GAZ ATOMİZASYONU YÖNTEMİYLE AA 2014 ALAŞIM TOZUNUN ÜRETİMİ

Hakan GÖKMEŞE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2010
ANKARA

Hakan GÖKMEŞE tarafından hazırlanan GAZ ATOMİZASYONU İLE AA 2014 ALAŞIM TOZUNUN ÜRETİMİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr. Bülent BOSTAN …….
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Süleyman TEKELİ …….
Metal Eğitimi A.D, Gazi Üniversitesi
Doç.Dr. Bülent BOSTAN …….
Metal Eğitimi A.D. Gazi Üniversitesi
Doç.Dr. Hüdayim BAŞAK …….
Makine Resim Eğitimi A.D. Gazi Üniversitesi
Yrd.Doç.Dr. Ahmet GÜRAL …….
Metal Eğitimi A.D. Gazi Üniversitesi
Yrd.Doç.Dr. Hakan DİLİPAK …….
Talaşlı Üretim A.D. Gazi Üniversitesi

Tarih: 17/ 06./2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU …….
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Hakan GÖKMEŞE

GAZ ATOMİZASYONU YÖNTEMİYLE AA 2014 ALAŞIM TOZUNUN ÜRETİMİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Hakan GÖKMEŞE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2010

ÖZET

Bu çalışmada; AA 2014 aluminyum alaşımına ait tozların üretimi, atomizasyon tekniklerinden gaz atomizasyon yöntemi kullanılarak, düşey gaz atomizasyon ünitesinde 790-800-810ºC olmak üzere farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerindeki artışa bağlı olarak küresel toz şeklinin yerini gözyaşı damlası ve çubuksu toz şeklinin aldığı gözlemlenmiştir. Üretilmiş tozlar elek analizine tabii tutulduktan sonra son dört elek aralığındaki tozların Tava (<53µm) - 270 mesh (53µm) – 200 mesh (74µm) – 140 mesh (105µm) homojen bir karışımı sağlanarak toz boyut analizi uygulanmıştır. Toz boyutu analizi sonrasında ortalama toz boyutu 90,66µm olarak tespit edilmiştir.

Ortalama toz boyutu 90,66 µm olan tozlar daha sonra presleme işlemine tabii tutulmuştur. Farklı presleme basınçları (250-875 MPa) denenmek suretiyle optimum presleme basıncı olarak 650 MPa tespit edilmiştir. Bu presleme basıncı altında 1x1x2 mm ebatlarında deney numuneleri üretilmiştir. Elde edilen deney numuneleri kullanılarak, farklı sıcaklık (550-560-570-580-590-600-610-620ºC) ve sürelerde (1-2-4 saat) sinterleme işlemi yapılmıştır. Uygun olan sinterleme sıcaklık ve süresinin tespit edilmesinde, gözenek-yapı etkileşimi göz önünde bulundurularak mikro yapı görüntüleri üzerinden inceleme yapılmıştır.

Bu bağlamda 550ºC sıcaklıktaki 4 saat sinterleme süresi, sinterleme pratiğinin anlaşılabilmesi için yeterli olmuştur. Artan sinterleme sıcaklıklarında gözenekliliğin artış gösterdiği, gözenek şekli açısından düzensiz şekilli olduğu tespit edilmiştir. Sinterleme sonrasında deney numunelerine sertlik testi uygulanarak, sinterleme süresinin ve sıcaklığın sertlik üzerinde nasıl bir etki meydana getirdiği tespit edilmeye çalışılmıştır. AA 2014 malzemesi için en yüksek sertlik değeri 560 ºC deki 4 saatlik sinterleme süresi ile 56,84 HV olarak tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar ile hem optimum şartlar hem de belirlenmiş tüm parametrelerin mikro yapı üzerinde ne derece etkili olduğu araştırılmıştır. Bu amaçla Optik Mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) kullanılmıştır. Numunelerin sertlik değerlerinin tespit edilmesinde ise makro ve mikro olmak üzere iki farklı sertlik ölçme cihazından yararlanılmıştır.

Bilim Kodu : **710.1.092**
Anahtar Kelimeler : **Toz Metalurjisi, Gaz Atomizasyon, Sinterleme**
Sayfa Sayısı : **132**
Tez Yöneticisi : **Doç. Dr. Bülent BOSTAN**

PRODUCTION WITH GAS ATOMISATION METHOD OF AA 2014 ALLOY POWDER
(M. Sc. Thesis)

Hakan GÖKMEŞE

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

JUNE 2010

ABSTRACT

In this study production of AA 2014 Aluminium alloy powder has been carried out at different temparatures like 790-800-810ºC in the unit of vertical gaz atomisation by using the method of gas atomisation among the atomisation methods. It has been observed that spherical powder type has turned into tear drop and stick toz type. After sieve analysis of the powder which has been produced, powder size analysis has been carried out by having a homogen mix of powder Tava(<53µm)-270mesh(53µm)-200mesh(74µm)-140mesh(105µm) which is among last four sieve values. After powder size analysis, avarage powder size has been found as 90,66 µm.

Powders, which avarage size is 90,66 µm has been pressed. 650Mpa has been found as optimum pressing pressure after different pressing pressures (250-875Mpa) being tried. Under this pressing pressure experiment samples being 1x1x2 sizes have been produced. By using this experiment samples, sintering process has been done at different temparatıres (550-560-570-580-590-600-610-620 ºC) and times (1-2-4 hours). Micro structure has been investigated by pore-structure interaction when suitable sintering temparature and times.

So the times of 4 hours sintering at 550 ºC has been enough for sintering process. It has been found that porosity has increased at increasing sintering temparatures and types of porosity have been irregular. After sintering process, hardness testing has been applied to experiment samples and it has been tried to find how sintering times and temparature has effected the hardness. It has been found that the highest hardness value for AA 2014 material has been 4 hours sintering time at 560 ºC and 56,84 HV.

It has been searched by the experimental studies how both the whole parameters and optimum conditions have effected the micro structure. Fort his purpose Optical microscope, Scaning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive Spectrometry (EDS) have been used. Two different hardness measurement device such as macro and micro has been used to find the values of samples hardness.

Science Code : 710.1.092
Key Words : Powder Metallurgy, Gas Atomisation, Sintering
Page Number : 132
Adviser : Assoc. Prof. Dr. Bülent BOSTAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ve tez çalışmalarım süresince her türlü yardımı esirgemeyen, her zaman yanımda olan aynı zamanda tez çalışmalarımın yürütülmesinde değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlanma fırsatı bulduğum çok kıymetli hocam Doç Dr. Bülent BOSTAN'a sonsuz teşekkür ve şükranlarımı en içten dileklerimle sunarım.

Deneysel çalışmalarımla ilgili olarak laboratuar çalışmalarımda gerekli imkan ve kolaylıkları sağlayan başta bölüm başkanımız Prof. Dr. Süleyman TEKELİ hocama, çalışmalarım sırasında her zaman desteğini arkamda gördüğüm, hiç çekinmeden yardımını aldığım değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜRAL hocama, yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet TÜRKER hocamıza, Yrd. Doç. Dr. Tayfun FINDIK'a ve Öğr. Gör. Hanifi ÇİNİCİ hocalarıma teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca sürekli yanımda olan dostlarım, Öğr. Gör. Sinan AKSÖZ'e, Mustafa TÜRKAN'a ve Alper AYTAÇ'a teşekkür ve saygılarımı sunuyorum.

Beni bugünlere kadar getiren ve bugünleri yaşıyor olmama hiçbir fedakârlıktan kaçınmaksızın her türlü desteği veren canım babam ve anneme, her zaman moral kaynağı olan ablam ve kardeşime teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……...iv

ABSTRACT……vi

TEŞEKKÜR……..viii

İÇİNDEKİLER……....ix

ÇİZELGELERİN LİSTESİ……...…xiii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ…….xiv

RESİMLERİN LİSTESİ……...…xvii

SİMGELERVE KISALTMALAR…….....xx

1. GİRİŞ……....1

2. TOZ METALURJİSİNİN TARİHİ GELİŞİMİ……5

2.1. Tarihi Gelişim…….……...5

2.2. Gelecekteki Beklentiler…….....6

2.3. Tozların Kullanım Sebepleri…….....7

2.4. Toz Metalurjisi Sektörün Vizyon ve Hedefleri……..….....9

2.4.1. Toz metalurjisi sektörünün vizyonu …….……...9

2.4.2. Toz metalurjisi sektörünün hedefleri..…….....9

3. TOZ METALURJİSİ TEKNOLOJİSİ……....11

3.1. Toz Metalurjisine Giriş……11

3.2. Toz Metalurjisi Uygulamaları……..12

3.3. Toz Metalurjisinin Önemi ve Kullanılmasının Sebebi……13

3.4. Toz Metalurjisinin Avantajları ve Dezavantajları……14

3.5. Aluminyum Toz Metalurji Teknolojisi……15

Sayfa

3.6. Alüminyum Tozlar……...17

4. METAL TOZU ÜRETİMİ…….20

4.1. Metal Tozu Üretim Teknikleri…….20

4.1.1. Mekanik üretim yöntemleri……20

4.1.2. Elektroliz ile üretim teknikleri……...22

4.1.3. Kimyasal üretim teknikleri……24

4.1.4. Atomizasyon teknikleri……..25

4.2. Toz Özellikleri ve Karekterizasyonu……...32

4.2.1. Toz tane boyutu ölçüm teknikleri……..33

4.2.2. Toz tane şekli…….35

4.2.3. Toz akış hızı……...35

4.2.4. Yüzey alanı, yoğunluk ve gözeneklilik……...……...36

4.3. Metal Tozlarının Preslenmesi……..37

4.3.1. Kalıpta sıkıştırma teknolojisi…….39

4.3.2. İzostatik presleme……..42

4.3.3. Aluminyum tozlarının preslenmesi……44

4.3.4. Aluminyum tozlarının sıkıştırılmasında görülen olaylar……...44

4.4. Metal Tozlarının Sinterlenmesi……46

4.4.1. Katı-hal sinterleme…….47

4.4.2. Sıvı faz sinterleme……..49

4.4.3. Alüminyum tozlarının sinterlenmesi……..51

Sayfa

5. GAZ ATOMİZASYONU……...52

5.1. Gaz Atomizasyon Üniteleri……..52

5.2. Atomizasyon Sistemleri……...54

5.3. Atomizasyon Mekanizması……..55

5.4. Nozul Çeşitleri…….57

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR…….58

6.1. Malzeme……...59

6.2. Gaz Atomizasyon Ünitesi……60

6.2.1. Ergitme ünitesi ……..61

6.2.2. Nozul……..64

6.2.3. Atomizasyon kulesi……65

6.2.4. Toz toplama bölümü……..66

6.2.5. Gaz sistemi…….67

6.3. Toz Üretim Aşaması……68

6.4. Tozların Karışımının Hazırlanması……..71

6.5. Toz Boyut Analizi……72

6.6. Toz Karışımının Preslenmesi……...73

6.7. Numunelerin Sinterlenmesi…….75

6.8. Numunelerin Yoğunluk Ölçümü……..77

6.9. Numunelerin Metalografik Olarak İncelenmesi……..78

6.10. Numunelerin Mikro Yapı İncelemeleri ve Analizleri……79

6.11. Numunelerin Sertlik Ölçümleri……..81

Sayfa

7. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME……....83

7.1. Çalışma Sürecinin Değerlendirilmesi……..83

7.2. Toz Boyut Analizi Sonuçları……...84

7.3. Toz Şekil ve Morfolojisi……..85

7.4. Presleme İşlemi……..…..98

7.5. Sinterleme İşlemi…….....100

7.6. EDS Analizi Sonuçları……..…….107

7.7. Yoğunluk Sonuçları……...117

7.8. Sertlik Sonuçları…….……120

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.……123

8.1. Sonuçlar…….124

8.2. Öneriler……..126

KAYNAKLAR……...……..……127

ÖZGEÇMİŞ……..132

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Bazı ticari alüminyum tozlarından üretilmiş parçaların özellikleri……16

Çizelge 3.2. Bazı ticari alüminyum alaşımlarının bileşimleri…….17

Çizelge 6.1. AA 2014 alaşımının kimyasal bileşimi……..…….59

Çizelge 7.1. Farklı presleme basınçlarındaki yoğunluk değişimi……...98

Çizelge 7.2. Sinterleme öncesi ve sonrasındaki yoğunluk değişimleri…….118

Çizelge 7.3. 790ºC' de üretilmiş gaz atomize tozların mikro sertlikleri……...121

Çizelge 7.4. Farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenmiş numunelerin makro sertlikleri……123

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Toz metalurji tekniklerinin tercih sebebi olarak kullanılması……..7

Şekil 3.1. T/M yöntemiyle üretilen malzemelerin kullanım alanları……..12

Şekil 3.2. T/M üretimi (demir ve çelik) 1996-2008……13

Şekil 4.1. Silindirik değirmende hareketin gösterilmesi. …….……..21

Şekil 4.2. Toz biriktirmek için bir elektroliz hücresi……..23

Şekil 4.3. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi……..24

Şekil 4.4. Atomizasyon prosesleri……..25

Şekil 4.5. Gaz atomizasyon ünitesi…….27

Şekil 4.6. Su atomizasyonu işlemi……..28

Şekil 4.7. Döner disk atomizasyon yöntemi……...29

Şekil 4.8. Döner elektrot ile savurmalı atomizasyonun şematik gösterimi……30

Şekil 4.9. Vakum atomizasyon yöntemi…….31

Şekil 4.10. Olası parçacık şekilleri ve önerilen niteliksel tanımlayıcılar……35

Şekil 4.11. Çeşitli metallerin sıkışma özellikleri……38

Şekil 4.12. Mekanik özelliklerin gözenek ile değişimi……...39

Şekil 4.13. Toz sıkıştırma kademelerinin bir görünüşü……..40

Şekil 4.14. Metal kalıplarda presleme; a) Tek hareketli b) Çift hareketli……...41

Şekil 4.15. Tek eksenli ve çift eksenli kalıpta preslenmiş tozlarda yoğunluk dağılımları……41

Şekil 4.16. İzostatik presleme yöntemleri; a) ıslak b) kuru…….43

Şekil 4.17. Sinterlemede nokta teması ile başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli……..47

Şekil 4.18. Sinterlemenin safhaları…….48

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.19. Gözenek yapı değişimlerinin şematik gösterimi……...49

Şekil 4.20. İki toz karışımı kullanılarak sıvı faz sinterlemesinin kavramsal aşamaları……..50

Şekil 5.1. Yatay gaz atomizasyonun şematik gösterimi…….52

Şekil 5.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi…….....53

Şekil 5.3. İki farklı atomizasyon sistemi…….54

Şekil 5.4. Sıvı metal tabakasının parçalanması……...56

Şekil 5.5. Atomizasyon sırasında sıvı demetinin parçalanmasında damlacık şekli değişiminin şematik olarak gösterilmesi…….56

Şekil 5.6. Ses hızının altındaki ve üsündeki akışlar için nozul tipleri……57

Şekil 5.7. Nozul tipleri; a) Laval tipi nozul b) Mannesmann tipi nozul…….……57

Şekil 6.1. Presleme kalıbının ön görünüşü ve katı modeli…….74

Şekil 7.1. Deney çalışma planı……...83

Şekil 7.2. AA 2014 tozunun toz tane boyut dağılımı…….84

Şekil 7.3. Presleme basıncının yoğunluk üzerine etkileri……..99

Şekil 7.4. Resim 7.15’ deki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi ……109

Şekil 7.5. Resim 7.15 genel EDS analizi ……...……..109

Şekil 7.6. Resim 7.16’ daki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi ……110

Şekil 7.7. Resim 7.16’ daki 2 nolu bölgeye ait EDS analizi ……111

Şekil 7.8. Resim 7.16’ daki 3 nolu bölgeye ait EDS analizi ……111

Şekil 7.9. Resim 7.17’ deki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi ……113

Şekil 7.10. Resim 7.17’ deki 2 nolu bölgeye ait EDS analizi …….....114

Şekil 7.11. Resim 7.18’ deki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi ……..115

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.12. Resim 7.18’ deki 2 nolu bölgeye ait EDS analizi**……..**…….115

Şekil 7.13. Resim 7.18’ deki 3 nolu bölgeye ait EDS analizi ……..116

Şekil 7.14**.** Resim 7.18’ deki 4 nolu bölgeye ait EDS analizi ……..116

Şekil 7.15. Resim 7.18 genel EDS analizi …….……..117

Şekil 7.16. Sinterleme sıcaklık ve sürelerine bağlı olarak yoğunluk değişimi……...119

Şekil 7.17. Sinterleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak gözeneklilik değişimi……...120

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. 50 µm öğütülmüş niyobyum tozlarının taramalı elektron mikroskop görüntüsü……22

Resim 4.2. Elektroliz ile üretilmiş bakır tozunun taramalı elektron mikroskop görüntüsü..……23

Resim 4.3. Suyla atomize ederek bilerek yuvarlak şekilli üretilmiş -325 elek paslanmaz çelik tozlarının taramalı elektron mikroskop görüntüsü…….28

Resim 4.4. Toz metalurjisi uygulamalarında farklı toz boyutları ve şekillerine ait örnekler……32

Resim 4.5. Nikel tozunun (33µm) sinterlemesi sırasında boyun oluşumu……46

Resim 6.1. Düşey gaz atomizasyon ünitesi…….……60

Resim 6.2. Ergitme Ünitesi…….……61

Resim 6.3. Ergitme potasının görünümü……62

Resim 6.4. Ergitme fırının iç görünümü……63

Resim 6.5. Sıcaklık kontrol ünitesi……63

Resim 6.6. Nozul bağlantısının gösterimi……...64

Resim 6.7. Atomizasyon kulesinin görünümü……65

Resim 6.8. Toz toplama bölümlerinin görünümü……...66

Resim 6.9. Gaz sistemi……67

Resim 6.10. AA 2014 aluminyum alaşım tozunun genel görünüşü……...72

Resim 6.11. Deney numunelerinin presleme işleminin yapıldığı cihaz……..……73

Resim 6.12. Deney numuneleri……..……75

Resim 6.13. Atmosfer kontrollü ısıl işlem fırını……76

Resim **Sayfa**

Resim 6.14.Yoğunluk ölçümünde kullanılan cihazlar……77

Resim 6.15. Metalografik çalışmalarda kullanılan cihazlar……78

Resim 6.16. Leica marka optik mikroskop……79

Resim 6.17. JOEL JSM–6060 LV model taramalı elektron mikroskobu ve EDS bağlantısı……80

Resim 6.18. Sertlik ölçümünde kullanılan cihazlar……81

Resim 7.1. 790 ˚C' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüleri ……..86

Resim 7.2. 790 ˚C' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüleri ……..87

Resim 7.3. 790 ˚C' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüleri ……..88

Resim 7.4. ˚C' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüleri …….89

Resim 7.5. 790ºC' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüsü a) Düşük büyütme b) Yüksek büyütme ……...……...92

Resim 7.6. 800ºC' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüsü; a) Düşük büyütme b) Yüksek büyütme ……...93

Resim 7.7. 810ºC' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüsü; a) Düşük büyütme b) Yüksek büyütme**……**……...94

Resim 7.8. 790ºC' de üretilen gaz atomize tozların optik mikroskop görüntüleri…….……...…96

Resim 7.9. 790ºC' de üretilen gaz atomize tozların optik mikroskop görüntüleri ……97

Resim 7.10. 550ºC,560ºC,570ºC,580ºC sıcaklıklarda 1-2-4 saat sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri…….....102

Resim 7.11. 590ºC,600ºC,610ºC,620ºC sıcaklıklarda 1-2-4 saat sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri……..……...103

Resim 7.12. 550ºC,560ºC,570ºC,580ºC sıcaklıklarda 1-2-4 saat sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri……104

Resim **Sayfa**

Resim 7.13. 590ºC,600ºC,610ºC,620ºC sıcaklıklarda 1-2-4 saat sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri……105

Resim 7.14. 550ºC,560ºC,570ºC,580ºC, 590ºC,600ºC,610ºC,620ºC sıcaklıklar da 4 saat sinterlenmiş numunelerin SEM görüntüleri…….106

Resim 7.15. 790 ºC' de üretilmiş ortalama toz boyutu 90,66 olan gaz atomize tozun EDS için SEM görüntüsü……108

Resim 7.16. 790 ºC' de üretilmiş ortalama toz boyutu 90,66 olan gaz atomize tozun EDS için SEM görüntüsü……110

Resim 7.17. 550 ºC de 4 saat sinterlenmiş numunenin EDS için SEM görüntüsü…….113

Resim 7.18. 620ºC de 4 saat sinterlenmiş numunenin EDS için SEM görüntüsü…….114

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklama**
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Aluminyum oksit
Ar	Argon
Be	Berilyum
Cu	Bakır
Cr	Krom
Fe	Demir
H	Hidrojen
HCl	Hidroklorik asit
HNO_3	Nitrik asit
H_2O	Su
HF	Hidroflorik asit
Mn	Mangan
Mg	Magnezyum
N	Azot
Ni	Nikel
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
SiO_2	Silisyum oksit
Sn	Kalay
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
W	Wolfram
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum

Kısaltmalar	Açıklama
CIP	Cold Isostatic Pressing
EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi
G.Ü.T. E. F.	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
HIP	Hot Isostatic Pressing
MPa	Megapaskal
SEM	Scaning Electron Microscope
TM	Toz Metalurjisi

1.GİRİŞ

İleri bir imalat yöntemi olan "Toz Metalurjisi (TM)", teknolojik malzemelerin üretilmesine çok uygun olan ve küçük parçaların çok sayıda ve ekonomik üretimini sağlayan bir yöntemdir. Toz Metalurjisi, "son şekle yakın üretim" süreçleri olarak sinterleme, sıcak presleme, sıcak izostatik presleme, toz metal enjeksiyonu, nano-parçacık teknikleri, mekanik alaşımlama gibi konularla sürekli büyüyen bir pazara hitap eden ileri teknolojilerden birisidir [1].

Maliyet ve kalitenin hedef haline geldiği günümüzde toz metal teknikleri ile parça üretimi giderek önem kazanmaktadır Toz metalurjisinin önemi; döküm, talaşlı imalat ile şekillendirilmesi oldukça zor veya imkânsız olan parçaların bu yöntemle kolaylıkla ve kütle üretimlerde ekonomik bir şekilde üretilebilmesinden kaynaklanmaktadır [2].

Toz metalurjisi küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatına oldukça uygundur. Malzeme kaybı çok azdır. Bu yöntemde ergime kayıpları yoktur, yakın toleranslar ve düzgün yüzeyler elde edilir. Tüm bu olumlu özeliklerin yanında tozların kalıp içerisindeki akıcılığının sınırlı olması yapılacak parçanın şekli için kısıtlayıcı bir faktördür. Ayrıca, ilk yatırım maliyetleri (presler, sinter teçhizatları) oldukça pahalıdır. Seri üretim yapılmadığı takdirde amortisman değerleri yüksek olur [3].

Gelişen teknolojiyle birlikte ihtiyaçlarda farklılaşmıştır [4]. Özellikle son yirmi yılda ileri teknoloji ürünlerinin kullanımı önem kazanmıştır. Savunma ve uzay sanayi bu konuda önde gelen sektörlerdendir. Bu alanlarda, malzemelerin mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini iyileştirmede; kimyasal modifikasyon, geleneksel termal, mekanik ve termo mekanik işlemler kullanılmaktadır [5-6]. Her geçen gün daha da artan kullanım alanı ile toz metalurjisi metal işleme teknolojileri arasında önemli bir yer teşkil etmektedir.

Toz metalurjisinin bu denli gelişmesinin en önemli sebebi elde edilen ürünün yüksek kaliteli olması ve ekonomik olarak yüksek toleranslı parçaların boyut ve şekil hassasiyeti ile üretilebilmesidir. Sonuçta elde edilen ürünlerdeki boyutsal hassasiyet ve yüzey bitirme kalitesinin birçok kullanım alanı için yeterli olması, talaşlı işlem kademesinin neredeyse tamamen yok edilmesini sağlamaktadır. Bunların yanında mikroyapının istenen şekilde ayarlanabilmesi ile malzeme özelliklerinin kontrolü kolay bir şekilde yapılabilmektedir.

Toz metalurjisi otomotiv dişlilerinden, ortopedik implantlara, elektrik kontakt parçalarından boya pigmentlerine kadar sayısız alanda kullanım alanı bulmakta ve diğer metal işleme tekniklerinin yerini almaya devam etmektedir. Böylelikle son 30-35 yılda atomizasyon tekniklerinin yoğun olarak gelişmesi ile konvansiyonel olarak üretilen takım çelikleri, paslanmaz çelikler, süperalaşımlar vb. daha yüksek mekanik özelliklerle üretilebilmektedir [7-8].

Son yıllarda Toz Metalurjisi yöntemi ile üretilen parça sayısında ve parça çeşidinde artışlar olmuştur. Özellikle yüksek mukavemet ve yeterli tokluk değerlerine sahip TM parçaların üretilebilir duruma gelmesi bu konudaki çalışmalara ağırlık verilmesine neden olmaktadır. TM parçaların üretiminden sonra herhangi bir ek işleme gerek duyulmaması ve tam yoğun parçalara uygulanan tüm ısıl ve mekanik yüzey işlemlerinin uygulanabilirliği çok önemli gelişmelere neden olmaktadır. Özellikle dünyadaki otomobil üretimindeki artışlara paralel olarak TM parçaların üretim miktarında da artışlar yaşanmaktadır. Son yıllarda otomobil üretici firmaların TM yöntemi ile üretilmiş parça ağırlığının otomobil başına 15 kg mertebesine yükseltilmiş olmasını çok önemli görmektedirler [9].

Dünya çapında üretilen tüm metalik tozlardan imal edilen sinter parçaların pazar paylarından en büyük kısmı % 86 ile demir–çelik esaslı sinter parçalar almaktadır. İkinci sırada % 11 pazar payı toplamı ile bakır ve bakır esaslı sinter parçalar, üçüncü sırada % 0,6 ile alüminyum ve alaşımları takip eder. Hafif metallerin TM endüstrisinde kullanım alanı açısından en çok yeri alüminyum toz metalurjisi almaktadır [10].

Hafif metallerin sahip oldukları (alüminyum, titanyum, berilyum) bazı üstün fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı TM endüstrisinde kullanım alanı oldukça geniştir. Birim ağırlıktaki yüksek mukavemet, aşınmaya karşı direnç, yüzey kalitesi ve başka üstün özelliklerden dolayı alüminyum TM parçaları, makine, otomobil ve alet teknolojisinde kullanılmaktadır. Pahalı ve uzun zaman gerektiren alüminyum döküm, ekstrüzyon ve talaşlı imalat yöntemlerine göre, alüminyum TM yöntemleri, ekonomikliği ve bazı fiziksel üstün özellikleri ve de mekanik özelliklerinden dolayı kullanım alanı oldukça artmaktadır [10].

Toz metalurjisinde ilk aşama tozun üretilmesidir. Birçok toz üretim tekniği arasından, ticari olarak; mekanik yöntemler, kimyasal yöntemler, elektroliz yöntemi ve atomizasyon yöntemleri kullanılır [11].

Atomizasyon yöntemi, eritilebilen tüm metallerin, tozlarının üretiminde kullanılabilen bir yöntemdir. Bu yöntemde ergimiş haldeki sıvı metal pota dibindeki dar bir kesitten çıkarken metal kolonu üzerine; su buharı, basınçlı hava veya başka bir gaz akımı gönderilir. Böylece metal çok ince parçacıklara ayrılarak katılaşır ve toz haline gelir [10]. Bu teknikler arasından öne çıkan gaz atomizasyonun da, sıvı metal demetini parçalamak için kullanılan gaz jeti N_2, Ar, CO_2 ve He gibi asal gazlar veya hava olabilir. Asal gazlar, süper alaşımlar ve titanyum gibi reaktif metaller atomize edildiğinde veya oksijen miktarının düşük seviyelerde olması istendiğinde kullanılır ve küresel tozlar elde edilir [12, 13-14]. Hava atomize tozlar ise karmaşık şekillidir [15].

Bu çalışmada, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Döküm Anabilim Dalında bulunan Gaz Atomizasyon Ünitesi kullanılarak, AA 2014 aluminyum alaşımına ait tozların üretimi, farklı gaz basıncı ve sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Üretilen tozlar elek analizi yöntemi ile 100 µm altı olarak sınıflandırılmıştır. Üretilen tozların 100 µm altı yani son dört elek aralığında olanlarından bir karışım yapılarak homojen karışımı sağlanmıştır. Yaklaşık 10 - 100 µm aralığındaki bu tozlar, metalografik işlemlerin ardından Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) yardımı ile karakterize edilmiştir.

Aynı tozlar karakterizasyon amaçlı, enerji saçılımlı X-ışınları spektrometresi (EDS) ile genel ve bölgesel olarak analiz edilmiştir. Daha sonra tozlar farklı pres basınçları altında presleme işlemine tabi tutularak, uygun pres basıncı sonrasındaki, deney numuneleri haline getirilmiştir.

Son işlem olarak, numunelere farklı sıcaklık ve sürelerde sinterleme işlemi uygulanmak suretiyle, gözenek-yoğunluk ilişkisi incelenmiştir. Aynı zamanda farklı değerlerdeki sinterleme sıcaklık ve sürelerinin, mekanik özellikler açısından sertlik değerleri üzerinde ne gibi etkiler meydana getirdiği, mikro sertlik ve makro sertlik cihazları kullanılarak incelenmiştir.

2. TOZ METALURJİSİNİN TARİHİ GELİŞİMİ

2.1. Tarihi Gelişim

Toz metalurjisi (T/M) metal ve metal dışı paçaların yapımında kullanılan gelişmiş bir üretim yöntemidir. Toz metalurjisinde kullanılan hammadde, metal yada seramik tozudur [16].

Eski ve orta çağlarda sert çelikten üretilen silahlar, kızıl derecede ısıtılan metal parçaları sıcakta dövüp birleştirmekle imal edilmiştir. M.Ö 3000 yıllarında Mısır'da toz metalurjisi kullanılarak demir takımlar yapılmıştır. Daha sonraki yıllarda İnkalarda değerli metal tozlarını kullanarak çeşitli eşyalar yapmışlardır. 19. yüzyıl sonlarında endüstride platin ve iridyum gibi yüksek sıcaklıkta ergiyen metallerin kullanılmasına başlanmıştır.

İlk modern toz metalurjisi ürünü 1900'lü yıllarda elektrik lambası için üretilen tungsten flamenttir. 1902de tugsten karbidden kesme takım malzemesi, 1940, 1950' li yıllarda bakır tozu ve kendiliğinden yağmalı yataklar ve bunun devamında demir esaslı malzemelerden çeşitli dişliler, kam mili ve diğer yapısal malzemeler, 70'li yıllardan itibaren tam şekilli ve yoğun parçaların üretilmesi için sıcak izostatik pres toz metalurjisine kazandırılmıştır. Bu yıllarda takım çelikleri ve süper alaşımların üretimi gerçekleştirilmiş ve aynı zamanda otomobil parçalarının toz metalurjisinden üretimi de yapılmaya başlanmıştır. 1980'de uçakların türbin motor parçaları toz metalurjisinden üretilen ürünlerdir. Bu yıllarda hızlı katılaşma ve enjeksiyonla kalıplama yöntemleri de ticari olarak gelişmeye başlamıştır.

Günümüzde ticari toz metalurjisi metodu çok gözenekli metalik filtrelerden kendiliğinden yağmalı yataklara ve yoğunluğu kontrol edilen toz metalurjisi parçalardan tamamen yoğun dövme toz metalurjisi metal sistemlerine kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır [17].

Eğer döküm zorlukla ve önemli kayıplarla yapılıyorsa ve dökümle elde edilen malzemenin sıcakta dökülmesi imkânsızsa, metal tozlardan direkt olarak, yani sinterlemeden sonra işlenmelerine lüzum kalmayan parçaların ekonomik olarak imali mümkündür. Ayrıca sinterlenmiş malzemenin yapısı dökümle elde edilmiş parçanın yapısına nazaran daha ince, mekanik özellikleri de daha iyidir [18].

2.2. Gelecekteki Beklentiler

Geçmişte toz teknikleri kullanılarak elde edilen başarılar maliyet düşüklüğünden kaynaklanmıştır. Buna bağlı olarak maliyeti düşük tozlar daha yaygın kullanılmaktadır. Bundan dolayı, demir tozlarının elmas tozlarına göre izafi tüketimi 100 000 000 kat daha fazladır.

Toz metalurjisi teknikleri yaygın olarak gelişmektedir. Toz kullanımı çeşitli uygulamalarda genişlemektedir. Yeni uygulamalara cevap verebilmek için daha çok eğitimli personele ihtiyaç vardır. Malesef, tasarım mühendisleri toz metalurjisi hakkında çok az bilgiye sahiptir. Bu hem problem, hem de fırsat olarak görülebilir. Problem olması yeni uygulamaları yavaşlatması, fırsat ise yeni malzemeler veya yöntemlerle ilgili buluşlara imkân tanımasıdır. Gelecek, mücadele edilmesi gereken zorluklarla doludur. Ancak, maliyet azaltma ve benzersiz malzeme birleşimleri ve üç boyutlu net şekilli üretim muhteşem avantajlar sağlamaktadır [19].

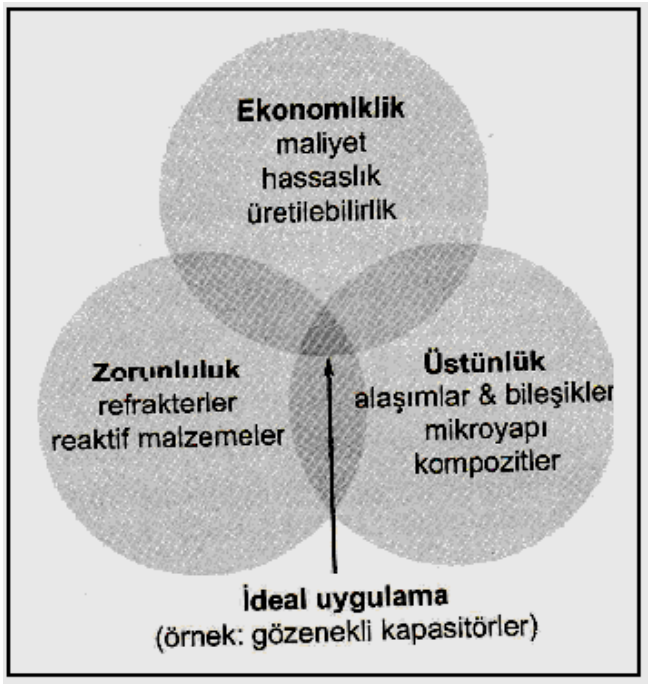
Başarı için atıfta bulunacak faktörler tespit edilmiş olup sürekli büyüme için gerekli altı alan aşağıda verilmiştir:

1. Düşük maliyetli malzemelerden hassas, yüksek kaliteli, yapısal parçaların çok miktarda üretilmesi,
2. Tam yoğunluk ve güvenilirliğin ön planda olduğu yüksek performanslı malzemelerin üretilmesi,

3. İşlemi zor olan homojen mikro yapılı, tam yoğunluklu ve yüksek performanslı alaşımların üretilmesi,
4. Özel alaşımlardan, tipik olarak karışık fazlı kompozitlerin, ekonomik olarak sıkıştırılması,
5. Amorf, mikrokristalli, nano ölçekli veya yarı kararlı alaşımlar gibi denge durumunda bulunmayan malzemelerin sentezlenmesi,
6. Benzersiz içeriğe sahip, karmaşık, sıra dışı ve işlevli parçaların üretilmesi [19].

2.3. Tozların Kullanım Sebepleri

Toz metalurjisinin başarısına birçok özellik katkıda bulunmaktadır. Üç anahtar etken; ekonomiklik, zorunluluk ve üstünlüktür. Şekil 2.1 toz metalurjisinin nasıl kategorize edildiğini göstermektedir.



Şekil 2.1. Toz metalurji tekniklerinin tercih sebebi olarak kullanılması [19].

Bunlardan ilki karmaşık geometrili parçaların ekonomik üretimine dayalı pek çok uygulamadır. Otomotiv endüstrisi için parçalar bu sahadaki iyi örneklerdir; yataklar, supap yuvaları, emisyon algılayıcıları, katalitik konvertörler, darbe emiciler, bujiler, piston kolları, zincir dişlisi ve pek çok motor zamanlama parçaları. Bu alanda daha çok üretilebilirlik, otomasyon ve boyut toleransı düşünceleri hakimdir. Yüksek üretim miktarları için hassaslık ve maliyetin her ikisi de çok önemlidir [19].

Toz metalurjisi ürünlerinin kullanılması için pek çok üstün özellik ve mikro yapısal uygunluk vardır. Örnek olarak gözenekli filtreler, oksit dağılımlı güçlendirilmiş tribün alaşımları, Sermetler (seramik-metal kompozitleri), fonksiyonel tabakalı yapay kemikler (metal-seramik, mesela titanyum hidroksiapatit gibi), temas alaşımları (bakır-krom), tungsten karbürden veya elmas kompozitlerden sert kesici takımlar verilebilir. Bu malzemeleri diğer tekniklerle üretimindeki yetersizlik bu sektörün büyümesine katkıda bulunmuştur.

Şekil 2.1' de gösterilen son daire zorunluluk uygulamalarına karşılık gelmektedir. Bu malzemelerin diğer tekniklerle üretilmesi oldukça zordur. Örnekler arasında seramikler, pek çok reaktif ve refrakter metaller ve ergitilmesi pratikte uygun olmayan bazı polimerler gibi sert ve yüksek sıcaklık malzemeleri vardır [19]. Güncel örneklerden bazıları molibden disilisit, titanyum diborür, titanyum alüminat, magnezyum diborür ve amorf metallerdir. Pek çok durumda, yüksek sıcaklık işleminden kaynaklanan mikro yapı hasarından kaçınmak için bir tozun oluşturulması ve daha sonra işlenmesinde düşük sıcaklık arzu edilir.

Sıklıkla her üç kategoride elementler, toz metalürjisi uygulamalarında yer alır. Gerçekten, önemli büyüme ve genişleme muhtemelen yüksek kaliteli, düşük maliyetli, amaca uygun şekillendirilmiş; ekonomiklik, zorunluluk ve üstünlüğün geliştirilmiş bileşenlerinden kaynaklanacaktır. Bir örnek olarak tantalyum gibi metaller veya baryum titanat gibi seramikler kullanılarak üretimi günde yüz milyonlara ulaşan elektronik devreler için gözenekli kapasitörler verilebilir [19].

2.4.Toz Metalurjisi Sektörün Vizyon ve Hedefleri

Toz metalurjisi endüstrisi ciddi bir değişime imkan tanıyan bir zamana girmektedir. Otomotiv endüstrisindeki değişim, diğer metal şekillendirme tekniklerinden daha sıkı rekabet, yüksek performanslı malzeme sistemleri için müşteri beklentilerini artırarak ve endüstride baştanbaşa parçaların maliyet etkinliğini sürekli gelişimini sağlamaktadır. Toz metalurji firmaları bu yeni iş çevresindeki etkili rekabeti gerçekleştirerek, gelecekteki başarı için şimdiden plan yapmak zorundadırlar [20].

2.4.1. Toz metalurjisi sektörünün vizyonu

Toz metalurji endüstrisinde 2020'e kadar metal esaslı parça ve sistemleri tercih edilecektir. Endüstri sünek imalatları, sağlam zincirleri ve mühendislik yaratıcılığıyla bütünleştirilmiş olarak, uygulamaların geniş bir kısmında en yüksek değer çözümleri sağlayacaklardır. En yüksek kalitedeki toz metalurji parçaların artan hızlarda müşteriye teslim edileceğini, stratejik teknoloji gelişimi, yirmi yıl kadar daha seçili kılmıştır. Bu gelişimler ile toz metalurjisi ulusal ekonomik büyümeyi aşarak, büyüme hızına katkı sağlamaya müsaade edecektir [20].

2.4.2. Toz metalurjisi sektörünün hedefleri

Toz metalurjisi endüstrisinin vizyonu anahtar bir misyon etrafında toplanmaktadır. Bu da toz metalurjisi sektörünü gittikçe artırmaktadır. Toz metalurjisi firmaların hızla büyümeleri için, yeni gelişme gösteren sektörlerden biyomedikal uygulamaları, elektronik ve iş makineleri gibi daha fazla alanı içine alması gerekirken, otomotiv, endüstriyel parçalar ve ev aletleri gibi geçerli sektörlerde sürekli büyümek zorundadırlar. Otomotiv pazarında büyüme önerileri ilk adımda yavaş başlamakla beraber, endüstri için öncelikle acil bir pazar değişikliği yapılmalıdır [20].

Toz metalurji endüstrisi gelecek yirmi yılın üstünde bir sektör büyümesi için iki amaç üzerine kurulmuştur. Bu amaçlar, hem otomotiv hem de otomotiv dışındaki alanlarda pazar gelişimindeki değişimin ölçülmesine yardım sağlayarak, beklenen büyüme miktarına yardım edecektir.

- Amaç, Otomotiv sektöründe 2020'e kadar yıllık %12 pazar büyümesini başarmak.
- Amaç, Otomotiv sektörü dışında 2020'e kadar yıllık %25 pazar büyümesini başarmak.

Bu amaçlar, fiyat düşüşü olmayan yıllar için ve değişmeyen dolar ölçümüyledir. [20]

3. TOZ METALURJİSİ TEKNOLOJİSİ

3.1. Toz Metalurjisine Giriş

Toz metalurjisi çok küçük partiküllerin birbirini preslemesiyle bağlanarak parça haline getirilmesi işlemidir. Maliyet ve kalitenin hedef haline geldiği günümüzde toz metal teknikleri ile parça üretimi giderek önem kazanmaktadır. Toz metalurjisinin önemi; döküm, talaşlı imalat ile şekillendirilmesi oldukça zor veya imkânsız olan parçaların bu yöntemle kolaylıkla ve kütle üretimlerde ekonomik bir şekilde üretilebilmesinden kaynaklanmaktadır [2].

Toz metalürjisi (T/M) yöntemi ile imal edilen makine parçalarının özellikleri toz tanelerinin şekli**,** boyutu, bileşimi, yağlayıcı cinsi, sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi, bitirme işlemleri gibi çok sayıda parametreye bağlı olduğundan özellikler hakkında genel sonuçlara varmak zordur.

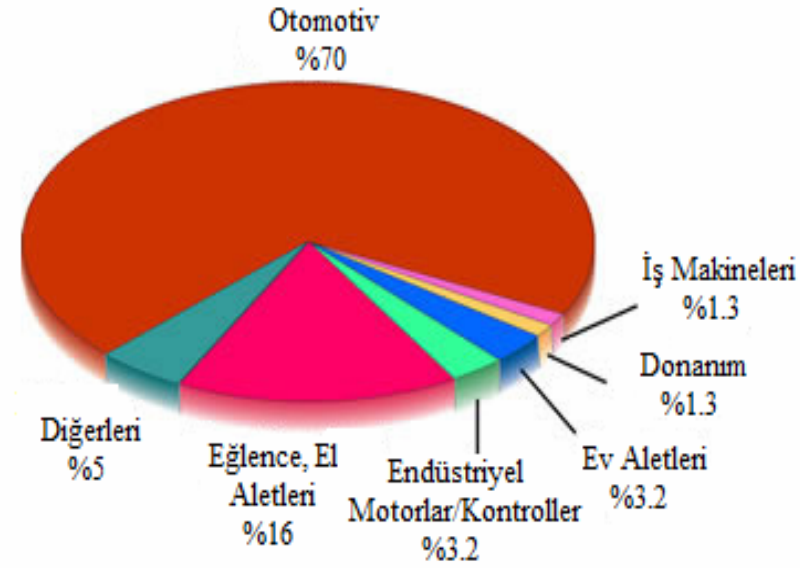
T/M parçaların mekanik özellikleri genellikle yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir. T/M parçalarda gözenek miktarı azaldıkça genel anlamda mekanik özellikler iyileşmektedir. Bu genelleme kabaca kabul görürken, iyileşme oranının hangi parça yoğunluğu değerleri üzerinde önem kazandığı net değildir. Ancak düşük izafi yoğunluklarda toplam gözeneklilik miktarı ana faktör olarak gözlenirken, yüksek yoğunluklarda gözenek boyutu, sekli ve dağılımı ile birlikte matris malzeme mikro yapısı daha önemli faktörler olarak dikkat çekmektedirler [21].

Toz metalurjisi yöntemleri ile üretilen kalıcı gözenekli sıradan makine parçalarının toklukları yeteri seviyede olmadıkları gibi mukavemetleri de ancak döküm malzemelerin mukavemet değerleri mertebesinde olabilmektedir. Bundan dolayı makine parçası olarak kullanıldıklarında çelikler kadar dayanıma sahip olmamaktadırlar.

Özellikle yorulma yüklemeleri durumunda daha da önem yitirmelerinden dolayı T/M üretilmiş parçaların yorulma dayanımlarının arttırılması için yoğunlukta önemli bir artış meydana getirmeden nitrürasyon, karbonitrirasyon, su verme-temperleme gibi ısıl işlemlerin yanında bilyalı dövme, soğuk haddeleme gibi mekanik yüzey işlemlerinin uygulanmasıyla yorulma özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılmaktadır [22].

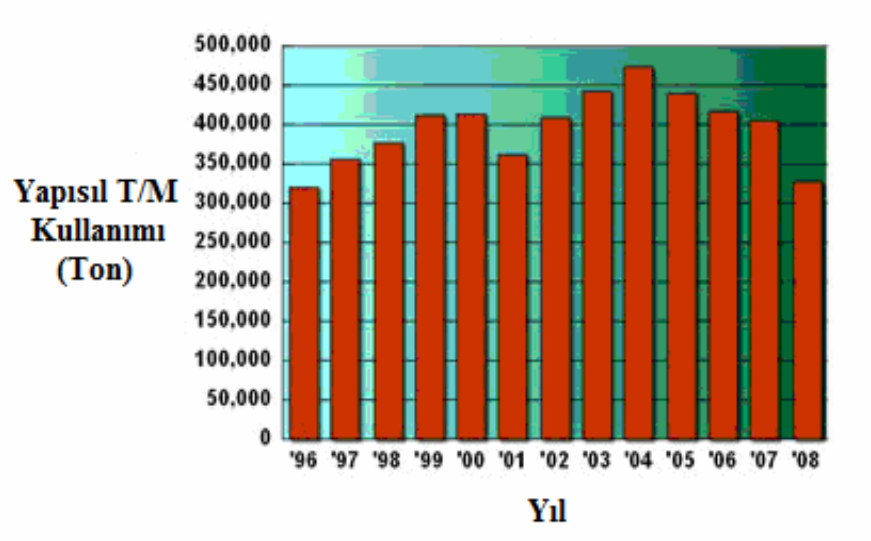
3.2. Toz Metalurjisi Uygulamaları

Toz metalurjisi parça uygulamaları iki ana gruba ayrılmıştır. İlk olarak tungsten, molibden veya tungsten karpitden yapılanlar gibi, diğer metotlarla da imalı zor olan parçalardır. Bunun yanı sıra gözenekli rulmanlar, filtreler ve çoğu manyetik parçalar toz metalurjisi kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. T/M yöntemiyle üretilen malzemelerin kullanım alanları [20].

İkinci grup, maliyet etkili alternatif makine parçalarını, dökümler ve dövme metalleri gösteren toz metalurjisi parçaları içermektedir. Otomotiv debriyaj balataları, bağlantı milleri, eksantrik mili ve dişli taşıyıcıları bunların bazı örnekleri arasında gösterilebilir.



Şekil 3.2. T/M üretimi (demir ve çelik) 1996-2008 [20].

