

**ATOMİZASYON ÜNİTESİ  
İMALATI VE KALAY TOZU ÜRETİMİ**

**2011  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METAL EĞİTİMİ**

**Şehmuz OĞUZ**

**ATOMİZASYON ÜNİTESİ  
İMALATI VE KALAY TOZU ÜRETİMİ**

**Şehmuz OĞUZ**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metal Eğitimi Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Nisan 2011**

Şehmuz OĞUZ tarafından hazırlanan "ATOMİZASYON ÜNİTESİ İMALATI VE KALAY TOZU ÜRETİMİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa BOZ

Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 28/ 04/ 2011

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Adem KURT (GÜ)

Üye : Doç. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)



...../...../2011

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

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



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

Şehmuz OĞUZ

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **ATOMİZASYON ÜNİTESİ İMALATI VE KALAY TOZU ÜRETİMİ**

**Şehmuz OĞUZ**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metal Eğitimi Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Mustafa BOZ**

**Nisan 2011, 85 sayfa**

Bu çalışmada ilk olarak Karabük Üniversitesi'nde gaz atomizasyon ünitesi imal edilmiştir. İmal edilen atomizasyon ünitesinde yakından eşlemeli nozul kullanılmıştır. Yapılan deneylerde kalay tozu üretilmiş olup deneyler sırasında atomizasyon gazı olarak argon tercih edilmiştir. Nozul çapları 2 mm, 3 mm ve 4 mm olarak kullanılmıştır. Ayrıca, her bir nozul için üretim sırasında argon gazının basıncı sırasıyla 2, 4, 6, ve 8 bar olarak ayarlanmıştır. Üretilen numunelerin boyutları ve şekilleri incelenmiştir. Numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri alınmış ve lazerle boyut ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre nozul çapının toz şekline belirgin bir etkisinin olmadığı ancak nozul çapının küçülmesi ya da gaz basıncının artmasına bağlı olarak toz boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir. Toz şeklinin ise ligamentten küresele doğru değiştiği görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler** : Toz metalurjisi, gaz atomizasyonu, kalay tozu

**Bilim Kodu** : 710.1.195

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **THE MANUFACTURE OF ATOMIZATION UNIT AND PRODUCTION OF TIN POWDERS**

**Şehmuz OĞUZ**

**Karabük University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Metallurgy Education**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Mustafa BOZ**

**April 2011, 85 pages**

In this study, gas atomization unit was produced at Karabuk University, Division of the Metallurgy Department. Production of the powder was carried out by using closely matched nozzle. Powder production experiments were done in argon gas atmosphere and tin material was used for powder production. During powder production, variety nozzle exit diameter in dimension of 2, 3 and 4 mm were used. In addition, 2, 4, 6 and 8 bar argon gas pressures were performed for nozzle diameter. Effect of gas pressure and nozzle diameter on powder particle size and shape were investigated. Laser particle measurement machine and SEM were also used to measure particle size and particle shape respectively.

Experimental results indicated that nozzle diameters had a little effect on powder particle size and shape compared to the gas pressure. Powder particle size also changed from ligament to globular shape with increasing the gas pressure.

**Key Words** : Powder metallurgy, gas atomization, tin powder

**Science Code** : 710.1.195

## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının yűrűtűlmesinde ve oluőumunda, ilgi ve desteğini esirgemeyen engin bilgi ve tecrűbelerinden yararlandığım tez danıőmanım olan kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa BOZ' a, deneysel çalıőmalar sırasındaki katkılarından dolayı saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Adem KURT' a, değerli hocam Sayın Nizamettin KAHRAMAN' a, çalıőmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım ve aileme sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	3
TOZ METALURJİSİ .....	3
2.1.TOZ METALURJİSİNİN TARİHİ GELİŞİMİ .....	5
2.2. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....	6
2.2.1. Mekanik Yöntemler .....	7
2.2.1.1. Talaşlı Üretim.....	8
2.2.1.2. Öğütme .....	8
2.2.1.3. Mekanik Alaşımlama .....	10
2.2.2. Kimyasal Yöntemler .....	10
2.2.3. Elektroliz .....	12
2.2.4. Buhar Yoğuşturma .....	13
2.2.5. Atomizasyon .....	14
2.2.5.1. Su Atomizasyon Yöntemi .....	14
2.2.5.2. Vakum Atomizasyon Yöntemi .....	16
2.2.5.3. Döner Disk Atomizasyonu .....	17

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.2.5.4. Döner Elektrod (REP) Yöntemi .....	18
2.2.5.5. Gaz Atomizasyonu Yöntemi .....	20
2.3. T/M ÜRÜNLERİN SINIFLANDIRILMASI .....	21
2.4. T/M ÜRÜNLERİN AVANTAJLARI .....	25
2.5. T/M ÜRÜNLERİN DEZAVANTAJLARI .....	26
2.6. TOZ KARIŞTIRMA .....	27
2.7. SIKIŞTIRMA .....	28
2.8. SİNTERLEME .....	31
BÖLÜM 3.....	33
GAZ ATOMİZASYONU.....	33
3.1. GAZ ATOMİZASYON MEKANİZMALARI .....	38
3.2. ATOMİZASYON SİSTEMLERİ .....	41
3.3. NOZUL ÇEŞİTLERİ.....	42
3.4. NEGATİF BASINÇ OLUŞUMU .....	44
3.5. GERİ BASINÇ OLUŞUMU .....	45
BÖLÜM 4.....	47
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	47
4.1. KARABÜK ÜNİVERSİTESİ GAZ ATOMİZASYON ÜNİTESİ .....	47
4.1.1. Gaz Sistemi .....	49
4.1.2. Ergitme Fırını.....	50
4.1.3. Nozul .....	53
4.1.4. Atomizasyon Kulesi .....	55
4.1.5. Toz Tutma Ve Sistem Temizliği .....	56
4.2. ATOMİZASYON ÇALIŞMALARİ .....	56
4.3. TOZ BOYUT ANALİZİ .....	58
4.4. TOZLARIN KARAKTERİZASYONU .....	59
BÖLÜM 5.....	60
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	60

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 6.....	81
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
6.1.SONUÇLAR.....	81
6.2.ÖNERİLER.....	82
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	85

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 2.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları .....	4
Şekil 2.2. Toz morfolojileri (şematik) .....	7
Şekil 2.3. Öğütmede çarpışmanın etkisi .....	9
Şekil 2.4. Çeşitli öğütme ekipmanları.....	9
Şekil 2.5. Mekanik alaşımlama yöntemi .....	10
Şekil 2.6. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi .....	11
Şekil 2.7. Elektroliz yöntemi ile bakır tozu üretimi.....	12
Şekil 2.8. Elektroliz yöntemi ile üretilmiş bakır tozunun SEM görüntüsü.....	13
Şekil 2.9. Su atomizasyon yöntemi .....	15
Şekil 2.10. Vakum atomizasyon yöntemi.....	16
Şekil 2.11. Döner disk atomizasyon yöntemi.....	17
Şekil 2.12. Döner elektrod yöntemiyle toz üretiminin şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.13. Döner elektrotta sıvı filmin parçalanması ve küresel parçacık oluşumunun şematik olarak gösterilmesi .....	19
Şekil 2.14. Döner elektrot yöntemi ile üretilmiş çelik tozlarında parçacık boyut dağılımının dönme hızı ile değişimi.....	19
Şekil 2.15. Düşey gaz atomizasyonu ünitesi .....	21
Şekil 2.16. T/M ile imal edilmiş makine parçaları .....	24
Şekil 2.17. Toz karıştırmada kullanılan bazı karıştırıcı tipleri .....	28
Şekil 2.18. Toz metal parçaların sıkıştırma basamakları.....	29
Şekil 2.19. Metalurjik açıdan sıkıştırma işlemi .....	30
Şekil 2.20. Çift ve tek etkili sıkıştırmada radyüs ve yükseklik (g/cm <sup>3</sup> ) ilişkisi.....	31
Şekil 3.1. Yatay gaz atomizasyonunun şematik gösterimi .....	34
Şekil 3.2. Düşey gaz atomizasyonu ünitesi .....	34
Şekil 3.3. Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi .....	36
Şekil 3.4. Paslanmaz çeliğin gaz atomizasyonu sırasında meydana gelen türbülans .....	36
Şekil 3.5. Atomizasyon sırasında sıvı demetinin parçalanmasında damlacık şekil değişiminin şematik olarak gösterilmesi.....	37
Şekil 3.6. Asal gazla atomize ile elde edilen yaklaşık 25 µm boyutundaki tozlar....	37

Şekil 3.7. Gaz atomizasyon ile elde edilmiş amorf Al-Fe-Y alaşım tozları .....	38
Şekil 3.8. Yassı tabakadan damlacık oluşumu .....	39
Şekil 3.9. Gaz atomizasyonunda mevcut üç aşamanın şematik gösterimi, See modeli .....	40
Şekil 3.10. See modelinin German tarafından farklı bir gösterimi.....	41
Şekil 3.11. Atomizasyon sistemleri (şematik) .....	42
Şekil 3.12. Farklı nozul geometrileri .....	43
Şekil 3.13. Dairesel yarık ve jet etkili nozulların şematik resimleri.....	44
Şekil 3.14. Metal akış borusu çıkışında basınç oluşumu .....	45
Şekil 3.15. Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi .....	45
Şekil 4.1. Karabük Üniversitesi gaz atomizasyon ünitesi.....	48
Şekil 4.2. Karabük Üniversitesi gaz atomizasyon ünitesi (şematik) .....	49
Şekil 4.3. Argon tüpü ve regülatör. ....	50
Şekil 4.4. Metal ergitme fırını, grafit pota ve açma kapama çubuğu.....	51
Şekil 4.5. Raylar üzerinde hareket edebilen ergitme fırını .....	51
Şekil 4.6. Metal ergitme fırını, nozul, grafit pota ve açma kapama çubuğu.....	52
Şekil 4.7. Dairesel yarıklı ve sonik geometrili nozul.....	53
Şekil 4.8. Nozul ve nozul akış borusu .....	54
Şekil 4.9. Paslanmaz çelikten imal edilen atomizasyon kulesi.....	55
Şekil 4.10. Toz toplama kabı .....	56
Şekil 4.11. Malvern Mastersizer E partikül boyutu ölçme cihazı.....	58
Şekil 4.12. Jeol JSM 6060 LV SEM cihazı .....	59
Şekil 5.1. 4 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	60
Şekil 5.2. 4 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	61
Şekil 5.3. 4 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	61
Şekil 5.4. 4 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	62
Şekil 5.5. 3 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	63
Şekil 5.6. 3 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	64

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 5.7. 3 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	64
Şekil 5.8. 3 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	65
Şekil 5.9. 2 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	66
Şekil 5.10. 2 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	66
Şekil 5.11. 2 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	67
Şekil 5.12. 2 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.....	67
Şekil 5.13. 4 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	69
Şekil 5.14. 4 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	69
Şekil 5.15. 4 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	70
Şekil 5.16. 4 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	70
Şekil 5.17. 3 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	72
Şekil 5.18. 3 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	72
Şekil 5.19. 3 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	73
Şekil 5.20. 3 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	73
Şekil 5.21. 2 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	75
Şekil 5.22. 2 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	75
Şekil 5.23. 2 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	76
Şekil 5.24. 2 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.....	76
Şekil 5.25. Farklı nozul çapında farklı gaz basınçlarıyla üretilen tozların ortalama toz boyutları.....	77

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 5.26. Farklı gaz basınçlarında farklı nozul çaplarıyla üretilen tozların ortalama toz boyutları.....	78
Şekil 5.27. Üretilen tozların spesifik yüzey alanı değerleri.....	79

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 1.1. Dünyada üretilen tozların üretim yöntemlerine göre dağılımı .....	1
Çizelge 2.1. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği faktörler.....	7
Çizelge 2.2. Metal Tozlarının Ana Uygulama Alanları .....	22
Çizelge 3.1. Nikel süper alayım tozu üretimi için örnek atomizasyon parametreleri.....	35
Çizelge 4.1. Atomizasyon değişkenleri .....	58



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Ar	: Argon
C	: Karbon
CO	: Karbonmonoksit
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	: Magnetit
Mo	: Molibden
Ni	: Nikel

### KISALTMALAR

MA	: Mekanik Alaşımlama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
T/M	: Toz Metalurjisi

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesi ile metalik parça üretimi olarak tanımlanan toz metalurjisi (T/M), çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniğidir. T/M, tozların imalatı, karakterize edilmesi ve kullanışlı parçalara dönüştürülmesi işlemlerini kapsar. T/M, imali zor parçaların (küçük, fonksiyonel, birbiri ile uyumsuz, kompozit yapılar vb.) ekonomik, yüksek mukavemet ve minimum toleransla ve diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha avantajlı bir şekilde üretilmesi yöntemidir. T/M, farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını, sağlam hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. İstenen mikroyapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde alaşım ve kompozit malzeme üretmek mümkündür [1].

Toz Metalurjisi'nde ilk aşama tozun üretilmesidir. Metal tozlarının üretiminde dünyada genel olarak kullanılan dört çeşit yöntem vardır. Bunlar mekanik öğütme ve alaşımlama, kimyasal yöntem, elektrolitik yöntem, kimyasal yöntem ve atomizasyon yöntemidir [2]. Çizelge 1.1'de dünyada üretilen tozların üretim yöntemlerine göre miktarları verilmiştir.

Çizelge 1.1. Dünyada üretilen tozların üretim yöntemlerine göre dağılımı [2].

Toz Üretim Yöntemleri	Yıllık Üretim Miktarları (%)
Mekanik öğütme ve alaşımlama	12-15
Kimyasal yöntem	4-5
Elektrolitik yöntem	1-2
Atomizasyon teknikleri	70-80

Metal tozu üretim teknikleri içerisinde, ince ve küresel tozlar elde etmede en yaygın olarak kullanılan yöntem gaz atomizasyonu yöntemidir. Bu yöntem, ergitilebilen tüm

metal ve alaşım tozlarının üretiminde kullanılabilir. Üretilen tozlar arasında paslanmaz çelik, pirinç, demir, alüminyum, magnezyum, çinko, kalay ve kurşun gibi metal ve alaşımların tozları sayılabilir. Gaz atomizasyonunda, sıvı metal demetini parçalamak için basınçlı akışkan olarak hava, azot, argon ve helyum gibi gazlar kullanılabilir. Bu yöntemde gaz cinsi, gaz basıncı, gaz ve sıvı metal akış debileri ile nozul geometrisi gibi üretim parametreleri tozların fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir [3].

Bu araştırmanın amacı, bir gaz atomizasyon ünitesi tasarlayarak imal etmek ve bu üniteye farklı nozul çaplarında ve farklı gaz basınçlarında kalay tozları üreterek tozların özelliklerinin incelenmesidir.

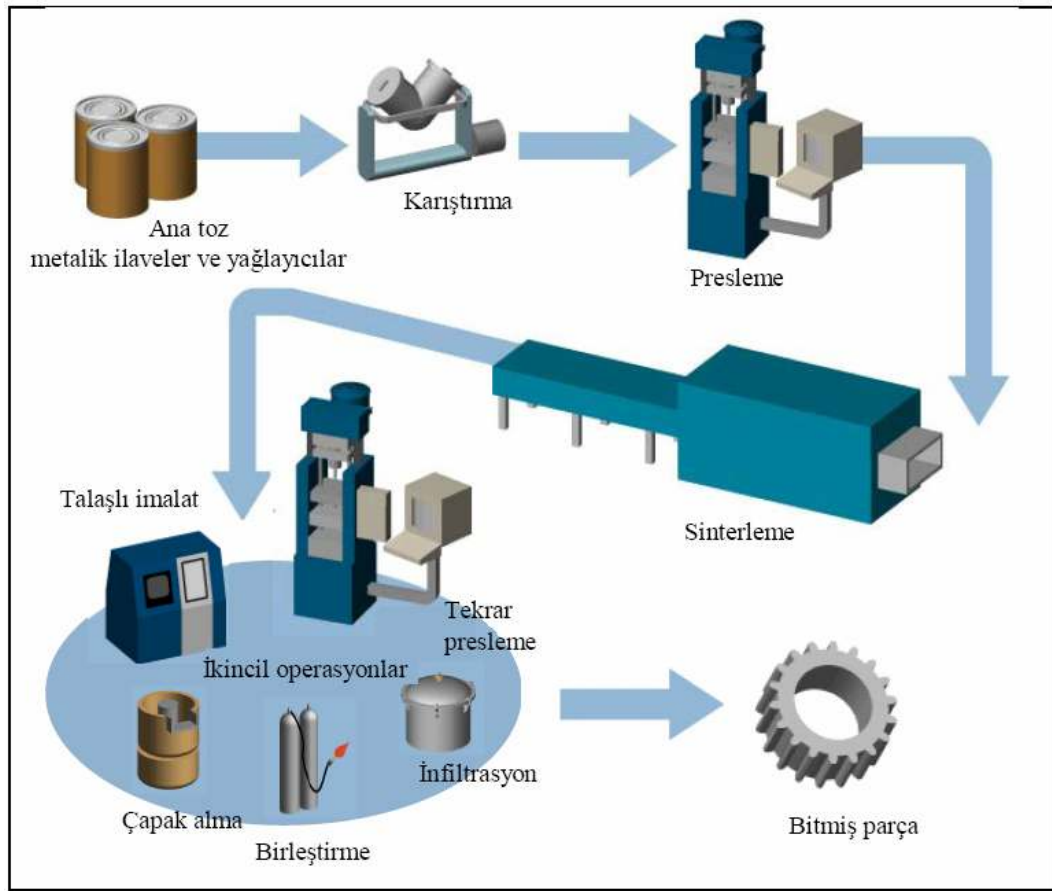
## BÖLÜM 2

### TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi (T/M), metal tozlarının üretimi ve bu tozların mekanik ve termik etkilerle birleştirilerek parça haline getirme işlemidir. Günümüzde T/M yöntemiyle parça üretimi çok yaygın olarak kullanılmakta ve giderek bilinen üretim yöntemlerine alternatif olmaktadır. İleri bir imalat yöntemi olan T/M, teknolojik malzemelerin üretilmesine çok uygun ve küçük parçaların çok sayıda ve ekonomik üretimini sağlayan bir yöntemdir [4]. Daha otuz yıl öncesine kadar T/M denilince gözenek miktarı fazla, yoğunluğu düşük, gevrek malzemeler akla gelirken, bugün T/M çok kompleks parçaları çok hızlı ve çok daha ucuza üretmeyi sağlayan bir üretim yöntemi olarak endüstrideki yerini almıştır [5]. Çok eskilerden beri bilinen, uygulanan bir yöntem olmasına rağmen uygulama açısından yeni sayılabilecek bir üretim tekniğidir [6].

T/M'nin önemi; döküm ve talaşlı imalat ile şekillendirilmesi oldukça zor veya imkansız olan parçaların bu yöntemle kolaylıkla ve kütle üretimlerde ekonomik bir şekilde üretilebilmesinden kaynaklanmaktadır [7]. T/M ile, çok yüksek hassasiyette karmaşık şekilli, yüksek kalitede parça üretimi mümkündür. Ergime sıcaklığı yüksek olan metaller, T/M ile kolaylıkla şekillendirilebilirler. Döküm, gibi alışlagelmiş üretim tekniklerinde yaşanan oksidasyon, segregasyon, gaz absorpsiyonu ve yüksek yoğunluk farkından dolayı alaşım oluşturmama gibi birçok problem T/M yöntemi ile kolaylıkla ortadan kaldırılabilir. Bir üretim yöntemi olmasının yanı sıra T/M aynı zamanda önemli bir malzeme ve yarı mamul üretim yöntemidir. T/M, kompozit malzeme üretiminde de kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yolla alışlagelmiş malzemelerden daha farklı ve üstün özelliklerde malzeme üretmek mümkündür. T/M farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür [6]. Bu dönüşüm başlıca, toz üretme, istenilen tozların homojen bir şekilde karıştırılması, toz karışımının kalıp içerisinde

sıkıştırılması ve toz tanelerinin birbirleriyle bağ oluşturmaları için atmosfer kontrollü ve gerekli sıcaklıkta-sürede sinterleme işleminin yapılması basamaklarını içerir. Bu dönüşümü kapsayan genel bir ifade ile T/M; farklı boyut, tip, şekil ve sıkıştırılabilirliğe sahip tozların, % ağırlık oranlarının belirlenip homojen olarak karıştırılması, karışımın uygun ortamda sıkıştırılmasıyla istenilen şekle veya forma dönüştürülerek yoğunluk kazandırılması daha sonra mukavemet ve yoğunluğun artırılması için sinterleme yapılması esasları ile parça imal etme tekniği olarak nitelendirilmektedir [8].



Şekil 2.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları [4].

T/M nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimli kullanır. Sahip olunan bu özellikler ile T/M verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırır. Bunların sonucu olarak, T/M konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme operasyonlarının yerini almaktadır. Kalite dağılımının homojen olması,

içeriğinin kontrol edilebilir olması, düşük enerji tüketimi, yüksek malzeme kullanım oranı ve düşük birim maliyet gibi faktörler nedeni ile toz metalürjisi üretim yöntemi son yıllarda imalat sektöründe müstakil üretim seçeneği olarak kullanılmaktadır [6].

Makine parçalarının hızlı, parçadan beklenen fonksiyonları yerine getirecek mukavemet ve özelliklerin yanı sıra istenen boyut hassasiyetlerinde üretimi gittikçe önem kazanmaktadır. Toz metalürjisi ile üretilen parçalar bu gereklilikleri her geçen gün daha fazla yerine getirmektedir. Karışık şekilli parçaların üretiminin yanında diğer yöntemlerle üretilmesi zor parçalar, kısa sürede ve beklenen özelliklerde toz metalürjisi yöntemiyle üretilmektedir. Ayrıca istenilen kimyasal bileşimdeki metallerin tozları ile parça üretebilmenin yanı sıra farklı metallerin tozlarından oluşan karışımlar da kullanılabilir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen makine parçaları ek bir talaşlı işlem gerektirmemektedir. Beklenen mekanik özelliklere ve toz bileşimine bağlı olarak belirlenen sinterleme işlemi sonunda makine parçası olarak doğrudan kullanılabilir [6].

## **2.1. TOZ METALURJİSİNİN TARİHİ GELİŞİMİ**

Günümüzde modern imalat yöntemleri arasında yerini alan toz metalürjisinin tarihi M.Ö. 3000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Eski Mısırlılar bu tarihlerde demir oksidi indirgeyerek sünger demir elde etmişler sonra da sünger demirden istedikleri şekilde kütle oluşturmuşlardır. M.S. 400 yıllarında da Hindistan'da bir demirci ustası günümüzdeki toz metalürjisi yöntemine benzer yöntemlerle 6.5 ton ağırlığında kütle elde etmiştir [9]. Thomas Edison tarafından Ekim 1879 yılında icat edilen elektrik lambasının üretiminde toz metalürjisi ciddi katkılar sağlamıştır. 1898 yılında Avusturya'da, 1905 yılında da Almanya'da T/M yöntemiyle çeşitli metallerden üretilen filamentler elektrik lambalarında kullanılmışlardır [10]. T/M nin bugünkü anlamda gelişimi 1945 yılından sonra başlamıştır. İlk çağlarda insanlar, doğada saf haliyle buldukları metalleri eritmeden çekiçle döverek birleştirmeyi gerçekleştirmişlerdir. Eski ve orta çağlarda çok sert çelikten imal edilen silahlar, yüksek sıcaklıklarda dövülerek birleştirilen metal parçalarından meydana gelmekteydi. 1826 yıllarında Rusya'da tedavüle çıkarılan platin para, toz metalürjisinin ilk endüstriyel uygulaması olmuştur. 19. Asrın sonlarında, endüstride

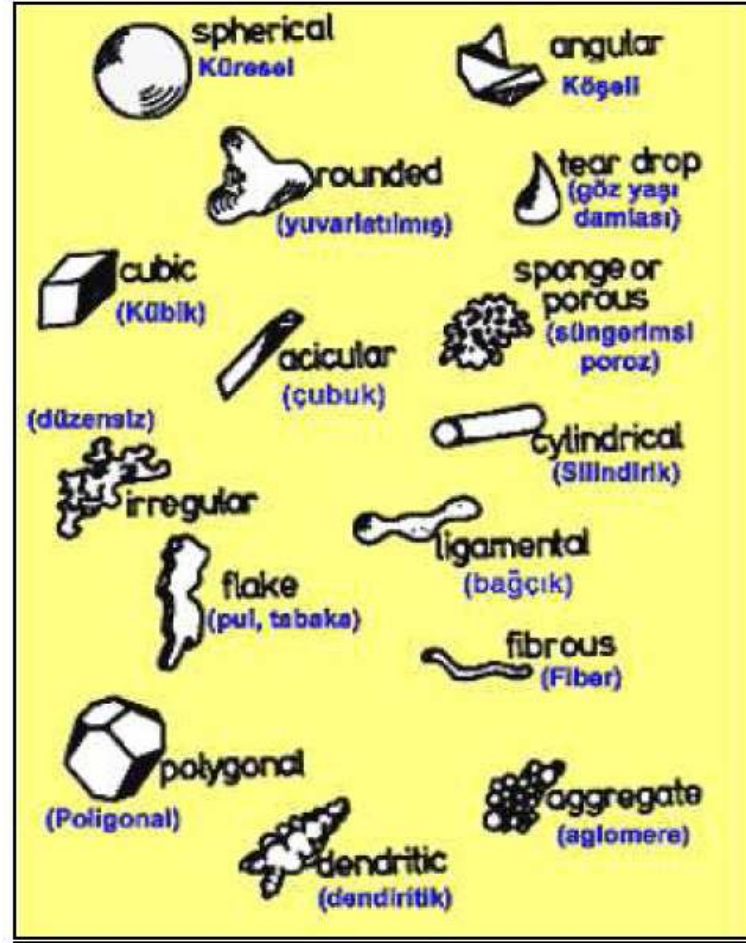
platin ve iridyum gibi yüksek sıcaklıkta eriyen metallerin kullanılması denenmiştir. Kimyasal bir usulle platin toz haline getirilmekte, bu toz çok yüksek basınçta sıkıştırılmakta ve sonra ısıtılmaktadır. Böylece tozlar masif bir kütle haline gelmektedir. İlk bronz alaşımlı yataklar 1925’li yıllarda üretilirken, sinterlenmiş demir ve çelik esaslı makine parçaları 1945’lerden sonra üretilmiştir. 1950’li yıllardan itibaren demir ve çelik tozlarından üretilen dişliler, kamlar ve çeşitli konstrüksiyonlardan oluşan makine elemanları piyasaya egemen olmaya başlamıştır. 1960’larda dövme çelik parçalar, takım çelikleri ve izostatik preslenmiş süper alaşımlar gibi tam yoğun T/M gereçleri üretilmiştir. 1975’te toz enjeksiyon kalıplama ile MX güdümlü roketler ile niyobyumlu ve radyasyon soğutmalı roket motorları üretilmiştir [11].

## **2.2. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ**

Metal tozlarının üretimi birçok teknikle gerçekleştirilir. Burada amaç toz üretimini belirli şekil ve boyut dağılım aralığında, herhangi bir kirlenme içermeksizin üretmektir. Bu aşamada toz karakterizasyonu bir sonraki üretim kademeleri açısından önemlilik arz eder. Kontrollü bir başlangıcın, istenen kalitede parça üretimini sağlaması kaçınılmazdır. Tozun şekil ve boyut özellikleri ön-hazırlama aşamasında iyi bir harmanlama veya karışım oluşumu açısından önemli rol oynarken özellikle presleme esnasında homojenlik, iyi sıkıştırılabilirlik ve yüksek ham yoğunluk kazandırılması açısından kontrol edilmesi gereken kavramlar olarak düşünülmelidir. Tüm bunların ötesinde sinterleme aşamasında ilk kademelerin optimizasyonun sağlanması ile arzulanan seviyede mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliğe sahip parça üretimi gerçekleştirilmiş olacaktır [12]. Bir toz üretim yönteminin diğerlerine göre seçilmesi yöntemin anlaşılmasına, ekonomikliğine, elde edilen tozların özelliklerine ve bu özelliklerin kullanım yeri ihtiyaçlarını ne ölçüde karşılayabildiğine bağlıdır. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, dendritik formlara kadar çok farklı olabilmektedir. Aynı şekilde tozun yüzey durumu da yani düzgün veya gözenekli olması da yine üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir [6]. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği faktörler, Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği faktörler [6].

Önemli Özellikler	Etkisi
Tozun boyutu ( partikül boyutu )	Görünür ( ham ) yoğunluk
Boyut dağılımı	Akış davranışı
Toz şekli ( partikül şekli)	Ham dayanım
Kimyasal kompozisyon	Sıkıştırılabilirlik
Yüzey özellikleri	Sinterleme
Mikroyapı	Şekillendirilebilirlik ( Forging ), tokluk



Şekil 2.2. Toz morfolojileri (şematik) [6].

Toz üretiminde kullanılan ana yöntemler; mekanik yöntemler, kimyasal tepkime, elektroliz, buhar yoğunlaştırma ve atomizasyon yöntemleri olarak sıralanabilir [13].

### 2.2.1. Mekanik Yöntemler

Mekanik yöntemler talaşlı üretim, öğütme ve mekanik alaşımlama olmak üzere üç grupta incelenebilir [14].



### **2.2.1.1. Talaşlı Üretim**

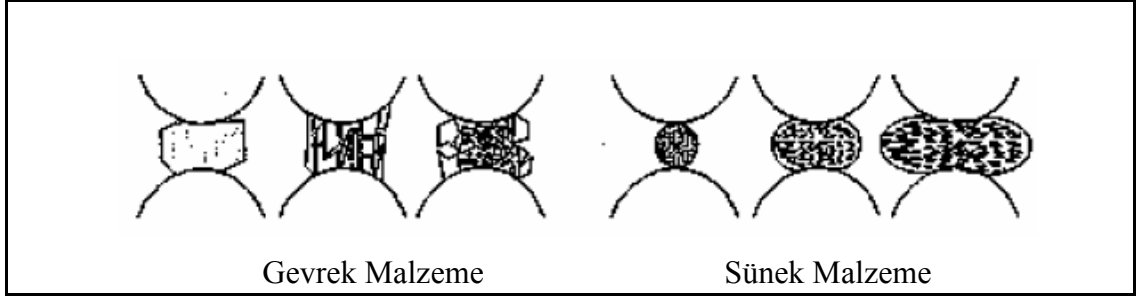
Bu yöntemle tornalama, frezeleme ve taşlama gibi talaş kaldırma teknikleri kullanılarak çok iri ve karmaşık tozlar üretilir. Üretilen tozlar, öğütülerek ince tozlar haline getirilebilir. Toz özelliklerinin kontrolündeki zorluk, oksitlenme, yağlanma, kir tutma ve diğer malzeme hurdaları ile karışarak kirlenme problemleri olabilir. Yüksek karbonlu çelik tozları bu yöntemle üretilir [14].

