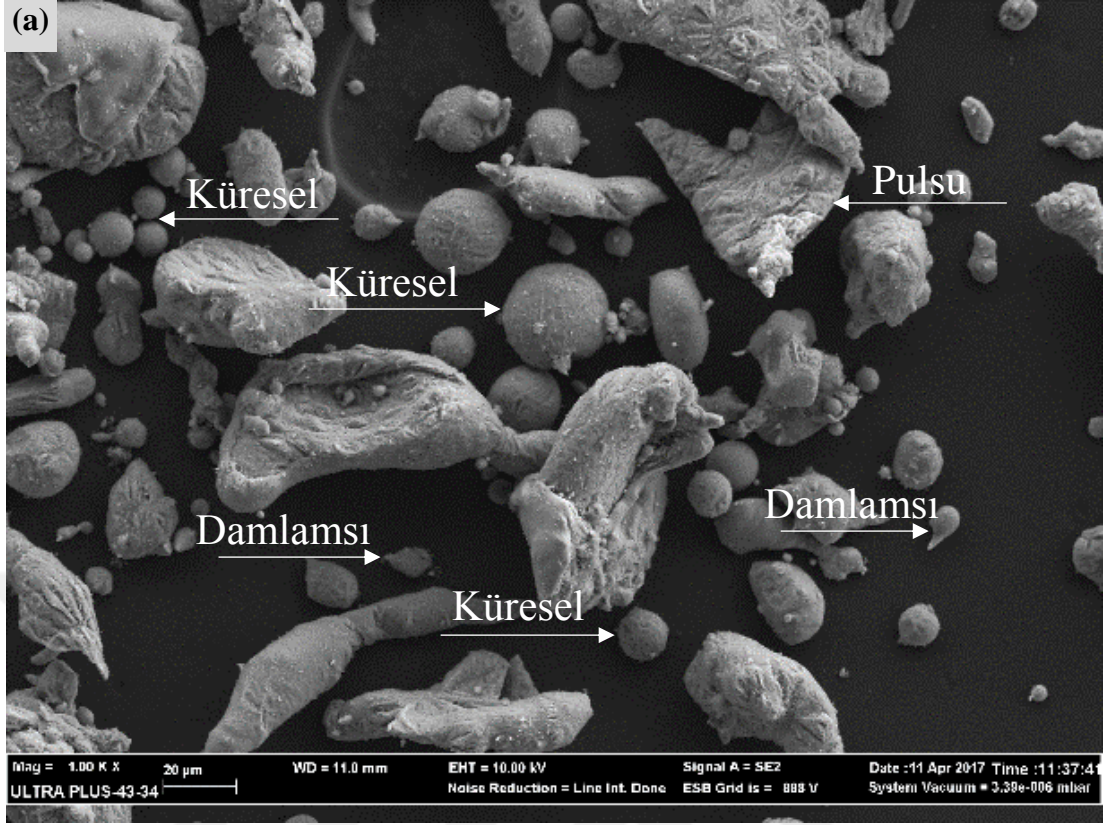
Şekil 9.6. 2 mm nozul çapı ve farklı basınçlarda üretilen AZ91 alaşım tozlarının SEM görüntüleri. a) 5 bar b) 15 bar c) 25 bar d) 35 bar.



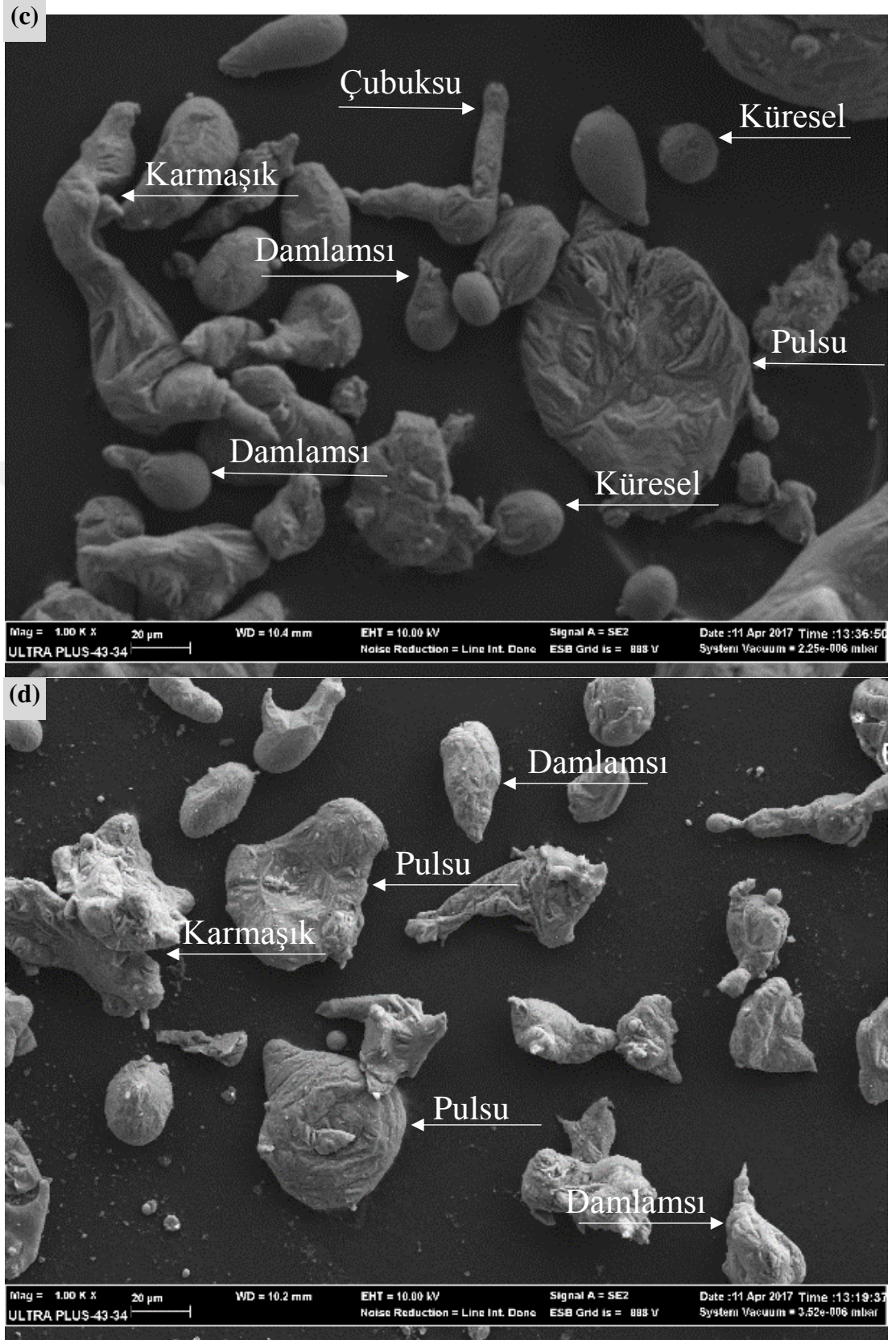
Şekil 9.6. (devam ediyor).

Şekil 9.6’da verilen SEM görüntülerinde toz yüzeylerinin gözenekli olduğu ve gaz basıncına bağlı olarak gözenek miktarının azaldığı açıkça görülmektedir. Ayrıca yüzeyler dikkatli bir şekilde incelendiğinde, bir toz tanesinin (katılaşmada olduğu gibi) alt tanelerden oluştuğu ve gaz basıncının artması ile de alt tanelerin küçüldüğü fark edilebilir. Bunun sebebinin, sıvı metalin katılaşmasında olduğu gibi, katılaşma hızına bağlı olarak alt taneleri oluşturan çekirdeklenmenin soğuma hızına bağlı olarak artması ve yapının daha küçük tanelerden oluşması olarak yorumlanabilir. Diğer taraftan artan gaz basıncının birim yüzeydeki basıncı artırdığı ve yüzeyin daha hızlı soğumasından dolayı da, daha yoğun bir yüzey oluştuğu SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.

Bununla birlikte, gaz atomizasyonu yöntemi ile toz üretiminde, nozul çapının da üretim parametresi olarak toz boyut ve şekline çok önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Nozul çapı arttırıldığında üretilen tozların tane boyutunun büyüdüğü, Şekil 9.7’de verilen SEM görüntülerinden açıkça anlaşılmaktadır. Bunun yanında, küçük nozul çaplarında üretilen tozlar çoğunlukla küresel, damlamsı ve pulsü şekle sahip iken, 4 ve 5 mm nozul çaplarında üretilen tozların genellikle ligament, pulsü (flake), çubuksu ve karmaşık şekilli olduğu görülmektedir. Tozların daha büyük nozul çaplarında iri ve karmaşık şekilli olmalarının sebebi, birim zamanda daha fazla sıvı metalin nozuldan geçmesi ve gazın yetersiz atomizasyonundan kaynaklanmaktadır.

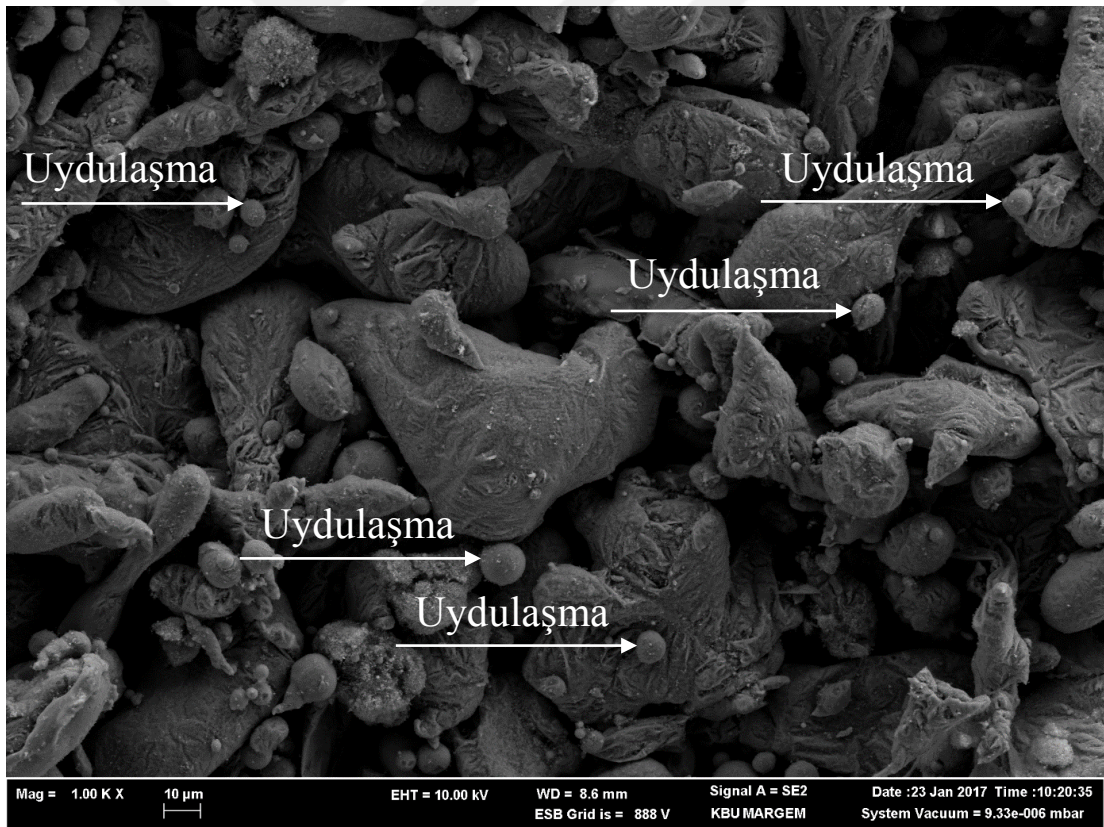


Şekil 9.7. 35 bar gaz basıncı ve farklı nozul çaplarında üretilen AZ91 alaşım tozlarının SEM görüntüleri. a) 2 mm b) 3 mm c) 4 mm d) 5 mm.

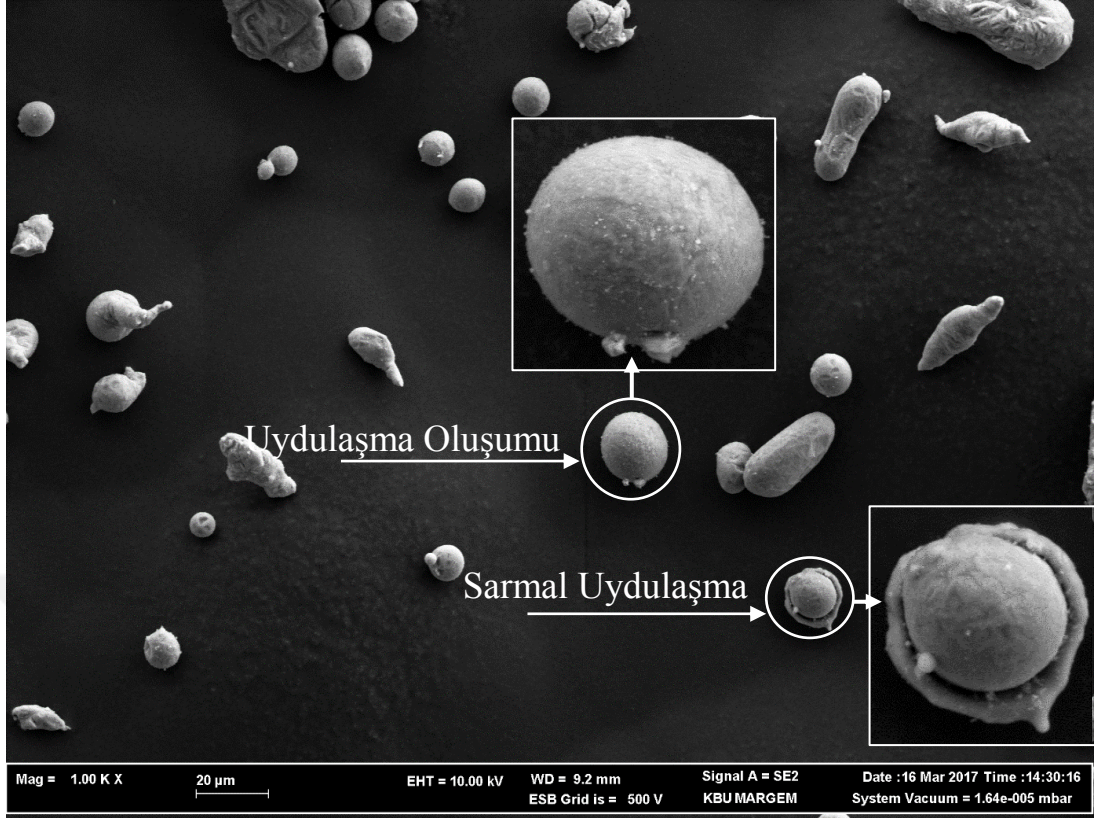


Şekil 9.7. (devam ediyor)

Atomizasyonun etkisiyle rastgele katılaşılan tozlar detaylı incelendiğinde, küçük parçacıklı tozların büyük parçacıklı tozlar üzerinde uydulaşma yaptıkları görülebilir (Şekil 9.8). Uydulaşma, atomizasyon sırasında küçük toz parçacıklarının henüz katılma işlemini tamamlamamış büyük toz parçacıkları ile çarpışması sonucu meydana gelir [118]. Clyne ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada büyük ve küçük boyutta oluşan tozların katılma süreleri arasındaki fark ve atomizasyon gazının etkisiyle farklı boyuttaki damlacıkların değişik oranlarda ivmelenmesi, uydulaşma işlemine yol açtığını belirtmişlerdir [120]. Bu tarz uydulaşmalar Şekil 9.8 ve Şekil 9.9'da verilen SEM görüntüsündeki gibi olurken, diğer taraftan literatürde hiç karşılaşılmayan bir yapının Şekil 9.9'da görüldüğü gibi tozun damlacık tarafından kısmen sıvanmasıyla veya damlacığın tozu tamamen kaplamasıyla da oluşan ve bizim sarmal uydulaşma olarak ifade ettiğimiz bir yapının oluştuğu gözlenmektedir.



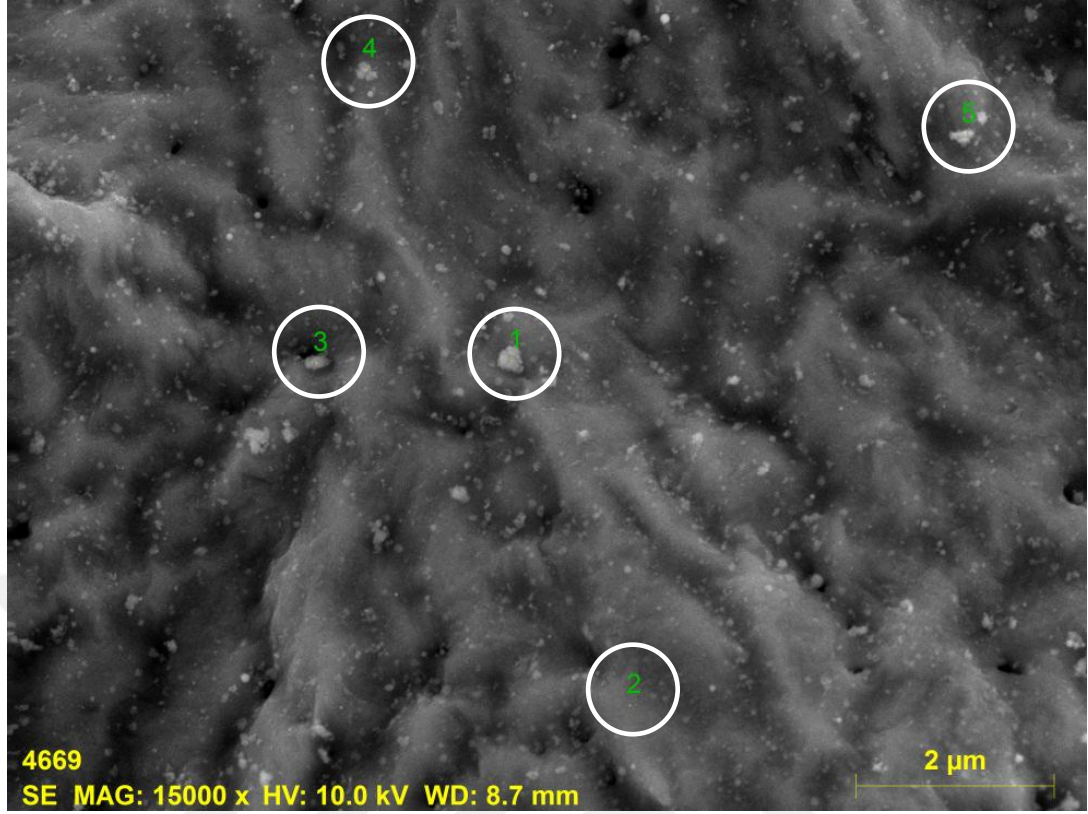
Şekil 9.8. 820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 5 bar gaz basıncında üretilen AZ91 tozunun SEM görüntüsü.