Toz metal parçalar çeşitli pazarlarda, senelik endüstri ürünlerinden demir ürünlerinin yaklaşık %70 inin tükendiği ve otomotiv endüstrisi baskın olmak üzere kullanılmaktadır (Şekil 3.2). Diğer önemli pazarlar, oyuncak el aletleri, ev aletleri, endüstriyel makineler ve iş makinelerini içerir. Yatırımcılar toz metal malzemeler hakkında süper bir performans, maliyet etkileri ve parça toleransları hakkında bilgiler önerebilmekte ve henüz işlenmemiş pazarlara yayılmaya eğilim göstermektedirler [20].

3.3. Toz Metalurjisinin Önemi ve Kullanılmasının Sebebi

T/M düşük enerji tüketimi, düşük maliyetlerde ve yüksek verimde malzeme kullanımı içeren otomasyon üretim süreçlerinden yararlanır. Bu özellikleri itibariyle T/M, günümüz teknolojilerinde önemli kavramlar olan verimlilik, enerji ve hammadde üçlüsü ile uyum içerisindedir [20].

Bir parçanın üretilmesinde toz metalurjisinin tercih edilmesinin iki ana sebebi olabilir. Birincisi parçanın T/M dışında herhangi bir yöntemle üretilememesidir. Örneğin volfram ve molibden gibi refrakter metallerden üretilen parçalar, volfram karbür gibi metalurjik alaşımlamanın mümkün olmadığı parçalar, kendiliğinden

yağlamalı gözenekli burçlar, filtreler ve manyetik malzemeler ancak T/M ile üretilebilir. İkinci ana sebep ise toz metalurjisiyle üretimin, talaşlı üretim, döküm veya dövme kalıplama yöntemlerine göre daha ekonomik olmasıdır [20].

Toz metalurjisi işlemi metal işleme teknolojileri ile rekabet ederek, üstün avantajlar sağlamaktadır. Bütün bunlar, maliyet etkinliği, şekil ve malzeme sünekliği, uygulamalardaki çok yönlülüğü ve ürün kalitesindeki gelişimler için parça düzgünlüğü gibi toz metalurjsinin neden tercih sebebi olması gerektiği sıralanabilir [20].

3.4. Toz Metalurjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Toz metalurjisi yöntemini diğer üretim yöntemlerinden daha öncelikli kılan ve tercih sebebi olarak kullanılmasının başlıca avantajları:

1. Üretimde malzeme kaybı yoktur veya en aza indirilmiştir
2. Talaşlı işlemler elimine edilmiş veya en aza indirilmiştir.
3. Ergime kayıpları yoktur.
4. Geniş bir çeşitlilikte alaşım sistemleri üretilebilmektedir.
5. Yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip malzemeler üretilebilmektedir.
6. Diğer üretim teknikleri ile üretilmesi imkânsız veya çok zor olan karmaşık ve özel şekilli parçaların üretimi mümkündür.
7. Kütle üretimlerine ve seri üretimlere uygundur.
8. Hassas toleranslı parça üretiminde uzun süreli ve güvenilir bir performansa sahiptir.
9. Sinterleme işleminden sonra parça kullanıma hazırdır ve ikinci işlemlere genellikle gerek kalmaz.
10. Yakın toleranslar ve düzgün son yüzeyler elde edilir [23].

Toz metalurjisi yönteminin tercih edilmesini kısıtlayan bazı önemli dezavantajları ise şöyledir:

1. İlk yatırım (takımlar, presler, ve sinterleme ekipmanı) oldukça pahalıdır. Seri üretim yapılmazsa amortisman değerleri yüksektir.
2. Metal tozların maliyeti, ingot halinde üretilen malzemelerden daha pahalıdır.
3. Toleranslar talaşlı işlemlere göre daha kabadır.
4. Tozların kalıp içerisinde akışkanlığı sınırlıdır. Dolayısı ile yapılacak parçanın sekli kısıtlayıcı bir faktör olabilir [24].

3.5. Aluminyum Toz Metalurji Teknolojisi

Hafif metalleri TM endüstrisinde kullanım alanı açısından en çok yeri, Al parçaları almaktadır. Al, Ti, Be' un sahip oldukları üstün fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı, TM endüstrisinde kullanım alanı oldukça geniştir. Birim ağırlıktaki yüksek mukavemet, aşınmaya karşı direnç, iyi yüzey kalitesi ve başka üstün özelliklerinden dolayı Al/TM parçaları, makine ve otomobil endüstrisinde ve alet teknolojisinde kullanılmaktadırlar.

Pahalı olan ve uzun zaman gerektiren Al döküm, ekstrüzyon ve talaşlı imalat yöntemlerine göre Al/TM yöntemlerinin ekonomikliği ve bazı üstün fiziksel ve mekanik özelliklerinden ötürü kullanım alanı gittikçe artmaktadır.

Ana yapı malzemesi olarak hafif oluşlarından dolayı tercih edilen ve önemli ölçüde mekanik ve korozif özelliklerin iyileşmesini sağlayan Al alaşımlarına (Çizelge 3.1-3.2) Al_2O_3, SiC, SiO_2 gibi sert seramik partiküllerinin ilave edilmesiyle elde edilen kompozit malzemelerin özellikle abraziv aşınma direnci artmaktadır [25].

Çizelge 3.1. Bazı ticari alüminyum tozlarından üretilmiş parçaların özellikleri [26]

Alaşım	Presleme basıncı (MPa)	Ham yoğunluk (gr/cm^3)	Ham dayanım (MPa)	Sinterlenmiş yoğunluk (gr/cm^3)	Temper	Çekme dayanımı (Mpa)	Akma dayanımı (MPa)	% uzama	Sertlik
601AB	96	2.29	3.1	2.45	T1	110	48	6	55-60(HRH)
					T4	141	96	5	80-85 (HRH)
					T6	183	176	1	70-75(HRE)
	165	2.45	6.55	2.52	T1	139	88	5	60-65 (HRH)
					T4	172	114	5	80-85 (HRH)
					T6	232	224	2	75-80(HRE)
	345	2.55	10.4	2.58	T1	145	94	6	65-70 (HRH)
					T4	176	117	6	85-90 (HRH)
					T6	238	230	2	80-85(HRE)
602AB	165	2.42	6.55	2.55	T1	121	59	9	55-60(HRH)
					T4	121	62	7	65-70(HRH)
					T6	179	169	2	55-60(HRE)
	345	2.55	10.4	2.58	T1	131	62	9	55-60(HRH)
					T4	134	65	10	70-75(HRH)
					T6	186	172	3	65-70(HRE)
201AB	110	2.36	4.2	2.53	T1	169	145	2	60-65(HRE)
					T4	210	179	3	70-75(HRE)
					T6	248	248	0	80-85(HRE)
	180	2.50	8.3	2.58	T1	201	170	3	70-75(HRE)
					T4	245	205	3.5	75-80(HRE)
					T6	323	322	0.5	85-90(HRE)
	413	2.64	13.8	2.70	T1	209	181	3	70-75(HRE)
					T4	262	214	5	80-85(HRE)
					T6	332	327	2	90-95(HRE)

Toz metal alüminyum alaşımlarının özelliklerini iyileştirmek için kullanılan yöntemlerden biri mikro (< % 0.5) veya makro (% 1–20) düzeyde alaşım elementi kullanmaktır. Bakır, magnezyum, lityum ve silisyum gibi alaşım elemanlarının değişik oranlarda ilavesiyle toz metal parçaların mekanik ve fiziksel özellikleri değiştirilebilir. Alaşım elementleri mekanik özelliklerin yanı sıra yoğunluk ve korozyon dayanımında da değişikliklere sebebiyet verir. Kadmiyum, kalay, kobalt, titanyum, bizmut ve gümüş gibi elementler çökelme sürecini etkileyerek daha ince taneli yapı elde edilmesini sağlar [27].

Çizelge 3.2. Bazı ticari alüminyum alaşımlarının bileşimleri [26]

Alaşım	Bileşim				
	Cu	Mg	Si	Al	Yağlayıcı
601AB	0,25	1	0,6	kalan	1,5
201AB	4,4	0,5	0,8	kalan	1,5
602AB	…	0,6	0,4	kalan	1,5
601AC	0,25	1	0,6	kalan	…
201AC	4,4	0,5	0,8	kalan	…
202AB	4	…	…	kalan	1,5

3.6. Alüminyum Tozlar

Alüminyum tozlar 1900'lü yılların başlarında pul ürünler olarak kullanılmıştır. T/M teknikleriyle yüksek mukavemetli, alaşımlı alüminyum parçalarının üretimi ise 20. yüzyılın ortalarına rastlamaktadır. Günümüzde Al tozu yıllık üretim kapasitesinin yaklaşık 200 000 ton olduğu tahmin edilmektedir. Bu kapasitenin tamamına yakını gaz atomizasyonu ile üretilmektedir [28].

Al tozunun gerçek yoğunluğu ana metalin yoğunluğuna yakındır. Ancak görünür yoğunluğu 0,8-1,3 g/cm3 olup, bu değer verilen aralıkta boyut dağılımına bağlı olarak değişmektedir.

Alüminyumun oksijenle reaksiyona girmesi, toz yüzeyinde Al_2O_3 tabakası oluşturur. Al tozlarının yüzeyindeki bu ince oksit tabakası, tozların sinterlenmesinde olumsuz etkiye sahiptir. Oksit miktarı, toz boyutuna bağlı olarak, ağırlıkça % 0,1-1,0 arasında değişir. İnce tozlar, birim ağırlığa göre artan yüzey alanı sebebiyle, ağırlıkça en yüksek oksit yüzdesine sahiptir. Alüminyum tozlar üzerindeki oksit tabakası kalınlığı, farklı atomizasyon şartlarında bile, göreceli olarak sabittir. Al, bu ince oksit tabakası sebebiyle havada kararlıdır. Bununla beraber, ince bölünmüş alüminyum tozları kimyasal olarak reaktiftir [29].

Al tozları, ergiyik haldeki metalden atomizasyon yöntemiyle değişik saflık derecelerinde üretilirler. İşlem sırasında, açık havada kararlı olarak kalmasını sağlayan koruyucu ince bir oksit tabakası oluşturur. Al tozunun şekli, incelmiş, çomak şekilli ve yassı yüzeylidir. Yani uzunluğu diğer iki ölçüsüne göre çok büyüktür. Al tozunun katı roket yakıtlarında kullanımında ise bu boyut 10 μm'nin altına düşmektedir. Al tozlarının rengi çeşitli parlaklık derecelerinde metalik beyazdır. Al tozlarının çok geniş bir kullanım alanı olmasına rağmen başlıcaları şunlardır;

Kaynak elektrotlarında oksijen giderici kaplama olarak, roketler için katı yakıt yapımında (boyutu 10 μm'nin altındadır), yüksek sıcaklık dayanımına sahip parçaların N_2 altında sinterlenmesinde, sürtünmeli ortamlarda çalışan parçaların üretiminde, roketlerin sürtünen parçaları, fren ve kavramalar, fren balataları, vb. Elmas taşlama disklerinde reçine ile karıştırılarak ve elmas takımlarda bağlayıcı olarak, amonyum nitrat gibi maddelerle birlikte patlayıcı karışım imalinde, dökümhanelerde ve demir-çelik sanayinde çelik imalinde kullanılan ekzotermik karışımlarda oksit giderici (deoksidan madde) olarak (sıvı metalin içine kireç, soda veya başka bir maddeyle oksit giderici işlevi yapmak üzere püskürtülür), tren rayı gibi büyük parçaların kaynağında kullanılan termit kaynağında ve Cr, Mn, V gibi

metaller için oksit önleyici olarak, fişek sanayinde diğer nitrat ve pekloratlarla birlikte renkli ve renksiz havai fişek yapımında, yağ ve su bazlı aydınlatma ve işaret verme maddelerinde, duman oluşturucu karışımlarda, kimya sanayinde boya ve mürekkep üretiminde, organik kimya sektöründe metal olmayan bileşik hazırlamada indirgeyici olarak kullanılmaktadır [30].

4. METAL TOZU ÜRETİMİ

4.1. Metal Tozu Üretim Teknikleri

TM de ortalama boyutları birkaç mikrondan, birkaç yüz mikrona kadar parçalanmış partiküller, toz olarak tanımlanmıştır. Tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, dendritik formlara kadar çok farklı olabilmektedir. Aynı şekilde tozun yüzey durumunun düzgün veya gözenekli olması da yine üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Tozun ortalama boyutları, şekli ve yüzey durumu parça imalatı açısından önemlidir. Toz üretimini esas olarak mekanik üretim yöntemleri, elektroliz ile üretim teknikleri, kimyasal üretim teknikleri ve atomizasyon teknikleri olmak üzere dört ana grupta toplamak mümkündür [31].

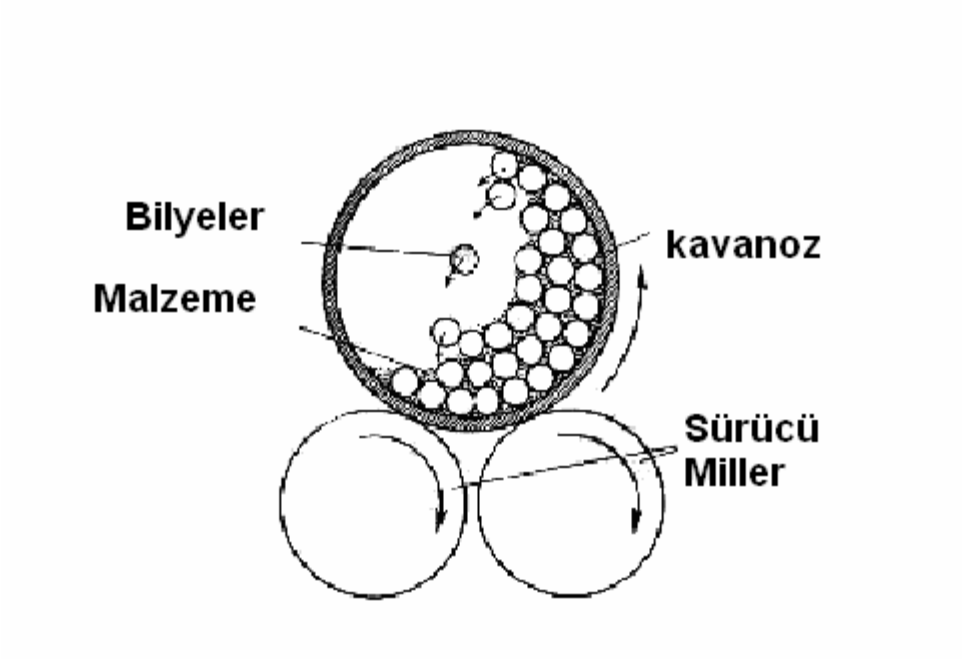
Bu üretim metotlarına ilave olarak, bazı seçilmiş malzemeler için özel toz üretim teknikleri de kullanılır. Endüstride kullanılan tozların % 60'dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir [1].

4.1.1. Mekanik üretim yöntemleri

Metaller arası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılgan malzemeler mekanik olarak bilyalı değirmenlerde öğütülürler. Fakat öğütme işlemi birçok sünek metal için uygun değildir; çünkü bu metaller kolayca kırılmazlar. Sünek tanecikler kırılma yerine birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanır ve daha büyük tanecik oluştururlar. Günümüzde öğütme işlemi alüminyum gibi sünek metallerden pul toz üretiminde de kullanılır. Bu durumda, soğuk kaynaklanmayı ve yapışmayı engellemek için yağlayıcılar kullanılır [1].

Dört ana mekanik öğütme yöntemi vardır: darbe, aşındırarak öğütme, kesme ve basma. Darbe, malzemeye çekiçle vurma gibi çok hızlı ve anlık uygulamaları içerir ve malzeme küçük parçalara ayrılır. Aşındırarak öğütme, aşındırıcıların bir biri üzerinde sürtünme hareketi sayesinde parçacıkların boyutunun küçültülmesidir.

Kesme, talaşlı imalatta olduğu gibi kesme işlemi ile malzemenin parçalanmasıdır. Diş dolgu malzemesi amalgamlarda kullanılan gümüş gibi pek çok metal tozu önceden tornalama ile elde ediliyordu. Kesme ile oluşturulan tozların büyük olma eğilimi vardır. Sonuncu olarak, basma kuvvetleri ile bir malzeme kırılma noktasına kadar deformasyona uğratıldığında toz haline gelir. Yiyeceklerde benzer şekillerde toz haline getirilir [19].



Şekil 4.1. Silindirik değirmende hareketin gösterilmesi [19].

Şekil 4.1' de görüldüğü gibi silindirik değirmende, silindir döner ve aşağıya düşen bilyeler malzemeyi öğüterek toza dönüştürür. Öğütme birçok sünek malzeme için kullanışlı değildir, çünkü bu tür malzemeler kırılarak ufalanma yerine şekil değiştirir veya topaklanır. Ayrıca sistemin verimi de düşük olup çoğunlukla %1–3 arasındadır. Gevrek malzemeler daha kolay öğütüldüklerinden malzemeleri gevrekleştirilmiş olarak öğütme daha uygundur, örneğin titanyum hidrojene maruz kaldığında gevrekleşir ve öğütme sonrası hidrojen malzemeden uzaklaştırılabilir. Birçok malzeme bu şeklide gevrek tersinir hidrürler oluşturur. Resim 4.1' de gösterilen köşeli Niyobyum tozları böyle bir hidrür tekniği ile öğütülmüş ve sünek metalden gevrek malzemelere özgü köşeli parçacıklar elde edilmiştir [19].

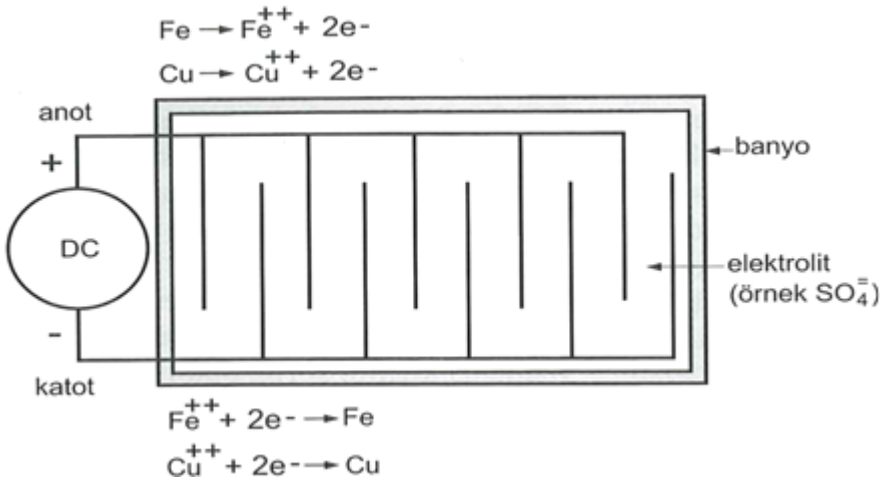


Resim 4.1. 50 µm öğütülmüş niyobyum tozlarının taramalı elektron mikroskop görüntüsü [19].

4.1.2. Elektroliz ile üretim teknikleri

Bu metot da tozlar doğrudan elektrolitik banyoda çökeltilir ya da iyi kırılabilme özelliğinde katot da toplanır. Bu yöntemle üretilen demir veya bakır tozları elektrolitin bulunduğu tekne içerisindeki paslanmaz çelik olan katot da ortalama 48 saatte 2,5 mm kalınlığında toplanır. Katotta biriken Cu veya Fe tozları sıyrılarak alınır, yıkanır, kurutulur ve gerekirse öğütme işlemi yapılarak toz tane ebadı küçültülebilir.

Bu yöntemle elde edilen tozlar indirgeyici gazlar ile tavlanarak sıkıştırılabilme özellikleri artırılır. Elektroliz yolu ile genel olarak bakır tozu üretilir. Bu yöntemle demir tozları elde etmek mümkün olmakla beraber, maliyetinin yüksek olması nedeni ile demir tozu üretiminde diğer yöntemler daha avantajlıdır. Bu yöntemle sadece saf element tozları üretilebilir, alaşım tozları üretilemez. Üretilen tozlar dendritik yapıya sahiptir. Şekil 4,2'de Elektrolitik toz üretiminin şematik resmi görülmektedir [32].



Şekil 4.2. Toz biriktirmek için bir elektroliz hücresi [19].

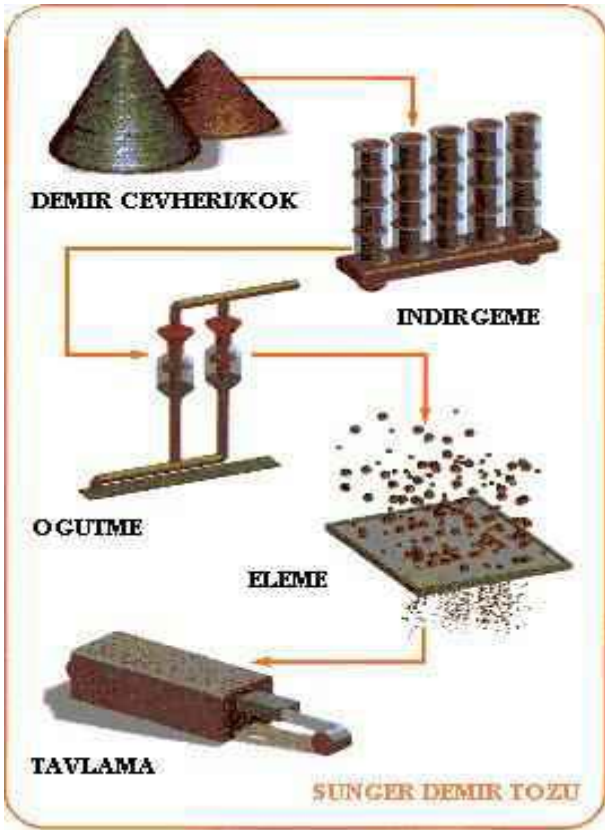
Elektroliz tekniği ile üretilen tozlar genellikle dentritik ve süngerimsi şekillidir. Ancak, parçacık boyutu ve şekli önemli ölçüde kontrol edilebilir. Tozların özellikleri biriktirme sırasındaki banyo şartları ve sonraki işlem basmaklarına bağlıdır. Elektrolizle üretilmiş bakır tozlarına örnek Resim 4.2' de gösterilmiştir. Elektrolizle üretilmiş tozlar genellikle düzensiz, gözenekli ve dentritik yapıda olup düşük paketlenme özelliği gösterirler [19].



Resim 4.2. Elektroliz ile üretilmiş bakır tozunun taramalı elektron mikroskop görüntüsü [19].

4.1.3. Kimyasal üretim teknikleri

Demir tozlarının üretiminde bu metot çok kullanılmaktadır. Bu yöntemde seçilen cevher öğütülür, kokla karıştırılır, karışım indirgemenin oluştuğu sürekli fırından geçirilir ve kek şeklinde sünger demir elde edilir. Sünger demir daha sonra öğütülür, metalik olmayan malzemelerden ayrılır ve elenir (Şekil 4.3). Tozların saflığı ham malzemelere bağlıdır. Düzensiz süngerimsi tanecikler yumuşaktır ve kolayca preslenebilir ve böylece ham mukavemeti iyi olan ürünler oluşur. Benzeri şekilde refrakter metaller de oksitlerinin hidrojenle indirgenmesiyle üretilirler [1].

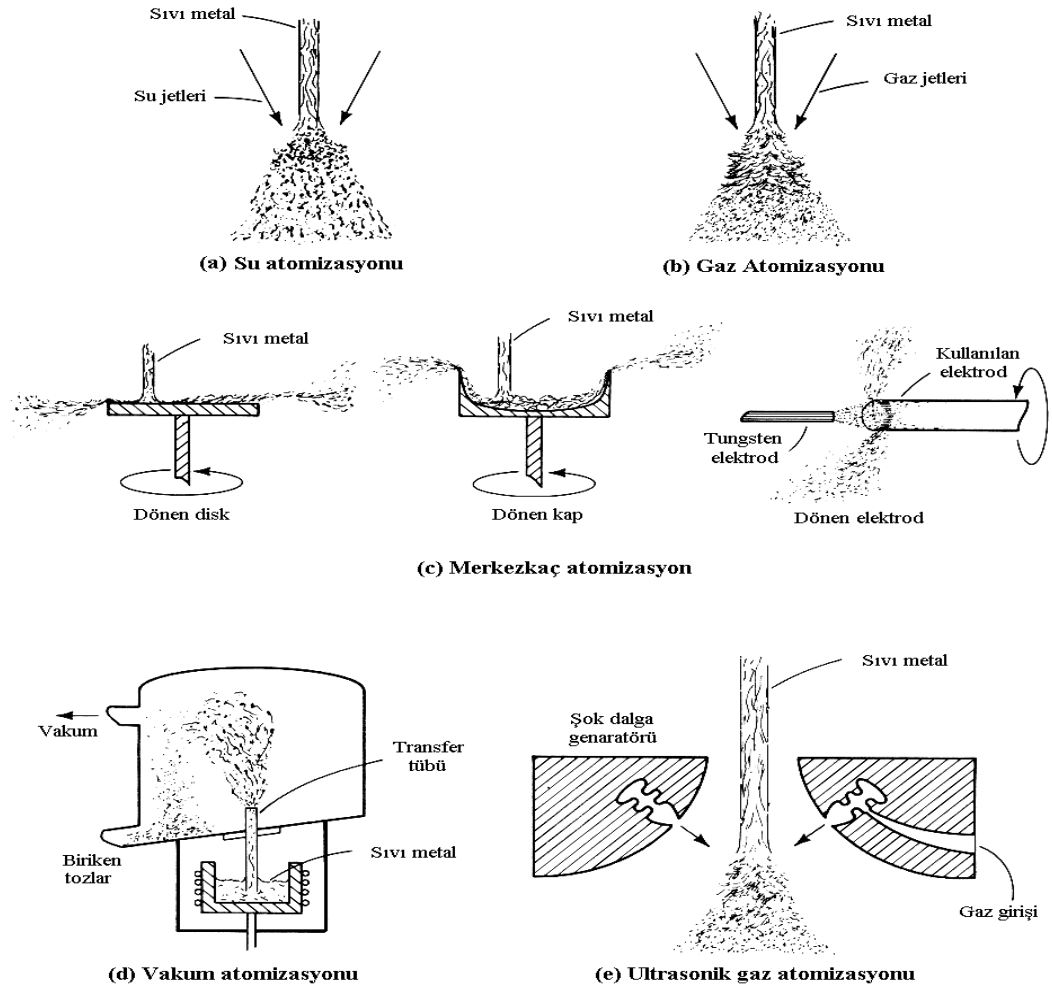


Şekil 4.3. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi [1].

4.1.4. Atomizasyon teknikleri

Bu işlemde ergimiş metal küçük damlacıklara parçalanır ve damlacıklar birbirleri ile veya katı yüzeyle temasa geçmeden hızlıca soğutulur. Ana fikir, ergimiş metali yüksek enerjili gaz veya sıvı çarpmasına maruz bırakarak sıvı metali daha küçük parçalara ayırmaktır [1].

Ayrıca, artan oranlarda uygulama alanı bulan diğer bir çok atomizasyon yöntemleri vardır. Bunlardan başlıcaları; Gaz atomizasyon yöntemi, Su atomizasyon yöntemi, Döner disk yöntemi, Döner elektrot yöntemi, Vakum atomizasyon yöntemi örnek gösterilebilir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Atomizasyon prosesleri [26]

Hava, azot ve argon en çok kullanılan gazlardır. Su ise sıvılar içinde en çok kullanılandır. Nozulun tasarım ve geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi birçok parametreyi değiştirerek toz boyutu dağılımını kontrol etmek mümkündür. Tanecik şekli ise katılaşma hızı ile belirlenir, düşük soğutma kapasiteli gazlar için küresel şekilden yüksek soğutma kapasiteli su için karmaşık şekle dönüşür.

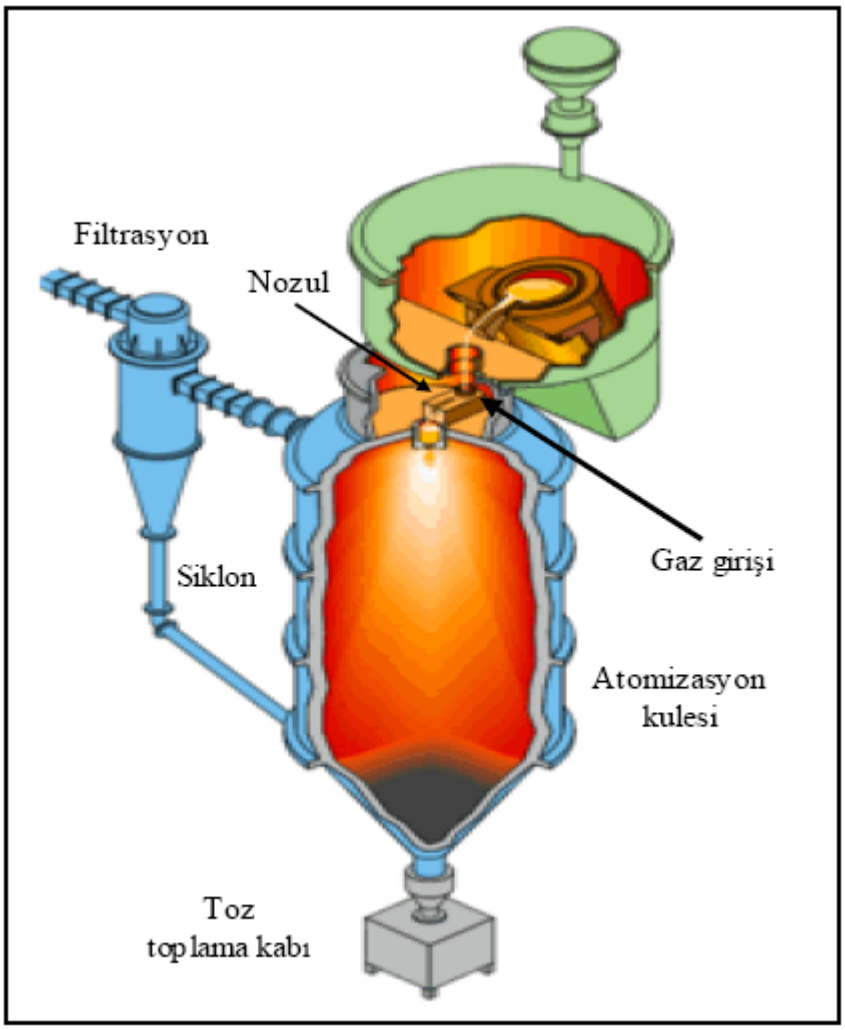
Genelde bu toz üretim metodu ergitilebilen tüm malzemeler için uygulanabilir ve ticari olarak demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz, aluminyum, kalay, kurşun, çinko ve kadmiyum tozlarının üretilmesinde kullanılır. Krom içeren alaşımlar gibi kolayca oksitlenen metallerde atomizasyon argon gibi asal gazlar yardımıyla gerçekleştirilir. Atomizasyon, alaşımı oluşturan tüm metallerin ergimiş durumda tamamen alaşımlandığı için, özellikle alaşımların toz halinde üretilmesinde faydalı bir yöntemdir. Böylece her toz taneciği aynı kimyasal bileşime sahip olur [1].

Püskürtme açısı ve konisi, akışkan hızı, debisi, akan metalin kalınlığı gibi birçok parametrenin kontrolü ile çok farklı boyutlarda toz üretimi mümkündür. Katılaşma hızına bağlı olarak parçacığın şekli küresel halden, daha düzensiz parçacığa kadar farklılık gösterebilir. Pratikte bu yöntem ergitilebilen bütün metallere uygulanabilir. Atomizasyon yönteminin avantajlarından biri de alaşım tozlarının ergitilmesinde rahatlıkla kullanılabilmesidir. Bu yöntemle üretilen tozların bileşimleri her bir toz tanesinde aynı kalmaktadır [31].

Gaz atomizasyon yöntemi

Basınçlı gaz ile atomizasyon da prensip olarak su atomizasyon yöntemine benzer. Bu yöntemde akışkan olarak su yerine gaz kullanılır [31]. Sıvı malzeme nozul çıkışında parfümün püskürtülmesi gibi hızlı gaz genleşmesi sayesinde parçalanır (Şekil 4.5).

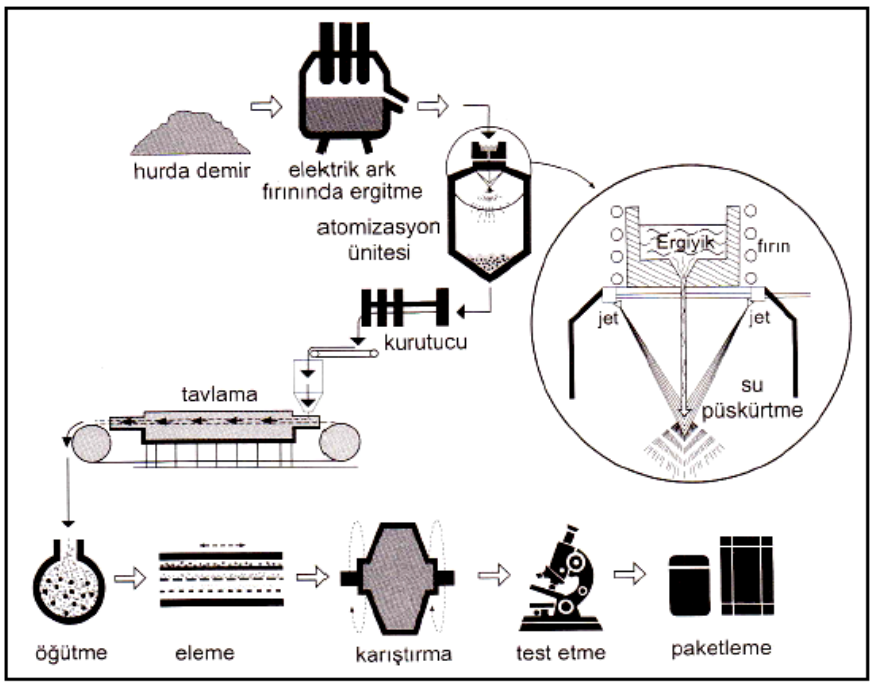
Gaz atomizasyon yöntemi, gaz atomizasyonu mekanizması, gaz atomizasyon üniteleri, gaz atomizasyonunda kullanılan nozul tipleri, gaz atomizasyon sistemleri olmak üzere Bölüm 5'deki Gaz Atomizasyonu adı altında ayrıca ele alınmıştır.



Şekil 4.5. Gaz atomizasyon ünitesi [33]

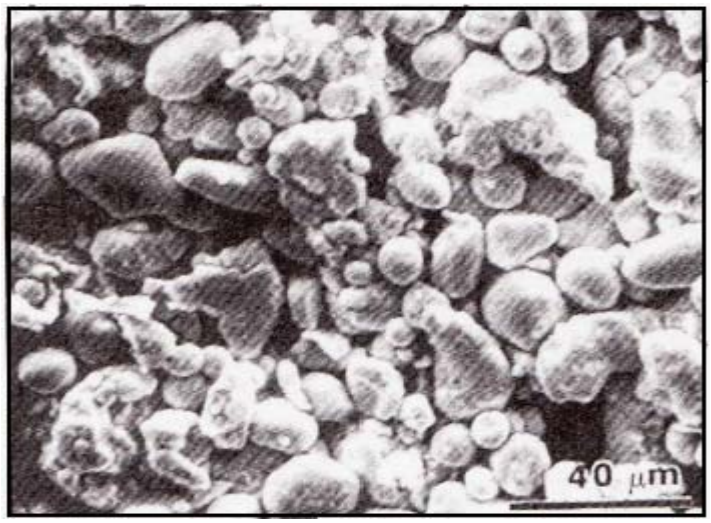
Su atomizasyon yöntemi

Bu yöntemde gaz yerine bir sıvının ergiyik demetini parçalamada kullanılması yaygındır. Şekil 4.6'da çelik veya demir tozu üretiminde kullanılan su atomizasyon yönteminin temel prensibi şematik olarak gösterilmektedir. Sıvılar, yağ ve su içerir. 1600 ˚C' den düşük sıcaklıklarda ergiyen az reaktif malzemeler için suyun kullanımı çok yaygındır. Yüksek basınçlı su jetleri ergiyik demetine yönlendirilerek onun parçalanmasını ve hızlı katılaşmasını sağlar. Su genellikle birkaç jetten yönlendirilir. Bu yöntem gaz atomizasyonuna benzer, ancak parçacıklar daha hızlı soğur ve atomizasyon sıvısı çok daha yüksek verimle hızı küçük tozlara aktarır.



Şekil 4.6. Su atomizasyonu işlemi [19].

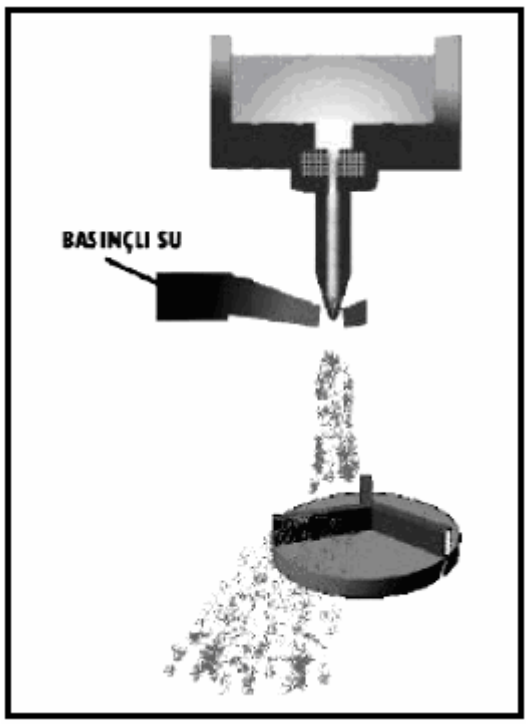
Atomizasyon öncesi ergiyik, sıvılaşma eğrisinin çok üzerine ısıtılırsa daha küresel tozlarda elde etmek mümkündür (Resim4.3). Su atomizasyon işleminde ana kontrol değişkeni basınçtır. Daha yüksek su basıncı daha yüksek su hızı, daha küçük parçacık boyutu meydana getirir [19].



Resim 4.3. Suyla atomize ederek bilerek yuvarlak şekilli üretilmiş -325 elek paslanmaz çelik tozlarının taramalı elektron mikroskop görüntüsü [19].

Döner disk yöntemi

Atomizasyon için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bunların içinde önemli bir yer tutan yöntem, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle toz metal üretimini sağlayan döner disk yöntemidir.



Şekil 4.7. Döner disk atomizasyon yöntemi [31]

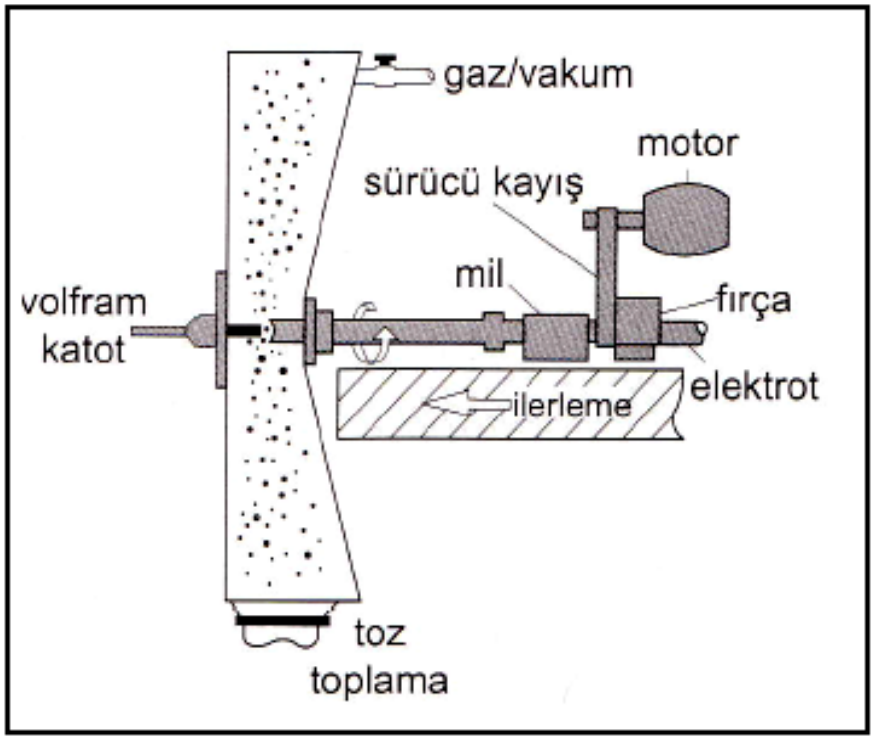
Bu yöntem içinde de iki ayrı üretim tekniği vardır, bunlardan biri belli bir miktarda sıvı metal toz oluşturacak kadar merkezkaç kuvvetine tabi tutulur. Diğer yöntemde ise ergimiş metal sürekli olarak dönen bir disk veya koni üzerine akıtılarak saçılan metalin toz haline gelmesi sağlanır (Şekil 4.7).

Bir potadan tandişe aktarılan sıvı metal, tandiş altındaki memeden dönen bir disk üzerine akıtılır. Disk üzerindeki set ve yarıklara çarpan sıvı metal parçalanarak şekildeki gibi saçılır.

Saçılan metal parçacıklar nozulden çıkışta bazen su ile soğutularak birbirine yapışmadan katılaşmaları sağlanır. Sıvı metali mekanik olarak parçalamak için uygulanan basit bir yol da katılaşma sırasında karıştırmaktır [31].

Döner elektrod yöntemi

Bu yöntemde tozu elde edilecek metalden yapılmış bir elektrot ile ergimeyen tungsten elektrot arasında ark oluşturulur (Şekil 4.8) [31].

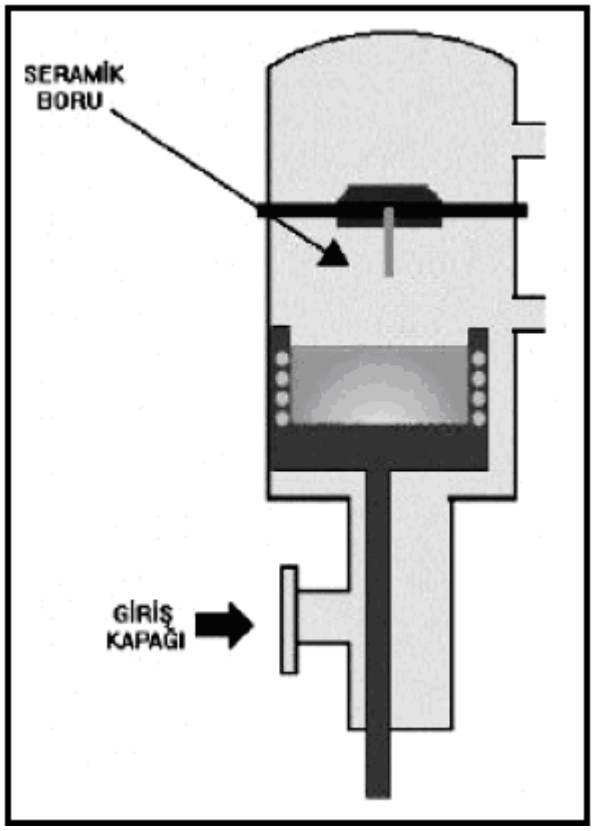


Şekil 4.8. Döner elektrot ile savurmalı atomizasyonun şematik gösterimi [19].

Ergiyen elektrotun döndürülmesiyle, elektrik arkı altında oluşan metal damlaları savrularak parçalanır ve tankta toplanır. Oksidasyonu önlemek için toz toplama tankı genellikle helyum, argon gibi bir asal gazla doldurulur. Bu yöntemle küresel ve oldukça eşit tane iriliğinde metal tozu üretmek mümkün olmaktadır [31].

Vakum atomizasyon yöntemi

Bu yöntemde, Şekil 4.9'da görüldüğü gibi silindirik bir tankın alt kısmında sıvı metal potası, üst kısmında da vakum atomizasyon odası bulunmaktadır [31].



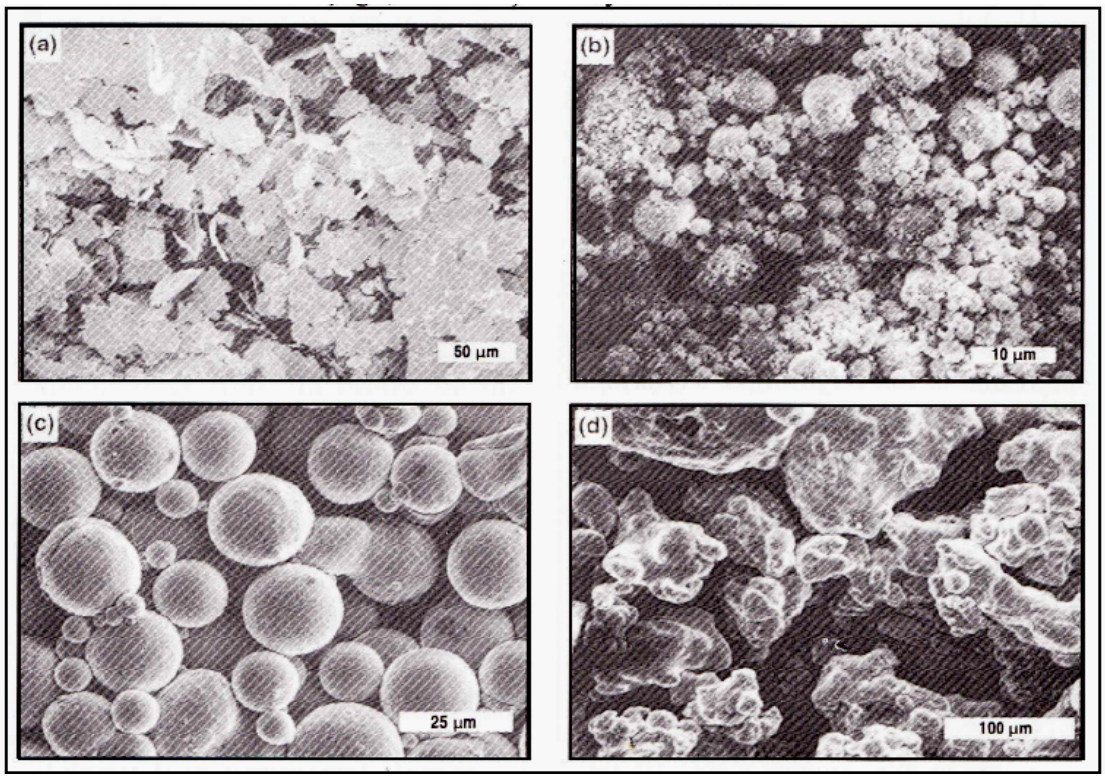
Şekil 4.9. Vakum atomizasyon yöntemi [31]

Her iki bölüm sıvının geçeceği memeyi taşıyan bir plaka tarafından bölünmüştür. Memenin alt kısmında ona bağlı bir seramik boru bulunmaktadır. Vakum altındaki sıvı metal önce belirli bir sıcaklığa kadar indüksiyon akımı ile ısıtılır, sonra bu bölüme hidrojen gazı doldurulur. Potadaki sıvı metal de bu hidrojen gazı çözündükten sonra taşıyıcı mil potayı yukarı iterek seramik boruyu potaya daldırır. Üst kısımda vakum olduğu için ergimiş sıvı metal memeden geçerek parçalanarak pülverize olur ve soğur. Böylece metal ve alaşımlarından ince küresel tozlar üretilebilmektedir [31].

4.2. Toz Özellikleri ve Karekterizasyonu

Toz metalurjisi teknolojileri parçacıkların bir araya gelmesiyle oluşan tozlarla başlar. Yoğunlaştırma işleminde önemli bir girdi olması nedeniyle tozun iyi anlaşılması gerekir. Teknik detaylar oluşturulurken işlem kontrolünün sürdürülmesinde toz özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin ürün performansının nasıl etkilediğinin bilinmesi önemlidir.

