KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GAZ ATOMİZASYONU İLE KALAY VE BAKIR ESASLI METAL TOZU ÜRETİMİ

ONUR MURATAL

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GAZ ATOMİZASYONU İLE KALAY VE BAKIR ESASLI METAL TOZU ÜRETİMİ

ONUR MURATAL

Prof. Dr. Muharrem YILMAZ		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniv.**	**.....**
Doç. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU		
Danışman,	**Kocaeli Üniv.**	**.....**
Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU		
Jüri Üyesi,	**Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniv.**	**.....**

Tezin Savunulduğu Tarih: 19.01.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı, beyan ederim.

[ ] Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

[X] Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler **Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi** tarafından FBA-2021-2629 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Onur Muratal

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐	Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
☐	Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
X	Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Onur MURATAL

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda tüm bilgi birikimi ve tecrübelerini en ince detayına kadar büyük bir özveri ile paylaşan, hayallerini benimle gerçekleştiren, bu uzun yolculukta beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan gerek akademik anlamda gerek kişisel anlamda gelişimimde en büyük pay sahibi saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU'na yol göstericiliği ve motive edici yaklaşımı için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın gerçekleşmesinde sağladığı maddi destekleri (Proje No: FBA-2021-2629) için Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Tezimin deneysel çalışmalarına katkıda bulunan ve gece gündüz demeden yardımlarını eksik etmeyen değerli çalışma arkadaşlarım Hasan İsmail YAVUZ, Yiğit GÖNÜLALAN, Oğuzhan YÜKSEL, Emin KURBAN ve İdris GÖKALP'e teşekkür ederim.

Her şeyden öte, hayatım boyunca her an yanımda olan, destekleyen ve bana güç veren Gülşen MURATAL'a, Mehmet Yasin MURATAL'a Erdi MURATAL'a ve Gaye MURATAL'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Mart 2023 Onur MURATAL

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET xi
ABSTRACT xii
1. GİRİŞ 1
2. TOZ METALURJİSİ 3
3. TOZ KARAKTERİZASYONU 5
3.1. Partikül Şekli 6
3.2. Partikül Boyutu 6
3.3. Partikül Saflığı 7
3.4. Boyut Dağılımı 8
4. METAL TOZLARININ DÜNYADAKİ PAZAR PAYI VE MARKET ANALİZİ 10
5. TOZ ÜRETİM TEKNİKLERİ 12
5.1. Mekanik Yöntemler 12
5.2. Kimyasal Yöntemler 14
5.3. Atomizasyon 14
6. ATOMİZASYON TEKNİKLERİ 16
6.1. Su Atomizasyonu 17
6.2. Gaz Atomizasyonu 18
6.3. Plazma Atomizasyonu 20
6.4. Plazma Destekli Dönel Elektrot Yöntemi 21
6.5. Ultrasonik Atomizasyonu 22
6.6. Atomizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması 22
7. GAZ ATOMİZASYONU VE PARAMETRE ETKİLERİ 25
7.1. Atomizasyon Mekanizmaları 28
7.2. Nozul Sistemleri 32
7.3. Negatif ve Pozitif Basınç Etkileri 35
8. MALZEME VE YÖNTEM 39
8.1. Atomizasyon Sistemi 39
8.2. Ergitme ve gaz sistemi 40
8.3. Nozul ve ergiyik akış tüpü 40
8.4. Gaz Atomizasyonu Parametre Çalışmaları 41
8.4.1. Gaz Atomizasyonu ile Kalay ve Babit Alaşımı Üretimi 41
8.4.2. Gaz atomizasyonu ile Bakır ve Bakır Alaşımlarının Üretimi 42
8.5. Elek Analizi ve Toz Boyut Dağılımları 43
8.6. Hall Akış Analizleri 43
8.7. Mikroyapısal Karakterizasyon 44
8.7.1. SEM Analizi 44
9. BULGULAR VE TARTIŞMA 45
9.1. Negatif Basınç ve Basınç Farkı Ölçümü 45
9.2. Saf Kalay Tozlarına Farklı Aşırı Isıtma ve Farklı Gaz Basınçlarının Etkisi 46