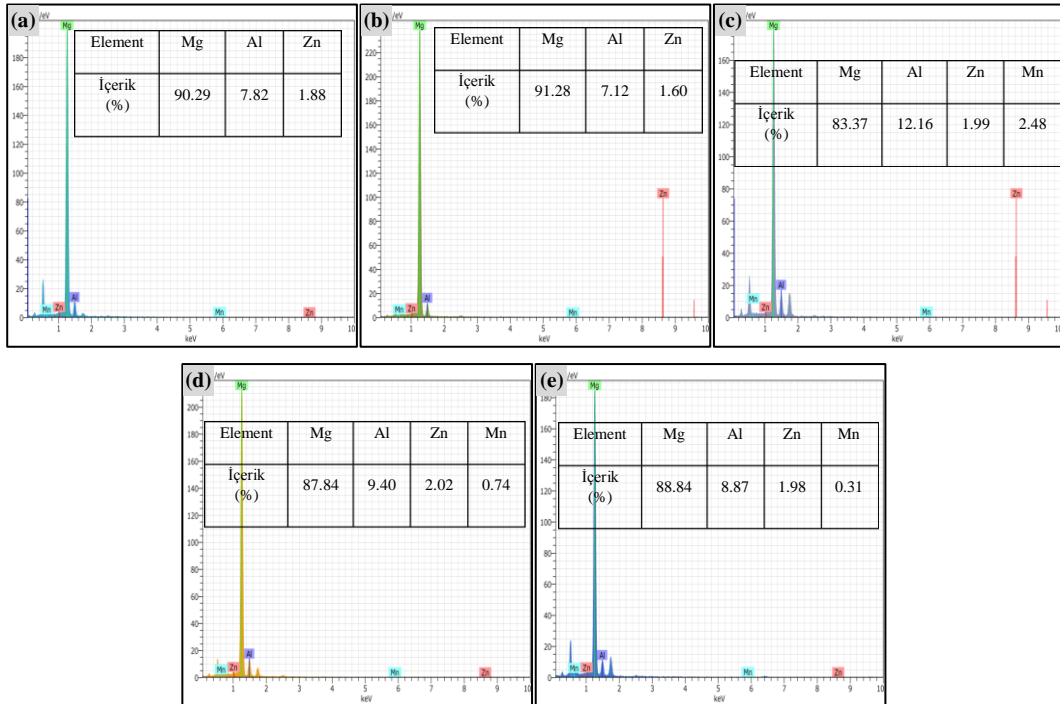
Şekil 9.9. 820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 35 bar gaz basıncında üretilen AZ91 tozunun SEM görüntüsü.

Diğer taraftan Şekil 9.9’da verilen SEM görüntüsündeki uydulaşma incelendiğinde, uyduların genellikle 10 μm altı tozlar tarafından oluşturulduğu ve bu tozların genellikle küresel parçacıklardan meydana geldiği görülmektedir. Küçük tozların erken katılaşması ve iri tozların hala sıvı haldeyken çarpışmaları uydulaşmaya sebep olmaktadır. Uyduların küresel olması ise, temas yüzey alanlarının çok büyük olması ve yüzey enerjisini düşürebilmek için kreselleşecek kadar zaman bulabilmelerinden kaynaklandđı düşünülmektedir.

Şekil 9.10’da 5 farklı noktadan alınan SEM-EDX analizleri sonucunda mikroyapıda 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı noktalarda α (Mg ana matris) fazı gözlemlenmektedir. Şekil 9.11’de verilen EDS analizi sonuçları da bu sonucu desteklemektedir.



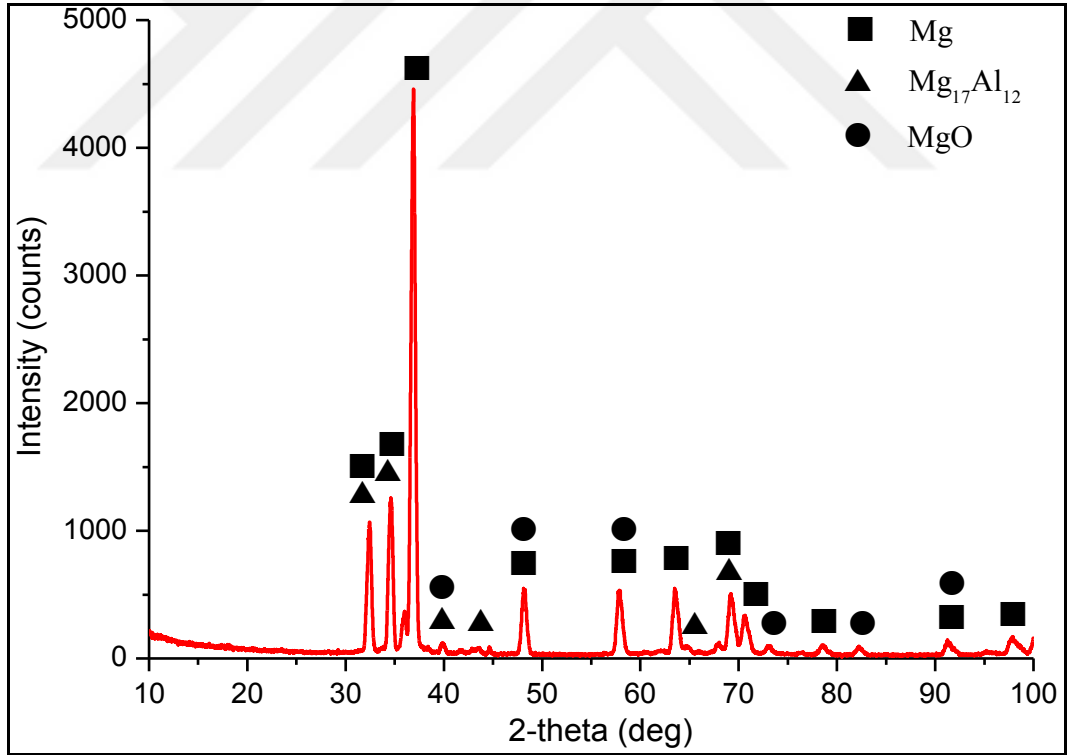
Şekil 9.10. 820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 15 bar basınçta üretilen AZ91 tozunun SEM görüntüsü.



Şekil 9.11. 820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 15 bar basınçta üretilen AZ91 tozunun EDS analizi a) Nokta 1, b) Nokta 2, c) Nokta 3, d) Nokta 4, e) Nokta 5.

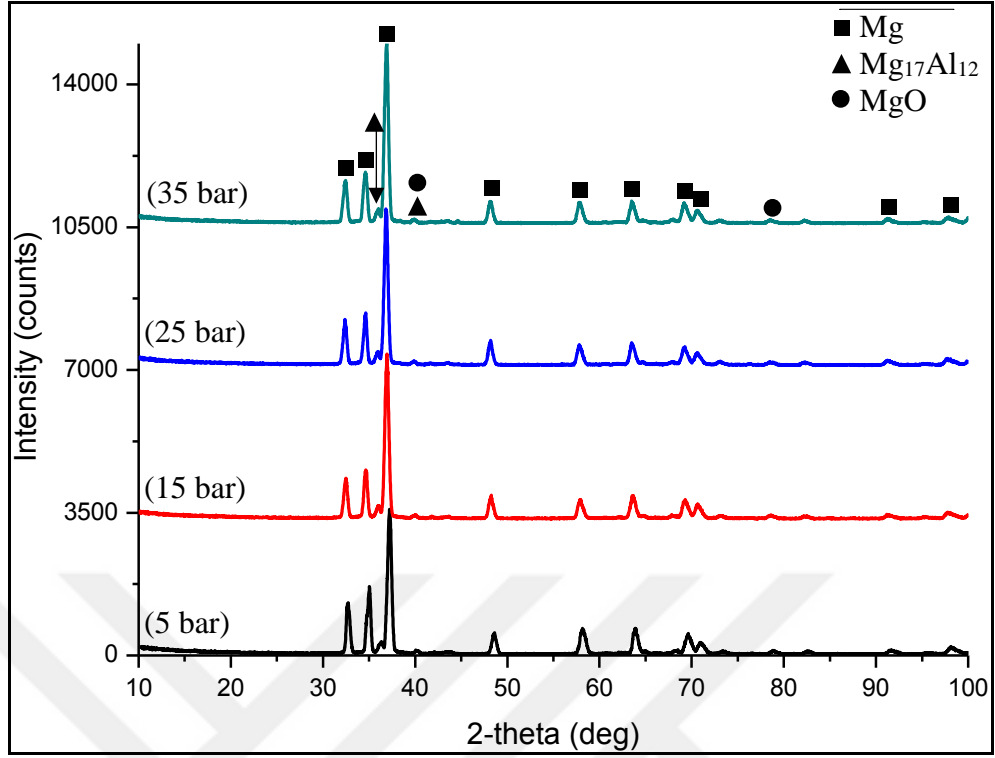
9.3. TOZLARIN XRD VE XRF ANALİZLERİ

Şekil 9.12’de AZ91 alaşım tozunun XRD sonucu verilmiştir. XRD sonuçları incelendiğinde, yapıda α (Mg ana matris) fazı, β fazı olan $Mg_{17}Al_{12}$ ve çok az miktarda da MgO görülmektedir. Çökelti, katılaşma yoluna bağlı olarak $Mg_{17}Al_{12}$ bileşimini oluşturmaktadır [121,122]. $Mg_{17}Al_{12}$ çökeltilerinin, AZ91 alaşımı için, süneklik pahasına mekanik bir güçlendirme sağladığı bilinmektedir [123]. Alaşımın mekanik davranışı, çökelti miktarına, morfolojisine ve boyutuna bağlıdır. AZ91 alaşımında, 120 °C'nin üzerinde $Mg_{17}Al_{12}$ fazının yumuşaması nedeniyle mukavemet ve sürünme direnci özelliklerini kaybeder [124]. AZ91, hexagonal sıkı paket α -Mg ve ötektik $\alpha+\gamma$ (γ fazı, hacim merkezli kübik α fazı + β - $Mg_{17}Al_{12}$ fazı olarak adlandırılır.) fazlarından oluşur. β fazının çökmesi sürekli ve süreksiz çökelti olarak iki şekilde meydana gelir [125,126].



Şekil 9.12. AZ91 tozunun XRD sonucu.

Şekil 9.13’de 5, 15, 25 ve 35 bar gaz basınçlarında üretilen AZ91 alaşım tozunun XRD sonuçları verilmiştir.



Şekil 9.13. Farklı basınçlarda üretilen AZ91 tozlarının XRD sonuçları.

Şekil 9.13’de verilen XRD sonuçlarında, gaz atomizasyon yöntemi ile toz üretiminde farklı gaz basınçlarının üretilen tozların, tozun kimyasal bileşimine bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.

Külçe halinde temin edilen AZ91 malzemenin kimyasal bileşim analizi Çizelge 9.2’de verilmiştir. Buna ek olarak Çizelge 9.3’de ise gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen AZ91 alaşım tozunun XRF kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 9.2. AZ91 külçesinin kimyasal bileşimi.

Element	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Mg
İçerik (%)	8,74	0,67	0,18	0,01	0,0062	Kalan

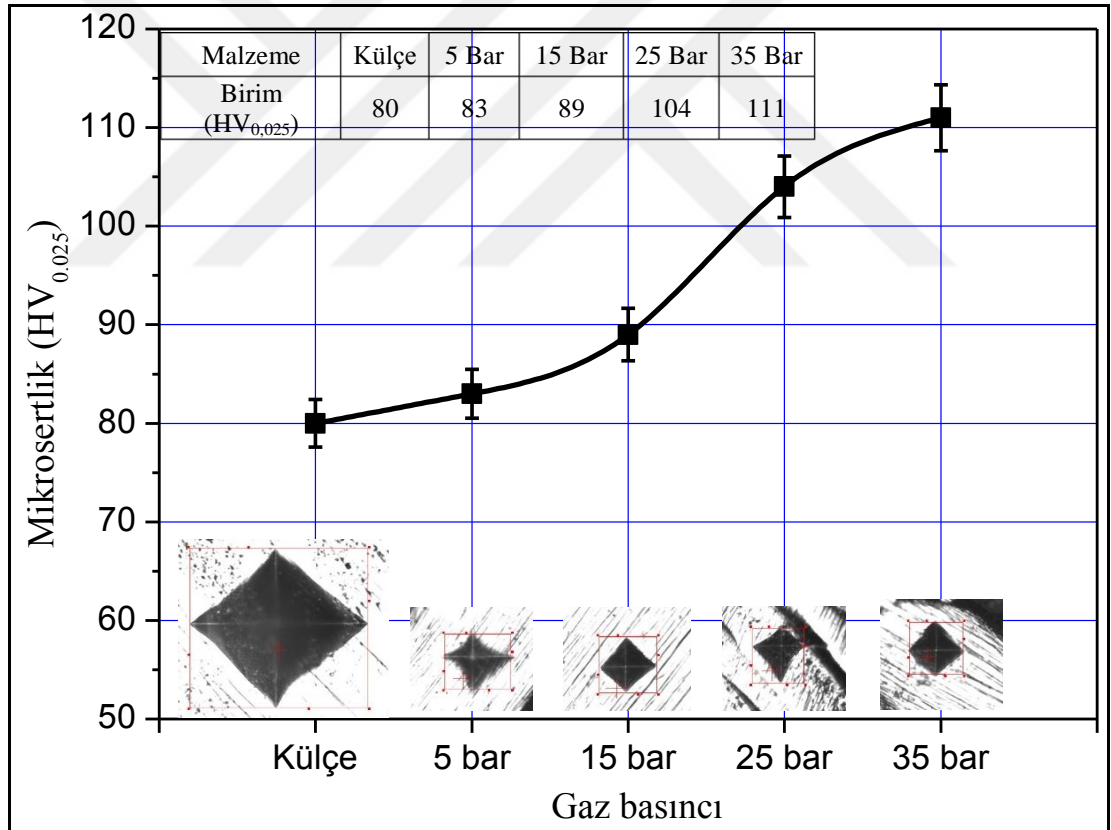
Çizelge 9.3. Üretilen AZ91 tozlarının kimyasal (XRF) analiz sonuçları.

Element	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Mg
İçerik (%)	8,6790	0,8084	0,4024	0,0330	0,0087	Kalan

Çizelge 9.2 ve Çizelge 9.3 incelendiğinde gaz atomizasyonu ile toz olarak üretilen AZ91 malzemesinin kimyasal bileşiminin neredeyse aynı olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal bileşimin neredeyse aynı olarak kalması, gaz atomizasyon sistemi ile toz üretiminde ne derece önemli olduğunu göstermektedir.

9.4. TOZLARIN MİKRO SERTLİK İNCELEMELERİ

Bakalite alınan AZ91 gaz atomize tozların mikro sertlik değerlerinin tespit edilebilmesi amacıyla beş farklı noktadan ölçüm yapılarak ortalama sertlik değerleri hesaplanmıştır. AZ91 ana malzemesi ve üretilen tozların ortalama sertlik değerleri üzerine gaz basıncının etkisi, Şekil 9.14’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 9.14. AZ91 ana malzemesi ve üretilen tozların ortalama sertlik değerleri.

Şekil 9.14 incelendiğinde, üretilen tozların sertliklerinin küççe malzemenin sertliğinden (80 HV_{0.025}) daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin döküm

yöntemi ile üretilen malzemenin gaz atomize tozlara göre daha yavaş katılaşmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Diğer taraftan, üretilen tozların sertliğinin gaz basıncının artmasına bağlı olarak arttığı Şekil 9.14'den görülebilir. 5 bar gaz basıncında toz sertliği ortalama 85 HV_{0,025}, 15 bar gaz basıncında 89 HV_{0,025}, 25 bar gaz basıncında 104 ve 35 bar gaz basıncında ise 111 HV_{0,025} olarak ölçülmüştür. Bunun sebebi hızlı katılaşmadır. Şekil 9.14 incelendiğinde gaz basıncının artmasıyla toz boyutunun küçüldüğü görülebilir. Tane boyutu küçüldükçe spesifik yüzey alanı artmış ve daha fazla β (Mg₁₇Al₁₂) fazı oluşmuştur, buda sertliğin artmasına neden olmuştur. Klasik katılaşma modelinde olduğu gibi hızlı katılaşan malzemelerin sertliği daha yüksek olur. Gökmeşe ve arkadaşları [128] gaz atomizasyonu ile AA 2014 tozu üretimi ve karakterizasyonu üzerine yaptıkları bir çalışmada, daha küçük tozların erken katılaşacağını ve sertliklerinin iri tozlara göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmanın sertlik sonuçları literatürle paralellik göstermektedir.