Parçacık, tozun bölünemeyen en küçük birimi olarak tanımlanır. Toz işleme teknolojileri genellikle dumandan daha büyük (0,01–1 μm), fakat kumdan daha küçük (0,1–3 mm) parçacıklarla ilgilenir. Kullanılan tozların çoğu, insan saçı çapı ölçüsündedir (25–200 μm). Çeşitli tozlara ait SEM fotoğrafları Resim 4.4' de verilmiştir [19].



Resim 4.4. Toz metalurjisi uygulamalarında farklı toz boyutları ve şekillerine ait örnekler; a) 50μm genişliğinde pul şeklinde tantalyum tozları, b) 2μm çapında topaklanmış küresel silisyum nitrür tozları, c) 20μm çapında küresel paslanmaz çelik tozları, d) yaklaşık 100μm uzunluğunda düzensiz şekilli demir tozları [19].

Bunlar toz metalurjisi uygulamalarında karşılaşılması mümkün, farklı parçacık boyutu ve şekillerine ait fotoğraflardır. Her bir toz yoğunlaştırma sırasında farklı tepki verir. Yoğunlaştırma sırasındaki sorunlar aşağıdaki çeşitli toz özelliklerinden kaynaklanabilir.

1. Parçacık boyutu ve dağılımı,
2. Parçacıkların topaklanması,
3. Yüzey alanı,
4. Parçacıklar arası sürtünme,
5. Akış ve paketleme,
6. İçyapı,
7. Bileşim, homojenlik ve kirlilik.

Bu toz özellikleri toz üretimi sırasında alınan kararları yansıtır [19].

4.2.1. Toz tane boyutu ölçüm teknikleri

Toz Tane boyutu ölçüm teknikleri olarak;

1. Elek analizi,
2. Mikroskobik yöntem,
3. Sedimantasyon,
4. Elektriksel alan algılaması,
5. X-ışını teknikleri
6. Işık Hüzmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Elek analizi büyük parçacıkların boyut dağılımının ölçülmesinde kullanılan eski bir teknik olup, tozların tane büyüklüğünün 38 μm' den büyük olması durumunda kullanılabilen bir yöntemdir. Birim alandaki mevcut delik sayısı eleği karakterize eder [34].

Parçacık boyutu ölçmenin evrensel bir yolu da, sayısallaştırılabilen veya dijital ortama aktarılabilen bir görüntü elde edilebilmesine imkân tanıyan mikroskobik yöntemdir. Günümüzde bu otomatik görüntü analizi ile bir mikroskopta gerçekleştirilebilir. Cihaz seçimi parçacık boyutuna bağlı olup birkaç nm boyuttan birkaç mm boyuttaki parçacıklara kadar uygulanabilir.

Sedimantasyon ile parçacık boyut analizi ise küçük parçacıklara uygulanabilir. Parçacık yoğunluğu ve merkezkaç kuvvetine bağlı olarak 0,02-100 μm parçacık aralığını kapsayacak şekilde ayarlanabilir.

Elektriksel alan algılaması tekniğinde, kalibrasyon işlemleri ve uygun açıklık çapının seçimi ile (en büyük parçacık boyutunun yaklaşık 1,6 katı) her biri için dinamik oranın yaklaşık 30 olduğu, çok çeşitli boyut aralıklarına uygulanabilir. En düşük parçacık boyut kapasitesi 0,5 μm' dir.

Çok küçük parçacıkların ortalama boyutunu ölçmek için kullanılan X ışını tekniklerinden ilki X ışını genişlemesi ile 200 nm parçacık boyutlarına kadar kullanılırken, ikinci X ışını tekniği küçük açı saçılımı ile 50 nm' den küçük parçacıkların ölçümünde son derece etkilidir [19].

Işık hüzmesinde, akışkan, birbirinden ayrılmış taneciklerle birlikte detektör sisteminin önünden geçer. Kırılan ışığın şiddeti, tanecik çapıyla ters orantılı olarak değişmektedir. Kırılan ışığın şiddeti ve açısal bilgilerinin bilgisayar ile analizi, hızlı tane boyutu ölçüm olanağı sağlar. En çok kullanılan çeşidi 1 ile 200μm aralığıdır [34].

4.2.2. Toz tane şekli

Toz şekli; parametreyi, akışı ve sıkıştırılabilirliği etkiler. Bundan başka, bir tozu üretmek için kullanılan şartların belirlenmesine yardımcı olur. Toz şeklini sayısal olarak ifade etmek zor olduğundan; şeklin bir anlam ifade etmesi için, nitelikle ilgili tanımlayıcılar sıkça kullanılır. Şekil 4.10 toz şekillerini ve uygun niteliksel tanımlamalarını göstermektedir [19].



Şekil 4.10. Olası parçacık şekilleri ve önerilen niteliksel tanımlayıcılar [19].

4.2.3. Toz akış hızı

Akış oranı; 50 gr'lık standart toz ağırlığının atmosferik şartlar altında özel olarak dizayn edilmiş bir huniden akması için geçen zamanı ifade etmektedir. Akış oranı üretim kapasitesini etkileyen bir faktördür. Düşük akış oranı, tozun kalıp içine istenen şekilde dolmasına mani olacağı gibi basınç kuvvetlerinin de eşit şekilde dağılmasına engel olur.

Akış oranına aşağıdaki parametreler etki eder;

a) Parçacıklar arası sürtünme
b) Toz boyut ve şekli
c) Toz malzemesi
d) Çevre şartları
e) Tozun ana malzemesinin yoğunluğu
f) Yaslanma açısı [35].

4.2.4. Yüzey Alanı, Yoğunluk ve Gözeneklilik

Metal tozun ham yoğunluğu, tozun temel özelliklerinden biridir. Ham yoğunluk, sıkıştırılmamış tozların birim hacimde kapladığı ağırlık olarak tarif edilebilir. Bu da kalıp dizaynını ve sıkıştırma basıncını belirlemede önemli bir büyüklüktür.

Ham yoğunluğa; katı metalin yoğunluğu, toz boyutu, toz boyut dağılımı, tozun şekli, yüzey alanı, tozun pürüzlülüğü etki eder. Ham yoğunluk toz boyutuyla çok ciddi ilişkilidir. Ham yoğunluk;

a) Toz boyutu küçüldükçe, düşer,
b) Tozun şekli çok düzensiz ve daha az küresel oldukça, azalır,
c) Yüzey pürüzlülüğü arttıkça, düşer,
d) Genellikle, değişik boyutlarda tozların karıştırılmasıyla, kontrol edilir.

<u>Toz Boyutunun Etkisi:</u>

Toz boyutu azaldıkça genellikle ham yoğunluk da azalır. Toz boyutu ne kadar küçükse tozların birbirleriyle teması nedeniyle oluşturacağı yüzey alanı o oranda büyür. Bu olay, tozların birbiriyle sürtünmelerini arttırır ve dolayısıyla yoğunluğu düşürür. Gaz atomizasyon yöntemi ile küresel olarak üretilmiş paslanmaz çelik tozları, yuvarlak şekillerinden dolayı birbirleriyle çok az sürtündüğünden, yukarıda

bahsedilen özellikleri göstermezler. Toz boyutunun küçülmesinin yoğunluk, üzerindeki etkisi, özellikle 20 μm'dan küçük toz boyutlarında çok önemlidir.

Toz Şeklinin Etkisi:

Tozun şekli küresel şekilden ne kadar farklılaşırsa metal tozların sürtünen yüzey alanları artacak ve dolayısıyla ham yoğunluk o oranda düşecektir. Atomizasyon yöntemi ile üretilmiş tozların çoğu küresel olup bu şekildeki tozlar en fazla ham yoğunluğa sahiptirler. Küresel tozların ham yoğunluğu imal edildiği malzemenin yaklaşık yarısıdır. Toz şekillerin diğer bir kısmını temsil eden ve imal edildiği malzemenin yoğunluğunun % 10'u mertebesinde ham yoğunluğa sahip pul tozlardır. Düşük ham yoğunluk özelliklerine sahip oldukları için özellikle boya sanayinde pigment olarak kullanılmaktadırlar.

Tozun Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi:

Birim hacim başına yüzey alanının azalması, yüzey pürüzlülüğünün azalmasına dolayısıyla da sürtünme kuvvetlerinin azalmasına neden olur. Bu durum tozların birbirleri arasındaki boşlukları doldurmasını ve ham yoğunluğun artmasını sağlar.

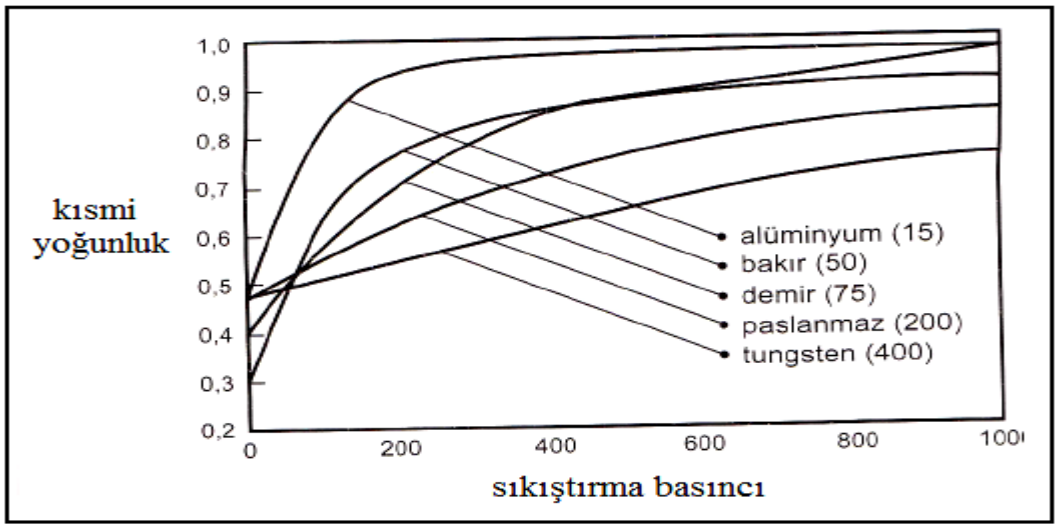
Tozun Boyut Dağılımının Etkisi:

Metal tozlarının ham yoğunluğunu arttırmanın etkili yöntemlerinden biri de metal tozları arasındaki boşlukları daha küçük tozlar ile doldurmaktır [36].

4.3. Metal Tozlarının Preslenmesi

Presleme işlemi, tozları basınç altında daha yoğun bir hale getirme işlemi olarak tarif edilebilir. Tozların preslenebilirliği, kalıp tasarımının ve parça yoğunluğunun tespit edilebilmesi aynı zamanda istenen bu yoğunluğu sağlayacak pres seçiminin ana faktörlerindendir. Tozun preslenebilirliğine değişik faktörler etki etmektedir.

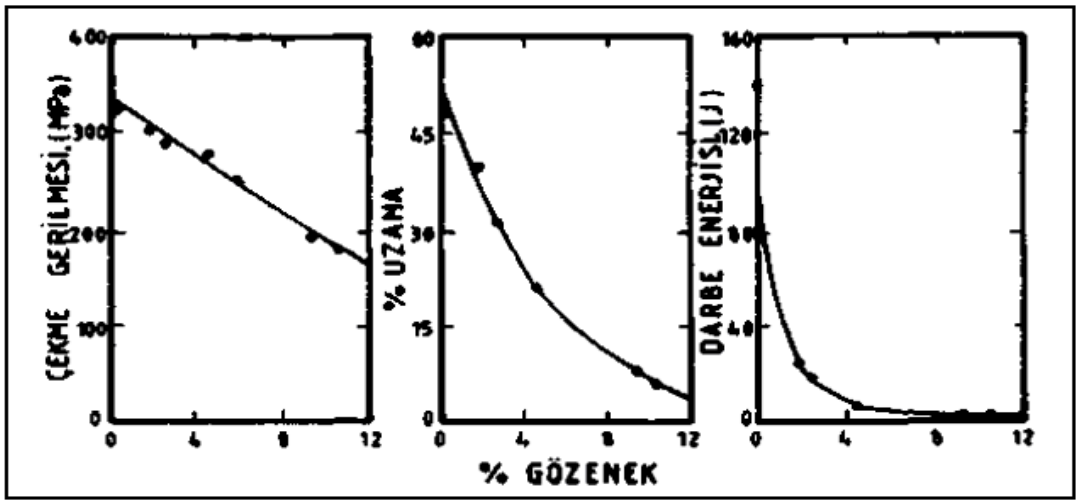
a) Ana malzemenin sertliği; bazı malzemelerin sertliğinin fazla olması preslenebilmesi için gerekli olan basınç kuvvetlerinin daha fazla olmasını gerektirmektedir.
b) Tozun şekli; tozun şekli ne kadar düzensizse preslenebilirlik o oranda düşüktür.
c) Tozun gözenekliliği; tozun içindeki küçük boşluklar presleme esnasında tozlar içindeki havanın sıkışmasına dolayısı ile tozların bağlanmasına engel olur. Boşluksuz tozlar en yüksek preslenebilme özelliklerine sahiptir.
d) Toz boyut dağılımı; aynı boyutlardaki tozların preslenebilirliği zayıftır. Farklı boyutlardaki tozların karışımı ile tozlar arası boşluklar azaltıldığı için daha iyi preslenebilirlik elde edilmektedir.
e) Metalik olmayan kalıntıların mevcudiyeti; oksit indirgeme gibi metalik olmayan malzemeler sertliklerinin çok fazla, yoğunluklarının ise az olması nedeniyle preslenebilirliği azaltır.
f) Katı yağlayıcıların kullanılması; Düşük ağırlıkları buna karşılık çok yer tutan hacimleri dolayısıyla katı yağlayıcıların metal karışıma etkisi preslenebilirliği artırır.
g) Alaşım elementleri ilavesi; Grafit ve sülfür gibi alaşım ilaveleri genellikle preslenebilirliği artırır [37].



Şekil 4.11. Çeşitli metallerin sıkışma özellikleri.

Şekil 4.11’ de görüldüğü gibi, yoğunluk artışı düşük basınçlarda önce hızlıdır, fakat gözenekler kapandıkça toz, yoğunlaşmaya karşı artarak direnç gösterir. Bu şekil sertlikleri giderek artan beş metalin davranışını göstermektedir. Çok tabidir ki parçacık sertliği sıkıştırma için önemli bir parametredir [19].

Makine elemanlarının mekanik özellikleri gözenek oranına bağlıdır. Gözenekler stresin yoğunlaştığı merkezler olarak davranırlar. Ayrıca gözenekler çatlak ilerlemesine de yardımcı olurlar. Mekanik özelliklerin gözenek ile değişimi Şekil 4.12’ de görülmektedir [38].



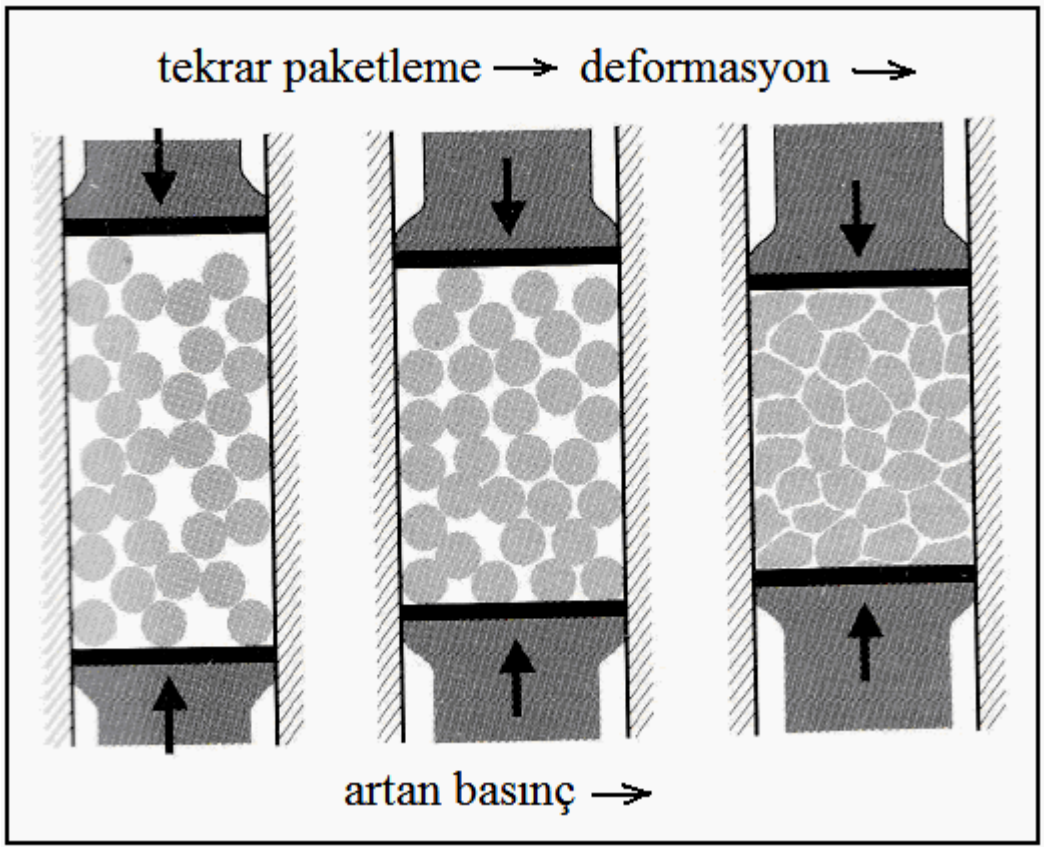
Şekil 4.12. Mekanik özelliklerin gözenek ile değişimi [38].

Toz metalürjisinde farklı presleme yöntemleri vardır. Preslenen toz kütlelerinde istenilen en önemli özellik, yoğunlaşma dağılımının homojen olmasıdır. Yoğunlaşma davranışı ise presleme yöntemine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir [38].

4.3.1. Kalıpta sıkıştırma teknolojisi

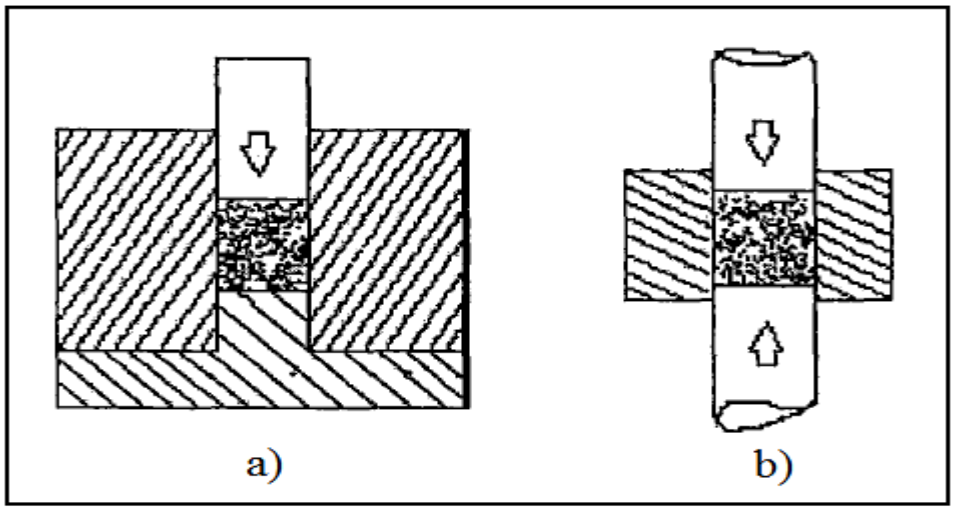
Kalıpta sıkıştırmanın basitleştirilmiş bir görünüşü Şekil 4.13’ de şematik olarak verilmiştir. Toz görünür yoğunlukta başlar, her bir parçacık 4-6 komşusu ile temastadır. Bu aşamada tozun herhangi bir bağ mukavemeti yoktur.

Basınç uygulandıkça parçacıklar yerleşir, şekil değiştirir ve bağ oluşturur. Şekil değiştirme parçacıkların sertliğini artırdığından, sıkıştırmayı devam ettirmek için daha yüksek basınç gerekir. Neticede malzeme geri dönüşü olmayan bir noktaya kadar sertleşir. Çok sert ve çok yumuşak tozlar daha düşük basınçlarda sıkıştırılır [19].



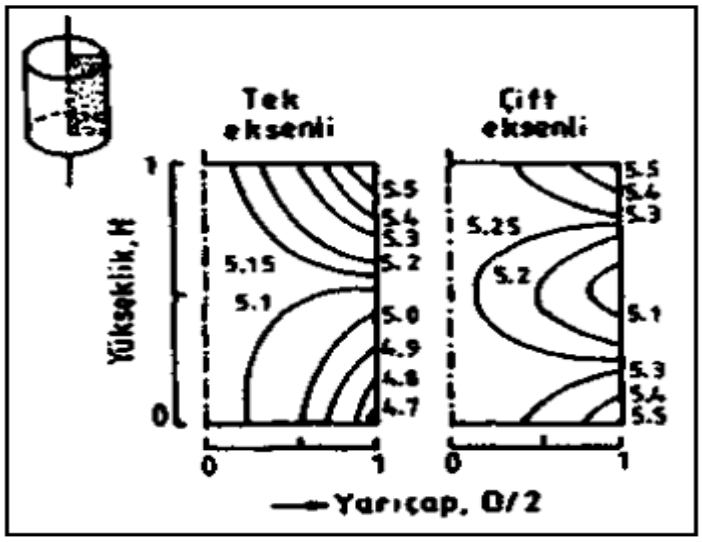
Şekil 4.13. Toz sıkıştırma kademelerinin bir görünüşü [19].

Kalıpta sıkıştırma teknolojisi en çok kullanılan şekillendirme yöntemlerindendir. Belirlenen basınç değeri kalıp içerisindeki toz kütlesinin tek ve çift tarafından dikey doğrultuda uygulanmak suretiyle (Şekil 4.14), tek hareketli zımbalarda presleme ve çift hareketli zımbalarda presleme olmak üzere isimlendirilmektedir [39].



Şekil 4.14. Metal kalıplarda presleme; a) Tek hareketli b) Çift hareketli [39].

Tek eksenli preslemede Şekil 4.15' de görüldüğü gibi, en düşük yoğunluk toz kütlesinin en alt kısmında meydana gelmiştir. Alternatif olarak çift eksenli preslemede ise, en düşük yoğunluk toz kütlesinin tam ortasında meydana gelişmiştir.



Şekil 4.15. Tek eksenli ve çift eksenli kalıpta preslenmiş tozlarda yoğunluk dağılımları [38].

Tozlar bir metal kalıba dolduruldukları zaman belirli bir yoğunluk alırlar. Bu görünür yoğunluk toz şekline, tane büyüklüğüne ve dağılımına, katkı maddelerine ve kısmende kalıp şekline bağlıdır. Basıncın uygulanmasıyla yoğunlaşma 3 kademede

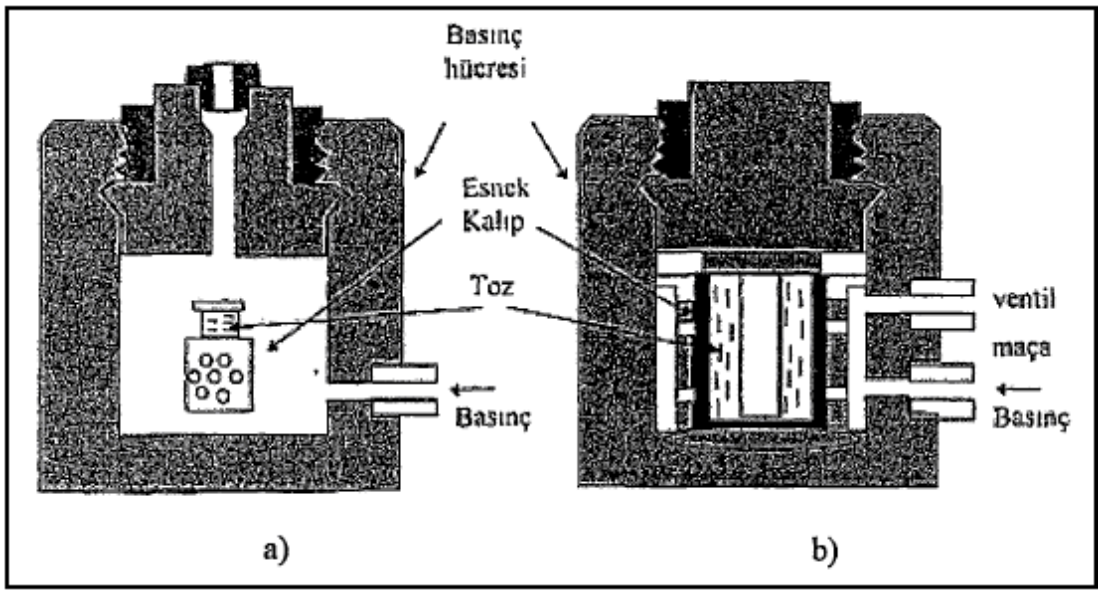
oluşur. Birinci kademede tozlar yer değiştirerek daha yoğun bir paketleme oluştururlar. Bu duruma yeniden paketlenme denilmektedir. Bu aşama ile başlayan yoğunlaşma, düzgün şekilli taneciklerin kolayca düzenlenmesiyle, % 10 civarında artar. Yoğunlaşmanın ikinci safhası orta basınçlarda, tozlar arasındaki nokta temaslardan başlayan bölgesel deformasyonu içerir. Bu aşamada başlayan plastik deformasyon ile meydana gelen toz kütle hareketiyle % gözeneklilik azalır, temas alanı ve miktarı artar [38].

4.3.2. İzostatik presleme

İzostatik basıncının uygulandığı ortam, çevre veya oda sıcaklığında olduğunda "soğuk izostatik presleme" olarak ve ortamın yüksek sıcaklıklarda olmasında ise "sıcak izostatik presleme" olarak ikiye ayrılır. Soğuk izostatik presleme ile yapılan yoğunlaştırma işleminden sonra sinterleme yapılır. Ancak sıcak izostatik preslemede yoğunlaştıma ve sinterleme birlikte olur [40]

Soğuk izostatik presleme

Tek eksenli kalıpta tozların sıkıştırılması sık kullanılmakla birlikte başka sıkıştırma metotları da vardır. Soğuk izostatik presleme (Cold Isostatic Pressing), kademeli ve karmaşık şekilli parçalar veya boy-çap oranının büyük olduğu parçalar için tercih edilir. CIP işleminde, toz esnek bir kalıp içerisinde sızdırmaz hale getirilir. Bu toz-kalıp birleşimi yağ veya su gibi bir sıvının olduğu kabın içinde sıkıştırılır. Genellikle yağlayıcılar kullanılmaz. Bununla beraber sert metallerin ham yoğunluğunu artırmak için bazı parafinler ilave edilebilir. 1 400 MPa' a kadar sıkıştırma basınçları mümkün olmasına rağmen 420 MPa altındaki basınçlarda yapılır [19].



Şekil 4.16. İzostatik presleme yöntemleri; a) ıslak b) kuru [40]

Soğuk izostatik preslemenin iki tipi ıslak ve kuru kalıplama tekniğidir (Şekil 4.16). Islak kalıplamada, doldurulup sızdırmazlığı sağlanmış esnek kalıp bir sıvı haznesine konur ve dışarıdan basınç uygulanır. Sıkıştırma yapıldıktan sonra esnek kalıp hazneden dışarı alınır ve sıkıştırılmış parça esnek kalıptan çıkartılır. Kuru kalıplama yöntemi seri üretimlerde kullanılır. Esnek kalıp basınç haznesi içerisine monte edilmiştir. Esnek kalıp şekil değiştirir fakat hazneden dışarı çıkarılmaz. İki uçtaki tapalar vasıtasıyla toz doldurulur ve parça esnek kalıptan çıkartılır [19].

Sıcak izostatik presleme

Sıcak izostatik presleme (Hot Isostatic Pressing) yönteminde soğuk izostatik preslemeden farklı olarak toz malzemeler gaz basıncıyla sıkıştırılırken aynı anda basınç odasının yüksek sıcaklıklara çıkarılmasıyla daha az gözenekli bir yapı elde edilir. Sıkıştırıcı gaz olarak asal gazlar, genellikle argon, tercih edilir. HIP yönteminin bir başka kullanım alanı da değişik altlıklar üzerine toz malzemelerin ince bir tabaka halinde kaplanması teknolojisidir [41].

4.3.3. Aluminyum tozlarının preslenmesi

Aluminyum T/M parçaları düşük basınçlarda sıkıştırılmaktadırlar. Her çeşit sıkıştırma cihazına adapte edilebilmektedirler. Al tozları sadece 165 MPa' lık bir sıkıştırma basıncı uygulanarak % 90 teorik yoğunluğa, 340 MPa' lık sıkıştırma basıncında %95 teorik yoğunluğa ulaşmaktadır. Al tozlarının kolay sıkıştırılabilir olması, T/M parça üreticilerine daha geniş yüzey alanına sahip parça üretme olanağı sağlamaktadır [42].

Tozun kalıplanması genellikle basınç altında yapılmaktadır. Presleme genellikle oda sıcaklığında özel şekilde hazırlanmış çelik matrislerde yapılmaktadır. Tozun plastik özelliklerine göre 1,33 ila 13,33 N/cm^2 arasında değişen basınç tatbik edilmektedir. Sinterlenmiş cisimlerin fiziksel özellikleri üzerinde yapılan araştırmalarda ise bazen 40 N/cm^2' ye kadar ulaşan basınçlar kullanılmıştır. Soğukta preslemede genellikle basıncın bir veya daha çok doğrultuda tatbik edilmesini sağlayan hidrolik presler veya mekanik presler yer almaktadır.

Sıcakta presleme veya basınç altında sinterleme soğuk presleme ve sonra sinterlemeye nazaran daha az pratiktir. Bu usul, tozların bir matris içine yerleştirilerek sıkıştırılmış parçaların sinterlenmesi esnasında basınç tatbik edilmesinden ibarettir.

4.3.4. Aluminyum tozlarının sıkıştırılmasında görülen olaylar

Al tozlarının sıkıştırılmasında görülen olaylar şöyle sıralanmaktadır:

1. Toz partiküllerinin yüzeyleri genellikle gayri muntazamdır. Dolayısıyla karşılıklı temas yüzeyi çok küçük olmaktadır.
2. Tozların saflığı imalat şekline göre çok değişmektedir; ayrıca partiküller havada çok moleküllü oksit ve gaz tabakalarıyla kaplanmaktadırlar. Bu ise çekme kuvvetlerinin tesirini engellemektedir.

3. Ergime ile elde edilen bir metal yüzeyini çevreleyen atom tabakasının yapısı, içinde bulunan bir kristalin dış tabakasından genellikle tamamen farklıdır. Ayrıca taneler arasındaki birim hakiki temas alanına tekabül eden yapışma kuvveti ve ergime ile elde edilmiş bir metal kristalitlerin arasındakinden farklı ve genellikle küçüktür.

Metalsel bir tozdan, basınç tesiri altında katı bir cisim elde edebilmek, basınç yardımıyla yüzeysel kuvvetlerin hiç olmazsa bir kısmından faydalanmak demektir. Fakat bu gibi hallerde mekanik mukavemet çok küçüktür. Buna sebep yukarda izah edilen üç faktörün tamamen yok edilmemesidir. Preslemenin etkileri şöyle sıralanabilir:

1. Toz partiküllerinin toplam temas yüzeyi, karşılıklı yaklaşma sonucu artar.
2. Basınç tesiri altında, birçok taneler birbirleriyle sürtünür. Bu ise bir çok noktada oksit ve gaz tabakalarının yüzeylerinin temasını sağlar.
3. Toz tanelerinin karşılıklı sıkıştırılmaları çok kısa süreli lokal sıcaklık yükselmelerine sebep olarak atomların temas yüzeyinde yeni ve kısmi bir organizasyon sağlanır(atom hareketleri, sıcakta birleşme).

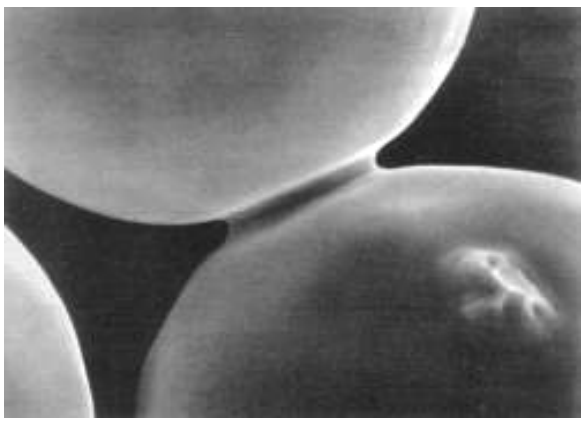
Presleme esnasında elastik deformasyon ve plastik deformasyon gibi iki ideal durum düşünülebilir. Birinci durumda, tozun ideal elastikliğine ilave olarak, toz mümkün olduğu kadar ince ve çok muntazam, basit şekilli, parlak yüzeyli partiküllerden ibarettir. Presleme tek taraftan, çelik bir matris içinde, ortalama bir basınçta yapılmaktadır. Basınç yavaş yavaş artmaktadır. Bu ideal şartların gerçekleşmesiyle, basınç kalıp içinde, sıvı içindeki hidrostatik bir basınç gibi, muntazam olarak dağılmaktadır. Böylece maksimum sıklık elde edilmektedir. Çekme kuvvetleri, toz partiküllerinin atomsal temasta oldukları noktalara tesir ederler. Presin hareketli pistonu civarında yoğunluk daha büyüktür. Kalıbın titreşmesi de bir avantaj teşkil etmektedir. Partiküllerin tuğla gibi üst üste yığılmalarının iyi olmadığı yerlerde, bilhassa bazı partiküller basıncı bir kubbenin taşları gibi taşınıyorsa, bu kubbe altında bir çok boşluk vardır. Yoğunluğun bu gayrı muntazamlığı göz önüne alınmazsa, yukarda izah edilen ideal presleme usulünde toz partikülleri hiçbir plastik

deformasyona maruz kalmazlar. Bu çok basit limit bir hal olduğundan, hiçbir sıvı faz görülmediği kabul edilirse, sonradan yapılacak ısıtma esnasında ortaya çıkacak sinterleme olayları da çok basit olacaktır.

İkinci limit hal yukarıdakilere zıt şartlarda görülmektedir. Toz partikülleri kaba, yüzeyleri gayrı muntazam, kompleks, toz çok plastik ve basınç çok yüksekte, partiküllerin tuğla gibi muntazam olarak dizilmesiyle sıklıkta muntazam bir artış sağlanamamaktadır. Elemanter partiküllerinin plastik deformasyonu daha önem kazanmaktadır, yoğunluğun artması partiküllerin birbirlerine yaklaşabilmelerine bağlıdır. Partiküllerin birbirine yapışması, çekme kuvvetlerinin bazı noktalarda değil, fakat bölgelerde tesir etmesiyle ve hacimli parçaların kaba olarak tuğla gibi dizilmeleriyle elde edilmektedir. Bütün bunlardan, bu gibi cisimlerin yüksek mekanik mukavemetlerinin sebebi anlaşılmaktadır [18].

4.4. Metal Tozlarının Sinterlenmesi

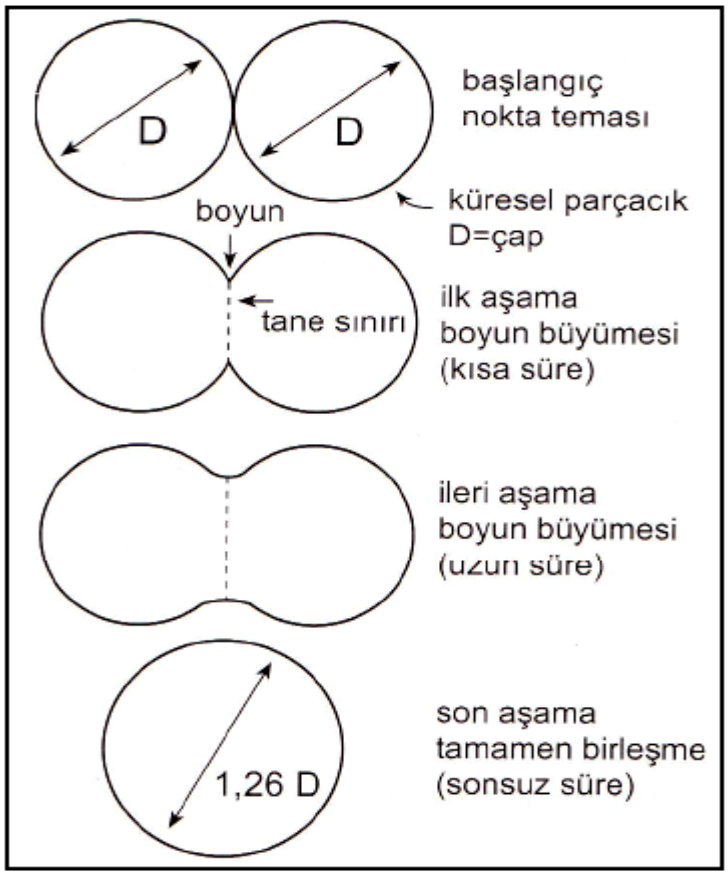
Sinterleme, birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda birbirine bağlanmasını sağlar. Bu bağlanma, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleriyle oluşabilir. Fakat pek çok durumda, sıvı faz oluşumu ile gerçekleşir. Mikro yapı ölçeğinde, bağlanma temas eden parçacıklar arasında boyunlaşma ile kendini gösterir. Resim 4.5’ de verilen taramalı elektron mikroskobu görüntüsünde küresel parçacıklar arasında katı halde boyun oluşumu görülmektedir [19].



Resim 4.5. Nikel tozunun (33µm) sinterlemesi sırasında boyun oluşumu [43].

4.4.1. Katı-hal sinterleme

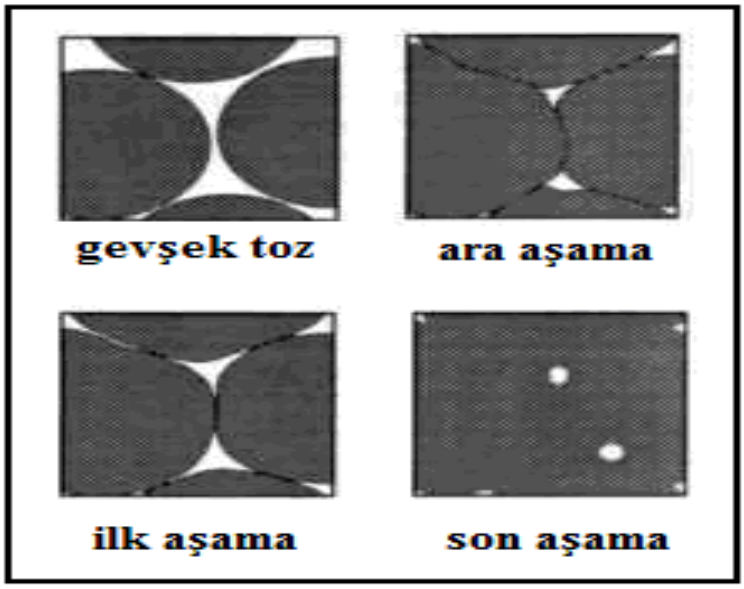
Sinterlemenin itici gücü yüzey enerjisinin azaltılmasıdır. Rasgele atom hareketleri sırasında, atomlar mikro yapıdaki boşlukları doldurur. Atom yerleşimleri açısından düz yüzeylerde gerilme yok iken kavisli yüzeylerin gerilmesi önemlidir. Küçük parçacıklarda boyun bölgesinin doldurulması için daha az sayıda atom gerekir. Atomların hareket mesafesi daha kısadır ve gerilme daha büyüktür.



Şekil 4.17. Sinterlemede nokta teması ile başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli [19].

Ham parça içinde her bir parçacık üzerinde birçok temas noktası vardır (Şekil 4.17). Sinterleme işlemi ilerledikçe birbirine temas eden parçacıklar arasındaki bağ büyür ve birleşir. Her temas noktasında bir tane sınırı büyür ve katı-buhar ara yüzeyinin yerini alır. Uzun süre sinterleme, iki parçacığın tamamen birleşerek çapı başlangıç çapının 1,26 katı olan tek küresel parçacık oluşturmasına yol açar.

Preslenmiş ham parça içinde her parçacığın birçok komşusu vardır. Böylece, her parçacığın birkaç değişik noktasında bağ oluşur [19].

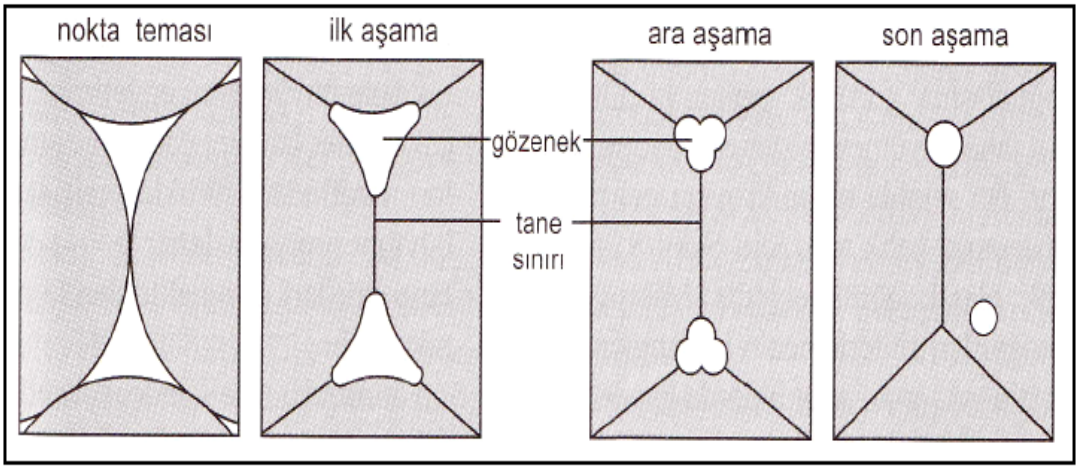


Şekil 4.18. Sinterlemenin safhaları [43].

Sinterlemenin ilk aşaması, her parçacık üzerinde birkaç noktada boyun büyümesi ile tanımlanır. Fakat boyunlar birbirinden bağımsız olarak büyür (Şekil 4.18). Sıkıştırma olmadan parçacıklarda temas küçük noktalara ile başlar. Başlangıçta gözenekler düzensiz ve köşeli şekildedir.

Sinterlemenin ara aşamasında, gözenekler yuvarlaklaşır, fakat gözenekler etrafındaki kavis kütle transferi için itici güç oluşturmaya devam ederek içbükey bölgeleri doldurur. Her ne kadar gözenekler yuvarlaklaşıp düzgün hale gelse de hala dışa açıktırlar. Sinterlemenin ilerlemesiyle taneler büyür ve gözenekler küçülür.

Sinterlemenin son aşamasında, gözenekler kapalı ve küreseldir. Tam yoğunluğa yaklaşırken tane sınırı hareketini zorlaştıran gözenek sayısı azaldığından tane büyümesi hızlanır. Gözenekler, sadece önemli oranda bulunduklarında tane büyümesine engel oluşturur [19].



Şekil 4.19. Gözenek yapı değişimlerinin şematik gösterimi [19].

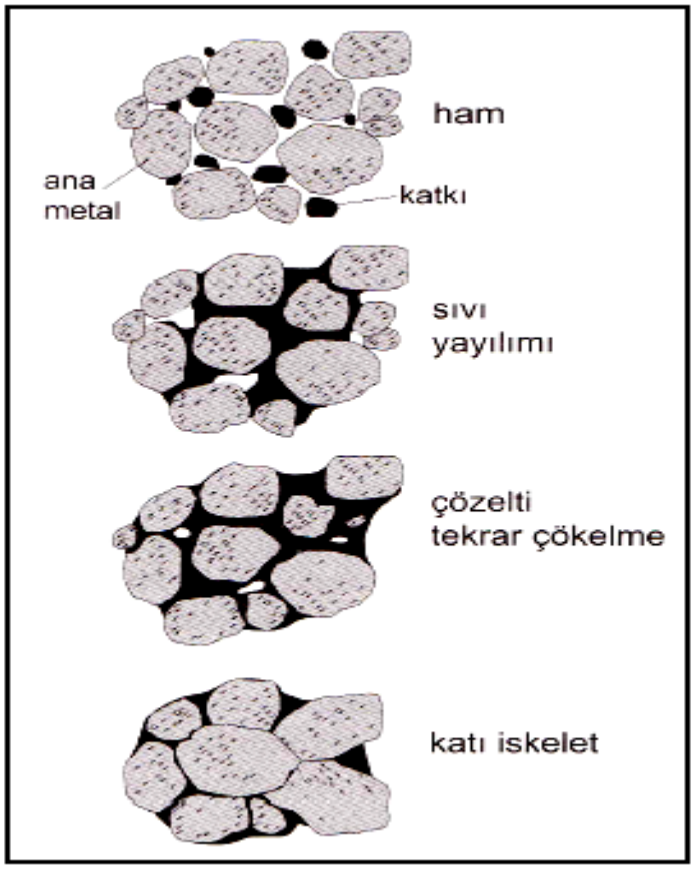
Şekil 4.19' da sinterleme sırasında gözeneklerin oluşum mekanizması görülmektedir. Bu gösterim bir genel oluşum mekanizmasıdır ve malzemeden malzemeye değişiklik gösterebilir. Karışım tozlarının sinterlenmesinde denge diyagramları dikkate alınmalı ve büyük farklar varsa hacimsel oranlarına göre uygun sinterleme sıcaklığı seçilmelidir [44].

4.4.2. Sıvı faz sinterleme

Son zamanlarda tam yoğun malzeme elde etmek için sıkça kullanılan bir metotta sıvı faz sinterlemesidir. Bu işlemde, katı fazların yanı sıra sıvı faz da oluşur. Sıvı faz difüzyon hızını büyük ölçüde arttırarak, parçacıklar arası bağ oluşumunu artırır. Bu oluşum gözenek yapısı, mukavemeti, iletkenliği, manyetik özellikleri korozyon dayanımım büyük oranda etkiler [44].

Yüksek sıcaklıkta ve sürekli sıvı faz sinterleme işleminde, iç yapıda sürekli olarak bulunan sıvı faz hızlı yoğunluk artışı ve tane büyümesine neden olur. Başlangıçta katıyı ıslatan sıvının, katı parçacıklar üzerine uyguladığı kapiler kuvvetler yardımıyla parçacıkların yeniden düzenlenmesi sonucu hızlı bir yoğunluk artışı olur. Yeniden düzenlenme ile erişilen yoğunluk artışı, oluşan sıvı faz miktarına, parçacık büyüklüğüne ve katının sıvı fazda çözünürlüğüne bağlıdır. Sıkıştırılmış kütle içerisindeki gözenek miktarının azalması sıvı faz akışım güçleştirir.

Bu nedenle yoğunlaşma hızı giderek azalır. Belirli bir aşamadan sonra çözünürlük ve yayınma (difüzyon) daha etkin hale gelerek, çözünme ve tekrar çökelme safhasına geçilir. Bu safhada yoğunlaşma ve tane büyümesi, olgunlaşması ve tane şekli oluşumunun her ikisi de difüzyon kontrollü işlemlerdir [45]. Bu işlemlerin oluşabilmesi için katı fazın sıvı fazda çözünürlüğünün olması gerekir. Alaşım oluşumu ile ergime sıcaklığının düşmesi sinterleme özelliğinin iyileştiğinin bir göstergesidir [46].



Şekil 4.20. İki toz karışımı kullanılarak sıvı faz sinterlemesinin kavramsal aşamaları.

Sıvı fazlı sinterlemedeki yoğunlaşma aşamaları (Şekil 4.20) şematik olarak gösterilmiştir. Başlangıçta ısıtma sırasında taneler katı hal sinterlemesi ile birbirine bağlanır. İlk sıvı oluştuğunda, tanelerin yeniden düzenlenmesi ile hızlı bir yoğunluk artışı olur. Oluşan sıvı katıyı ıslatarak oluşmuş olan katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlemeyi sağlar.