9.3. Babit Alaşım Tozlarına Farklı Aşırı Isıtma ve Farklı Gaz Basınçlarının Etkisi 50
9.4. Saf Bakır Tozlarına Farklı Aşırı Isıtma ve Farklı Gaz Basınçlarının Etkisi 54
9.5. Bakır Alaşım Tozlarına Farklı Aşırı Isıtma ve Farklı Gaz Basınçlarının Etkisi 57
10.SONUÇLAR VE ÖNERİLER 61
KAYNAKLAR 64
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 73
ÖZGEÇMİŞ 75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Geleneksel toz metaurjisi ile parça üretiminin şematik gösterimi 3
Şekil 3.1. Hall akış testi 5
Şekil 3.2. Farklı partikül şekilleri 6
Şekil 3.3. Farklı yöntemleri için partikül boyut gereksinimleri 7
Şekil 3.4. Farklı tip harmanlama cihazları a) V-tipi b) Silindir tipi 8
Şekil 5.1. Bilyalı değirmen prosesinin şematik gösterimi 13
Şekil 5.2. Bilyalı değirmen prosesinin şematik gösterimi 13
Şekil 5.3. Kimyasal toz üretim yöntemi akış şeması 14
Şekil 6.1. Su atomizasyonu ile toz üretiminin şematik gösterimi 17
Şekil 6.2. Gaz atomizasyonu ile toz üretiminin şematik gösterimi 19
Şekil 6.3. Plazma atomizasyonu ile toz üretiminin şematik gösterimi 20
Şekil 6.4. PREP atomizasyonunun şematik gösterimi 21
Şekil 6.5. Ultrasonik atomizasyonunun şematik gösterimi. 22
Şekil 7.1. Yatay gaz atomizasyonunun şematik gösterimi 25
Şekil 7.2. Dikey atomizasyon yönteminin şematik gösterimi 26
Şekil 7.3. Sıvı metal demetinin toza dönüşümünün şematik gösterimi 27
Şekil 7.4. Atomizasyon sonrası farklı partikül şekilleri a) gaz b) plazma c) PREP d) su atomizasyonu 27
Şekil 7.5. Ergiyik demetinin parçalanması; I. film oluşumu, II. ligament oluşumu, III. droplet oluşumu 28
Şekil 7.6. Gaz atomizasyonu sonucu oluşan partiküllerin şematik gösterimi 29
Şekil 7.7. a) Serbest düşmeli, b) close-coupled (yakından eşlemeli) nozul sistemleri 30
Şekil 7.8. Serbest düşmeli ve yakından eşlemeli gaz atomizasyonları için üretilen partikül boyutları, gaz basınçları ve ergiyik aşırı ısıtma sıcaklıkları için aralıklar. 31
Şekil 7.9. Nozul gaz çıkış geometrileri a) daieresel yarıklı, b) jet yarıklı 32
Şekil 7.10. Farklı nozul tasarımları a) HPGA b) SIGMA c) Ünal nozul d) laval e) NANOVAL f) halkalı levha nozul 33
Şekil 7.11. a) Daralan geometriye sahip dairesel nozul tasarımı (Mannessmann) b) daralan-genişleyen (Laval tipi) nozul tasarımı 33
Şekil 7.12. Nozul tasarımı ile gaz akış hızının değişiminin şematik gösterimi 34
Şekil 7.13. Atomizasyon nozulu ve ergiyik akış tüpü arasındaki açı eşleşme durumları 34
Şekil 7.14. Atomizasyon nozulu konumuna göre metal akış tüpünün konumu 35
Şekil 7.15. Aspirasyon etkisine sahip yakından eşlemeli bir atomizasyonda gaz akışı ve füzyon modelleri 36
Şekil 7.16. Birincil atomizasyon sırasında sıvı metal ile gaz arasında oluşan kuvvetler 37
Şekil 8.1. Kocaeli Üniversitesi'nde bulunan gaz atomizasyon sistemi 39
Şekil 8.2. 13 KW indüksiyon ergitme ocağı sisteminin görüntüsü 40
Şekil 8.3. Testo basınç farklı ölçer ile negatif ve pozitif basınç ölçüm tekniğinin şematik gösterimi 41
Şekil 8.4. Retch marka elek analiz sistemi ve Malvern Mastersizer partikül boyut dağılım cihazı 43
Şekil 8.5. Hall akış ölçer düzeneği 44