9.5. ÜRETİLEN TOZLARIN SİNERLENEBİLİRLİĞİ VE MALZEME İMALATI

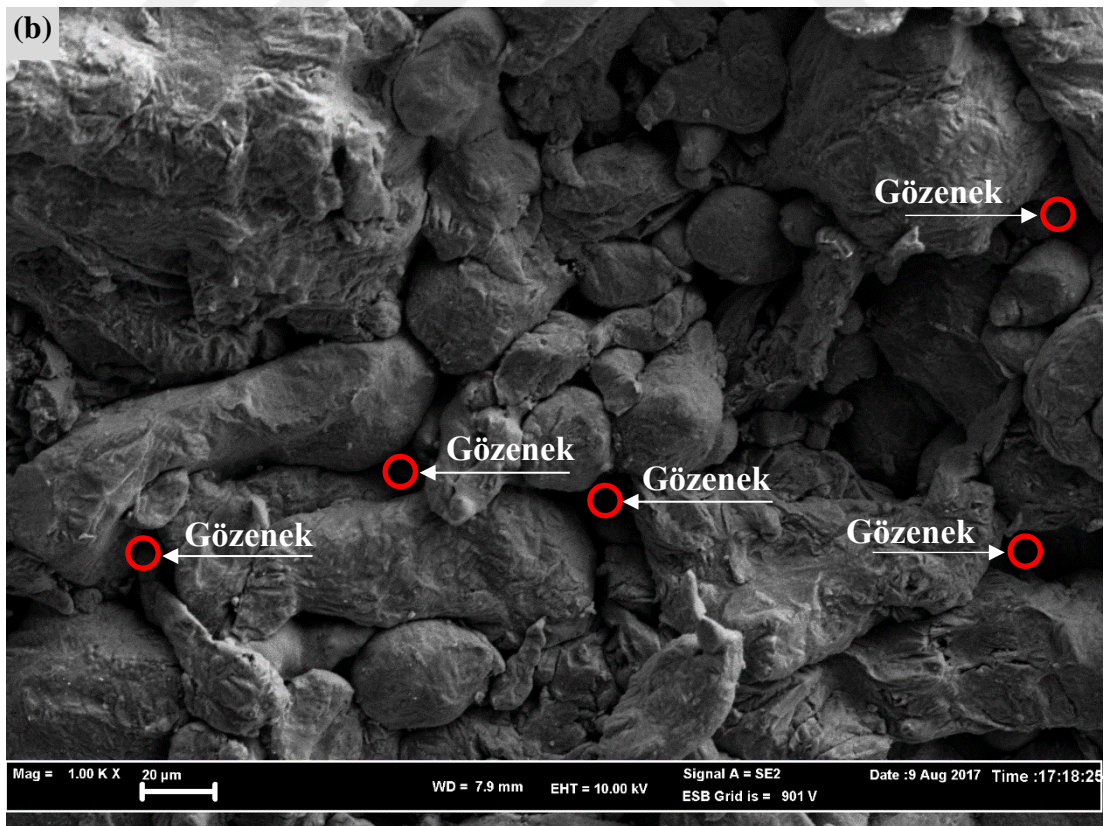
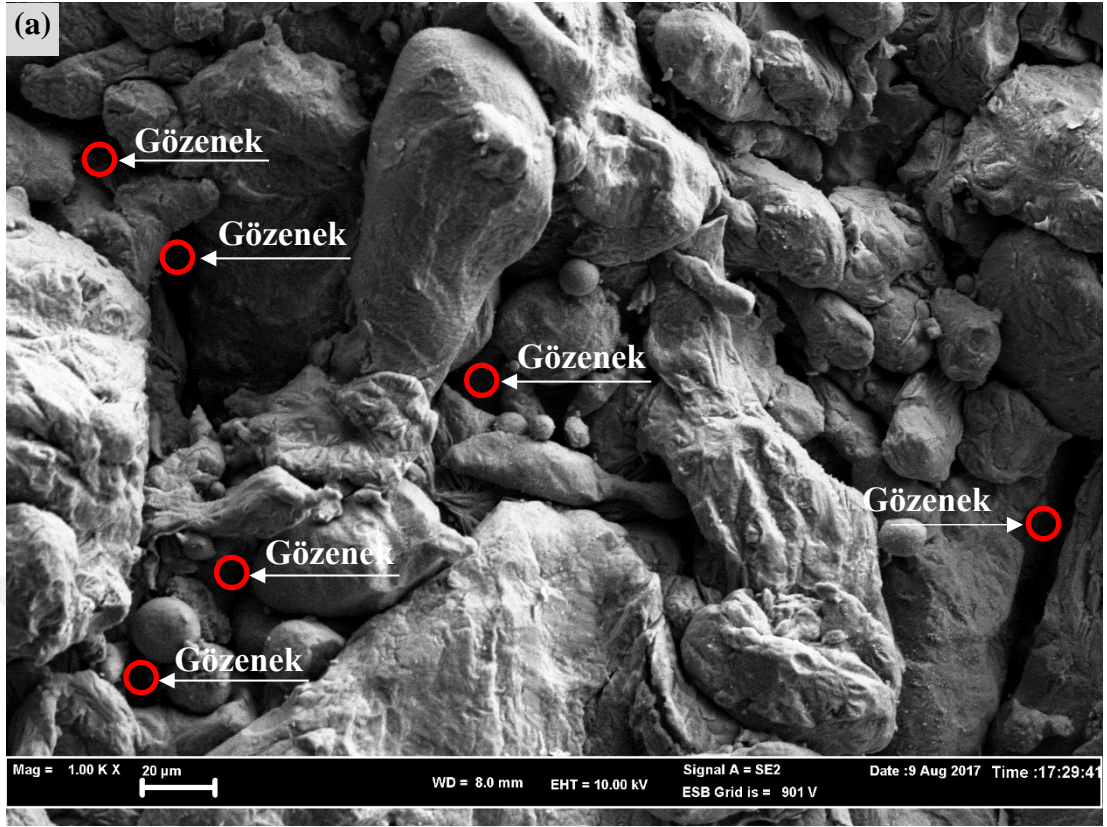
9.5.1. Sinterleme öncesi Ve Sinterleme Sonrası Yoğunluk Analizi

Preslenen tozların, presleme basıncına bağlı olarak yoğunluk değerlerindeki değişim Çizelge 9.5'de verilmiştir.

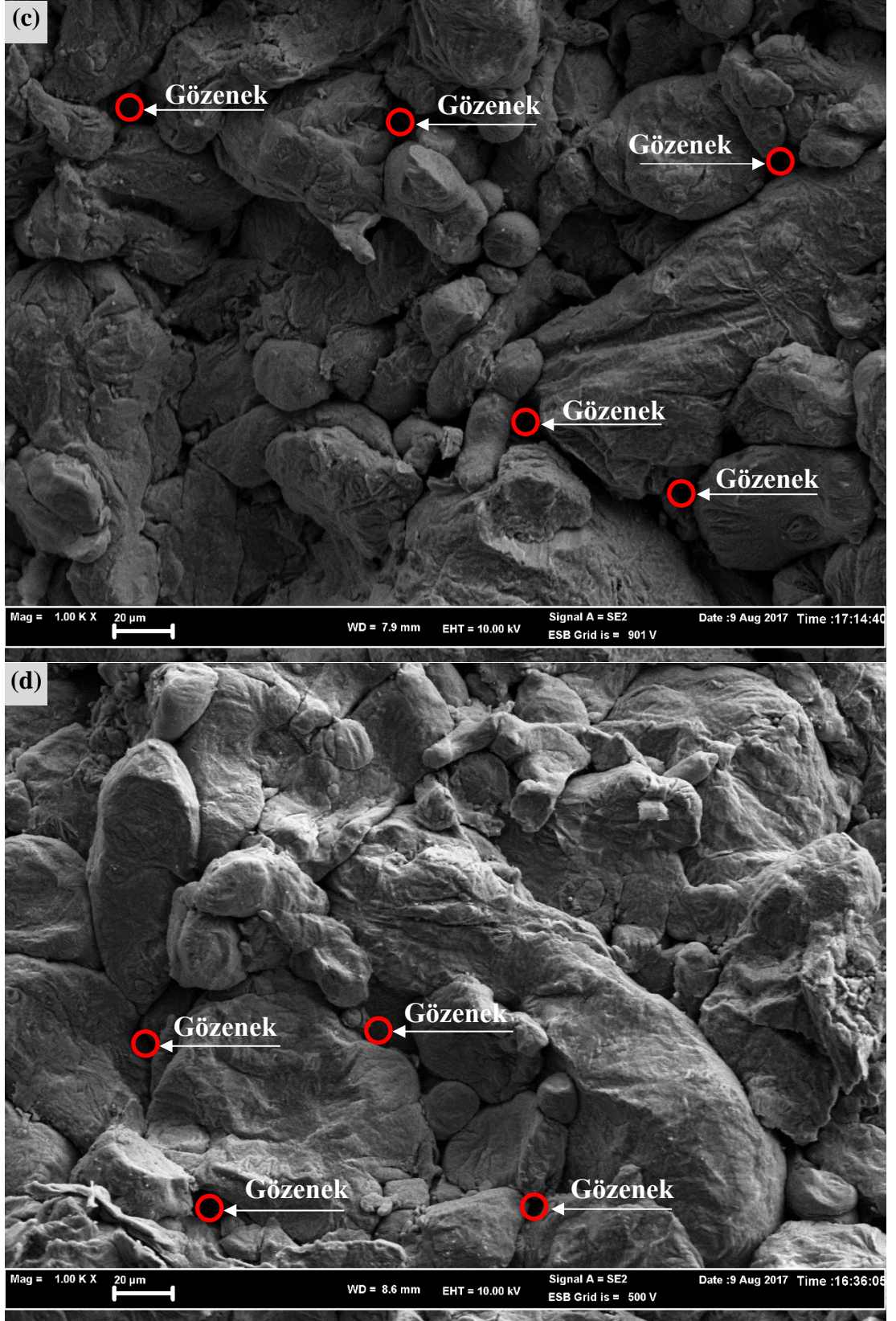
Çizelge 9.5. Numunelerin presleme sonrası yoğunlukları.

Numune No	Basınç (MPa)	Ağırlık (gr)	Yükseklik (cm)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Bağlı Yoğunluk (%)
1	300	2,0014	1,0070	1,3366	1,4974	82,73
2		2,0024	1,0010	1,3286	1,5071	83,27
3		1,9985	1,0040	1,3326	1,4997	82,86
4	400	1,9972	0,9570	1,2702	1,5723	86,87
5		2,0038	0,9580	1,2715	1,5759	87,07
6		2,0070	0,9550	1,2676	1,5834	87,48
7	500	2,0108	0,9390	1,2463	1,6134	89,14
8		2,0024	0,9360	1,2423	1,6118	89,05
9		1,9999	0,9340	1,2397	1,6132	89,13
10	600	2,0077	0,9050	1,2012	1,6714	92,34
11		2,0044	0,9040	1,1999	1,6705	92,29
12		2,0000	0,9010	1,1959	1,6724	92,40

Farklı basınçlarda (300, 400, 500 ve 600 MPa) preslenerek kütle haline getirilen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri, Şekil 9.15’de verilmiştir. Verilen SEM görüntülerinde presleme basıncının artması ile numunelerde oluşan gözeneklilik miktarlarının azaldığı ve bunun yanında var olan gözeneklerin hacimlerinin de küçüldüğü net bir şekilde görülmektedir. Tüm basınçlarda küçük boyutlu tozlar büyük boyutlu tozların aralarına girerek dolgu etkisi göstermiştir. Yine soğuk presleme ile mekanik bağlanma (kenetlenme) ve sıvanma meydana gelmektedir. Presleme basıncının artması ile mekanik bağlanmanın ve sıvanmanın derecesi artmıştır. Mekanik bağlanmanın yüksek olduğu bölümlerde ise soğuk kaynak vuku bulmuştur. Ayrıca presleme basıncı ile numunelerin yoğunluk oranlarının artışı verilen SEM görüntüleri ile açık bir şekilde desteklenmektedir.



Şekil 9.15. Presleme sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri a) 300 MPa b) 400 MPa c) 500 MPa d) 600 MPa.



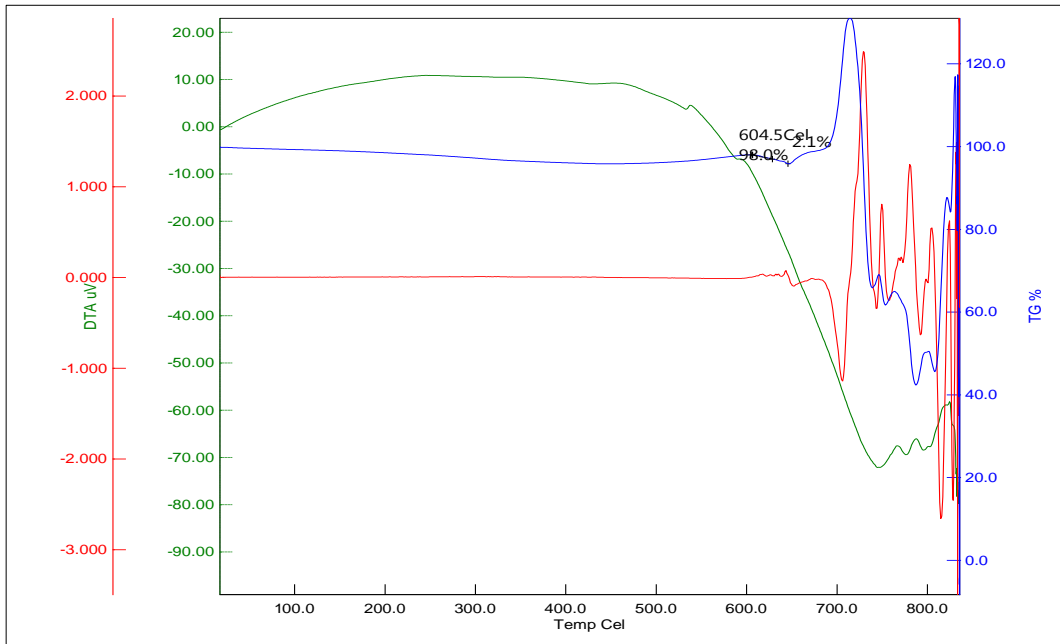
Şekil 9.15. (devam ediyor).

9.5.2. Tozların Sinterlenmesi

Dört farklı basınçta (300, 400, 500 ve 600 MPa) preslenenip kütle haline gelen peletler, üç farklı sıcaklıkta (500, 550 ve 600 °C) bir saat süre ile atmosfer kontrollü fırında sinterleme işlemine tabi tutulmuştur.

İdeal sinterleme sıcaklığının belirlenebilmesi amacıyla AZ91 alaşım tozunun Şekil 9.16'da grafiği verilen TG-DTG analizi yapılmıştır. Grafikte mavi eğri TG (Termografik Graviometri) kütle değişimini vermektedir. 600 °C'ye kadar ısınan malzemede herhangi bir değişim olmadığı ancak 604 °C sıcaklıktan sonra malzemenin egzotermik olarak bir değişim gösterdiği grafikten tespit edilmiştir. Kırmızı çizgi ile verilen DTG (Diferansiyel Termo Gravimetrik) incelendiğinde ise 650 °C'den sonra malzemede köpürme meydana gelmiştir, bu yüzden bu köpürme malzemede kütle artışına sebep olmuştur.

Bu sebeple farklı basınçlarda üretilen malzemelerin maksimum sinterleme sıcaklığının 600 °C olduğu TG-DTG analiziyle tespit belirlenmiştir. Optimum sinterleme sıcaklıklarını belirlenmesi amacıyla, Çizelge 9.6'da verilen parametreler uygulanmıştır.



Şekil 9.16. AZ91 tozunun TGA-DTA analiz grafiği.

Çizelge 9.6. Numunelerin sinterleme parametreleri.

Numune No	Presleme Basıncı (MPa)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
1	300	500
2		550
3		600
4	400	500
5		550
6		600
7	500	500
8		550
9		600
10	600	500
11		550
12		600

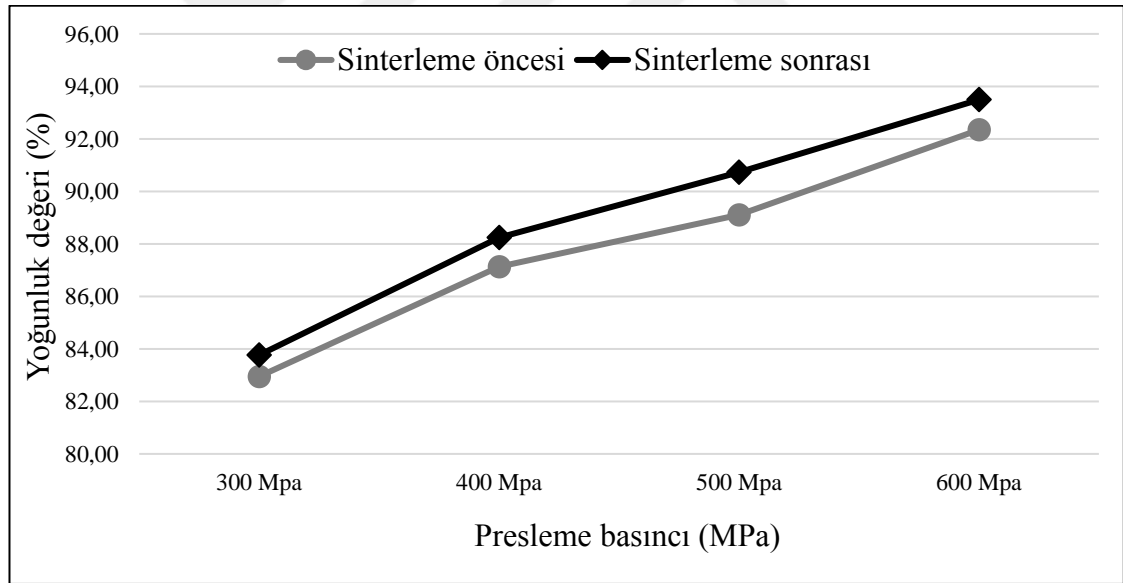
Kütle halinde, üç farklı sıcaklıkta sinterlenen AZ91 alaşımlarının sinterleme sonrası yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Kütle haline getirilen numunelerin sinterleme sonrası yoğunluk değerleri, Çizelge 9.7’de verilmiştir.

Çizelge 9.7. Sinterlenen AZ91 alaşımlarının yoğunluk sonuçları.

Numune No	Basıncı (MPa)	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Ağırlık (gr)	Yükseklik (cm)	Çap (cm)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Bağlı Yoğunluk (%)
1	300	500	1,9998	1,0100	0,6450	1,3200	1,5150	83,70
2		550	1,9901	1,0050	0,6450	1,3135	1,5151	83,71
3		600	1,9597	1,0030	0,6400	1,2906	1,5184	83,89
4	400	500	1,9957	0,9720	0,6400	1,2507	1,5956	88,16
5		550	1,9973	0,9740	0,6400	1,2533	1,5936	88,05
6		600	1,9691	0,9580	0,6390	1,2289	1,6024	88,53
7	500	500	2,0110	0,9600	0,6390	1,2314	1,6331	90,22
8		550	1,9899	0,9570	0,6350	1,2123	1,6415	90,69
9		600	1,9174	0,9310	0,6300	1,1608	1,6518	91,26
10	600	500	1,8895	0,9020	0,6300	1,1247	1,6800	93,31
11		550	1,8785	0,9010	0,6280	1,1163	1,6828	93,47
12		600	1,8709	0,8980	0,6270	1,1090	1,6869	93,70

Çizelge 9.7’de verilen yoğunluk sonuçları incelendiğinde 300 MPa presleme basıncı ve 500 °C sıcaklıkta sinterlenen numunenin bağıl yoğunluğu %83,70 olarak ölçülmüştür. Ancak, 600 MPa presleme basıncı ve 600 °C sıcaklıkta sinterlenen numunenin bağıl yoğunluğu %93,70 olarak ölçülmüştür. Çizelge 9.7 incelendiğinde artan presleme basıncı ve artan sinterleme sıcaklığı ile numunelerin bağıl yoğunluğunun arttığı belirlenmiştir.

Farklı basınçlarda kütle haline getirilen ve daha sonra farklı sıcaklıklarda sinterlenen AZ91 alaşımlarının yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası yoğunluk değerleri her numune için ayrı ayrı belirlenmiştir. Her numune için ayrı ayrı belirlenen yoğunluk değerlerinin, uygulanan her basınç için ortalama yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası yoğunluk değerleri, Şekil 9.17’de verilmiştir.