### **2.2.1.2.Öğütme**

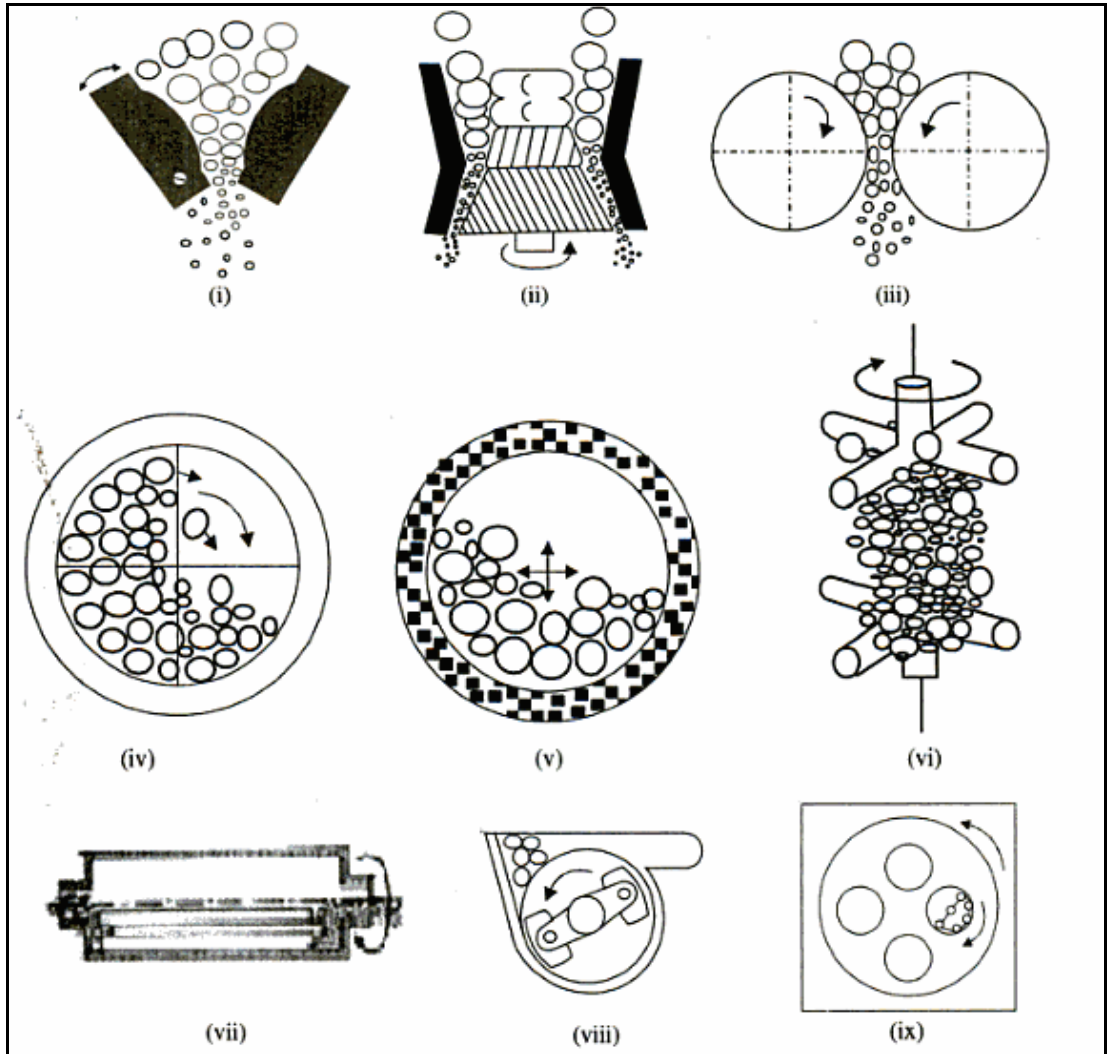
Bir metal tozu üretim tekniği olmakla birlikte, diğer tekniklerle üretilmiş ancak kümeleşmiş tozların kırılması için de kullanılan öğütme, en çok bilyeli değirmenlerde yapılmaktadır. Öğütülecek metal, içinde büyük çaplı, sert ve aşınmaya karşı dayanıklı bilyelerin bulunduğu kaba yerleştirilir. Kap döndürülerek veya titreştirilerek bilyeler harekete geçirilir [15].

Metallerarası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılma malzemeleri mekanik olarak bilyeli değirmenlerde öğütülürler. Fakat öğütme işlemi bir çok sünek metal için uygun değildir; çünkü bu metaller kolayca kırılmazlar [6]. Eğer öğütülen malzeme gevrek ise, bilyelerle çarpışmanın etkisiyle çok küçük tozlara bölünür. Öğütülen malzeme sünek parçacıklardan oluşuyor ise, çarpışma sonucunda şekil değiştirerek yassılaşırlar [14]. Sünek tanecikler kırılma yerine birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanır ve daha büyük tanecik oluştururlar. Gevrek olmayan malzemelerin kırılması zor olduğu için öğütme işlemi genellikle bu tür malzemelere uygulanmaz, bunun yerine bazı sünek malzemeler sıvı azot ile soğutularak gevrek hale gelmesi ve öğütme işlemine elverişli hale gelmesi sağlanır. Sünek malzemelerin öğütülmesinde, özellikle alüminyumun öğütülmesinde yapışmayı engelleyici yağlayıcılar kullanılır. Bu yöntemde diğer bir uygulama da hidrürler oluşturmak ve sonra bu hidrürlerin vakum ortamında giderilmesi ile metal veya tozlarının eldesi sağlanır, bu yöntem daha çok titanyum için kullanılan bir yöntemdir. Burada elde edilen toz, kütleler halindedir ve yüksek oranda hidrojen ve oksijen içerir [6].

Homojen bir karışım için kaba konulacak bilyelerin hacmi ve öğütülecek malzeme miktarı çok önemlidir. Bilyelerin hacmi kap hacminin yaklaşık yarısı ve öğütülecek malzeme miktarı kap hacminin yaklaşık % 25'i oranında olmalıdır [14].



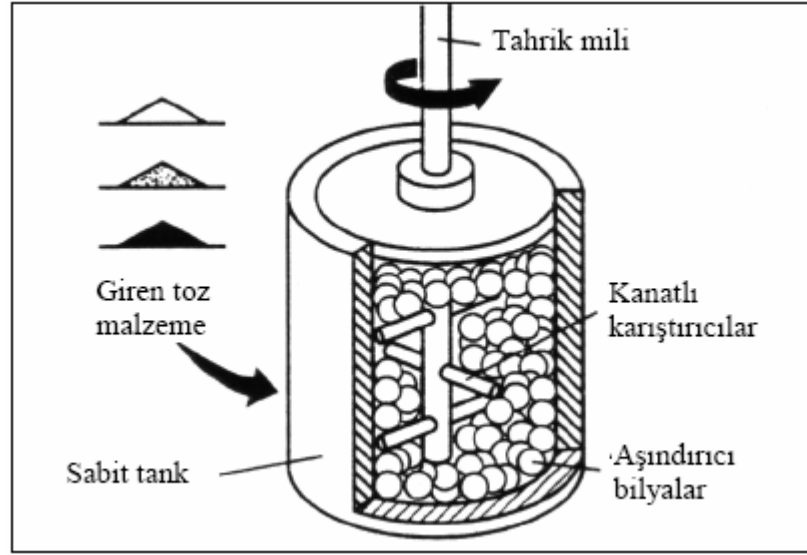
Şekil 2.3. Öğütmede çarpışmanın etkisi [15].



Şekil 2.4. Çeşitli öğütme ekipmanları [16].

### 2.2.1.3. Mekanik Alaşım

Mekanik alaşım (MA) yöntemi, kuru ve katı haldeki tozların birbirlerine periyodik olarak kaynaklanmasını ve tekrar bu kaynakların kırılmasını sağlayarak daha ince ve homojen bir mikroyapıya sahip yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılır. MA yönteminde tozlar kapalı bir kap içerisine konular ve tahrik mili döndürülür (Şekil 2.5). Tozlar, mil üzerindeki kanatlar ve bilyeler yardımı ile deforme edilir ve bu tozlarda kırılma ve soğuk kaynaklaşmalar meydana gelir [14].



Şekil 2.5. Mekanik alaşım yöntemi [14].

### 2.2.2. Kimyasal Yöntemler

Metal tozlarının kimyasal yöntemle üretimi, metal oksitlerin (demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobalt) CO veya hidrojen gibi indirgeyici gazlarla oksitlerinden kimyasal olarak indirgenmesidir. Kimyasal yöntemle üretilen sünger-demir tozu bu yöntemin önemli bir uygulama örneğidir. Sünger demir, demir oksit cevherinin uygun nitelikte indirgeyici elemanlara indirgenerek süngerimsi bir kütleye dönüştürülmesiyle elde edilir. Magnetit ( $Fe_3O_4$ ), kok ve kireç taşı ile karıştırılır ve seramik kaplara doldurulur. Karışım seramik kaplar içerisinde  $1260\text{ }^{\circ}C$  sıcaklıktaki fırınlarda 6-8 saat bekletilir. İndirgenmenin tamamlanması ile sünger demir elde

edilir. Şekil 2.6’da kimyasal yöntemle demir tozu imalatı görülmektedir. Elde edilen sünger demir külçeleri yüksek sıcaklıkta (1260 °C) birbirine kaynak olmuş tozlardan oluştuğundan öğütülerek istenilen tane büyüklüğüne getirilir. Hidrojen gazı altında 870 °C’de tavlanarak oksijen ve karbondan mümkün olduğu kadar arıtılır ve son olarak elekten geçirilir [14]. Hidrojen indirgeme yöntemi ile, çok ince ve saf tozlar elde edilebilmektedir.

İndirgeme yöntemi ile tozun imalatı için, toz karakteristiğini etkileyen önemli parametreler aşağıda açıklanmıştır:

1. İndirgeme süresi arttıkça daha büyük toz boyutu, düşük birim yüzey alanı ve kalıntı oksijen,
2. Düşük indirgeme sıcaklığı toz boyutunun düşük olmasına ve birim yüzey alanının yüksek olmasına, kalıntı oksijen miktarının artmasına neden olur,
3. Hidrojen akış hızının yüksek olması, yüksek indirgeme hızına ve düşük kalıntı oksijenle birlikte soğuma sırasında bir miktar oksitlenmeye neden olur [8].

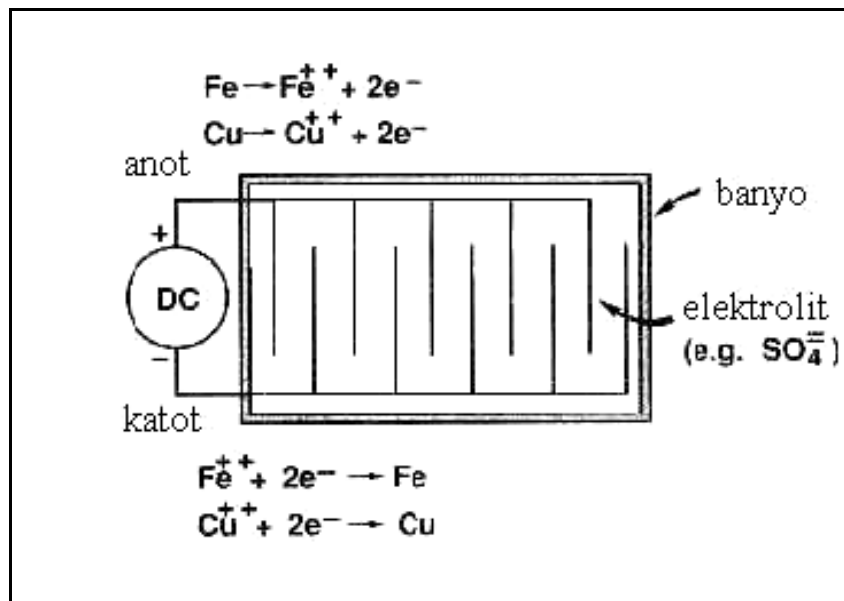


Şekil 2.6. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi [14].

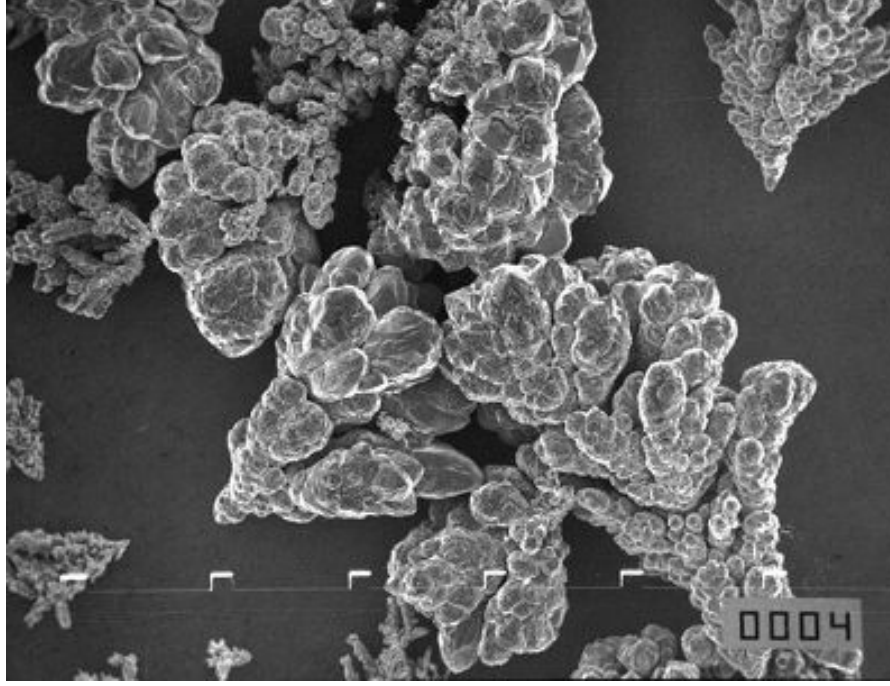
### 2.2.3. Elektroliz

Elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartları uygunca seçerek, bir çok metal sünger veya toz durumunda katot üzerinde biriktirilebilir. Daha sonraki işlemler olarak, yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme gerekli olabilir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır gelir, aynı zamanda krom ve magnezyum da bu yöntemle üretilebilir. Elektrolitik tozlar çok saftırlar [5].

Elektroliz yöntemiyle, oksitlerden oluşan tozlar katoda akım vermek suretiyle elektrolitik banyoda çökertilir yada iyi kırılabilme özelliğinde katot da toplanır. Banyo teknesi kurşun kaplıdır. Elektrolitik olarak bakır sülfat ve sülfirik asit kullanılır. Anot bakır katod ise antimuanlı kurşundur. Elektroliz yöntemi ile bakır tozları imal edilir. Elektroliz yönteminde, elektrolitik banyoda çökertilen veya katotta toplanan metal kolaylıkla öğütülerek ince toz haline getirilir ve üretilen tozlar yıkanarak elektrolitten iyice temizlenir. Kurutma asal gazlar altında yapılarak oksitlenme önlenir. Elektroliz sırasında oluşan parçacıklar dendritik bir yapı gösterirlerse de daha sonraki işlemlerle bu yapı kaybolur. Elektrolitik tozların en büyük avantajı yüksek safiyetleri, dolayısıyla iyi sıkıştırabilme özelliklerine sahip olmalarıdır [14].



Şekil 2.7. Elektroliz yöntemi ile bakır tozu üretimi [17].



Şekil 2.8. Elektroliz yöntemi ile üretilmiş bakır tozunun SEM görüntüsü [18].

#### 2.2.4. Buhar Yoğuşturma

Buhar fazından homojen çekirdeklenme ile tozların oluşturulmasında oldukça ilerleme kaydedilmiştir. Bu tip yaklaşımlar nano ölçekli parçacıkların oluşturulmasında çok yararlıdır. Günümüzde  $0,01\mu\text{m}$  boyuta kadar çeşitli tozlar bu yöntemlerle üretilmektedir [13].

Atmosfer basıncının %10'u civarında düşük basınçlı argon içinde malzeme buharlaştırılır. Düşük basınçta, ısı kaynağından uzaklaştıkça sıcaklık hızla düşer. Böylece, buharlaşan malzeme ısı kaynağından uzaklaştıkça soğur ve aşırı soğutulmuş olur. Sonuçta, küçük katı parçacıklar buhardan doğrudan çekirdeklenir. Bu parçacık dumanı soğuk bir altlık üzerinde toplanır [13].

Buhardan üretilmiş parçacıkların ilgi çekici tarafı yüksek saflık ve küçük boyutu bir arada sunmasıdır. Yaklaşım bakır, gümüş, demir, altın, platin, kobalt ve çinko gibi birçok metalin oluşturulmasında uygulanmaktadır. Buhar veya parçacıklar atmosferle istenilerek tepkimeye sokularak nitrürler, oksitler veya diğer bileşikler oluşturulabilir [13].

### **2.2.5. Atomizasyon**

Atomizasyon ergimiş sıvıya ve sıvının damlacıklara parçalanmasına dayanır. Damlacıklar donarak parçacık haline gelirler. Yöntem çoğunlukla metaller, alaşımlar ve inter-metalikler için kullanılmakla birlikte son zamanlarda polimer ve seramiklere de uygulanmaktadır. Atomizasyon yöntemi, iyi işlem kontrolü ile farklı malzemelere uygulanabilirliğinden dolayı cazip bir yöntemdir [13].

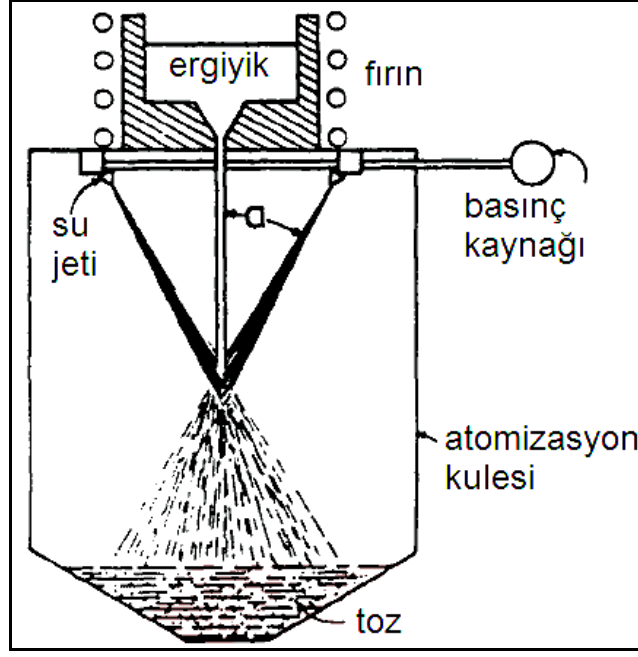
Atomize tozlar diğer üretim yöntemleri ile elde edilemeyecek özelliklere ve avantajlara sahiptir. Bu işlemde eriyik formdaki metal birbirleri ile veya katı yüzeylerle temas etmeden çok küçük damlacıklara parçalanır ve soğutulurlar. Temel prensip, eriyik haldeki metal çok ince şerit halinde akıtılır ve bu esnada bir su veya gaz jeti ile çok küçük parçacıklara ayrılarak soğutulur. Hava, azot ve argon sıklıkla kullanılan gazlardandır ve su ise çok sık tercih edilen sıvıdır. Atomizasyon, metal tozu üretiminde kullanılan en yaygın toz üretim yöntemidir. Bu üretim tekniği üç ana bölüme ayrılır [6]:

1. Ergitme
2. Atomizasyon (Eriyik metal damlalarını daha küçük boyutlarda parçalamak)
3. Katılaşma ve soğuma

Atomizasyon tekniğinde kullanılan yöntemler; su atomizasyonu yöntemi, vakum atomizasyon yöntemi, döner disk yöntemi, döner elektrod yöntemi ve gaz atomizasyonu yöntemi olarak sıralanabilir [6].

#### **2.2.5.1. Su Atomizasyon Yöntemi**

Su atomizasyon yöntemi, ergime derecesi 1600 °C altında olan metallerin tozlarının üretilmesinde çok sıkça kullanılan atomizasyon yöntemidir [19]. Bu yöntem demir, paslanmaz çelik ve diğer bir çok malzemenin düzensiz şekilli tozlarının üretilebileceği en ekonomik yöntemdir [20].



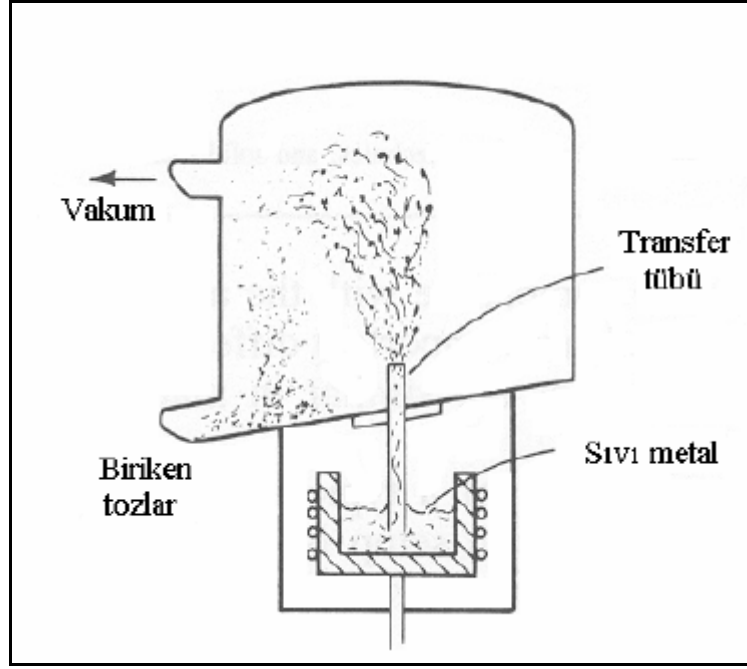
Şekil 2.9. Su atomizasyon yöntemi [20].

Pota çıkış ağzından eriyik metal düşey yönde akıtılırken yüksek basınçlı ve özel tasarımı su jetleri ile parçalanır . Uygulamalı çalışmalar sonucu elde edilen ampirik ilişkiler bu yöntemle elde edilen toz malzemelerin ortalama tane boyutu ve dağılımına,suyun basıncı ve hızı, metal eriyik akış açısı, eriyik viskozitesi, eriyik yoğunluğu, eriyik yüzey gerilimi, sıvı metal akış hızının soğutma suyu akış hızına oranı gibi parametreler etki etmektedir. Su atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozların genelde ortalama tane boyutu 30-1000  $\mu\text{m}$  arasında olmaktadır. Proses parametrelerinin değiştirilmesi suretiyle toz şekli farklılık gösterebilir. Tipik toz şekli düzensiz olup bu tozların sıkıştırma sonrası ham dayanımları yüksektir ve yapısal parçaların imalinde kullanılır. Atomize edilen metal ve kullanılan suyun reaksiyonu ise sistemin dezavantajlarından [6]. Pek çok malzeme su ile tepkimeye girdiği için atomizasyon sonrası tozların temizlenmesi gerekir. Ergiyik sudan oksijeni ayırarak yan ürün olarak tehlikeli hidrojen gazını oluşturur. Sentetik yağlar bu tepkimeleri ortadan kaldırmakta yardımcı olur, fakat bu işlem de toz maliyetini artırır [13].



### 2.2.5.2. Vakum Atomizasyon Yöntemi

Vakum atomizasyonu yöntemi, basınçlı gaz altındaki sıvı metale ani olarak vakum uygulanması sonucu gazın genişmesi ve metalin atomize olmasıyla gerçekleştirilen bir metottur [14].



Şekil 2.10. Vakum atomizasyon yöntemi [5].

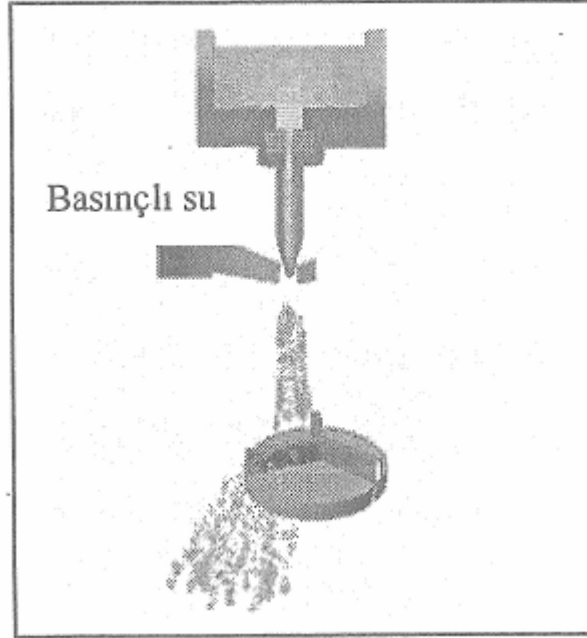
Bu yöntemde, silindirik bir tankın alt kısmında sıvı metal potası, üst kısmında da vakum atomizasyon odası bulunmaktadır. Her iki bölüm sıvının geçeceği memeyi taşıyan bir plaka tarafından bölünmüştür. Memenin alt kısmında ona bağlı bir seramik boru bulunmaktadır [6].

Vakum altındaki sıvı metal önce belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır, bundan sonra bu bölüme hidrojen gazı doldurulur. Potadaki sıvı metalde hidrojen gazı çözüldükten sonra potayı yukarı taşıyan mil potayı yukarı iterek seramik boruyu potaya daldırır. Üst kısımda vakum olduğu için sıvı metal memeden geçerek parçalanır. Böylece metal ve alaşımlarından ince küresel tozlar üretilir [14]. Bu teknik süper alaşım tozlarının üretilmesinde kullanılır. Titanyum hidrür ve diğer metallerin kullanıldığı türler de görülmüştür. Vakum atomizasyon yönteminde soğuma hızı yavaştır, çünkü

vakum odasında sadece ışıma ile soğuma gerçekleşir. Gaz atomizasyonunda olduğu gibi taşınım soğuması gerçekleşmez [13].

### 2.2.5.3. Döner Disk Atomizasyonu

Atomizasyon için değişik yöntemler kullanılabilir, bunların içinde önemli bir yer tutan yöntem olarak merkezkaç kuvvetinin etkisiyle toz metal üretimini sağlayan döner disk yöntemi gösterilebilir [6]. Bu yöntemde hızla dönen bir diskin üzerine akıtılan sıvı metal diske çarparak parçalanır ve damlacıklar halinde katılaşır [21].



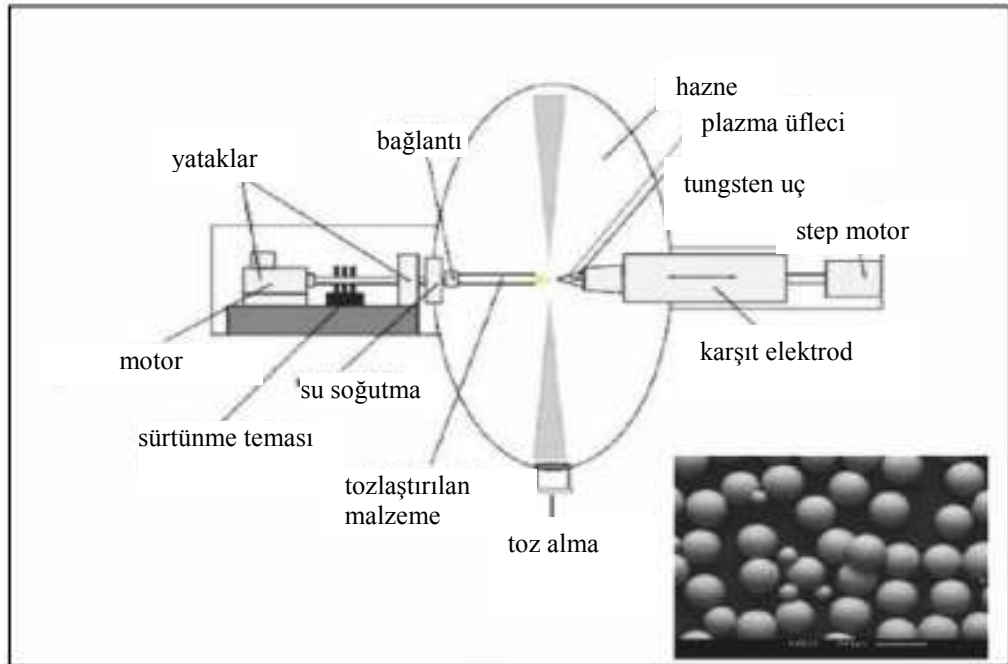
Şekil 2.11. Döner disk atomizasyon yöntemi [21].

Döner disk atomizasyonu sıvı metal veya alaşımın yüksek hızda dönmekte olan disk üzerine akıtılıp, santrifüj kuvvet etkisiyle parçalanarak toz elde etme işlemidir. Disk üzerine düşen sıvı metal damlacıkların katılaşması büyüklüklerine bağlı olarak disk üzerinde veya diskten savrulduktan sonra gerçekleşir. Küçük boyutlu tozların yüzey/kütle oranı daha büyük olduğundan daha hızlı soğurlar. Tozların katılaşmasını hızlandırmak veya ısının süratle uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç değişik soğutma ortamı kullanılır. Sıvı metal damlacıklarını soğutulan bir katı yüzeye çarptırarak yapılan soğutmada katı-sıvı ara yüzeyinde kondüksiyon ısı transfer katsayısı yüksek olduğundan soğuma hızı da yüksek olur.

Öte yandan, pek çok hızlı katılaştırma yöntemi sıvı metali ısı iletim katsayısı yüksek olan metal bir yüzeye temas ettirerek soğutma esasına dayanır. Bu sebepten, hızlı katılaştırma işleminde ısı iletim katsayısı yüksek olan bakır gibi metaller kullanılır. Hızlı katılaştırmanın olabilmesi için sıvı-katı ara yüzeyindeki ısı transfer katsayısının yüksek ve soğuyan sıvı metal filminin kesitinin ince olması gerekir [24]. Döner disk atomizasyonu ile üretilen tozlar uzay araçlarının parçalarının imalatı gibi yerlerde kullanılabilir [22].