Şekil 8.6. JEOL JSM-6060 ve ZEIS EVO-10 model taramalı elektron mikroskobu görüntüleri 44
Şekil 9.1. Ergiyik akış tüpünün çıkış ucunda oluşan basınç farkı değerleri 45
Şekil 9.2. Pozitif (+) ve Negatif (-) basınç değerlerinde sıvı metal – ergiyik akış tüpü etkileşimi a) pozitif basınç b) negatif basınç c) pozitif basınç d) negatif basınç 46
Şekil 9.3. Farklı atomizasyon parametreleri için kalay tozlarının partikül boyut dağılımları a) Sn1 b) Sn2 c) Sn3 d) Sn4 48
Şekil 9.4. Farklı atomizasyon parametreleri için kalay tozlarının SEM görüntüleri a) Sn1 b) Sn2 c) Sn3 d) Sn4 49
Şekil 9.5. Gaz atomizasyon tekniği ile üretilen tozlara ait SEM görüntüleri a) Sn3 b) Ernesto ve ark. Cu tozu 50
Şekil 9.6. Farklı atomizasyon parametreleri için babit alaşım tozlarının partikül boyut dağılımları a) Babit1 b) Babit2 c) Babit3 d) Babit4 52
Şekil 9.7. Farklı atomizasyon parametreleri için babit alaşım tozlarının SEM görüntüleri a) Babit1 b) Babit2 c) Babit3 d) Babit4 53
Şekil 9.8. Farklı atomizasyon parametrelerine sahip saf bakır tozlarının partikül boyut dağılımları a) Cu1 b) Cu2 55
Şekil 9.9. Farklı atomizasyon parametreleri için saf bakır yığınları ve yığın ölçümleri a) Cu1 b) Cu2 56
Şekil 9.10. Farklı atomizasyon parametreleri için saf bakır tozlarının SEM görüntüleri a) Cu1 b) Cu2 57
Şekil 9.11. Farklı atomizasyon parametrelerine sahip CuCrZr alaşım tozlarının partikül boyut dağılımları a) CuCrZr(1) b) CuCrZr(2) 58
Şekil 9.12. CuCrZr tozlarının farklı büyütmelerde SEM görüntüleri a) 30 bar, 250x b) 30 bar, 1kx c) 35 bar 250x d) 35 bar 2kx 59

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. 2005-2020 yıllarında üretilen metal toz miktarları ve piyasa değerleri 10
Tablo 6.1. Atomizasyon yöntemlerinin karşılaştırılması 23
Tablo 8.1. Kalay ve kalay alaşımlarının atomizasyon parametreleri 42
Tablo 8.2. Bakır ve bakır alaşımlarının atomizasyon parametreleri..... 42
Tablo 9.1. Kalay tozlarının atomizasyon parametreleri ve toz özellikleri..... 47
Tablo 9.2. Babit alaşım tozlarının atomizasyon parametreleri ve toz özellikleri 50
Tablo 9.3. Saf Bakır (Cu) tozlarının atomizasyon parametreleri ve toz özellikleri 54
Tablo 9.4. CuCrZr alaşım tozlarının atomizasyon parametreleri ve toz özellikleri 57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C : Santigrat derece
μm : Mikro metre
Ag : Gümüş
Al : Alüminyum
Au : Altın
Be : Berilyum
Cl : Klor
Co : Kobalt
CO_2 : Karbondioksit
Cr : Krom
Cu : Bakır
Dak : Dakika
Dev : Devir
F : Flor
Fe : Demir
GPa : Gigapascal
H : Hidrojen
H2O : Su
kN : Kilonewton
m : Kütle
mbar : Milibar
Mg : Magnezyum
mL : Mililitre
mm : Milimetre
Mn : Mangan
Mo : Molibden
MÖ : Milattan Önce
MPa : Megapaskal
N : Azot
N : Nitrür
Nb : Niyobyum
Ni : Nikel
O_2 : Oksijen
Pb : Kurşun
s : saniye
Sb : Antimon
Sn : Kalay
Ta : Tantalyum
Ti : Titanyum
V : Vanadyum
W : Tungsten
Zr : Zirkonyum
μ : Mikron
ρ : Yoğunluk, (g/cm^3)