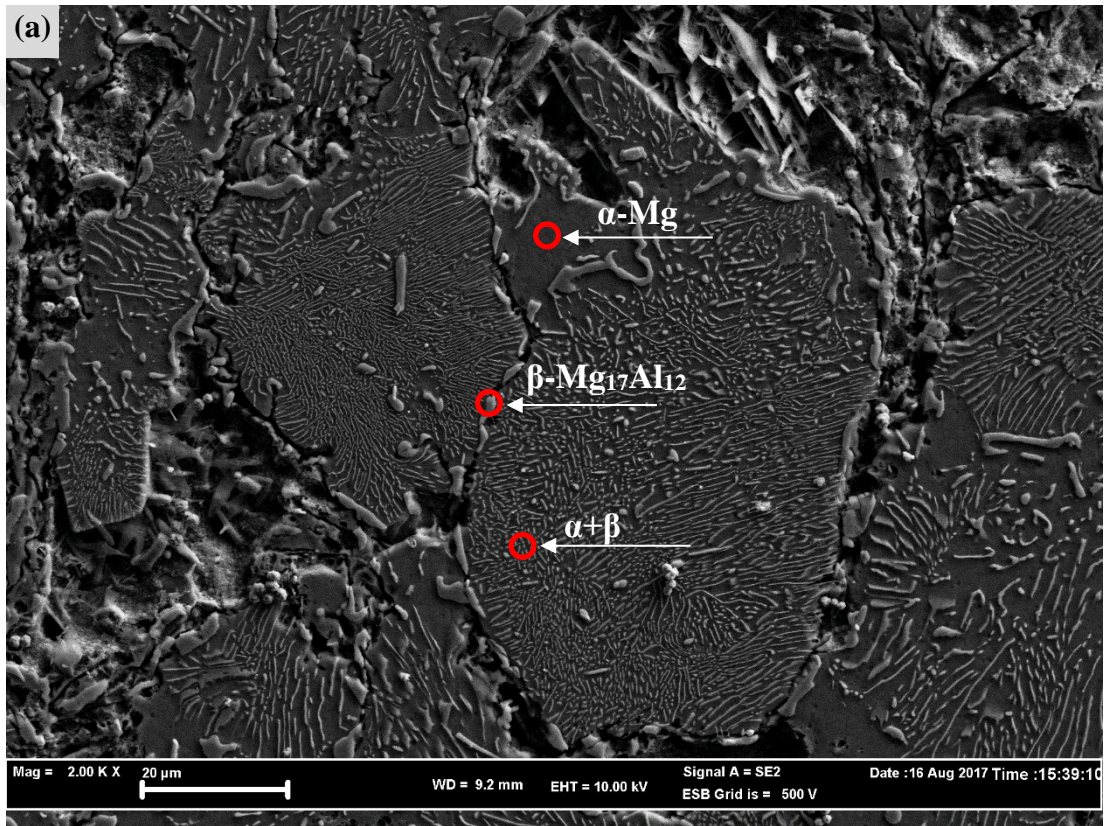


Şekil 9.17. AZ91 alaşımlarının sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası yoğunluk değişimleri.

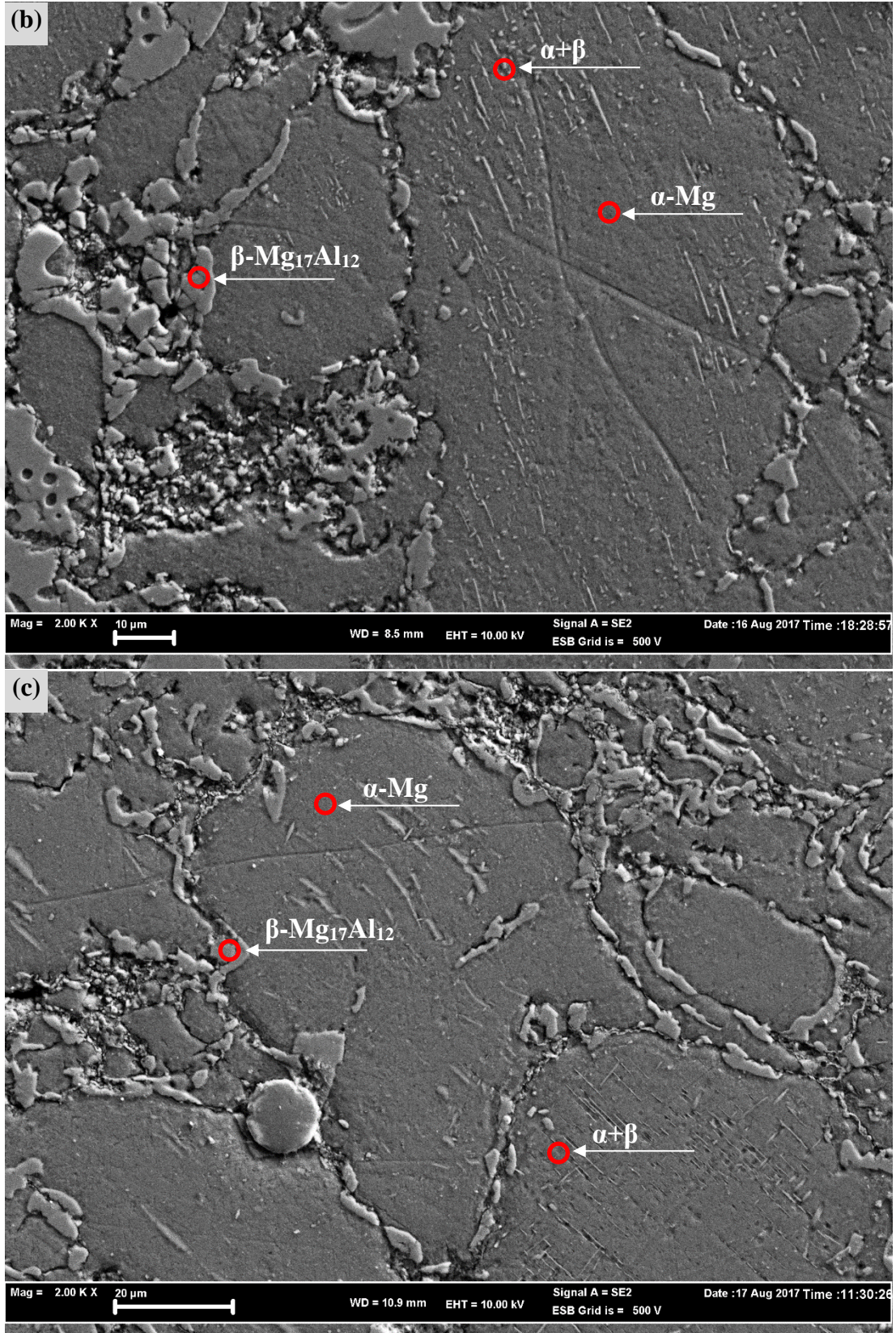
Şekil 9.17’de verilen yoğunluk değişimleri incelendiğinde, gaz atomizasyonu ile üretilen AZ91 magnezyum alaşımının optimum preslenebilirlik ve sinterlenebilirlik değerleri 600 MPa basınç ve 550 °C sıcaklığında olduğu anlaşılmaktadır.

9.5.2.1. Sinterleme Sonrası SEM-EDS Sonuçları

AZ91 Mg alaşımının 300 MPa basınç ve 500, 550 ve 600 °C sıcaklıklarda üretilen numunelerin SEM görüntüleri, Şekil 9.18'de verilmektedir. AZ91 alaşımının SEM görüntüleri incelendiğinde, yapıda α -Mg matris fazının yanı sıra, diğer fazların tane sınırları boyunca dağıldığı Şekil 9.18'de görülmektedir. Cizek ve arkadaşları [91] yaptıkları çalışmada AZ91 alaşımında α -Mg matrisin yanı sıra β ($Mg_{17}Al_{12}$) intermetaliti ve $\alpha+\beta$ ötektiği oluştuğunu rapor etmişlerdir.



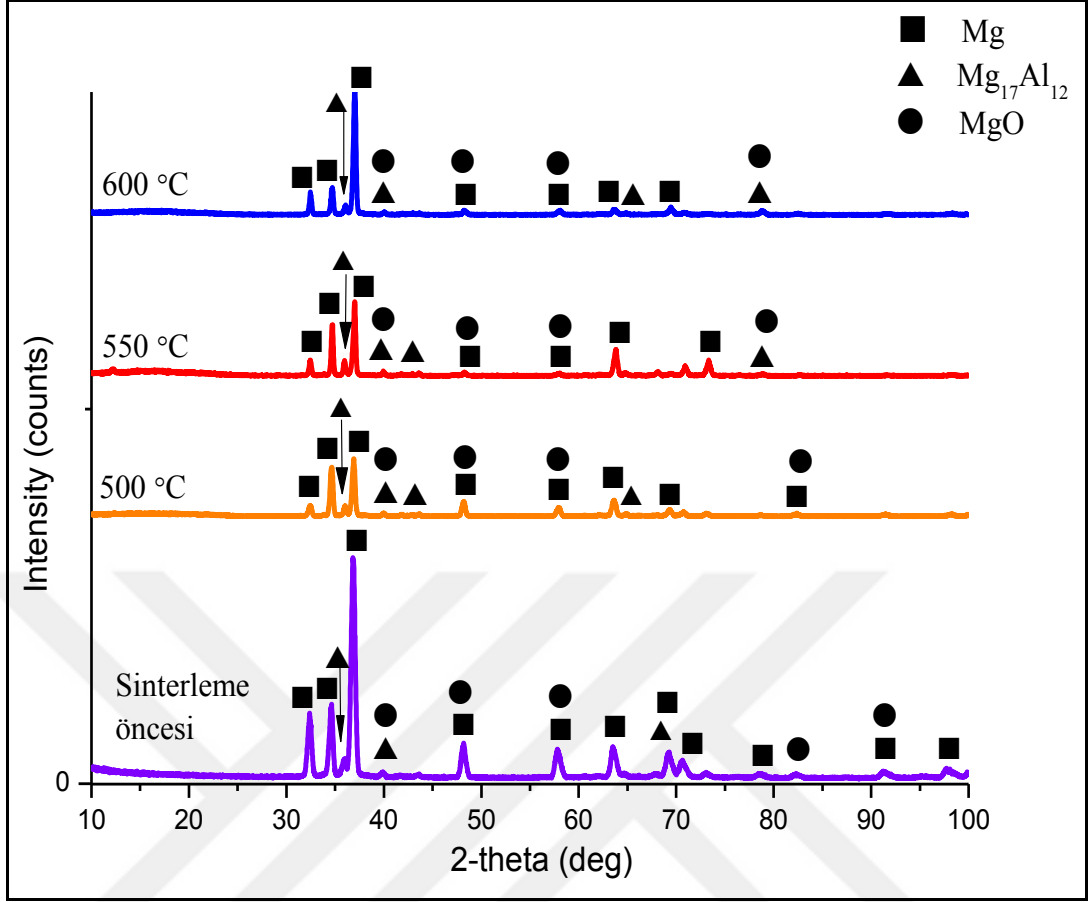
Şekil 9.18. Sinterleme sonrası SEM görüntüleri a) 500 °C b) 550 °C c) 600 °C.



Şekil 9.18. (devam ediyor).

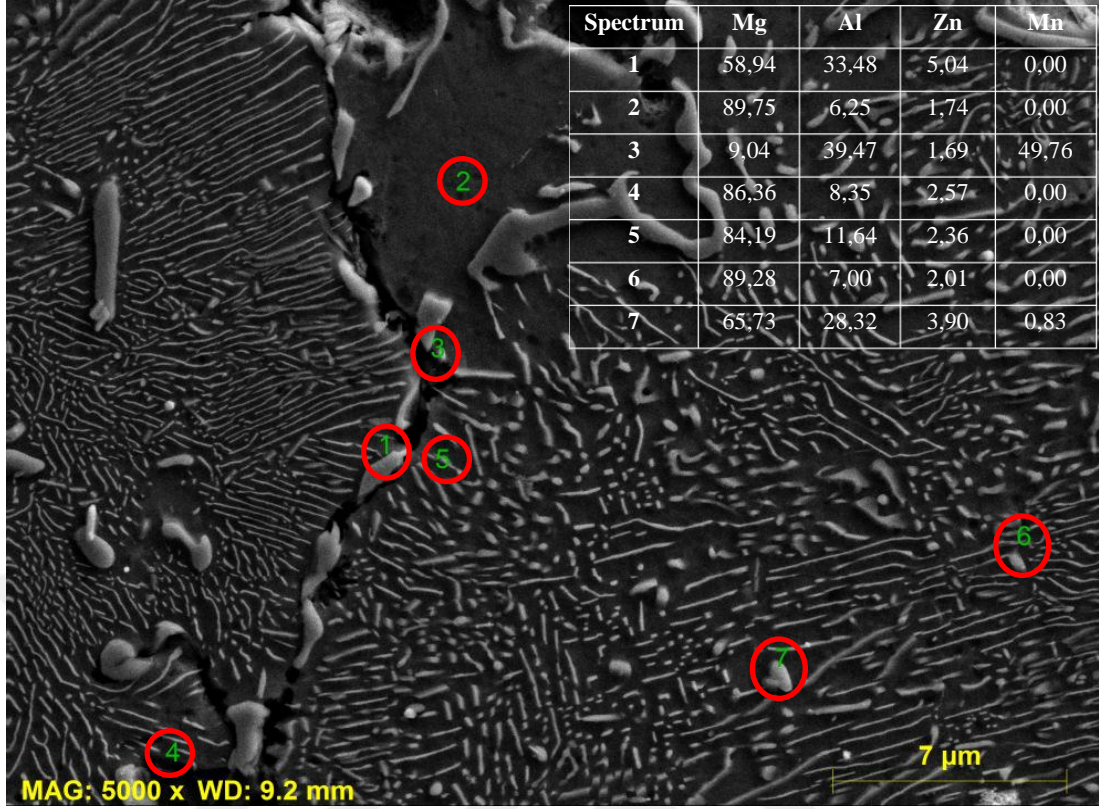
Şekil 9.18’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, 500 °C sıcaklıkta sinterlenen numunede $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazın yapı içerisinde çoğunlukla homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Fakat 550 ve 600 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde ise, $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazın homojen olarak değil tane sınırlarında biriktiği ve hatta irileştiği görülmektedir. $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazın tane sınırlarında yoğunlaştığı ve büyüme sebebi, artan sıcaklıkla birlikte $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazın bir kısmının α -Mg fazı içerisinde çözüldüğü ve bir kısmında tane sınırlarında oluşan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazı ile birleşerek büyüdüğü düşünülmektedir. Bunun yanısıra, $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının yüksek sıcaklıklarda (500 ve 600 °C) mikroyapıda homojen olarak dağılmadığı mikrosertlik analizi sonuçlarıyla da desteklenmektedir. 500 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazı homojen olarak dağıldığı için bu numunelerin sertlik değerleri yüksek çıkmıştır. Fakat 550 °C sıcaklıkta ve özellikle de 600 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde ise intermetalik fazın α -Mg fazı içerisinde çözünmesi ve tane sınırlarında irileşmesi sonucu sertlik değerlerinin düştüğü şeklinde yorumlanabilir.

Oluşan fazların belirlenebilmesi için XRD analizi yapılmış ve α -Mg, β ($Mg_{17}Al_{12}$) ve $\alpha+\beta$ fazlarının varlığı tespit edilmiştir (Şekil 9.19). Ayrıca verilen grafik incelendiğinde, sinterleme öncesinde alınan XRD analizi sonucunda Mg pikleri net bir şekilde görülmektedir. Ancak sinterleme sonrası alınan XRD sonuçlarında Mg piklerinin derecesinde hafif bir düşüş gözlemlenmektedir. Bunun yanısıra, XRD sonuçları incelendiğinde, sinterleme sonrası alınan grafiklerde $Mg_{17}Al_{12}$ fazının daha da netleştiği açık bir şekilde görülmektedir. Sinterleme sonrasında Mg fazının azalması malzeme içerisinde oluşan kristalleşmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

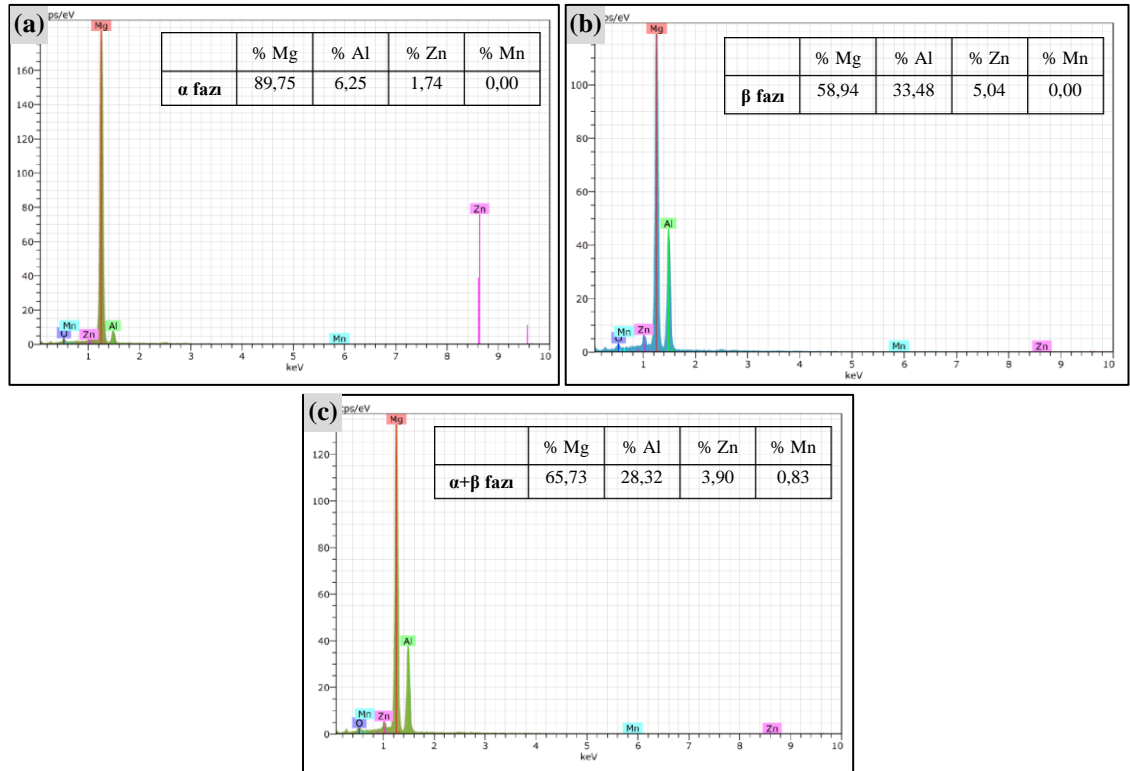


Şekil 9.19. AZ91 alaşımının sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası XRD sonuçları.