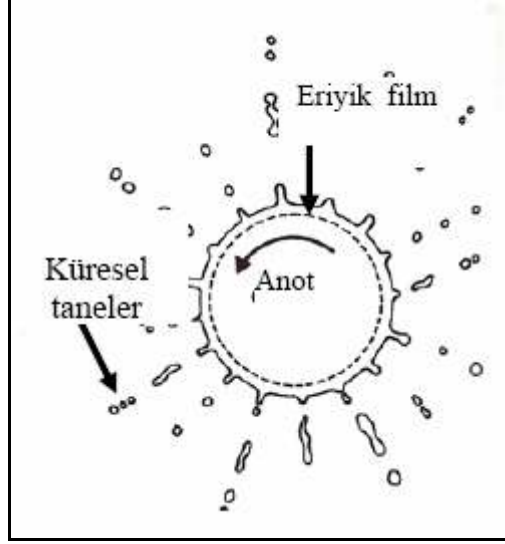
#### 2.2.5.4. Döner Elektrod (REP) Yöntemi

Bu yöntemde tozu elde edilecek metalden yapılmış bir elektrod ile ergimeyen tungsten elektrod arasında ark oluşturulur [6]. Elektrodun ucu plazma arkı veya tungsten elektrod ile ergitilir. Tüklenen elektrod, dıştan sürücü bir motor ile 50000 dev/dak'ya kadar hızlarda döndürülür. Uç kısmında ergime oluştuğunda, ergiyik damlacıklar halinde fırlatılır ve toplama odası içindeki koruyucu ortamda katılaştırılır. Elektrod ile elektrik bağlantısı oda dışında temas fırçası ile sağlanır. Döner elektrod atomizasyonunda tozları korumak amacıyla işlem çoğunlukla koruyucu ortam altında gerçekleştirilir [13].

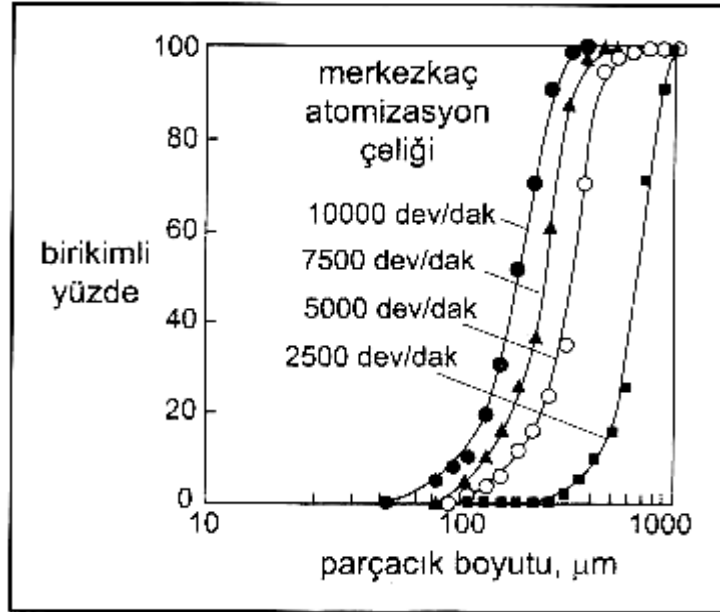


Şekil 2.12. Döner elektrod yöntemiyle toz üretiminin şematik gösterimi [6]

Yüksek hızlı fotoğraflarla kayıt edilen damlacık oluşum davranışı Şekil 2.13’de şematik olarak gösterilmiştir. Sıvı, dönmekte olan katı kenarının daha ilerisinde bir tabaka oluşturur. Kayma etkisiyle şişkinlik ve çubuklar meydana gelir. Yüksek ergitme hızlarında, sıvı film çubuklar oluşturur ve bunlar damlacıklara bölünür.



Şekil 2.13. Döner elektrotta sıvı filmin parçalanması ve küresel parçacık oluşumunun şematik olarak gösterilmesi [8].



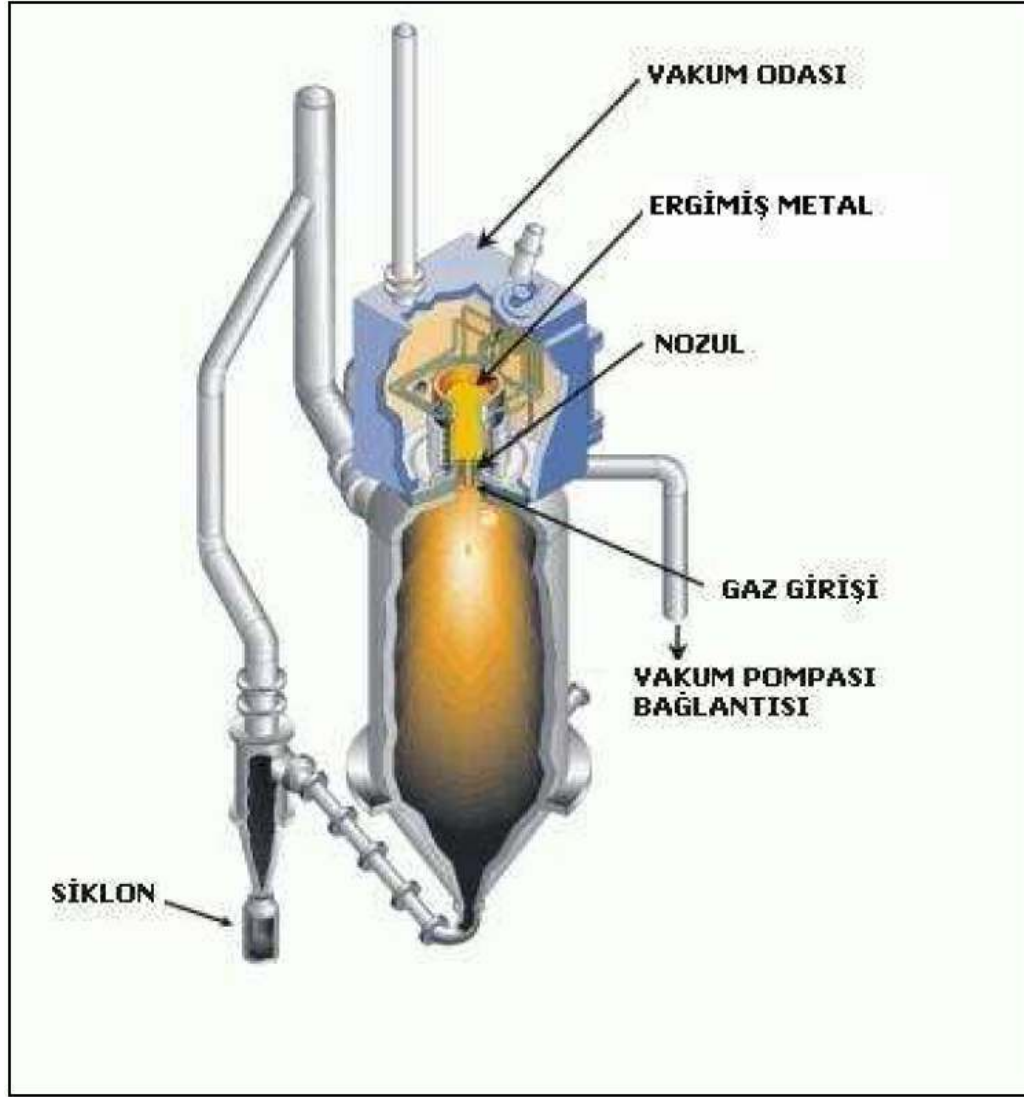
Şekil 2.14. Döner elektrot yöntemi ile üretilmiş çelik tozlarında parçacık boyut dağılımının dönme hızı ile değişimi [13].

Şekil 2.14, dört farklı elektrod dönme hızında üretilmiş çelik tozlarının birikimli parçacık boyut dağılımını göstermektedir. Yüksek dönme hızı, büyük dönme çapı ve düşük yüzey enerjili sıvılar ile küçük parçacıklar oluşturulur. Uçuş sırasında çubuklar damlacığa bölünür ve sonunda küre oluştururlar. Ancak, yetersiz aşırı ısıtma varsa, küreselleşmeden önce çubuksu parçacıklar katılaşır. Genellikle parçacık şekli küreseldir ve 250 µm ortalama parçacık boyutuna sahiptir.

Döner elektrod yöntemi, yüksek paketlenme yoğunluğu ve kolay akış özelliklerine sahip, temiz ve küresel şekilli tozlar oluşturur. Bu yöntemin olumsuz tarafları düşük üretim hızları, yüksek donanım ve işletme maliyeti ile büyük parçacık boyutudur. Bunlara ilaveten, eğer katı bir katot kullanılırsa atomize edilmiş tozlarda genellikle kirlilik vardır. Bundan dolayı, pek çok yüksek performans uygulamalarında plazma ergitme tekniği tercih edilir [13].

#### **2.2.5.5. Gaz Atomizasyonu Yöntemi**

Basınçlı gaz ile atomizasyon da prensip olarak su atomizasyonu yöntemine benzer, ancak burada akışkan olarak su yerine gaz kullanılır. Sistemin birbirine nozul ile irtibatlı düşey olarak üst üste bulunan iki odası vardır. Üstteki odada sıvı metal potası bulunmakta, alttaki odada ise atomizasyon işlemi yapılmaktadır. Her iki oda da vakum pompasına bağlantılı olup oksidasyonu engellemek için işlem vakum altında yapılmaktadır. Basınçlı gaz tüpünden boru ile nozula ulaşan gaz potadaki sıvı metali beraberinde sürükleyerek atomizasyon odasına pulverize ederek dağıtılır. Soğuyan metal tozu bu odanın tabanındaki bir hazne içinde toplanır. Pulverize edilen metal tozlarının birbirine yapışmaması, şekillerinin bozulmaması için atomizasyon odasının boyutları dikkatli seçilmelidir [6].



Şekil 2.15. Düşey gaz atomizasyonu ünitesi [6].

### 2.3. T/M ÜRÜNLERİN SINIFLANDIRILMASI

Toz metalurjisi ile üretilen ürünler beş grupta sınıflandırılabilir;

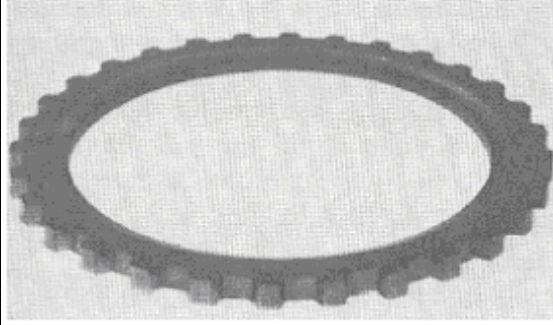
1. Yatak, filtre, basınç veya sıvı regülatörü gibi gözenekli ve geçirgen ürünler; Toz ürünlerinin büyük bir kısmını bakır veya demir alaşımlarından yapılan yağ emdirilmiş yataklar oluşturmaktadır. Bu yataklar yağlamaya ve kullanım esnasında bakıma ihtiyaç duymadıklarından otomotiv endüstrisinde ve ev aletlerinde yaygınca kullanılmaktadır. T/M filtreleri hemen her boyutta gözeneğe sahip şekilde üretilebilirler ve en küçük gözenek çapı 0,0025 mm'dir.

Çizelge 2.2. Metal tozlarının ana uygulama alanları [5].

Uygulama alanı	Kullanılan toz
Havacılık	
Frenleme yüzeyleri	Bakır, kurşun, kalay, yüksek nikel alaşımları, grafit, demir
Balans ağırlıkları	Tungsten, bakır, nikel, demir
Yakıt, hidrolik ve hava filtreleri	Bronz, paslanmaz çelik, nikel
Dış çerçeveler	Alüminyum, berilyum, titanyum, demir
Isı tutucular	Berilyum, tungsten
Isı tutucu kaplamalar	Alüminyum
Jet motor bileşenleri	Süper alaşımlar
Roket yakıtları	Alüminyum
Komponent tamiri	Nikel-krom, nikel-alüminyum, paslanmaz çelik
Otomobil	
Klima	Demir, çelik
Alternatör regülatörleri	Platinyum alaşımları, demir
Buşing, yataklar	Bakır, kurşun, kalay, demir, alüminyum, grafit, bronz
Filtreler	Paslanmaz çelik, bronz
Yakıt pompa parçaları	Demir, bakır, takım çeliği
Şok sönmeyiciler	Demir, alüminyum
Buji gövdeleri	Demir
Aktarma parçaları	Demir, bakır, çelik
Fren balataları	Bakır, demir, kurşun, kalay, grafit, çinko
Karpitler	Tungsten, titanyum, tantalum, niobiyum
Difüzyon kaplamaları	Alüminyum-titanyum alaşımları, krom, çinko, hafniyum
Elektrik ve elektronik	
Bataryalar	Nikel, çinko, gümüş, demir, kurşun, grafit
Fırçalar	Bakır, gümüş, grafit
Motor kutup parçaları	Demir, silikon-demir
Baskı devreler	Bakır, gümüş, paladiyum, altın, platinyum
Yarıiletkenler	Kurşun
Erozyon tezgahları	
Elektrot	Bakır, gümüş, tungsten
Isıl işlem	
Fırın ısıtma elemanları	Platinyum alaşımları, tungsten, molibden
Fırın ısı koruma kalkanları	Alüminyum, tungsten
Yüzey sıvama	Bakır, pirinç, gümüş, manganez
Thermocapuls	Platinyum alaşımları, tungsten, molibden
Genel sanayi	
Yataklar	Bakır, kalay, kurşun, bronz
Kesici takımlar	Tungsten, kobalt
Filtreler (sıvı-gaz)	Bronz, nikel, paslanmaz çelik, süper alaşımlar, titanyum
Alevle kesme	Demir, alüminyum
Sürtünme malzemeleri	Bakır, kurşun, kalay, demir, çinko, grafit
Birleştirme	
Sert lehim	Bakır, nikel, gümüş, kobalt, altın, alüminyum, nikel-kobalt-demir-krom alaşımları, nikel-silikon-boron alaşımları
Ark kaynak elektrot örtüleri	Demir, nikel, krom
Direnç kaynağı elektrotları	Tungsten, bakır, gümüş, molibden, manganez
Lehimleme	Kurşun, kalay, lehim alaşımları
Yağlayıcılar	
Kaynaşmayı önleyici malzeme	Bakır, kalay, kurşun, grafit
Bakırlı yağlayıcılar	Bakır
Gresler	Kurşun, grafit
Yüksek sıcaklık yağlayıcıları	Alüminyum, grafit

2. Diğer yöntemlerle üretilmeleri halinde aşırı miktarda talaşlı işleme gereksinim duyulan karışık parçalar; Küçük boyutlu dişlilerin büyük bir kısmı toz metalurjisiyle üretilmektedir. Toz yöntemleri ile elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey bitirme kalitesi çoğu zaman ilave bir işlemi gerektirmez ve bazı özel hallerde sadece çok küçük oranlarda yüzey işleme yeterlidir. Kam ve küçük manivela kolları gibi diğer girift parçalar da toz yöntemiyle oldukça ekonomik bir şekilde üretilebilmektedir.
3. Talaşlı işleme zor veya yüksek ergime noktalı malzemelerden yapılan parçalar; Toz metalurjisi modern anlamda ilk kez tungsten lamba flamları ve tungsten karbür kesici takımların üretiminde kullanılmıştır.
4. İki veya daha fazla metalin kombine özelliklerinin istendiği parçalar; Bileşenlerin özelliklerini parçalara kazandırabilme kabiliyetinden dolayı toz metalurjisi özel kullanım alanı olan veya bazı amaçlar için dizayn edilen parçaların üretiminde yaygınca kullanılmaktadır. Motor veya jeneratör parçaları bu amaçla bakır ve grafitten üretilmektedir. Bakır elektrik iletkeni görevini görürken grafit yağlama işlevini yerine getirir. Benzer şekilde yataklar, grafit-demir, grafit-bakır veya grafit-bakır-kalay alaşımı gibi ikili malzeme gruplarından yapılmaktadır. Yumuşak metal, sert metal matrisi içerisinde dağıtılır. Elektrik anahtarı kontaklarında çoğunlukla bakır veya gümüş; tungsten, nikel veya molibden elementlerinden biriyle birleştirilir. Bakır veya gümüş yüksek iletkenlik sağlarken, yüksek ergime sıcaklıklı malzeme ark esnasında ve devrenin kapalı olduğu süre boyunca ergimeye karşı direnç sağlar.
5. Toz metalurjisi yönteminin diğer yöntemlere göre üstün özellik sağladığı ürünler; %100 yoğunluğa ulaşmak amacıyla geliştirilen yöntemlerle üretilen ürünlerin özellikleri alternatif yöntemlerle üretilen ürünlerin özelliklerini aşmıştır. Uçak sanayi gibi kritik döneme sahip alanlarda ilave maliyetler özelliklerin geliştirilmesi ile haklı görülebilir. Toz metalurjisi magnetlerin üretiminde önemli bir avantaj sağlar; sinterleme öncesinde toz tanelerinin dizilmesi mağnetik bir alanda yapılarak toz mağnetlerde daha yüksek bir flaks yoğunluğuna ulaşabilir [5].

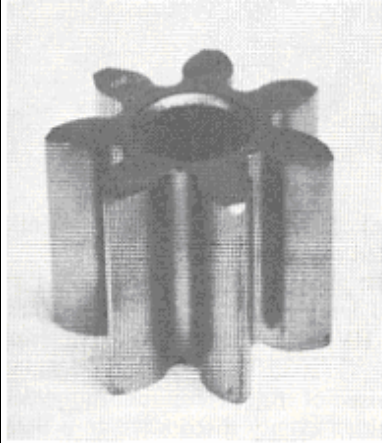




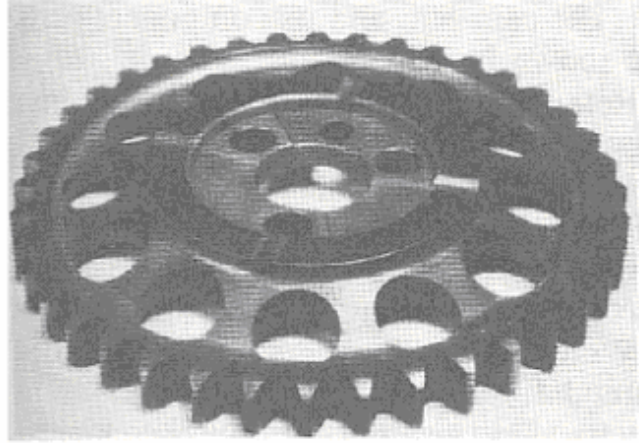
Fe-Cu-C karışımından imal edilmiş ve ikinci işlem olarak yüzeyi taşlanmış otomatik vites debriyaj baskı plakası



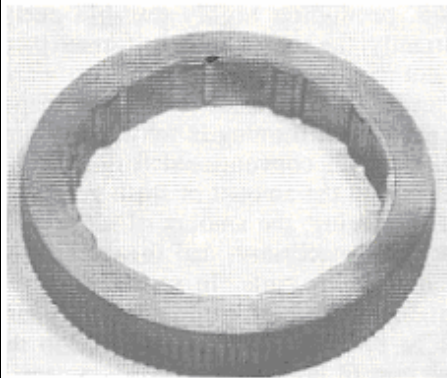
Fe-C alaşımından imal edilmiş kam şaft yatağı



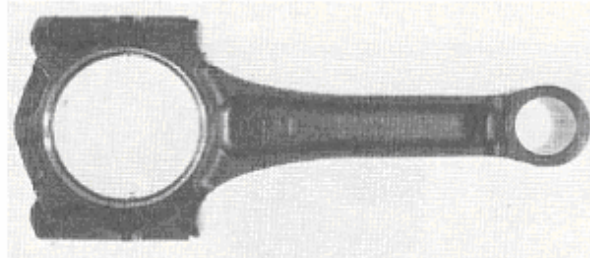
Fe-C alaşımından imal edilmiş motor yağ pompası hareket dişlisi



Fe-C-Ni alaşımından imal edilmiş ve ikincil işlem olarak karbonitrüleme yapılmış kam şaft dişlisi



Fe-C-Ni-Mo alaşımından imal edilmiş otomatik vites silindiri



Sıcak formlandırma (T/M) ile imal edilmiş biyel kolu

Şekil 2.16. T/M ile imal edilmiş makine parçaları [5].

## 2.4. T/M ÜRÜNLERİN AVANTAJLARI

1. Talaşlı işlem gereksiniminin azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması: Toz yöntemiyle elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey bitirme kalitesi çoğu ürün veya uygulama alanı için yeterli olduğundan ilave talaşlı işleme gerek yoktur. İstisnai şekilde boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesinin talebi halinde ürünler basma ve boyutlandırma gibi ikinci işlemlere tabi tutulabilirler.
2. Yüksek üretim hızları: Toz metalurjisi yöntemindeki bütün adımlar basittir ve otomasyona uygundur. İş gücü gereksinimi düşüktür, ürün homojenliği ve aynı kalitede tekrar üretilebilirlik oranı diğer yöntemlere göre daha yüksektir.
3. Karmaşık şekillerin üretimi: Talaşlı imalatla üretilemeyen ürünlerin üretilmesi mümkündür.
4. Çok geniş bir bileşim aralığı: Bileşim açısından oldukça yüksek saflığa sahip parçalar üretilebilir. Metal ve seramikler gibi birbiri içinde çözünmeyen ve farklı karakterdeki malzemeler de bir araya getirilebilir. Katı eriyik veya çözünürlük sınırları aşılarak aşırı doymuş katı çözelti alaşımları veya yüksek alaşımlı malzemelerde elde edilebilir. Düşük ve yüksek alaşımlı veya birbiri içinde çözünmeyen toz tanelerinden meydana gelen kompozit malzemelerden üretilen parçaların makroskobik ölçekte (bir iki toz taneleri boyutu mesafelerde) bileşim homojenitesi diğer yöntemlerle üretilenlerden daha yüksektir.
5. Özelliklerin geniş bir aralıkta değişimi: Toz metalurjisiyle üretilen parçaların yoğunluğu ve dolayısıyla içerdikleri gözenek oranı geniş bir aralıkta değişir. Çok yüksek oranda gözenek içeren filtreler gibi fonksiyonel amaçlı parçaların üretimi yanı sıra konstrüksiyon amaçlı yüksek mukavemetli parçalarda üretilebilir. Gözenekli yapılar döküm işleminde yağlayıcıların daha etkin ve istisnai bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Sürekli dökümde kalıp başlıkları içerisine yerleştirilen toz plakalar gözenekli oldukları için yağlayıcılar bu gözeneklerden sürekli olarak kalıp-ingot ara yüzeyine sevk edilebilir. Böylece yapışmaya mani olunarak hem ingotların yüzeylerin

kalitesi arttırılır ve hem de çalışanlar için son derece tehlikeli olan sıvı metal akıntılarının oluşumu (kanama) önlenir. Modern sıcak başlık kalıplarının üretim hattında bu plakaların kullanılmasının diğer bir nedeni ise plakaların kalıp duvarı boyunca ısı transferini (primer soğuma) önleyerek kalıp içinde primer soğuma ile gerçekleşen katılaşmanın ortadan kaldırılmasıdır. Böylece kalıp içindeki katılaşma kalıp altı su spreyinin etkisiyle gerçekleştirilir ve ingot dökümlerdeki birbirinden farklı karakterdeki yapısal zonların oluşumu önlenir. Magnetik, aşınma ve diğer özellikler özel bir uygulama alanının gereksinimlerini karşılayacak şekilde kontrollü olarak dizayn edilebilir (kontrollü fabrikasyonla ürünlere istenilen özellikler kazandırılabilir).

6. Hurda miktarının azaltılması veya ortadan kaldırılması: Toz metalurjisi bilinen üretim yöntemleri içerisinde malzeme kaybına neden olmayan tek yöntemdir. Döküm, talaşlı işlem ve preste şekillendirmede hurda miktarı başlangıçtaki malzeme miktarının yarısına (% 50) ulaşmaktadır. Hurda oranı özellikle pahalı malzemelerin şekillendirilmelerinde daha da önem kazanmaktadır. Toz metalurjisi ile bazen toplam maliyeti arttırmadan daha pahalı malzemeler kullanarak parça üretimi gerçekleştirilebilir [5].

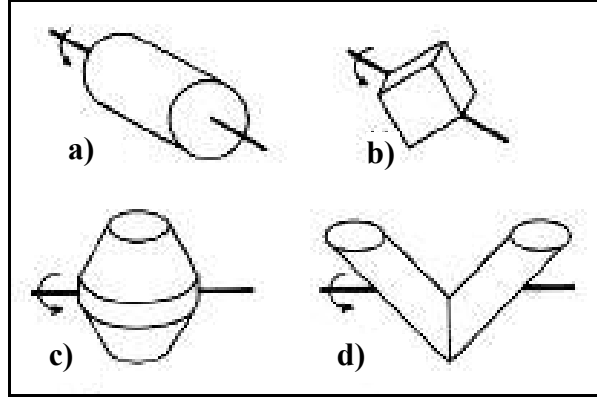
## **2.5. T/M ÜRÜNLERİN DEZAVANTAJLARI**

1. Düşük mekanik özellikler: Çoğu kez toz metalurjisi parçalarının mekanik özellikleri döküm ve dövme ile üretilenlerin özelliklerinden daha düşüktür. Yüksek gerilmelerin söz konusu olduğu uygulama alanlarında bu parçalar kullanılamaz. Bununla birlikte ilave masrafların göze alınması halinde ürünlerin mukavemet değerleri farklı malzeme, alternatif yöntem veya ikincil işlem teknikleri kullanımıyla yükseltilebilmektedir.
2. Nispeten yüksek kalıp maliyeti: Toz yönteminde yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve yüksek miktarda aşınma söz konusu olduğu için kalıplar pahalı malzemelerden ve büyük kütleler halinde yapılmaktadır. Bu nedenle toz metalurjisi ile üretilen parça sayısı en az 10,000 adet olmalıdır.

3. Yüksek malzeme maliyeti: Birim ağırlık esasına göre toz malzemeler dövme ve döküm malzemelerden daha pahalıdır. Ancak hurda şeklinde malzeme kaybının olmayışı ve talaşlı işlemin ortadan kaldırılması yüksek malzeme maliyetini dengelemektedir. Toz metalurjisi daha çok birim parça başına malzeme maliyetinin yüksek olmadığı küçük parçaların üretiminde kullanılır.
4. Dizayn sınırlamaları: Toz metalurjisi işlemi bazı şekillerdeki parçaların üretimi için uygun değildir. Parçalar kalıptan kolay çıkarılabilecek şekillerde olmalıdır. Kalınlık/çap oranı sınırlıdır. İnce kesitlerin eldesi zor olup parça boyutu pres kapasitelerinin belirlediği sınırları içinde olmalıdır.
5. Parça kesiti boyunca özelliklerin değişim göstermesi: Yoğunluğun parça içinde bir noktadan diğer bir noktaya değişimi özelliklerin de değişimine neden olmaktadır. Bunun ana nedeni parçaların tasarımı yapılırken dizayn kriterlerine riayet edilmemesidir. Üniorm olmayan şekillerin toz metalurjisi ile üretilmesi halinde bu tip problemlerle karşılaşılabilir [5].

## 2.6. TOZ KARIŞTIRMA

T/M teknolojisinin toz imalatından sonraki önemli bir aşaması, homojen bir şekilde karıştırılmasıdır. Metalik tozlar, yağlayıcılar ve isteğe bağlı alaşım elementleriyle homojen bir karışım elde etmek için karıştırılır. Karışım, imalatı yapılacak parçanın ağırlığına göre, % olarak karışım elementlerinin ağırlığı belirlenerek oluşturulur. Karışım içerisine, genellikle % 0.5-1.5 arası yağlayıcı ilave edilmektedir. Yağlayıcı olarak çinko stearat, stearik asit, metalik stearatlar ve parafin en çok kullanılanlarıdır. Özellikle küresel tozların paketlenmesinde, parafin, polivinil alkol (PVA) gibi bağlayıcılar sıklıkla kullanılmaktadır. Yağlayıcının temel amacı, toz taneleriyle takım yüzeyleri ve kalıp duvarları arasındaki sürtünmeyi azaltmak, tozların sıkıştırma sırasında kolay kaymalarını sağlamaktır. Karıştırma işlemi, Şekil 2.17’de verilen prizmatik, V şekilli ve çift taraflı konik kaplar tarafından gerçekleştirilir.



Şekil 2.17. Toz karıştırma için kullanılan bazı karıştırıcı tipleri (a. Silindirik şekilli, b. Kübik, c. Çift taraflı konik, d. V şekilli) [8].

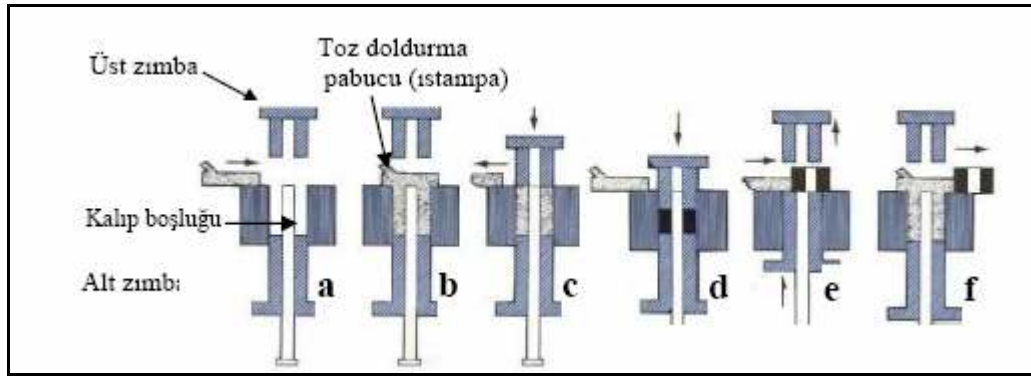
Karıştırma işleminde karıştırıcı doluluk oranı, minimum % 30-40 oranında olması tavsiye edilmektedir. Karıştırma devri 20-30 dev/dak hızda, 20-30 dakika süreyle yapılmaktadır. Optimum karıştırma işlemi, ham yoğunluğu ve sinterleme sonrası yoğunluğu etkilemektedir. Eğer, uygun karıştırma yapılmazsa, partiküller arasında mekanik kilitleme meydana gelerek sinterleme sonrası daha büyük gözenekli yapı meydana gelir ve bu ise mekanik özelliklerin kötüleşmesine neden olmaktadır. Yüksek hızda karıştırma homojenliği ortadan kaldırır ve toz tanelerinde plastik deformasyon meydana getirebilmektedir. İlave edilen yağlayıcının miktarı arttıkça, ham yoğunluk değerlerinin düştüğü ve ham biriketlerin sıyırma sırasında daha çok deformasyona uğradığı tespit edilmiştir [8].