Kısaltmalar

HIP	: Sıcak İzostatik Pres (Hot Isostatic Press)
MÖ	: Milattan önce
PREP	: Plazma Döndürme Elektrot Prosesi (Plasma Rotate Electrode Process)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscope)

GAZ ATOMİZASYONU İLE KALAY VE BAKIR ESASLI METAL TOZU ÜRETİMİ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı eklemeli imalat teknolojileri başta olmak üzere diğer toz metalurjik üretim teknikleri (sıcak pres, lazer/plazma cladding, termal sprey kaplama ve kaynak) için gerekli elementsel ve alaşım tozların üretilmesidir. 3D metal yazıcı teknolojileri veya büyük bir çoğunlukla eklemeli imalat şeklinde kabul edilen bu teknoloji son yıllarda birçok firma ve akademisyen tarafından üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan bir alan haline gelmiştir. Bunların yanında, eklemeli imalat teknolojileri gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için de stratejik bir alan olarak ifade edilmektedir. Kişiye özgü parçaların kalıba gerek olmadan üretimi, gizlilik gerektiren parçalar için kalıba ihtiyaç duymadan bu gizliliğin korunarak firmanın bünyesinde üretimin yapılabilmesi, içi boş fakat dayanımı yüksek parçaların imalatı bu teknolojiyi ön plana çıkaran bazı avantajlardan birkaçıdır. Özellikle metal sektörü açısından son 10 yılda oldukça fazla gelişme olmasına rağmen bu yöntemlerin endüstriyel uygulamalarda kullanımı henüz yaygın hale gelmemiştir. Bunun en önemli sebeplerinden birisi kullanılan hammaddelerin temininden kaynaklanmaktadır. Ülkemiz için stratejik önem arz eden bu hammaddeler büyük ölçüde yurt dışından temin edilmektedir. Metal tozu üretimi için çok farklı teknikler bulunmaktadır. Fakat mevcut durumda eklemeli imalat teknolojileri için genel beklenti, 100 μm altında ve küresel şekilde tozlara olan ihtiyaçtır. Birçok yöntem beklenen kriterleri sağlayan metal tozlarının üretimine izin vermektedir. Çalışma kapsamında Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Gaz Atomizasyonu sisteminin nozul tasarımı yapılarak farklı bileşimlere sahip metal tozlarının üretimi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bakır, Gaz Atomizasyonu, Kalay, Toz Karakterizasyonu, Toz Metalurjisi.

TIN AND COPPER BASED METAL POWDER PRODUCTION BY GAS ATOMIZATION

ABSTRACT

The aim of this study is to produce elemental and alloy powders for additive manufacturing technologies and other powder metallurgical production techniques such as hot press, laser/plasma cladding, thermal spray and welding. In recent years, 3D metal printer technologies or additive manufacturing has become a field that has been intensively studied by many companies and academics. In addition, additive manufacturing technologies are considered a strategic area for both developed and developing countries. Some of the advantages of this technology are customized to need parts without for molds, specific and high strength parts are produced. In the last 10 years there has been a lot of development especially in the metal sector, these methods have not yet become widespread in industrial applications. The reason of that used raw material is to simple found. Raw materials that are largely supplied from abroad, are importanted for our country. There are many different techniques to produce metal powders. However, in order to additive manufacturing technology are required below 100 μm and spherical in shape metal powders. Many processes provide the production of metal powders that is expected these criteria. For this purpose, different compositions metal powders were carried out by designing the nozzle of the Gas Atomization system in Kocaeli University Metallurgical and Materials Engineering Department.