Yapılan SEM-EDS analiz ile mikroyapıda α -Mg matrisin yanı sıra tane sınırları boyunca uzanan β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazı ve tane sınırlarında ince bir faz olarak $\alpha+\beta$ ötektiği gözlemlenmiştir (Şekil 9.20).



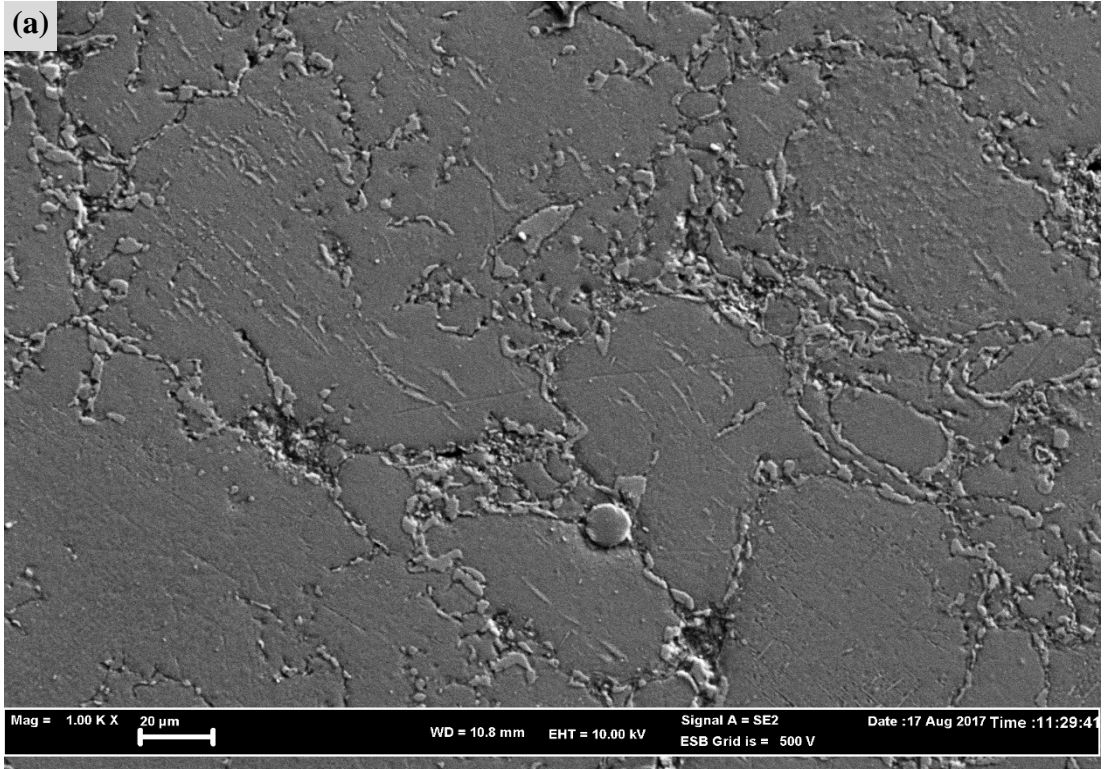
Şekil 9.20. Sinterleme sonrası SEM-EDX görüntüsü.



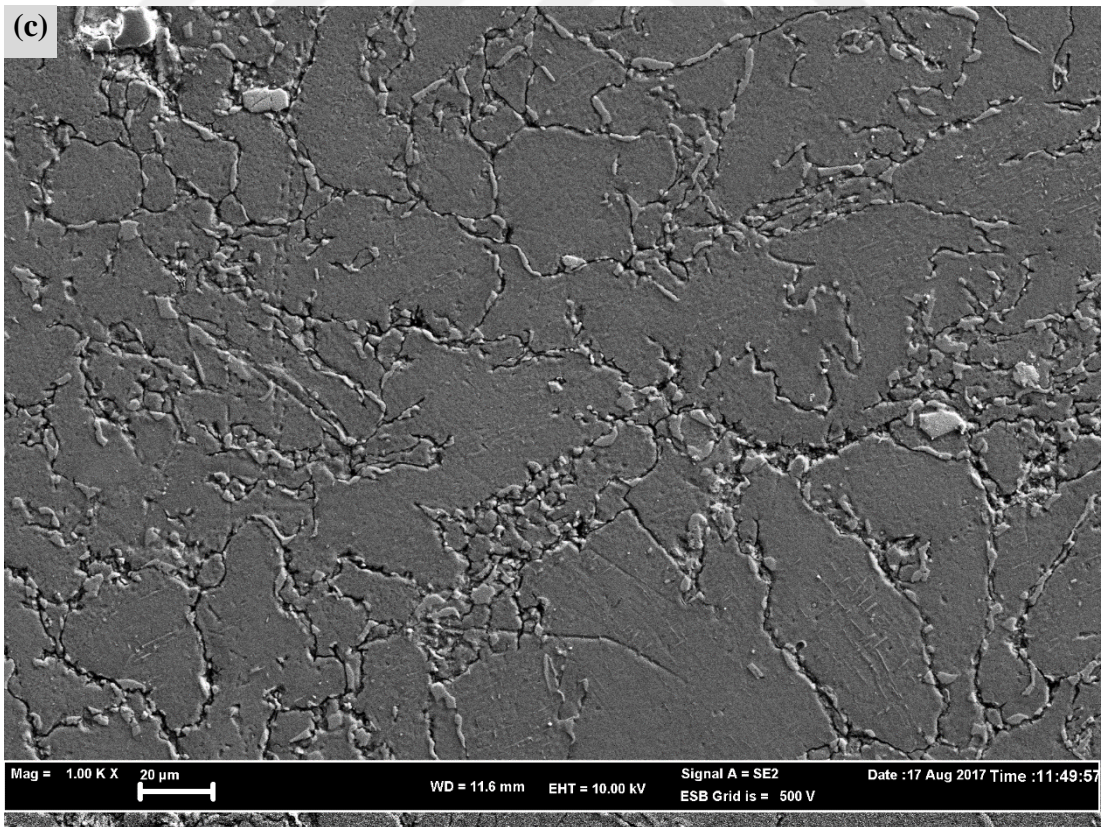
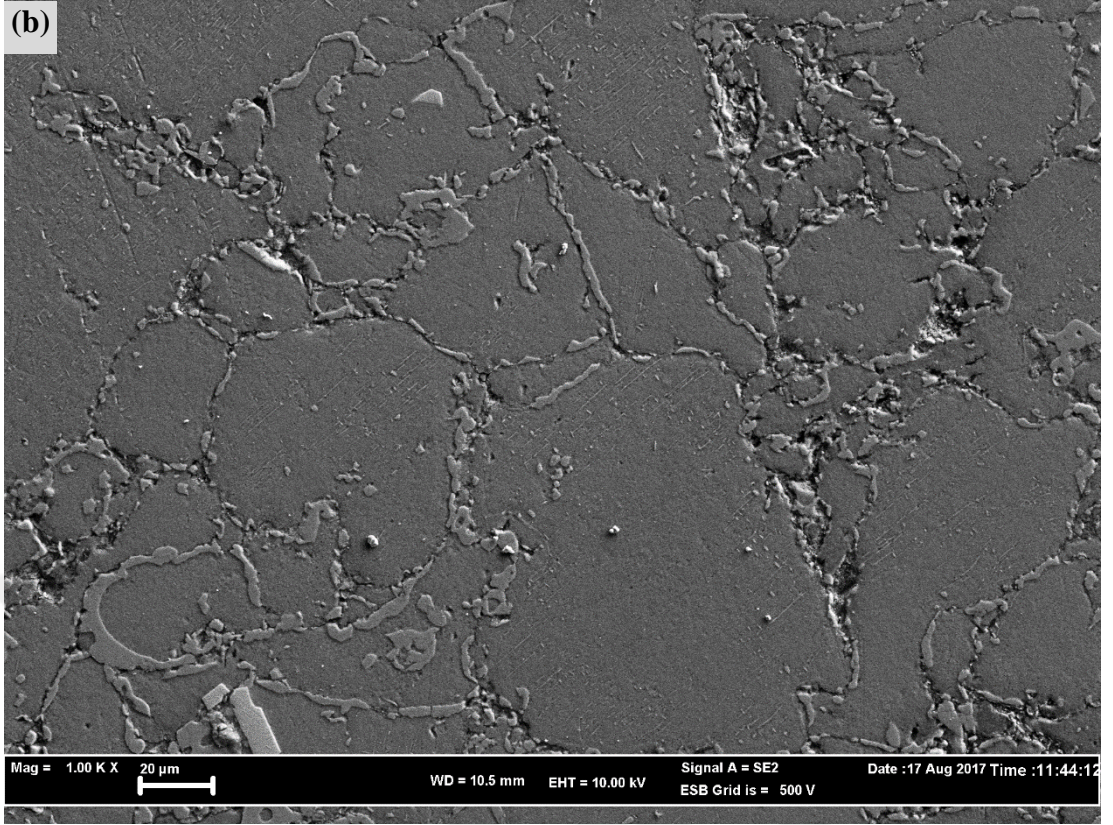
Şekil 9.21. EDX analizleri a) α fazı EDX analizi b) β fazı EDX analizi c) $\alpha+\beta$ fazı EDX analizi.

Yapılan EDS analizleri sonucu tane sınırlarında alüminyumca zenginleşen α -Mg olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9.21). Soğuma sırasında Zn'nun yüksek segregasyon eğiliminden ve katılaşmanın ilk evrelerinde katı-sıvı ara yüzeyinden dolayı tane sınırlarında zenginleşmesine neden olmaktadır. Ünal ve arkadaşları [26], yaptıkları bir çalışmada Zenginleşen Al, α -Mg ile ötektik yapıyı veya β fazını oluşturduğunu rapor etmiştir. Tane sınırlarında β fazını oluşturmak için yeterli kompozisyona ulaşmayan bölge alüminyumca zengin α -Mg fazı meydana gelmektedir.

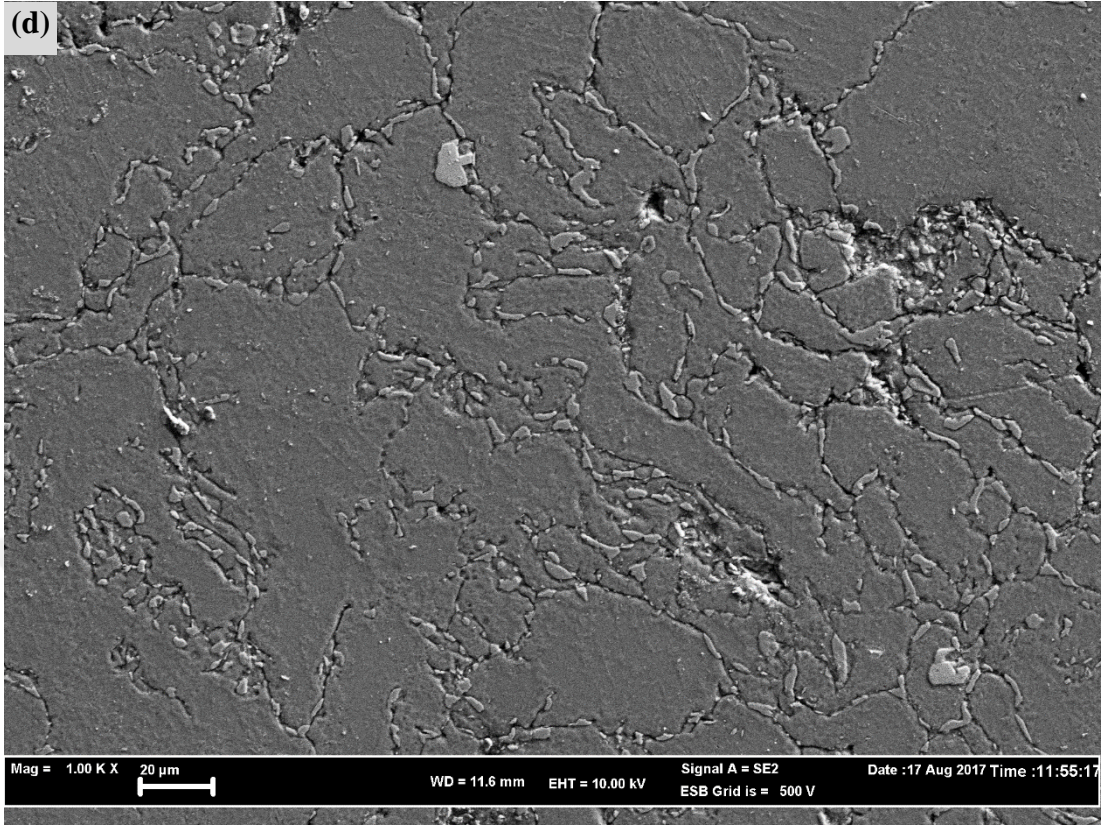
AZ91 Mg alaşımının 600 °C sıcaklık ve 300, 400, 500 ve 600 MPa basınçlarda ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri Şekil 9.22'de görülmektedir. Verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, tane sınırlarında oluşan β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazı basıncın artması ile yüzeye doğru yayılmaya başladığı görülmektedir. Bunun yanısıra basıncın etkisi tanelerin küçüldüğü net bir şekilde görülmektedir. Bu durum, basıncın artmasıyla tozlarda meydana gelen plastik deformasyonun artması ile açıklanabilir. Belirli bir değerden sonra tozlar şekil değiştirmeye karşı direnç gösterir ve tozlarda parçalanmalar meydana gelir.



Şekil 9.22. Sinterleme sonrası SEM görüntüleri a) 300 MPa b) 400 MPa c) 500 MPa d) 600 MPa.



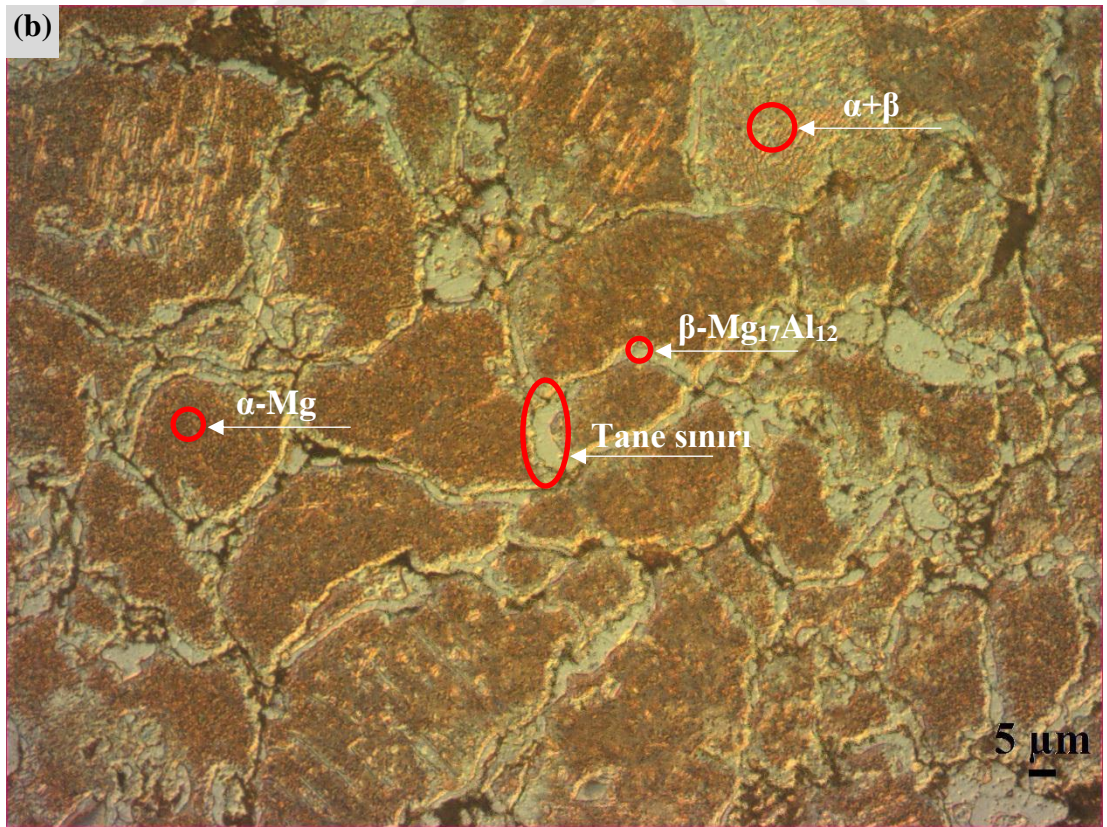
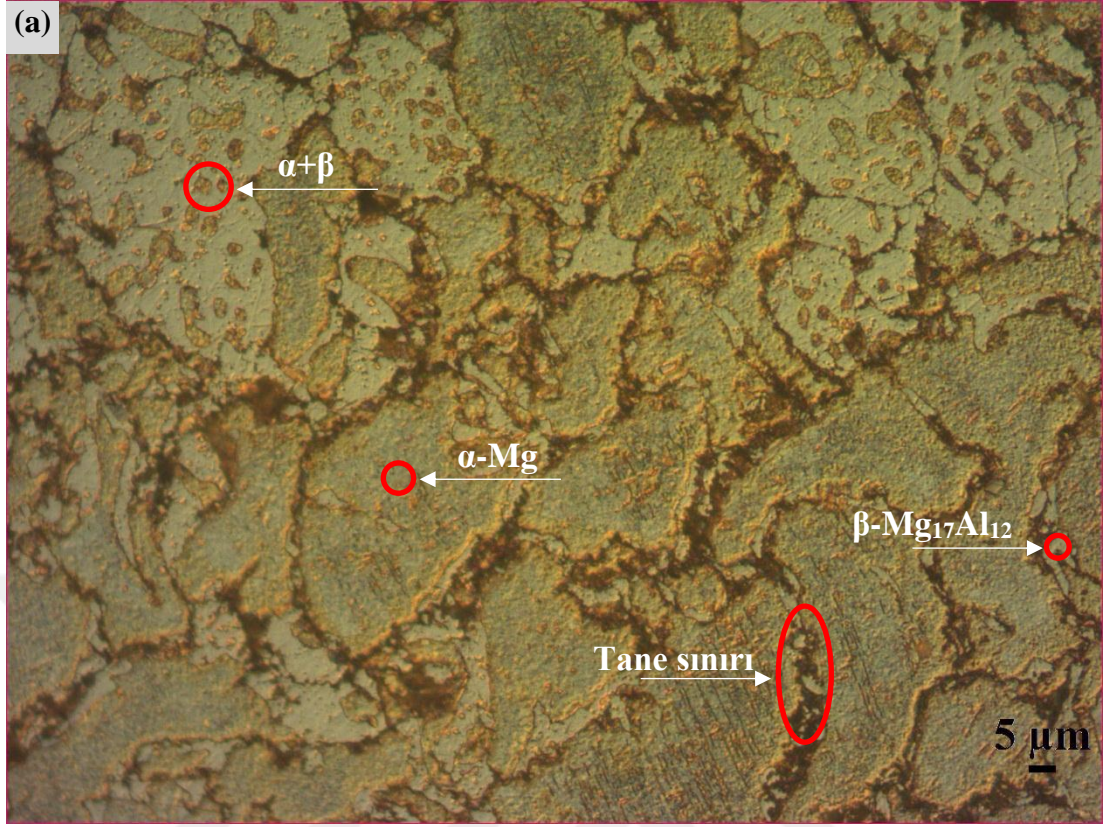
Şekil 9.22. (devam ediyor).