## 2.7. SIKIŞTIRMA

Toz metalürjisindeki en önemli ve üçüncü işlem basamağı sıkıştırma"dır. Metal tozlar, özel olarak hazırlanmış kalıp içerisinde basınç etkisiyle briket hale getirilir. Sıkıştırmanın temel amacı, toz partiküllerin istenilen şekle dönüştürülmesi için, yapıya kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar yoğunluk kazandırılmasıdır. Sıkıştırma, aksel, izostatik ve hacim deformasyonu olarak üç farklı yöntemde gerçekleştirilir. Aksel sıkıştırma; tek ve çift etkili olabildiği gibi soğuk, sıcak ve ılık sıkıştırma şeklinde de olabilmektedir. İzostatik sıkıştırma soğuk ve sıcak olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilir. Hacimsel deformasyon işlemleri ise, toz dövme, toz ekstrüzyon ve toz haddeleme olarak uygulanmaktadır. Şekillendirme ve sıkıştırma yöntemine karar verilirken aşağıdaki parametreler dikkate alınır:

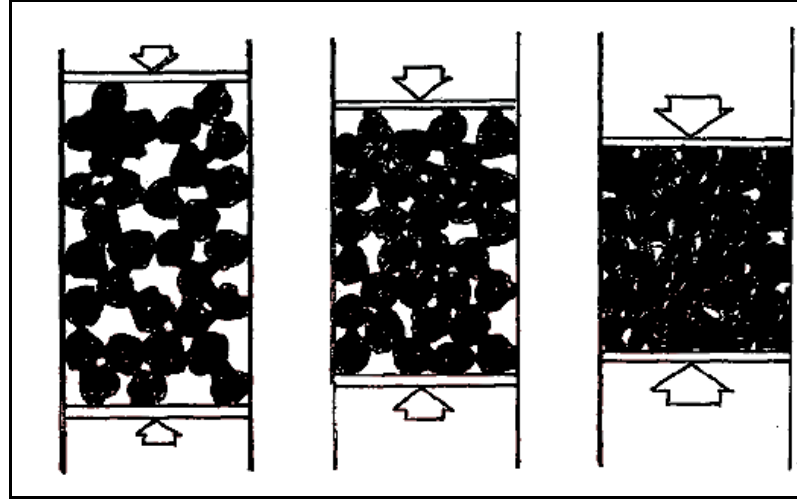
1. Kullanılacak tozun tipi (küresel, sünger, pul) ve toz imalat yöntemi
2. Bağlayıcı ve yağlayıcı kullanımı
3. Rijit kalıp kullanımı
4. Üretilecek malzemedен istenilen özellikler

Genellikle endüstriyel uygulamalarda, Şekil 2.18’de sistematik olarak gösterilmiş olan çift etkili sıkıştırma işlemi kullanılmaktadır.



Şekil 2.18. Toz metal parçaların sıkıştırma basamakları [8].

Çift etkili sıkıştırmada, zımbaların her ikisi de hareketlidir. Şekil 2.18,a ilk aşamadır ve imal edilecek parçanın kalıbı daha önceden tasarlanmış olup, bu aşamada kalıp prese montajlanır. Şekil 2.18,b ikinci aşamada, toz partikülleri kalıp doldurma pabucundan kalıba serbest akış durumunda doldurulur. Üçüncü aşamada, kalıp boşluğuna doldurulan toz, sistemin titreşim mekanizmasıyla sıkıştırma öncesi titreşimli yoğunluk kazandırma işlemi yapılarak doldurulan tozun kalıpta düzgün bir şekilde yerleşmesi sağlanır. Bu sırada da, ıstampa ile kalıp yüzeyinde artan tozlar diğer toz haznesine itilir ve üst zımba sıkıştırmak için dişi kalıp boşluğuna yerleşir (Şekil 2.18, c). Dördüncü aşamada, sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamada, toz taneleri sıkıştırmının etkisiyle belli bir değerde yoğunluk ve mukavemet kazanarak briket hale gelmektedir. Beşinci aşamada ise mukavemet ve yoğunluk kazandırılmış ham briket, belli bir sıyırma kuvvetiyle alt zımba tarafından kalıp boşluğundan çıkartılır. Altıncı ve son aşamada (Şekil 2.18,f), kalıp boşluğundan çıkarılan ham briket toz doldurma pabucu tarafından itilir ve ikinci parçanın preslenmesi için toz doldurma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 2.19’da görüldüğü gibi, sıkıştırma işlemi metalurjik açıdan üç aşamada ele alınabilir.

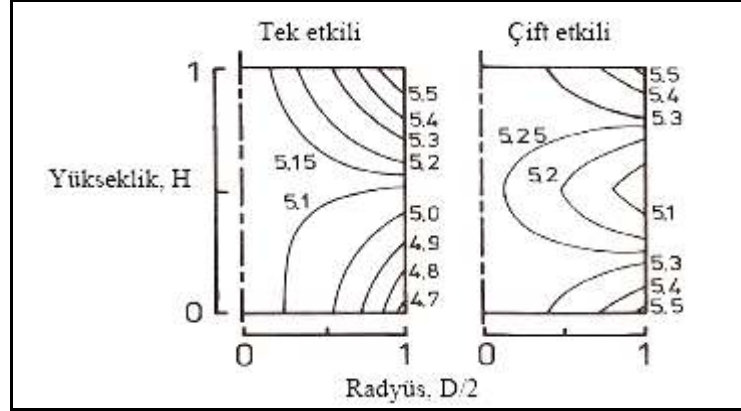


Şekil 2.19. Metalurjik açıdan sıkıştırma işlemi [9].

1. İlk aşamada, sıkıştırma basıncının uygulamasından sonra, toz tanelerinin yer değiştirmesi ve yeniden pozisyon belirlenmesi sağlanır. Bu aşamada, plastik şekillendirme yoktur, ancak bir kısım toz tanelerinde kırılma olabilir. Partikül boyutu, şekli, toz boyut dağılımı ve taneler arası sürtünme önemli rol oynar.
2. İkinci aşamada elastisite ve plastik deformasyon faktörleri baskındır. Partiküller arası soğuk şekillendirmeye bağlı olarak bağlar oluşabilir. Ayrıca, tanelerin mekaniksel kilitlenmeleri ve tane-tane etkileşimleri bu aşamada gerçekleşir.
3. Sıkıştırma basıncının arttığı ve sıkıştırmanın son aşamasında, toz tanelerinin kırılması, boşlukların dolması ve toz taneleri arasında soğuk kaynaklanma oluşmakta ve ham yoğunluk kazandırılmış olur. Toz sıkıştırmada temel problem tozlar ile kalıp cidarları arasındaki sürtünmedir. Sürtünme kuvveti uygulanan kuvvetin alt bölgede azalmasına neden olmaktadır. Toz kompaktlarda basınç-yoğunluk ve mukavemet arasındaki ilişki, kalıp malzemesinin pekleşme oranı, yüzey sürtünme katsayısı ve toz taneleri ile kimyasal reaksiyon eğilimine bağlıdır. Ayrıca, sıkıştırılabilir toz şekli ve büyüklüğü, yağlayıcı durumu ve sıkıştırma oranı ile ilişkilidir.

Tek eksenli sıkıştırmada toz kompaktın alt bölgesi ile üst bölgesi arasında yoğunluk farklılığı oluşmaktadır. Bu farklılık, Şekil 2.20’de görüldüğü gibi çift etkili sıkıştırma

ile dengelenebilmekte ve bu sayede sinterleme sonrası özellikler iyileştirilebilmektedir [8].



Şekil 2.20. Çift ve tek etkili sıkıştırmada radyüs ve yükseklik ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ilişkisi [8].

## 2.8. SİNERLEME

Sinterleme sıkıştırılmış parçaların mukavemet kazandığı bir ısıl işlemdir. Demir esaslı alaşımlar için sinterleme sıcaklığı genellikle  $1100\text{-}1150\text{ }^\circ\text{C}$  arasındadır. Bazı durumlarda sinterleme sıcaklığı  $1250\text{ }^\circ\text{C}$  ye kadar çıkabilir. Sinterleme işleminin süresi uygulamanın çeşidine göre 10 ile 60 dakika arasında değişebilir. Sinter fırınlarında kullanılan bant genellikle elek tipindedir ve malzemeler bir kap içine yerleştirildikten sonra bant üzerine yerleştirilir. Diğer tip (arabalı, askılı vs.) fırınlar da kullanılmaktadır. Sinterleme sırasında oluşacak oksidasyonu engellemek için kullanılan atmosfer kırılmış amonyak veya azot gibi atmosferlerdir. Sinterlenmiş parçalarda örneğin demir esaslı alaşımlarda karbon içeriğinin kontrolü nihai özellikler açısından önemlidir. Sinterleme işlemi aşağıdaki kademelerden oluşur.

1. Yağlayıcıların giderilmesi
2. Sinterleme
3. Soğutma

Sinterleme fırınının ilk bölgesinde yağlayıcının uçması sağlanır. Aynı zamanda toz tanecikleri üzerindeki oksitler fırın içinde redüklenirler ve birbirine temas eden taneciklerde ilk bağlanma başlar. Sinterlemenin ana mekanizmaları yüzey ve hacim difüzyonudur. Difüzyon ile katkı maddelerinin toz içine difüze olmaları sağlanır.

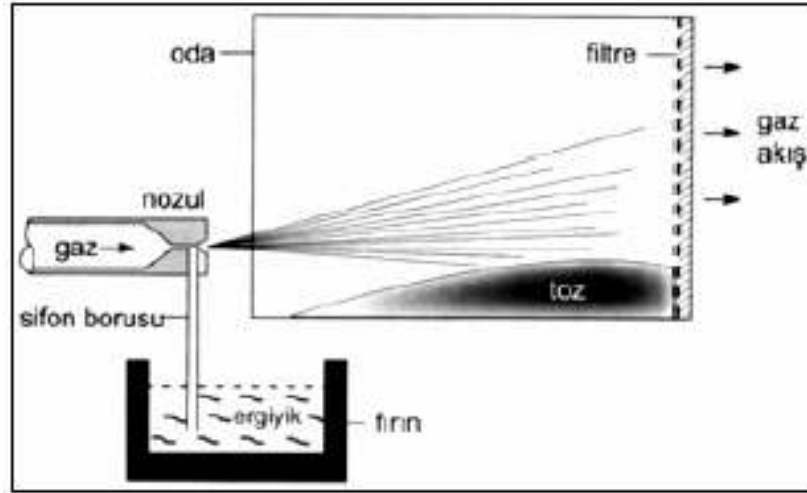


Termodinamik kurallarına göre enerjiyi minimize edebilmek için porozitelerin yuvarlanması ve küçüklerin büyüklerin gelişimine yardımcı olabilmek için kaybolduğu gözlenir. Sinterleme fırınının soğutma bölgesinde parçaların hava ile temas ederek oksitlenmelerini engellemek amacıyla oksitlenmeden koruyucu bir gaz altında soğumaları sağlanır. Soğuma sıcaklığı 850-500 °C civarındadır ve malzemenin mekanik özellikleri meydana gelen faz dönüşümleri nedeniyle soğutma hızı ile yakından ilişkilidir. Sinterleme sırasında boyutta orta derecede değişim görülür. Birçok malzeme küçüldüğü halde, bakır gibi bazı alaşımlarda boyutta artış görülür. Baskı kalıbı tasarlanırken bu değişimlerin de göz önünde bulundurulması gerekir [23].

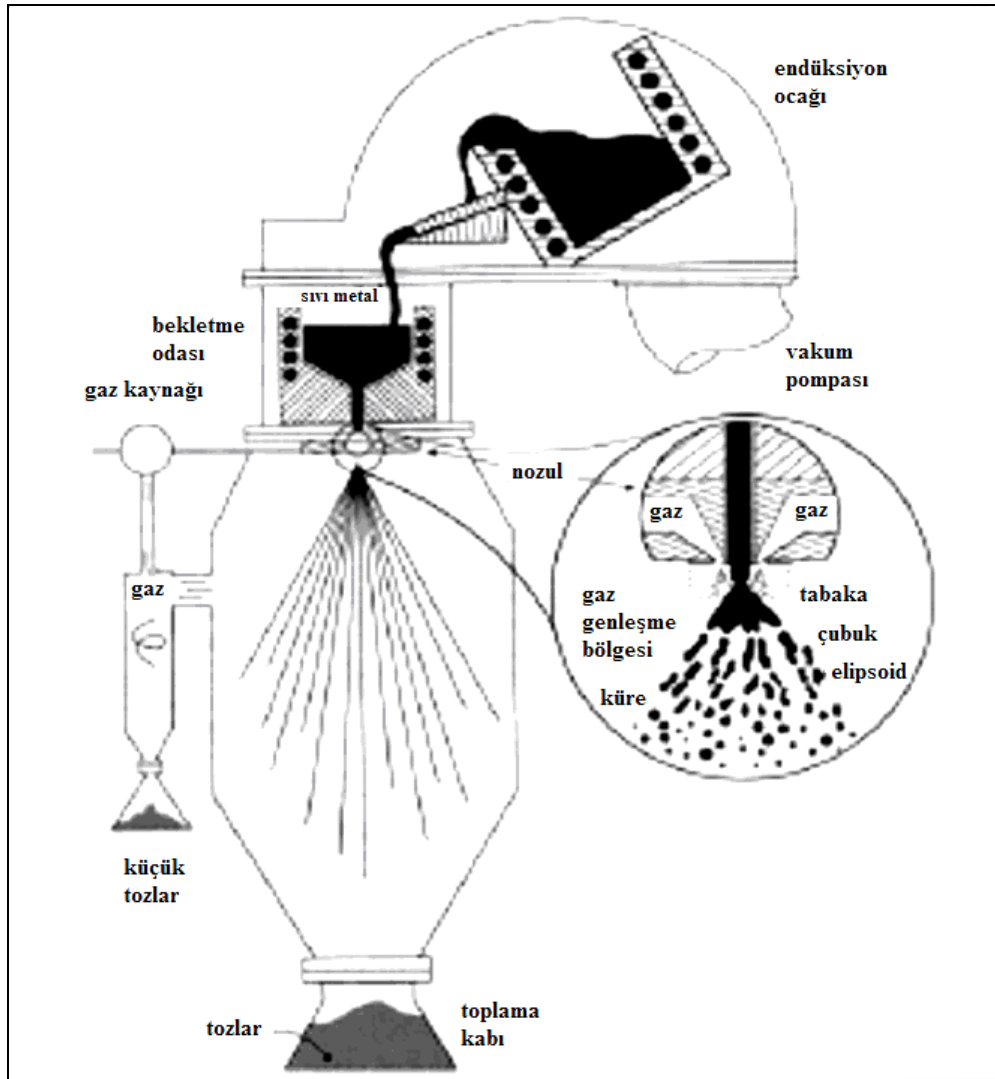
## BÖLÜM 3

### 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 genişmesi sayesinde parçalanır. Donanım tasarımı, ergitilmiş malzemenin besleme mekanizmasına ve ergitme ve toz toplama odasının yapısına göre değişiklik gösterir. Bununla birlikte ana fikir enerjinin (hızlı genişleyen gazdan) sıvı metal demetine aktararak damlacık oluşturması ve bunların parçacık olarak hemen katılaşmasıdır. Düşük sıcaklık atomizasyon üniteleri Şekil 3.1’de gösterildiği gibi yatay olarak tasarlanır. Nozuldan çıkan yüksek hızlı gaz, sifon etkisi meydana getirerek sıvı metali gaz genişleme bölgesine çeker. Yüksek gaz hızı daha küçük damlacıklar oluşturur. Toz toplama odası boyunca uçan damlacıklar ısı kaybederek parçacıklar halinde katılırlar. Yatay atomizasyon ünitelerinde geniş filtre alanı tozları tutarken gaz geçişine müsaade eder. Yüksek sıcaklıkta ergiyen metaller için, tozların oksitlenmesini önlemek amacıyla, asal gaz doldurulmuş kapalı bir oda kullanılır. Şekil 3.2’de düşey gaz atomizasyonu ünitesi şematik olarak gösterilmiştir. Ergiyik endüksiyon ocağı ile sıvılaştırma eğrisinin çok üzerinde bir sıcaklığa (aşırı ısıtma) ısıtılarak soğuk nozula gönderilir. Farklı bir tasarım olarak, sıvı metal demetinin çevresinde dairesel olarak yerleştirilmiş çoklu nozullarla gaz jetleri oluşturulabilir.



Şekil 3.1. Yatay gaz atomizasyonunun şematik gösterimi [13].



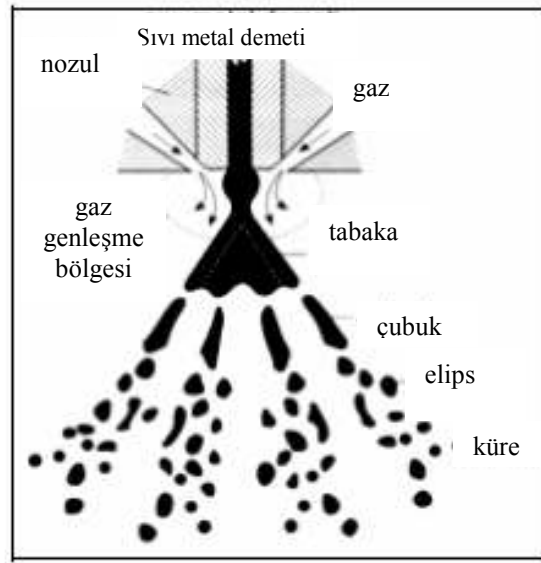
Şekil 3.2. Düşey gaz atomizasyonu ünitesi [13].

Atomizasyonda kullanılan gazın miktarından dolayı, geri basınç oluşumunu engellemek için gazın tahliyesi önemlidir. Düşey asal gaz atomizasyonu ünitelerinde siklon ayırıcı kullanmak gereklidir. Siklon gazın geçişine ve geri dönüşümüne müsaade ederken tozları tutar. Atomizasyon kulesinin boyutu en büyük damlacıkların kule duvarına çarpmadan önce katılaşmasına fırsat vermelidir. 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 viskozite, 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. Tipik gaz atomizatörü işletme değişkenlerine örnek olarak Çizelge 3.1’de nikel esaslı süper alaşım tozunun üretim değişkenleri verilmiştir. Pratik olarak, gaz atomizasyonu 100 kg/dak’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, paslanmaz çelikler, kobalt alaşımları, alüminyum alaşımları, nikel alaşımları, değerli metaller (altın,gümüş) ve sert lehim gibi düşük ergime sıcaklığına sahip pek çok alaşım sayılabilir [23].

Çizelge 3.1. Nikel süper alaşım tozu üretimi için örnek atomizasyon parametreleri [13].

<b>Parametre</b>	<b>Koşullar</b>
Alaşım ergime sıcaklığı	1400 °C
Sıvı metal sıcaklığı	1550 °C
Atomizasyon gazı	Argon
Gaz basıncı	2 MPa
Gaz akış debisi	8 m <sup>3</sup> /dak
Nozul çıkışında gaz hızı	100 m/s
Gaz-sıvı metal çarpışma açısı	40 °
Sıvı metal debisi	20 kg/dak
Ortalama parçacık boyutu	120 µm

Gaz atomizasyonunda sıvı metale ne kadar çok enerji aktarılabilirse üretilen parçacıklar da o kadar küçük olur. Gaz-ergiyik etkileşimi yüksek hızlı fotoğraf teknikleri ile çalışılmış ve atomizasyon olayının anlaşılmasına yardımcı olan Şekil 3.3'deki sema elde edilmiştir. Sıvı demetinin çevresindeki genişleyen gazlar Şekil 3.4'de gösterildiği gibi önemli basınç düşmesine ve sıvı demetinin parçalanmasına yol açar. Bu yüksek hızlı kademeli lazer fotoğrafları, sıvı demetinin 0,07 s gibi çok kısa aralıkta değişim durumunu göstermektedir [2].

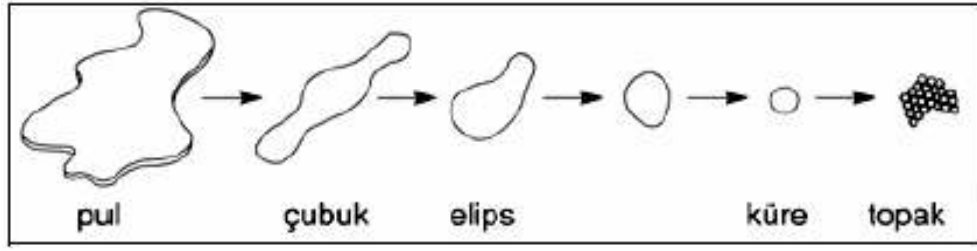


Şekil 3.3. Gaz atomizasyon ile metal tozu üretimi [2].



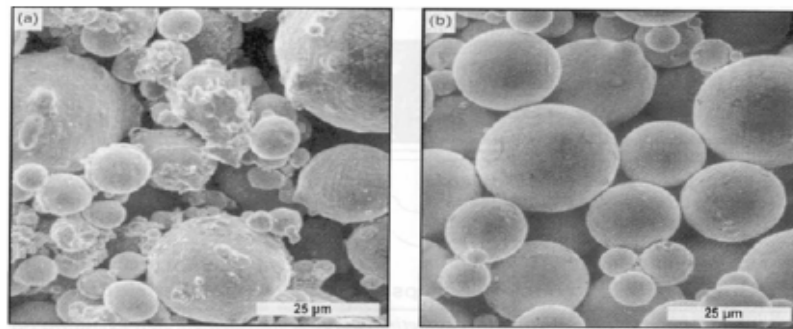
Şekil 3.4. Paslanmaz çeliğin gaz atomizasyonu sırasında meydana gelen türbülans [2].

Gaz basıncının düşmesi sıvı demetini nozuldan çıktıktan sonra içi boş bir koni sekline getirir. İnce koni, hacmine göre yüzey alanının yüksek olması nedeniyle kararlı değildir. Aşırı ısıtma ile sıvının erken katılaşmasının önlenildiği varsayılırsa, genişleyen gazın kesme kuvvetleri ile sıvı parçalanmaya devam eder. Bu etki ile Şekil 3.5'te gösterildiği üzere önce çubuk ve daha sonra küçük küresel parçacıklar oluşur.



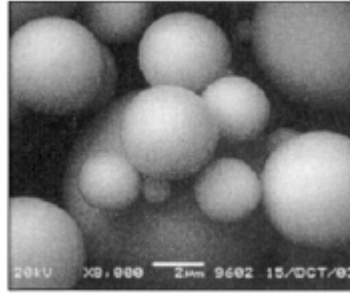
Şekil 3.5. Atomizasyon sırasında sıvı demetinin parçalanmasında damlacık şekil değişiminin şematik olarak gösterilmesi [2].

Eğer küreler çok küçükse çoğunlukla topaklanır. Sıvının ağırlığı, aşırı ısıtma sıcaklığı ve ivme kuvvetleri boyutun küçültülmesini sınırlamaktadır. Ergiyiğin sıvılaştırma sıcaklığının üzerine aşırı ısıtılması viskoziteyi azaltır ve atomizasyon sonrası katılma süresini uzatır. Daha uzun katılma süresi parçacıkların küreselleşmesine yardımcı olur. Aşırı ısıtmanın miktarına bağlı olarak katılma farklı şekillerden birini meydana getirir. Buna ilaveten, nozulun yakınındaki gazın türbülans hareketinden dolayı küçük parçacıklar tekrar gaz genişleme bölgesine girer. Katılmış olan bu parçacıklar henüz katılmamış olan iri tanelerin uçuş yolu içerisine girerek uydulaşmanın meydana gelmesine neden olur. Gaz atomize tozlarda türbülans gaz dolaşımı nedeniyle meydana gelen uydulaşmalar ile nozul yakınındaki gaz dolaşımının kontrolü ile uydulaşmanın önlenmesi tozların karşılaştırılması Şekil 3.6'da verilmiştir. Uydulaşmanın önlenmesi paketleme ve akış özelliğinin iyileşmesi açısından önemlidir. İşlem değişkenlerinin etkisi ergiyiğe enerji aktarılması koşulları ile en iyi şekilde anlaşılabilir. Gaz çıkışı ve sıvı demeti arasındaki kısa mesafe enerji aktarılmasına destek olarak küçük tozların oluşumuna yardımcı olur. Nozuldan çıkan gazın hızı ve aşırı ısıtma miktarı oluşacak tozun boyutunu belirler.



Şekil 3.6. Asal gazla atomize ile elde edilen yaklaşık 25 µm boyutundaki a) çarpışma, topaklanma ve uydulaşma görülen tozlar ve b) uydulaşma görülmeyen tozlar [23].

Gaz atomizasyonunun çoğu Weber sayısı (Atalet kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine oranını ifade eden boyutsuz parametre) 1000'in altında gerçekleştirilir. Düşük ergiyik/gaz kütleli debi oranları ve büyük Weber sayısı (yüksek damlacık hızı) ve küçük tozların elde edilmesini sağlar. Bazı malzemelerin gaz atomizasyonunda parçacık boyutunun gaz hızının tersi ile bağıntılı olduğu gözlenmiştir. Atomizasyon basıncı yüksek ve parçacık boyutu küçük olduğunda damlacıkların kristalleşmeden hızlı katılaşması mümkündür. Böylece amorf parçacıklar elde edilir. Şekil 3.7'de bu şekilde üretilmiş alüminyum alaşımının taramalı elektron mikroskop görüntüsü verilmiştir. Şekildeki parçacıklarda kristalleşme işaretleri yoktur. Böyle parçacıklar gaz atomizasyonunun yüksek performanslı parçalar için istenen bir üründür ve kristalleşme ve mikroyapı tozların yoğunlaştırılması sırasında kontrol edilir [23].



Şekil 3.7. Gaz atomizasyon ile elde edilmiş amorf Al-Fe-Y alaşım tozları [23].

Gaz atomize tozların parçacık boyutu genellikle log-normal dağılıma uymaktadır. Dağılım genişliği ortalama toz boyutu küçüldükçe daralır. Böylece, ampirik bağıntılar hesaplanan veya ölçülen ortalama toz boyutuna göre parçacık boyutu dağılım genişliğini belirlemede başarılı olmuştur. İstenilen boyutta toz üretebilmek amacıyla damlacık boyutları lazer parçacık boyutu analizi ile takip edilerek kütleli debi oranı kontrol edilebilir. Gaz atomize tozlar iyi paketlenme ve akış özelliğine sahiptir, görünür ve vurgu yoğunlukları % 60 - 65 teorik yoğunluk civarındadır.

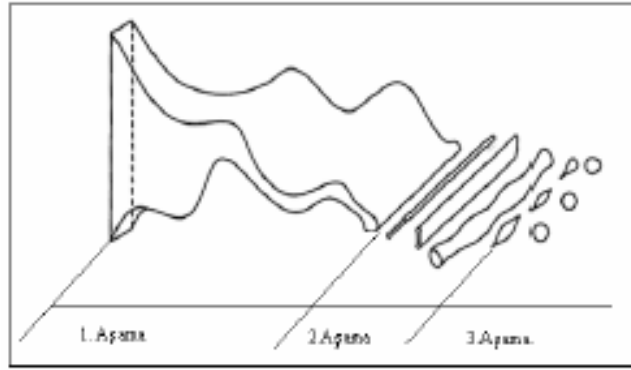
### 3.1. GAZ ATOMİZASYON MEKANİZMALARI

Bir nozuldan atmosfere aniden çıkan sıvı demeti, sıvının ve onu çevreleyen gazın nozul tasarımına bağlı olarak, silindirik sütun, yassı tabaka veya konik bir yüzey

şeklini alabilir. Bu damlacık şekillenme mekanizmaları üç aşamadan meydana gelmektedir:

1. Hızla artan genlikteki sinüs dalgasının başlaması,
2. Dalganın büyümesiyle çubuk (ligament) oluşması,
3. Çubuğun bölünmesiyle küresel damlacıkların oluşması.

Gordon , Dombrowski ve Johns sıvıların atomizasyon mekanizmaları ile ilgili modelleme çalışmaları yapmışlardır. Gordon yapmış olduğu çalışmada, hava jetine maruz sıvı damlaların parçalanması, damlacıkların çapı ve bunun oluşum zamanıyla ilgili bir model ortaya koymuştur. Dombrowski ve Johns ise, yassı tabakadan damlacık oluşumu için fiziksel bir model geliştirmişlerdir (Şekil 3.8).



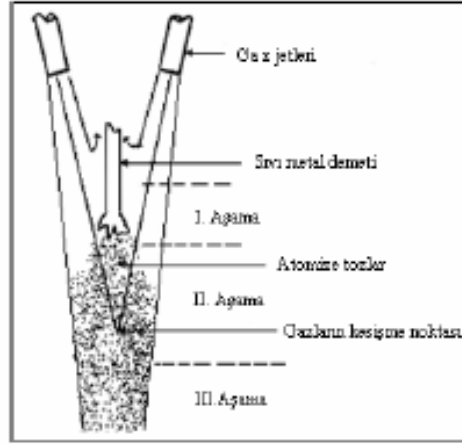
Şekil 3.8. Yassı tabakadan damlacık oluşumu [3].

Bu modelde öncelikle, tabaka üzerinde kritik bir genliğe ulaşana kadar dalgalar büyür. Sonra dalganın tepe ve dip bölgelerinde yırtılmalar oluşur ve yarım dalga boyuna karşılık gelen kısımlar kırılır. Kırılan bu kısımlar yüzey gerilmesinin etkisiyle kararsız çubuk haline gelerek damlacıklar oluşur . Ergiyik metallerin atomizasyonu, toz oluşumu sırasında sıcaklığın düşmesi sonucu, metal damlacıkların katılaşması nedeniyle diğer sıvıların atomizasyonundan ayrılır. Literatürde, ergimiş metallerin atomizasyonu ile ilgili mekanizmaların modellenmesi See ve Johnston, Mehrotra, Bürger ve ark, Putimsev ve Ünal tarafından çalışılmıştır. See ve Johnston, yaptıkları çalışmalar sonucunda ergiyik metallerin gaz ile atomizasyonunda üç aşama tanımlamışlardır:



1. Birincil bölünme
2. İkincil bölünme
3. Katılaşma

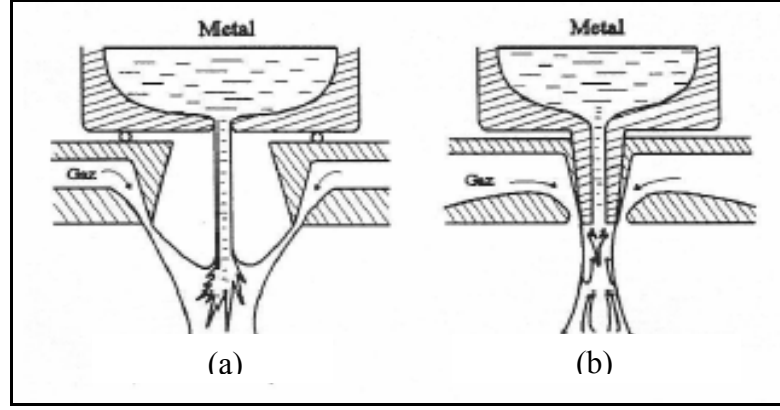
Bu aşamalar Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Gaz atomizasyonunda mevcut üç aşamanın şematik gösterimi, See modeli [3].