Bundan sonra ise çözelti-tekrar çökelme olarak bilinen işlemde, sıvı katı atomların taşıyıcısı olur. Bu aşamada daha küçük tane kütleleri sıvı içinde çözünür, sıvı içinden yayınır ve daha sonra büyük tanelerin üzerine çökelir. Ancak düşük çözünürlüklü veya iri taneli sistemlerde yoğunlaşma yavaştır. Sıvının hacim oranı arttıkça gözenekleri dolduracak sıvı miktarı daha fazla olduğundan yoğunlaşmada kolaylaşır.

Eğer sıvı yoksa, sinterleme katı-hal işlemleri ile gerçekleşir. Fazla sıvı olması durumunda ise, sıvı oluşumu ile birlikte taneler arasındaki bütün gözenekler dolar. Sıvı oluştuğunda kılcal kuvvetler taneleri yeniden düzenler, daha sonra tane şekli yerleşimi ve yoğunluğun daha artmasına yol açan çözelti-tekrar-çökelme oluşur. Sonunda, temas eden taneler arasında kararlı boyunlar oluşur ve son yoğunlaşma katı iskeletin sinterlenmesine bağlıdır [19].

4.4.3. Alüminyum tozlarının sinterlenmesi

Alüminyum tozlarının sinterlenmesinde araştırmacılar yıllardır çeşitli zorluklarla karşılaşmışlardır. Çünkü;

1. Alüminyum tozları, ne şekilde imal edilirlerse edilsin daima oksit filmleri ihtiva eder. Alüminyum oksit, erime noktasının altında indirgeyici gazlar altında indirgenememektedir.
2. Çoğu zaman iç yağlayıcılar, katı sinter bağları engelleyen çökelme ürünleri meydana getirirler.

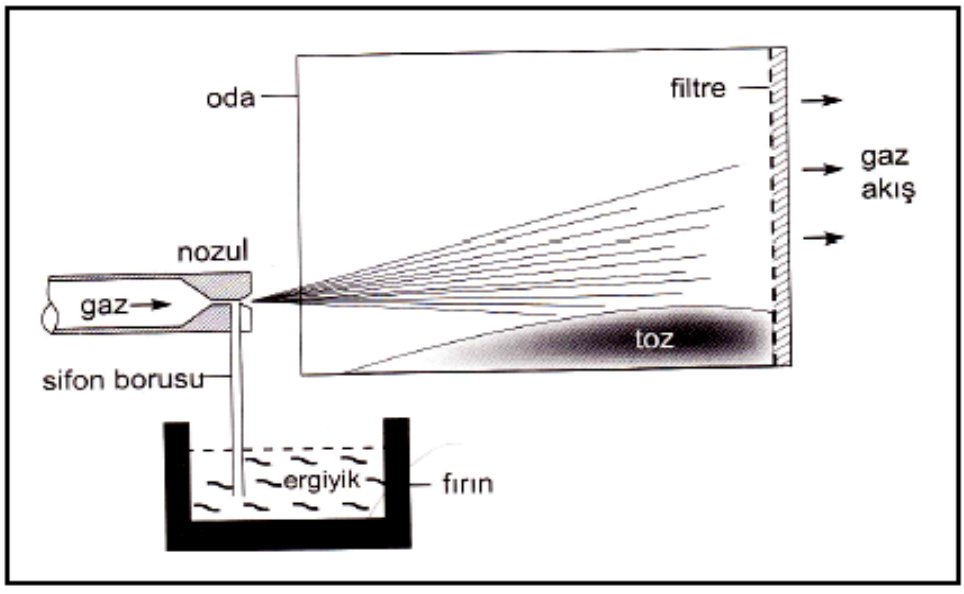
Aluminyum toz metalurjisi alaşımlarının çoğunun sinterlenmesi, ham yoğunluğa ve alaşım kompozisyonuna bağlı olarak 595°C ile 625°C arasında yapılmaktadır. Bu değer, demir esaslı alaşımların sinterleme sıcaklığının yarısı ve bakır alaşımlarının ise 2/3'üdür. Sinterleme zamanı 15-30 dak. arasında değişmektedir. Yüksek sinterleme mekanik özelliklerinden dolayı, sinterleme atmosferleri içerisinden daha çok azot tercih edilmektedir [42].

5. GAZ ATOMİZASYONU

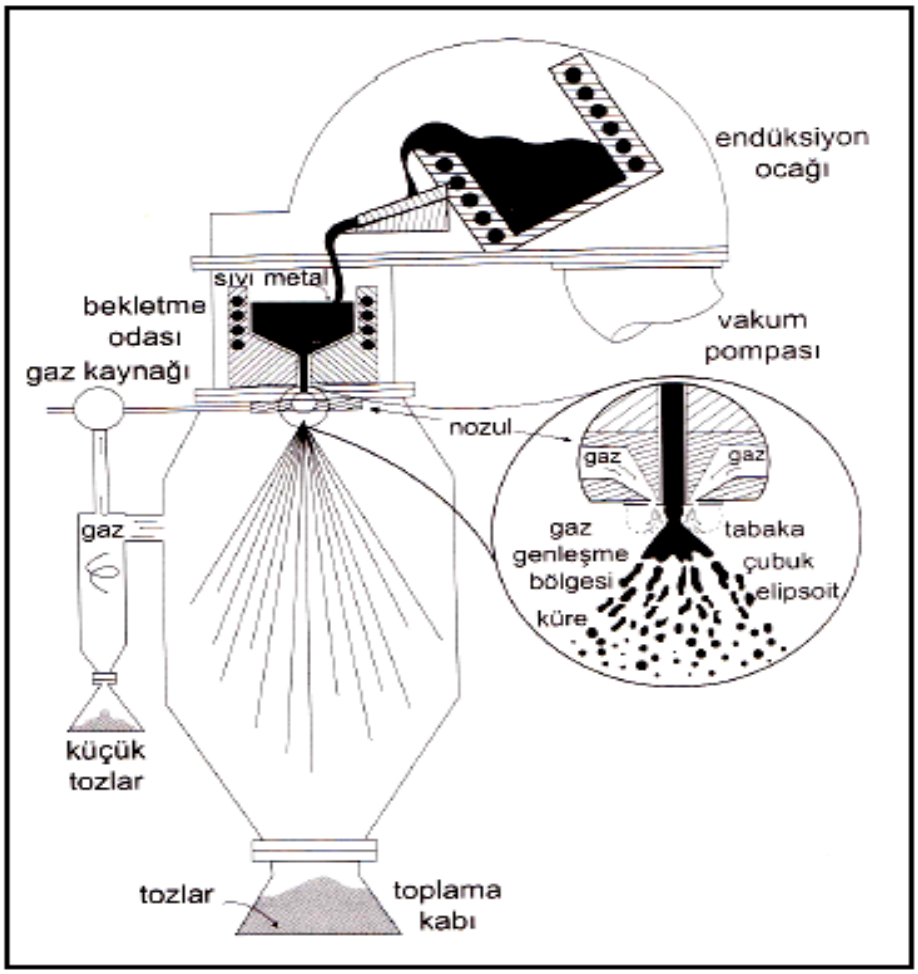
Hava, azot, argon ve helyumun sıvı metal demetini parçalayan gaz olarak kullanılması gaz atomizasyonu olarak adlandırılır. Sıvı malzeme nozul çıkışında parfümün püskürtülmesi gibi hızlı gaz genleşmesi sayesinde parçalanır. Donanım tasarımı ergitilmiş malzemenin beslenme mekanizmasına ve ergitme ve toz toplama odasının yapısına göre değişiklik gösterir. Bununla birlikte ana fikir enerjinin (hızlı genleşen gazdan) sıvı metal demetine aktarılarak damlacık oluşturulması ve bunların parçacık olarak hemen katılaşmasıdır [19].

5.1. Gaz Atomizasyon Üniteleri

Düşük sıcaklık atomizasyon üniteleri Şekil 5.1' de gösterildiği gibi yatay olarak tasarlanır. Nozuldan çıkan yüksek hızlı gaz, sifon etkisi meydana getirerek sıvı metali gaz genleşme bölgesine çeker. Yüksek gaz hızı daha küçük damlacıklar oluşturur. Toz toplama odası boyunca uçuşan damlacıklar ısı kaybederek parçacıklar halinde katılaşırlar. Yatay atomizasyon ünitelerinde geniş filtre alanı tozları tutarken gaz geçişine müsaade eder [19].



Şekil 5.1. Yatay gaz atomizasyonun şematik gösterimi [19].



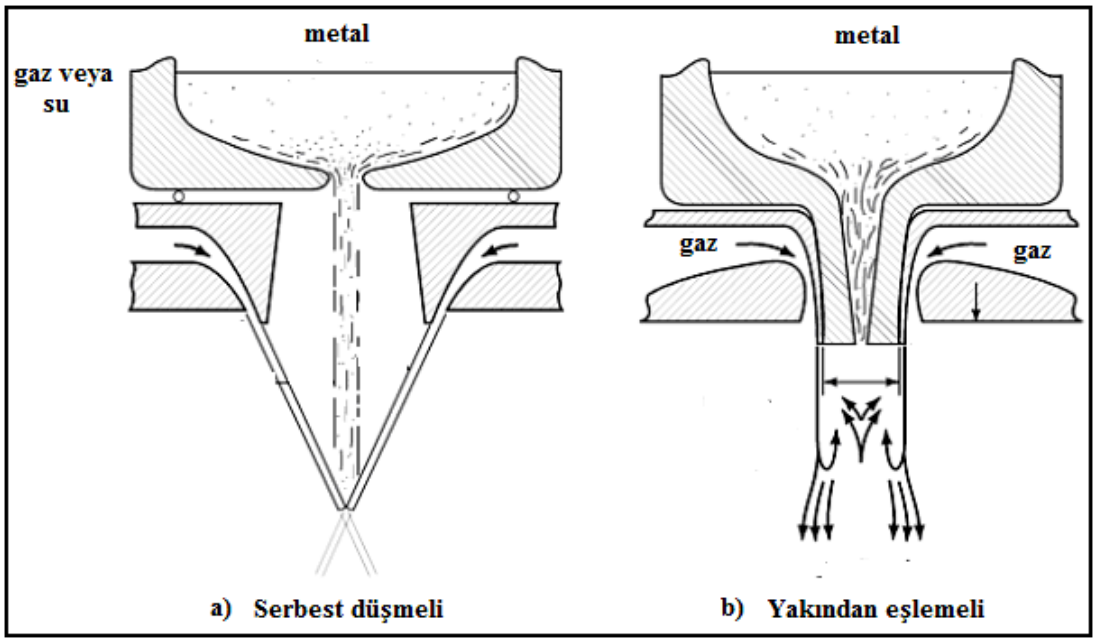
Şekil 5.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [19].

Yüksek sıcaklıkta ergiyen metaller için, tozların oksitlenmesini önlemek amacıyla, asal gaz doldurulmuş kapalı bir oda kullanılır. Şekil 5.2' de düşey asal gaz atomizasyon ünitesi şematik olarak gösterilmiştir.

Ergiyik endüksiyon ocağı ile sıvılaşma eğrisinin çok üzerinde bir sıcaklığa ısıtılarak soğuk nozula gönderilir. Gaz jetleri ile sıvı metal demetinin çok küçük damlacıklara ayrılması sağlanır. Asal gaz ortamında yüksek saflıkta alaşım tozu üretilebilir. Parçacık şekli küreseldir ve genellikle geniş boyut dağılımlıdır [19].

5.2. Atomizasyon Sistemleri

Gaz atomizasyon ünitelerinin ana kısımlarından biri olan nozul, gaz jetinin akışını kontrol ederek, istenilen özelliklerde tozun üretilmesine yardım eder [47]. Düşey gaz atomizasyon üniteleri için iki farklı atomizasyon sistemi kullanılmaktadır. Şekil 5.3 deki serbest düşmeli sistemde, sıvı metal yerçekimi sayesinde atomizasyon alanına doğru akar. Yakından eşlemeli sistemde ise, serbest düşüşün başlangıcında veya serbest düşme gerçekleşmemişken atomize olabilmektedir.



Şekil 5.3. İki farklı atomizasyon sistemi [26].

5-20 µm aralığında bir toz üretimi; gaz ile sıvı metal temasının metal akış borusunun hemen ucunda gerçekleşmesi ve böylece sıvı metal demetini ince damlacıklara ayırmak için gerekli momentumun daha iyi aktarılması nedeniyle, yakından eşlemeli nozullarda daha verimli bir şekilde yapılır. Ancak, bu tip nozullarda sıvı metal akış borusu ucunda metal donması problemi vardır ve bunun çözümü de karmaşık tasarım problemlerini beraberinde getirmektedir [47].

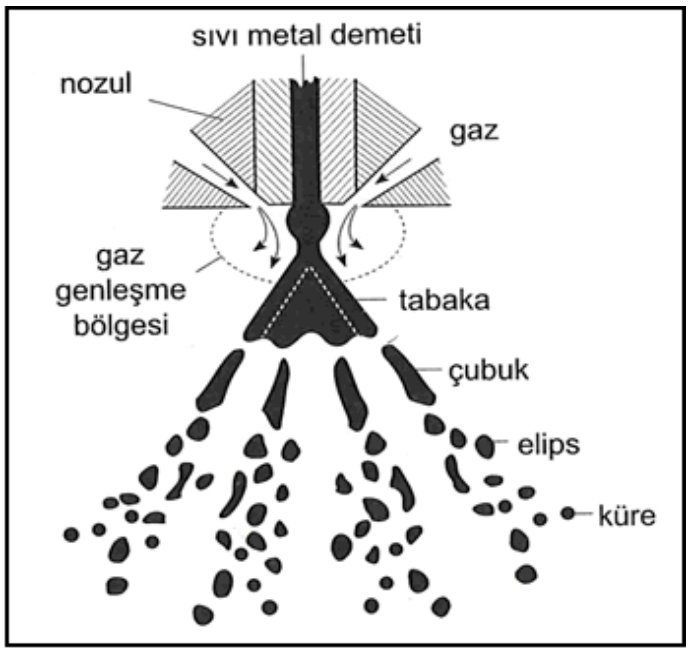
5.3. Atomizasyon Mekanizması

Gaz atomizasyonu tamamen asal gaz ortamında gerçekleştirilebilir ve böylece yüksek saflıkta alaşım tozu üretilebilir. Parçacık şekli küreseldir ve genellikle geniş boyut dağılımlıdır. Fakat çoğunlukla 10 μm üzeri boyutlarla sınırlıdır. Gaz atomizasyon yönteminde çok sayıda değişken vardır:

Bunlar gaz türü, ortam atmosferi, sıvı metal sıcaklığı ve nozula girdiği andaki vizkosite, alaşım türü, sıvı metal akış debisi, gaz basıncı, gaz debisi ve hızı, nozul geometrisi ve gaz sıcaklığıdır. Bu değişkenler ayarlanarak kullanıma göre gerekli özelliklerde tozlar üretilebilir. Gaz atomizasyon yönteminin ana üstünlüğü ürün homojenliği ve üretilen tozun küresel şekilli olmasının sağladığı iyi paketlenme özellikleridir.

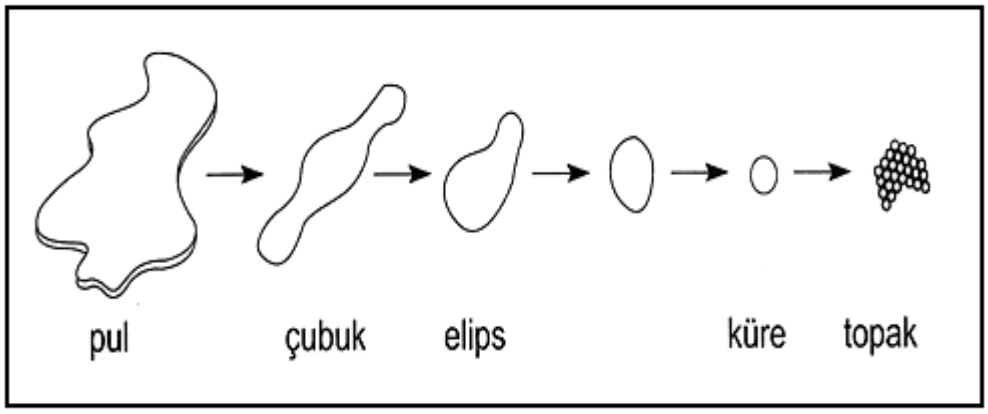
Pratik olarak gaz atomizasyonu 100 kg/dk ya kadar üretim hızlarına çıkabilir. Basınç tipik olarak 5 MPa'ın altında olup, bazı özel durumlarda 18 MPa kadar çıkabilir. Teknik büyük ölçekli olarak pek çok alaşıma uygulanmaktadır. Bunlar arasında çelikler, takım çelikleri, paslanamaz çelikler, kobalt alaşımlar, alüminyum alaşımları, nikel alaşımları, değerli metaller (altın, gümüş) ve sert lehim gibi düşük ergime sıcaklığına sahip pek çok alaşım sayılabilir.

Gaz, atomizasyon sırasında sıvı metale ne kadar çok aktarılabilirse üretilen parçacıklar da o kadar küçük olur. Gaz eriyik etkileşimi yüksek hızlı fotoğraf teknikleriyle çalışılmış ve atomizasyon olayının anlaşılmasına yardımcı olan Şekil 5.4' deki şema elde edilmiştir. Sıvı demetinin çevresinde genleşen gazlar önemli basınç düşmesine ve sıvı demetinin parçalanmasına yol açar [19].



Şekil 5.4. Sıvı metal tabakasının parçalanması [19].

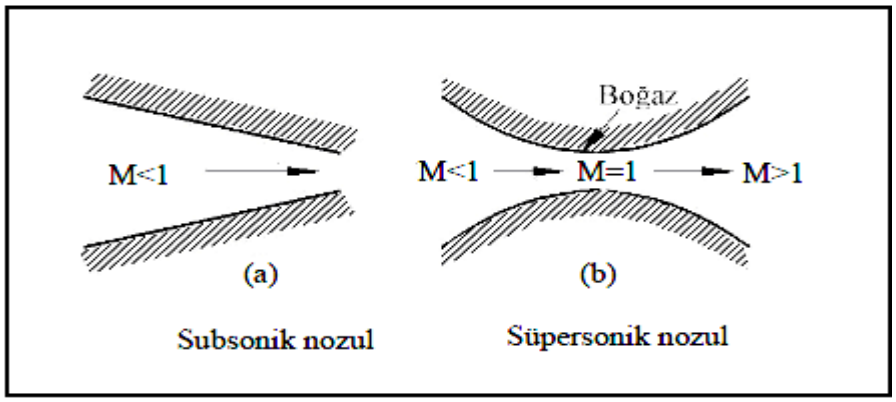
Gaz basıncının düşmesi sıvı demetinin nozuldan çıktıktan sonra içi boş bir koni şekline getirir. İnce koni, hacmine göre yüzey alanın yüksek olması nedeniyle kararlı değildir. Aşırı ısıtma ile sıvının erken katılaşması önlendiği varsayılırsa, genleşen gazın kesme kuvvetleriyle sıvı parçalanmaya devam eder. Bu etki ile Şekil 5.5' de gösterildiği üzere önce çubuk daha sonra küçük küresel parçacıklar oluşur. Eğer küreler çok küçükse çoğunlukla topaklanır [19].



Şekil 5.5. Atomizasyon sırasında sıvı demetinin parçalanmasında damlacık şekli değişiminin şematik olarak gösterilmesi [19].

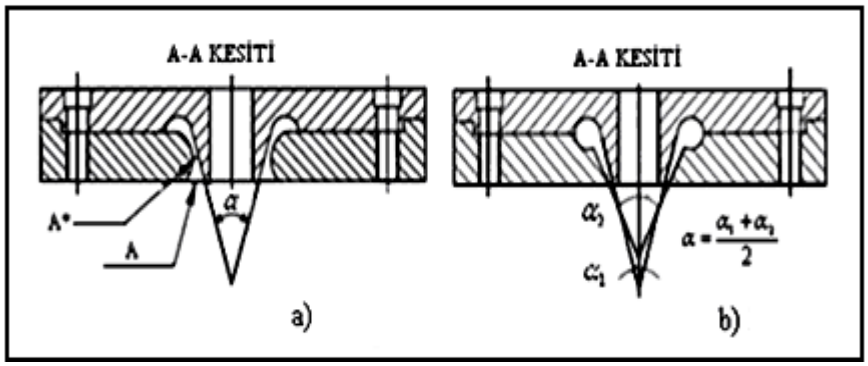
5.4. Nozul Çeşitleri

Nozul geometrisi atomizasyon gaz akışını kontrol ettiğinden dolayı, herhangi bir atomizasyon uygulamasında son derece önemlidir [15]. Nozul geometrisi, gaz hızını ses hızının altındaki hızlarla sınırlayan veya ses hızının üstündeki hızlara ulaşmasına imkan verecek şekilde olabilmektedir (Şekil 5.6) [11].



Şekil 5.6. Ses hızının altındaki ve üsündeki akışlar için nozul tipleri [47]

Aynı zamanda nozul geometrisi, daralan tasarım veya daralan – genişleyen tasarım şeklinde olabilir (Şekil 5.7). Daralan/genişleyen tasarım Laval nozulu olarak da bilinmektedir. Gaz çıkışı, eş merkezli halka biçiminde olan daralan tasarıma sahip nozullar ise Mannesmann nozulu olarak adlandırılır [47].



Şekil 5.7. Nozul tipleri; a) Laval tipi nozul b) Mannesmann tipi nozul [48].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen tozlar, bir dövme Aluminyum alaşımı olan AA 2014 malzemesi toz üretim yöntemlerinden atomizasyon teknikleri sınıflandırmasına dahil olan Gaz Atomizasyon yöntemi kullanılarak, Düşey Gaz Atomizasyon Ünitesinde gerçekleştirilmiştir.

Toz üretimi süreci içerisinde, toz üretiminde en önemli parametrelerden birisi olan gaz basıncı (5-30 bar) ve yine bu bağlamda çalışmalarda etkili olduğu düşünülen farklı sıcaklık değerleri (790˚C, 800˚C, 810˚C) kullanılmak suretiyle yapılan çalışmalarda optimum gaz basıncı ve sıcaklık değeri sağlanmış olup, çalışmaların devamındaki toz üretimi işlemi bu şartlar altında gerçekleştirilmiştir.

Toz üretim süreci sonrasında bu tozlar, elek analizi yardımıyla Tava (<53μm) – 3360 μm olarak sınıflandırılmıştır. Elek analizi verileri doğrultusunda son dört elek aralığı, 100 μm altı tozlardan homojen bir karışım sağlanarak, toz boyut analiz işlemi yapılmıştır. Toz boyut analizi sonrasında elde edilen bilgiler ışığında ortalama toz boyutu 90,66 μm olarak belirlenmiş olup, deneysel çalışmaların ileriki süreçlerinde kullanılmak üzere ağzı kilitli poşet içerisinde desikatör ortamında muhafaza edilmiştir.

Çalışmaların son bölümünde ise üretimi yapılan tozların preslenebilirliği ve sinterleme tavırları üzerinde yoğunlaşılmıştır. Buna bağlı olarak öncelikle farklı presleme basınçları kullanılmıştır (250-875 MPa). Uygun presleme basıncı ve sonrasındaki farklı sinterleme sıcaklıkları (550˚C, 560˚C, 570˚C, 580˚C, 590˚C, 600˚C, 610˚C, 620˚C) ve bu sıcaklık değerlerindeki farklı süreler (1saat, 2saat, 4saat) denenmek suretiyle optimum şartlar belirlenerek, deney numuneleri üretilmiştir.

Son olarak bu deney numuneleri üzerinden mekanik bir özellik olarak, bu tez çalışmasında yalnızca sertlik değerlerinin tespit edilebilmesi için mikro sertlik ve makro sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Bu çalışmada, karekterizasyon açısından, optimum şartlar altında elde edilen değerlerin mikro yapı üzerinde ne derece etkili olduğunu belirlemek için, Optik Mikroskop, SEM çalışmaları ve EDS analizleri yapılmıştır.

6.1. Malzeme

Çalışmalar süresince kullanılan AA 2014 aluminyum alaşımının tozlarının üretimi, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Döküm Anabilim Dalında bulunan atomizasyon tekniklerinden olan düşey gaz atomizasyon ünitesi kullanılarak yapılmıştır. Gaz Atomizasyon ünitesindeki; nozul, gaz sistemi ve ergitme ünitesi eksiklikleri tamamlanmıştır (Resim 6.1). Bu çalışmalar için yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozul kullanılmış olup, gaz sistemi ve diğer bağlantı elamanlarının kontrolleri yapılarak, toz üretim işlemi gerçekleştirilmiştir.

Toz üretimi ve bu eksikliklerin giderilmesi, yine sonrasında da yapılabilecek çalışmalar açısından ihtiyaç duyulan gerekli destek 41/2009-04 nolu "Gaz Atomizasyonu ile Aluminyum ve Alaşım Tozlarının Üretimi" adlı BAP projesinden sağlanmıştır.

Üretilen bu tozlar daha sonra boyut analizine tabii tutulmuştur, mikro yapı görüntü ve analizleri, SEM ve EDS cihazları kullanılmak suretiyle tespit edilmiştir. Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş olan AA 2014 tozlarının kimyasal bileşimi ve özellikleri Çizelge 6.1' de verilmiştir.

Çizelge 6.1. AA 2014 alaşımının kimyasal bileşimi

İÇERİK	Al	Cu	Si	Mn	Mg	Fe	Zn	Cr	Ti
% ORAN	93,5	4,06	0,6	0,57	0,56	0,47	0,106	0,03	0,01

6.2. Gaz Atomizasyon Ünitesi

Bu tez çalışmasında AA 2014 aluminyum alaşımının toz üretimi için, G.Ü.T.E.F. Döküm A.B.D.' de bulunan Düşey Gaz Atomizasyon ünitesi kullanılmıştır. Gaz atomizasyon ünitesi için sekiz farklı bölüm gösterilmiştir (Resim 6.1).



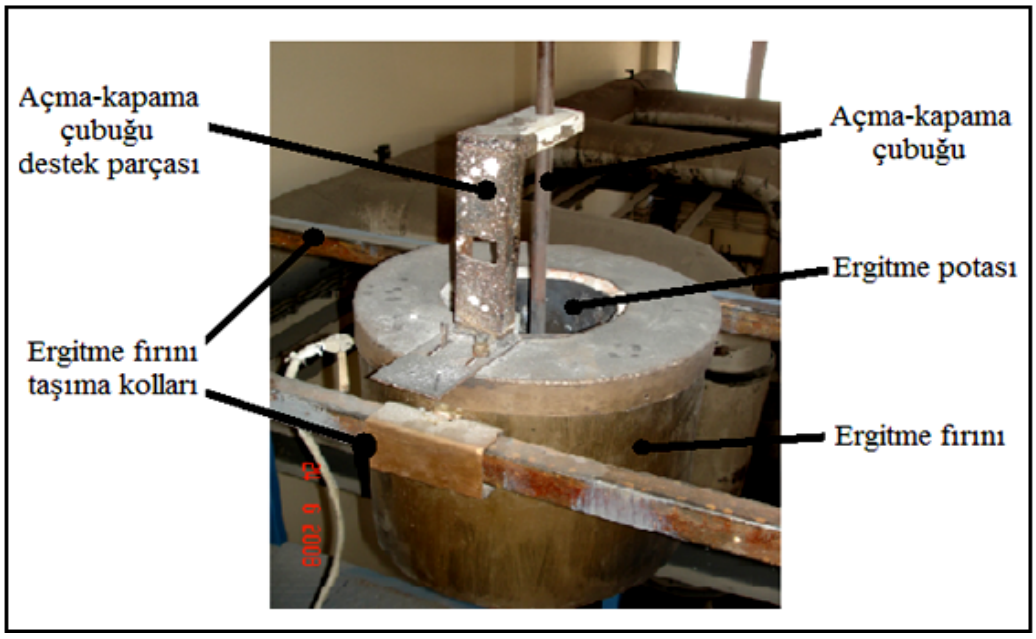
Resim 6.1. Düşey gaz atomizasyon ünitesi
1. Ergitme ünitesi 2. Nozul 3. Atomizasyon kulesi 4.Toz toplama ünitesi
5. Siklon 6. Fan 7. Basınçlı gaz ünitesi 8.Sıcaklık kontrol ünitesi

Resim 6.1’ de gaz atomizasyon ünitesi sekiz farklı bölümde gösterilmiştir. Ancak toz üretimi aşamasında genel olarak beş ana bölüm olarak ele alınmıştır;

1- Ergitme Ünitesi
2- Nozul
3- Atomizasyon kulesi
4- Toz toplama bölümü
5- Gaz sistemi

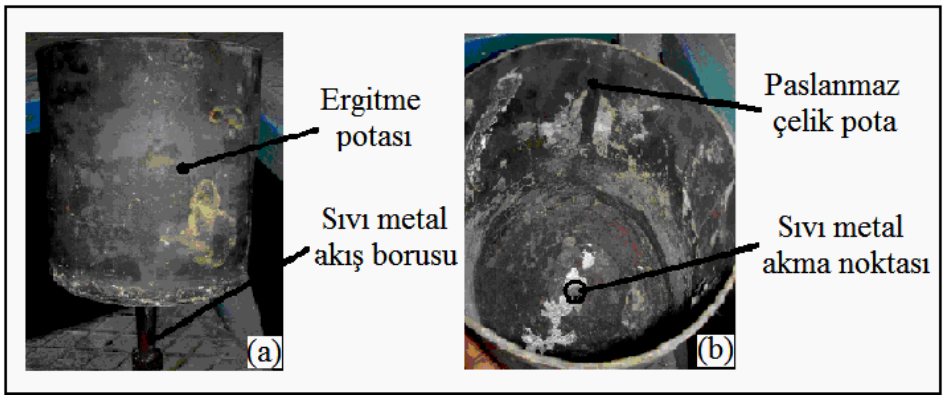
6.2.1. Ergitme ünitesi

Metal tozu üretimi için, literatürde de yer aldığı gibi birçok yöntem olduğu bilinmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada toz üretimi işlemi için düşey gaz atomizasyon yöntemi kullanılmasından dolayı, bu yöntemde malzemenin toz olarak üretilebilmesi için öncelikle ergitme ünitesinde, ergiyik metal şeklinde bulunması gerekmektedir. Çalışmaların en başında, kullanılmak üzere AA 2014 aluminyum alaşımı hadde mamül şeklinde temin edilmiştir ve ergitme işlemi atomizasyon kulesinin hemen üst kısmına yerleştirilen ergitme ünitesinde yapılmıştır (Resim 6.2).



Resim 6.2. Ergitme ünitesi

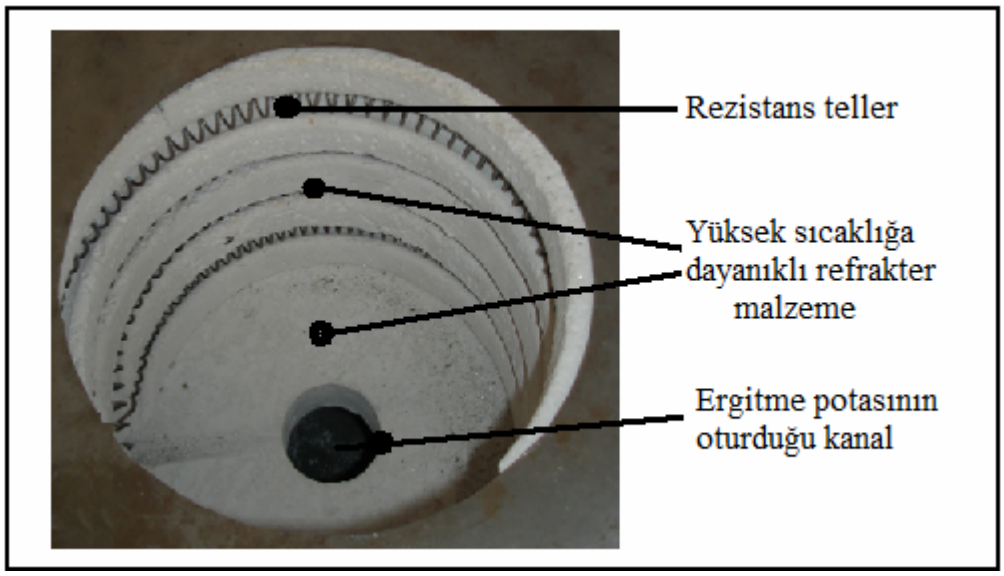
Ergitme ünitesinde görüldüğü üzere; ünitenin rahatlıkla ve güvenli bir şekilde taşınabilmesi, aynı zamanda toz üretimi işleminde atomizasyon kulesi üstündeki yerine yerleştirilebilmesi için, profiller yardımıyla taşınabilmesine imkan tanıyan taşıma kolları bulunmaktadır. Ergiyik haldeki sıvı metalin ergitmenin başlangıcından toz üretim işlemine kadar, ergitme ünitesindeki pota içerisinde kalmasını sağlayan dolayısıyla tıkaç vazifesi gören açma-kapama çubuğu ve destek parçası bulunmaktadır. Son olarak ergitme işleminin gerçekleştirildiği ergitme fırını ve içerisindeki çelik pota da bu kısımda yer almaktadır (Resim 6.3).



Resim 6.3. Ergitme potasının görünümü; a) Potanın ön görünüşü b) Potanın iç kısmı

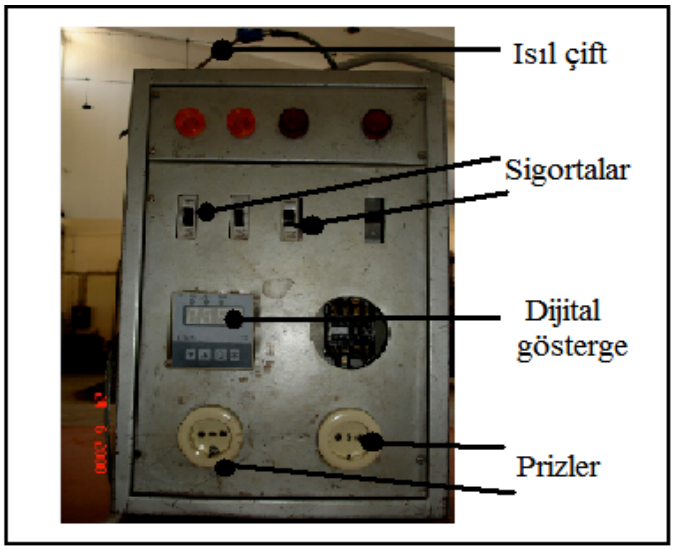
Ergitme işlemi Resim 6.3' de görüldüğü gibi paslanmaz çelik pota içerisinde gerçekleştirilmiştir. Ergitme potasının hemen alt kısmında, ergiyik haldeki sıvı metalin toz üretimi sırasında akışını sağlayan sıvı metal akış borusu (Resim 6.3, a) ve sıvının pota içerisinde kalabilmesi için açma-kapama çubuğu ile kapatılan, aynı zamanda sıvı metalin pota içerisinden serbest düşme ile birlikte akışa başladığı sıvı metal akma noktası da gösterilmiştir (Resim 6.3, b).

Ergitme potasının içine yerleştirildiği ergitme fırını olarak, cast 95 refrakter malzemesinden yapılmış rezistanslı fırın kullanılmıştır (Resim 6.4). Fırının üst kısmında kullanılan aynı zamanda sıvı metalin ergitilmesi sırasında da atmosfer kontrolü sağlanması açısından da yüksek sıcaklığa dayanıklı elyaf battaniye kullanılmıştır.



Resim 6.4. Ergitme fırının iç görünümü

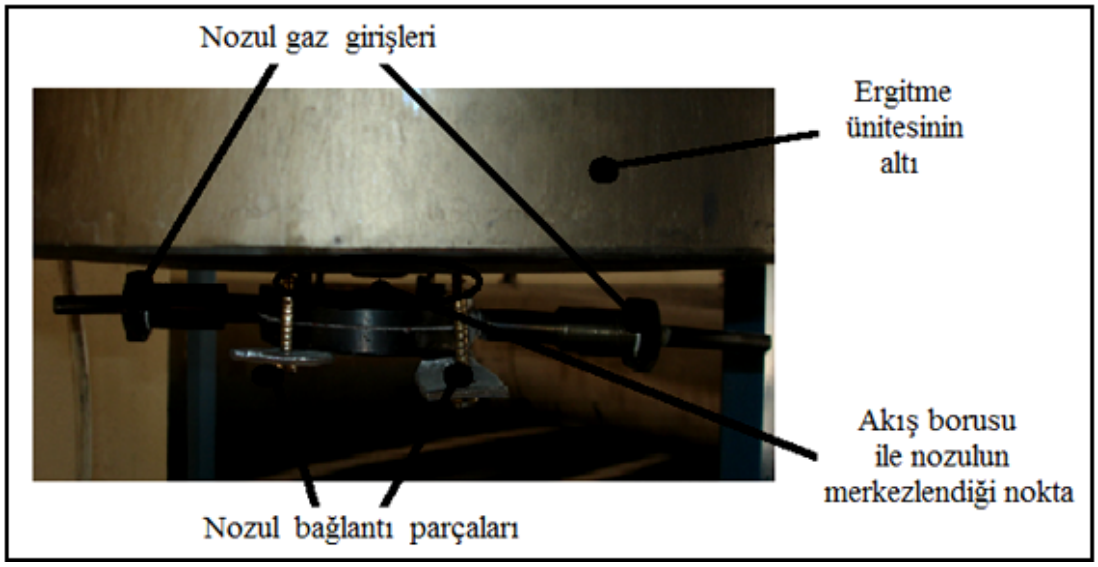
Ergitme fırınında pota içerisinde ergiyik haldeki sıvı metalin sıcaklığını, yapılan toz üretimi süreci içerisinde 790-800-810˚C gibi sıcaklık değerlerinde kontrol edebilmek amaçlı, sıcaklık kontrol ünitesi kullanılmıştır (Resim 6.5). Sıcaklık kontrol ünitesi üzerinde bulunan ısıl çiftin, ergitme fırının üst kısmında bulunan delik içerisinden geçirilmesiyle pota ile temas etmesi sağlanarak, sıvı metalin sıcaklığının ölçülmesi sağlanmıştır. Bu sayede çalışmalarımızda farklı sıcaklıklar denenmek suretiyle toz üretimi işlemi gerçekleştirilmiştir.



Resim 6.5. Sıcaklık kontrol ünitesi

6.2.2. Nozul

Toz üretimi süreci içerisinde, atomizasyon çalışmalarında kullanılmak üzere Mannesmann tipi yakından eşlemeli nozul kullanılmıştır. Uslan [47], yapmış olduğu çalışmasında, Mannesmann ve Laval tipi nozullarla üretilmiş hava atomize aluminyum tozu boyutuna etkilerini araştırmıştır. Küçükarslan [49], benzer şekilde, Mannesmann nozul sistemini kullanarak hava atomize kalay tozlarının boyut ve dağılımı, toz şekil ve morfolojisi ile ilgili araştırma yapmıştır. Gaz atomizasyon yöntemi ile metal tozu üretimine yönelik olarak; Aydın ve Ünal [50], yaptığı çalışmada laval tipi süpersonik bir nozul tasarımı ile kalay tozu üretimi ve değişkenlerini, Yıldız [51], ise atomizasyon deneylerinde süpersonik geometriye sahip farklı uç geometrisindeki nozullar ile çalışmalar yapmıştır.



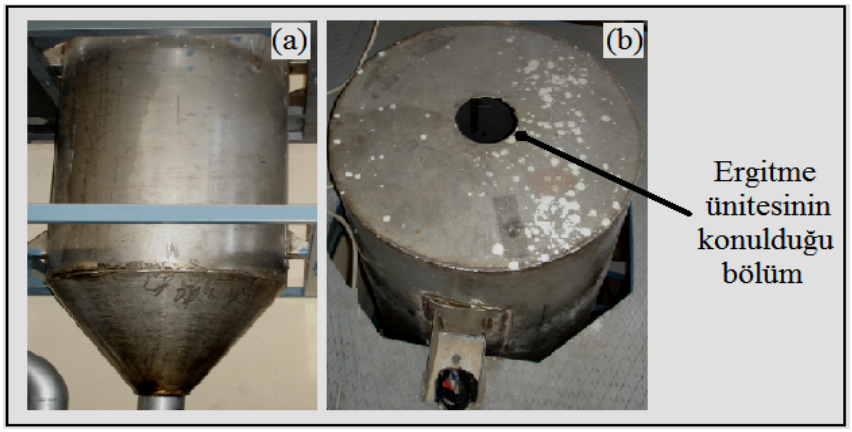
Resim 6.6. Nozul bağlantısının gösterimi

Nozul bağlantısının yapıldığı alan, Resim 6.6' da gösterilmiştir. Çalışmalarımızda kullandığımız nozul bağlantısı ergitme fırının hemen alt kısmına yapılmıştır. Nozulun bağlantısı için, karşılıklı olarak delinmiş olarak bulunan noktalarda, saç parçalar ve vida bağlantılarıyla birlikte nozulun ergitme potasının hemen alt kısmına yerleştirilmesi işlemi yapılmıştır.

Bu şekilde nozul yerleştirildikten hemen sonra nozulun ergitme potası alt kısmında bulunan sıvı metal akış borusu ile nozul gaz çıkış noktasının, atomizasyonun gerçekleşmesi için merkezlenmesi gerekmektedir. Serbest düşme ile sıvı metalin nozul ile ilk temas halinde olduğu sıvı metal pülverize işleminin düzgün bir şekilde gerçekleşmesi için bu merkezleme işlemi oldukça önemlidir.

6.2.3. Atomizasyon kulesi

Atomizasyon kulesi, sıvı metalin pülverize edilerek damlacık oluşum aşamalarını tamamladıktan sonra, toz şeklini almasını sağlayacak şekilde imalatı yapılan kapalı tasarımlardır. Çalışmalarımızda kullandığımız düşey gaz atomizasyon ünitesinin önemli kısımların birisi olan atomizasyon kulesi gösterilmiştir (Resim 6.7.). Ergitme ünitesi, taban kısmında düzgün bir şekilde sıvı metal akış borusu uç kısmı ile merkezlemesi yapılan nozul bağlantısıyla birlikte, Resim 6.7, b' de görüldüğü gibi, atomizasyon kulesinin hemen üst kısmına yerleştirilmektedir.



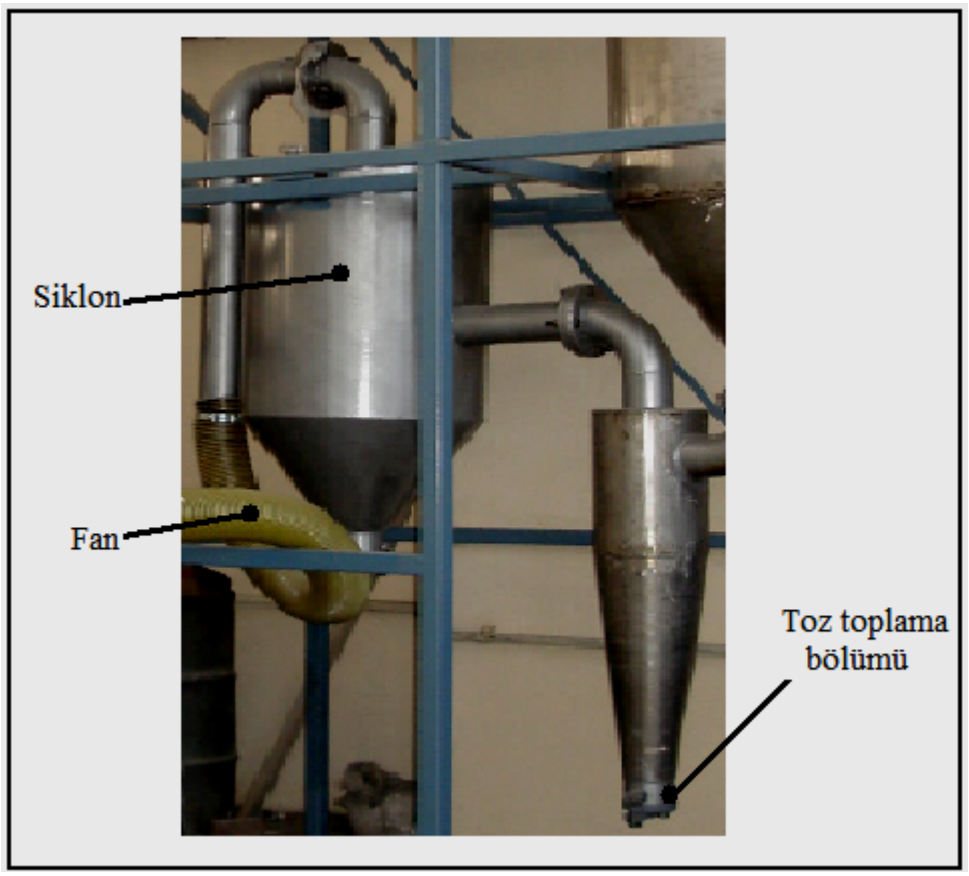
Resim 6.7. Atomizasyon kulesinin görünümü; a) Ön görünüşü b) Üst görünüşü

Sıvı metalin gaz ile temas ettiği nokta itibariyle atomizasyon kulesi içerisinde serbest düşme ile birlikte, tozun katılaşmasına kadar geçen süreye zaman oluşturacak şekilde, atomizasyon kulesi yüksekliği tasarlanmalıdır. Kullanılan atomizasyon kulesi paslanmaz çelikten yapılmıştır. Atomizasyon kulesi iç kısımları her toz üretim işleminden sonra, özenle temizlenerek bir sonraki çalışma için hazır hale getirilmiştir.

Atomizasyon kulesinin hemen alt kısmında toz toplama bölümü ve devamında bağlantılı olduğu, atomizasyonda kullanılan gazın, atomizasyon kulesi dışına tahliyesinin sağlandığı ve nispeten daha ince tozların tutulduğu siklon bulunmaktadır.

6.2.4. Toz toplama bölümü

Çalışmalarımızı yürüttüğümüz düşey gaz atomizasyon ünitesinde iki farklı toz toplama bölümü bulunmaktadır. Bunlardan birincisi atomizasyon kulesinin hemen alt kısmında yer alan daha iri taneli tozların bulunduğu toz toplama bölümü iken ikincisi ise Siklondur. Siklon hem çok ince tozların toplandığı hem de basınçlı atmosfer şartlarının dengelendiği bir bölümdür (Resim 6.8).

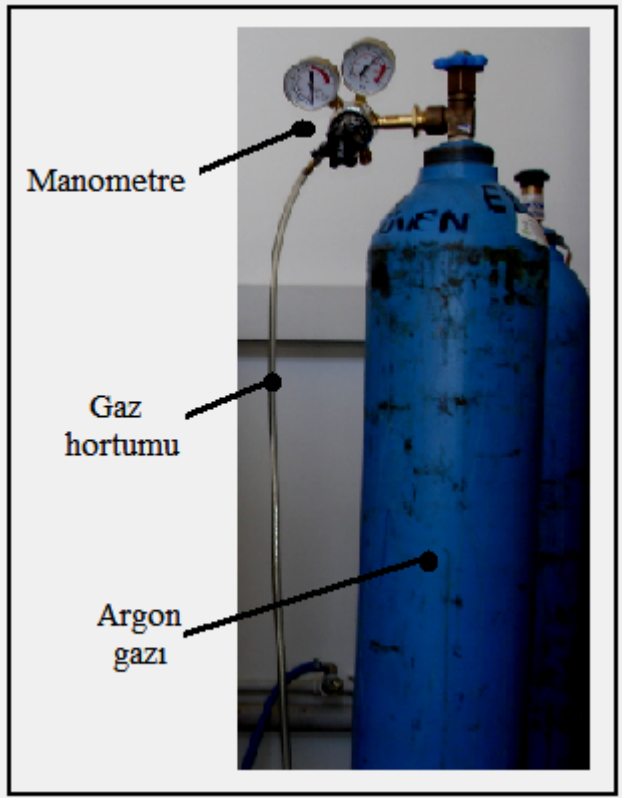


Resim 6.8. Toz toplama bölümlerinin görünümü

Yapmış olduğumuz çalışmalar sonrasında, toz toplama bölümü bağlantı noktalarından sökülerek iç kısımları temizlenmiştir. Bu sayede atomizasyon kulesi temizliği de hem alt kısımdan hem de kule üst kısmından fırça yardımıyla özenle temizlenerek bir sonraki üretim için hazır hale getirilmiştir.