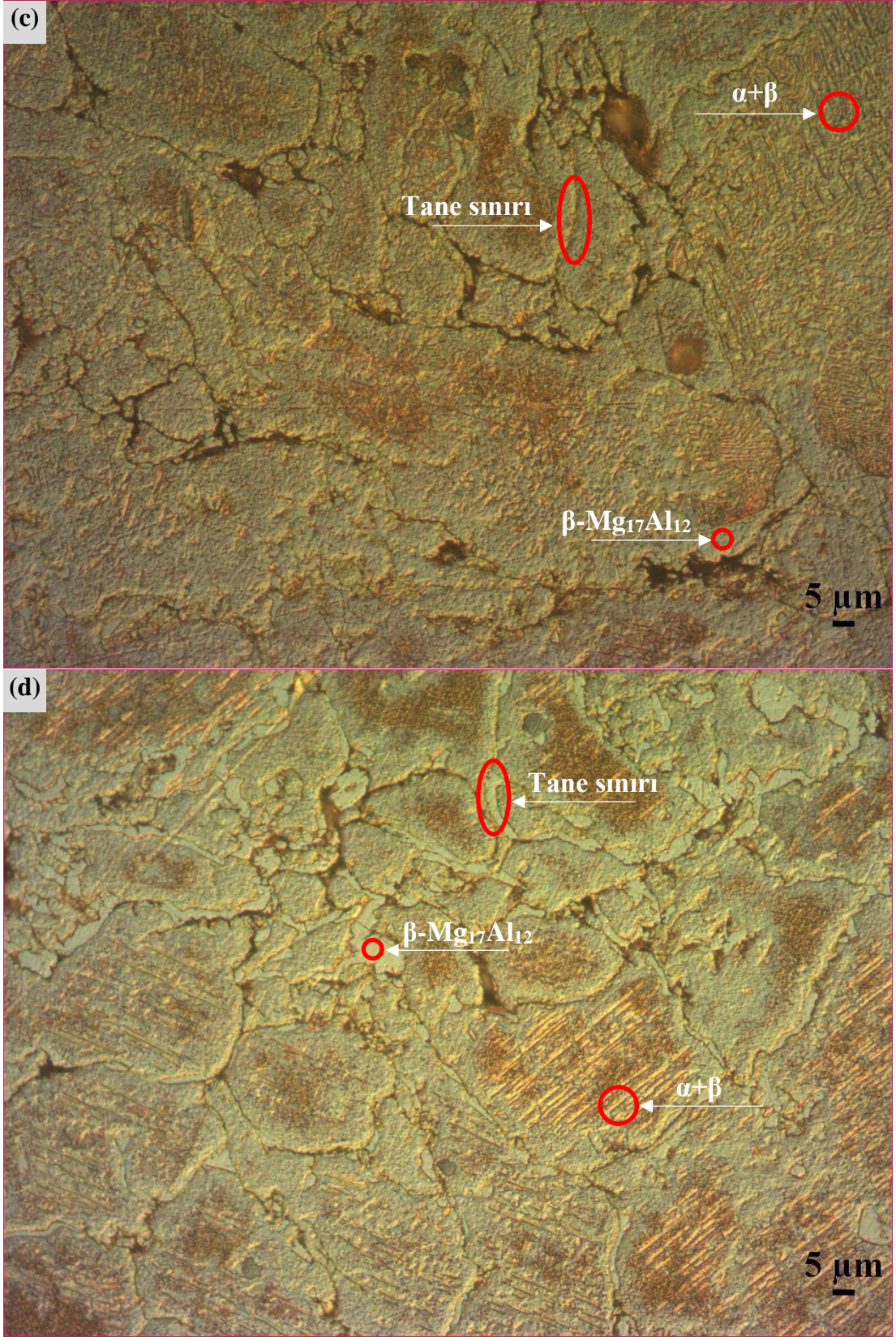
Şekil 9.22. (devam ediyor).

9.5.2.2. Sinterleme Sonrası Optik Mikroskop Görüntü Analizi

AZ91 Mg alaşımı preslenen tozların, 550 °C sıcaklık ve 300, 400, 500 ve 600 MPa basınçlarda ile üretilen numunelerin optik mikroskop görüntüleri. Şekil 9.23'de verilmektedir.



Şekil 9.23. Sinterleme sonrası optik mikroskop görüntüleri a) 300 MPa b) 400 MPa c) 500 MPa d) 600 MPa.

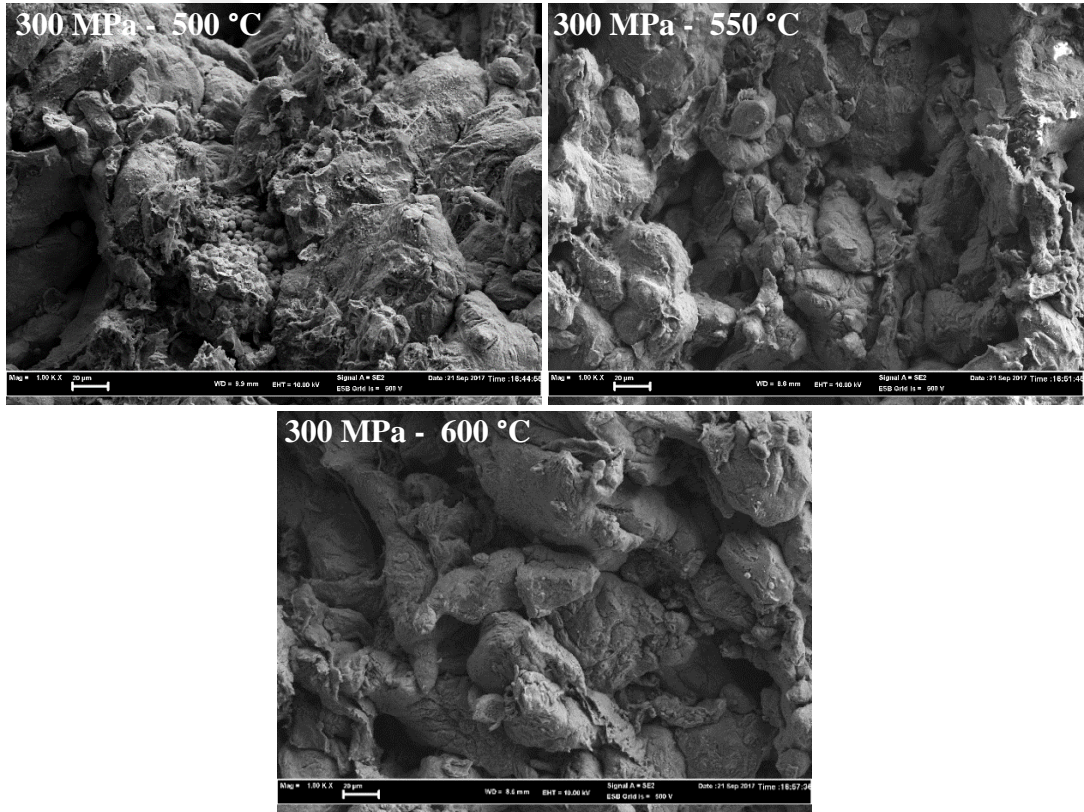


Şekil 9.23. (devam ediyor).

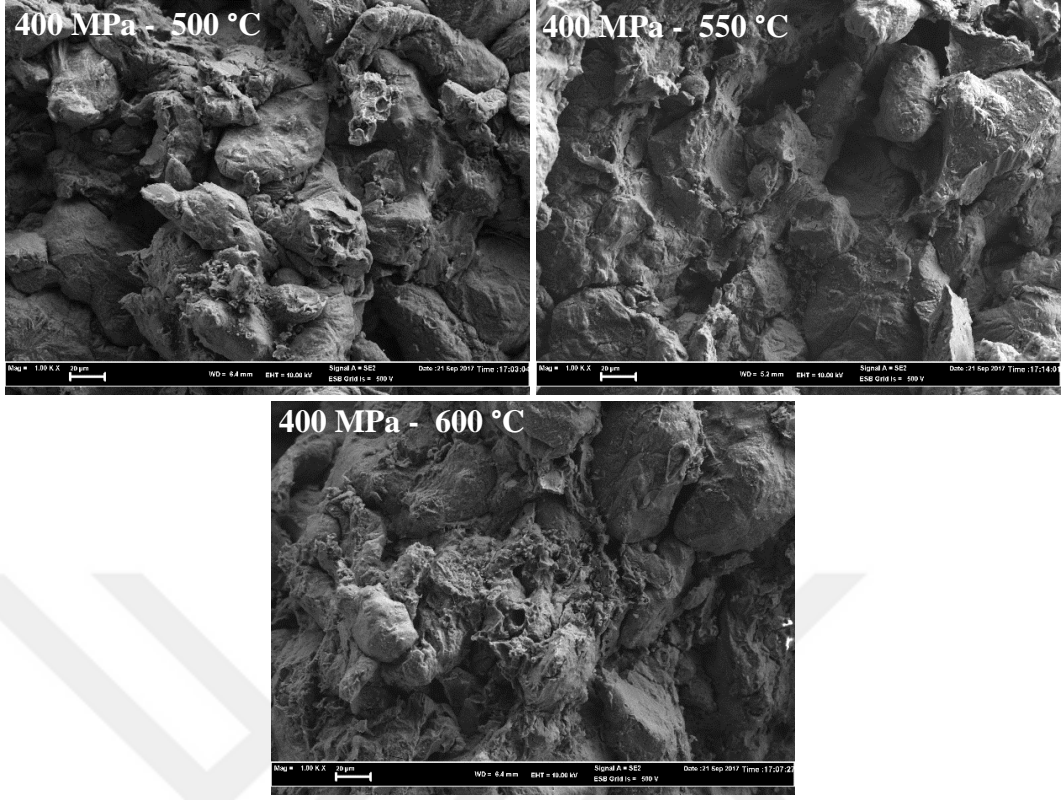
Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, tane sınırlarında oluşan β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazının, basıncın artması ile arttığı açıkça görülmektedir. Ayrıca β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazının taneleri çepeçevre sardığı verilen görüntülerde net bir şekilde görülmektedir. Bunun yanısıra, basıncın etkisi ile β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazının sadece tane sınırlarında değil aynı zamanda yapının geneline yayıldığı gözlemlenmektedir.

9.5.2.3. Sinterleme Sonrası Kırık Yüzey SEM Analizi

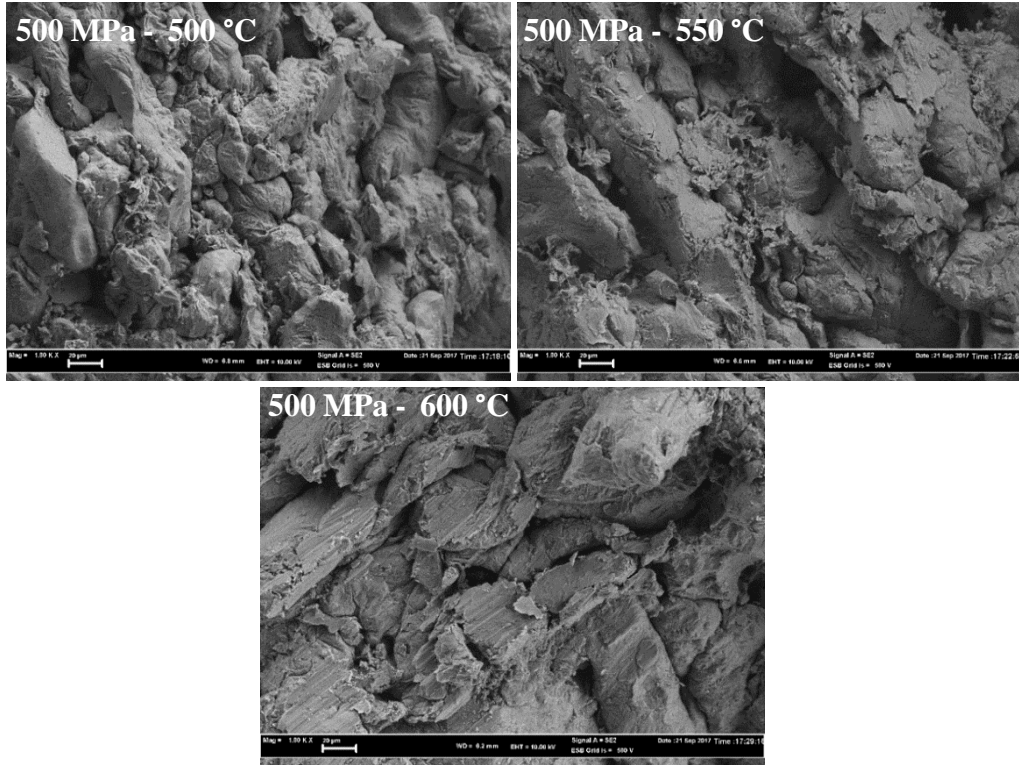
Şekil 9.24, Şekil 9.25, Şekil 9.26 ve Şekil 9.27’de farklı basınçlarda soğuk preslenmiş numunelerin üç farklı sıcaklıkta sinterlendikten sonra kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir.



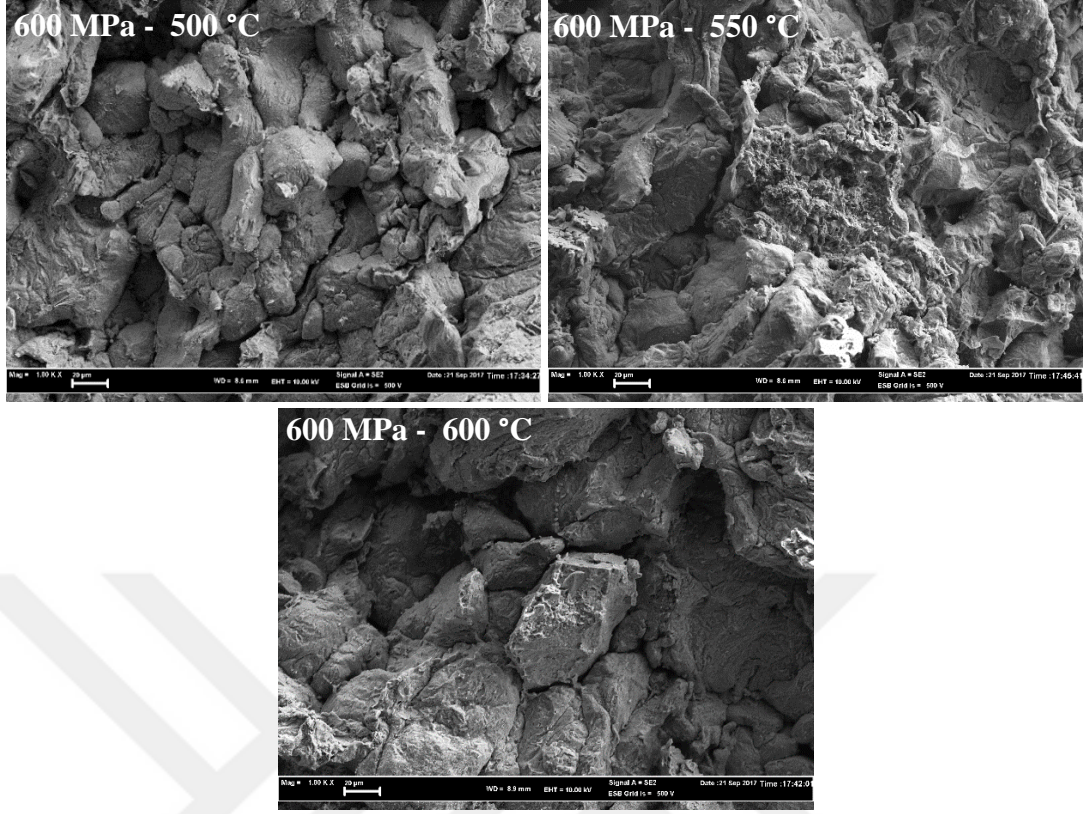
Şekil 9.24. Sinterleme sonrası (300 MPa) kırık yüzey SEM görüntüleri.



Şekil 9.25. Sinterleme sonrası (400 MPa) kırık yüzey SEM görüntüleri.



Şekil 9.26. Sinterleme sonrası (500 MPa) kırık yüzey SEM görüntüleri.



Şekil 9.27. Sinterleme sonrası (600 MPa) kırık yüzey SEM görüntüleri.