Birinci aşamada sıvı metal demeti, yüzeyinde kararsızlığın başlayıp büyümesinde etkili olan türbülans sebebiyle dinamik basıncın değiştiği yüksek hızlı gaz akış bölgesine girer. Artan dinamik basınç, sıvı metal demetinden malzeme kopmasına sebep olur. Eğer dinamik basınç, yüzey kuvvetinden kaynaklanan yeniden yapılanma kuvvetini aşarsa ikincil bölünme meydana gelir. Üçüncül aşamada ise katılaşma ve küreselleşme zamanına bağlı olarak metal parçacık şekillenir. See ve Johnston’ın gaz atomizasyonu ile metal tozu oluşum modelinin aşamaları, German tarafından daha açık bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.10). Gaz genişleme bölgesindeki emme basıncı sebebiyle eriyiğin, önce içi boş ince bir konik tabaka şeklini, daha sonra da çubuk, elipsoid ve küre şeklini aldığı görülmektedir. Ünal ise alüminyum tozlarının oluşum mekanizmasını, yakından eşlemeli nozullar kullanarak atomizasyon işlemi esnasında çekmiş olduğu fotoğraflarla incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada, birincil bölünmede yaklaşık olarak 500 µm çapındaki damlacıkların oluştuğu, daha ince tozların ise ikincil bölünmenin ürünü olduğunu belirtmiştir.





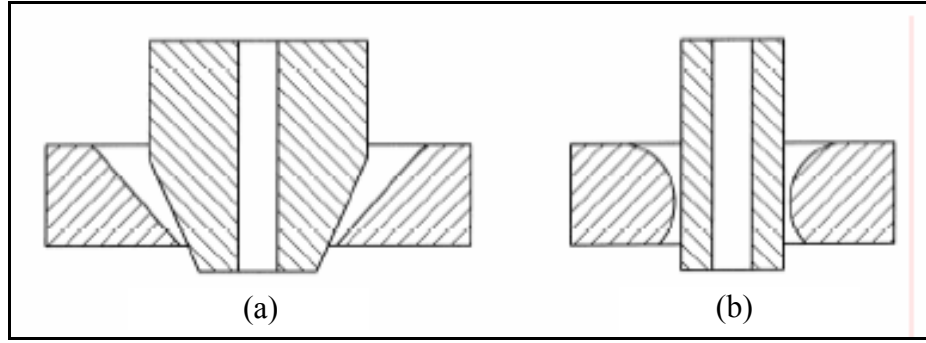
Şekil 3.11. Atomizasyon sistemleri (şematik): a) Serbest düşmeli, b) Yakından eşlemeli [6].

Yakından eşlemeli sistemler yüksek verimde çalışmalarına rağmen bazı zorluklara sahiptir. Bunlardan en önemlisi metal akış borusu ucunda oluşan basınçtır. Bu basınç negatif ya da pozitif olabilir. Yüksek atomizasyon basınçlarında, sıvı metal akışının kararlılığı, nozul ve metal akış borusunun boru ucunda negatif basınç oluşturacak geometride tasarlanmasıyla kontrol edilebilir. Yakından eşlemeli sistemlerde karşılaşılan sorunlardan bir diğeri ise yüksek atomizasyon basınçlarında sıvı metalin, metal akış borusu içinde katılaşması sorunudur. Sıvı metalin katılaşması sonucu atomizasyon işlemi sona erer. Bu yüzden metal ergime sıcaklığının 100-200 °C üzerine ısıtılır. Aşırı ısıtılmış metal atomizasyon bölgesine girmeden önce seramik akış borusunun içinden geçer. Sıvı metalin seramik akış borusu içersinde katılaşmasını önlemek amacıyla seramik boru direnç telleri ile ısıtılır. Bu sistemlerde serbest düşme sistemlerine göre daha kolay bölünme gerçekleşir ve daha ince boyutlarda, sıkıştırılma kapasitesi ve akıcılığı yüksek küresel tozlar üretilir [1].

### 3.3. NOZUL ÇEŞİTLERİ

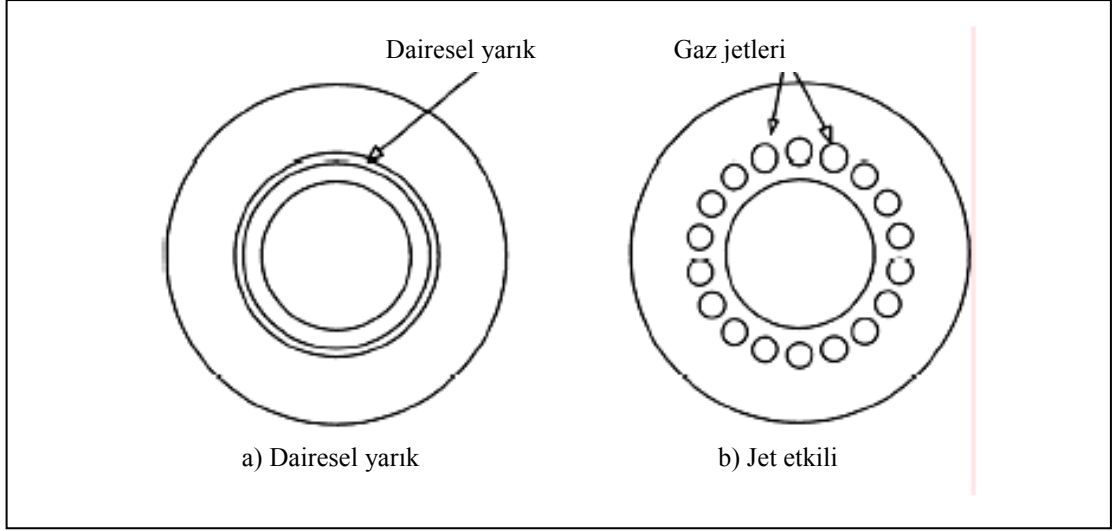
Nozul parçası, gaz iletim sisteminde yüksek hızlı gaz jeti ve sıvı metal arasındaki etkileşimi sağlayan önemli bir parçadır. Atomizasyon işleminde nozul geometrisi oldukça önemli bir yere sahiptir. Nozul, toz üretim ünitesine monte edildikten sonra geometrisinde herhangi bir değişiklik oluşmadığı için atomizasyon ünitesinin sabit parçalarından bir tanesidir. Bu yüzden atomizasyon işlemi gaz basıncı, gaz tipi, sıvı metal akış hızı, akış borusunun çıkıntı mesafesi ve sıvı metalin aşırı ısıtılması gibi işlem parametrelerinin optimizasyonu ile gerçekleştirilir. Buna rağmen bazı

parametrelerdeki değişim oldukça sınırlıdır. Örneğin helyum gazının kullanımı ortalama toz boyutunu düşürür fakat azot gazının kullanımı ekonomiktir. Nozul tipleri ile ilgili teknik bilgilerin bilimsel bir sır olarak saklanmasından dolayı nozul tipleri genel olarak sınıflandırılmamaktadır. Az sayıda yayınlanmış bilgilere göre nozullar geometrilerine göre ikiye ayrılırlar (Şekil 3.12) : 1) Süpersonik Nozullar (daralan-geişleyen geometri), 2) Sonik Nozullar (daralan geometri).



Şekil 3.12. Farklı nozul geometrileri: a) Sonik geometri b) Süpersonik geometri [25].

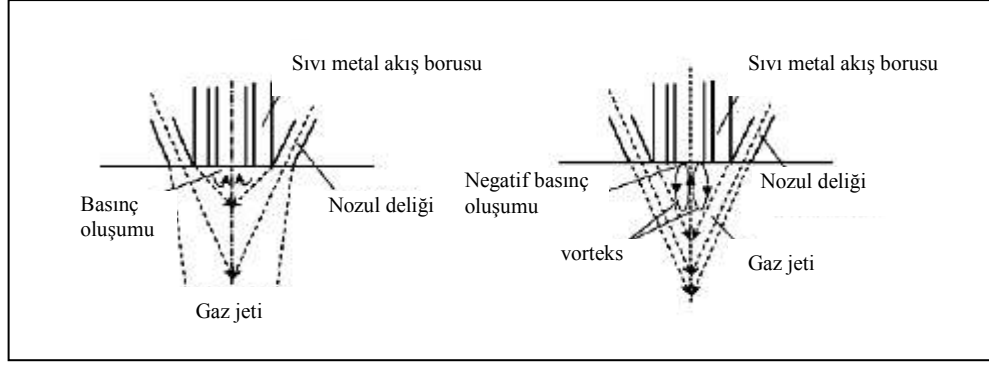
Sıvı metaller yüksek yüzey gerilmesine sahip olduğu için atomizasyonlarında genellikle süpersonik geometri nozullar kullanılır. Sonik geometriye sahip nozullar ile oldukça yüksek basınç değerlerinde ses üstü hızlara ulaşılırken, süpersonik geometriye sahip nozullarda ise daha düşük atomizasyon basınçlarında ses üstü hızlara ulaşmak mümkündür. Nozullar sahip oldukları gaz çıkış geometrilerine göre jet etkili veya dairesel yarıklı olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 3.13). Yüksek verimli atomizasyon işlemi için yapılması gereken en önemli aşama uygun şartlarda çalışabilecek bir nozul tasarımının yapılmasıdır. Bunun için nozul performansının araştırılması gerekir. Nozul performansının incelenmesi için nozula sadece gazın gönderilmesi sonucu oluşan gaz akış bölgeleri incelenir.



Şekil 3.13. Dairesel yarıklar ve jet etkili nozulların şematik resimleri [25].

### 3.4. NEGATİF BASINÇ OLUŞUMU

Sıvı metal akış borusu ucunda oluşan gaz akışı ve negatif basınç oluşumu gaz dinamiğine bağlıdır. Gaz atomizasyonu işlemi esnasında sıvı metal akış borusunun ucundaki gaz basıncı atomizasyon değişkenlerinin durumuna göre pozitif veya negatif olabilir (Şekil 3.14). Negatif basınç oluşumu sonucunda sıvı metal potadan metal akış borusuna doğru çekilir. Pozitif basınç oluşumu sonucu metal akışı gerçekleşmediği gibi pota içinde püskürme oluşabilir. Bu yüzden negatif basınç oluşumu istenen bir durumdur. Metal akış borusu ucunda oluşan negatif basınç, sıvı metale etki eden dolaşım bölgesindeki gaz akış kuvvetlerinin toplamıdır. Atomizasyon işleminde gaz akışı nozul geometrisine bağlıdır. Yapılan araştırmalarda, süpersonik geometrili nozulların, sonik geometrili nozullara göre daha kuvvetli negatif basınç oluşumu gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Negatif basınç oluşumuna etki eden en önemli faktörlerden biri metal akış borusunun nozul gaz çıkışına göre konumudur. Genel olarak metal akış borusu çıkıntı mesafesinin artması sonucu daha etkili negatif basınç oluşumu gerçekleşir fakat borunun uzaması sıvı metalin donması problemini beraberinde getirir. Le ve Henein, yaptığı araştırmalarda, metal akış borusunun nozul çıkışının 10 mm altında olduğu konumda maksimum negatif basıncın oluştuğunu tespit etmişlerdir.

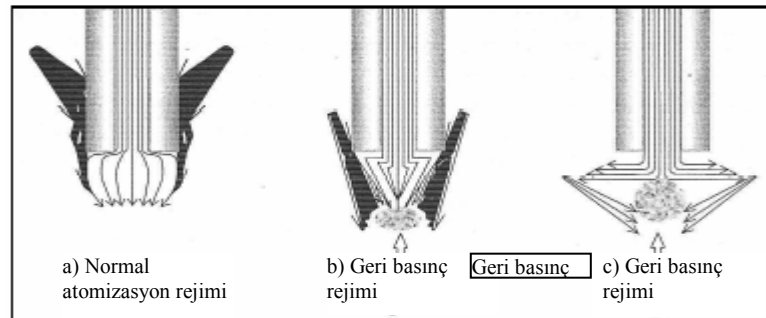


Şekil 3.14. Metal akış borusu çıkışında basınç oluşumu [25].

Negatif basınç ölçümleri atomizasyon işleminin verimliliğinin araştırılması açısından oldukça önemlidir. Yüksek basınçlı gaz atomizasyonunda negatif basınç bölgesi, metal akış borusu ucundaki sıvı metal beslemesini kontrol edebilir. Negatif basınç oluşumu daha dengeli bir sıvı metal beslemesi sağlar ve böylelikle toz boyut dağılımı daha kolay kontrol edilir.

### 3.5. GERİ BASINÇ OLUŞUMU

Atomizasyon işlemi esnasında akış borusunun ucunda oluşan basınç değerinin pozitif olması durumunda sıvı metal akışı yavaşlar hatta bazı durumlarda durur yada ters yönde akış özelliği gösterir. Bu basınç değerinin atmosfer basıncından büyük olması durumunda gaz, akış borusu içerisine girer ve bu durum genellikle metalin katılaşmasına sebep olur. Bu duruma ters akış durumu denir. Chen ve diğerleri yaptığı araştırmalarda metal akış borusu çıkıntı mesafesinin değişmesi ile birlikte atomizasyon işleminde 3 farklı aşamanın gerçekleşebileceğini gözlemlemişlerdir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi [6].

Metal akış borusu, nozul gaz çıkışının alt bölgelerinde yerleştirilmesi sonucu gaz boru çeperlerine çarpar ve bu çeperler boyunca hareket ederek sıvı metal ile buluşur. Bu aşamaya normal aşama denir. Metal akış borusu çıkıntı mesafesi azaldıkça atomizasyon hızı azalır ve sıfır olur. Bu aşama geri basınç oluşumu aşamasıdır. Bu aşamada gaz jetleri metal akış borusunun uç çevresinde buluşurlar ve sıvı metalin akmasına izin vermezler. Geri basınç oluşumu atomizasyon gaz basıncına, nozul geometrisine ve metal akış borusu çıkıntı mesafesine bağlıdır. Metal akış borusu çıkıntı mesafesinin daha da azalmasıyla birlikte gaz jetlerinin buluşma noktası bir miktar aşağı yönde kayar. Bu aşamada da geri basınç bölgesi mevcuttur fakat metal akış borusunun hemen ucunda değil belli bir miktar alt bölgededir [25].

## **BÖLÜM 4**

### **DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu çalışmada, Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi atelye ve laboratuvarlarında gaz atomizasyon ünitesi imal edilmiştir. İmal edilen gaz atomizasyon ünitesinde kalay tozu üretimi gerçekleştirilmiş ve gaz basıncı ile nozul çapının toz tane boyut ve dağılımına etkisi araştırılmıştır. Üç ayrı nozul çapı ve her çap için dört farklı gaz basıncı ile yapılan atomizasyon çalışmalarından elde edilen kalay tozlarının şekil ve morfolojileri taramalı elektron mikroskobu ile, toz boyutu ise lazer ışın toz boyutu ölçme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

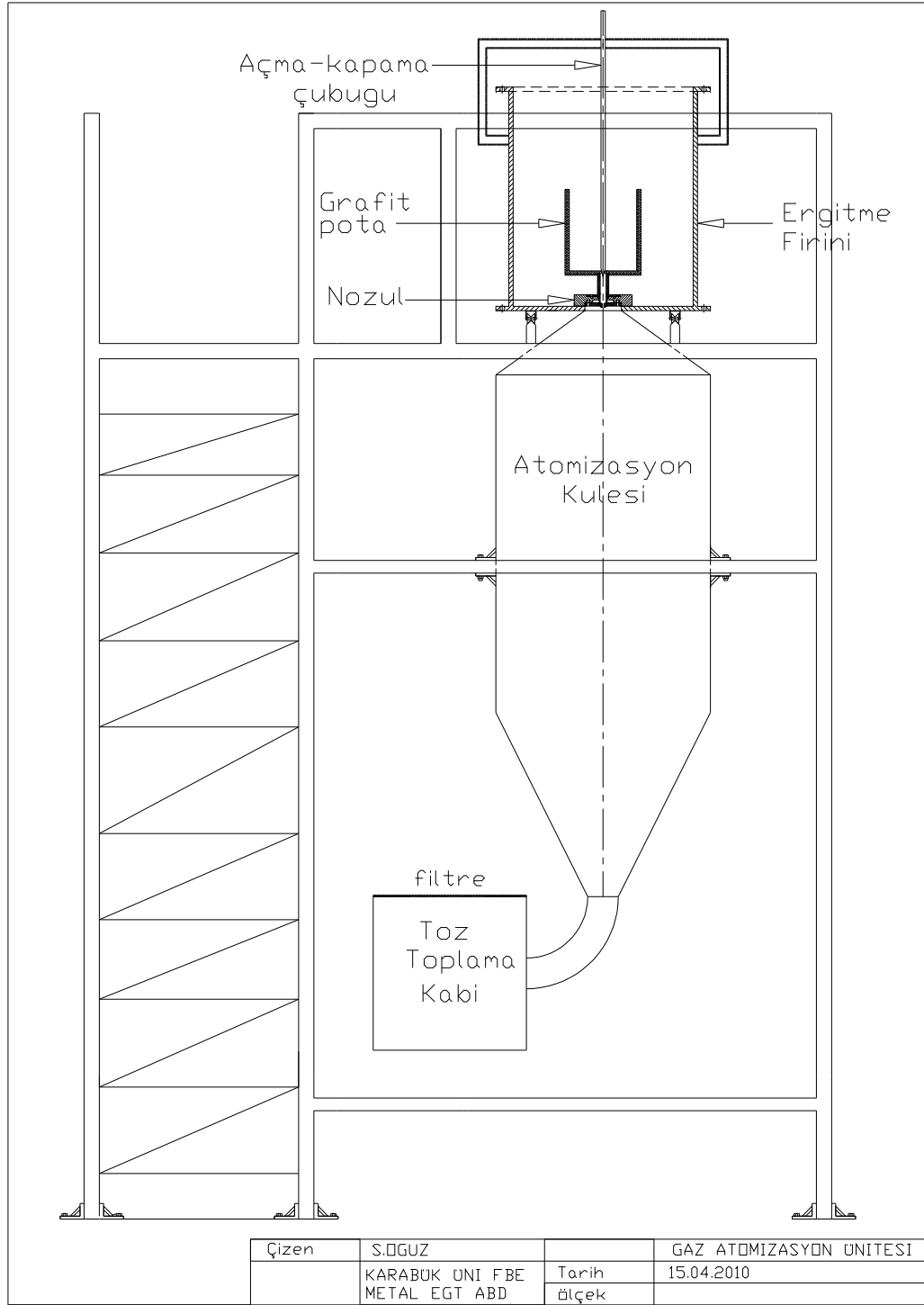
#### **4.1. KARABÜK ÜNİVERSİTESİ GAZ ATOMİZASYON ÜNİTESİ**

Atomizasyonla toz üretimi Şekil 4.1 ve 4.2’de görülen ve gaz sistemi, ergitme fırını, nozul, atomizasyon kulesi ve toz toplama kabı olmak üzere beş ana bölümden oluşan Karabük Üniversitesi Gaz Atomizasyon Ünitesinde gerçekleştirilmiştir.





Şekil 4.1. Karabük Üniversitesi gaz atomizasyon ünitesi (1-Gaz sistemi, 2-Ergitme fırını, 3-Atomizasyon kulesi, 4-Kontrol panosu, 5- Termokupl).



Şekil 4.2. Karabük Üniversitesi gaz atomizasyon ünitesi (şematik)

#### 4.1.1. Gaz Sistemi

Yapılan deneylerde atomizasyon gazı kaynağı olarak 200 bar işletme basıncına sahip basınçlı tüp kullanılmıştır. Atomizasyon basıncının ayarlanması, tüpün çıkışına

yerleştirilen bir regülatör yardımı ile yapılmıştır. Regülatör çıkısına bir küresel vana yerleştirilmiştir. Atomizasyon işlemi başladıktan sonra manometrede okunan basınç değeri atomizasyon gaz basıncı olarak kabul edilmiştir. Atomizasyon gazı olarak argon kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Argon tüpü ve regülatör.

#### 4.1.2. Ergitme Fırını

Ergitme işlemi, atomizasyon kulesi üzerindeki fırın içersine yerleştirilmiş grafit potada gerçekleştirilmiştir. Fırın 1500 °C sıcaklığa çıkabilecek kapasitededir. Ergitme fırını atomizasyon kulesinin üzerinde yatay şekilde hareket edebilmesi için raylı sistem şeklinde tasarlanmıştır. Bu sayede atomizasyon kulesinin temizliği daha basit şekilde yapılabilmektedir. Üst kapağı sıvı metalin akışını kontrol edebilmeyi sağlayan açma kapama çubuğunun ve sıcaklığını ölçmek için kullanılacak termokuplun geçebileceği şekilde delinmiştir. Fırının toplam üç ayrı noktasına termokupl yerleştirilmiş ve bunlar elektronik bir kontrol tablosuna bağlanarak ısıtma işleminin hassas bir şekilde kontrol edilmesine imkan tanınmıştır. Ergitme fırını, grafit pota ve açma kapama çubuğu Şekil 4.4-4.6'da görülmektedir. Isıtma işlemi

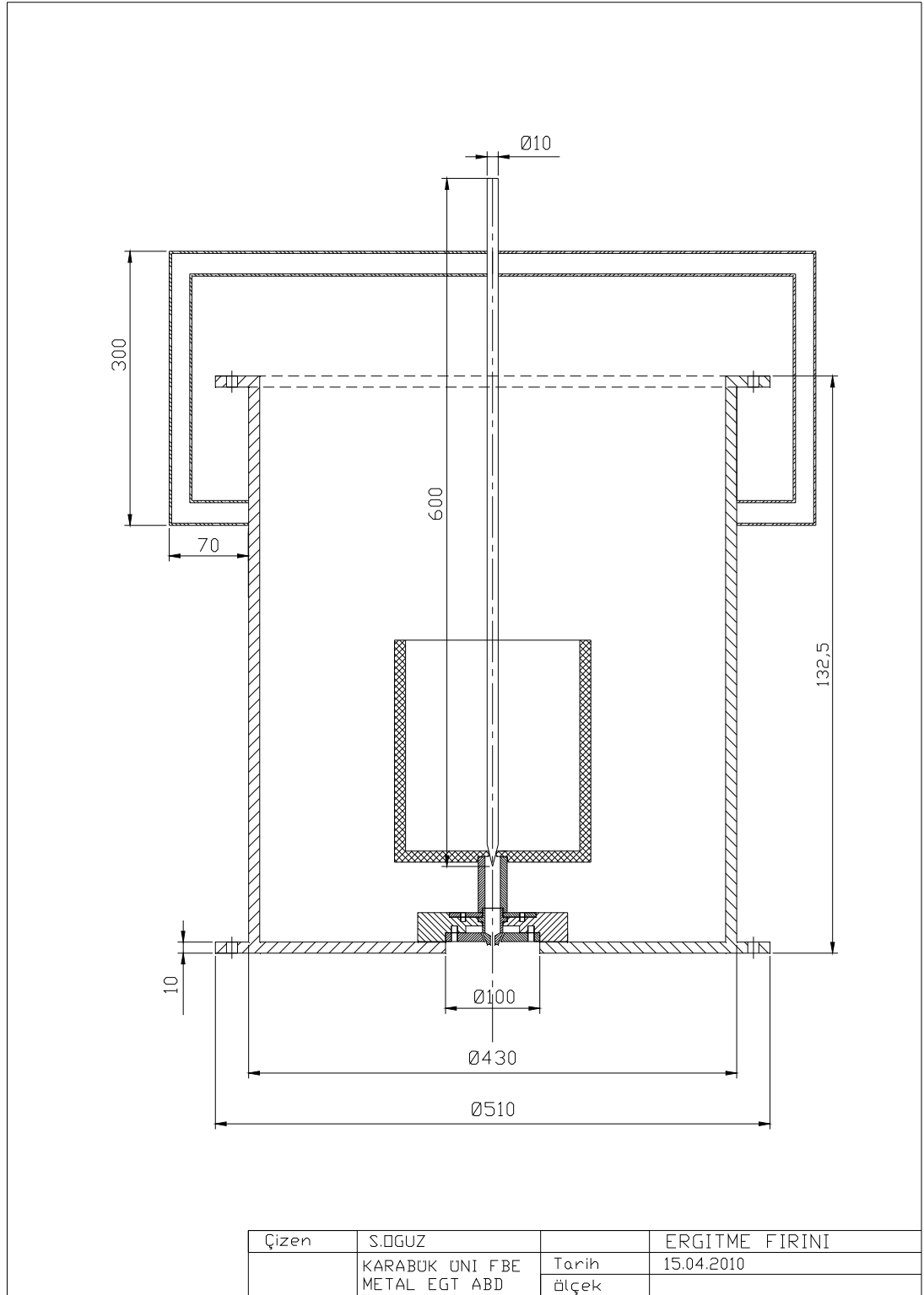
490-500 °C aralığında gerçekleştirilmiştir. Sıvı metal gerekli sıcaklığa ulaştıktan sonra açma-kapama çubuğu manuel olarak çekilmiş ve metal akışı sağlanmıştır. Metalin ergitme işlemi sırasında havanın etkilerinden korunabilmesi için fırının alt ve üst kısımlarına küresel vanalar konulmuş, bu vanalar sayesinde fırının içerisine düşük basınçta argon gazı verilerek ergitilen metal oksitlenmeye karşı korunmuştur.



Şekil 4.4. Metal ergitme fırını, grafit pota ve açma kapama çubuğu.



Şekil 4.5. Raylar üzerinde hareket edebilen ergitme fırını



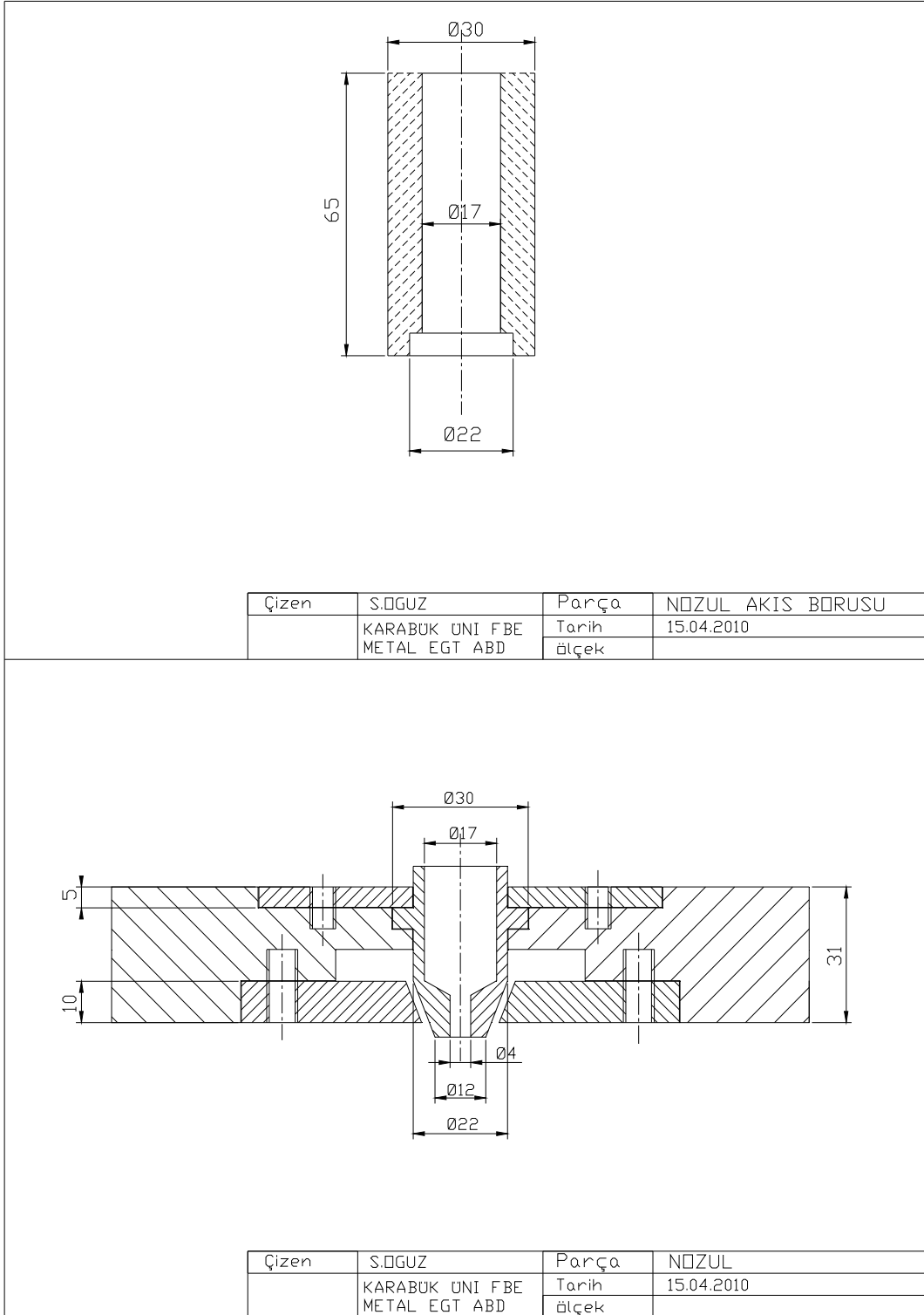
Şekil 4.6. Metal ergitme fırını, nozul, grafit pota ve açma kapama çubuğu.

### 4.1.3. Nozul

Atomizasyon deneylerinde yakından eşlemeli sistem tasarlanmıştır. Bu sistemde dairesel yarıklı ve sonik geometriye sahip üç farklı çapta uca sahip nozul kullanılmıştır. Nozulun uçları 2, 3 ve 4 mm olarak üç adet imal edilmiştir. Nozul Şekil 4.7 ve 4.8’de görülmektedir. Yakından eşlemeli sistemlerde sıvı metal akış borusunun da ısıtılması büyük önem taşımaktadır. Metal akış borusunun iyi ısıtılamaması halinde ergimiş metalin, metal akış borusu ucunda sıcaklığı düşecek ve bu durum sıvı metal debisinin düşmesine neden olacaktır. Bazı durumlarda ise, yüksek basınçlarda oluşan geri basıncın etkisiyle ergimiş metalin, akış borusu ucunda donması ve akış borusunu tıkaması kolaylaşacaktır. Bu sebeple, kullanılan nozul ve metal akış borusu ergitme fırınının iç kısmına yerleştirilmiş ve bu sorunun önüne geçilmiştir.