Keywords: Copper, Gas Atomization, Powder Characterization, Powder Metallurgy, Tin.

1. GİRİŞ

İnsanoğlu geçmişten günümüze yaşamsal faaliyetlerinin devamlılığı için birçok araç ve gereci geleneksel yöntemler ile karşılamışlardır. Yaygın olarak kullanılan bu üretim yöntemlerine döküm ve dövme örnek olarak verilebilir (Derand ve Hero, 1992). Geçmişte yaşamış insanlar yüksek sıcaklıklarda ergitilen metallerin bir kalıba dökülerek katılaştırılması sonucunda gıda ürünlerinin korunması için tabak, çanak diğer yandan yabani hayata karşı kendilerini güvende tutmaları için koruyucu ekipman olarak mızrak, bıçak ve diğer aletlerin üretimini gerçekleştirmişlerdir (Van Der Merwe ve diğ., 1982). Özellikle döküm yöntemi ile üretilen malzemelerin mukavemetlerinin artırılması için tavlama sıcaklıklarında diğer bir geleneksel üretim yöntemi olan dövme tekniğini kullanmışladır. Ancak teknolojinin gelişmesine paralel olarak yeni ihtiyaçların oluşması farklı üretim tekniklerinin arayışına zemin hazırlamıştır (Zhuang ve diğ., 2020; Hayman, 2004). Bu kapsamda döküm ve dövme ile üretilmesi mümkün olmayan spesifik ve kompleks şekilli malzemeler için modern bir üretim yöntemi olan toz metalurjisi mükemmel bir çözüm olmuştur. Bundan dolayı özellikle malzeme bilimi uzmanlarının çalışma konularında toz metalurjisi son yıllarda yapılan çalışmalarda odak noktası olmuştur (Yamanoğlu ve diğ., 2021).

Geleneksel üretim yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen toz metalurjisi ergimiş bir metalin yüksek basınç altında hızlı katılaştırılarak metal tozu haline getirilme işlemidir. Üretilen bu tozlar farklı partikül boyutlarına (1 μm – 250 μm) sahip olarak endüstriyel uygulamalarda özellikle uzay, havacılık ve otomotiv sanayinde mikro boyuttaki parçalarda tercih sebebi olmaktadır (Kostornov ve Fushchich, 2007). Diğer yandan 3D printer yazıcılarının gelişmesine bağlı eklemeli imalat endüstrisinde hammadde olarak metal tozlarının kullanılması toz metalurjisinin önemini artıran diğer bir etkendir (Mostafaei ve diğ., 2021).