6.2.5. Gaz sistemi

Metal tozu üretimi ile ilgili olarak, atomizasyon çalışmalarında çok sayıda parametre etkin olup, bunlardan bir tanesi de gaz basıncıdır. Yaptığımız çalışmalarda gaz basıncı olarak, 200 bar işletme basıncına sahip bir adet Argon tüp kullanılmıştır (Resim 6.9).



Resim 6.9. Gaz sistemi

Toz üretimi sırasında gaz basıncının ayarlanması, Argon tüpünün çıkışına yerleştirilen manometre ile sağlanmıştır. Bu şekilde atomizasyon çalışmalarında kullandığımız 5-30 bar arasındaki farklı gaz basınç değerleri manometreden

okunarak, optiumum gaz basıncı belirlenmiştir. Bu belirlemede manometreden okunan değerlere bağlı olarak yapılan farklı denemeler sonucunda üretilen tozlar belirleyici olmuştur. Nozul ağzından çıkış sırasındaki anlık basınçlar ölçülmemiştir.

Gaz sisteminin atomizasyon kulesi ile olan bağlantısı gaz hortumları kullanılarak yapılmıştır. Ergitme fırını tabanındaki nozula gaz girişi iki taraflı olduğundan, nozulun iki tarafından da gaz beslemesi için, t şeklindeki bir parça imalatı yapılarak, gaz hortumlarının bu parça ile gerekli bağlantıları tamamlanarak, nozula gaz kaynağının iletimi sağlanmıştır.

6.3. Toz Üretim Aşaması

Bu tez çalışmasında AA 2014 aluminyum alaşımı kullanılarak toz üretimi sırasında, farklı sıcaklık ve gaz basınç değerleri denenmek suretiyle, optimum şartlar sağlanmış olup, nozul geometrisi, gaz basıncı ve sıcaklık değerleri sabit tutularak toz üretimi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan atomizasyon çalışmalarında yakından eşlemeli mannesmann nozul sistemi kullanılmıştır. Gaz basıncı olarak 5-30 bar aralığında farklı gaz basınç değerleri test edilerek, toz tane büyüklüğü, şekli ve dağılımı açısından uygun atomizasyon basıncı, 12,5 bar gaz basıncı ile sağlanmıştır.

Atomizasyon sırasında beklenilen sıvı metal akışkanlığı için, 750˚C sıcaklık değeri üzerindeki sıcaklıklar yeterli olduğu, farklı sıcaklık değerlerinin toz oluşumunda nasıl bir etki meydana getirdiğini tespit etmek için de üç farklı sıcaklık değeri baz alınarak, 790-800-810˚C olmak üzere çalışmalarımızda kullanılmıştır. Bu sıcaklık değerleri sıvı madenin ergitilmesinin gerçekleştirildiği haznenin sıcaklığı olup, nozul ile sıvı madenin buluşma sıcaklığının bu noktanın 10-20˚C daha altında olduğu düşünülmektedir. Çıkış sıcaklığının tespiti amaçlı çalışmalarımız devam etmektedir.

Bütün denemeler ise, belirtilen nozul sistemi, uygun gaz basıncı ve farklı sıcaklık değerleri kullanılarak bu optimum şartlar altında toz üretim süreçleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalarımızda öncelikli olarak, nozulun ergitme ünitesinin tabanına rahat bir şekilde yerleştirilebilmesi için vida bağlantıları sağlamlaştırılmıştır. Gaz hortumu bağlantılarının rahat yapılabilmesi ve gaz hortumunun ergitme fırınının sıcaklığından etkilenmesini azaltmak için nozul gaz giriş delikleri uzatılmıştır.

Atomizasyon sırasında nozulda oluşabilecek gaz kaçaklarını önlemek açısından, nozulun iç yüzeylerine yüksek sıcaklığa dayanıklı sıvı conta sürülmüştür. Gaz basıncının, nozulun iki tarafında bulunan gaz giriş deliklerine aktarılabilmesi için, t şeklindeki bir boru imalatı yapılarak, gaz basıncının iki koldan nozula ulaşması sağlanmıştır. Daha önceden temin ettiğimiz AA 2014 külçe malzemesinin, pota içerisinde ergitilebilmesi için daha küçük boyutlara kesilerek, hazır hale getirilmiştir. Böylelikle toz üretim işlemine geçmeden önce, çalışmalarımız sırasında bir engel teşkil edebilecek bazı eksiklikler giderilmeye çalışılmıştır.

Düşey gaz atomizasyon yöntemi kullanılarak toz üretimine yönelik yapmış olduğumuz çalışmalar sırasıyla aşağıda belirtilmiştir;

- Ergitme ünitesi taşıma kolları yardımıyla askıya alınarak açma-kapama çubuğu destek parçası sağlamlaştırılmıştır.

- Ergitme potası hemen altındaki sıvı metal akış borusu ile, ergitme fırınının tabanındaki kanala oturacak şekilde yerleştirilmiştir.

- Nozulun merkezi, potanın altındaki sıvı metal akış borusu ile aynı merkeze gelecek şekilde ayarlandıktan sonra vida bağlantıları yapılarak, hazır hale getirilmiştir.

- Nozulun bağlantısı tamamlandıktan sonra, taşıma kolları vasıtasıyla ergitme ünitesi atomizasyon kulesi üst kısmındaki açıklığa gelecek şekilde taşınmıştır.

- Açma-kapama çubuğu destek parçası içerisinden geçirilerek, pota içerisindeki sıvı metal akış noktası kapatılmıştır.

- Ergitme potası içerisine yaklaşık 450-500g daha önceden küçük parçalar halinde kestiğimiz AA 2014 aluminyum alaşımı konularak, hazır hale getirilmiştir.

- Sıcaklık kontrol ünitesi taşınabilir olduğundan, ergitme ünitesi yakınına yerleştirilmiştir. Isıl çift, fırın üst kısmındaki delikten geçirilerek pota ile teması sağlanmıştır. Sıcaklık kontrol ünitesindeki gerekli ayarları yapılarak, kablo ve fiş bağlantıları tamamlandıktan sonra ergitme fırını çalıştırılmıştır.

- Ergitme fırını atomizasyon sıcaklığı için uygun akışkanlığa ısıtıldığında, nozulun gaz giriş deliklerine gaz hortumları kelepçeler yardımıyla bağlantısı yapılmıştır.

- Manometre üzerindeki gaz basıncı ayar vanası açılarak, istenilen değerdeki atomizasyon gaz basıncına ayarlanmasıyla, nozula gaz beslemesi yapılmıştır. Aynı zamanda atomizasyon sırasında oluşan gazın tahliyesi ve ince taneli tozlarında siklonda toplanabilmesi için fan çalıştırılmıştır.

- Artık toz üretimi için son aşamaya gelinmiştir. Ergitme potası içerisinde sıvı metalin akışını engelleyen açma-kapama çubuğu yerinden çıkartılarak, sıvı metalin serbest düşme ile birlikte akış borusu içerisinden geçerek gaz jeti ile sıvının pülverizasyonu sağlanmıştır. Bu şekilde pota içerisindeki sıvı metal bitinceye kadar toz oluşumu devam etmiştir.

- Toz üretimi tamamlandıktan sonra sisteme verilen gaz basıncı kesilerek, fan kapatılmıştır ve gaz bağlantı hortumları da sökülmüştür. Toz toplama kaplarındaki biriken tozlar alınmıştır.

- Son olarak, ergitme ünitesi soğuması için taşıma kolları yardımıyla yan tarafa alınmıştır. Atomizasyon kulesi yüzeyine yapışmış olan tozlar, hem üst hem de alt tarafından temizlenmiştir. Aynı şekilde toz toplama bölümü vida bağlantılarından sökülerek yüzeyinde yapışmış halde bulunan tozlar temizlenerek tekrar bağlantısı yapılmıştır.

- Gerekli bağlantılar ve temizleme işlemleri özenle yerine getirildikten sonra bir sonraki üretim için hazır hale getirilmiştir.

Toz üretim süreci içerisindeki gerçekleştirilen aşamalar sırasıyla verilmiştir. Her bir yeni deneme için yukarıda bahsedilen aşamalar sırasıyla tekrarlanmıştır. Çalışmalarımızın devamında toz özellikleri ve karekterizasyonu açısından, bu aşamaların önemi göz önünde bulundurularak, toz üretimi gerçekleştirilmiştir.

6.4. Toz Karışımının Hazırlanması

Farklı gaz basınçları ve sıcaklık değerleri denenmek suretiyle optimum şartlar altında toz üretimi gerçekleştirilmiştir. Gaz atomizasyon ünitesinde, toz üretimi ile birlikte siklon içerisinde ince tozların fan yardımıyla nispeten daha iri taneli tozlardan ayrılması sağlanmıştır. Bu ayrım hemen atomizasyon kulesi alt kısmında bulunan toz toplama bölümünden almış olduğumuz iri taneli ve siklonda biriken ince taneli tozlar olarak yapılmıştır. Sonrasında bu tozların ağzı kilitli poşetler içerisine alınması yoluyla, elek analizi işlemine tabi tutulmuştur.

Yapılan çalışmalarımız sonrasında tozların tane büyüklüğü ve boyutu hakkında bilgi sahibi olabilmemiz için, G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Döküm laboratuarında bulunan ve toz tane boyutu ölçümünde kolay bir yöntem olan elek analizi cihazı ile yapılmıştır. Bu aşama hem tozları sınıflandırmak hem de kaba taneli tozları ayırmak amaçlı yapılmıştır.

Elek analizi ile birlikte tozlar Tava (<53µm) – 3360 µm olarak sınıflandırılmıştır. Yapmış olduğumuz çalışmaların devamında kullanılmak üzere ortalama 100 µm altı olarak nitelendirebileceğimiz son dört elek aralığı sırasıyla; 105 µm, 74 µm, 53 µm ve Tava (<53µm) olmak üzere ileriki süreçlerde toz özellikleri ve karekterizasyonu açısından incelenmek üzere homojen bir şekilde karışımı sağlanmıştır (Resim 6.10).



Resim 6.10. AA 2014 aluminyum alaşım tozunun genel görünüşü

Ayrıca bu homojen karışım daha sonrasında boyut analizine de tabii tutulmak suretiyle ortalama toz boyutu hakkında da fikir sahibi olunmuştur.

6.5. Toz Boyut Analizi

AA 2014 aluminyum alaşım tozlarının tane boyutlandırması işlemi Gazi Üniversitesi Mimarlık-Mühendislik Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümünde yapılmıştır. Bu işlemde kullanılan cihaz Malvern Mastersizer E ver 1,2, b boyut analizi cihazıdır. Daha sonrasında Optik mikroskop ve SEM ile yapmış olduğumuz mikro yapı incelemeleri ve EDS analizleri ile de birlikte toz boyutu hakkında yeterli bilgiye ulaşılmıştır.

6.6. Toz Karışımının Preslenmesi

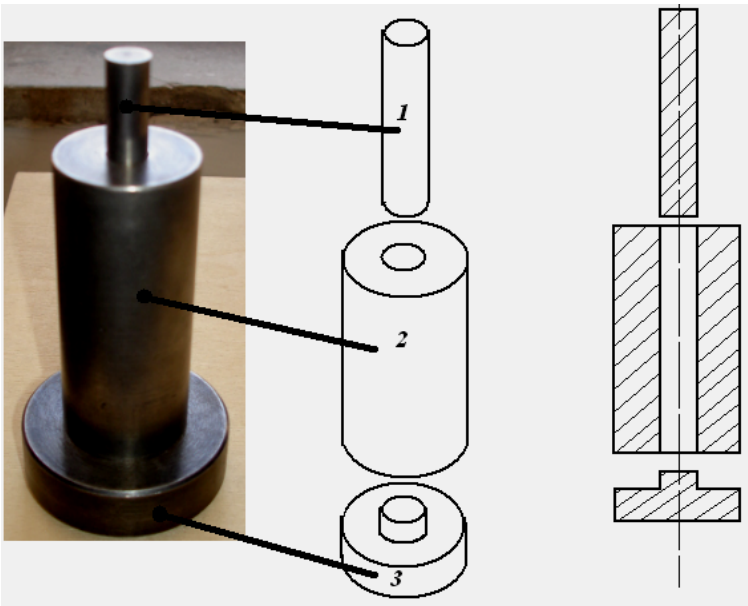
Hazırlanan toz karışımı, sinterleme sıcaklığının ve sürelerinin belirlenebilmesi için presleme işlemine tabi tutulmuştur. Presleme işlemi G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Malzeme Anabilim Dalı laboratuarında bulunan presleme cihazında yapılmıştır (Resim 6.11).



Resim 6.11. Deney numunelerinin presleme işleminin yapıldığı cihaz

Presleme işlemine düşük presleme basınçları ile başlanılarak yüksek presleme basınç değerlerine kadar çıkılmıştır (250-875MPa). Maksimum noktadaki presleme basıncı tespit edilmiştir. Bütün bu presleme basınçlarının uygunluğunun belirlenebilmesi için, uygulanan presleme basıncı sonrasındaki yoğunluk ölçümü (sinterleme öncesi yoğunluk) ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde yapılan çalışmalar doğrultusunda maksimum presleme basıncından sonra yoğunlukta ciddi bir değişim meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Bu bilgiler ışığında uygun presleme basıncı 650MPa olarak tayin edilmiştir.

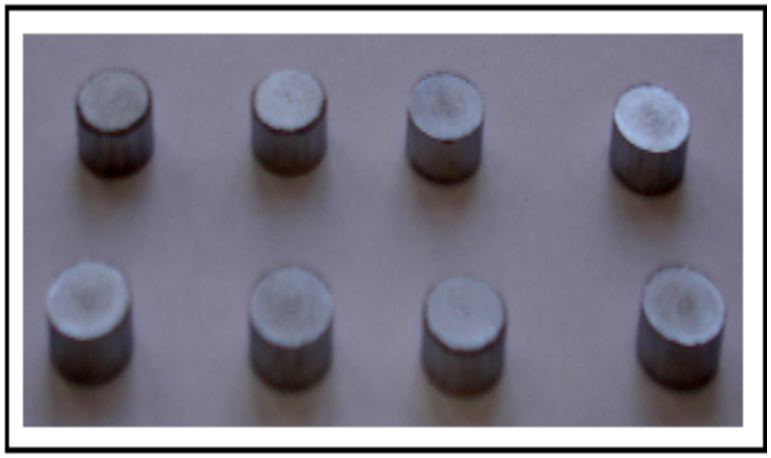
Presleme işlemi için kullanılan kalıp Şekil 6.1' de görülmektedir. Presleme işleminde 10 mm çapındaki tek yönlü pres kullanılmış olup, kullanılan kalıp içi ve zımbası sertleştirilmiş çelikten yapılmıştır. Kalıp çok sayıdaki presleme işlemine elverişli şekilde üretilmiştir. Presleme öncesinde 1g toz numuneler hassas terazi yardımıyla tartılarak, preslemeye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.1. Presleme kalıbının ön görünüşü ve katı modeli
1. Hareketli zımba 2. Kalıbın ana gövdesi 3. Sabit altlık

Şekil 6,1'de görüldüğü gibi kullanılanan hareketli kalıp yüzeylerindeki sürtünme kuvvetlerinin azaltılması amacıyla preslemenin sağlıklı olarak yürütülebilmesi için her presleme işlemi öncesinde mutlaka gerekli temizleme işlemleri yapılmıştır. Maksimum presleme basıncı ile birlikte artık yoğunlukta ciddi bir değişimin meydana gelmediğinin tespit edilmesiyle birlikte, uygun presleme basıncı sonrasında elde edilen standart deney numuneleri gösterilmiştir (Resim 6.12).

Bundan sonra sinterleme tavırlarının incelenebilmesi için, uygun presleme basıncı ile presleme yapılmış olan, deney numunelerinden çok sayıda üretilmiştir. Bu numuneler sinterleme ve sonrası işlemlerde kullanılmıştır.



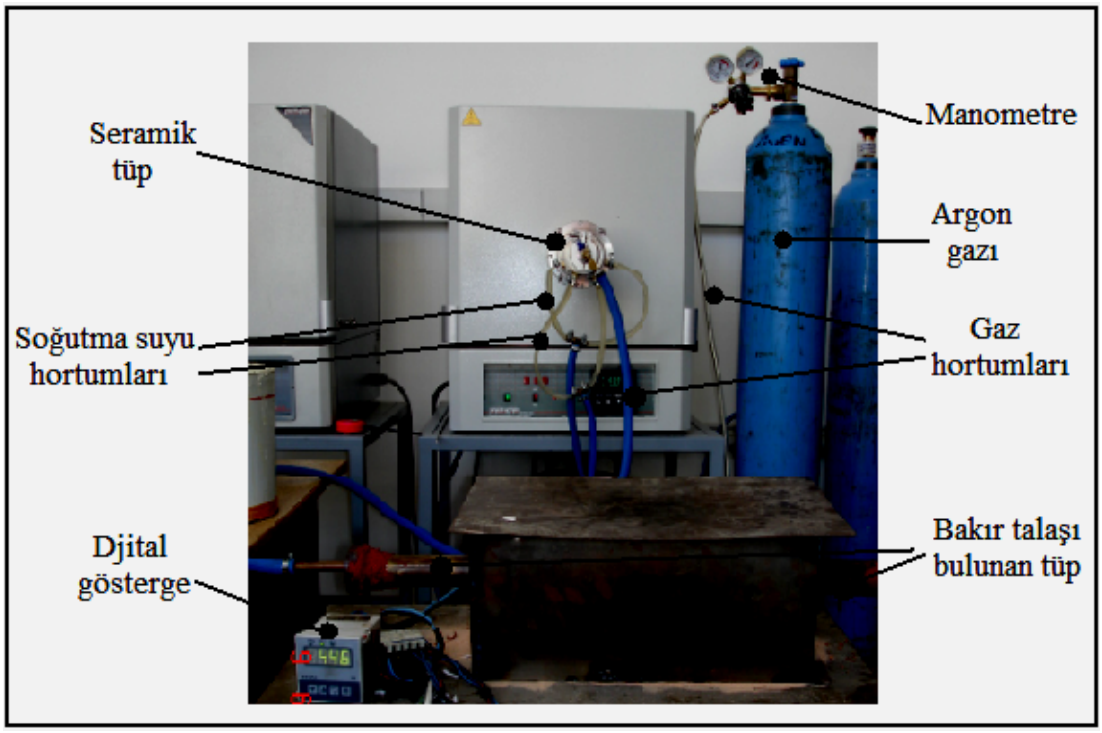
Resim 6.12. Deney numuneleri

6.7. Numunelerin Sinterlenmesi

Deney numuneleri üretildikten sonra, sıradaki işlem süreci numunelerin sinterlenmesidir. Sinterleme işleminde G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Malzeme Anabilim Dalındaki SFL (sc 1206 model) marka yatay fırın kullanılmıştır (Resim 6.13).

Ancak sinterlemeye geçmeden kullanacağımız fırının kalibrasyonunun yapılması gereklidir. Bunun nedeni ise fırının dijital göstergesinden okumuş olduğumuz sıcaklık değeri ile fırının içerisinde çalışma bölgesindeki en sıcak bölge olarak tanımladığımız bölgedeki sıcaklık değerleri arasında fark olmasıdır.

Sinterlemenin sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için, fırının sıcak bölgesinin homojen bir değerde olması gerekmektedir. Bunun yerine getirilebilmesi için, belirli bir sıcaklık değerine ayarlanan fırında, ısıl çiftler yardımıyla gerektiği gibi ölçümler yapılarak, sıcaklık değerinin uzun süre değişmeden kaldığı aralık fırın içerisinde homojen sıcaklık bölgesi olarak belirlenmiştir.



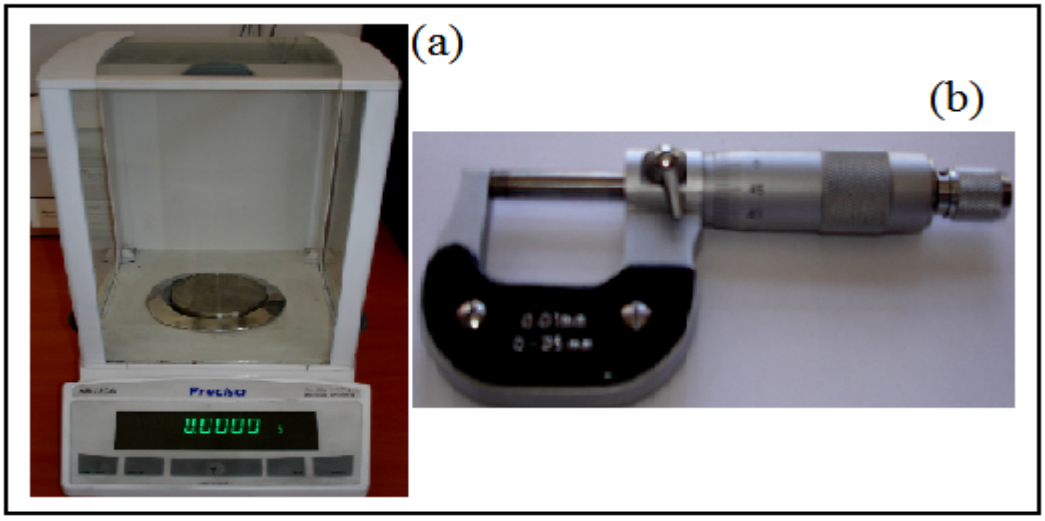
Resim 6.13. Atmosfer kontrollü ısıl işlem fırını

Çalışmalarımız süresince preslenen toz numunelerin, farklı sinterleme sıcaklığı ve sürelerinde nasıl bir durum sergiledikleri gözlemlenmeye çalışılmıştır. Farklı sinterleme sıcaklıkları olarak 550, 560, 570, 580, 590, 600, 610 ve 620˚C test edilmiştir. Her bir sıcaklıkta 1, 2 ve 4 saat olarak farklı sinterleme süreleri test edilmiştir. Sinterlemenin yapılmasında önemli bir hususta, ısıl işlem fırınında kontrollü atmosferin oluşturulmasıdır. Numunelerin sinterlenmesi Resim 6.13' de görüldüğü gibi atmosfer kontrollü fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Atmosfer kontrollü fırın içerisinde koruyucu gaz ile yapılan çalışmalarda %99,9 saflıkta argon gazı kullanılmış olup, gazın saflığının artırılabilmesi ve içerisindeki nem ve oksijenin alınabilmesi için, sisteme içerisinde bakır talaşı bulunan 450 ºC' ye ayarlı ikinci bir sızdırmaz tüp bağlantısı yapılmıştır. Bu sayede tüp fırının içerisinden Ar gazının geçirilmesiyle oksitlenme tavrı minimuma indirilmiştir. Arıtma işleminde kullanılan sızdırmaz tüp içerisindeki bakır talaşı belirli sürelerde değiştirilmiştir. Bu değiştirme işlemi bakır talaşının oksitlenmesinden sonra yapılmaktadır.

6.8. Numunelerin Yoğunluk Ölçümü

Presleme işlemi uygulanan deney numunelerine bir sonraki aşamada yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Bu yoğunluk, numunenin sinterleme öncesi yoğunluğu (ham yoğunluğu) olarak alınmıştır. Sinterleme öncesi yoğunluğu belirlenmiş olan numunelere daha sonra farklı sinterleme sıcaklık ve süreleri uygulanmıştır. Bu aşamadan sonra elde edilen yoğunluk ise sinterleme sonrası yoğunluk olarak tespit edilmiştir. Yoğunluk ölçümleri G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalı laboratuarlarında yapılmıştır. Kullanılan cihaz ve ekipmanlar Resim 6.14'de görülmektedir.

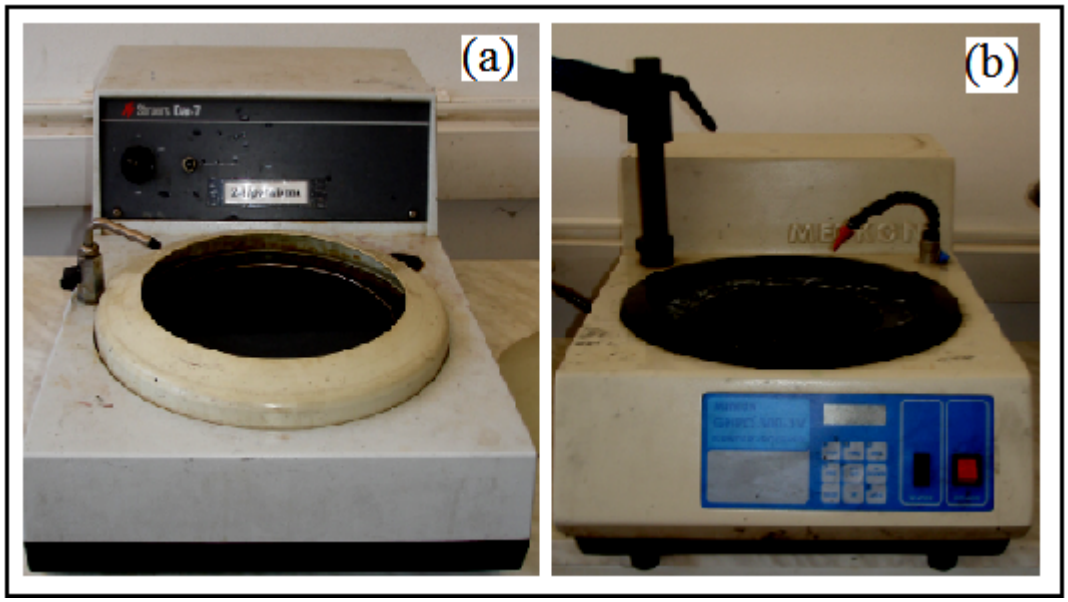


Resim 6.14. Yoğunluk ölçümünde kullanılan cihazlar; a) dijital terazi b) mikrometre

Deney numunelerinin sinterleme öncesi ve sonrasındaki yoğunluk ölçümleri iki şekilde yapılmıştır. Bunlardan birincisi Arşiment prensibine göre çalışan, 0,001 g hassasiyetteki üzerinde yoğunluk kiti bulunan hassas terazide ölçülmüştür. Bir diğeri ise hassasiyeti 0,1 mg olan olan dijital terazi ile kütle tespiti ve mikrometre kullanılarak 10 mm çapa sahip numunelerin yüksekliği belirlenerek, matematiksel hesaplamalarla hacim hesabı üzerinden yapılmıştır. İki ölçüm sonrasındaki sonuçlar kıyaslandığında değerlerde farklılık olmadığından dolayı ölçümler mikrometre ve dijital terazi kullanılarak hacim hesabı üzerinden yapılmıştır.

6.9.Numunelerin Metalografik Olarak İncelenmesi

Sinterleme sonrasında numunelerin mikro yapı incelemeleri ve analizleri için, bazı metalografik işlemlerden geçirilmesi gereklidir. Bu işlemler sırasıyla zımparalama, parlatma ve dağlama olarak uygulanmıştır. Metalografik incelemeler yapılırken, G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalı laboratuarlarında bulunan zımparalama, parlatma cihazları kullanılmıştır (Resim 6.15).



Resim 6.15. Metalografik çalışmalarda kullanılan cihazlar;
a) Zımparalama cihazı b) Parlatma cihazı

Öncelikli olarak deney numunelerine zımparalama işlemi uygulanmıştır. Zımparalama işlemi döner disk üzerinde 600, 800 ve 1200 numaralı zımparalar ile yapılmıştır. Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonra numunelere parlatma cihazında yine döner disk üzerinde 6µm, 3µm ve 1µm parlatma keçeleri solüsyonları kullanılmak suretiyle parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Son işlem olarak numunelerin mikro yapı olarak faz dağılımlarının incelenebilmesi için Keller çözeltisi (1 ml HF, 1,5 ml HCl, 2,5ml HNO_3, 95 ml H_2O) kullanılmıştır.

6.10. Numunelerin Mikro Yapı İncelemeleri ve Analizleri

Numuneler metalografik işlemlerden geçirildikten sonra mikro yapı incelemeleri ve analizleri için, G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalı laboratuarlarında bulunan Leica marka Optik mikroskop (Resim 6.16) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Joel JSM - 6060 LV model cihaz ile yapılmıştır (Resim 6.17).



Resim 6.16. Leica marka optik mikroskop

Optik mikroskopla AA 2014 aluminyum alaşım tozlarının şekilleri ve presleme sonrası sinterleme sıcaklık ve sürelerine bağlı olarak gelişen yapı-gözenek ilişkileri açısından yapılan incelemelerde X50 ve X100 büyütmeler olmak üzere kullanılmıştır.



Resim 6.17. JOEL JSM–6060 LV model taramalı elektron mikroskobu ve EDS bağlantısı

Optik mikroskopta yapılan incelemeler, sonrasında yapılan SEM incelemeleri için bir ön hazırlık niteliği taşımaktadır. SEM incelemelerinde ise, özellikle toz numunelerin şekil ve morfolojileri ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Toz üretimi sonrasında toz yüzeylerinde oluşabilecek, aynı zamanda sinterleme sonrasında da deney numunelerinde oluşabilecek oksitlenme, yapı farklılıkları, tane boyutlarının belirlenmesi gibi yapısal farklılıklar tespit edilmeye çalışılmıştır. SEM ve buna bağlı olarak çalışmalarımızda kullandığımız EDS yardımıyla, tane ve tane sınırlarında analizler yapılarak, özellikle etkili olduğunu düşündüğümüz oksit oluşumu ve yapı farklılıkları tespit edilmeye çalışılmıştır.

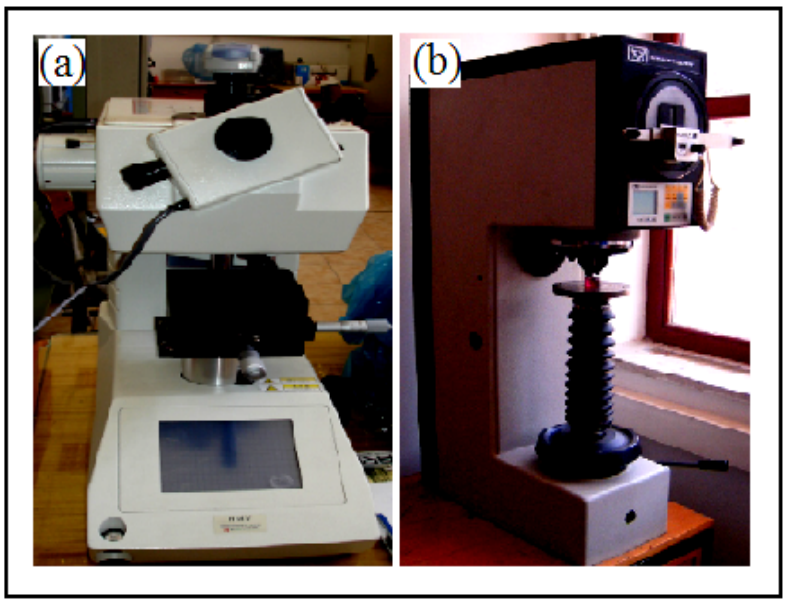
AA 2014 aluminyum alaşımına ait genel analizler yapılmış olup, gerek nokta analizleri gerekse bölgesel analizler yapılarak, yapı içerisindeki element dağılımı tespit edilmeye çalışılmıştır.

6.11. Numunelerin Sertlik Ölçümleri

Sinterleme sonrasında, deney numunelerine metalografik işlem basamakları sırasıyla uygulandıktan sonra, bu tez çalışmasında AA 2014 aluminyum alaşımı için uygulanan farklı sinterleme sıcaklıkları ve sürelerine bağlı olarak ortaya çıkan sertlik değerlerinin nasıl etkilendiği mekanik bir özellik olarak araştırılmıştır.

Numunelerin sertlik ölçümlerinde mikro sertlik ve makro sertlik olmak üzere iki farklı sertlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Bu ölçümler, G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalındaki SHIMADZU Mikro Sertlik cihazında 0,1 kg yük kullanılarak mikro sertlik ölçümleri ve INSTRON WOLPERT DIATESTOR 7551 Model cihazda 0,5 kg yük kullanılarak makro sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Numunelerde sertlik ölçümlerinde en az üç noktadan ölçüm yapılırken, ancak sağlıklı bir ölçüm olmadığı takdirde ölçümlerin güvenilirliğini sağlamak açısından bu sayının daha da üzerine çıkılmıştır. Sertlik ölçümleri numunelere presleme işleminin uygulandığı yüzeyinden yapılmak suretiyle, sertlik sonuçları açısından preslemeden dolayı ortaya çıkabilecek farklılıklar giderilmeye çalışılmıştır.



Resim 6.18. Sertlik ölçümünde kullanılan cihazlar;
a) Mikro sertlik cihazı b) Makro sertlik cihazı

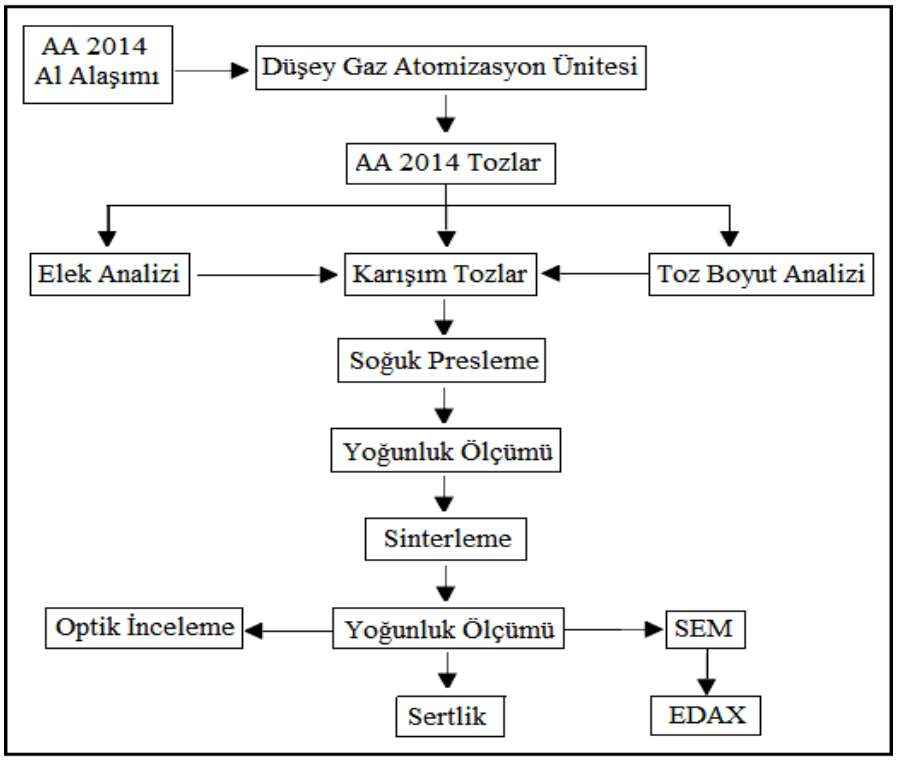
Bu bağlamda mikro sertlik ile yapmış olduğumuz ölçümler sonrasında elde edilen sertlik sonuçlarında farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin çeşitli bölgelerinden olmak üzere on' a yakın alınan sertlik değerlerinden uyumlu veya bağlantılı bir sonuç alınamamıştır. Bunun nedeni olarak mikro sertlik ile yapılan ölçümlerde oluşturulan izlerin küçük bir alanda olması itibariyle ve yapının geneli hakkında bir sertlik değeri alınamadığından kaynaklandığı düşünülmüştür. Dolayısıyla sertlik ölçümlerinde mikro sertlik ölçümünün tek başına yeterli olmadığı kanısına varılmıştır ve makro sertlik testi de numunelere uygulanmıştır.

Makro sertlik ölçümlerinde çoğu numunelerde en az üç noktasından yapılan ölçümler sonucunda değerlerin aritmetik ortalaması alınarak sertlik değerleri belirlenmiştir. Bu da makro sertlik ile daha büyük bir alandan sertlik alınabilmesi ve yapının geneli hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamıştır ve bundan sonraki ölçümler makro sertlik cihazı kullanılarak yapılmıştır.

7. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

7.1. Çalışma Sürecinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada Düşey Gaz Atomizasyon Ünitesi kullanılarak, AA 2014 Aluminyum alaşımının toz üretimi gerçekleştirilerek, toz özellikleri ve karekterizasyonu açısından uygun değerler tespit edilmeye çalışılmıştır. Tez çalışması kapsamında yürütülen deneysel çalışma akış şeması Şekil 7.1' de gösterilmiştir.



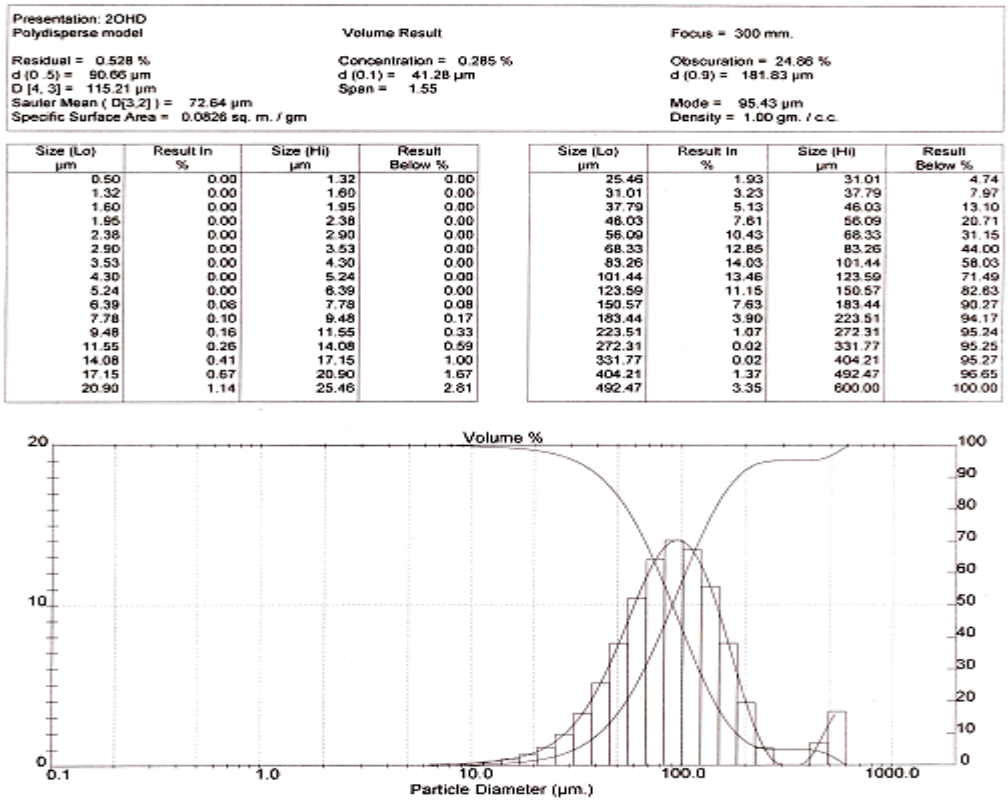
Şekil 7.1. Deney çalışma planı

AA 2014 malzemesi silindirik hadde halinde temin edilmiştir. Daha küçük boyutlara getirilerek atomizasyon işlemi için ergitme ünitesine yerleştirilmiştir. Farklı sıcaklık ve gaz basınçları denenmek suretiyle, uygun gaz basıncı olarak 12,5 bar ve 790-800-810 ˚C sıcaklık değerleri kullanılarak, düşey gaz atomizasyon ünitesinde toz üretimi gerçekleştirilmiştir. Gaz atomizasyon ünitesinin alt kısmında bulunan toz toplama bölümünden, üretilen tozlar alınarak kapalı poşetler içerisine konulmuştur. Elde edilen bu tozlar daha sonrasında yaklaşık 10 dakika elek analizine tabii tutulmuştur.

Elek analizi ile birlikte 3360 – Tava(<53)µm olarak sınıflandırılmıştır. Çalışmalarımızda kullanılmak üzere 790˚C' de üretilmiş tozlar elek analizi sonrasında son dört elek aralığı Tava(<53µm)-270mesh(53µm)-200mesh(74µm)-140mes(105µm) homojen bir karşımı yapılmıştır. Sonrasında ise ortalama toz boyutu hakkında bilgi sahibi olunması için toz boyut analizi yapılmıştır. Çalışmanın devamı olarak toz malzemenin preslenebilirlik ve sinterleme tavırları incelenerek, gözenek-yapı etkileşimi, yoğunluk değişimleri ve sertlik değerleri üzerinde nasıl bir etki meydana getirdiği tespit edilmeye çalışılmıştır.

7.2. Toz Boyut Analizi Sonuçları

Elek analizi sonrasında homojen bir şekilde karışımı sağlanan tozlara, toz boyut analizi uygulanmıştır. Ortalama toz tane boyutu 90,66 µm olarak ölçülmüştür. Toz dağılımına bağlı olarak %10' unun ortalama toz tane boyutu d(0.1) = 41,28 µm ve %90' ının ortalama toz tane boyutu d(0.9) = 181,83 olarak ölçülmüştür (Şekil 7.2).



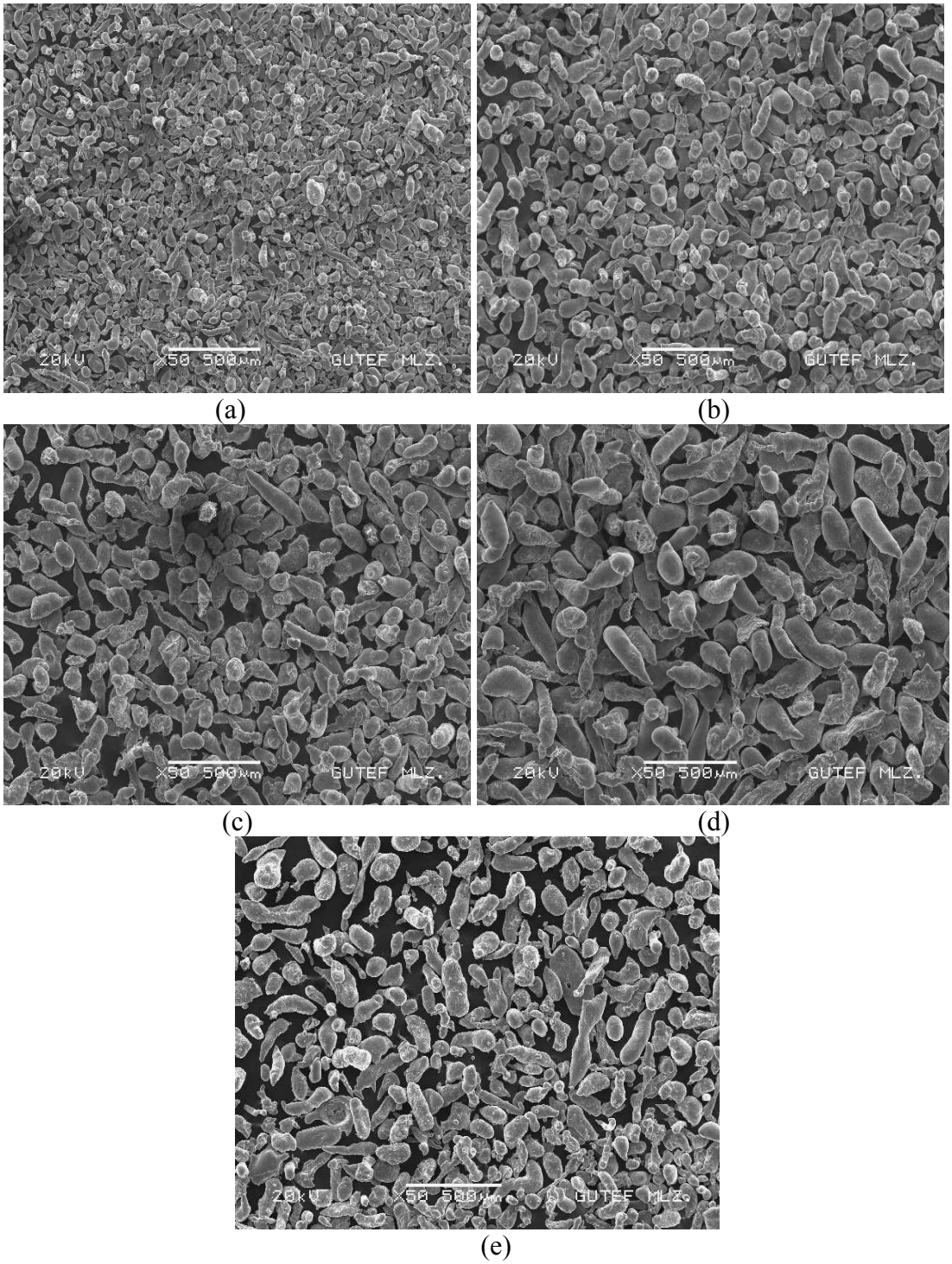
Şekil 7.2. AA 2014 tozunun toz tane boyut dağılımı

7.3. Toz Şekil ve Morfolojisi

Çalışmalarımızda öncelikle toz üretimi sırasında en önemli parametrelerden birisi olan gaz basıncı çeşitli denemeler sonrasında optimum seviyeye getirilmiştir. Gaz atomizasyonu ile toz üretimi sürecinde gaz basıncı toz boyutu ve dağılımı açısından oldukça önemlidir. Yaklaşık 15-20 bar seviyelerine kadar artan gaz basıncı toz boyutunu küçültmektedir. Bilindiği üzere yüksek gaz basınç değerlerinde toz boyutu küçültmektedir. Bunun nedeni ise gaz atomizasyonunda sıvı metale ne kadar çok enerji aktarılabilirse üretilen parçacıklarda o kadar küçük olur.

Denemelerde gaz basıncının yetersiz olduğu durumlarda, sıvı metalin serbest düşme gerçekleştirdiği yani atomizasyonun gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Artan gaz basıncının belirli bir değerin üzerine çıkıldığında tozların pulsu bir hal aldığı gözlemlenmiştir. Ölçülen gaz basıncının manometreden gerçekleştirilmesi işlemi güçleştirmiştir. Sıcaklık değeri açısından kullanılan malzemenin ergime sıcaklığının üzerindeki yaklaşık 150˚C gibi bir aşırı sıcaklığa ısıtılması yönünden sıcaklık değeri yeterli olmuştur. Bu durum gaz basıncının yetersiz seviyede olmasından kaynaklanmıştır.

Yine yapılan başka bir denemede ise sıvı metal akıcılığı için sıcaklık değeri 790˚C gibi bir aşırı ısıtılmış sıcaklık değerine getirilerek, sıvı metal bu sıcaklığa ulaştığında manometre üzerinden 12,5 bar atomizasyon basıncı ayarlanarak sıvı metal pülverizasyonu gerçekleşmiştir. Sıvı metalin tamamına yakını toz haline dönüşmüştür. Oluşan toz şekilleri küresel, çubuksu ve göz yaşı damlası şeklinde gözlemlenmiştir (Resim 7.1 a,b,c,d). Elek analizi ve devamında toz boyut analiz ile boyutlandırılmıştır. Resim 7.1, Resim 7.2, Resim 7.3, Resim 7.4’ de elek analizi sonrasındaki son dört elek aralığındaki gaz atomize tozların SEM görüntüleri ve bunların karışımı ile elde edilen SEM görüntüsü verilmiştir.