Şekil 4.7. Dairesel yarıklı ve sonik geometrili nozul.



Şekil 4.8. Nozul ve nozul akış borusu.

#### 4.1.4. Atomizasyon Kulesi

Karabük Üniversitesi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nin atomizasyon kulesi çevresinde bir adet gözetleme noktası mevcuttur. Kule paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Çapı 60 cm, toplam yüksekliği ise 150 cm olarak tasarlanmıştır. Kule yüksekliği, sıvı metal damlacıklarının kule tabanına inmeden katılaşabilmelerine imkan verecek yükseklikte ve kule çapı, damlacıkların kule çeperine çarpmayacak boyuttadır. Atomizasyon kulesinin temizliğinin kolay yapılabilmesine imkan sağlamak için kule üzerindeki ergitme fırını raylı olarak tasarlanmış ve kule üzerinde hareket ettirilebilir durumdadır.



Şekil 4.9. Paslanmaz çelikten imal edilen atomizasyon kulesi.



#### 4.1.5. Toz Tutma Ve Sistem Temizliği

Ünitede bir adet toplama kabı mevcuttur. Toz toplama kabı ünitenin en alt kısmında yer almaktadır ve atomize edilmiş tozların toplandığı yerdir. Paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Yapılan her deney sonrasında atomizasyon ünitesinin iç kısımları temizlenmiştir. Üretilen tozlar plastik kaplarda muhafaza edilmiştir.



Şekil 4.10. Toz toplama kabı.

#### 4.2. ATOMİZASYON ÇALIŞMALARI

Karabük Üniversitesi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde yapılan çalışmalar boyunca yakından eşlemeli nozul sistemi kullanılarak gaz atomize kalay tozu üretimi gerçekleştirilmiştir. Atomizasyon çalışmaları sırasında sıvı kalay, ergime sıcaklığının üzerine (500 °C) aşırı ısıtılmıştır. Atomizasyon çalışmaları sırasında gerçekleştirilen işlemler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. Öncelikle deneyde kullanılacak çaptaki metal akış ucu nozula monte edilmiş ve nozul ergitme fırınının tabanına yerleştirilmiştir. Pota ile nozul arasında akışı sağlayan boru nozul üzerine yerleştirilmiştir.
2. Pota fırın içerisine yerleştirilmiştir.

3. Açma - kapama çubuğu çelikten yapılmış ve sızdırmazlık sağlayacak şekilde ayarlanarak fırın içindeki potanın merkezine monte edilmiştir.
4. Ergitme fırını içindeki potaya, her bir deney için yaklaşık 600 g kalay konularak fırın çalıştırılmış ve kalay 500 °C'ye aşırı ısıtılmıştır. Ergimiş kalayın sıcaklığı fırın içerisindeki 3 adet termokupl vasıtasıyla ölçülmüştür.
5. Atomizasyon gaz basıncı, basınç ayar vanası ile istenilen basınç değerlerine ayarlanmış ve nozula gaz gönderilmiştir.
6. Açma-kapama çubuğunun yukarı doğru kaldırılmasıyla ergimiş kalayın akması ve gaz jeti ile parçalanması sağlanmıştır. Metal akışının tamamlanmasından sonra gaz akışı durdurulmuş ve atomizasyon işlemi tamamlanmıştır.
7. Atomizasyon kulesi bağlantı noktalarından sökülerek, toz toplama kabında biriken tozlar alınmıştır. Tozlar elekten elenerek, elek altı tozlar ayrılmış ve kilitli poşetler içinde muhafaza edilmiştir.
8. Toz toplama kabı, siklon ve kule iç yüzeyine yapışan tozlar bezle silinerek bir sonraki deney için ünite temizlenmiştir. Ünitenin montajı tekrar yapılarak yeni bir deney için yukarıda sıralanan işlemler tekrar edilmiştir.

Çalışmalarda farklı gaz basınçları ve farklı çapta akış uçları kullanılarak deneyler yapılmıştır. Atomizasyon gazı olarak argon kullanılmış ve sıvı metal 500 °C'ye aşırı ısıtılmıştır. Yakından eşlemeli nozul ile yapılan her bir deneydeki atomizasyon değişkenlerine ait bilgiler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Atomizasyon değişkenleri.

Deney No	Nozul Çapı (mm)	Gaz Basıncı (bar)
1	4	2
2	4	4
3	4	6
4	4	8
5	3	2
6	3	4
7	3	6
8	3	8
9	2	2
10	2	4
11	2	6
12	2	8

### 4.3. TOZ BOYUT ANALİZİ



Şekil 4.11. Malvern Mastersizer E partikül boyutu ölçme cihazı.

Gaz atomizasyonu ile elde edilen kalay tozlarının boyut analizi, Şekil 4.11’de gösterilen ve Fraunhofer’in lazer ışınının kırınımı teorisine göre çalışan Malvern Mastersizer E lazerle parçacık boyutu ölçme cihazında yapılmıştır. Bu teoriye göre, katı cisimler ışığı çapları ile ters orantılı olarak kırarlar. Bu amaçla; içinde uygun bir taşıyıcı ortamda süspansiyon halinde bulunan tozların pompa yardımıyla lazer ışınlarının önünden geçmesini sağlayan hazne, ışın yoluna yerleştirilir. Bu hazneden ve daha sonrada seçilen lens üzerinden geçip tarayıcı üzerine düşen kırılmış ışının

açısı ve şiddeti tarayıcıda ölçülür. Bu teoriye göre hesaplanan toz boyutları, ölçüm sırasında otomatik olarak bilgisayara kaydedilir ve birçok istatistiksel bilgi ile birlikte toz dağılımı grafik olarak elde edilir. Malvern Mastersizer E lazerle boyut ölçme cihazı 0.1-600  $\mu\text{m}$  arasındaki toz boyutlarını ölçebilmektedir ve 45  $\mu\text{m}$ 'den küçük boyutlarda elek analizine güvenilmemesi nedeniyle yaptığımız çalışmalarda büyük kolaylık sağlamıştır. Bu teknikte toz şekli küresel kabul edilir. Tozların topaklanmasının algılanması zordur ancak, uygun bir taşıyıcı ortam kullanılarak veya ultrasonik titreştirici yardımıyla topaklanma en aza indirilebilir.

#### 4.4 TOZLARIN KARAKTERİZASYONU

Gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen kalay tozlarının karakterizasyonu amacı ile toz tane şeklini belirleyebilmek için SEM görüntüleri alınmış ve toz tane boyutunun belirlenebilmesi amacı ile de boyut analizi yapılmıştır. Üretilen tozların SEM görüntüleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Malzeme laboratuvarında Jeol JSM 6060 LV marka cihazdan alınmıştır.



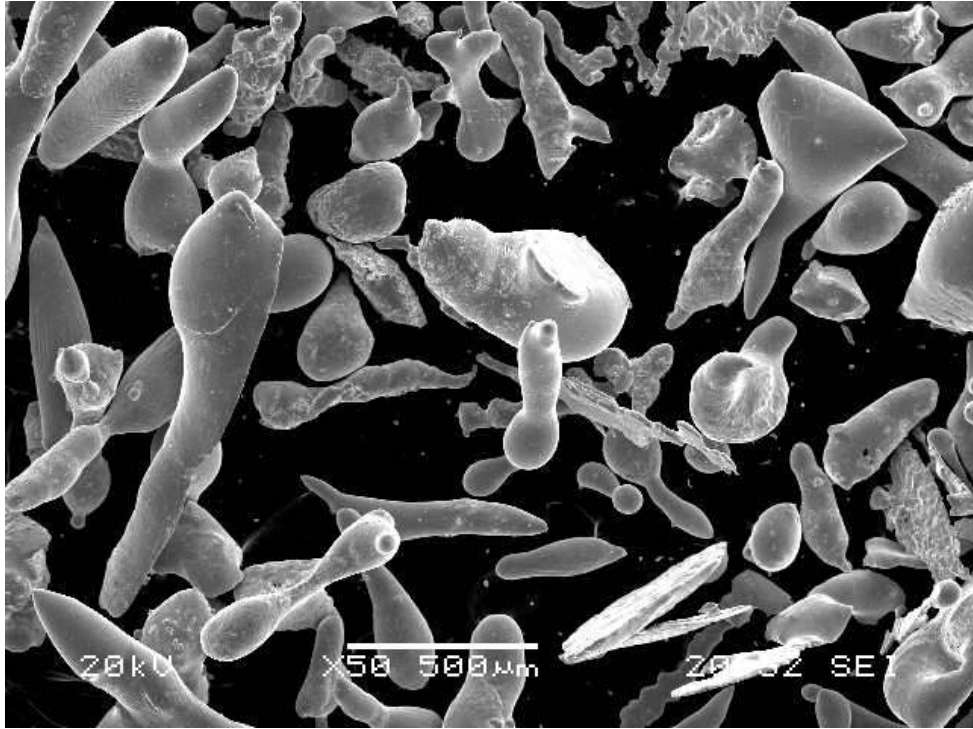
Şekil 4.12. Jeol JSM 6060 LV SEM cihazı

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Farklı nozul çapı ve farklı gaz basınçları kullanılarak üretilen kalay tozlarının parametrelere göre özellikleri aşağıda verilmiştir.

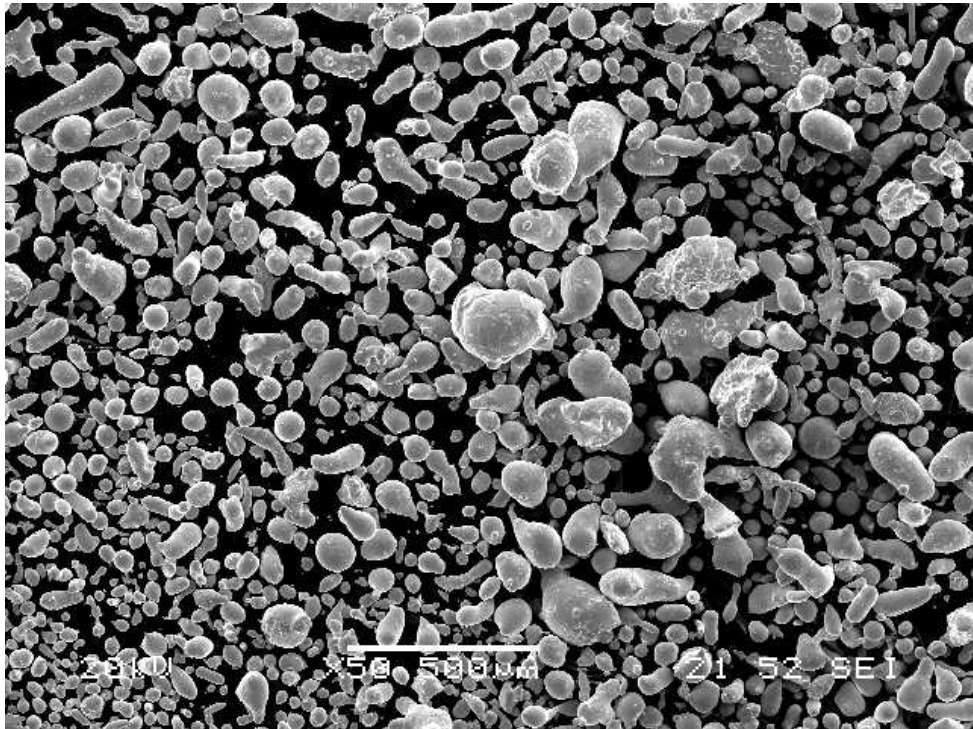
4 mm çapında metal akış ucu kullanılan nozulla, sırasıyla 2, 4, 6 ve 8 bar gaz basıncı ile üretilmiş olan kalay tozlarının Jeol JSM 6060 LV cihazı ile çekilmiş SEM görüntüleri Şekil 5.1-5.4'te verilmiştir.



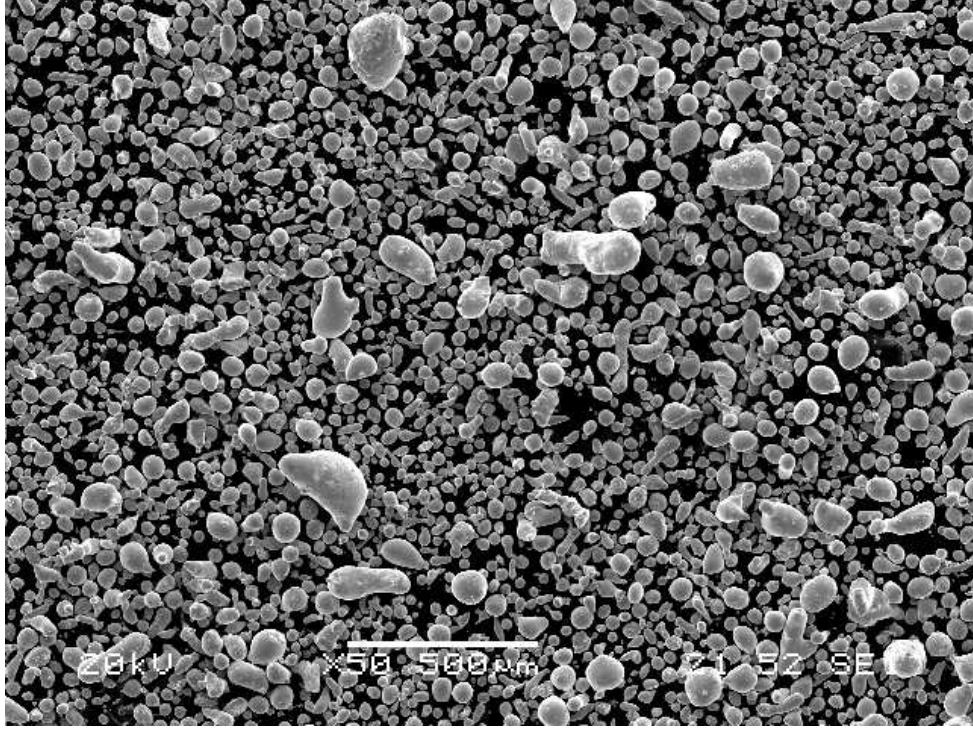
Şekil 5.1. 4 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.



Şekil 5.2. 4 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.



Şekil 5.3. 4 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.



Şekil 5.4. 4 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.

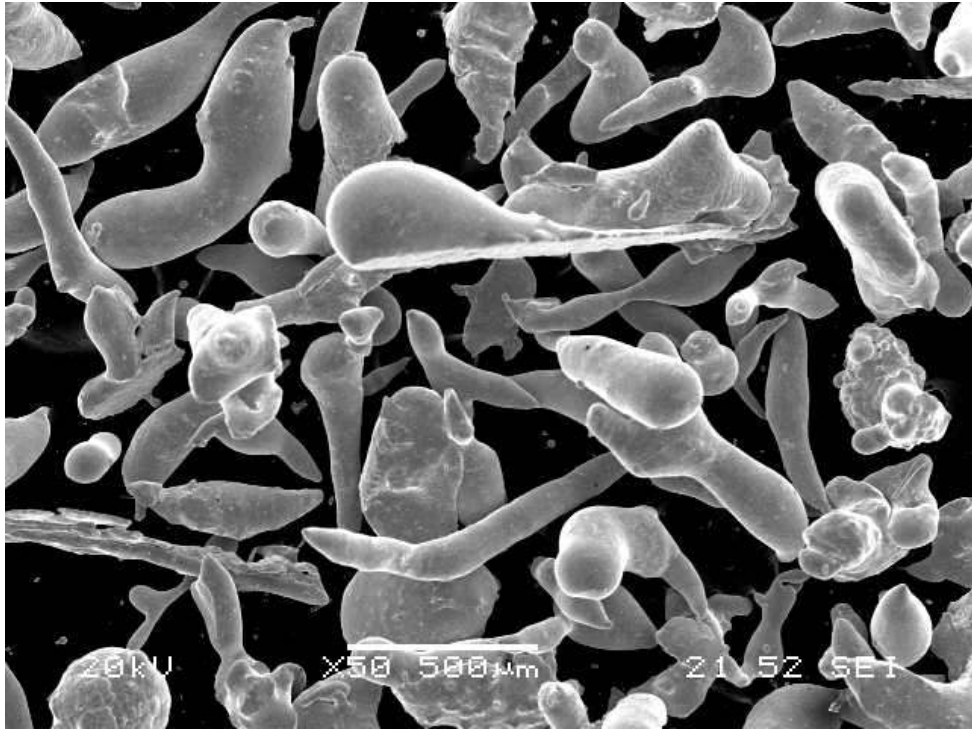
Şekil 5.1'deki toz partiküllerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, partikül dağılımlarının homojen bir şekle sahip olmadığı görülmektedir. Kalay tozları bu deneyde bir çok farklı şekilde oluşmuştur. Tozlar genel olarak ligament, çubuksu ve çok az miktarda da küresel şekillidirler. Bu karışık şekillenmeye, atomizasyon sırasındaki 2 bar'lık gaz basıncının sıvı metal demetini yeterince küçük parçalara ayıramamasının sebep olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.2'de verilmiş olan görüntüye bakıldığında üretilen toz partiküllerinin şekillerinin neredeyse tamamının ligament ve küresel olduğu görülmektedir. Şekil 5.1'deki tozlara göre daha homojen bir toz şeklinin oluşmuş olması gaz basıncındaki artıştan kaynaklanmıştır. Ancak yine de gaz atomizasyon yönteminde elde edilmesi planlanan küresel toz şekli elde edilememiştir. Bu deneyde de gaz basıncının sıvı metali yeterince küçük parçalara ayıramadığı, partiküllerin küreselleşmeye fırsat bulamadan katılaşmaya başlayıp ligament şeklindeki taneleri oluşturduğu düşünülmüştür. Bu sebeple 3 bar'lık gaz basıncının tane küçülmesine sebep olmakla birlikte küresel tane şekli elde etmeyi sağlayabilecek derecede yüksek olmadığı anlaşılmaktadır.

Şekil 5.3'te görülen ve 6 bar gaz basıncında elde edilen tozlara bakıldığında ise ligament şekilli tozların Şekil 5.2'ye göre azaldığı ve küresel tozların miktarının arttığı anlaşılmaktadır.

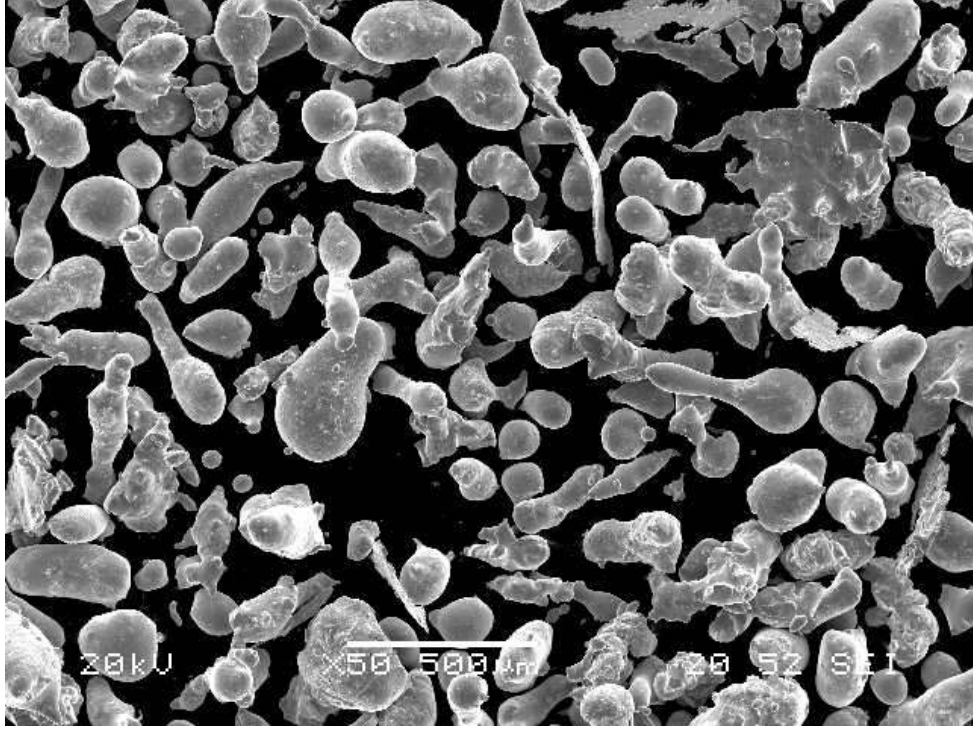
Şekil 5.4 incelendiğinde ise atomize gaz basıncının 8 bar'a çıkarılmasıyla üretilen kalay tozlarının şekillerinin neredeyse tamamının küresele dönüştüğü görülmektedir. Bu durumun 8 bar gaz basıncının sıvı metali çok küçük partiküllere ayrıştırabilmesi, küçük partiküllerin de daha kolay küreselleşmeleri sonucunda gerçekleştiği düşünülmektedir.

3 mm nozul çapı ve 2, 4, 6 ve 8 bar gaz basınçlarında elde edilen tozların SEM görüntüleri Şekil 5.5-5.8'de verilmiştir.

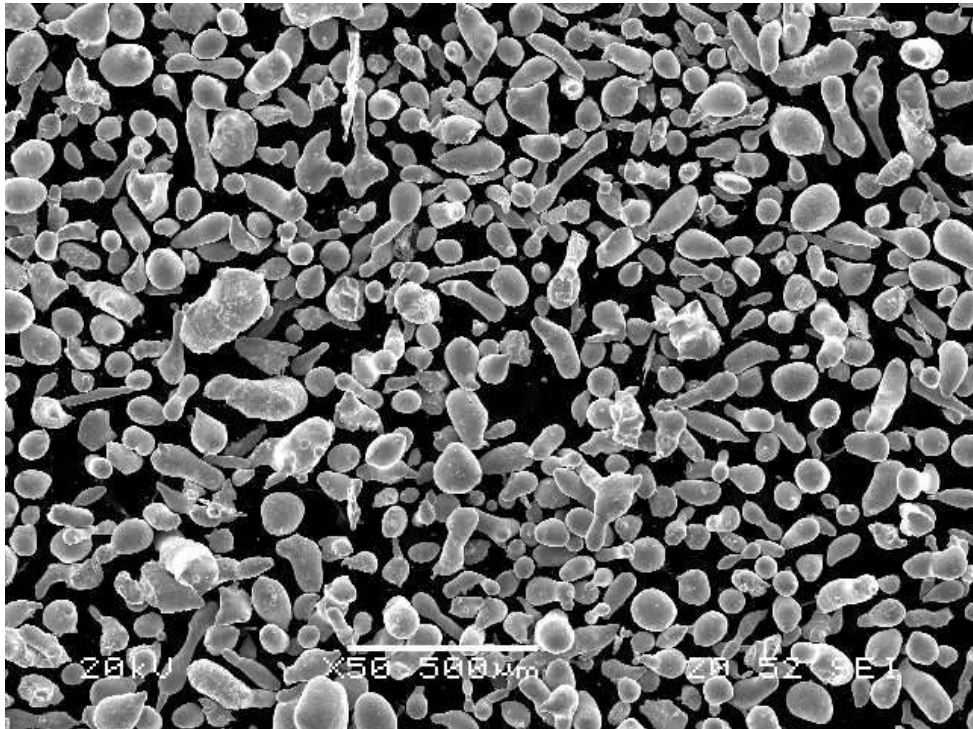


Şekil 5.5. 3 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.

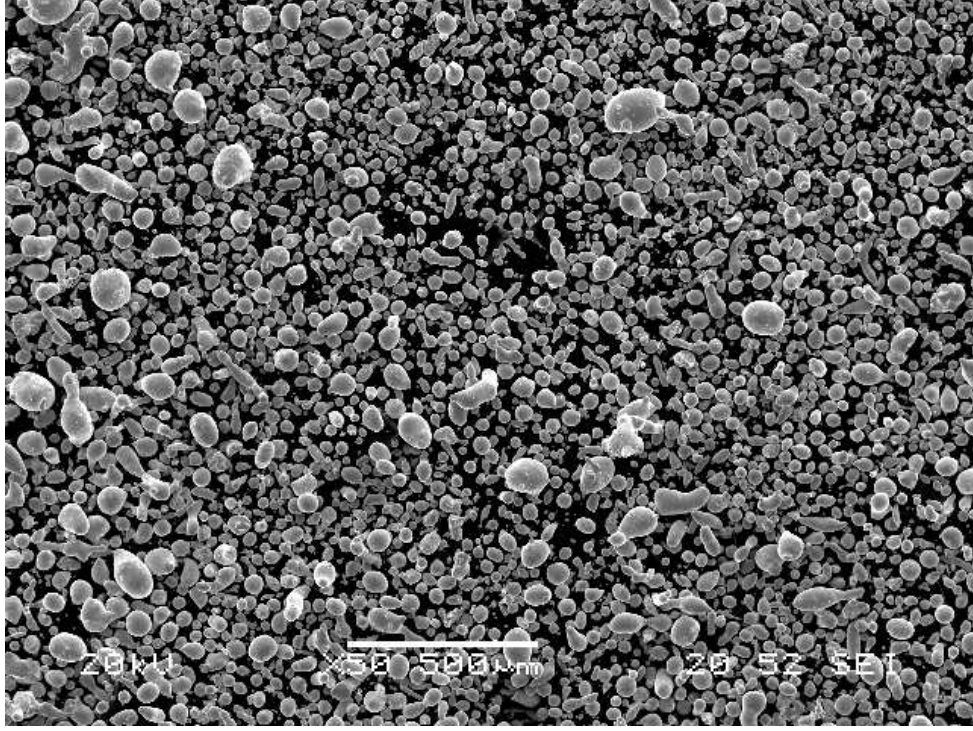




Şekil 5.6. 3 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.



Şekil 5.7. 3 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.

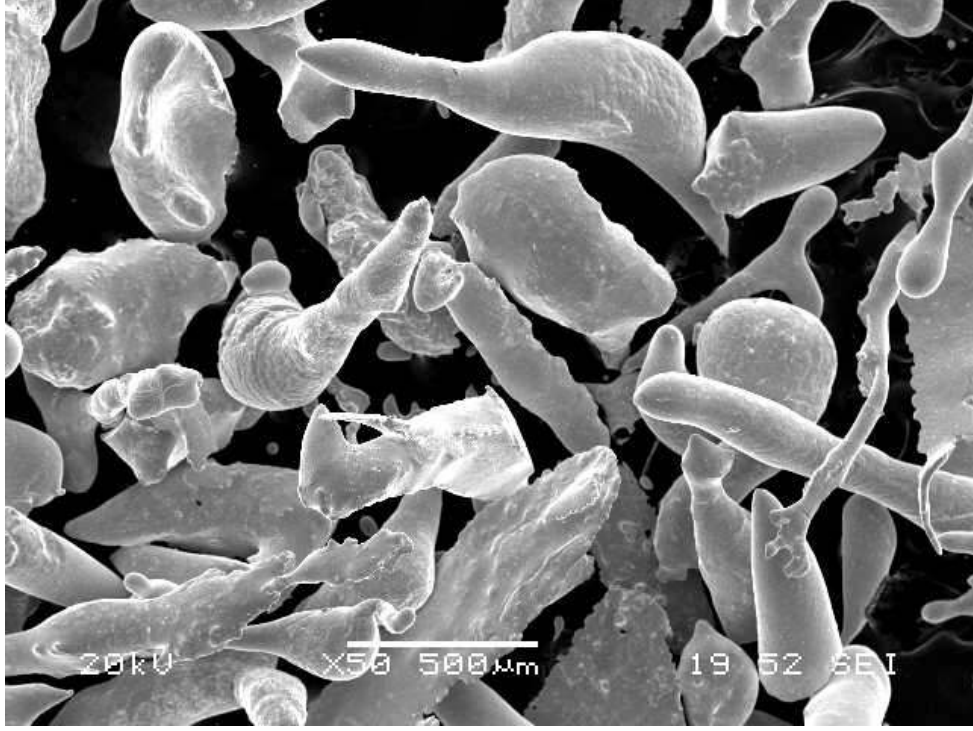


Şekil 5.8. 3 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.

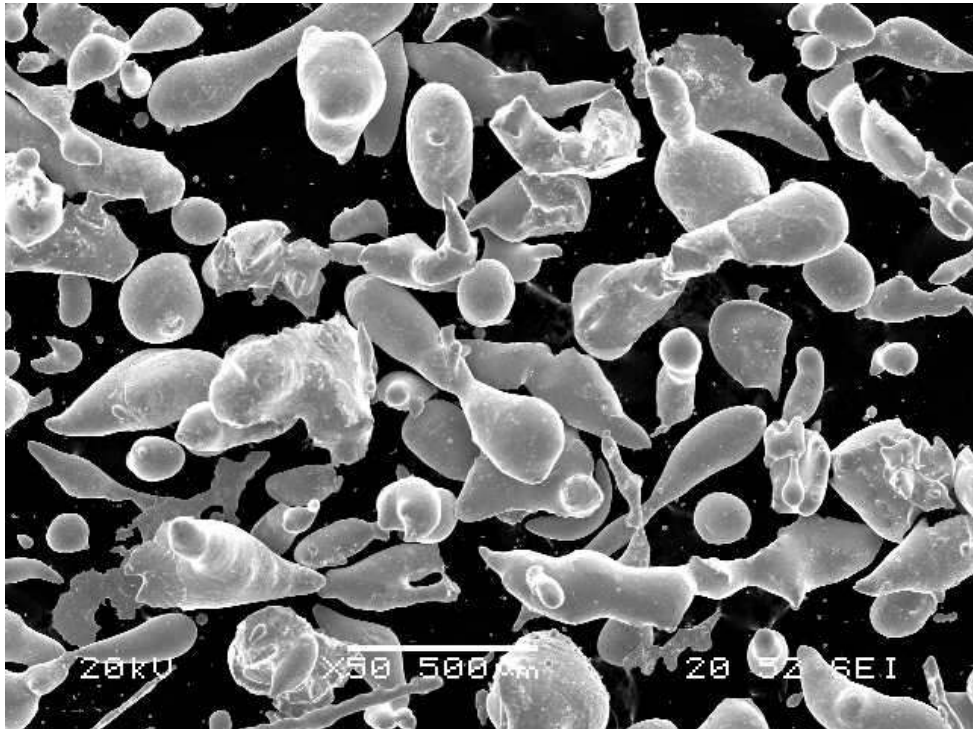
3 mm nozul çapı ve farklı gaz basınçlarında elde edilen kalay tozlarının görüntüleri incelendiğinde de ilk dört deneydeki gibi atomizasyon sırasındaki gaz basıncının toz şekline etkisi açık şekilde görülmektedir. Şekil 5.5'te görüldüğü gibi, 3 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında oluşan karmaşık şekilli tozlar Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8'de gaz basıncının artmasıyla giderek kaybolmuş ve yerlerini küresel şekilli tozlara bırakmışlardır.