Tüm numunelerde genel olarak, sinterleme sıcaklığının artmasıyla daha yoğun ve kompakt bir yapının oluştuğu Şekil 9.24 - 9.27’de verilen SEM görüntülerinde açıkça görülmektedir. Bu yoğun yapının sebebi, sinterleme sıcaklığının artması ile $D = D_0 \exp(-Q/RT)$ eşitliğine göre tozların birbirine olan difüzyonundan kaynaklanmaktadır [129]. Burada D difüzyon katsayısı, Q aktivasyon enerjisi, R Boltzmann sabiti ve T sıcaklıktır. Artan sinterleme sıcaklığı, toz parçacıklar arasında katı bağ oluşumunu arttırmış, parçacıkların birbirine olan difüzyonunu hızlandırmıştır [129]. Aslında, magnezyum alaşımı AZ91 için ana mukavemet arttırıcı faz $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazıdır. Hacim merkezli kübik yapısı ile $Mg_{17}Al_{12}$, hegzagonal sıkı paket yapıya sahip magnezyum matrisi ile uyumsuzdur. Bu uyumsuzluk ise Mg ile $Mg_{17}Al_{12}$ arayüzeyinde kırılma yol açmaktadır [130]. Bu yüzden, Mg ve $Mg_{17}Al_{12}$ arayüzeyinde mikro çatlakların başlamasına ve hatta $Mg_{17}Al_{12}$ parçacıklarının da çatlamasına yol açmaktadır. Hegzagonal sıkı paket kristal kafes sistemine sahip olan Magnezyum, sınırlı kayma sisteminden dolayı şekillendirilebilirliği düşüktür. Tane sınırları AZ91 magnezyum alaşımında başlıca engellerdir. Bir malzemedeki tane sınırı

miktarı arttıkça, dislokasyonların karşılaştığı engel miktarı da arttığı için, daha fazla sayıda dislokasyon hareketsiz kalarak malzeme güçlenmektedir [131-135]. Düşük sinterleme sıcaklıklarında (özellikle 500 °C) kırılma Mg ile Mg₁₇Al₁₂ arayüzeyinde meydana gelirken, sinterleme sıcaklığı arttıkça kırılma hem Mg ile Mg₁₇Al₁₂ arayüzeyinde hem de Mg₁₇Al₁₂ parçacıklarından gevrek bir şekilde meydana gelmiştir. Taneler arasındaki ayrılma Mg₁₇Al₁₂ intermetalığının varlığı sebebi ile yetersiz sinterlemeden kaynaklanmaktadır. Çok az oranda AZ91 alaşım tozu taneleri arasında boyun verme suretiyle kopma olayı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi AZ91 alaşımının düşük sertliğe sahip olması ve kopma anında söz konusu bölgelerin aşırı plastik deformasyona uğrayarak kopmuş olmalarındandır. Farklı basınçlardaki kırık yüzeylerde, basınç arttıkça sıcaklıkta olduğu gibi yoğun bir yapı oluşmuştur. Fakat 600 MPa basınçta yüksek yoğun bir yapı beklenirken daha gevşek bir yapı görülmektedir. Bu durum tozun preslenebilme sınırının aşılmasıyla, tozun gösterdiği direnç ile ifade edilebilir.

9.5.2.4. Sinterleme Sonrası Mikrosertlik Analizi

Farklı presleme basıncı (300, 400, 500 ve 600 MPa) ve farklı sinterleme sıcaklıklarında (500, 550 ve 600 °C) üretilen numunelerin presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığının sertlik üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, 0,5 kg yük (HV_{0,5}) altında ve 15 saniye bekletme zamanı uygulanarak alınmıştır. Sertlik değerleri her bir numuneden 5 adet sertlik değerinin ortalaması hesaplanarak belirlenmiştir. Çizelge 9.8'de sertlik sonuçları verilmektedir.

Çizelge 9.8. Sinterleme sonrası sertlik değerleri.

	Basınç (MPa)	Sıcaklık (°C)	1.Ölçüm (HV0,5)	2.Ölçüm (HV0,5)	3.Ölçüm (HV0,5)	4.Ölçüm (HV0,5)	5.Ölçüm (HV0,5)	Ortalama Değer (HV0,5)
1	300	500	64,3	62,2	61,3	65,7	66,6	64,02
2		550	65,1	62,4	61,3	62,9	65	63,34
3		600	66,9	64,6	60,4	59,2	64,7	63,16
4	400	500	61,6	61,2	61,9	61	61,5	61,44
5		550	61,8	60,9	61	60,3	61,7	61,14
6		600	59,4	59	64,2	62,8	58,9	60,86
7	500	500	66,6	58,3	52,5	54,7	52,1	56,84
8		550	55,2	53,6	61,6	51,7	59,8	56,38
9		600	52,8	53,4	57,2	58	56,6	55,60
10	600	500	56,5	54,7	56,9	53,9	54,5	55,30
11		550	52,6	53,2	56,5	57,6	55,4	55,06
12		600	51,2	56,5	57,4	56,8	52,4	54,86

Çizelge 9.8’de verilen sertlik sonuçları incelendiğinde, presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak numunelerin sertlik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ortaya çıkan en yüksek sertlik değeri 64,02 HV_{0,5} ile 300 MPa presleme basıncı ve 500 °C’ sinterleme sıcaklığında ölçülürken, 600 MPa presleme basıncı ve 600 °C sinterleme sıcaklığında 54,86 HV_{0,5} ile en düşük sertlik değeri elde edilmiştir.

Sinterleme sıcaklığının artmasına bağlı olarak sertlik değerlerinin düşmesi Şekil 9.22’deki SEM görüntüleri ile açıklanabilir. Şekil 9.22’deki sinterlenmiş numunelerin yüzey görüntüleri incelendiğinde, 500 °C sıcaklıkta üretilen numunede Mg₁₇Al₁₂ arafazının tüm yüzeye homojen bir şekilde yayıldığı, oysaki 600 °C sıcaklıkta üretilen numunede ise Mg₁₇Al₁₂ arafazının tane sınırlarında konumlandığı görülmektedir. Dolayısıyla, numunelerin sertlik ölçümleri tüm yüzeylerden homojen bir şekilde yapıldığı için sertlik ölçüm sonuçları artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak azalmaktadır.

Diğer taraftan kütle haline getirilen numunelerin Şekil 9.19'daki sertlik değerleri incelendiğinde en düşük sertlik değerinin 83 HV_{0,025} olduğu görülmektedir. Bu değer sinterleme sonrası sertlik değerlerinin oldukça üzerinde bir değerdir. Sinterlenmiş numunelerin sertlik düşmesi, atomize tozların hızlı katılaşması ile iç enerjileri yüksek olduğundan sinterleme sırasında enerji boşalması yapısal sertliğin düşmesine sebep olmuştur diye düşünülmektedir.



BÖLÜM 10

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

10.1. GENEL SONUÇLAR

Farklı parametrelerin uygulandığı gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen AZ91 tozunun karakterizasyonu üzerine yapılan bu çalışmada, aşağıda elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

1. Bu çalışmada öncelikli olarak Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde gaz atomizasyon ünitesi tasarımı ve imalatı yapılmıştır.
2. Tasarımı ve imalatı yapılan bu gaz atomizasyonu ünitesinde, tozların üretiminde yaygın olarak kullanılan gaz atomizasyonu yöntemiyle magnezyum alaşımı AZ91 tozunun üretimi gerçekleştirilmiştir.
3. Gaz atomizasyonu yöntemiyle toz üretiminde sıvı metal sıcaklığının, tozların boyut, dağılım, şekil ve yüzey görünümüne çok az etkisinin olduğu anlaşılmıştır.
4. Nozul çapı ve gaz basıncı arttırıldığında toz boyutunun küçüldüğü ve toz şeklinin ise karmaşık, ligament, pulsü ve çubuksu yapıdan damlamsı ve küresele doğru değiştiği görülmüştür. Bunun yanısıra, basınç artışı ergiyiğe daha fazla enerjinin aktarılmasını sağladığı için, üretilen tozlar daha küçük ortalama toz boyutuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapılan gaz atomize magnezyum alaşımı AZ91 tozu üretiminde en küçük toz boyutu 820 °C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 35 bar basınçta 66,3 µm olarak ölçülmüştür.

5. Atomizasyon sırasında toz ve damlacıkların çarpışması ile farklı şekillerde uydulaşmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca üretilen tozların yüzeylerinin gaz basıncına bağlı olarak değiştiği ve dentritik veya hücreli dentritik yapıda olduğu görülmüştür.
6. Yapılan XRD analizleri sonucunda mikroyapıda α (Mg ana matris) fazı β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazı gözlemlenmiştir.
7. XRF sonucunda, üretilen AZ91 tozunun ve külçe (ana malzeme) malzemenin kimyasal bileşiminin yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir.
8. Üretilen tozların sertliğinin gaz basıncının artmasına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Üretilen AZ91 tozunun en yüksek sertlik değeri 35 bar gaz basıncında 111 HV_{0,025} olarak ölçülmüştür.
9. Farklı basınçlarda (300, 400, 500 ve 600 MPa) preslenip ön şekillendirilen numunelerin yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Yapılan bu yoğunluk ölçümleri sonucunda presleme basıncının artması ile numunelerde oluşan gözeneklilik miktarlarının azaldığı ve bunun yanında var olan gözeneklerin hacimlerinin de küçüldüğü, kırık yüzey SEM görüntülerinde görülmüştür. Tüm basınçlarda küçük boyutlu tozlar büyük boyutlu tozların aralarına girerek dolgu etkisi yapmıştır. Buna ek olarak, presleme basıncı ile numunelerin yoğunluk oranlarının artışı net olarak belirlenmiştir. Presleme sonrasında en yüksek bağlı yoğunluk değeri, 600 MPa basınçta % 92,40 olarak ölçülmüştür.
10. Farklı basınçlarda preslenerek üretilen malzemelerin maksimum sinterleme sıcaklığının belirlenebilmesi için, TG-DTG analizi yapılmıştır. Yapılan bu analiz sonucunda sinterleme sıcaklığının maksimum 600 °C olduğu belirlenmiştir.
11. Üç farklı sıcaklıkta (500, 550 ve 600 °C) sinterlenen numunelerin, sinterleme işleminden sonra bağlı yoğunluklarının arttığı belirlenmiştir. Sinterleme işlemi

sonrası en yüksek bağıl yoğunluk değerine değerine sahip olan numune 600 MPa basınç ve 600 °C sıcaklıkta % 93,70 olarak ölçülmüştür.

12. Sinterleme işlemi sonrası XRD analizi sonuçlarında yapı içerisinde α -Mg, β ($Mg_{17}Al_{12}$) ve $\alpha+\beta$ fazlarının varlığı görülmüştür. Fakat, sinterleme öncesinde alınan XRD analizinde Mg pikleri net bir şekilde görülürken, sinterleme sonrası alınan XRD analizinde Mg piklerinin derecesinde hafif bir düşüş görülmüştür. Bunun yanısıra, sinterleme sonrası XRD analizinde artan sinterleme sıcaklığı ile $Mg_{17}Al_{12}$ fazının daha da netleştiği görülmüştür. Sinterleme sonrasında Mg fazının azalması malzeme içerisinde oluşan kristalleşmeden kaynaklandığı tespit edilmiştir.
13. Sinterlenen malzemelerin kırılmaları, düşük sinterleme sıcaklıklarında taneler arası şeklinde meydana gelirken, sinterleme sıcaklığı arttıkça sünek şekilde meydana geldiği sinterleme sonrası kırık yüzey SEM görüntülerinde görülmüştür. Farklı basınçlarda preslenen numunelerin kırık yüzeylerinde, basınç arttıkça sıcaklıkta olduğu gibi yoğun bir yapıya rastlanmıştır. Fakat 600 MPa basınçta yüksek yoğun bir yapı beklenirken daha gevşek bir yapı görülmüştür. Yüksek presleme basıncında, parçacıkların deformasyonu ile iç enerjileri artarak sinterleme sırasında hacimsel artışa yol açtığı düşünülmektedir.
14. Sinterleme sıcaklığının artmasına bağlı olarak numunelerin sertlik değerleri düşmüştür. Bu sertlik değerlerindeki düşüşün sebebi, sinterleme sıcaklığı ve atomizasyon sırasında hızlı katılaşmadan dolayı gevrek bir yapının oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Düşük sıcaklıklarda sinterlenen numunelerde $Mg_{17}Al_{12}$ arafazının tüm yüzeye homojen bir şekilde yayıldığı, oysaki 600 °C sıcaklıkta üretilen numunede ise $Mg_{17}Al_{12}$ arafazının tane sınırlarında biriktiği görülmüştür. Dolayısıyla, numunelerin sertlik ölçümleri tüm yüzeylerden homojen bir şekilde yapıldığı için sertlik ölçüm sonuçları artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak azalmıştır. Kütle haline getirilen numunelerde en yüksek sertlik değeri 64,02 HV_{0,5} ile 300 MPa presleme basıncı ve 500 °C' sinterleme sıcaklığında ölçülmüştür.

10.2. ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar doğrultusunda AZ91 magnezyum alaşımının toz üretimi ile ilgili olarak ileri de aşağıda belirtilen çalışmalar yapılabilir;

1. Tasarımı ve imalatı yapılan gaz atomizasyon ünitesinin eksiklikleri giderilerek, özellikleri geliştirilmiş, yüksek performanslı tam otomatik bir ünite ile toz üretimine yönelik daha iyi sonuçlar alınabilir.
2. Farklı magnezyum alaşım türleri de kullanılmak suretiyle toz üretimi gerçekleştirilebilir.
3. AZ91 malzemesi için farklı nozul tipi ve tasarımları kullanılarak, toz üretimine yönelik ortaya çıkabilecek farklılıklar karşılaştırılabilir.
4. Toz metalurjisi yöntemi ile Mg ve alaşımlarının özelliklerinin geliştirilmesi için üretilen tozların içerisine çeşitli elementel toz ilaveleri ile güçlendirme mekanizması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Kandemir, K. ve Çetin C. A., “Otomotiv endüstrisi için magnezyum alaşımlarının kullanım potansiyeli”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9.1, 37-45 (2003).
2. Uygur, İ. U. ve Saruhan, H., “Aluminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8.1, 167-174 (2004).
3. Ünal, R., "Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi değişkenlerinin araştırılması", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara (1995).
4. Angers, R., Tremblay, R. and Dube, D., “Formation of irregular particles during centrifugal atomization of AZ91 alloy”, *Materials Letters*, 33: 13-18 (1997).
5. Lagutkin, S., Achelis, L., Sheikhaliev, S., Uhlenwinkel, V. and Srivastava, V., “Atomization process for metal powder”, *Materials Science and Engineering*, 383 (A): 1–6 (2004).
6. I, O. D., Vasilieva, G. I. Sameljuk, A. V. and Krajnikov, A. V., “Water atomised aluminium alloy powders”, *Materials Science and Engineering*, 383 (A): 7–13 (2004).
7. Liu, X., Xie, H., Wang, L., Luo, J. and Cai, Y., “Production of Fe-Si-Al-Ni-Ti soft magnetic alloy powder by inert-gas atomization”, *Chinese Materials Conference*, 27: 1426-1433 (2012).
8. Kim, T. S. and Chae, H. J., “Consolidation of gas atomized mg alloy powders”, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 18: 769-772 (2008).
9. Karagöz, Ş., Yamanoğlu, R., ve Atapek, Ş. aH., “Metalik toz işleme teknolojisi ve prosesleme kademeleri açısından parametrik ilişkiler”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt:XXII, Sayı:3, 77-87 (2009).
10. Öztürk, S., Arslan, F. ve Öztürk, B., “Su soğutmalı döner disk atomizasyonu ile üretilen AA 2014 alaşımı tozlarının soğuma hızına atomizasyon parametrelerinin etkisi”, *Toz Metalurjisi Konferansı*, İzmir, 44-52 (2002).
11. Gürmen, S. ve Elbin, B., “Nanopartiküller ve üretim yöntemleri – 1”, *Metalurji Dergisi*, 150: 31-38 (2008).
12. Erarслан, Y. and Akça, C., “Wear behavior of AZ91D magnesium composite”, *Sigma J Eng & Nat Sci*, 33 (3): 465-471 (2015).

13. Bao, C. M., Dahlborga, U., Adkins, N. and Calvo-Dahlborg, M., "Structural characterisation of Al-Ni powders produced by gas atomisation", *Journal of Alloys and Compounds*, 481: 199–206 (2009).
14. Zdujic, M., and Uskokovic, D., "Production of atomized metal and alloy powders by the rotating electrode process", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 29.9: 673-683 (1990).
15. Ünal, R., "The influence of the pressure formation at the tip of the melt delivery tube on tin powder size and gas/melt ratio in gas atomization method", *Journal of Materials Processing Technology*, 180: 291–295 (2006).
16. Aydın, M. ve Ünal, R., "Laval tipi yeni bir nozul tasarımı ile metal tozu üretimi ve üretim değişkenlerinin etkisinin incelenmesi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (1): 69-76 (2007).
17. Sofuoğlu, A., "Investigation of the production parameters of gas atomised aluminium and tin powders: experimental and numerical study", *International Symposium on Computing in Science & Engineering. Proceedings*, GEDIZ University, Engineering and Architecture Faculty, p. 86. (2013).
18. Akgün, M., Özger, G. ve Ulaş H. B., "Döküm yöntemiyle üretilmiş AZ91 magnezyum alaşımının işlenebilirliğinin yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(5): 323-328 (2014).
19. Persson, F., Eliasson, A. and Jönsson, P., "Prediction of particle size for water atomised metal powders: parameter study", *Powder Metallurgy*, 55 (1): 45-53 (2012).
20. Uslan, İ. ve Küçükarslan S., "Kalay tozu üretimine gaz atomizasyonu parametrelerinin etkisinin incelenmesi", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 25, No (1): 1-8 (2010).
21. Duygulu, Ö., Yücel, O. ve Kaya A. A., "Magnezyum levha alaşımlarının üretimi ve geliştirilmesi", *itüdergisi/d*, Cilt:9, Sayı:4, 133-138 (2011).
22. Dunkley, J., "Blown to atoms: how to make metal powders", *Metal Powder Report*, 57 (11): 18-19 (2002).
23. Denigris, J., "Higher quality, better process economics: using continuous particle sizing to improve gas atomization processes", *Metal Powder Report* 70 (6): 297-299 (2015).
24. Oğuz, Ş., Öztürk, Z., Uzun, E., Kurt, A. ve Boz, M., "Gaz atomizasyonu yöntemi ile kalay tozu üretiminde gaz basıncının toz boyutu ve şekline etkisi", *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elâzığ, 565-568 (2011).

25. Öztürk, F. ve Kaçar, İ., “Magnezyum alaşımları ve kullanım alanlarının incelenmesi”, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 1 Sayı 1: 12-20 (2012).
26. Ünal, M., Koç, E., Türen, Y., Gül, F. ve Candan E., “AZ91 magnezyum alaşımının döküm ve mekanik özelliklerine silisyum ilavesinin etkisi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, (2009).
27. Buytoz, S., Dagdelen, F., Islak, S., Kok, M., Kir, D., and Ercan, E., "Effect of the TiC content on microstructure and thermal properties of Cu–TiC composites prepared by powder metallurgy.", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 117.3, 1277-1283 (2014).
28. Boz, M., 'Toz Metalurjisi İle Üretilmiş Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (1999).
29. Boz, M. ve Kurt, A., "Toz metal fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma performansı üzerine çinkonun etkisi.", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21.1 (2006).
30. Ersümer, A., ‘Toz Metalürjisi’, *İ.T.Ü. Makine Fakültesi*, İstanbul (1970).
31. Demirkesen, E., Kompozit Malzemeler Ders Notları, *İstanbul Teknik Üniversitesi* (2003).
32. Newkirk, J. W. and Kosher, R. A., “Designing with Powder Metallurgy Alloys”, *in Handbook of Mechanical Alloy Design*, Eds. Totten, G.E., Xie, L. and Funatani, K.M., Dekker, New York (2004).
33. Sarıtaş, S., and Doğan, C., “Metal powder production by centrifugal Atomization”, *Int. J. Powder Metallurgy*, 30, 419 – 427 (1994).
34. Clyne, T. W., “Metal Matrix Composites: Matrices and Processing”, *in Encyclopaedia of Materials: Science and Technology*, Ed. Mortensen, A., Elsevier (2001).
35. Doğan, C. ve Sarıtaş, S., “Döner Disk Atomizasyon Yöntemiyle Kurşun Tozu Üretimi”, *4. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, Eylül, 307-316 (1990).
36. Aydın, M. ve Ünal, R., “Laval tipi yeni bir nozul tasarımı ile metal tozu üretimi ve üretim değişkenlerinin etkisinin incelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (1): 69-76 (2007).
37. Gökmeşe, H. and Bostan B., "Fabrication and characterization of nanoparticle MgO/B4C composite by mechanochemical method", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* 0954408916629106, (2016).