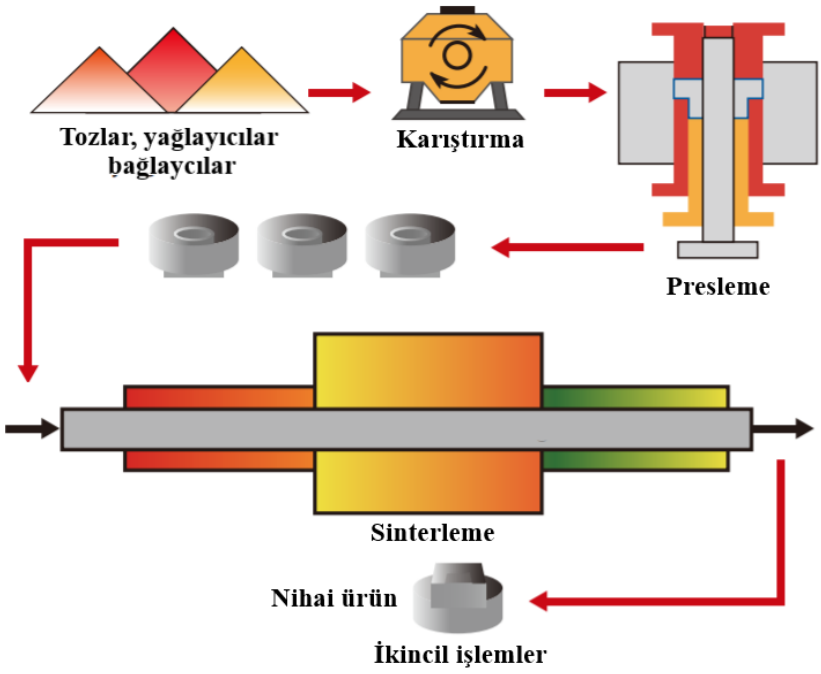
Küresel alanda hızla gelişen teknolojik çalışmalar sonucunda trend olan eklemeli imalat endüstrisinde fonksiyonel parçaların üretimi hız kazanmıştır. Eklemeli imalat ile katman katman üretilen malzemelerde sadece metal tozları değil aynı zamanda polimer ve kompozit gibi diğer malzeme grupları da kullanılmaktadır (Balla ve diğ., 2019). Bundan dolayı diğer üretim yöntemlerine göre mikro boyutlarda popüler hale gelmektedir.

Eklemeli imalat için hammade kaynağı olarak metal tozları birçok yöntem ile üretilmektedir. Yaygın olarak kullanılan bu yöntemler su atomizasyonu, plazma atomizasyonu, plazma destekli dönel elektrot, ultrasonik atomizasyon ve gaz atomizasyonu olarak sıralanabilir.

Bu tez çalışmasında küresellik, partikül boyutu, boyut dağılımı ve saflık gibi birçok faktör göz önüne alınarak optimum toz üretim yöntemi olan gaz atomizasyonu tercih edilmiştir.

2. TOZ METALURJİSİ

Geleneksel üretim yöntemlerinden olan toz metalurjisi tarihsel olarak MÖ 14. yüzyıla dayanmaktadır. O yıllarda yaşayan mısır kralı Tutankamon'un yakın tarihte bulunan mezarından çıkarılan 'altın kılıç' malzeme bilimi uzmanları tarafından yapılan incelemeler sonucunda toz metalurjisi ile üretildiği tespit edilmiştir (Tsukerman, 2013). Toz metalurjisi uzun bir geçmişe sahip olmasına rağmen endüstriyel olarak ancak 18. yüzyılda Rus metalurjist Petr Grigor tarafından kullanılmaya başlanmıştır (Plotkin, 1996). Ancak teknolojik imkanların yeterli olmadığı o yıllarda toz metalurjisi istenen gelişmeyi sağlayamamıştır. 20. yüzyıla gelindiğinde ise küresel alanda gelişen endüstriyel sanayi ile yüksek ergime sıcaklıklarına sahip tungsten karbür kesici uçlar, yatak malzemeleri için bronz burçlar toz metalurjisi ile üretilmeye başlanmıştır (Ortner ve diğ., 2014). Şekil 2.1' de toz metalurjisinin modern üretim yöntemi gösterilmektedir. Özellikle 2. Dünya savaşından sonra modern toz metalurjiye geçiş ile demir esaslı ve demir dışı metalik malzemelerin toz metalurjisi ile üretimi oldukça dikkat çekici hale gelmiştir (Ayyıldız, 2008).