Şekil 5.1-5.4'teki deneylerde 4mm, Şekil 5.5-5.8'deki deneylerde ise 3 mm nozul çapı kullanılarak tozlar üretilmiştir. Buradaki amaç, nozul çapının gaz basıncı sabit tutularak değiştirilmesi sonucunda toz şekline etkisini görmektir. Ancak Şekil 5.1-5.8'deki SEM görüntülerine bakıldığında 4 mm metal akış ucuna sahip deneylerde oluşan toz şekilleri ile 3 mm metal akış ucunda oluşan toz şekilleri arasında belirgin bir fark görülmemiştir.

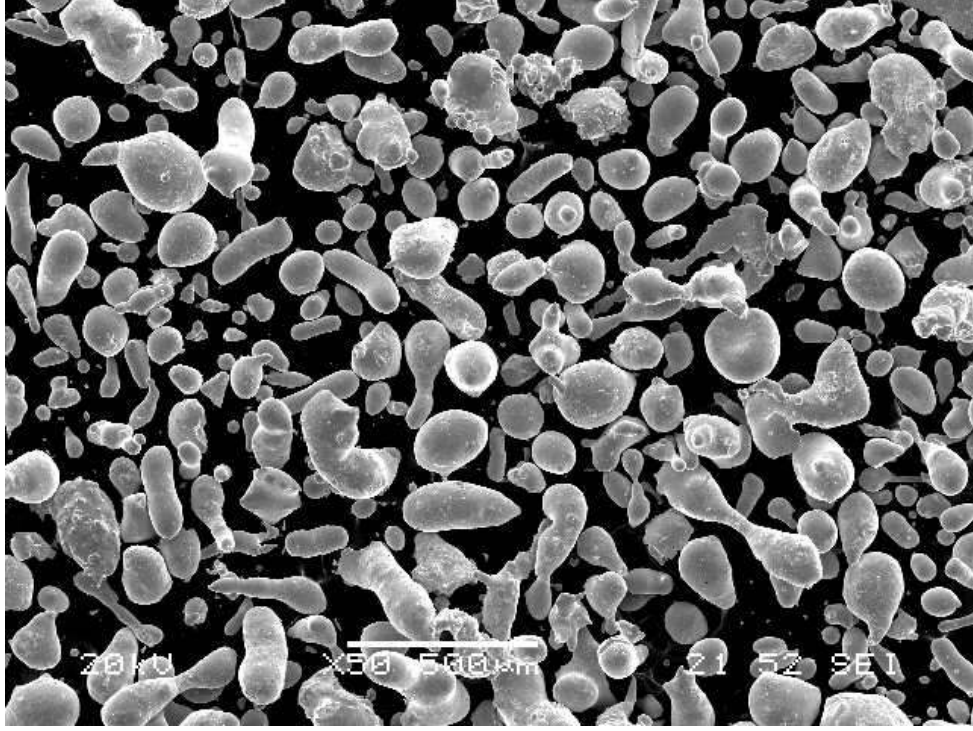
Şekil 5.9-5.12'de 2 mm nozul çapı ve 2, 4, 6 ve 8 bar gaz basınçlarında üretilen tozların SEM görüntüleri verilmiştir.



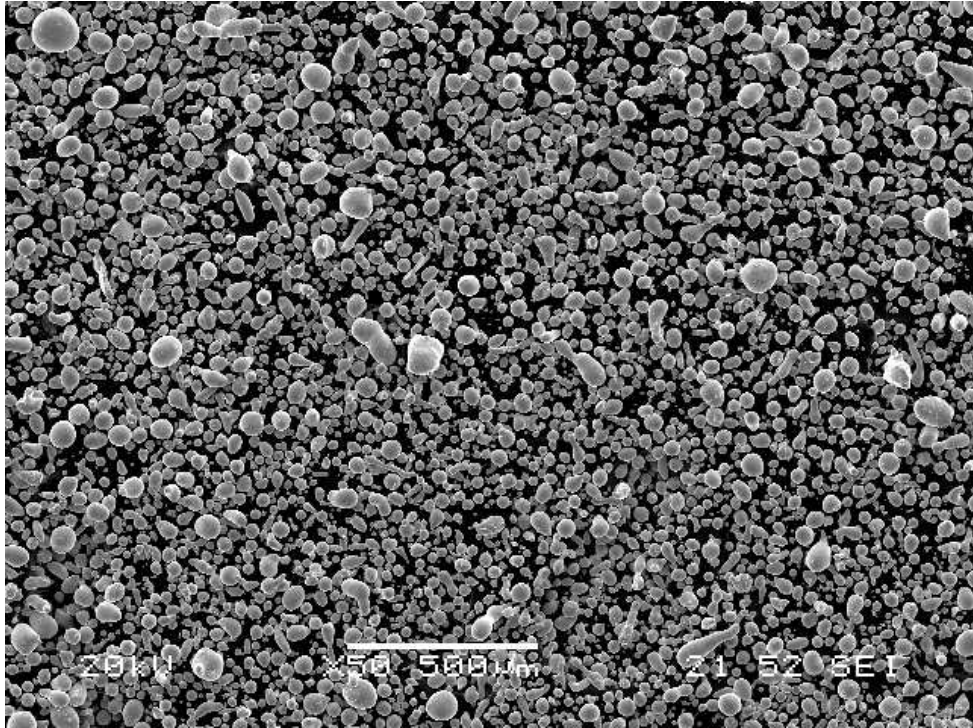
Şekil 5.9. 2 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.



Şekil 5.10. 2 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.



Şekil 5.11. 2 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.

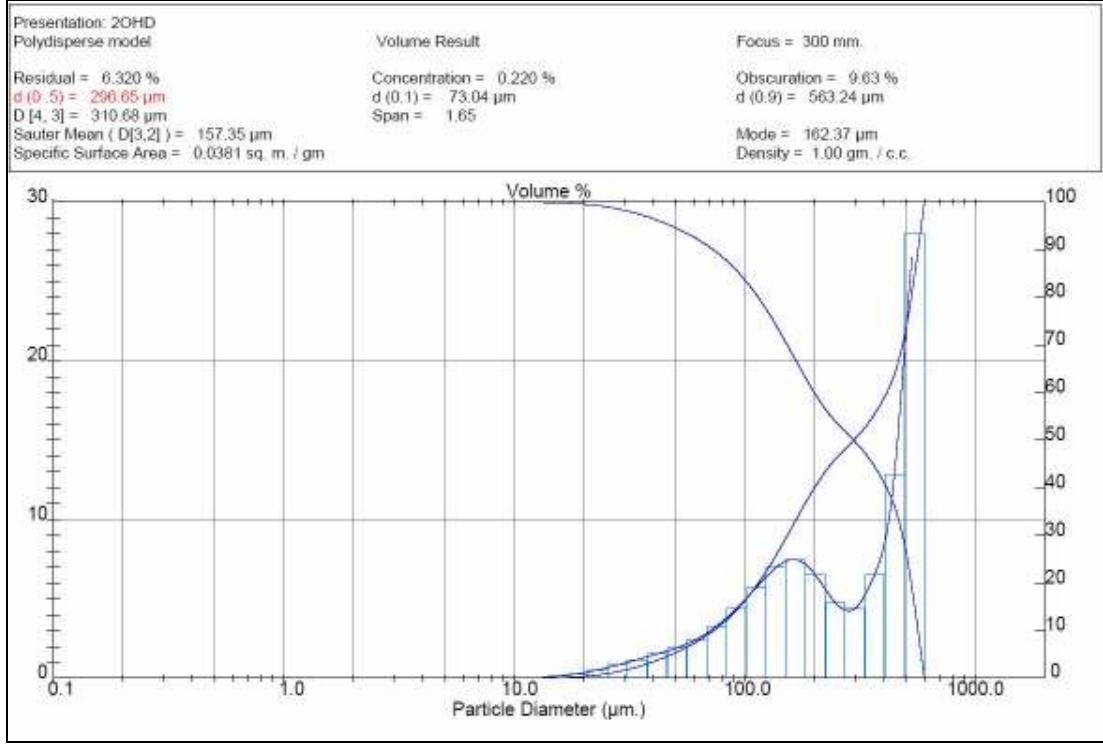


Şekil 5.12. 2 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların SEM görüntüsü.

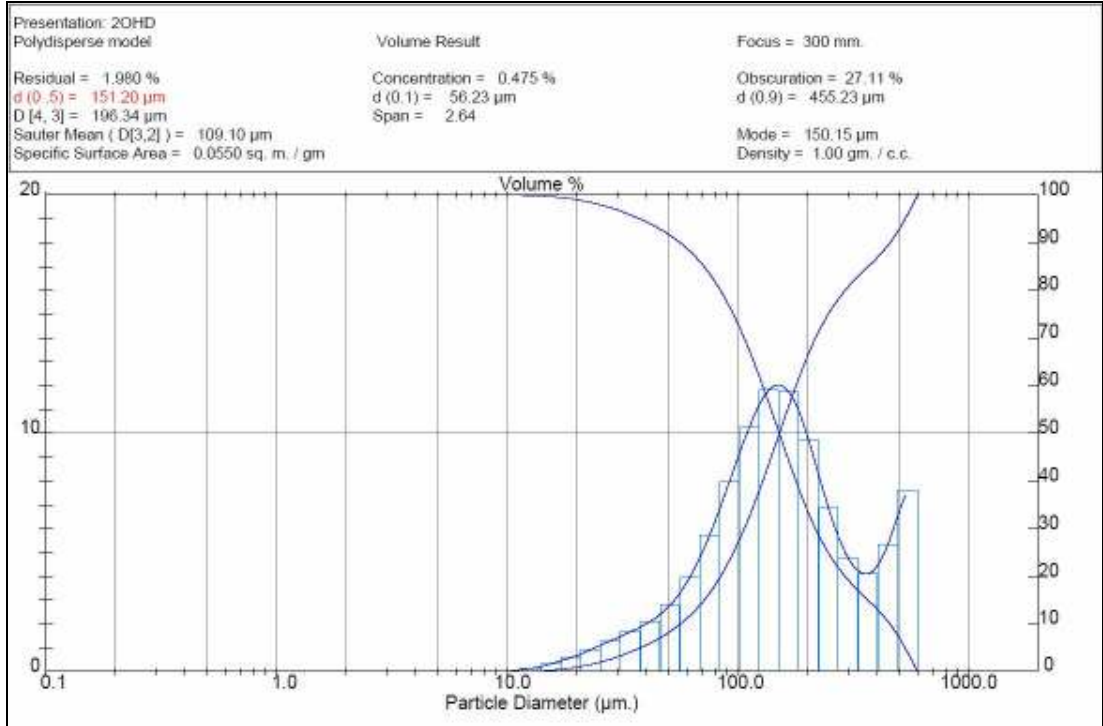
2 mm nozul çapı ve 2, 4, 6 ve 8 bar gaz basınçlarında üretilen tozların görüntülerinden de anlaşıldığı gibi atomizasyon işlemi sırasındaki gaz basıncının artırılması toz şekillerinin karmaşık şekilden küresele doğru dönüşmesini sağlamıştır.

Sonuç olarak şimdiye kadar incelenen şekillere bakıldığında, 2, 3 ve 4 mm nozul çaplarında gaz basıncının 2 bar olduğu deneylerde karışık toz şekli görülmüştür. Gaz basıncının 4 bar olarak ayarlandığı deneylerde ise ligament ve küresel şekilli tozların bir arada olduğu anlaşılmıştır. Basıncın daha da artırılması ile (6 ve 8 bar) yapılan deneylerde de toz şekillerinin tamamına yakınının küreselleştiği net olarak görülmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak küresel şekilli tozlar elde edilebilmesi için gaz atomizasyonunda minimum gaz basıncının 6 bar civarında olması gerektiği düşünülmektedir. Küçükarslan [3], yaptığı çalışmalarda atomizasyon gazı olarak hava kullanmış ve karmaşık şekilli tozlar elde etmiştir. Bu sebeple yapılan deneylerde atomizasyon gazı olarak argon tercih edilmesinin küresel tozlar elde edebilmek için yararlı olacağı sonucuna varılmıştır.

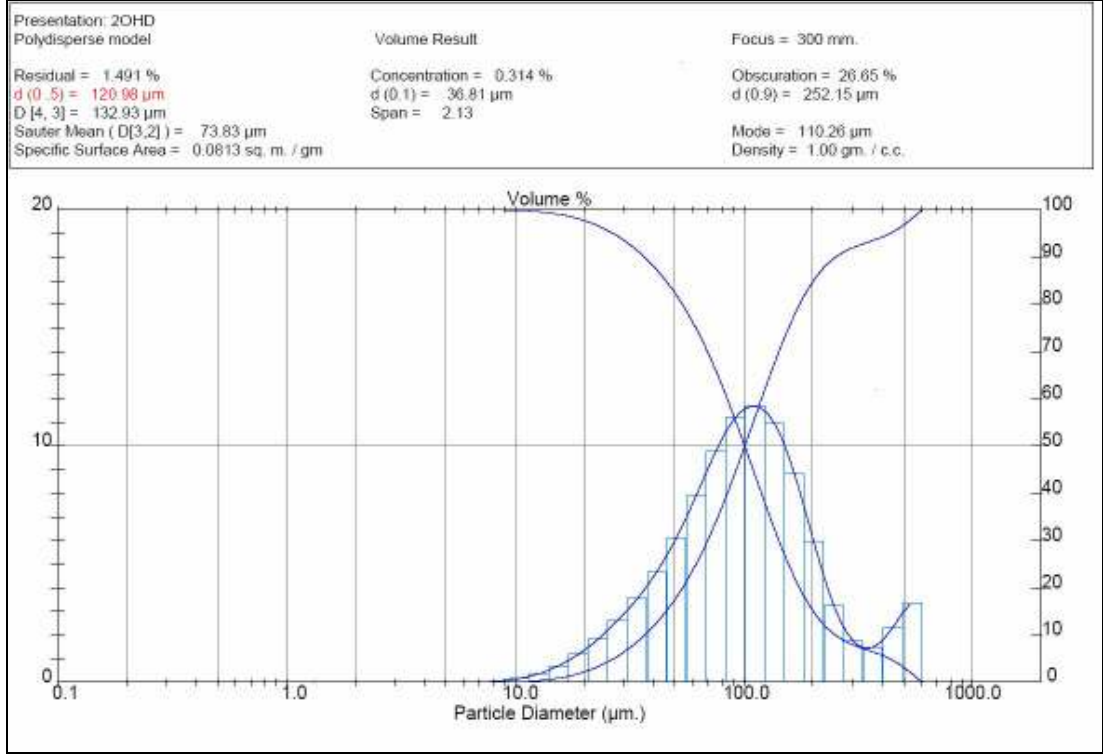
4 mm çapındaki nozulla, sırasıyla 2, 4, 6 ve 8 bar gaz basıncı ile üretilmiş olan kalay tozlarının Malvern Mastersizer E partikül boyutu ölçme cihazı ile yapılan boyut analizlerinin sonuçları Şekil 5.13-5.16'da verilmiştir.



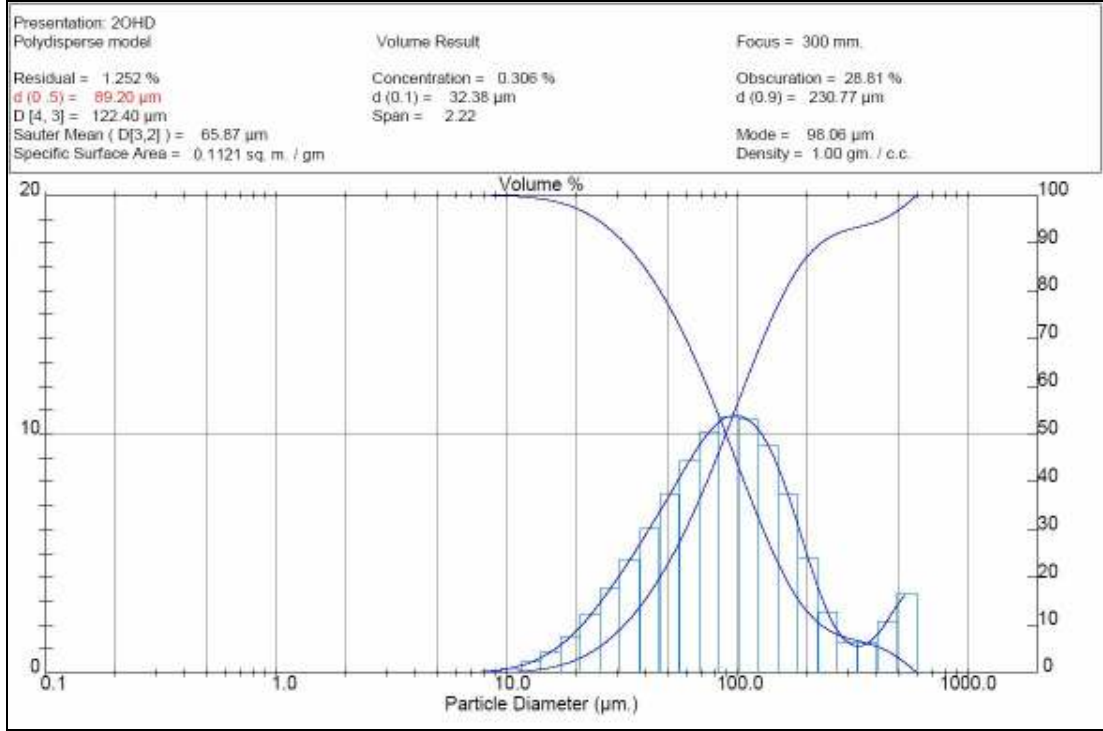
Şekil 5.13. 4 mm nozul çapı ve 2bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.



Şekil 5.14. 4 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.



Şekil 5.15. 4 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.



Şekil 5.16. 4 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.

Şekil 5.13'te 4 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında elde edilen tozların boyut analizi sonuçları görülmektedir. Yapılan analizde bu deneyde elde edilen tozların boyutları  $d(0.5) = 296.65\mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 73.04 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 563.24 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Analiz raporunda  $d(0.5)$  ortalama toz boyutunu,  $d(0.1)$  tozların %10'unun verilen değerden küçük olduğunu,  $d(0.9)$  tozların %90'ının verilen değerden küçük olduğunu ifade etmektedir.

Şekil 5.14.'te ise 4 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların analiz sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında da  $d(0.5) = 151.20 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 56.23 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 455.23 \mu\text{m}$  olduğu görülmüştür. Bu iki deneyden elde edilen tozların analizleri incelendiğinde artan atomize gaz basıncı ile sıvı metalin parçalanması arttığından toz tane boyutunun küçüldüğü görülmektedir.

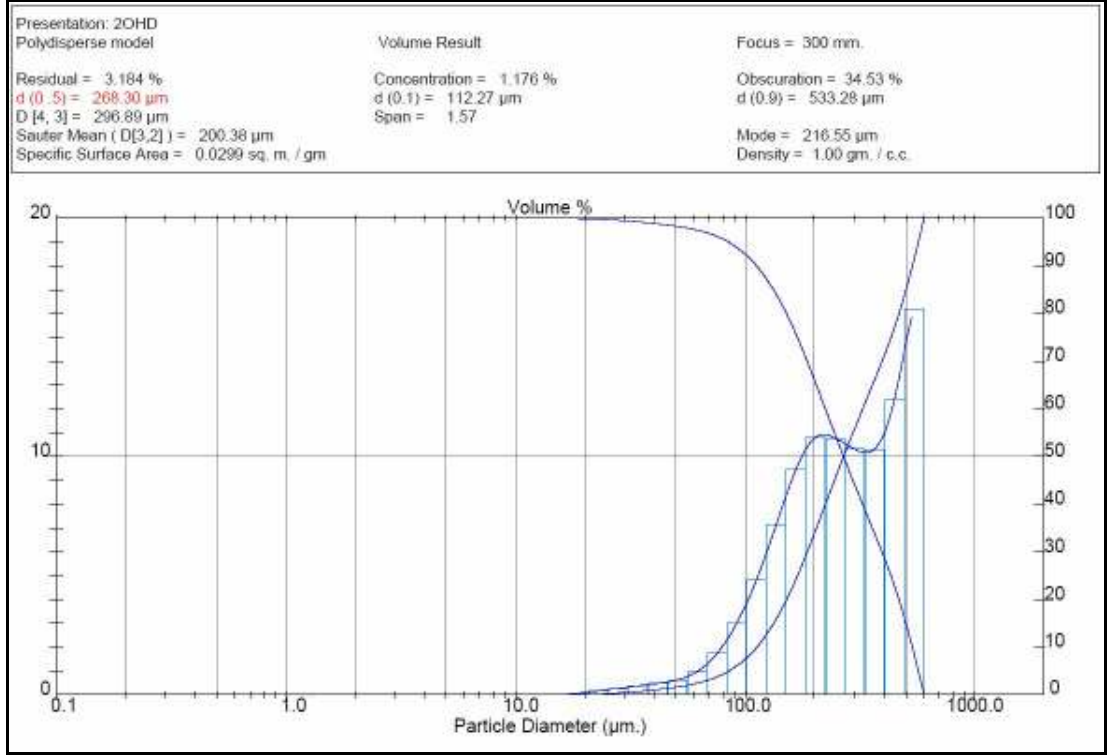
Şekil 5.15.'te verilen ve 4 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncındaki tozlara ait sonuçlar da  $d(0.5) = 120.98 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 36.81 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 252.15 \mu\text{m}$  olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlarda da aynı nozul çapı ve 4 bar gaz basıncındaki sonuçlarla karşılaştırıldığında gaz basıncına bağlı ortalama toz boyutunda azalma görülmüştür.

Şekil 5.16 incelendiğinde 4 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında elde edilen tozların analiz sonuçları  $d(0.5) = 89.20 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 32.38 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 230.77 \mu\text{m}$  olarak görülmektedir. Bu değerler de, aynı nozul çapı ve 4 bar gaz basıncındaki değerlerle kıyaslandığında, diğer deneylere paralel olarak atomizasyon gaz basıncının artması ile ortalama toz boyutunun küçüldüğü anlaşılmaktadır.

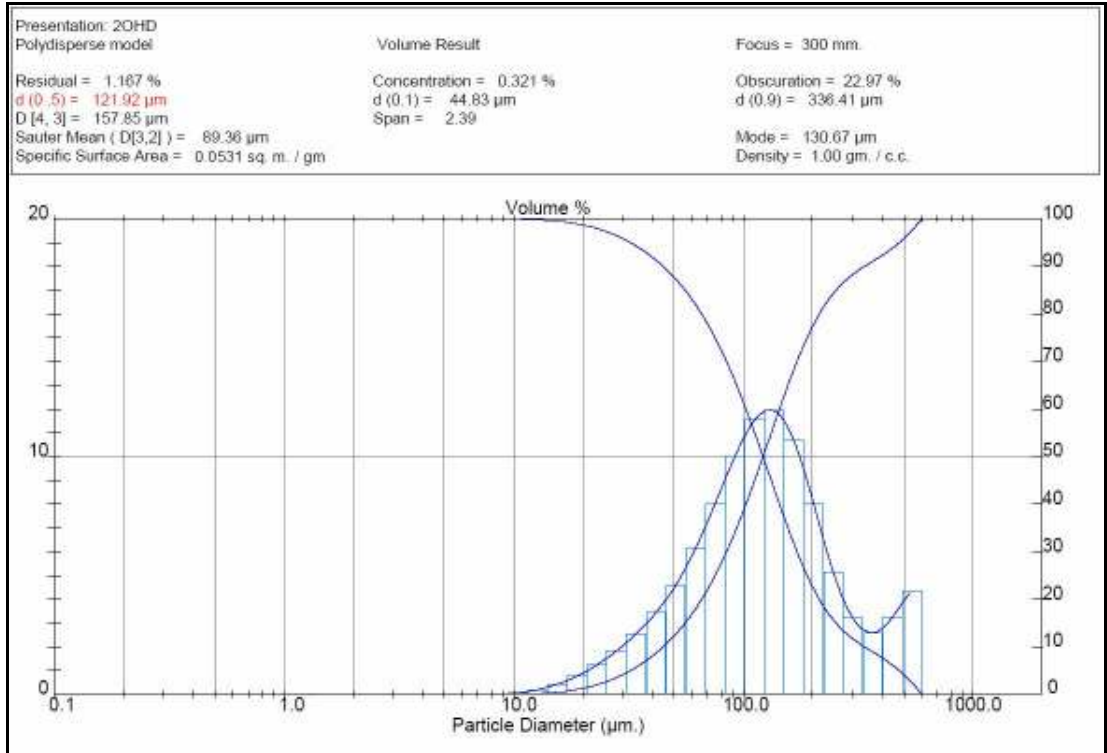
Yukarıda incelenen dört analiz sonucuna bakıldığında; aynı nozul çapında ( 4 mm) yapılan deneylerin tamamında 2, 4, 6 ve 8 bar gaz basınçlarında ortalama toz boyutunun belirgin şekilde küçüldüğü tespit edilmiştir.

3 mm nozul çapı ve 2, 4, 6 ve 8 bar gaz basınçlarında elde edilen tozların boyut analizleri Şekil 5.17-5.20'de verilmiştir.

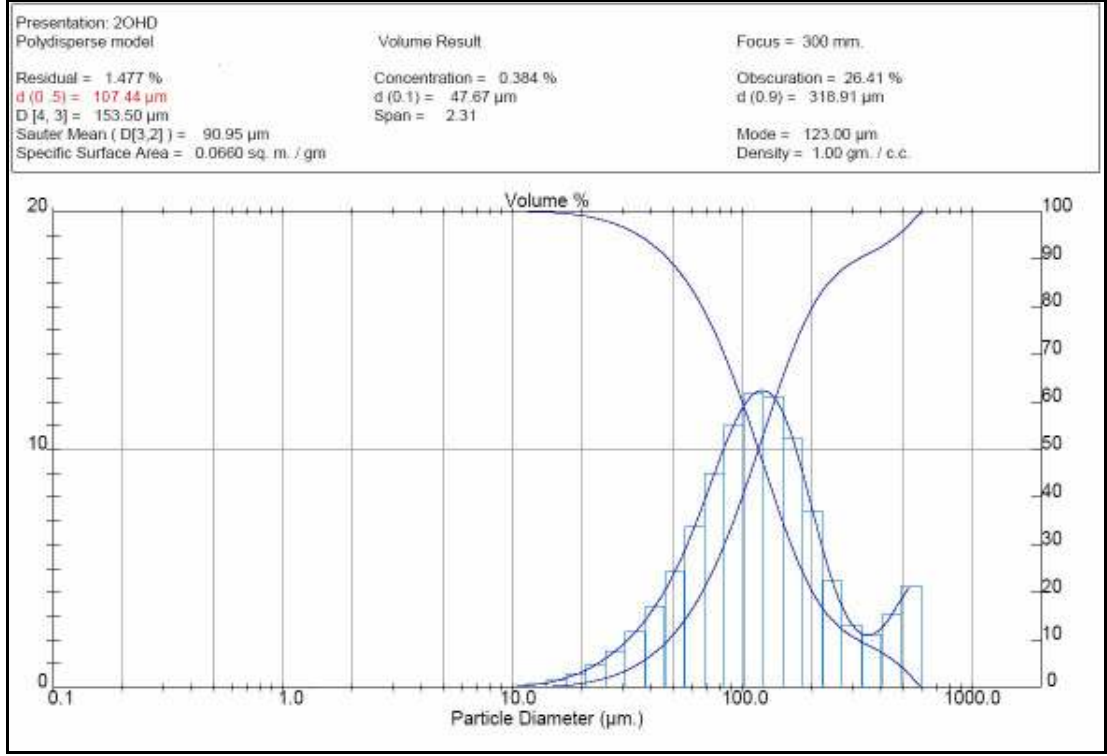




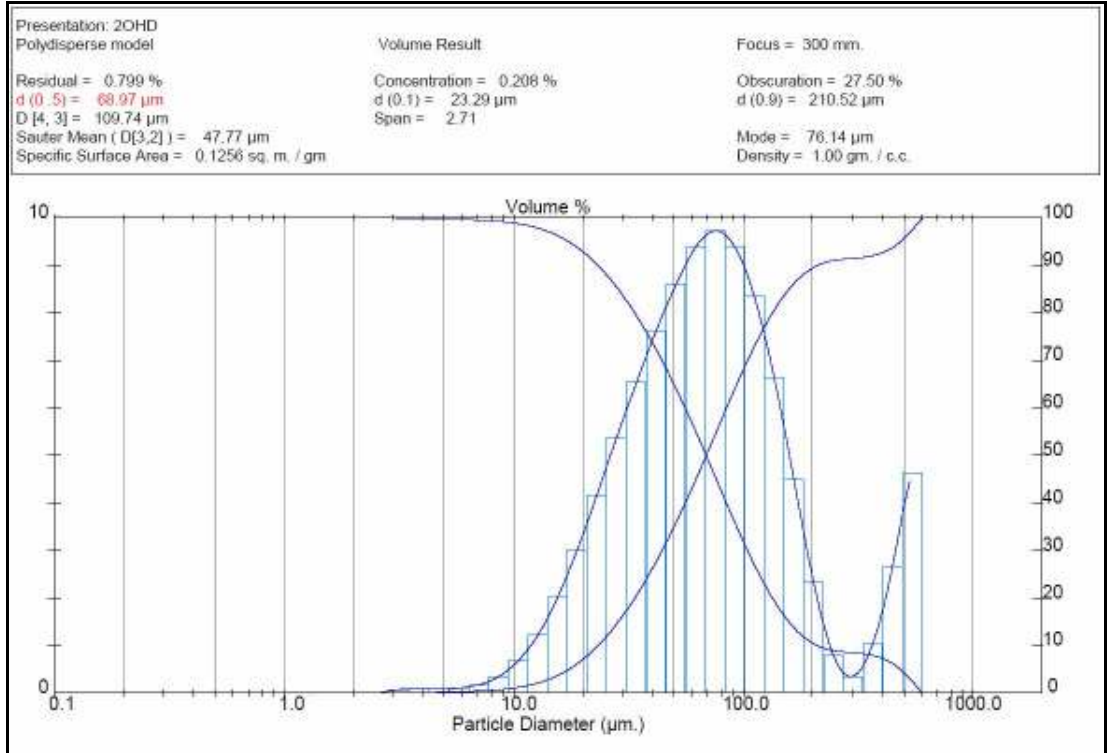
Şekil 5.17. 3 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.