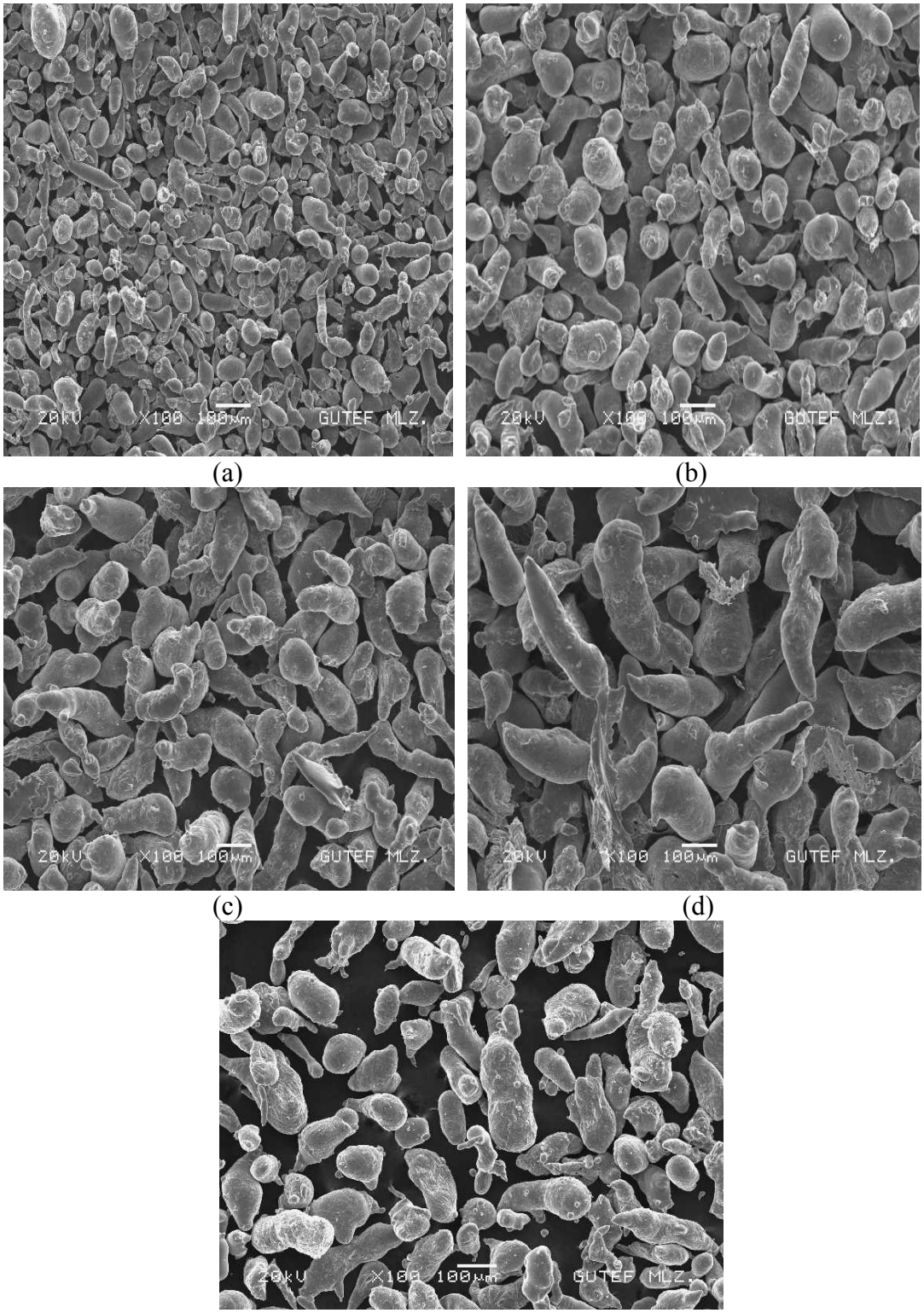


(a) (b)

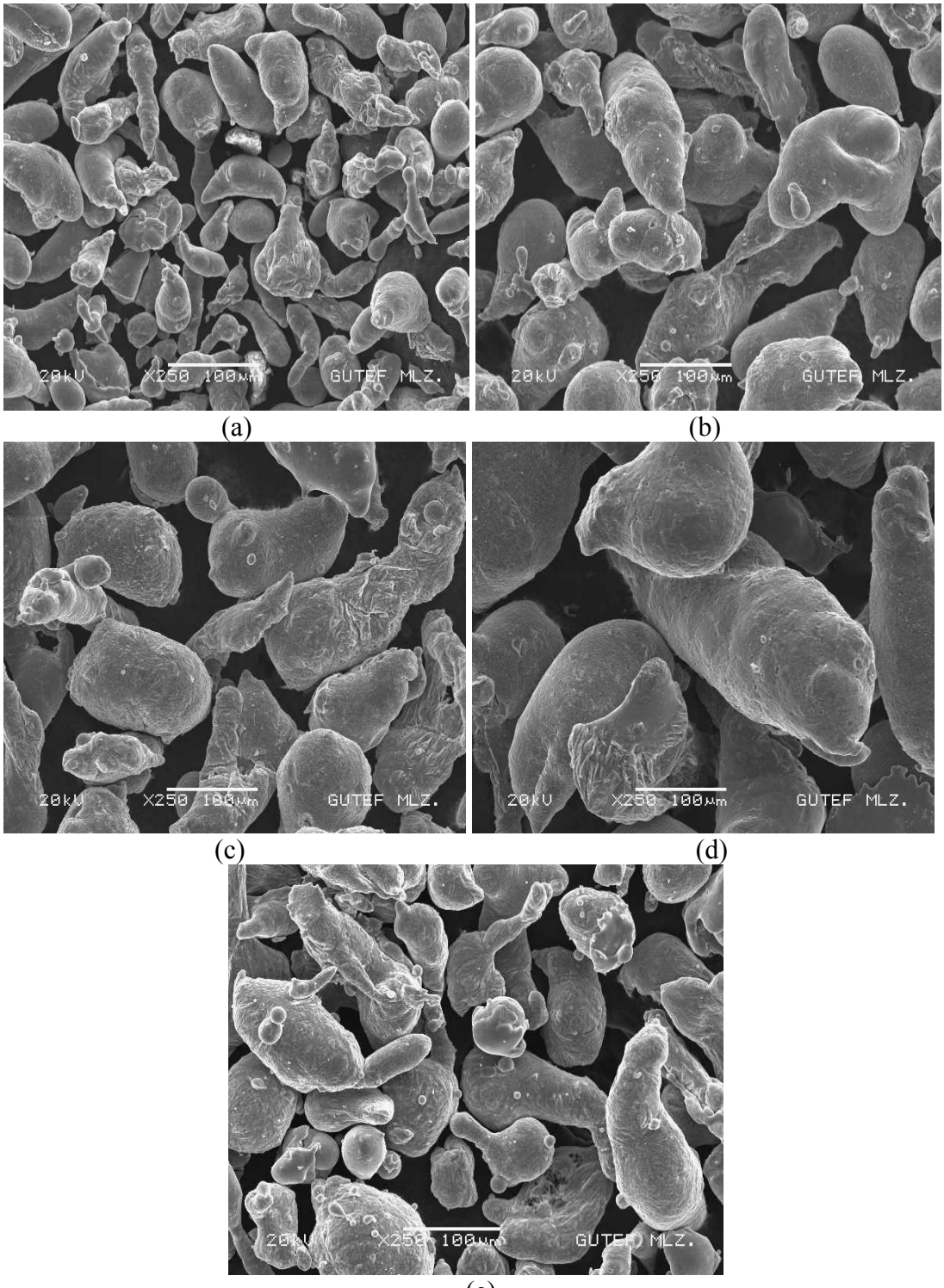
(c) (d)

(e)

Resim 7.1. 790 ˚C' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüleri;
a) Tava<53µm b) 53µm c) 74µm d) 105µm e) Karışım toz 90,66 µm



Resim 7.2. 790 ˚C' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüleri;
a) Tava<53µm b) 53µm c) 74µm d) 105µm e) Karışım toz 90,66 µm

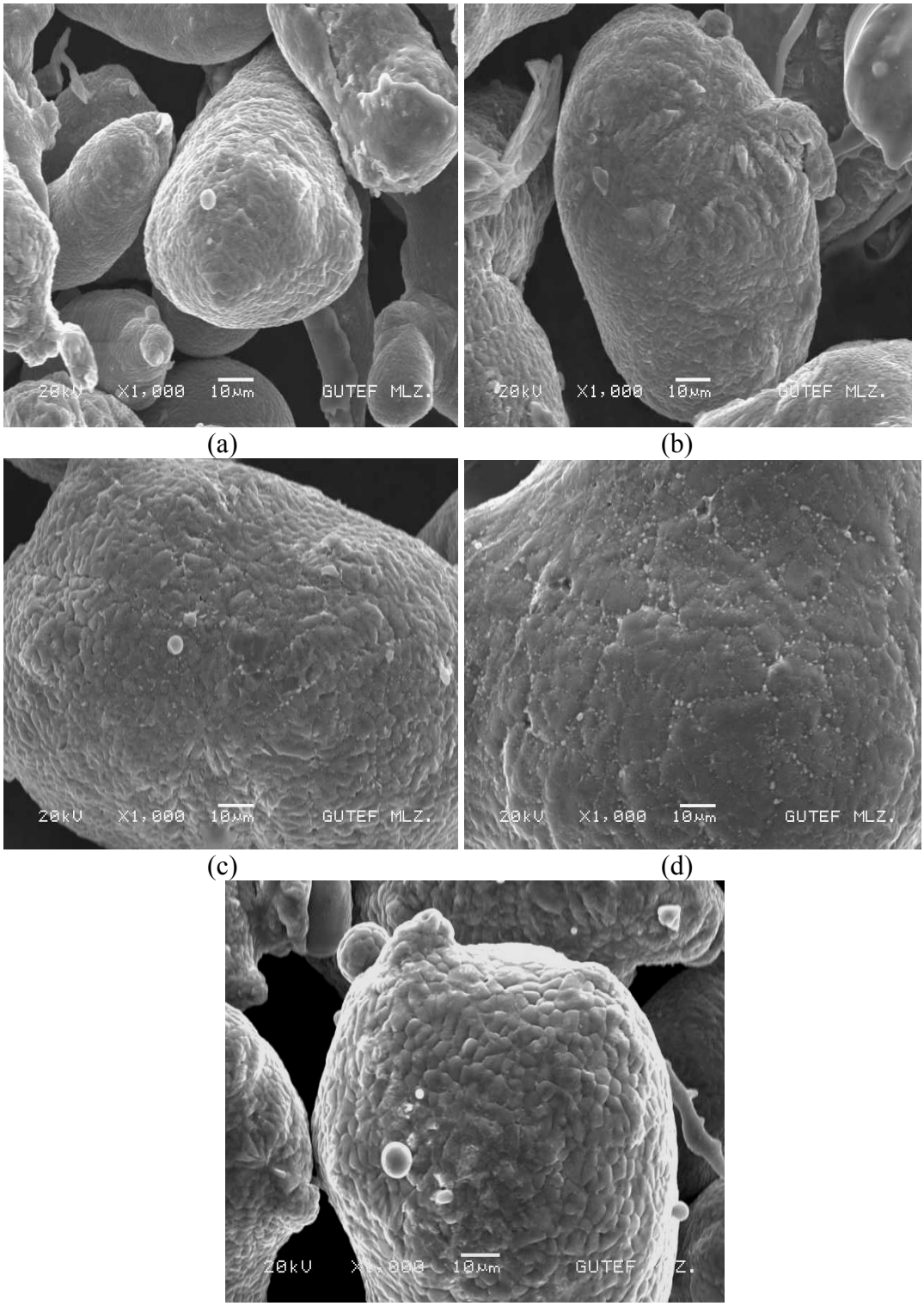


(a) (b)

(c) (d)

(e)

Resim 7.3. 790 ˚C' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüleri;
a) Tava<53µm b) 53µm c) 74µm d) 105µm e) Karışım toz 90,66 µm



(a) (b)

(c) (d)

(e)

Resim 7.4. 790 ˚C' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüleri;
a) Tava<53µm b) 53µm c) 74µm d) 105µm e) Karışım toz 90,66 µm

Gaz atomizasyonu ile üretilen AA 2014 alaşım tozlarının SEM görüntüleri incelendiğinde, üç farklı şekilde tanımlanabilen toz şekil ve morfolojisi gözlemlenmiştir. Bunlar sırasıyla söylemek gerekirse, sıvı metalin gaz ile temas durumuna göre oluşma eğilimi göstermişlerdir.

İlk olarak birinci toz şekli olan çubuk şeklindeki tozlar oluşmaktadır. Bu tozlar gaz basıncının artması ve sıvı metalin katılaşmaması durumunda bir ileri aşamada gerçekleşen gözyaşı damlası şekline dönüşebilmektedir. Bu aşamada etkin parametreler gaz basıncı ve sıvı metal miktarıdır. Bir diğer etkin faktör ise atomizasyon kule yüksekliğidir. Tozun oluşum sürecinde tozun serbest düşme ile birlikte katılaşmasına imkan tanıyacak yükseklikte olmak zorundadır. Bütün toz üretim çalışmalarımız süresince kule yüksekliğinin optimum şartlarda olduğu tespit edilmiştir. Atomizasyonu ikinci evresinde oluşan gözyaşı damlası şeklindeki tozlar küresel tozlardan biraz daha iri ve elipse benzer bir geometrik şekli vardır. Son olarak oluşan küresel toz taneleri ortalama toz boyutunu da belirleyen temel faktördür.

Oluşan toz şeklinin toz boyutuna bağlı olarak meydana gelen değişimi incelenirse, küçük boyuta sahip tozların küresel, nispeten daha iri taneli olarak belirlenen tozların küresel, çubuksu ve küresel şekline yakın tozlardan oluştuğu görülmüştür (Resim 7.1, a,b,c,d). Elek analizi sonrasında en küçük toz boyutu olarak Tava<53µm gözlemlenirken, daha büyük olarak 105 µm(140mesh) toz boyutu elde edilmiştir (Resim 7.1. a ve d). Bu toz boyutlarında da çubuksu, gözyaşı damlası ve küresel toz şekil oluşumları gözlemlenmiştir (Resim 7.1, a,b,c,d).

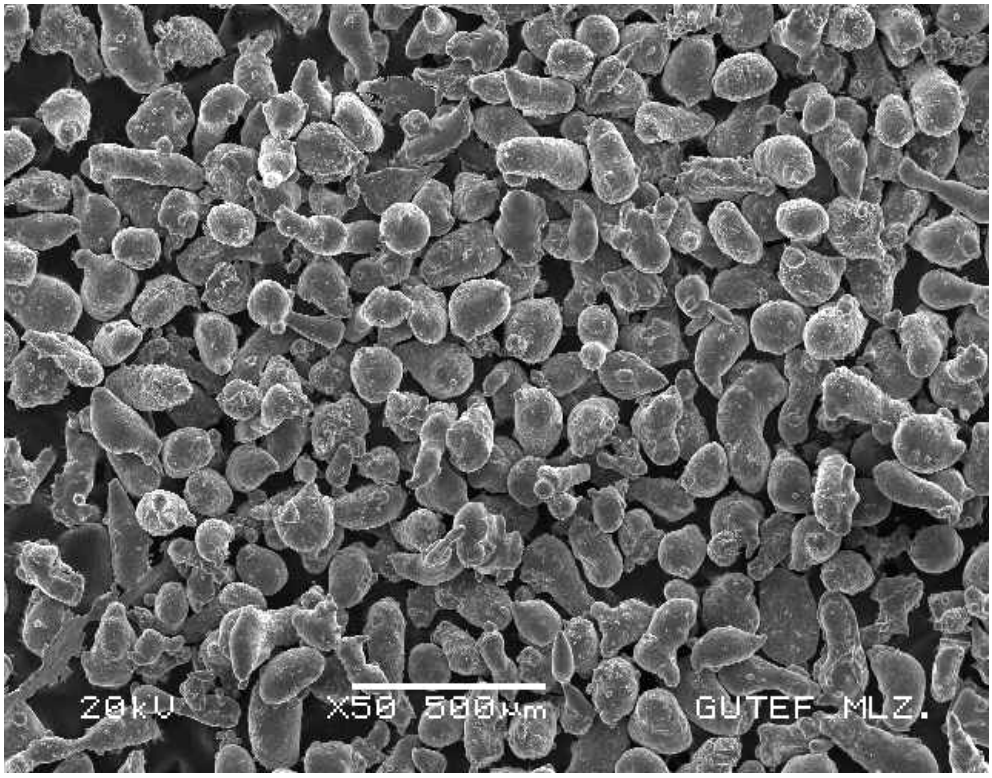
Yüksek büyütmelerdeki toz şekilleri incelendiğinde, küçük tozların büyük tozlar üzerinde yapıştığı gözlemlenmiştir (Resim 7.4, e). Bu durum uydulaşma olarak tanımlanmıştır. Uydulaşma henüz katılaşmamış iri damlacıklara daha önce katılaşmış olan küçük damlacıkların kaynak olması şeklinde tanımlanmıştır. Genellikle atomizasyon yöntemiyle toz üretimi sırasında oluştuğundan, bu çalışmada da gaz atomizasyonu kullanılmasından dolayı, yüksek büyütmelerde uydu oluşumu tespit edilmiştir.

Toz üretim süreci sonrasındaki çalışmalarımızda da toz özellikleri ve karakterizasyonu açısından preslenebilirlik ve sinterleme tavırlarının belirlenmesinde Resim 7.1.e' den gözlemlendiği gibi ortalama toz tane boyutu 90,66 μm olan karışım toz kullanılmıştır. Karışım toz şeklinin de SEM görüntüsü incelendiğinde, çubuksu, gözyaşı damlası ve küresel toz şekillerinin varlığı gözlemlenmiştir. 53 μm altı tozların genel yapısı küresel olup bu tozların içerisinde en küçük toz boyutunun yaklaşık olarak 10 μm olduğu söylenebilir.

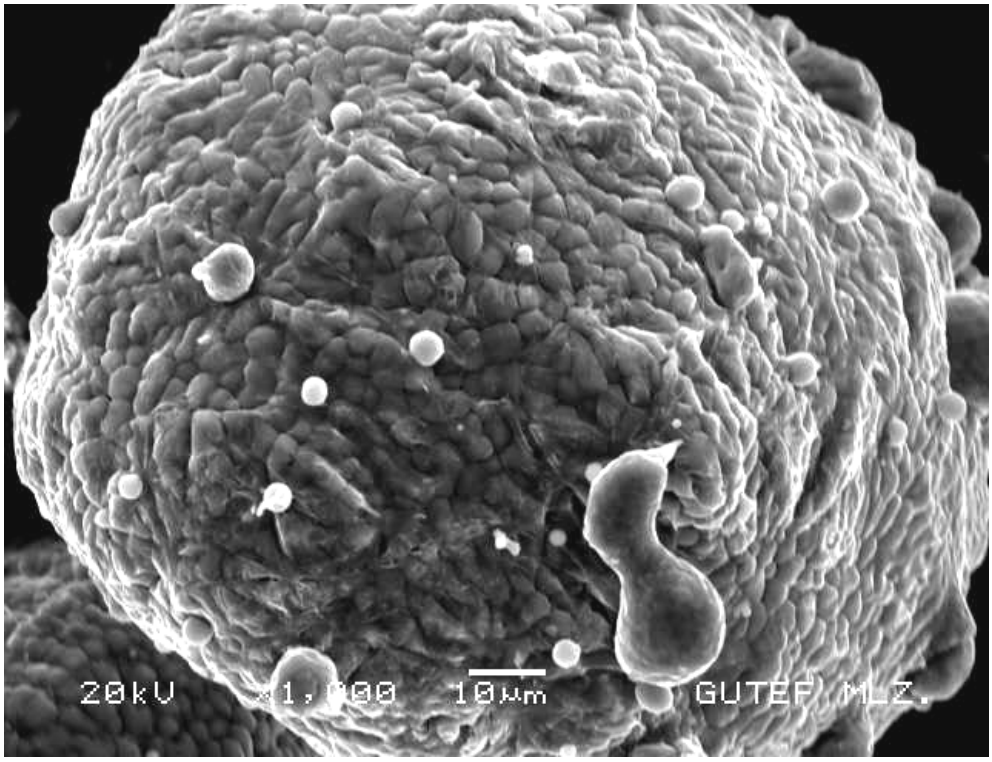
Yapılan çalışmaların devamında, 790ºC sıcaklık değerinin üzerine çıkılarak, 800ºC ve 810ºC gibi sıcaklıklarda atomizasyon gaz basıncı sabit tutularak (12,5 bar), toz üretimi gerçekleştirilmiştir (Resim 7.5, Resim 7.6, Resim 7.7).

Resim 7.5' de görüldüğü gibi, 790ºC' de üretilmiş tozların mikro yapısı incelendiğinde çoğunluğunun küresel ve küresele yakın olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık değerindeki artışa bağlı olarak (800ºC, 810ºC), küçük büyütmelerde daha belirgin bir şekilde göze çarpan küresel toz şeklinin yerini, yapı içerisinde geneli itibariyle çubuksu ve gözyaşı damlası şeklinde tanımlayabileceğimiz toz şekli ortaya çıkmıştır (Resim 7.6, a, Resim 7.7, a). Uydu oluşumu ile ilgili olarak, Resim 7.5, b' de gözlemlendiği gibi önceden katılaşmış küçük tanelerin, henüz katılaşmasını tamamlamış olan iri tanelere sıvanmasıyla uydulaşma eğilimi gösterilmiştir.

Resim 7.5, b, Resim 7.6, b, Resim 7.7, b' deki daha büyük büyütmelerde gözlemlendiği gibi, yapı itibariyle artan sıcaklıkla birlikte eşeksenli tanelerin oluşumu artık yerini çoğunlukla yapıda yönlenmiş tanelerin varlığı şeklinde göstermiştir. Bu durumu ortaya çıkaran etkin parametrenin tozların soğuma hızları ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Hızlı soğuma ile birlikte homojen, eşeksenli tane şekli oluşumundan dolayı, toz katılaşma hızlarına bağlı olarak 800ºC ve 810ºC sıcaklıklarda yönlenmiş tane şekli oluşumu gözlemlenmiştir. Buradan yola çıkarak çalışmalarımız süresince üretmiş olduğumuz tozların homojen bir şekilde eşeksenel ve yönlenmiş taneler şeklinde katılaştığı düşünülmektedir. Aynı zamanda Resim 7.8 ve Resim 7.9' da ki gibi dentritik katılaşma şeklide gösterilmiştir.

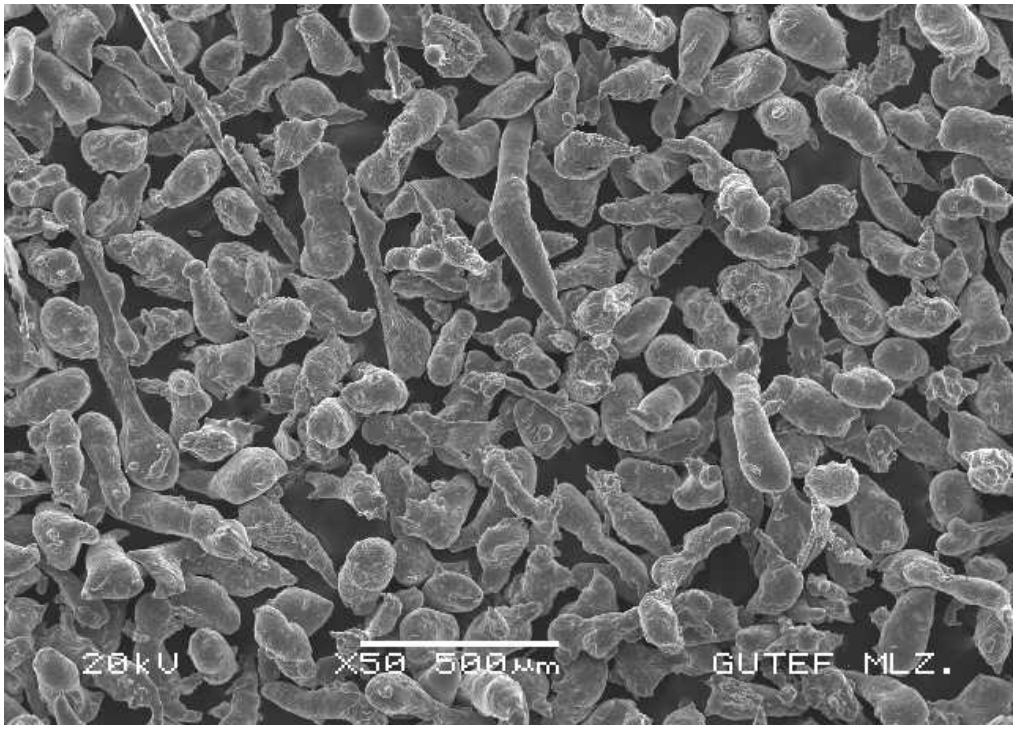


(a)

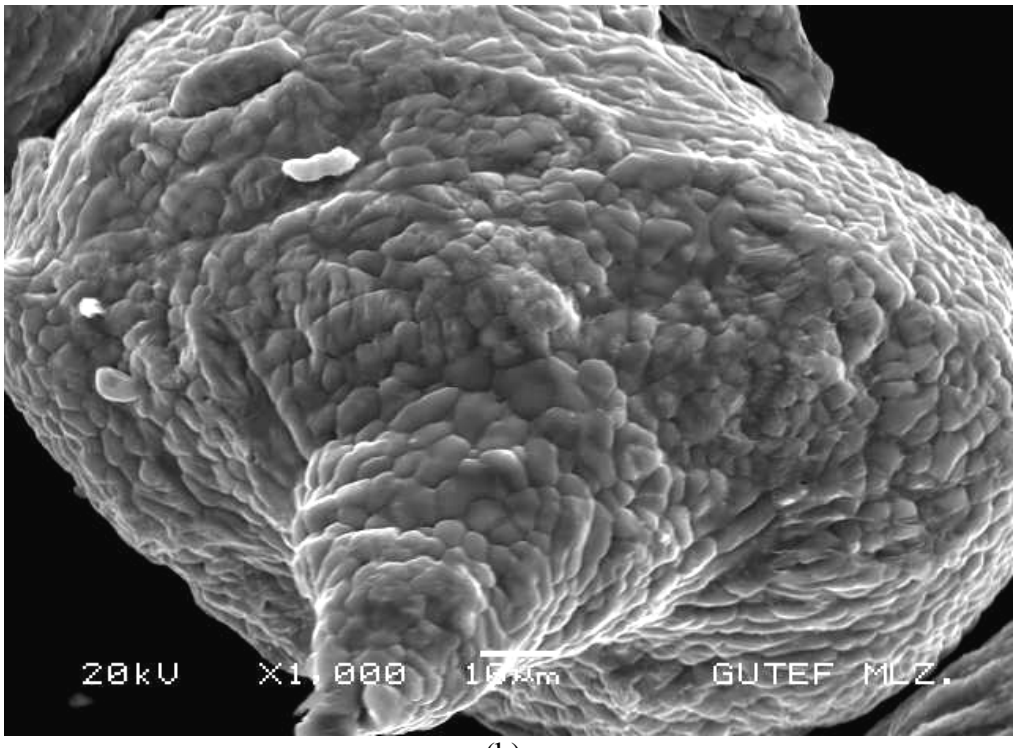


(b)

Resim 7.5. 790ºC' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüsü;
a) Düşük büyütme b) Yüksek büyütme

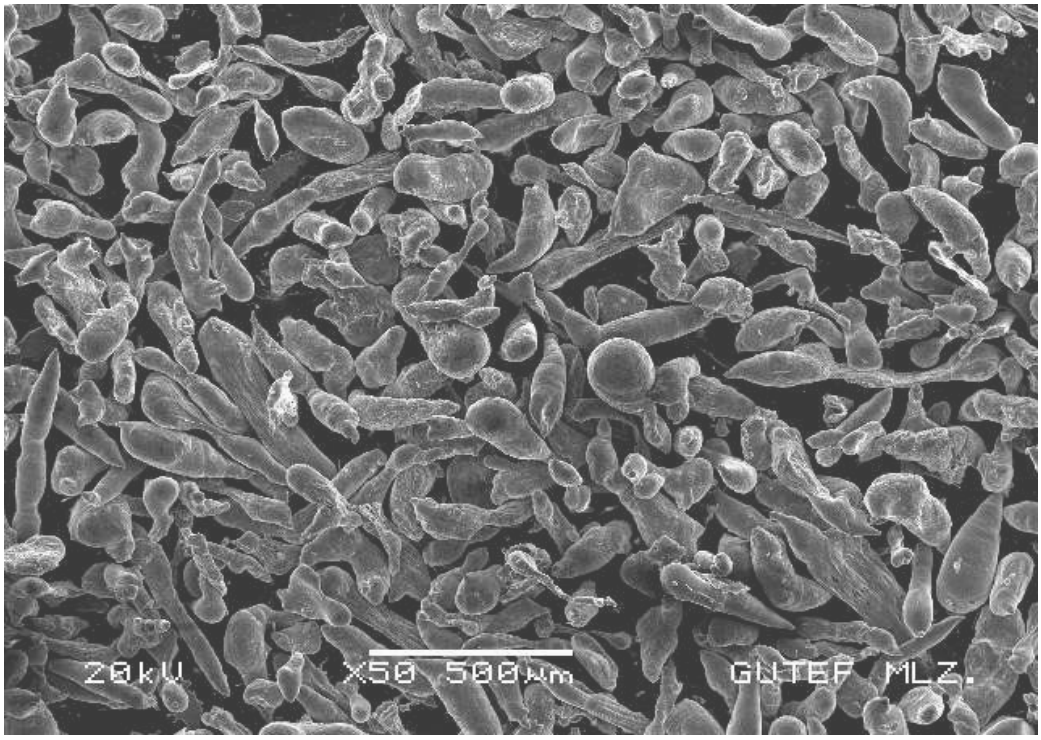


(a)

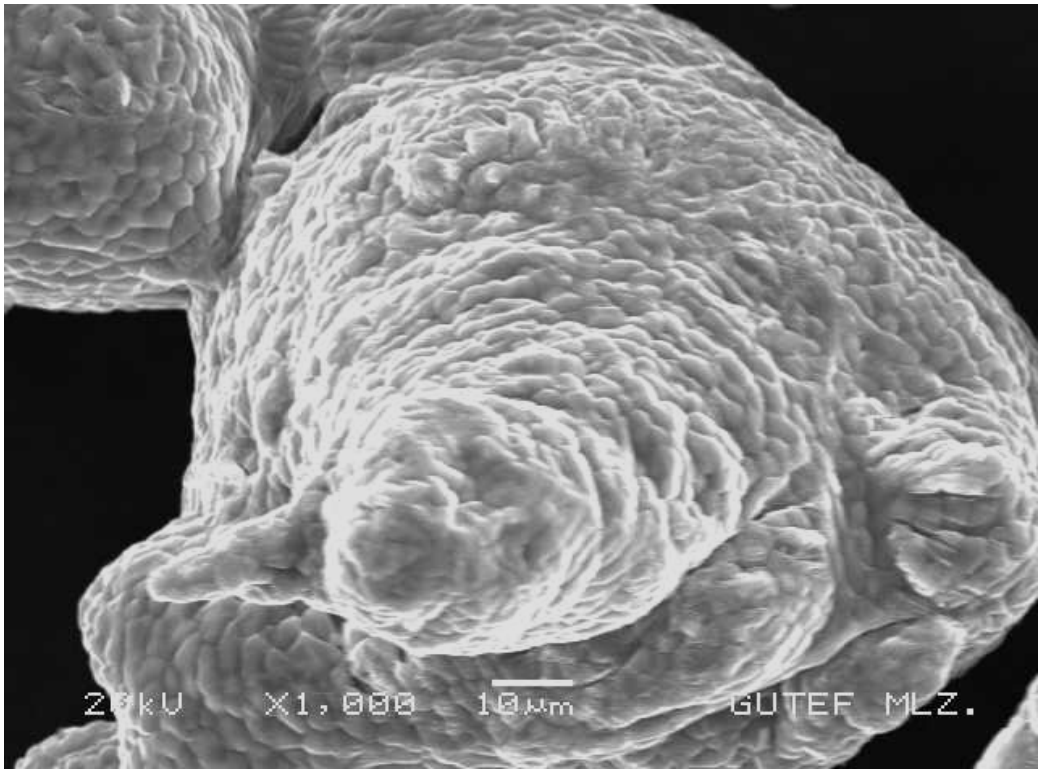


(b)

Resim 7.6. 800ºC' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüsü;
a) Düşük büyütme b) Yüksek büyütme



(a)



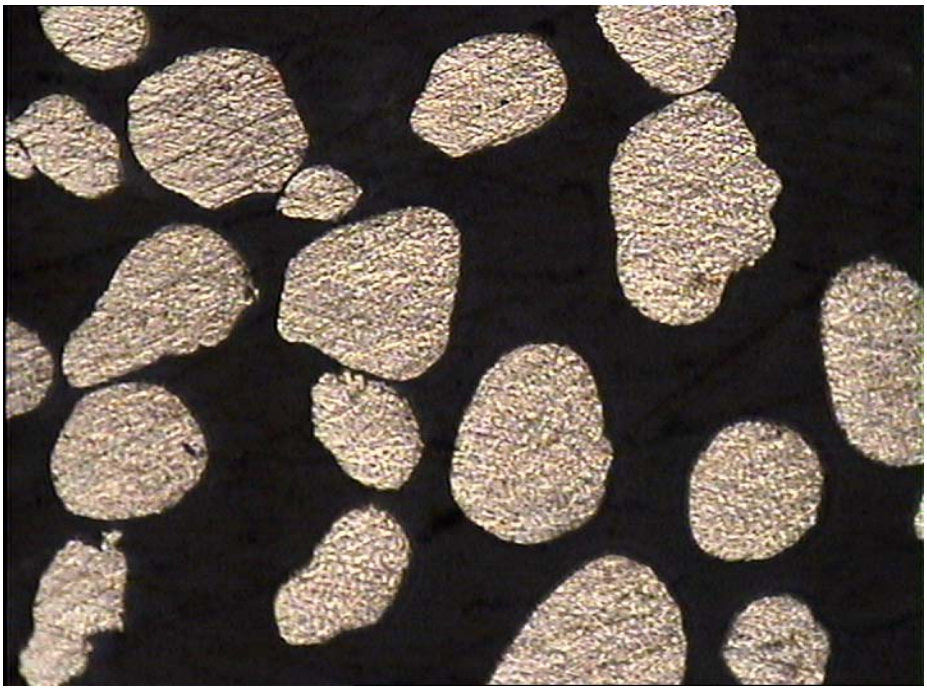
(b)

Resim 7.7. 810ºC' de üretilen gaz atomize tozların SEM görüntüsü;
a) Düşük büyütme b) Yüksek büyütme

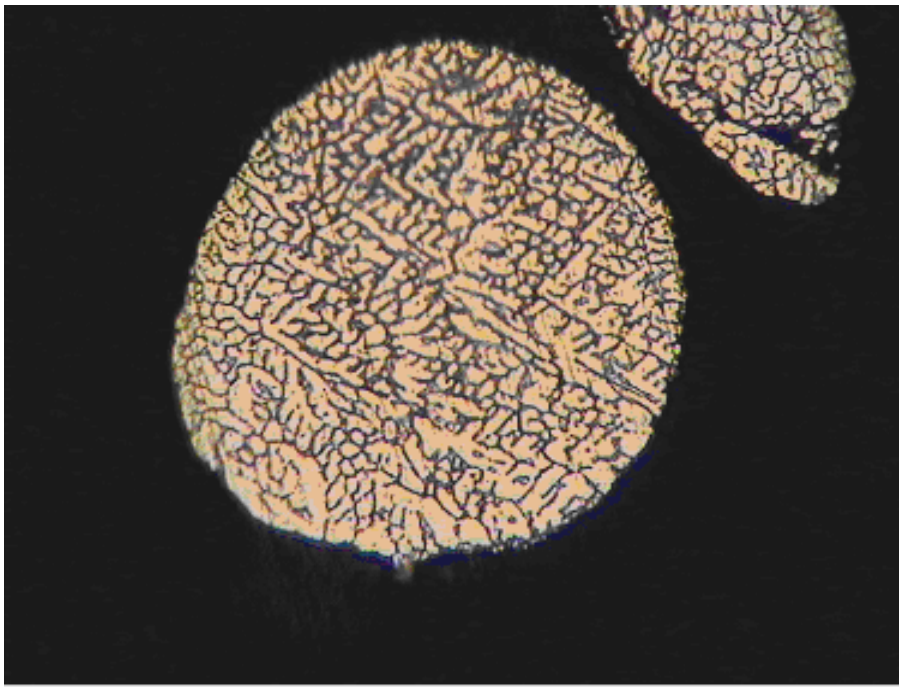
Tozların tane şekli, toz parçacıklarının soğuma zamanına bağlıdır. Yüksek metal sıcaklığı, pülverize edilmiş metal parçacıklarının damlacık oluşma aşamasını tamamlamasını sağlayarak küresel taneli tozların elde edilmesini mümkün kılacaktır. Hızlı soğutma ise, ergimiş metal parçacıklarının, damlacık oluşum aşamalarını tamamlayamadan katılaşacağından karmaşık şekilli tozlar elde edilir [52]. Diğer metal tozu üretim tekniklerine göre atomizasyon işlemlerinde tane şekli, tane büyüklüğü ve dağılımının kontrolü çok kolaydır, özellikle alaşım tozlarının tamamı atomizasyonla üretilir. Çünkü iyi homojenlik sağlanmış olur. Kullanılan atomizasyon yöntemine göre tanecik şekli, büyüklüğü ve dağılımı da farklılıklar gösterir. Öztürk ve arkadaşları [53], aynı AA 2014 aluminyum alaşımı için benzer şekildeki su soğutmalı döner disk atomizasyonu nu kullanmışlardır. Üretmiş oldukları toz şekillerini yapraksı, çubuksu ve düzensiz şekilli olarak sınıflandırmışlardır. Küresel toz oranının artışını, toz boyutundaki küçülmeye bağlı olarak ifade etmişlerdir. Eslamian ve arkadaşları [54] ise, farklı bir aluminyum alaşımı için döner disk atomizasyonu ile ilgili olarak toz şekillerinin farklılaştığını göstermişlerdir.

Tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, dendritik forumlara kadar çok farklı olabilmektedir. Aynı şekilde tozun yüzey durumu da düzgün veya gözenekli olması da yine üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Tozun ortalama boyutları, şekil ve yüzey durumu parça imali açısından önemlidir [10]. Gaz atomize tozlarının, optik mikroskop çalışması sonrasındaki görüntüleri incelendiğinde hücresel-dentritik katılaşma mikro yapısı sergilediği gözlemlenmiştir. Hücresel-dentritik katılaşmaya bağlı olarak her yönde gözlemlenen çok sayıdaki çekirdeklenmenin varlığı tespit edilmiştir (Resim 7.8, Resim 7.9). Ebeoğlu [55], yaptığı çalışmasında gaz atomize Al-Sn alaşımının mikro yapısında tozların hücresel-dentritik katılaşma sergilediği ve tozların gözeneksi yapıda olduğunu ifade etmiştir.

Toz şekil ve morfolojisi irdelendiğinde, üretmiş olduğumuz tozların gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen tozlar ile benzer karakteristik özellikler taşıdığı söylenebilir. Yine ortalama toz tane boyutu, toz tane şekli ve boyut dağılımı açısından da toz metalurjisi uygulamaları için optimum seviyede olduğu düşünülmüştür.

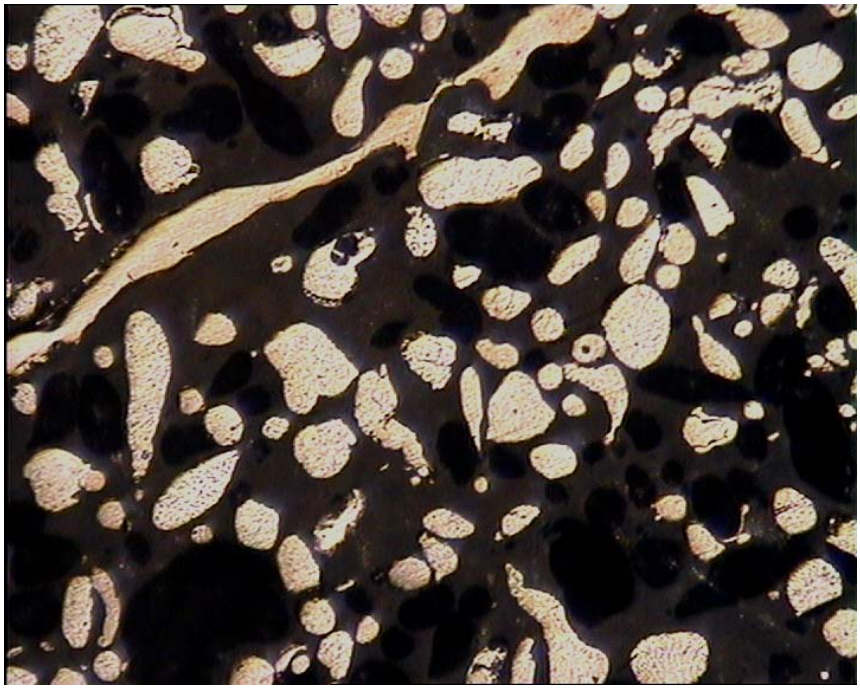


(a)

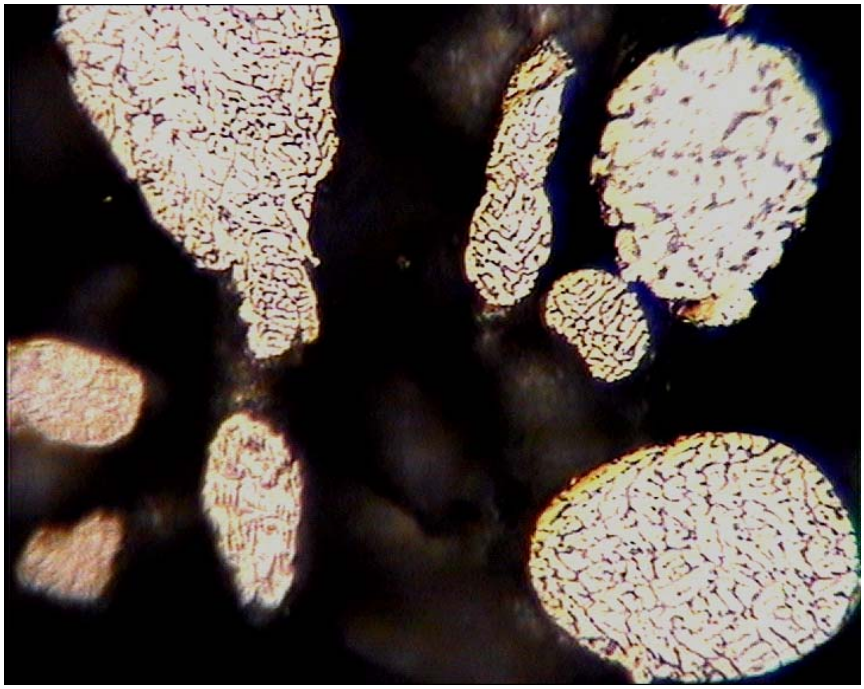


(b)

Resim 7.8. 790ºC' de üretilen gaz atomize tozların optik mikroskop görüntüleri;
a) Düşük büyütme, (105µm) b) Yüksek büyütme, (105µm)



(a)



(b)

Resim 7.9. 790ºC' de üretilen gaz atomize tozların optik mikroskop görüntüleri;
a) Düşük büyütme, (<53µm) b) Yüksek büyütme, (<53µm)

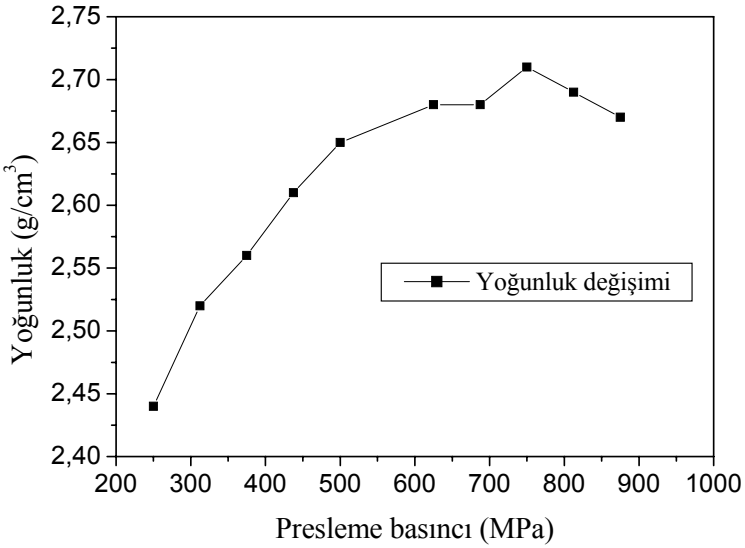
7.4. Presleme İşlemi

Presleme işlemi ve devamındaki sinterleme sürecinde malzeme özellikleri ve karakterizasyonu açısından, 790˚C'deki üretilmiş tozlardan elek analizi sonrasında son dört elek aralığındaki tozların homojen karışımı yani ortalama toz boyutu 90,66 olan karışım toz kullanılmıştır. Ortalama toz boyutu 3 veya 4 elek dağılımına sahip olan tozlar presleme de daha etkin olacaktır [56,57]. Dolayısıyla yapılan çalışmada elek dağılımının uygun olduğu belirlenmiştir. Presleme işleminde tek yönlü soğuk pres kullanılarak düşük presleme basınçlarından başlanılarak yüksek presleme basınçları test edilmek suretiyle uygun presleme basıncı belirlenmiştir (Çizelge 7.1).

Çizelge 7.1. Farklı presleme basınçlarındaki yoğunluk değişimi

Numune Kodu	Presleme Basıncı (MPa)	Yoğunluk (g/cm3)
Numune 1	250	2,44
Numune 2	312,5	2,52
Numune 3	375	2,56
Numune 4	437,5	2,61
Numune 5	500	2,65
Numune 6	625	2,68
Numune 7	687,5	2,68
Numune 8	750	2,71
Numune 9	812,5	2,69
Numune 10	875	2,67

Çizelge 7.1' de görüldüğü gibi artan presleme basıncı ile birlikte yoğunluk değerinde de bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. 625 MPa presleme basıncından sonra tozların yoğunluğunda önemli bir değişim meydana gelmediği tespit edilmiştir. Bundan sonra 875 MPa presleme basıncının üzerine daha fazla çıkılmasının gerekli olmadığı uygun görülmüştür. Saf haldeki külçe Alüminyum' un yoğunluğu 2,70 g/cm^3 olarak bilinmektedir. Bu değer göz önünde bulundurularak yoğunluk hesaplamalarında teorik yoğunluk olarak ele alınmıştır.



Şekil 7.3. Presleme basıncının yoğunluk üzerine etkileri

Presleme basıncının yoğunluk üzerindeki meydana getirdiği değişim daha güzel anlaşılmaktadır (Şekil 7.3). Eğri üzerinden de görüldüğü gibi presleme basıncının yoğunluk değeri üzerinde önemli bir değişim meydana getirmediği, uygun presleme basıncı olarak 650 MPa presleme basıncı kabul edilmiştir. Düşük presleme basınçlarında numune yüzeylerinden dökülmeler ve çatlak oluşumları meydana gelmiştir. Ayrıca presleme işlemi ile birlikte gözeneklerde tamamıyla kapanmadığından yapı içerisinde belirli bir boşluk yüzdesi oluşumu kaçınılmaz bir gerçektir. Bu boşlukların varlığı sebebiyle presleme sonrası sinterleme sıcaklık ve sürelerine bağlı olarak gözenek-yapı etkileşimiyle sinterleme başlangıç ve bitiş aralıkları tespit edilebilmiştir.