38. İnternet: Toz Üretimi, http://mf.dumlupinar.edu.tr/~runal/toz/tozuretimi/powder_product.html, (2008).
39. Graf, W., Potschke, J., Sibum, H. and Weiglin, W., “Production of Gas-Atomized Metal Powders”, *Metall*, 45(4), 348-354 (1991).
40. Yaşa, A., “Düz Dişlilerin Modellenmesi Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması”, *Celal Bayar Üniv. Yüksek Lisans Tezi*, 14-30 (2008).
41. German, R. M., “Powder metallurgy Science”, 2nd edition, *Metal Powder Industries Federation*, USA (1994).
42. Turan, H., “Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara (1993).
43. İnternet: Türk Toz, <http://www.turktoz.gazi.edu.tr> (2017).
44. Baksan, B. ve Gürler, R., “Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması”, *Osmangazi Üniversitesi Doktora Tezi*, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir (2003).
45. Singh, S. N. and Ojha, S. N., “Microstructural investigation on rapidly solidified cast iron powders”, *Int.J. Rapid Solidification*, 7, 201 – 217 (1992).
46. Gerking, L., “Powder from metal and ceramic melts by laminar gas streams at supersonic speeds”, *Powder Metallurgy Int.*, 25(2), 59 – 65 (1993).
47. Ünal R. ve Aydın, M., “Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemi ile gaz atomizasyon nozulu modellenmesi”, *TÜBİTAK Destekli Proje*, Dumlupınar Üniv. Mühendislik Fak. Makina Mühendisliği Bl, Kütahya, Türkiye (2008).
48. Hohmann, M. Jonsson, S., “New concepts for inter gas atomization Plants”, *Metal Powder Report*, 47 – 50 (1990).
49. Lawley, A., “Atomization: The production of metal powders”, *Metal Powder Industries Federation*, Princeton, New Jersey, USA (1992).
50. Dombrowski, N., and Johns, W. R., “The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets”, *Chemical Engineering Science*, 18, 203 – 214 (1963).
51. Ünal, A., “Production of rapidly solidified aluminium alloy powders by gas atomization and their applications”, *Powder Metallurgy*, 33(1), 53 – 64 (1990).
52. Yule, A. J. and Dunkley, J. J., “Atomization of melts”, Oxford Univ. Press, New York, USA (1994).
53. Matei, G., Matei, D. and Moraru, V., “Studies on the metal and alloys atomization methods”, *1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, 67-89 (1996).

54. Mates, S. P. and Settles, G. S., "A study of Liquid Atomization using Close-Coupled Nozzles", *Atomization and Sprays*, Vol 15 (No. 1), 19-60 (2005).
55. Klar, E., and Fesko, J. W., "Production of metal powders", Metals Handbook, 9th ed. Vol. 7, *Powder Metallurgy*, 25 – 51, Ohio (1984).
56. Aksel, M. H. and Eralp, O. C., "Gas Dynamics", *Prentice Hall International Ltd.*, UK (1994).
57. Uslan, İ., "Gaz atomize alüminyum tozlarının özelliklerine üretim değişkenlerinin etkisinin araştırılması", Doktora tezi, *Gazi Üniversitesi*, Ankara (1999).
58. Cui, C., Cao, F. and Li, Q., "Formation mechanism of the pressure zone at the tip of the melt delivery tube during the spray forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, 1377, 5 – 9 (2002).
59. German, R.M., "Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri", *Çeviri* (2007).
60. Göktaş, A. A., "Al₂O₃-B₄C kompozit seramiklerin sinterlenmesi ve karakterizasyonu", *8.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 1317-1321 (1995).
61. Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, M., "Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri", *Türk Toz Metalurjisi Yayınları*: 05, Ankara, 2-4, 206-237, 379-410 (2007).
62. Sur, G., "Alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-42 (2002).
63. Bardal, A., "Wettability and interfacial reaction products in the Al-Si-Mg surfaceoxidized SiC system", *Materials Science and Engineering*, 119-125 (1992).
64. Anonymous, "Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products", *Metal Powder Industries Federation*, Princeton, NJ (2002).
65. Erdoğan, M., "Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri", *Nobel Yayınevi*, 2, Ankara, 36-45 (1999).
66. Özgün, Ö., "Toz metalurjisi ile üretilen alaşımlı çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri", (Master's thesis), (2007).
67. Hanyaloğlu, S. C. ve Colm, M., "Alüminyum Nitrür / Nikel-Alüminyum kompozitleri toz metalurjisi metoduyla üretimi", *Uluslararası Katılımlı 2. Toz Metalurjisi Konferansı*, ODTÜ, Ankara, 653-659 (1999).
68. Upadhyaya G. S., "Powder Metallurgy Technology", *Cambridge Ambridge International Science Publishing*, Hindistan, 31 (2002).

69. Koch, C. C., "Milling of brittle and ductile materials", In ASM Handbook, *ASM International Publishers*, 53 – 66 (1998).
70. Kurt, A., "Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (1992).
71. İnternet: SubTech, Graphite Manufacturing Process, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=graphite_manufacturing_process, (2016).
72. Yandouzi, M., Böttger, A.J., Hendrikx, R.W.A., Brochu, M., Richer, P., Charest, A. and Jodoin, B., "Microstructure and Mechanical Properties of B4C Reinforced Al-Based Matrix Composite Coatings Deposited by CGDS and PGDS processes", *Surface & Coatings Technology*, 205:2234–2246, Kanada (2010).
73. Ekşi, A. ve Kurt, A.O., "Metal ve seramik tozlarının bilgisayar kontrollü tek eksenli kalıpta preslenmesi", *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı, ODTÜ*, Ankara, 557-563 (1999).
74. Bahçeci, E., "Al matrisli α -Si₃N₄ takviyeli kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin karakterizasyonu", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 18-20 (2006).
75. Matik, U., "Akımsız nikel kaplamalarda ısıl işlemin sertlik ve aşınma özelliklerine etkisi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-50 (2010).
76. Ünlü, M. D., "SiC Esaslı Seramiklerin Spark Plazma Sinterleme(SPS) Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu", (Doktora tezi) *Istanbul Technical University* (2014).
77. German R. M., "Liquid Phase Sintering", *Plenum Press*, New York, 1-3 (1985).
78. İnternet: Kocaeli Üniversitesi, "Metalürji Ders Notları", <http://metalurji.kocaeli.edu.tr/files/DersNotlari/mmt423-11.pdf>
79. Kang, S. J. L., "Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure", Butterworth-Heinemann, 3-5 (2004).
80. Cho, K., Sano, T., Doherty, K., Yen, C., Gazonas, G., Montgomery, J., Moy, P., Davis, B. And DeLorne, R., "Magnesium Technology and Manufacturing for Ultra Lightweight Armored Ground Vehicles", *Army Research Laboratory* (ARL), (2009).
81. Deng, K. K., Li, J. C., Nie, K. B., Wang, X. J. and Fan, J. F., "High temperature damping behavior of as-deformed Mg matrix influenced by micron and submicron SiCp", *Mater. Sci. Eng. A* 624, 62-70 (2015).

82. Mordike, B. L. and Luka, P., "Chapter 3-Physical metallurgy, in: Magnesium Technology", *Springer*, 63 (2006).
83. Czerwinski, F., "Controlling the ignition and flammability of magnesium for aerospace applications", *Corros. Sci.* 86, 1-16 (2014).
84. Yıldırım, M., and Özyürek, D., "The effects of Mg amount on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys", *Materials & Design* 51, 767-774 (2013).
85. Neite, G., Kubota, K., Higashi, K. and Hehmann, F., "Chapter 4-Magnesium-Based alloys", in: R.W. Cahn, P. Haasen, E.J. Kramer (Eds.), *Structure and Properties of Nonferrous Alloys*, vol. 8, 113-212 (1996).
86. Qian, M. and Das, A., "Grain refinement of magnesium alloys by zirconium: Formation of equiaxed grains", *Scripta materialia*, 54(5), 881-886 (2006).
87. Vinotha, D., Raghukandan, K., Pillai, U. T. S. and Pai, B. C., "Grain refining mechanisms in magnesium alloys—An overview", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 62(6), 521-532 (2009).
88. StJohn, D. H., Qian, M. A., Easton, M. A., Cao, P. and Hildebrand, Z., "Grain refinement of magnesium alloys". *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36(7), 1669-1679 (2005).
89. Kulekci, M. K., "Magnesium and its alloys applications in automotive industry", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39, 851-865 (2008).
90. Colombié, M., "Chapitre 13-Magnésium et alliages de magnésium", *Matériaux Métalliques*, Dunod, Paris, 679-726 (2000).
91. Cizek, L., Greger, M., Pawlica, L., Dobrzanski, L.A. and Tanski, T., "Study of selected properties of magnesium alloy AZ91 after heat treatment and forming", *J. Mater. Process. Technol.*, 157-158, 466-471 (2004).
92. Mordike, B. L. and Ebert, T., "Magnesium properties-applications-potential", *Materials Science and Engineering*, A 302, 37-45 (2001).
93. ASM Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 2, *ASM International*, Materials Park, USA (1990).
94. Url-1<<http://www.yildiz.edu.tr/~akdoğan/lessons/malzeme>> alındığı tarih 09.06.2011.
95. Mendis, C. L., "Chapter 4-Understanding precipitation processes in magnesium alloys, in: Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy", *Publishing W*, 125-151 (2013).

96. Avedesian, M. M. and Baker, H., "Grades and alloys, in: ASM Speciality Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys", *International ASM*, 12-25 (1999).
97. Trajonova, Z. and Lukac, P., "Compressive deformation behaviour of magnesium alloys", *Achievements in Mechanical and Materials Engineering*, 681-684 (2005).
98. Friedrich, H. and Schumann, S., "Research for a "new age of magnesium" in the automotive industry", *Journal of Materials Processing Technology*, 117, 3, 276-281 (2001).
99. Schunmann, S., "The paths and strategies for increase magnesium application in vehicles", *Material Science Forum*, 488/489, 1-8 (2005).
100. Bavarian Motor Works, Magnesium fosters rebirth of an automotive engine International Magnesium Association: *The global voice for magnesium*, 1, 1-3 (2007).
101. Ostrovsky, I. and Henn, Y., "Present State and Future of Magnesium Application in Aerospace Industry", *International Conference "New Challenges in Aeronautics" ASTEC'07*, Moscow (2007).
102. Zeng, R., Dietzel, W., Witte, F., Hort, N. and Blawert, C., "Progress and Challenge for Magnesium Alloys as Biomaterials", *Advanced Engineering Materials*, 10, 8, B3-B14 (2008).
103. Staiger, M. P., Pietak, A.M., Huadmai, J. and Dias, G., "Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials", *Biomaterials*, 27, 9, 1728-1734 (2006).
104. Akdoğan, E. A., "Magnezyum ve alaşımları". www.yildiz.edu.tr, (2008).
105. Eliezer, D., Aghion, E. and Sam Froes, F.H., "Magnesium science, technology and applications." *Advanced Performance Materials* 5.3, 201-212 (1998).
106. Bilgin, M., Karabulut, Ş., ve Özdemir, A., "Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Kaynak Edilebilirliğinin Değerlendirilmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 5(2), 191-209 (2017).
107. Barber, L. P., "Characterization of the Solidification Behavior and Resultant Microstructures of Magnesium-Aluminum Alloys", A Thesis of Master, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester, 10-46 (2004).
108. Erçayan Y., İrizalp S. G. ve Saklakoğlu N., "A380 Alaşımında Yarı-Katı Şekillendirmenin Kompozit Yapılara Etkisinin İncelenmesi", *I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, İzmir (2011).

109. Gökçe, A., Fındık, F. ve Kurt, A. O., “Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri”, *Engineer*, 58(686), 21-47 (2017).
110. Tzamtzis, S., “Solidification Behaviour and Mechanical Properties of Cast Mg-alloys and Al-based Particulate Metal Matrix Composites Under Intensive Shearing”, PhD thesis, Brunel University, *Brunel Centre for Advanced Solidification Technology* (2011).
111. Dahle, A. K., Lee, Y. C., Nave, M. D., Schaffer, P. L. and St.John, D. H., “Development of as the cast microstructure in magnesium-aluminium alloys”, *Journal of Light Metals*, 1, 61-72 (2001).
112. Baram, J., “Pressure Characteristics at The Pour- Tube Orifice in Ultrasonic Gas Atomization”, *Materials Science And Engineering*, 98: 65-69 (1988).
113. Friedrich H. E. and Mordike B. L., “Magnesium Technology: Metallurgy, Design, Data, Applications”, *Springer Science & Business Media* (2006).
114. Savunma Sanayi Müsteşarlığı, “Duyurular”, http://www.ssm.gov.tr/anasayfa/hizli/duyurular/etkinlikler/torenler/Sayfalar/20140220_HMKTSP.aspx, (2014).
115. Her orduya lazım ileri askeri teknolojiler, http://www.chip.com.tr/galeri/her-orduya-lazim-ileriaskeri-teknolojiler_1830_11.html, 18 Ocak 2015
116. Phillips Plastics Corporation, New Technologies for Modernizing and Improving Ground Soldier Equipment, (January 2009)
117. Wu, G., Ibrahim, J. M., and Chu, P. K., “Surface design of biodegradable magnesium alloys — A review”. *Surface and Coatings Technology*, 233, 2-12 (2013).
118. Salord, F., Gaussorgues, P., Marti-Flich, J., Sirodot, M., Allimant, C., Lyonnet, D. and Robert, D., “Nosocomial maxillary sinusitis during mechanical ventilation: a prospective comparison of orotracheal versus the nasotracheal route for intubation”, *Intensive care medicine*, 16(6), 390-393 (1990).
119. Fischmeister, H. F., Ozerskii, A. D. and Olsson, L., “Solidification structure of gas atomized high speed steel powders”, *Powder Metallurgy*, 25(1), 1 – 9 (1982).
120. Clyne, T. W., Ricks, R. A. and Goodhew, P. J., “The production of rapidly – solidified aluminium powder by ultrasonic gas atomization. Part I: Heat and fluid flow”, *Int.J. Rapid solidification*, 1, 59 – 80 (1984-85).
121. Aller, A. J. and Losada, A., “Characteristics of atomized powders”, *Powder Metallurgy Int.*, 21(5), 15 –19 (1985).

122. Grant, N. J., "Recent trends and developments with rapidly solidified materials", *Metallurgical and Materials Transactions A* 23.4, 1083-1093 (1992).
123. Daloz, D. and Michot, G., "Influence of the consolidation step on the mechanical properties of rapidly solidified Mg-Al-Zn alloys", *Int. J. Rapid Solidif.*, 9, 289e304 (1996).
124. Rajan, T. P. D., Jayakumar, E. and Pai. B. C., "Developments in solidification processing of functionally graded aluminium alloys and composites by centrifugal casting technique", *Transactions of the Indian Institute of Metals* 65.6, 531-537 (2012).
125. Pai, B. C., Pillai, U. T. S., Manikandan, P. and Srinivasan, A., "Modification of AZ91 Mg alloys for high temperature applications", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 65(6), 601-606 (2012).
126. Zhang, J. M., Jiang, B. L., Wang, Z. H., Yuan, S., Nan, H. Q. and Luo, H. B., "Influence of aging modes on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy", *Research & Development* (2007).
127. Boby, A., Pillai, U. T. S. and Pai, B. C., "Effect of Pb Addition on the Discontinuous and Continuous Mg₁₇Al₁₂-β Precipitate During Solidification of AZ91 Magnesium Alloy", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 66(2), 105-108 (2013).
128. Gokmese, H., Ozdemir, M. and Bostan, B., "The Characterization and Production by Gas Atomization Method of Pre-alloyed AA 2014 Powder Metal Aluminum", *International Journal of Scientific and Technological Research*, 1 (1) 26-38 (2015).
129. German, R. M., "Sintering theory and practice. *Solar-Terrestrial Physics* (Solnechno-zemnaya fizika)", 568 (1996).
130. Lima, W. M., Velasco, F. J., Abenojar, J. and Torralba, J. M., "Numerical approach for estimating the elastic modulus in MMCs as a function of sintering temperature", *Journal of materials processing technology*, 143, 698-702 (2003).
131. Polmear, I. J., "Recent developments in light alloys", *Materials transactions, JIM*, 37(1), 12-31 (1996).
132. Srivatsan, T. S., Wei, L. and Chang, C. F. "The tensile behaviour of rapidly solidified magnesium alloys", *Journal of materials science*, 30(7), 1832-1838 (1995).
133. Yue, T. M., Ha, H. U. and Musson, N. J., "Grain size effects on the mechanical properties of some squeeze cast light alloys", *Journal of materials science*, 30(9), 2277-2283 (1995).

134. Nussbaum, G., Sainfort, P., Regazzoni, G. and Gjestland, H., “Strengthening mechanisms in the rapidly solidified AZ91 magnesium alloy”, *Scripta Metallurgica*, 23(7), 1079-1084 (1989).
135. Lü, Y. Z., Wang, Q. D., Ding, W. J., Zeng, X. Q. and Zhu, Y. P., “Fracture behavior of AZ91 magnesium alloy”, *Materials Letters*, 44(5), 265-268 (2000).



ÖZGEÇMİŞ

Mehmet AKKAŞ 1987 yılında Manisa'nın Kırkağaç ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kırkağaç Gazi İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2006 yılında Kırkağaç Eczacı Engin Ümmetoğlu Lisesi'nden mezun oldu. 2006 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2010 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2010 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu tezli yüksek lisans programını, 2013 yılında tamamladı. 2013 yılında Kastamonu Üniversitesi Cide Rıfat Ilgaz Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora programına başladı ve halen devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Kastamonu Üniversitesi
Cide Rıfat Ilgaz Meslek Yüksekokulu
Cide / KASTAMONU

Tel : 0 543 217 3369

E-posta : mehmetakkas@kastamonu.edu.tr