Şekil 5.18. 3 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.



Şekil 5.19. 3 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.

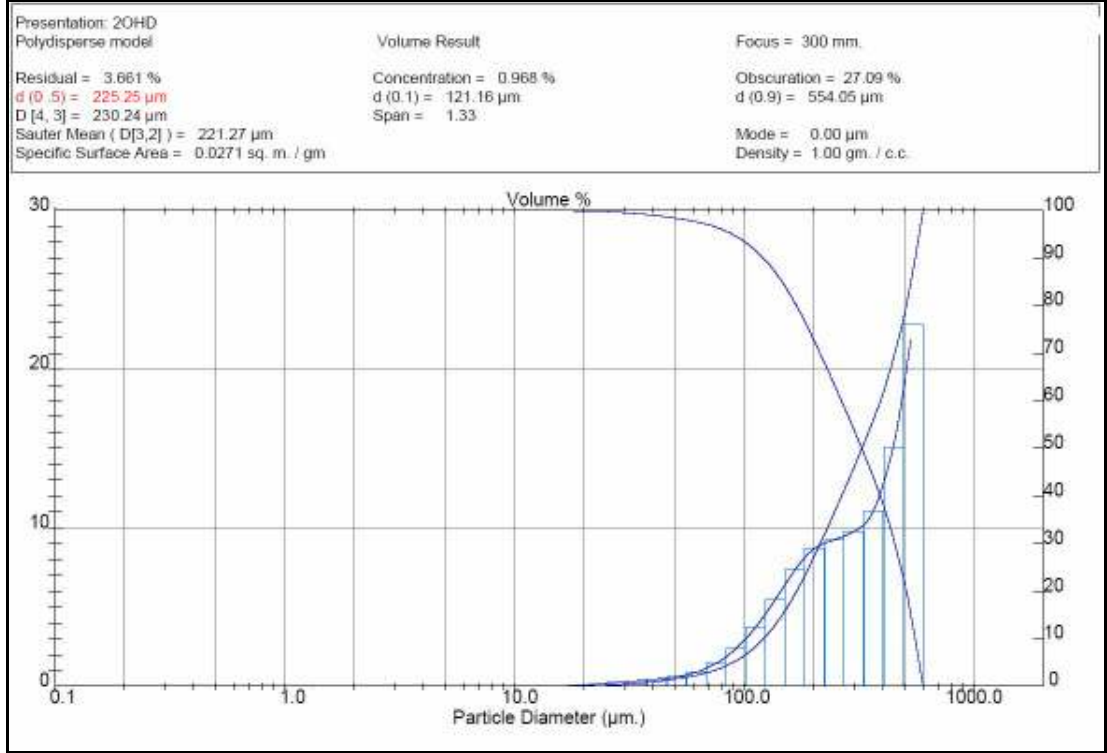


Şekil 5.20. 3 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.

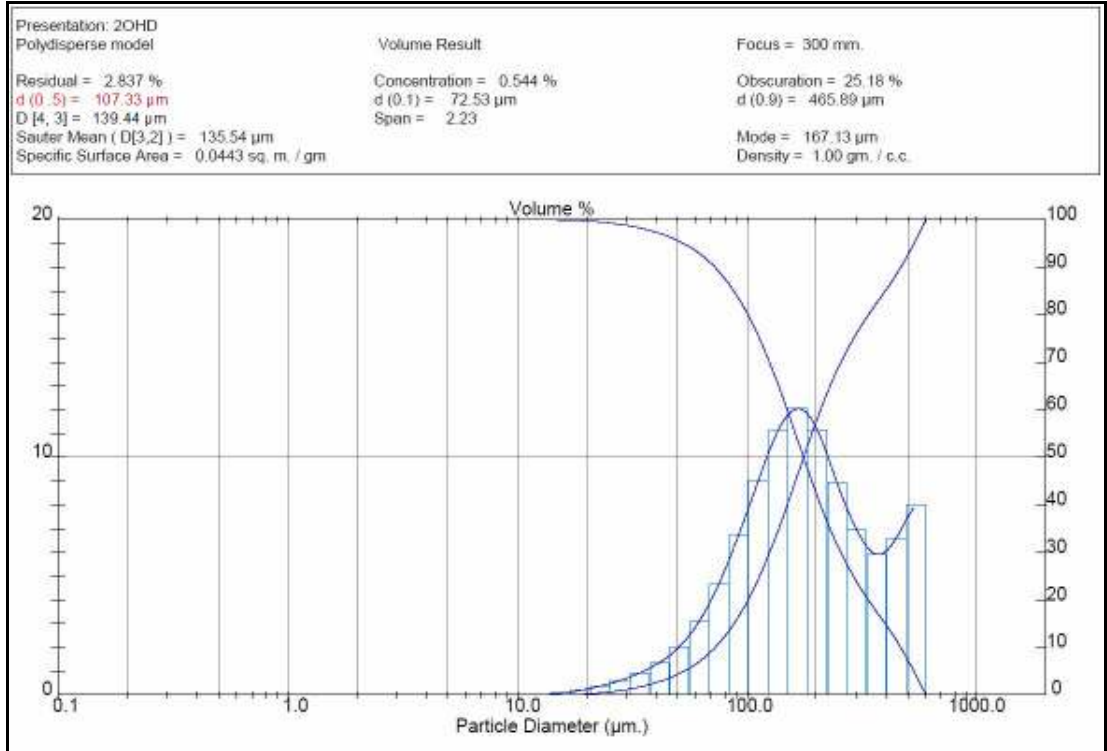
Şekil 4.17'deki analiz sonuçlarında 3 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında elde edilen tozların boyutları  $d(0.5) = 268.30 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 112.27 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 533.28 \mu\text{m}$  olarak görülmektedir. Aynı nozul çapı ve 4 bar gaz basıncındaki tozların boyutları da  $d(0.5) = 121.92 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 44.83 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 336.41 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüş ve Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekil 4.19'da 3mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların sonuçları  $d(0.5) = 107.44 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 47.67 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 318.91 \mu\text{m}$  ve Şekil 4.20'de aynı nozul çapı ve 8 bar gaz basıncındaki tozların analiz sonuçları  $d(0.5) = 68.97 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 23.29 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 210.52 \mu\text{m}$  olarak görülmektedir.

Bu dört analiz sonuçlarına bakılarak, aynı nozul çapı ile yapılan deneylerde gaz basıncının artması ile ortalama toz boyutunun küçüldüğü görülmüştür. Ancak 2 ile 4 bar ve 6 ile 8 bar gaz basıncında elde edilen toz boyutları arasında büyük farklar görülürken, 4 bar ile 6 bar basınçta elde edilen toz boyutları arasındaki farkın çok küçük olduğu görülmüştür.

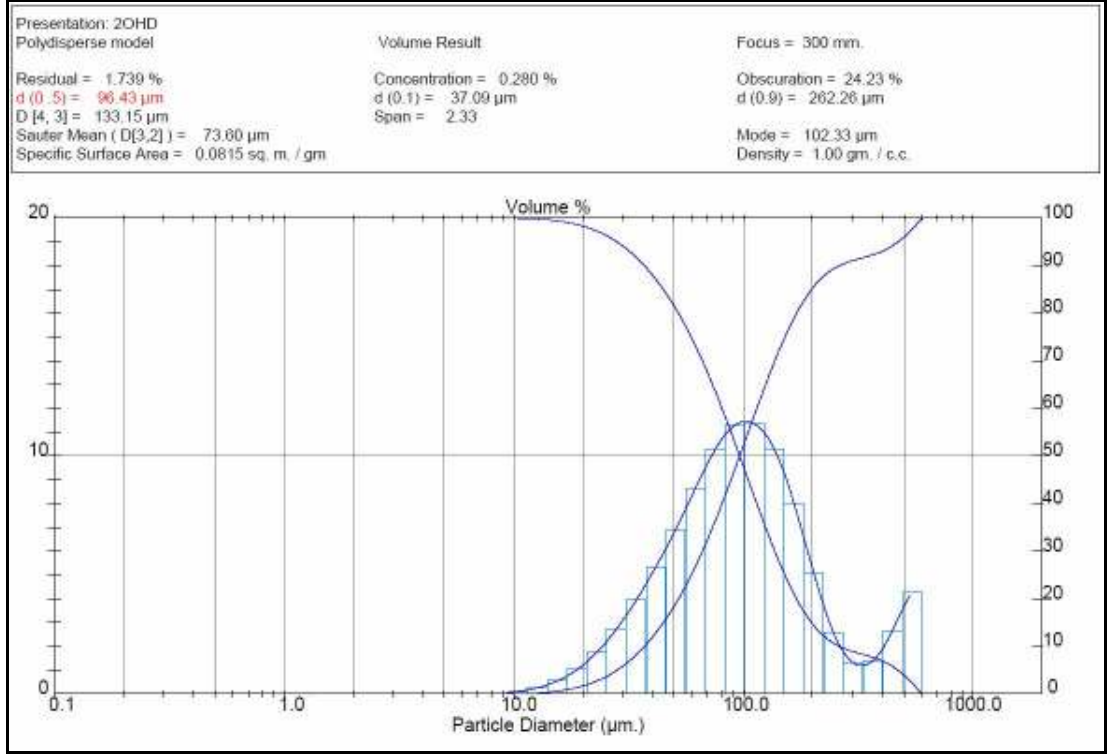
Şekil 5.21-5.24'te 2 mm nozul çapında ve 2, 4, 6 ve 8 bar gaz basınçlarında üretilen tozların boyut analizlerinin sonuçları verilmiştir.



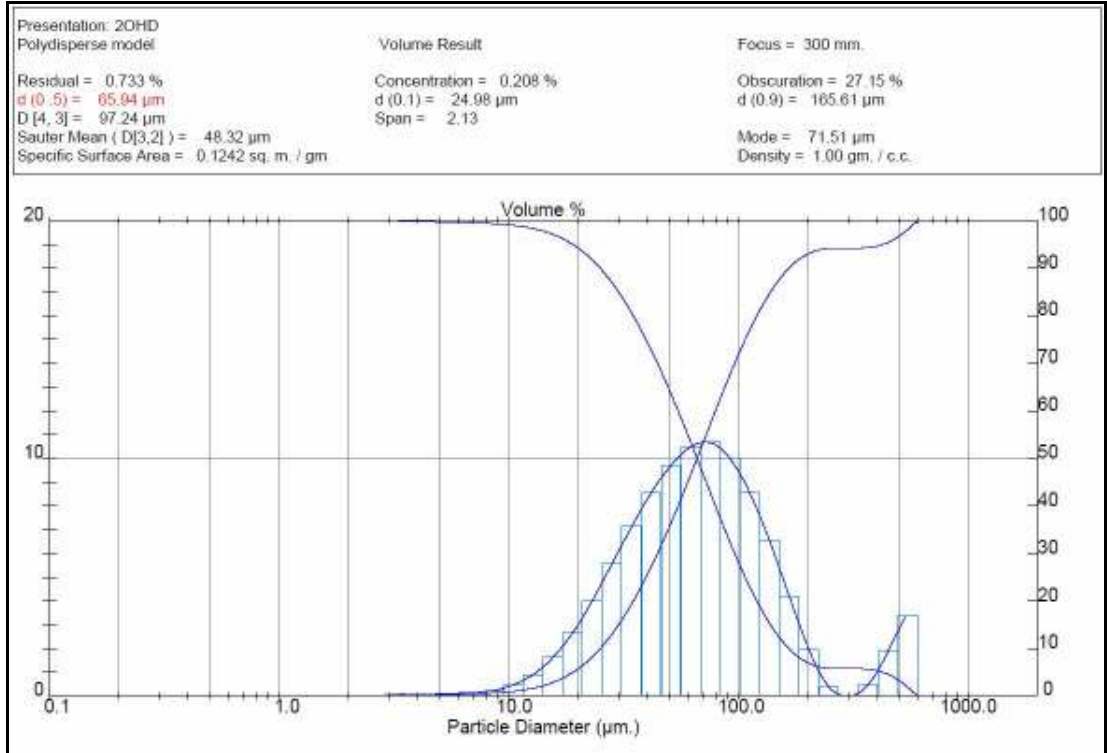
Şekil 5.21. 2 mm nozul çapı ve 2 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.



Şekil 5.22. 2 mm nozul çapı ve 4 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.

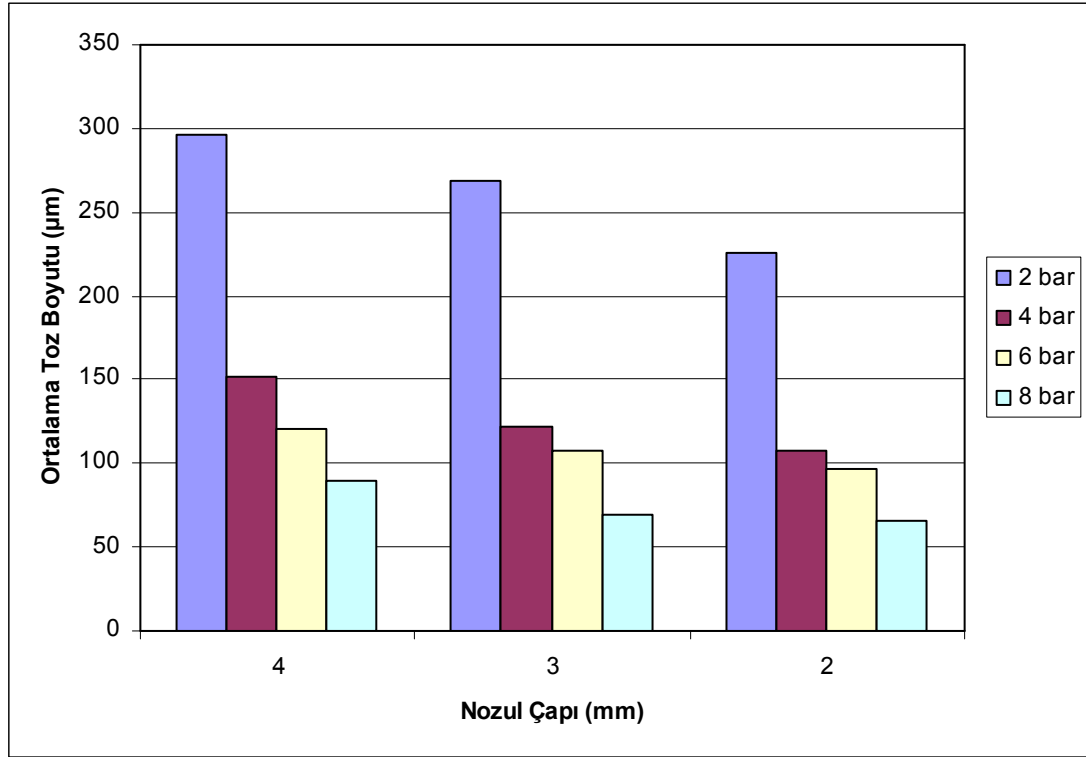


Şekil 5.23. 2 mm nozul çapı ve 6 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.



Şekil 5.24. 2 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozların boyut analizi sonuçları.

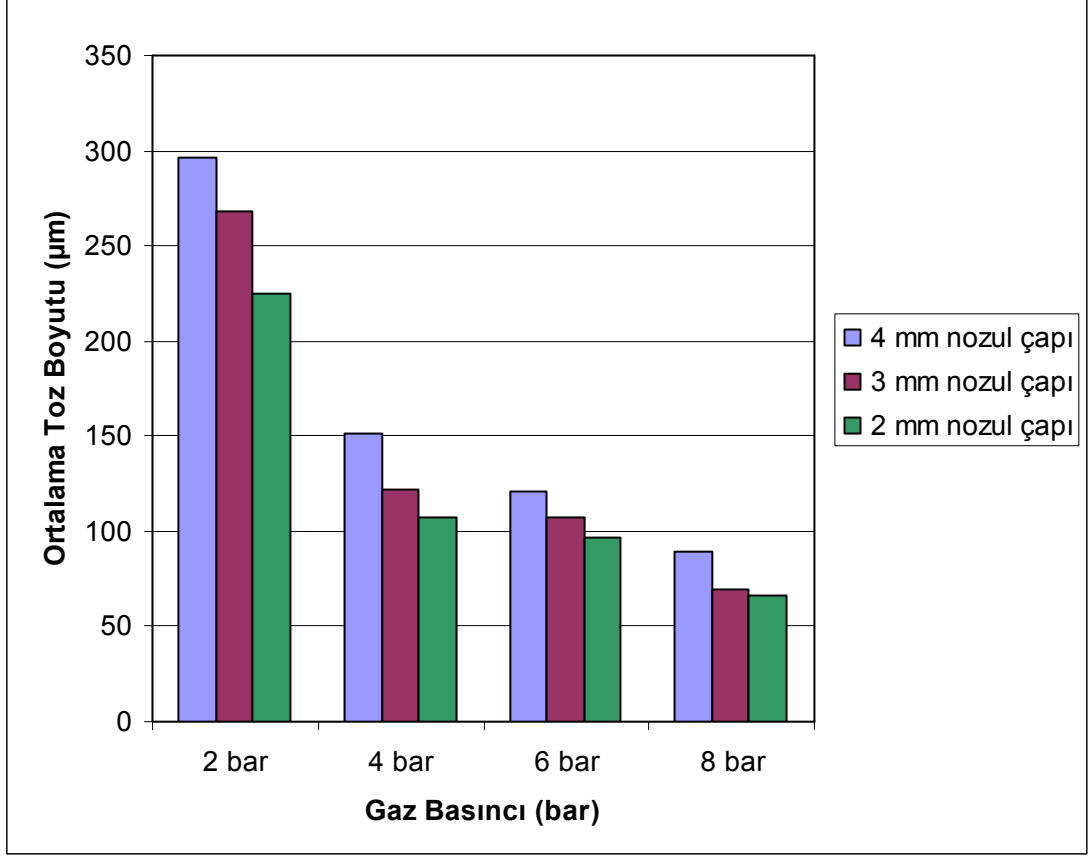
Şekil 4.21’de verilen analizde  $d(0.5) = 225.25 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 121.16 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 554.05 \mu\text{m}$ , Şekil 4.22’de  $d(0.5) = 107.33 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 72.53 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 465.89 \mu\text{m}$ , Şekil 4.23’te  $d(0.5) = 96.43 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 37.09 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 262.26 \mu\text{m}$  ve Şekil 4.24’te  $d(0.5) = 65.94 \mu\text{m}$ ,  $d(0.1) = 24.98 \mu\text{m}$ ,  $d(0.9) = 165.61 \mu\text{m}$  olarak görülmektedir. Bu deneyler 2 mm nozul çapı ile ve sırasıyla 2 bar, 4 bar, 6 bar ve 8 bar’lık atomizasyon gazı basınçları ile yapılmıştır. Yapılan dört deneyde de gaz basıncındaki artış ile ortalama toz boyutunda belirgin bir azalma olduğu net bir şekilde tespit edilebilmektedir ve bu durum literatür [13] ile paralellik arz etmektedir.



Şekil 5.25. Farklı nozul çapında farklı gaz basınçlarıyla üretilen tozların ortalama toz boyutları.

Şekil 5.25’te farklı nozul çapı ile farklı gaz basınçlarında üretilen tozların ortalama toz boyutu değerleri verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi aynı nozul çapında gaz basıncının artması ile ortalama toz boyutu küçülmektedir. Ebeoğlu’da [1], çalışmalarında farklı gaz basınçlarının toz boyutlarına etkisini araştırmış ve gaz basıncının artmasıyla toz boyutlarının küçüldüğünü tespit etmiştir.

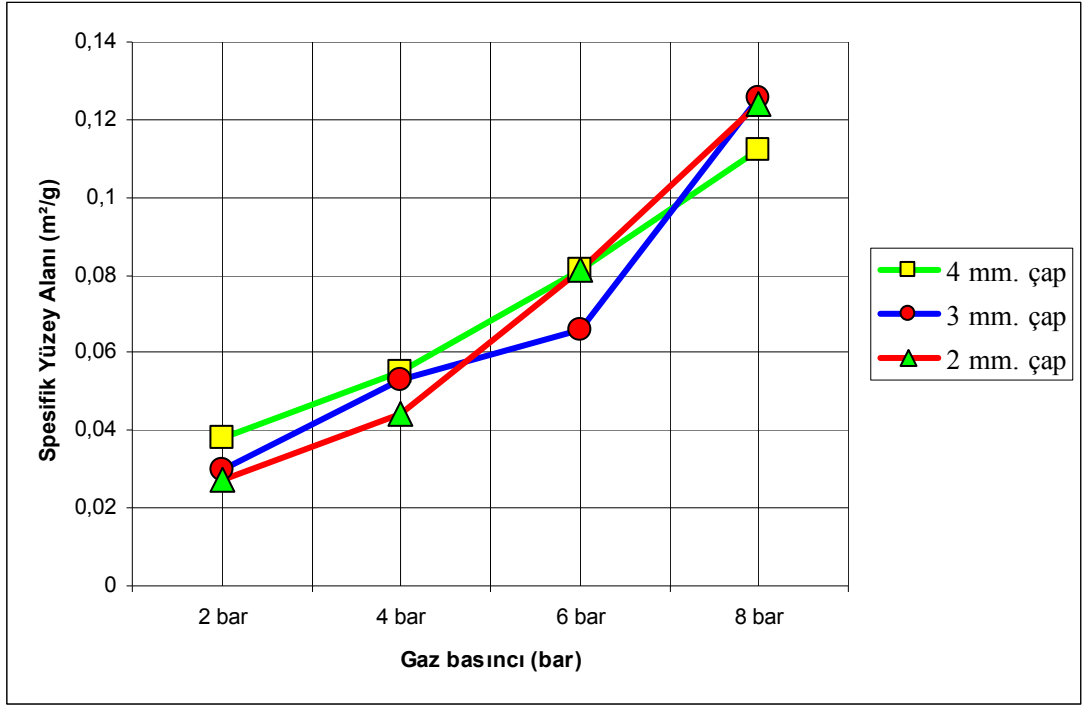
Nozul çapının değiştirilmesinin toz boyutu üzerine etkisini tespit etmek için, yapılan tüm atomizasyon deneylerindeki ortalama toz boyutu değerleri bir grafikte (Şekil 5.26) toplanmıştır.



Şekil 5.26. Farklı gaz basıncında farklı nozul çaplarında üretilen tozların ortalama toz boyutları.

Şekil 5.26'da aynı gaz basınçlarında farklı çaplardaki nozullarla yapılan deney sonuçları incelendiğinde, ortalama toz boyutlarında düzenli bir küçülme görülmektedir. Bu durum nozul çapının küçülmesi ile sıvı akış miktarının azalması sebebiyle ortaya çıkmaktadır.

Farklı nozul çapı ve gaz basınçlarında yapılan deneylerde elde edilen tozların spesifik yüzey alanı değerleri Şekil 5.27'de bir grafikte toplanarak verilmiştir.



Şekil 5.27. Üretilen tozların spesifik yüzey alanı değerleri

Tozların spesifik yüzey alanlarının toz şekline bağlı olarak değiştiği bilinmektedir [13]. Birim kütle başına düşen alan olarak bilinen spesifik yüzey alanı [ $m^2/g$ ], küresellik parametresini vermektedir. Küresellik parametresi ise, üretilen tozların içerisinde küresel olanların küresel olmayanlara oranı olarak bilinir. Tozların küresellik parametresi 1 yada 1'e yakın bir değerde ise toz şekli küreseldir denilebilir.

Şekil 5.27'deki grafikte görüldüğü gibi, gaz basıncına bağlı olarak spesifik yüzey alanı değerleri düzenli bir artış göstermiştir. Şekil 5.9 ile 5.12 kıyaslandığında 2 mm nozul çapı ve 8 bar gaz basıncında üretilen tozun, aynı nozul çapında 2 bar gaz basıncında üretilen tozlara göre daha küresel ve toz boyutunun daha küçük olduğu görülmektedir.

Grafikteki değerler incelendiğinde, nozul çapındaki değişimin spesifik yüzey alanına önemli bir etkisinin bulunmadığı görülmektedir. Buna karşın gaz basıncının, spesifik yüzey alanına oldukça fazla etki ettiği anlaşılmaktadır.



Üretilen tozların boyut ve şekline bakıldığında (Şekil 5.1-5.24), gaz basıncının artmasına bağlı olarak toz partiküllerinin küçülmesi ve Şekil 5.27’de görüldüğü gibi spesifik yüzey alanlarının artması tozların boyutlarının küçüldüğüne delil olarak gösterilebilir.

## BÖLÜM 6

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 6.1. SONUÇLAR

Karabük Üniversitesi gaz atomizasyon ünitesi ile değişik parametrelerde yapılan deneylerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Gaz basıncının artması ile toz şeklinin ligamentten küresele doğru değiştiği görülmüştür.
2. Gaz basıncındaki artış ile birlikte ortalama toz boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir.
3. Nozul çapının küçülmesine paralel olarak ortalama toz boyutunun da küçüldüğü ancak toz şekline bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.
4. En küçük boyutlu tozlar 2 mm nozul çapı ile 8 bar gaz basıncında yapılan deneyde elde edilmiştir.
5. Gaz basıncının artması ile spesifik yüzey alanı değerinin yükseldiği anlaşılmıştır.
6. Küresel yada küresele yakın tozlar elde edebilmek için 2, 3 ve 4 mm nozul çaplarında minimum gaz basıncının 6 bar civarında olması gereklidir.

## 6.2. ÖNERİLER

1. Ergitme fırınının daha yüksek sıcaklıklara çıkabilecek şekilde yeniden tasarlanıp imal edilmesi yüksek ergime dereceli metal tozu üretimi için faydalı olacaktır.
2. Toz toplama kabı yerine siklon kullanılarak tozların boyutlarına göre ayrıştırılması sağlanabilir.
3. Farklı metallerin ya da alaşımların tozları üretilerek incelenebilir.
4. Değişik atomizasyon gazları kullanılarak bunların toz şekli ve boyutuna etkisi araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Ebeoğlu, A.R., “Gaz atomizasyonu ile üretilen Al-Sn alaşım tozlarının özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 23-28 (2008).
2. İncekara, M., “Elektroliz yöntemi ile bakır tozu üretilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-12 (2008).
3. Küçükarslan, S., “Gaz atomize kalay tozu üretim parametrelerinin deneysel olarak araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 21-50 (2006).
4. Ünlü, B.S., Kurgan, N. ve Yılmaz, S.S., “Toz metal çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri”, *Mühendis ve Makine*, 50(588): 11-12 (2009).
5. Başaran, A., “Toz metal parçalara ısıl ve mekanik yüzey işlemlerin birlikte uygulanabilirliğinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 3-39 (2007).
6. Yıldız, E.S., “Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretiminde nozul geometrisinin toz boyutuna etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 5-14 (2007).
7. Çakır, M., Kurt, A., ve Ateş, H., “Toz metal Al malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında devir sayısının kaynaklanabilirliğe etkisi”, *Mühendis ve Makine*, 49(580): 3-4 (2008).
8. Yalçın, B., “Toz metalurjisi yöntemiyle imal edilen titanyum alaşımı implantların temel özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 6-25 (2007).
9. Kurt, A., “Toz metal bronz yatak malzemelerin özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-2 (1992).
10. Ramakrishnan, P., “History of powder metallurgy”, *Indian Journal Of History Of Science*, 18(1):109-114 (1983).
11. Tüfekci, K., “Dinamik yüklenmiş t/m yataklarının farklı sıcaklık şartlarındaki tribolojik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 3-19 (2003).

12. Karagöz, Ş., Yamanoğlu, R. ve Atapek, Ş.H., “Metalik toz işleme teknolojisi ve prosesleme kademeleri açısından parametrik ilişkiler”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(3): 78-80 (2009).
13. German, R.M., “Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri”, Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara, 61-90 (2007).
14. Aydın, M., “Gaz atomizasyon yönteminde yeni bir nozul tasarımı ve toz üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 1-16 (2005).
15. Kılınç, Y. ve Uslan, İ., “Titreşimli yatay atritör imalatı ve alumina öğütme davranışının incelenmesi”, *Mühendis ve Makine*, 44(517): 25-26 (2003).
16. Angelo, P.C. and Subramanian, R., “Powder metallurgy”, **PHI Learning Private Limited**, New Delhi, 22-23 (2008).
17. İnternet: Türk Toz Metalurjisi Derneği “Toz metalurjisi üretim teknikleri” <http://turkishpm.etu.edu.tr/makale.htm>
18. İnternet: Electrochemistry Encyclopedia “Metal powder production by electrolysis” <http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-p04-metalpowder.htm> (2005).
19. Groover, M.P., “Powder metallurgy” , Fundamentals of modern manufacturing 4th ed., *John Wiley&Sons Inc.*, United States of America, 351-352 (2010).
20. Yılmaz, N.F., “Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, Gaziantep, 7-25 (1996).
21. Huiping, L. and Xucheng, D., “Prediction of powder particle size during centrifugal atomisation using a rotating disk”, *Science and Technology of Advanced Materials* , 8: 264-270 (2007).
22. Capus, J.M., “Metal powders 3rd edition”, *Elsevier Science Ltd.*, United States of America, 115-116 (2000).
23. Sarı, D., “Elektroliz yöntemi ile toz üretiminde anot yüzey alanı ve bakırsülfat oranının toz boyutu ve şekline etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 62-65 (2010).
24. Öztürk, S., Arslan, F. ve Öztürk, B., “Su soğutmalı döner disk atomizasyonu ile üretilen AA 2014 alaşım tozlarının soğuma hızına atomizasyon parametrelerinin etkisi”, *Mühendis ve Makine*, 44(517): 44-45 (2003).
25. Ünal, R. ve Aydın, Ö., “Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile gaz atomizasyon nozulu modellenmesi”, Proje no: 107M189, *Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Kütahya, 3-13 (2008).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Şehmuz OĞUZ 1978'de Bartın'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı ve Bartın Lisesi'nden mezun oldu. 1996 yılında ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'ne girdi; 2000 yılında mezun olduktan sonra Yüksekova Çok Programlı Lisesi Metal İşleri Bölümünde Öğretmen olarak göreve başladı. 2008 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını sürdürmekte olup, 2008 yılında göreve başladığı Karabük Mesleki Eğitim Merkezi'nde Metal İşleri Bölümü Öğretmenliği'ne devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres: Karabük Mesleki Eğitim Merkezi  
Yüzüncüyıl Mahallesi / KARABÜK

Tel: (505) 295 72 14

E-posta: seh muzoguz@hotmail.com