650 MPa uygun presleme basıncı belirlendikten sonra, bu basınç değeri altında deney numuneleri üretilmiştir. Durmuş ve Meriç [58], benzer şekilde AA 2014 toz malzemesi için yapmış oldukları çalışmada 600MPa presleme basıncı kullanmışlardır. Daha sonra bu deney numuneleri kullanılarak optimum sinterleme sıcaklık ve süreleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

7.5. Sinterleme İşlemi

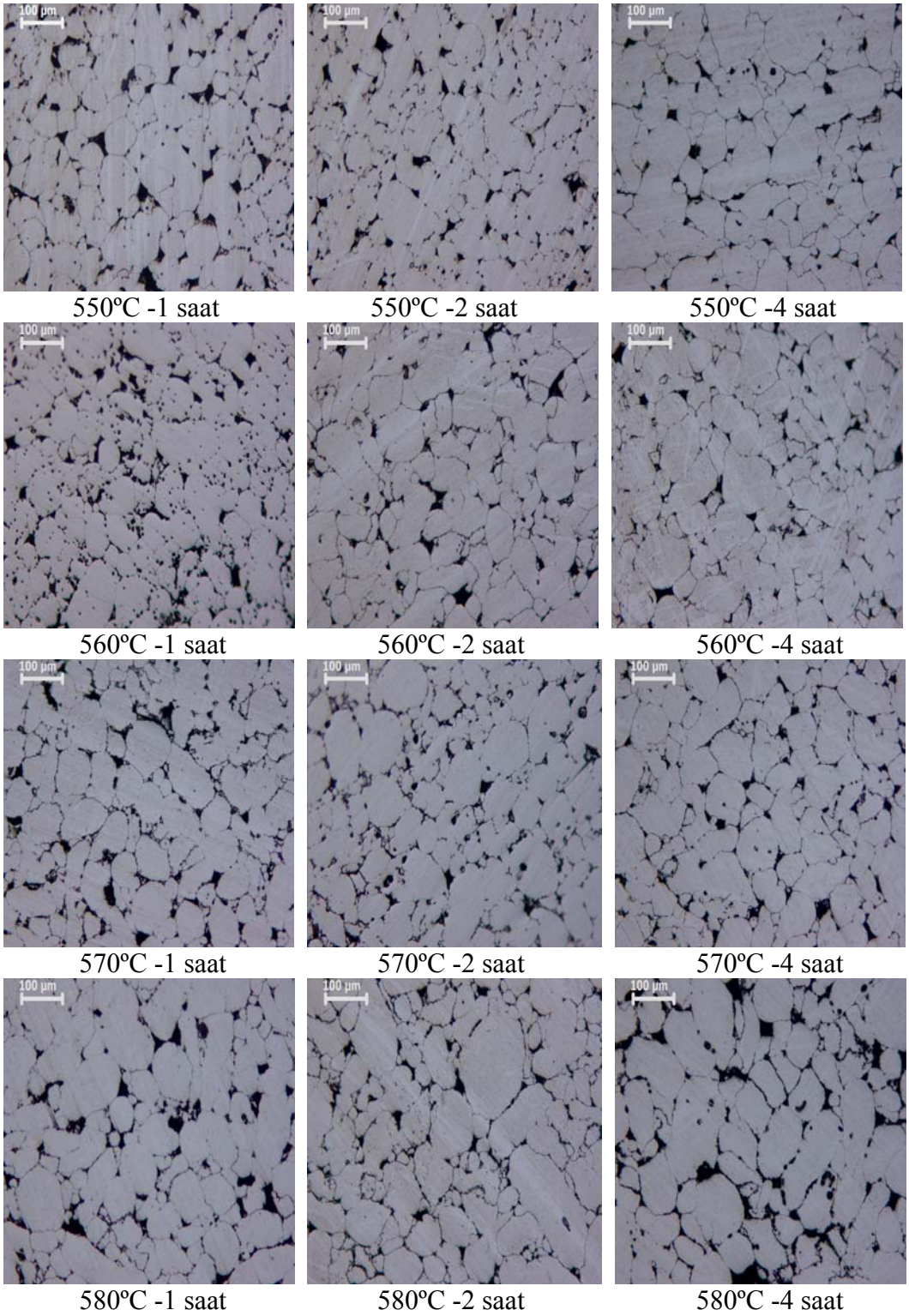
Ortalama toz boyutu 90,66 μm olan karışım tozları 650 MPa presleme basıncı altında tek yönlü soğuk preste preslenerek standart deney numuneleri üretilmiştir. Standart deney numuneleri atmosfer kontrollü fırında 550-560-570-580-590-600-610-620ºC sıcaklıklarda 1-2-4 saat süreyle sinterlenmiştir. Bu şekildeki farklı sinterleme sıcaklıkları ve süreleri denenmek suretiyle tane yapısı ve gözenek oluşumuna etkileri tespit edilerek, sertlik değeri üzerinde nasıl bir değişim meydana getirdiği araştırılmıştır. Sinterleme işleminde tozların preslenebilirliği oldukça önemlidir. Tozların temas yüzeyleri arttığında uygulanan sinterleme sıcaklığı ve süresinde değişim meydana geldiği aynı zamanda yoğunluk değerlerinde de değişiklikler oluşturabilmektedir. Bu bağlamda tozların preslenmesinde uygun presleme basınıcının tespit edilerek sürecin devamı açısından belirlenen presleme basıncı üzerinde devam ettirilmelidir.

Aluminyum tozlarının sinterlenmesinde en büyük engellerden bir tanesi oksit tabakasının tane sınırı ve tane sınırına yakın yerlerde bulunmasıdır. Bu oksit oluşumunun varlığı sebebiyle gerek sinterleme sürecinde gerekse mekanik özellikler açısından önemlidir. Dolayısıyla oksit oluşumunu en aza indirgemek için sinterleme atmosfer kontrollü tüp fırın içerisinde yapılmıştır. Tane üzerinde bulunan oksit film tabakası özellikle mikro yapı incelemelerinde tane sınırlarında birikerek mekanik özelliklerin düşmesine sebep olacaktır. Bu oksit tabakasının varlığı EDS analizleri ile araştırılmıştır.

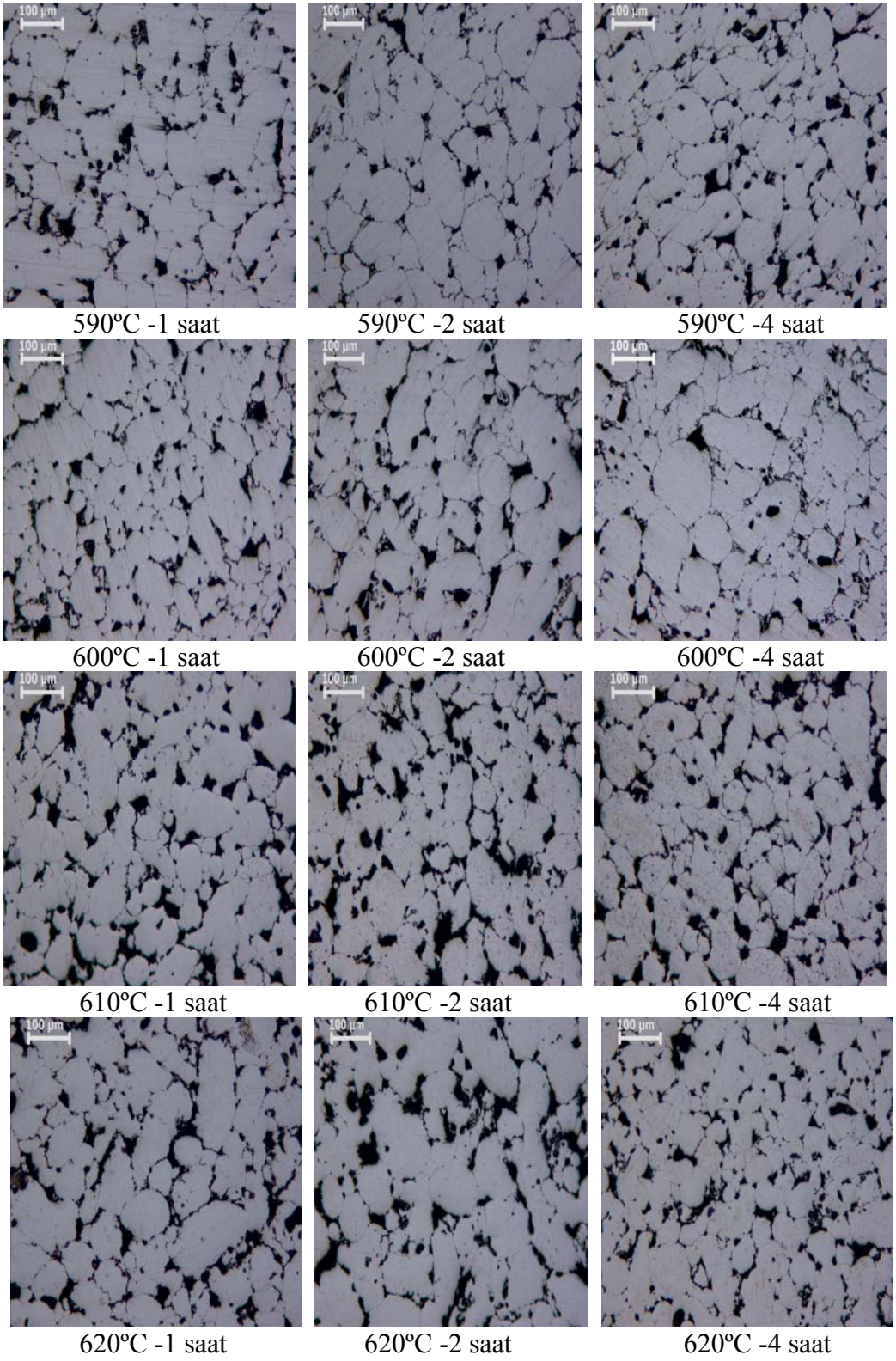
Yapılan sinterleme çalışmalarında sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluklar belirlenerek, aynı zamanda gözenek oluşumları da dikkate alınarak uygun sinterleme işlemi araştırılmıştır. Sinterleme sonrasında teorik yoğunluğun %97 civarına kadar ulaştığı gözlemlenmiştir (Çizelge 7.2). Sinterleme sonrasında numunelerin boyutlarında gözle görülür derecede bir artış meydana gelmiştir. Daha uzun süredeki sinterleme sürelerinde gözeneklilik giderek azalmıştır. Sinterleme süresi arttıkça küçük boyuttaki gözenekler tanelerin birleşmesi ile giderek azalmıştır (Resim 7.10, 7.11, 7.12, 7.13).

Sinterleme süresinin artışıyla birlikte bütün sıcaklıklarda gözeneklilik oluşumu sayısal olarak azaldığı gözlemlenirken, sinterleme sıcaklığı artışıyla birlikte bu oluşum söz konusu olmamıştır. Dolayısıyla sinterleme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak ciddi bir şekilde göze çarpan gözenekliliğinde artışı gerçekleşmiştir. Resim 7.10 ve Resim 7.11' de görüldüğü gibi 570ºC sıcaklıktan sonraki sinterleme sıcaklıklarında daha çok gözenek oluşumu tespit edilmiştir.

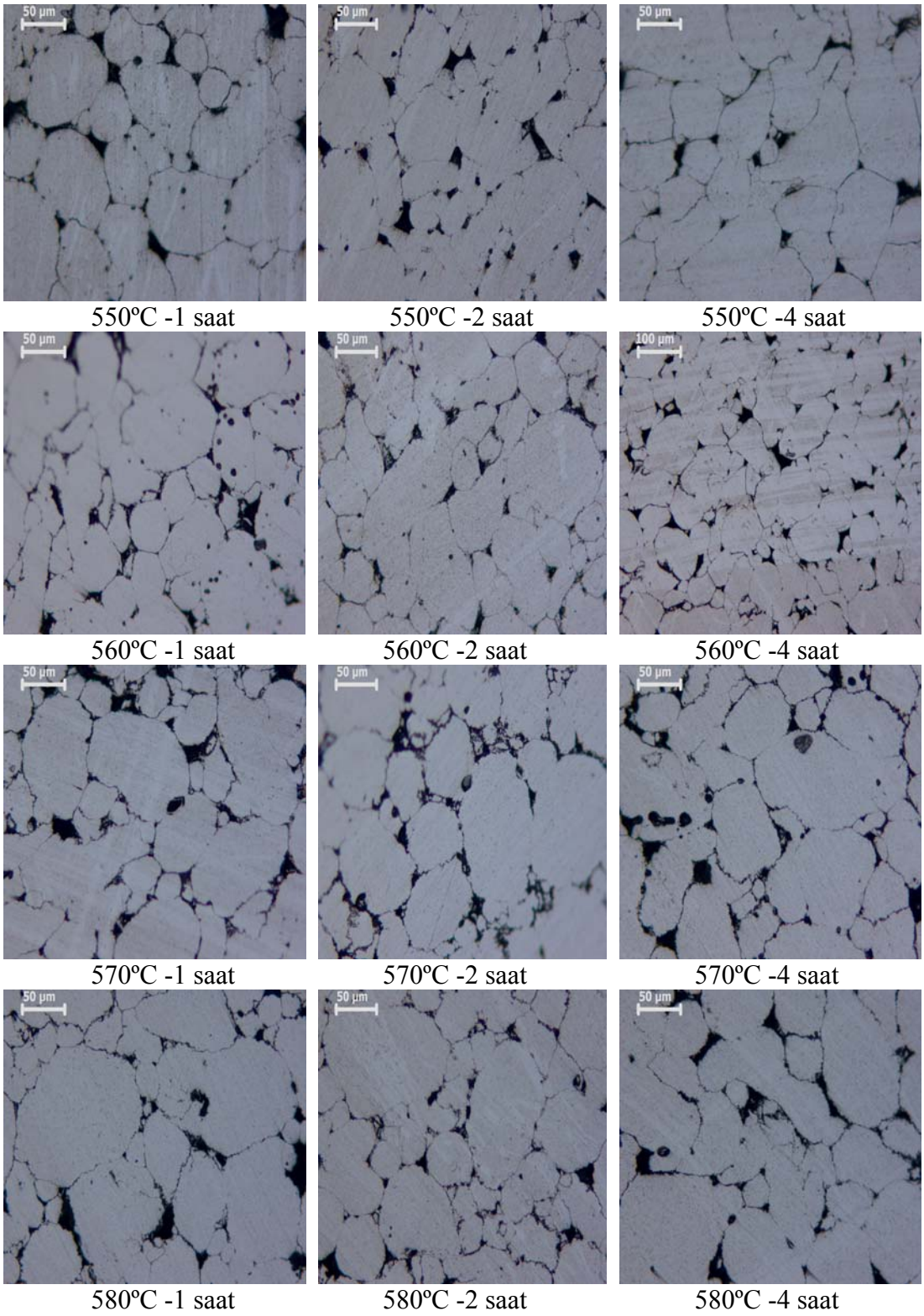
Yapılan incelemeler neticesinde gözeneklerin çoğunluğunun tane sınırlarında nadiren de olsa tane içlerinde olduğuna rastlanmıştır. Sinterleme süresinin artışıyla birlikte tane sınırı ve içlerindeki gözeneklerin birleşerek tane sınırlarına doğru yönlendiği gözlemlenmiştir. Bu durum en iyi şekilde 550ºC ve 4 saat sinterleme süresi ile sağlanmıştır (Resim 7.10). Resim 7.10 incelendiğinde 550-560-570-580ºC sinterleme sıcaklıklarında 1 saatlik sinterleme süresi sonunda gözeneklerin düzensiz şekilli ve çok sayıda olduğu görülmüştür. 2 saatlik sinterleme sürelerinde yapıda biraz toparlanma olduğu, gözenek sayısındaki azalma, gözeneklerin küreselleşmeye başladığı yalnız halen dışarı açık olarak bulunabildiği ve tane sınırlarının belirginleşmeye başladığı görülmüştür. 4 saatlik sinterleme süresi sonunda ise, tane sınırları artık iyice belirginleşmiştir, gözenekler ilk durumu göre belirgin bir derecede azalmıştır ve sinterleme teorisinde olduğu gibi gözenekler kapalı ve küresel şeklini almıştır. Bu durum özellikle Resim 7.10'da 550ºC' deki 4 saatlik sinterleme süresi sonrasında açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Resim 7.11 incelendiğinde sinterleme sıcaklığının 590ºC gibi bir sıcaklık ve üzerinde olması durumu gözenek-yapı etkileşimi açısından düzensiz bir yapı ihtiva etmektedir. Çok sayıdaki ve düzensiz şekilli gözenek oluşumu tespit edilmiştir. Resim 7.11' de 600ºC' deki 4 saatlik sinterleme süresi sonrasında bu durumun biraz farlılık gösterdiğini söyleyebiliriz. Bu sıcaklık aralığında ki gözeneklilik diğer sıcaklıklara nazaran oldukça azdır. Tane sınırları ve tane içindeki gözeneklerin varlığı gösterilmiştir. Daha yüksek büyütmelerde sinterleme süresinin ve sıcaklık farkının tane oluşumları üzerine etkileri daha iyi anlaşılmaktadır (Resim 7.12, Resim 7.13). Benzer şekilde 4 saatlik sinterleme süresi sonrasında sinterleme pratiği incelenirse, 550ºC' de gözeneklerin tane sınırlarında, kapalı ve küresel şekline yakın olduğu SEM görüntüsü ile de ayrıca desteklenmiştir (Resim 7.14, 550ºC, 4saat).



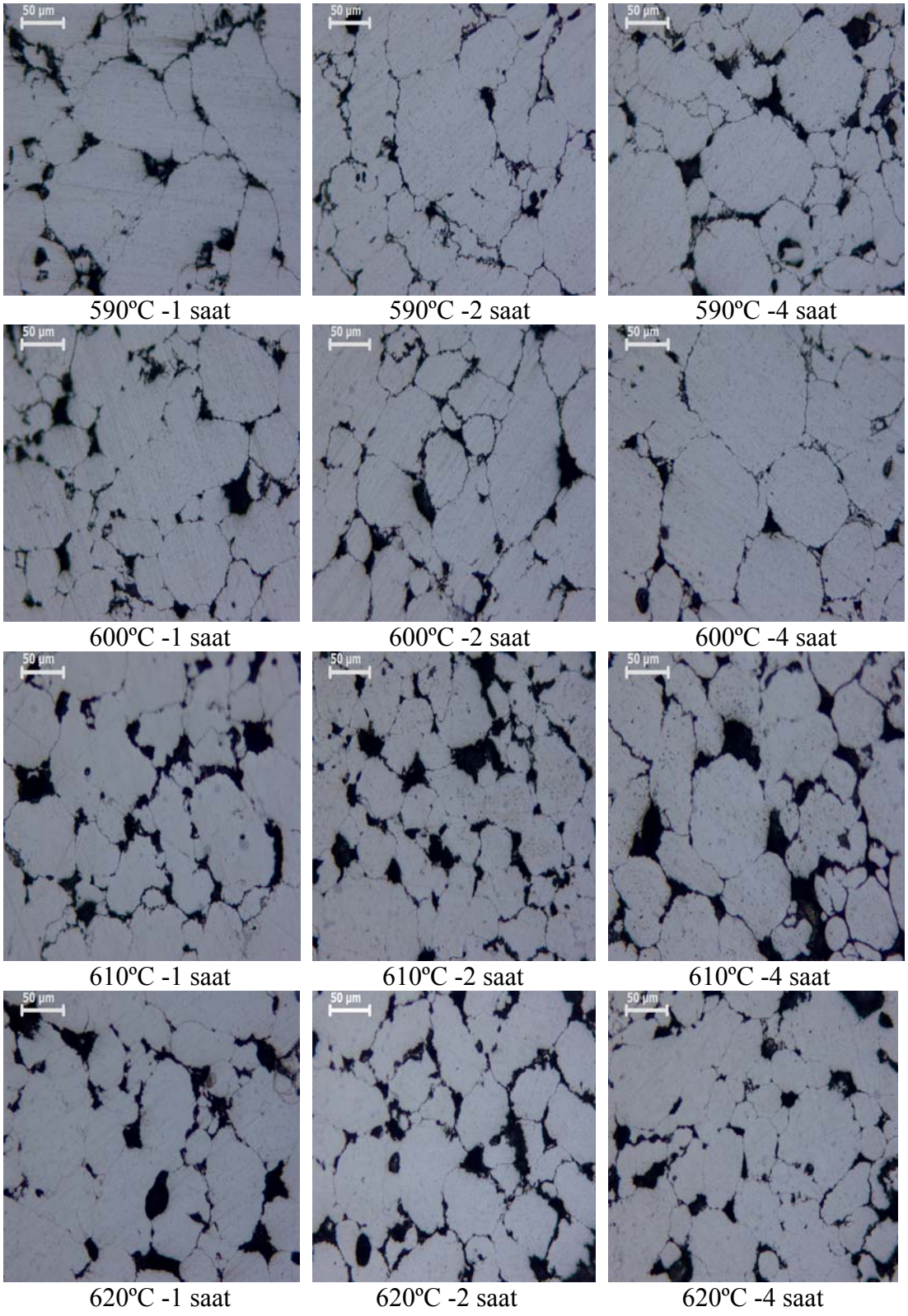
Resim 7.10. 550ºC,560ºC,570ºC,580ºC sıcaklıklarda 1-2-4 saat sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri



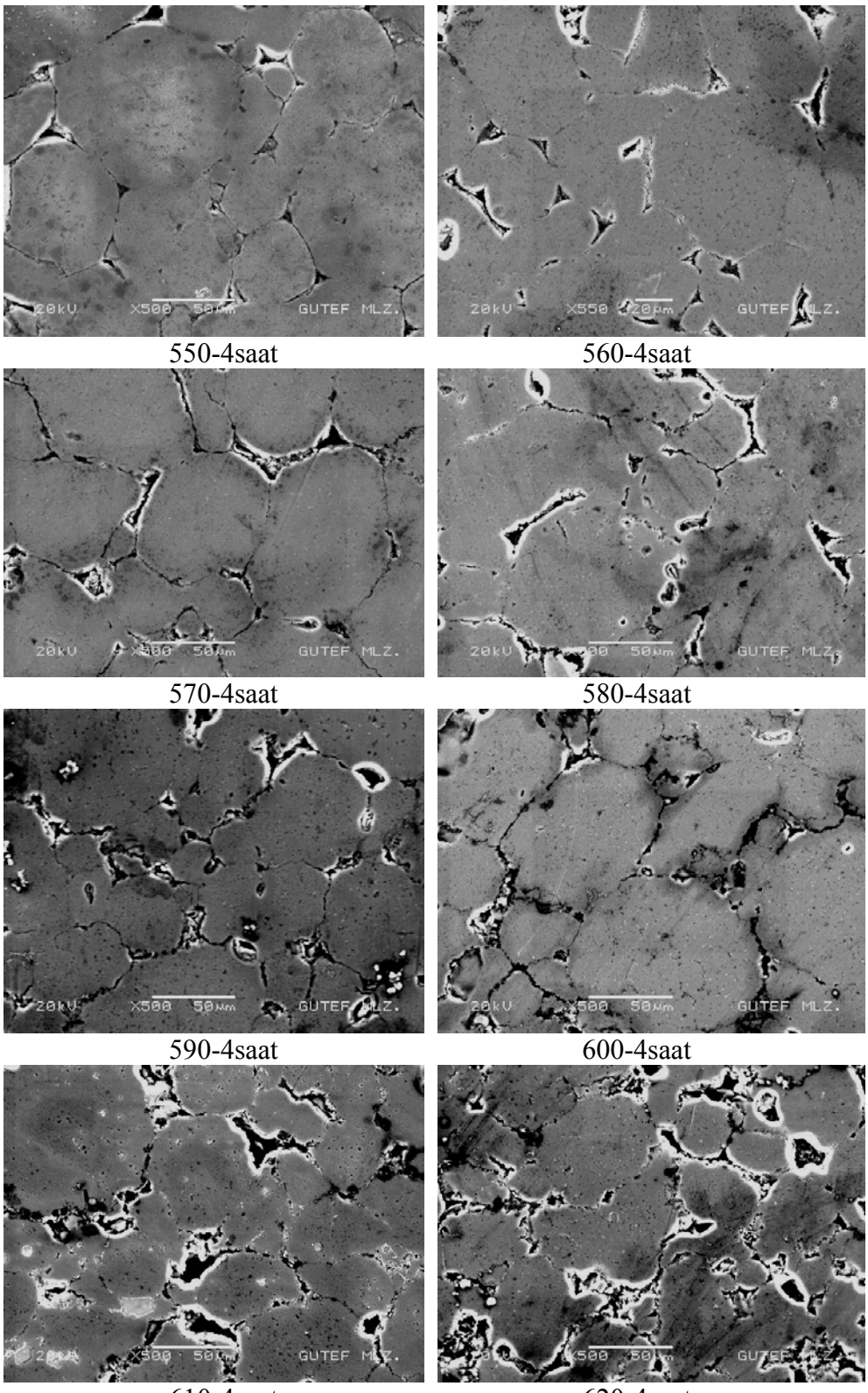
Resim 7.11. 590ºC,600ºC,610ºC,620ºC sıcaklıklarda 1-2-4 saat sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri



Resim 7.12. 550ºC,560ºC,570ºC,580ºC sıcaklıklarda 1-2-4 saat sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri



Resim 7.13. 590ºC,600ºC,610ºC,620ºC sıcaklıklarda 1-2-4 saat sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri



Resim 7.14. 550ºC,560ºC,570ºC,580ºC, 590ºC,600ºC,610ºC,620ºC sıcaklıklarda 4 saat sinterlenmiş numunelerin SEM görüntüleri

7.6. EDS Analizi Sonuçları

Yapılan deneysel çalışmalarda taramalı elektron mikroskobu ile düşük ve yüksek büyütmelerde çekilmiş olan mikro yapı görüntüleri üzerinden EDS analizleri yapılmıştır. EDS analizleri, 790ºC' de üretilmiş tozlar üzerinden toz tanelerinin genel yapısı ve katılaşma tavırlarına bağlı olarak fazların oranlarının nasıl değiştiğinin incelenmesi için yüksek büyütmelerde yapılırken, daha düşük büyütmelerde sinterleme sonrasındaki yapıdaki oluşan fazların oranları ve dağılımı hakkında bilgi sahibi olunması için gerçekleştirilmiştir.

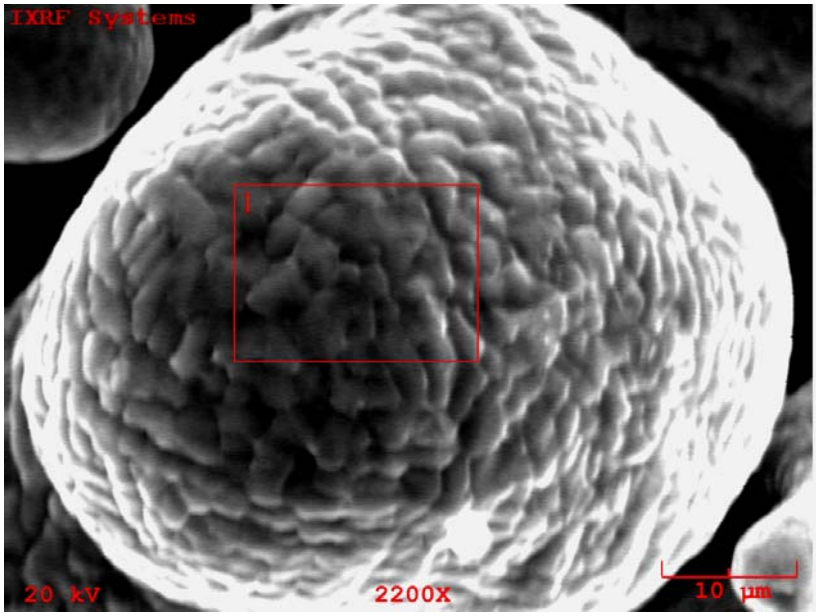
Yapılan çalışmada aluminyum-bakır alaşımının kullanılması sebebiyle EDS incelemelerinde öncelikli olarak Al, Cu ve yapı üzerinde etkili olabileceği düşünülen O fazının varlığı araştırılmıştır. Bu sebeple mikro yapı görüntüsü üzerinde farklılıklar gösteren bölgeler belirlenerek, EDS analizlerinin geneli itibariyle bu bölgelerden alınması uygun görülmüştür.

Öncelikli olarak 790ºC' de üretilmiş ortalama toz boyutu 90,66µm olan gaz atomize tozların EDS analizleri ele alınmıştır. Gaz atomize tozun SEM görüntüsü üzerindeki yapılan bölgesel ve genel analizi gösterilmiştir (Resim 7.15). Resim 7.15' deki yapılan incelemeler sonrasında, toz tane şeklinin homojen eşeksenli bir yapı oluşturduğu durumlarda, alaşım içerisindeki bulunması gereken Cu değerine yakın bir değer olan 4,50 gibi bir bakır yüzdesi çıkmış olması, yapılan bölgesel analiz sonrasında bakırın toz taneleri içerisinde ki homojen bir dağılım gösterdiğinin kanıtı olarak düşünülmüştür (Şekil 7.4).

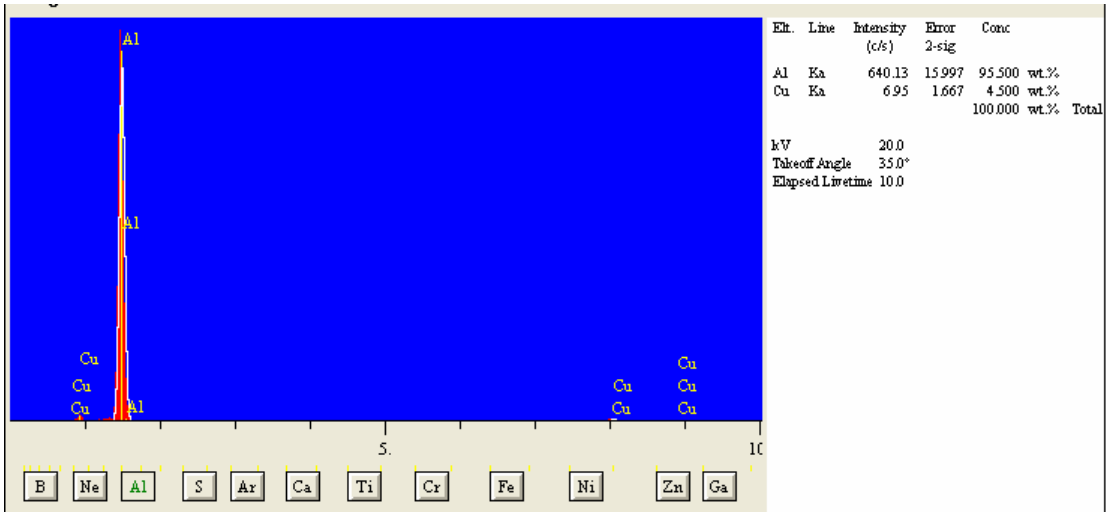
Resim 7.15 SEM görüntüsü üzerinden yapılan diğer EDS analizi olarak, gaz atomize tozların geneli itibariyle alaşım içerisindeki elementlerin oranlarına bağlı kalarak Al' un ana matris ve Cu' unda olması gereken değerde bulunduğu genel EDS analizi ile tespit edilmiştir. Bu durum göstermiştirki sıvı madenin ergimiş halden atomizasyon sırasında toza dönüşmesi kimyasal yönden homojen olarak gerçekleşmiştir.

Mikro yapı içerisinde toz tane şekil oluşumuna bağlı olarak küresel toz tanelerinin yanı sıra gözyaşı damlası ve çubuksu şeklinde ki yönlenmiş tanelerin oluşumu da gösterilmiştir (Resim 7.16).

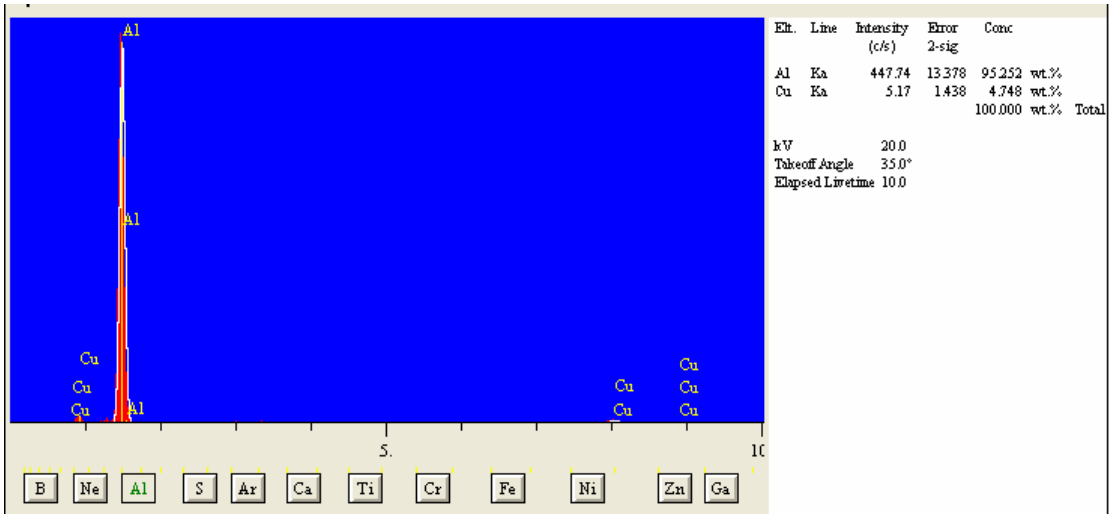
Resim 7.16' daki SEM görüntüsü üzerinden yapılan incelemelerde katılaşma şekli ve yönüne bağlı olarak oluşan toz tane şekli üzerinden üç farklı bölge analizi yapılarak katılaşma formu açısından Cu oranlarındaki farklılıklar gözlemlenmiştir. Yapılan birinci noktanın analizinde Cu miktarının 2,989 gibi düşük bir oranda çıktığı görülmüştür (Şekil 7.6). İkinci noktanın analizinde ise Cu miktarının 4,362 gibi Cu' ın yapı içerisinde olması gereken aralıkta bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.7). SEM görüntüsü üzerindeki yapılan üçüncü analizde ise Cu miktarının 3,808 gibi bir yüzde oranına sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 7.8). Bu durumla ilgili olarak katılaşma hızının bir etkisi olduğu düşünülmüştür. Katılaşma sırasında tozlar yüzey enerjilerini gidermek amaçlı, en kolay yüzey enerji dağıtımı olan küresel şeklini almaya çalışırlar. Bu esnada yüksek hızla katılaşma ile birlikte en dış noktadan iç noktaya doğru bir dağılımı farklılığı meydana gelmektedir. Benzer şekilde konsantrasyon farklılığından kaynaklanan Cu'ın dağılımında farklılık olduğu gözlemlenmiştir.



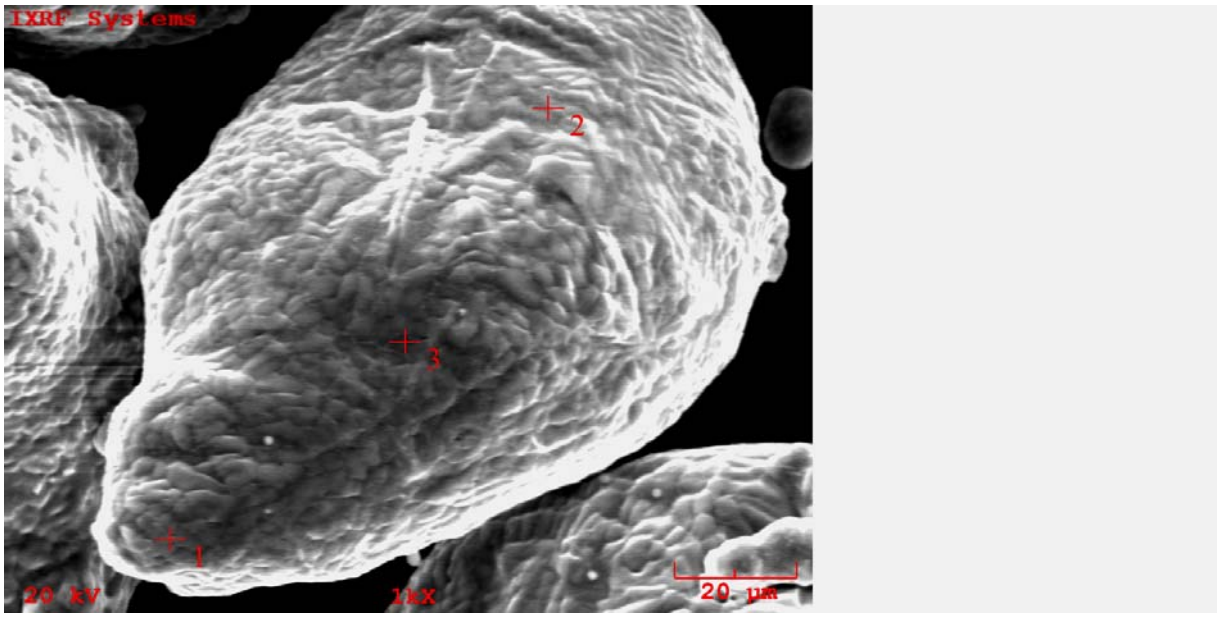
Resim 7.15. 790 ºC' de üretilen ortalama toz boyutu 90,66 olan gaz atomize tozun EDS için SEM görüntüsü



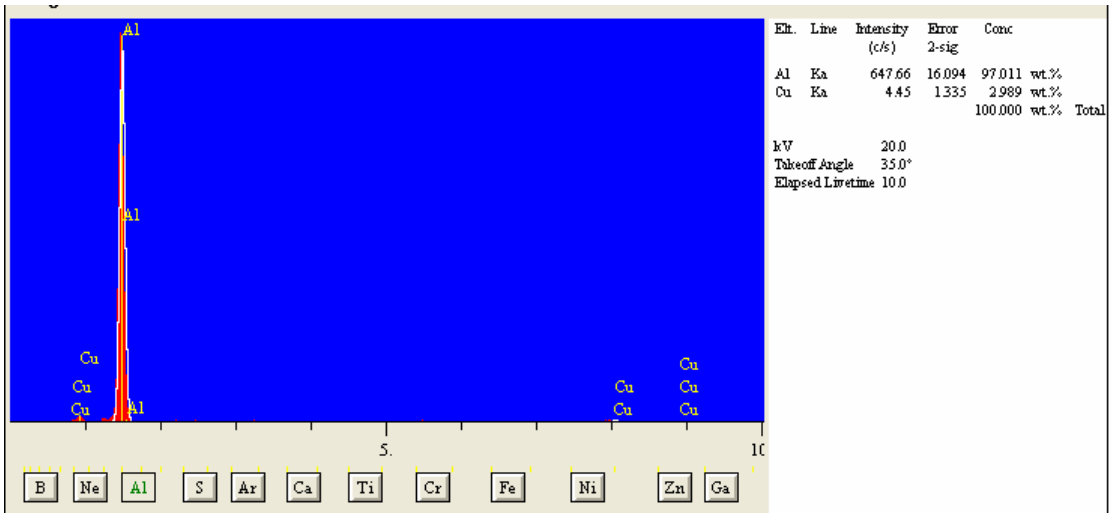
Şekil 7.4. Resim 7.15' deki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi



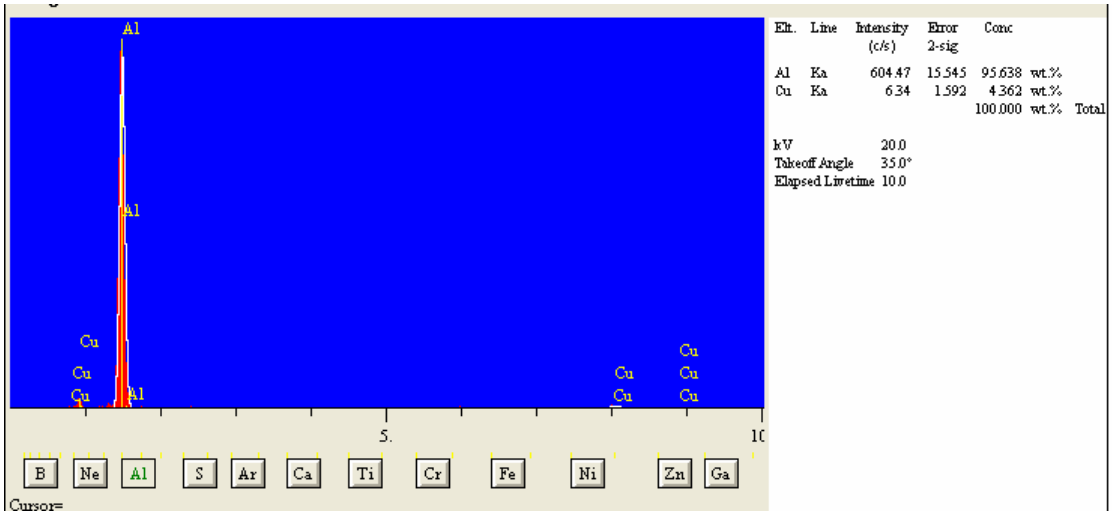
Şekil 7.5. Resim 7.15 genel EDS analizi



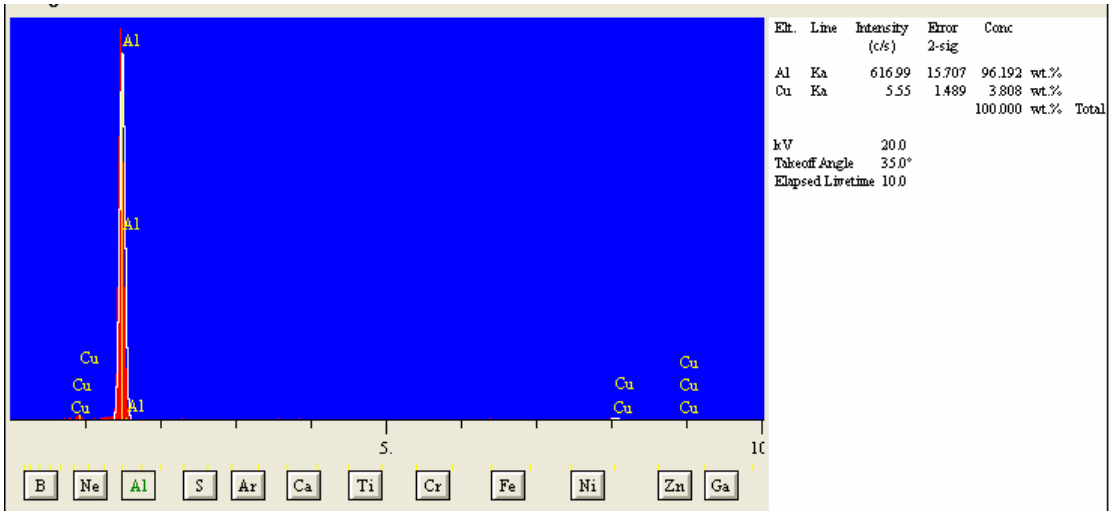
Resim 7.16. 790 ºC' de üretilen ortalama toz boyutu 90,66 olan gaz atomize tozun EDS için SEM görüntüsü



Şekil 7.6. Resim 7.16' daki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi



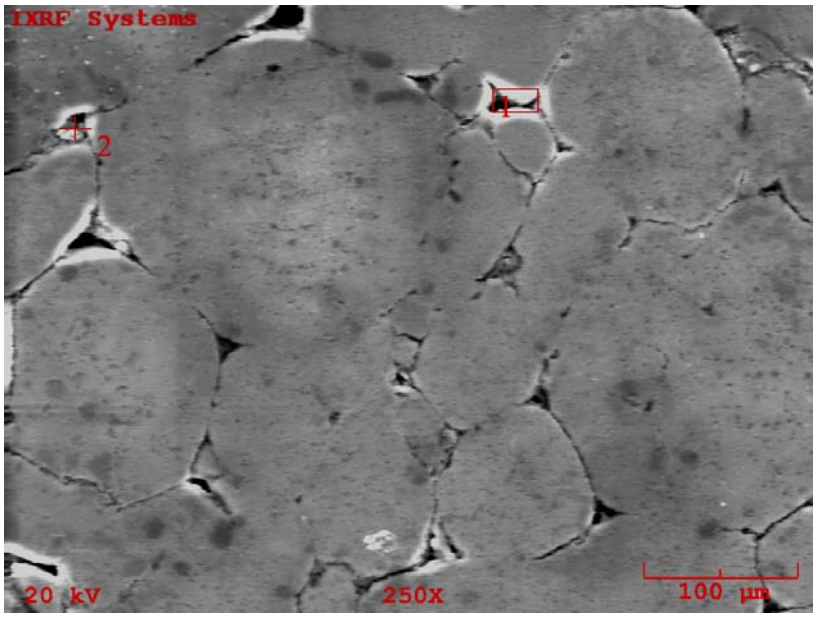
Şekil 7.7. Resim 7.16' daki 2 nolu bölgeye ait EDS analizi



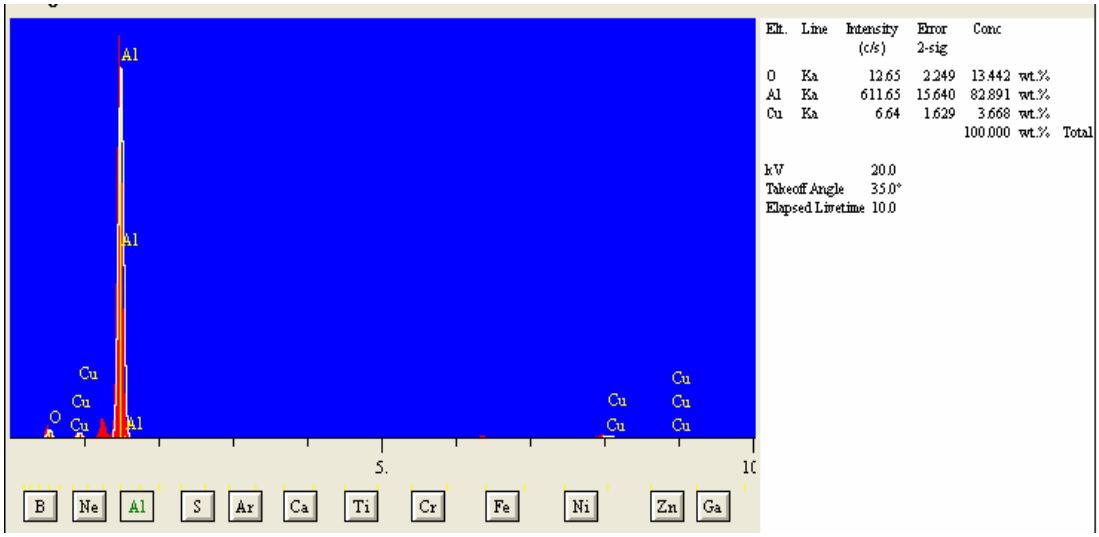
Şekil 7.8. Resim 7.16' daki 3 nolu bölgeye ait EDS analizi

Çalışmanın devamında toz üretimi süreci ve sonrasındaki presleme işlemi, sinterleme sıcaklıkları ve sürelerine bağlı olarak oluşan fazların dağılımı ve oranlarının belirlenebilmesi için SEM görüntüsü üzerinden yapılan EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlem yapı üzerindeki farklıkların oluştuğu bölgeler üzerinden yapılmıştır. Sinterleme sıcaklık ve süresi açısından ise sinterleme ile en uygun gözenek şekli ve dağılımı, tanelerin şekli ve dağılımı, gözenek-yapı etkileşimi oluşumunun sağlandığı, 4 saat gibi bir sinterleme süresi baz alınarak, yapılan çalışmadaki en düşük ve en yüksek sinterleme sıcaklıkları ile mukayese yapılmıştır (Resim 7.14). Resim 7.17' deki 550ºC' de 4 saat sinterlenmiş numunenin SEM görüntüsü üzerinden iki farklı bölgede EDS analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerde Al, Cu ve O gibi belirli elementlerin oranlarının üzerinde yoğunlaşılmıştır. Yapılan birinci analiz sonrasında tane sınırı ve tane sınırlarına yakın bölgelerde O'in varlığı tespit edilmiştir (Şekil 7.9). O'in sinterleme öncesinde toz üretiminde yeterli olarak inert bir ortamın sağlanamayışından dolayı az miktarlarda da olsa tozların yüzeyinde bulunabilme ihtimali açısından oksit tabakasının sinterleme sonrasında da preslemeye bağlı olarak tane sınırlarında belirgin bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. İkinci yapılan analiz ile de birlikte tane sınırındaki oksitin varlığı gösterilmiştir (Şekil 7.10).

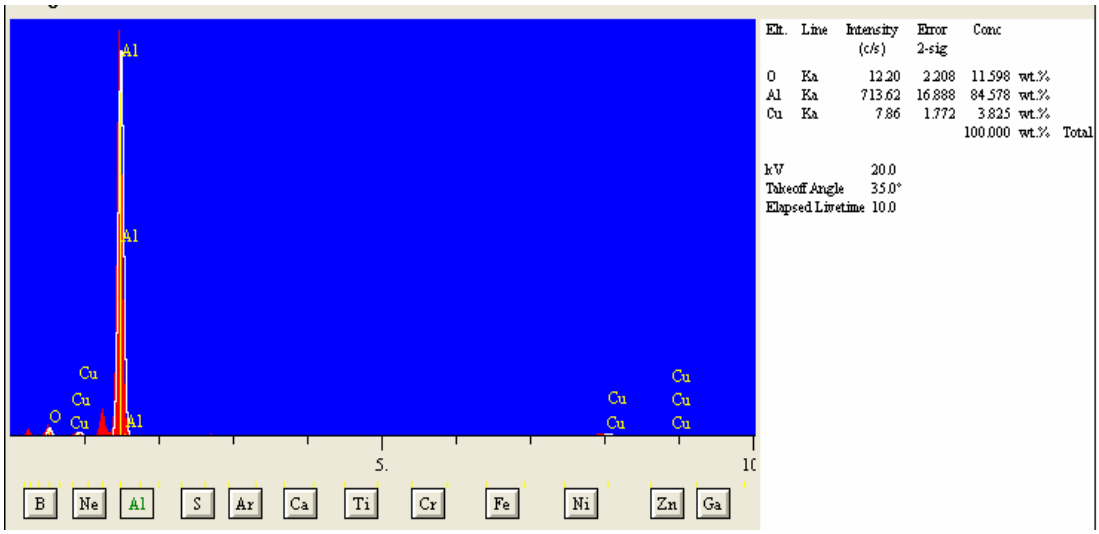
Resim 7.18' deki 620ºC' de 4 saat sinterlenmiş numunenin ise dört farklı bölgesinden ve genel EDS analizleri alınmıştır. Yapmış olduğumuz EDS analizlerine bağlı olarak birinci (Şekil 7.11), ikinci (Şekil 7.12) ve üçüncü analiz (Şekil 7.13) sonuçları irdelendiğinde özellikle tane sınırlarında farklı yüzde değerlerinde oksit fazın var olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bu bölgelerden 2 ve 3 nolu analizlerde Cu oranında diğerlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan dördüncü analizle birlikte, tane içlerinde ve tane merkezine yakın olan bölgelerde diğer analizlere nazaran daha yüksek oranda aluminyumun varlığı tespit edilmiştir (Şekil 7.14). Son olarak SEM görüntüsü üzerinden yapılan genel EDS analizi ile birlikte yapının geneli hakkında fikir sahibi olunmuştur. Al ve Cu' un yanında alaşım içerisindeki eser miktarlarda bulunan Mn ve Si' in varlığı da gösterilmiştir (Şekil 7.15).



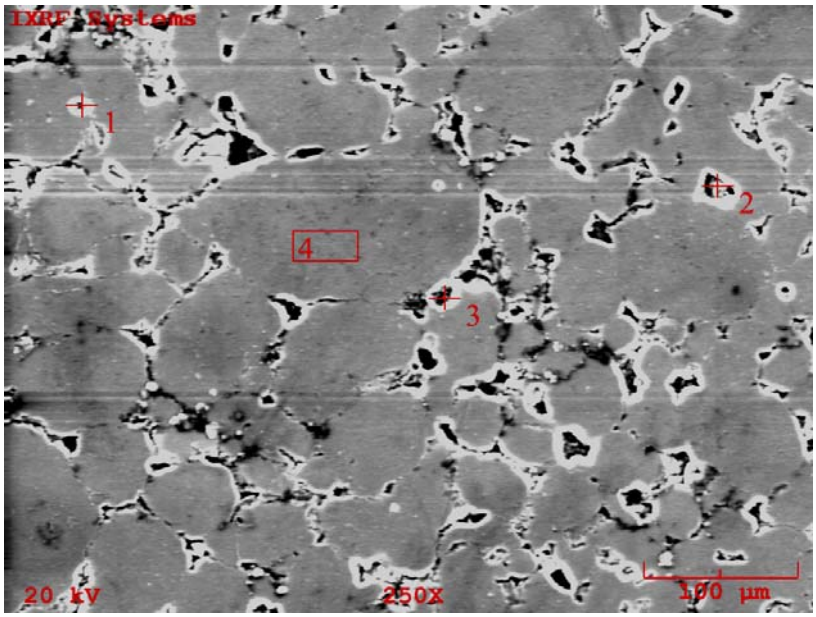
Resim 7.17. 550 ºC de 4 saat sinterlenmiş numunenin EDS için SEM görüntüsü



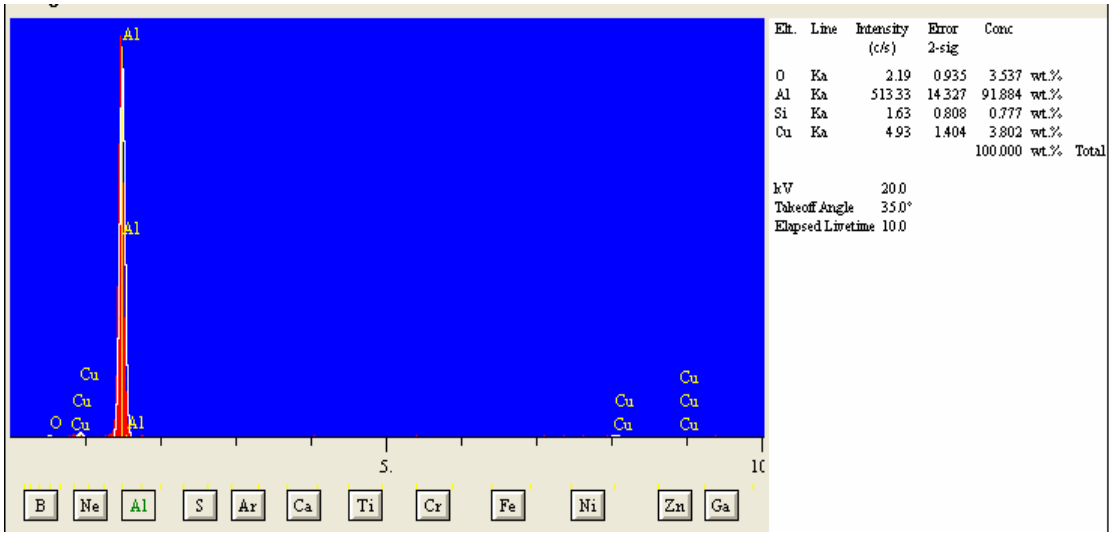
Şekil 7.9. Resim 7.17’ deki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi



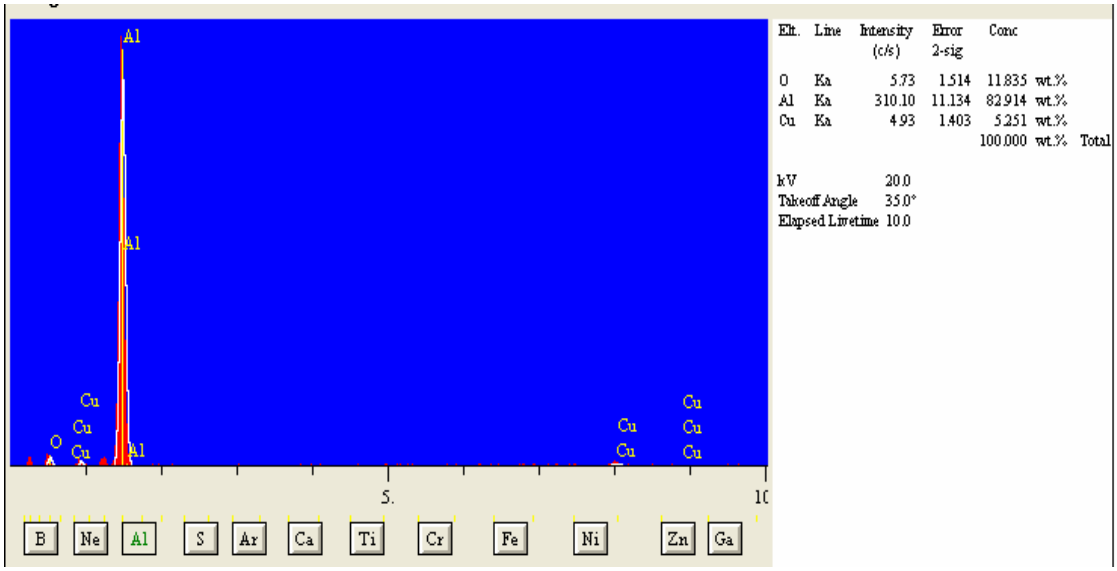
Şekil 7.10. Resim 7.17' deki 2 nolu bölgeye ait EDS analizi



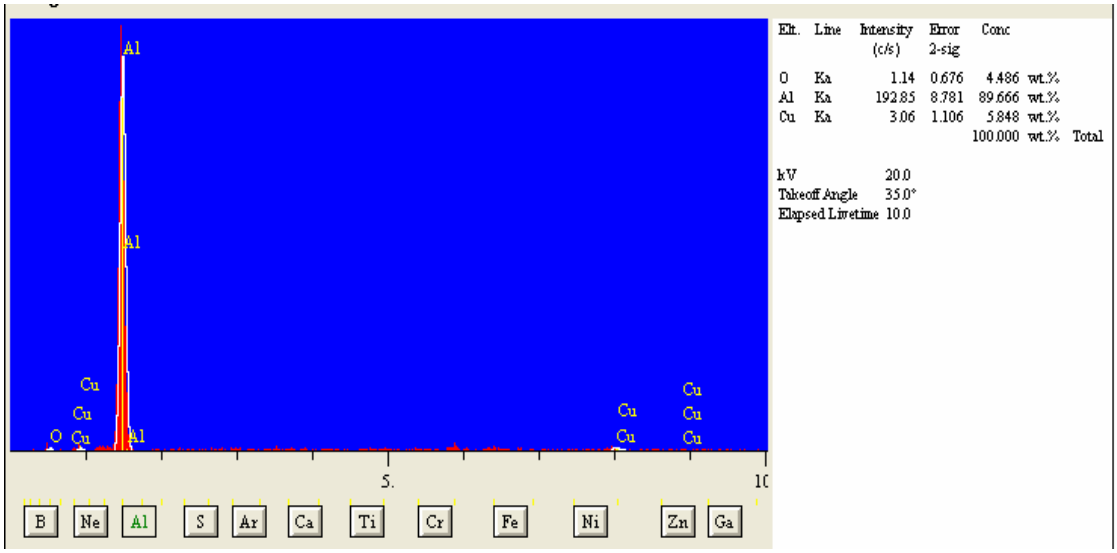
Resim 7.18. 620ºC de 4 saat sinterlenmiş numunenin EDS için SEM görüntüsü



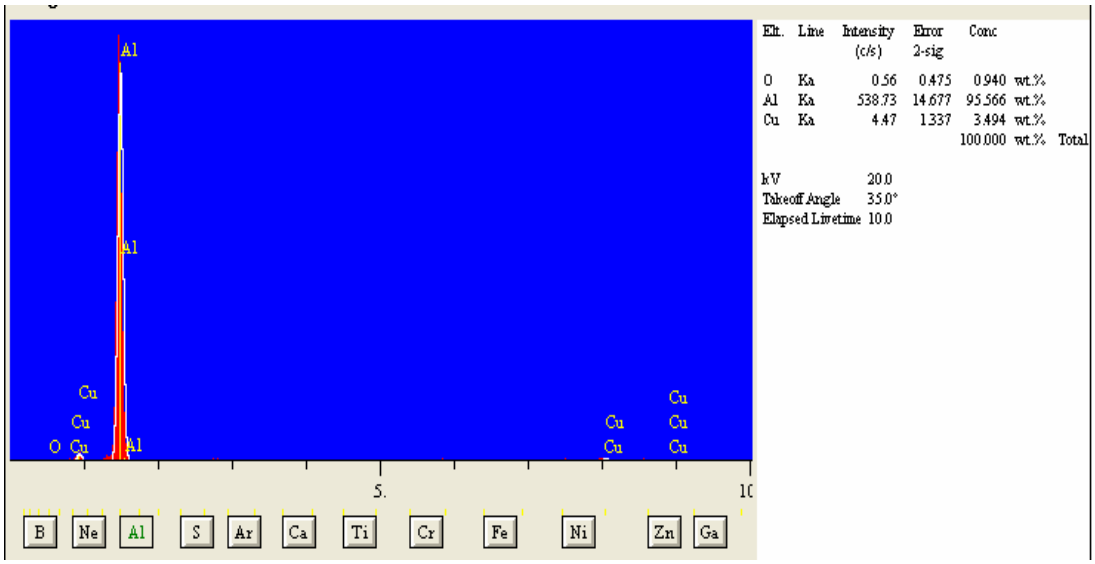
Şekil 7.11. Resim 7.18' deki 1 nolu bölgeye ait EDS analizi



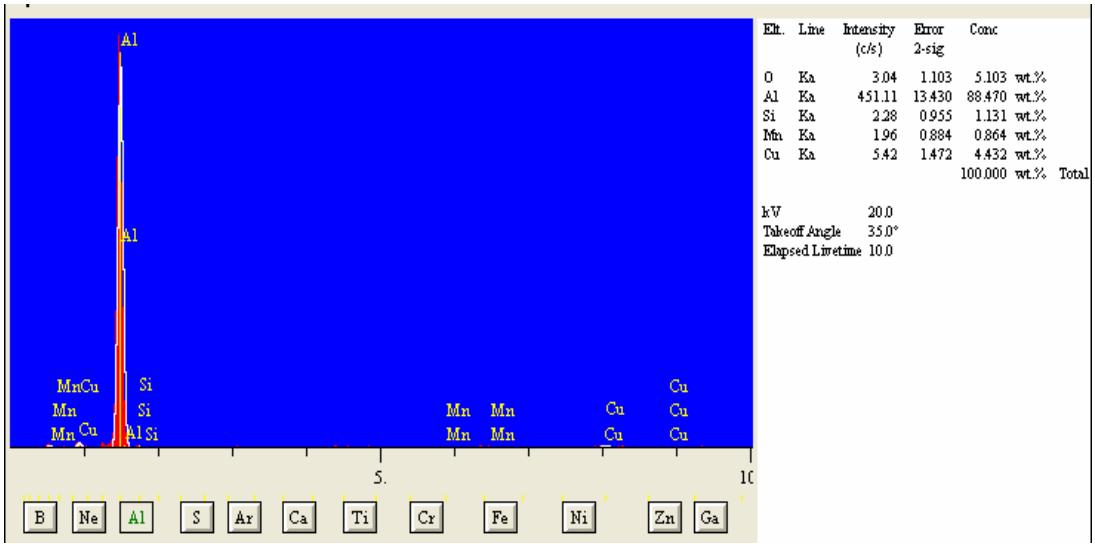
Şekil 7.12. Resim 7.18' deki 2 nolu bölgeye ait EDS analizi



Şekil 7.13. Resim 7.18’ deki 3 nolu bölgeye ait EDS analizi



Şekil 7.14**.** Resim 7.18’ deki 4 nolu bölgeye ait EDS analizi



Şekil 7.15. Resim 7.18 genel EDS analizi

7.7. Yoğunluk Sonuçları

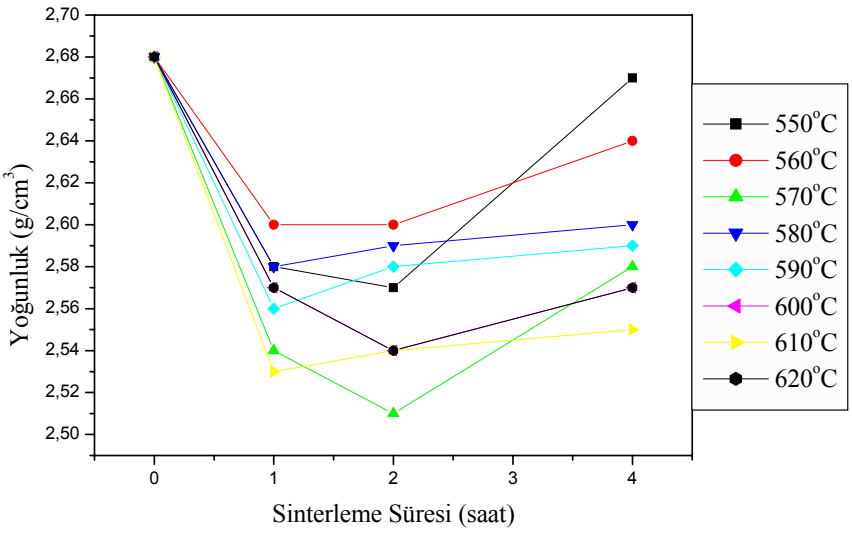
Deney numunelerinin yoğunluk ölçümleri sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimlerini belirlemek için yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri, hacim hesabı üzerinden yapılmıştır (Çizelge 7.2).

Farklı sıcaklık ve sürelerdeki yapılan sinterleme işlemi öncesi ve sonrasındaki yoğunluk sonuçları incelendiğinde yoğunluk değerlerinde bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak ise, çalışmalarımızda kullandığımız AA 2014 alaşımının içeriğinde bulunan alaşım elementlerinin bir etkisi olduğu düşünülmüştür. Eğer iki bileşenin yayınım katsayıları çok farklı ise, bileşenlerin eşit olmayan yayılma güçlerinden dolayı gözenek oluşur. Sonuç olarak, özellikle ergime noktalarının çok farklı olmaları durumunda, şişme meydana gelir. Mesela, demire alüminyum eklenmesi, alüminyumun ergimesi sonucu şişmeye neden olur [19]. Bu yoğunluk düşüşü sinterleme esnasında yapı içerisinde bulunan ve sıcaklığa bağlı olarak şişme etkisi gösteren malzemelerden kaynaklandığı düşünülmüştür. Aynı zamanda her ne kadar sinterleme işlemleri inert bir ortamda yapıldı ise de sinterleme sürelerine ve sıcaklıklarına bağlı olarak oluşan oksit tabakalarının da yoğunluğu olumsuz yönde etkilediğini söylemek yanlış olmayacaktır.

Çizelge 7.2. Sinterleme öncesi ve sonrasındaki yoğunluk değişimleri

Numune Kodu	Sinterleme Sıcaklığı (˚C)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Öncesi Yoğunluk (g/cm^3)	Sinterleme Sıcaklığı (˚C)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Sonrası Yoğunluk (g/cm^3)	Teorik Yoğunluk Yüzdesi
Num.1	550˚C	1h	d=2,67	550˚C	1h	d=2,58	93,81%
Num.2		2h	d=2,68		2h	d=2,57	93,45%
Num.3		4h	d=2,68		4h	d=2,67	97,09%
Num.4	560˚C	1h	d=2,69	560˚C	1h	d=2,60	94,54%
Num.5		2h	d=2,68		2h	d=2,60	94,54%
Num.6		4h	d=2,67		4h	d=2,64	96%
Num.7	570˚C	1h	d=2,66	570˚C	1h	d=2,54	92,36%
Num.8		2h	d=2,68		2h	d=2,51	91,27%
Num.9		4h	d=2,66		4h	d=2,58	93,81%
Num.10	580˚C	1h	d=2,69	580˚C	1h	d=2,58	93,81%
Num.11		2h	d=2,68		2h	d=2,59	94,18%
Num.12		4h	d=2,69		4h	d=2,60	94,54%
Num.13	590˚C	1h	d=2,68	590˚C	1h	d=2,56	93,09%
Num.14		2h	d=2,69		2h	d=2,58	93,81%
Num.15		4h	d=2,69		4h	d=2,59	94,18%
Num.16	600˚C	1h	d=2,68	600˚C	1h	d=2,57	93,45%
Num.17		2h	d=2,69		2h	d=2,54	92,36%
Num.18		4h	d=2,68		4h	d=2,57	93,45%
Num.19	610˚C	1h	d=2,66	610˚C	1h	d=2,53	92%
Num.20		2h	d=2,67		2h	d=2,54	92,36%
Num.21		4h	d=2,68		4h	d=2,55	92,72%
Num.22	620˚C	1h	d=2,67	620˚C	1h	d=2,57	93,45%
Num.23		2h	d=2,68		2h	d=2,54	92,36%
Num.24		4h	d=2,67		4h	d=2,57	93,45%

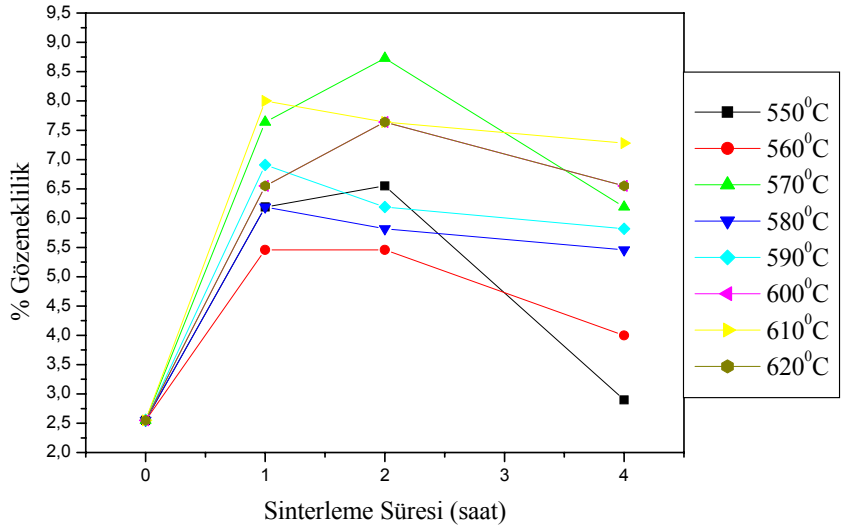
650 MPa presleme basıncı ile preslenen standart deney numunelerinin sinterleme öncesi yoğunluk değerlerinde fazla bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir ve 2,68 g/cm^3 yoğunluk değeri baz alınarak eğriler yardımıyla farklı sıcaklık ve sürelerdeki yoğunluk değişimleri gösterilmiştir (Şekil 7.16).



Şekil 7.16. Sinterleme sıcaklık ve sürelerine bağlı olarak yoğunluk değişimi

Şekil 7.16' da gözlemlendiği sinterleme sonrasındaki en yüksek yoğunluk değeri 550ºC sinterleme sıcaklığındaki 4 saatlik sinterleme süresi ile elde edilmiştir. 1saatlik sinterleme süresi ile sağlanan en yüksek yoğunluk değeri 560 ºC sinterleme sıcaklığı ile, 2 saatlik süre sonunda yine 560 ºC sinterleme sıcaklığı ile ve 4 saatlik süre sonunda ise 550 ºC sinterleme sıcaklığında sağlanmıştır (Şekil 7.16).

AA 2014 alaşımının teorik yoğunluğunun 2,70 olarak kabul edilip, yapılan hesaplamalarda teorik yoğunluk yüzdesinin, 550 ºC sinterleme sıcaklığı ve bu sıcaklıktaki 4 saatlik sinterleme süresi ile birlikte %97 mertebesine kadar tırmandığı görülmüştür (Çizelge 7.2). Malzemelerin sinterleme tavırları açısında gözenek-yapı etkileşimi oldukça önemlidir. Malzemelerde gözenek-yapı etkileşimleri göz önünde bulundurularak, sinterleme sıcaklığı, sinterleme başlangıç ve bitiş süreleri hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Yapmış olduğumuz çalışma açısından da sinterleme için uygun sıcaklık ve sürenin belirlenebilmesi için mikro yapı incelemesi ile birlikte gözenek-yapı etkileşimi hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Teorik yoğunluk hesaplandıktan sonra gözenekli malzemelerde geriye kalan yüzde miktarı gözeneklilik oranını vereceğinden, bu tez çalışmasında tam yoğunluklu malzeme üretimi açısından gözeneklilik oranı da hesaplanmıştır (Şekil 7.17).



Şekil 7.17. Sinterleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak gözeneklilik değişimi

7.8. Sertlik Sonuçları

Sertlik ölçümleri iki farklı şekilde yapılmıştır. Bunlardan birincisi 790ºC sıcaklıktaki üretimi gerçekleştirilen gaz atomize tozların, elek analizi sonrasında elde edilen son dört elek aralığının (Tava<53µm, 53 µm, 74 µm, 104 µm) sertlik ölçümleri, ve bu dört elek aralığının homojen karışımı sağlanarak oluşturulan ortalama toz boyutu 90,66 µm olan karışım toz üzerinden sertlik ölçümleri yapılarak mukayesesi yapılmıştır. İkinci sertlik ölçümü olarak ise, farklı sinterleme sıcaklık ve sürelerinin sertlik değeri üzerinde nasıl bir değişim meydana getirdiğini belirleyebilmek için yapılmıştır.

Gaz atomize tozların sertlik ölçümleri HV 0,1 kg yük altında mikro sertlik cihazı 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.

Bunun yanı sıra sinterlenmiş deney numunelerinin sertlik ölçümünde ise makro sertlik cihazı kullanılarak, HV 0,5 kg yük altında sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Makro sertlik yönteminin tercih edilmesinin sebebi ise, mikro sertlik yöntemi ile tespit edilemeyen tane ve tane sınırındaki çökeltilerin sertlik değeri üzerindeki etkilerini daha iyi bir şekilde belirleyebilmek için aynı zamanda yapının geneli hakkında fikir sahibi olabilmek için makro sertlik yöntemi tercih edilmiştir.

Gaz atomize tozların mikro sertlik değerlerinin tespit edilebilmesi için beş farklı noktasından ölçüm yapılmıştır. Daha sonrasında alınan bu beş ölçümün ortalaması, dört farklı elek aralığının ve karışım tozun sertlik değerleri olarak tayin edilmiştir (Çizelge 7.3).

Çizelge 7.3. 790ºC' de üretilmiş gaz atomize tozların mikro sertlikleri

Ölçüm Sayısı	Tava<53µm	270mesh-53µm	200mesh-74µm	140mesh-105µm	Karışım toz-90,66µm
1	90,1	87,9	84	80,1	94,5
2	94,5	86,6	85,1	81,3	94,5
3	90,8	84,4	83,4	80	97,5
4	92,4	88,2	83	82	96,1
5	93,6	89,1	84,7	80,5	97,3
Ortalama Değer (HV)	92,28	87,24	84,04	80,78	95,98

Belirlenen sertlik değerleri irdelendiğinde, en küçük toz boyut dağılımına sahip tozlarda 92,28 HV gibi bir sertlik değeri gözlemlenirken, artan toz boyut dağılımına bağlı olarak ortaya çıkan 80,78 HV' lik bir sertlik değeri tespit edilmiştir. Bu durum artan toz boyut dağılımına bağlı olarak sertlik değerinde bir azalma olduğu şeklinde bağlanmıştır.

Bir diğer durumda katılaşma hızıdır. Klasik katılaşma modelinde olduğu gibi hızlı katılaşan malzemelerin sertliği daha yüksek olur. Bu durum küçük tozlardaki hızlı katılaşmada açıkça görülmektedir. Artan toz boyutuyla birlikte katılaşma daha geç gerçekleşecektir ve bu durumda toz sertlikleri daha da düşecektir. Karışım tozun sertlik değeri incelendiğinde ise 95,98 HV değerinde olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ise karışım toz içerisindeki farklı toz boyutlarının bir etkisi olduğu düşünülmüştür.

Benzer şekilde farklı sıcaklık ve sürelerde sinterleme işlemine tabi tutulmuş deney numuneleri üzerinden yapılan makro sertlik değerlerinin tayini için, beş farklı noktadan ölçüm yapılmıştır (Çizelge 7.4). Sertlik sonuçları incelendiğinde, sinterleme sıcaklık ve süresine bağlı olarak ortaya çıkan en yüksek sertlik değeri 560ºC' deki 4 saat sinterleme süresi ile 56,84 HV olarak tespit edilmiştir. Sinterleme süresi göz önünde bulundurulduğunda, sinterleme pratiğinde 1 saat süre zarfında yapıdaki mukavemet artışının sağlanması açısından, yapmış olduğumuz çalışmada 1 saat süre olarak ele alacak olursak, 550ºC sıcaklıkta 1 saatlik sinterleme süresi ile 53,44 HV olarak, diğer sıcaklıklara nazaran en yüksek sertlik değeri ölçülmüştür. 2 saat sinterleme süresi sonunda elde edilen en yüksek sertlik değeri, 1 saat ve 4 saat sinterleme süreleri sonrasında elde edilen sertlik değerlerinden daha düşük olup, 570ºC ve 580ºC sıcaklıklarda en yüksek değerine çıkmıştır.

Sertlik sonuçları incelendiğinde, 550ºC, 560 ºC, 600 ºC, 610 ºC, 620 ºC sinterleme sıcaklıklarında, 1 saat sinterleme süresi sonrasındaki 2 saat sinterleme işlemi ile birlikte sertlik değerinde bir azalma gözlemlenirken, artan sinterleme süresi ile birlikte 4 saat gibi bir süreye çıkıldığında ise, tekrar bu sıcaklıklarda sertlik değerinin bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. 570ºC, 580ºC, 590º sinterleme sıcaklıklarında ise bu durumun farklı olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla 1 saat süreden, 2 saat sinterleme süresine çıkıldığında sertlik değerinde artış olurken, 4 saat sinterleme süresi ile birlikte sertlikte bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Sertliklerdeki bu değişimler için etkili parametrelerin, oksit oluşumu, preslemeye bağlı deformasyon etkisi, oluşabilecek ikinci fazlar ve sinterleme süresi olarak sıralanabilir. Tüm bu parametreler bağımlı ve bağımsız değişkenler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu bilgiler doğrultusunda AA 2014 aluminyum alaşımı için sertlik değeri açısından 550ºC ve 560ºC gibi sinterleme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda sertlikte bir düşüş meydana gelmiştir. En yüksek sertlik değeri ise 560ºC' deki 4 saat sinterleme süresi ile sağlanmıştır.

Çizelge 7.4. Farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenmiş numunelerin makro sertlikleri

Sinterleme Sıcaklığı (˚C)	Sinterleme Süresi (saat)	1. ölçüm	2. ölçüm	3. ölçüm	4. ölçüm	5. ölçüm	Ortalama Değer (HV)
550	1	53,1	52,2	55,4	53,5	53	53,44
	2	42,5	44,9	43,2	45,4	43,5	43,9
	4	51,3	50,8	50,5	53,1	52,8	51,7
560	1	46,4	52,1	47,3	47,5	47,2	48,1
	2	41,2	43,9	44,3	42	42,4	42,76
	4	58,7	55,6	56,6	57,1	56,2	56,84
570	1	39,4	40	39,3	39	41	39,74
	2	49,7	49,9	46,8	48,2	49,1	48,74
	4	38,5	41,4	40,7	40,5	40,8	40,38
580	1	43,5	43,6	41,6	42,5	43,5	42,94
	2	47,1	48,4	49,6	48,5	48,3	48,38
	4	45,2	43,9	45,6	44,4	45,7	44,96
590	1	37,2	37,5	37,8	37,6	37,5	37,52
	2	48,1	46,6	47,1	46,5	46,9	47,04
	4	36,2	37,4	37,9	37,7	36,5	37,14
600	1	43,9	41,2	40,4	40,8	41,4	41,54
	2	38,2	36,7	35,4	36,7	37,2	36,84
	4	41,9	42,5	41,4	41,8	42	41,92
610	1	38,7	40,8	40,9	38,6	41,2	40,04
	2	38,5	37,7	38,4	37,2	38	37,96
	4	45,7	46,3	45	44,9	45,8	45,54
620	1	44,8	44,4	45,4	43,5	45,1	44,64
	2	39,9	40,1	40,3	40,5	40	40,16
	4	44,3	43,4	43,7	42	45,1	43,7

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular aşağıda belirtilmiştir;

1. Düşey gaz atomizasyon ünitesi kullanılarak AA 2014 alüminyum alaşımı toz üretimi geçekleştirilebilir.

2. 790ºC' de 12,5 bar gaz basıncında üretilmiş tozların ortalama toz boyutu 90,66 µm olarak ölçülmüştür.

3. Tozlarda çok düşük bir seviyede de olsa oksit oluşumuna rastlanılmıştır.

4. Gaz atomizasyon yöntemi ile toz üretiminde oluşması muhtemel toz şekilleri açısından kıyaslandığında küresel, çubuksu ve gözyaşı damlası şeklindeki toz üretimi gerçekleştirilmiştir.

5. Tozların SEM görüntüleri incelendiğinde küçük boyutlu gaz atomize alüminyum tozlarının daha iri boyuttaki gaz atomize alüminyum tozları üzerinde uydulaşma oluşturdukları tespit edilmiştir.

6. Üretilen AA 2014 alüminyum alaşım tozlarının genel ve bölgesel EDS analizleri yapıldığında, Al ve Cu'un olması gereken oranlarda bulunduğu belirlenmiştir.

7. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde üretilmiş tozların katılaşma şekilleri ile ilgili olarak hücresel ve dentritik katılaşma yüzey yapısına sahip olduğu gösterilmiştir.

8. Presleme basıncının sinterleme öncesinde ve sonrasındaki yoğunluk değerleri açısından etkili olduğu belirtilmiştir.

9. Sinterlemeye bağlı olarak yoğunluk değerlerinde bir artış olması beklenirken, azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum gözeneklerin küçülmesini durduran bir etki yapan, AA 2014 alüminyum alaşımının içerisindeki diğer alaşım elementlerinin varlığından kaynaklandığı şeklinde bağlanmıştır.

10. Sinterlemenin 550-560 ºC sıcaklık değerlerinde 4 saat gibi bir sinterleme süresiyle yeterli olabileceği ancak bu sıcaklığın artışına bağlı olarak gözenek-yapı etkileşimi dolayısıyla yoğunluk açısından etkili olmayacağı düşünülmüştür.

11. AA 2014 aluminyum alaşımı için en yüksek sertlik değeri ise 560 ºC' deki 4 saat sinterleme süresi ile 56,84 HV olarak ölçülmüştür. Bu sıcaklığın üzerindeki sinterleme sıcaklıklarında bu sertlik değeri giderek azalmıştır.

8.2. Öneriler

Yapılan çalışmalar doğrultusunda AA 2014 aluminyum alaşımının toz üretimi ile ilgili olarak ileri de aşağıda belirtildiği gibi çalışmalar yapılabilir;

1. Düşey gaz atomizasyon ünitesi eksiklikleri giderilerek, özellikleri geliştirilmiş, yüksek performanslı bir ünite ile toz üretimine yönelik daha iyi sonuçlar alınabilir.

2. Farklı alaşım türleri de kullanılmak suretiyle toz üretimi gerçekleştirilebilir.

3. AA 2014 malzemesi için farklı nozul tipi ve tasarımları kullanılarak, toz üretimine yönelik ortaya çıkabilecek farklıklar karşılaştırılabilir.

4. Oksit oluşumunu engellemek için, yeni bir atmosfer kontrolü tasarımı ile oluşturulan kapalı bir hacim içerisinde ergitme işlemi yapılarak, bu sorun ortadan kaldırılabilir.

5. Toz metalurjisi Al ve alaşımlarının özelliklerinin geliştirilmesi için aluminyum tozları içerisine çeşitli elementel toz ilaveleri ile güçlendirme mekanizması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: TTMD – Türk Toz Metalurjisi Derneği Online Yayını "Toz Metalurjisi", Türk Toz Metalurjisi Derneği, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, www.turktoz.gazi.edu.tr, Ankara, (2003).

2. Roll, K.H., "History of Powder Metallurgy", ***Metals Handbook, 9th edition, ASM. Metal park,*** Ohio**,** 7: 1–110 (1984).

3. Yavuz, N., Güner, R,. "Demir esaslı toz metal parçaların elektrik direnç kaynağında optimum kaynak şartlarının belirlenmesi**"** ***Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi***, 7 (1): 221–228 (2002).

4. Bloor, D., Brook, R.J, Flemings, M.C. and Mahajan., S., "The Encyclopedia of materials",: ***Pergamon Press***, Oxford, 79-86, (1999).

5. Suryanarayana, C., "Mechanical alloying and milling", ***Progress in Materials Science*****,** 46: 1-184, (2001).

6. Arzt, E., "High temperature properties of dispersion strengthened materials produced by mechanical alloying current theoretical understanding and some practical implications", ***Conf. of New Materials by MA Tech***., 185-200, (1988).

7. German, R.M., "Powder Metallurgy Science Second Edition", ***Metal Powders Industries Federation***, Princeton, New Jersey, 83, (1994).

8. Thieme, M., Wieters, K.P., Bergner, F., Scharnweber, D., Worch, H., Ndop, J., Kim, T.J., Grill, W., "Titanium Powder Sintering for Preparation of a PorousFunctionally Graded Material Destined for Orthopaedic Implants",***Journal of Materials Science in Medicine 12*****,** 225– 231, (2001).

9. Demir, A., Sarıtaş, S., "Toz Metal Çeliklerin Mekanik Özellikleri", ***AkdenizÜniversitesi Mühendislik Fakültesi***, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, 7:1-14, (1993).

10. Bostan, B., "Gaz Atomizasyon Yöntemi İle AA 2014 Alaşım Tozlarının Üretilmesi ve Karakterizasyonu", ***5. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, TOBB***, Ankara, 1-8, (2008)

11. Klar, E., ve Fesko, J.W., "Production of Metal Powders", ***Metals Handbook***, Powder Metallurgy, Ohio, A.B.D., 7: 25-51, (1984).

12. Lawley A., "Atomization: The Production of Metal Powders", ***MPIF***, Princeton, New Jersey, A.B.D., (1992).

13. Ünal, A., "Influence of Atomizing Conditions on Structure of Aluminium Powders", ***Aluminium Technology Con.***, The Institute of Metals, London, 673-678, (1986).

14. Gerking, L., "Powder from Metal and Ceramic Melts by Laminar Gas Streams at Supersonic Speeds", ***Powder Metallurgy Int.*****,** 25 (2): 59-65, (1993).

15. Ünal, A., "Production of Rapidly Solidified Aluminium Alloy Powders by Gas Atomisation and Their Applications", **Powder Metallurgy,** 33, 1: , 53-64, (1990).

16. Öveçoğlu, M. L., (1997), "Toz Metalurjisi: Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları ve Yeni Eğilimler", 9. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi, ***TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Yayını***, İstanbul, 449-475, (1997).

17. German, R.M., "Powder Metallurgy of Iron and Steel, New York, NY, 496, (1998).

18. Ersümer, A., "Toz Metallürjisi, Sert Metal Sinterleme" İTÜ, ***İTÜ Matbaası***, İstanbul, 277, (1970).

19. German, Randall M., "Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri", 05, Prof.Dr. Süleyman SARITAŞ, Prof.Dr. Mehmet TÜRKER, Doç.Dr. Nuri DURLU, ***Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları***, Ankara, 8-10, 61-87, 195-218, 235-270, (2007).

20. İnternet: Metal Powder Industries Federation http://www.mpif.org, (2001).

21. Yılmaz, S. S., Varol, R., Kurgan, N., "Yüzey sertlestirme islemlerinin demir esaslı T/M numunelerin mekanik özelliklerine etkisi", ***4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı***, 832-847, (2005).

22. Sarıtaş, S., "Bilyalı Dövmenin Fe+%2Cu+%0,5C T/M Çeliğin Yorulma Dayanımına Etkisinin Araştırılması", ***2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı***, Bildiri Kitabı, Ankara, 519-527, (1999).

23. Akoral, E., "Toz Metalurjisi Yöntemi ile Al-SiC Kompozit Malzeme Üretimi ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara,10-45, (2003).

24. German, R., "The Fundamental Principles of Powder Metallurgy", ***Powder Metallurgy***, 13-17, (1997).

25. Hiçyılmaz, N., "Toz Metalurjisi Yöntemi İle Elde Edilen Seramik Tanecik Destekleyicili Al Esaslı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 137, (1999).

26. ASM Metals Handbook, Powder Metallurgy, Ohio, USA, 7: 90, 112, 1147, (1976).

27. Bishop D.P., Cahoon J.R., Chaturvedi M.C. , Kipouros G.J., Caley W.F. , "On Enhancing The Mechanical Properties of Aluminum P/M Alloys, Materials Science and Engineering", A290: 16–24, (2000).

28. Feng, A.H., Geng, L., Zhang, J., Yao, C.,K., "Hot compressive deformation behaviour of eutectic Al-Si alloy based composite reinforced with α-Si3N4 whiskers", ***Materials chemistry andphysics,*** Chiana,82:618-621, (2003).

29. Işıker, V., Ögel, B., "Al-SiC kompozitlerinin üretiminde yatay bilyalı değirmen kullanımı ve parçacık dağılımına etkisi", ***1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı,*** Gazi Üniversitesi, Ankara, 377-385, (1996).

30. Çöçen, Ü., Önel, K. and Özdemir, İ., "Microstructures and age hardenability of Al-5%Si - 0-2%Mg based composites reinforced with particulate SİC"**,** ***Composites Science and Technology*** **,** 139-147, (1997).

31. Baksan, B., Gürler, R., "Toz metalurjisinin savunma sanayinde uygulanması" ***Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü***, Eskisehir, 1-15, (2004).

32. Karataş, Ç., "Toz enjeksiyon kalıplamada kurşun, demir, alümina tozlarının basılabilirliklerinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara**,** 1-25 (1992).

33. Internet: Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Bölümü, http://mf.dpu.edu.tr/~runal/toz/tozmet.html, Kütahya, (2007).

34. Sarıtaş, S., Toz Metallürjisi-Bileşik Gereçler-Seramikler, Makine mühendisliği el kitabı-2, mmo,1: 63-115, (1994)

35. Patel K.B., "Flow Rate of Metal Powders", ***Metals Handbook Ninth Edition***, Powder Metallurgy, 278-281, (1984).

36. Leo, A.A., "Apperent Density of Metal Powders", ***Metals Handbook Ninth Edition***, Powder Metallurgy, Ohio, 7: 273-275, (1984).

37. Davitson, J.E., "Compressibility of Metal Powders", ***Metals Handbook Ninth Edition,*** Powder Metallurgy, Ohio, 7: 286-287, (1984).

38. Ekşi A., Kurt A.O., "Bilgisayar kontrollü tek eksenli kalıpta preslenen bakır ve bronz tozlarının mekanik özelliklerinin incelenmesi", ***Bilim Günleri 5-6-7 Mayıs Makine Mühendisleri Odası Bildiriler Kitabı,*** Denizli, 221 : 544-552, (1999).

39. Calvo, F.A., "Special Features of The Formation of The Diffusion Bonded Joins Between Copper and Aluminum", ***Journal of Material Science***, 2273-2280, (1988).

40. Ünlü, N., Öveçoğlu, L., "Toz Metalurjisinin Yaygın Kullanım Alanları", ***Metal Dünyası***, Teknik Yazı, İstanbul, 12-13, (1995).

41. Mussman, S., "Hot İsostatic Pressing, Materials World", November, 7 (11): 677-78, (1999).

42. Hiçyılmaz, N., "Toz Metalurjisi Yöntemi İle Elde Edilen Seramik Tanecik Destekleyicili Al Esaslı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri", Y.Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi***, 137, Ankara, (1999).

43. Internet: Tasarım ve İmalat Teknolojileri Portalı, http://www.turkcadcam.net/rapor/otoinsa/sinterleme.html, (2002).

44. Arslan, F., "Sıvı faz sinterlemesi", ***1. Ulusal Toz Metalurji Konferansı***, 16-17 Eylül 551-558, (1996).

45. German, R. M., " Phase diagrams in liquid phase sintering treatments", ***J. of Metals***, 38: 26-29, (1986).

46. Lee, C. J. and German, R. M., "Enhanced sintering of tungsten phase equilibrium effect on properties", ***Int. J. of Pow. Met. Pow. Tech.,*** 20:149-162, (1984).

47. Uslan, İ., "Nozul tipinin hava atomize aluminyum tozu boyutuna etkisi", ***Gazi Üniversitesi***, Müh.Mim.Fak.Der., Ankara, 14 (1): 1-15, (1999).

48. Uslan, İ., "Gaz atomize alüminyum tozlarının özelliklerine üretim değişkenlerinin etkisinin araştırılması", Doktora tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara, 4, 58-65, 69-71, 82-100 (1999).

49. Küçükarslan, S., "Gaz atomize kalay tozunun üretim parametrelerinin deneysel olarak araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 66-82, (2006).

50. Aydın, M., 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).

51. Yıldız, E. S., "Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretiminde, nozul geometrisinin toz boyutuna etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, ***Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kütahya, 44-60, (2007).

52. M. Aravind, P. Yu, M.Y. Yau, Dickon H.L. Ng, "Formation of Al_2Cu and AlCu İntermetallics in Al(Cu) alloy matrix composites by reaction sintering", ***Materials Science and Engineering***, A 380, 384-393, (2004).

53. Öztürk, S., Arslan, F., Öztürk, B., "Su soğutmalı döner disk atomizasyonu ile üretilen AA 2014 alaşım tozlarının soğuma hızına atomizasyon parametrelerinin etkisi", ***Toz Metalurjisi Konferansı***, Türk Toz Metalurjisi Derneği, 1-12, (2002).

54. Eslamian, M., Rak, J., Ashgriz, N., "Preparation of aluminum/silicon carbide metal matrix composites using centrifugal atomization", ***Powder Technology***, 11- 20, (2008).

55. Ebeoğlu, A. R., "Gaz atomizasyonu ile üretilen Al-Sn alaşım tozlarının özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kütahya, 40, (2008).

56. German R. M., "Particle packing characteristics", ***MPIF***, New Jersey, (1989).

57. Türker, M., Özdemir, A.T., Öğel, B. ve Yavuz, A., "Al-SiC tozlarının mekanik alaşımlama değirmeninde öğütme zamanının kompozit toz yapısına etkisinin araştırılması", ***2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı***, 15-17 Eylül, ODTÜ**,** Ankara, 425-431, (1999).

58. Durmuş, H. K., Meriç, C., "Age hardening of powder metallurgy AA 2014 alloy", ***Materials and Dizayn***, 28: 982-986, (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı	: GÖKMEŞE, Hakan
Doğum tarihi ve yeri	: 09.10.1984 / ANKARA
Medeni hali	: Bekar
Nüfusa kayıtlı olduğu yer	: ÇANKIRI
Uyruğu	: T.C.
Askerlik Durumu	: Yaptı (05.16.2009)
Telefon	: 0 539 876 15 47
E-posta	: hakangkms@hotmail.com, hakangokmese@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Gazi Üni. (Döküm Öğretmenliği)	2007
Lise	Çankırı Anadolu Teknik Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-2010	Gazi Üniversitesi/Atatürk M.Y.O.	Öğretim Görevlisi
2008	Ostim Mega Makine A.Ş.	Romonya Projesi (Malzeme Sevkiyat Takibi)

Yabancı Dil

İngilizce