Şekil 2.1. Geleneksel toz metaurjisi ile parça üretiminin şematik gösterimi (Ortner ve diğ., 2014)

Diğer bir geleneksel üretim yöntemi olan döküm yönteminde gaz boşukları, sıcak yırtılmalar ve çarpılma gibi malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyen döküm hataları meydana gelmektedir (Chia ve diğ., 2022). Ancak toz metalurjisi ile üretilen malzemelerde bu gibi dezavantajlar bulunmamaktadır. Bundan dolayı toz metalurjisi ve döküm yöntemleri karşılaştırıldığında toz metalurjisi ile üretilen malzemeler yüksek katılaşma hızı ve koruyucu gaz ortamlarında üretildikleri için daha yüksek mekanik özellikler göstermektedir (Yamanoğlu, 2014). Bununla birlikte döküm ile üretilemeyen kompleks parçaların mikrodalga sinterleme, sıcak pres, sıcak izostatik pres (HIP) ve plazma sprey kaplama gibi yöntemler ile üretimi ve sonrasında talaşlı işleme ihtiyaç duyulmaması toz metalurjisinin diğer önemli avantajlarıdır (Furuya ve diğ., 2022). Diğer yandan talaşlı işlemden kaynaklı malzeme kayıplarının olmaması ekonomik olarak büyük bir maliyet kazancı da sağlamaktadır. Ayrıca toz metalurjisi ile üretilen malzemelerde mekanik özellikler açısından toz partiküllerinin karakteristik özellikleri oldukça önemlidir. Bir sonraki bölümde toz karakterizasyonu detaylı olarak incelenmektedir.

3. TOZ KARAKTERİZASYONU

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen malzemelerin mekanik özellikleri döküm ve dövme gibi diğer geleneksel üretim yöntemlerine göre oldukça yüksektir. Toz metalurjisi ile üretilen malzemelerin yüksek mekanik özelliklere sahip olmasındaki en önemli parametre hammadde olarak kullanılan toz partiküllerinin kendileridir (Tambe ve diğ., 2022). Üretilen tozların akıcılığı, yoğunluğu, şekli, boyutu, saflığı ve boyutsal dağılımı en önemli parametrelerdir. Tozların akıcılığı şekil 3.1'de görüntüsü verilen Hall akış testi ile ölçülmeketedir.



Şekil 3.1. Hall akış testi (Dai ve diğ., 2021)

Hall akış testinde 50 gr tozun yer çekimi etkisi ile çapı 2,5 mm açıklığa sahip huniden akma süresine bağlı olarak tozların akıcılığı hesaplanmaktadır. Toz partiküllerinin akış süresi boyutlarına bağlı olmakla birlikte çok ince partiküller (< 10 µm) topaklandıkları için geç akarlar veya akmazlar. Tozların görünür yoğunlu akış testi gerçekleştirildikten sonra hacim hesabı yapılarak ölçülmektedir (Kulkarni ve diğ., 2010). Titreşim yoğunluğu ise kaba dökülen tozların mekanik bir etki sonucunda oluşan yeni hacmin hesaplanmasıdır. Titreşimli yoğunluk sonrası tozların bir kuvvet altında preslenmesi sonucu oluşan yeni yoğunluğa ham yoğunluk denmektedir. Son olarak ise sinterleme sonrasında nihai yoğunluk Arşimet prensibine göre hesaplanmaktadır (Letenneur ve diğ., 2020). Tozların şekil, boyut, saflık ve boyutsal dağılımı ise bir sonraki bölümde detaylandırılmaktadır.

3.1. Partikül Şekli

Metal tozlarının akışkanlık, reaktiflik, sıkıştırılabilirlik ve sinterlenebilirlik özelliklerine partikül şeklinin etkisi oldukça yüksektir. Çünkü partiküllerin geometrisi nihai malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Haferkamp ve diğ., 2021). Şekil 3.2'de farklı geometriye sahip partiküllerin küresel, köşeli, yuvarlak, düzensiz, silindirik vd. görüntüleri verilmektedir. Bu partikül şekillerinde mükemmel akıcılığa ancak küresel şekilli partiküller ile ulaşılmaktadır Çünkü küresel partiküller minimum temas açısına sahip oldukları için Hall akış testlerinde yüksek verimlilikte akmaktadır. Bundan dolayı üretilen tozların küresel veya küresele yakın olması endüsrtiyel uygulamalarda istenen temel parametreler arasındadır (Woo ve diğ., 2022).

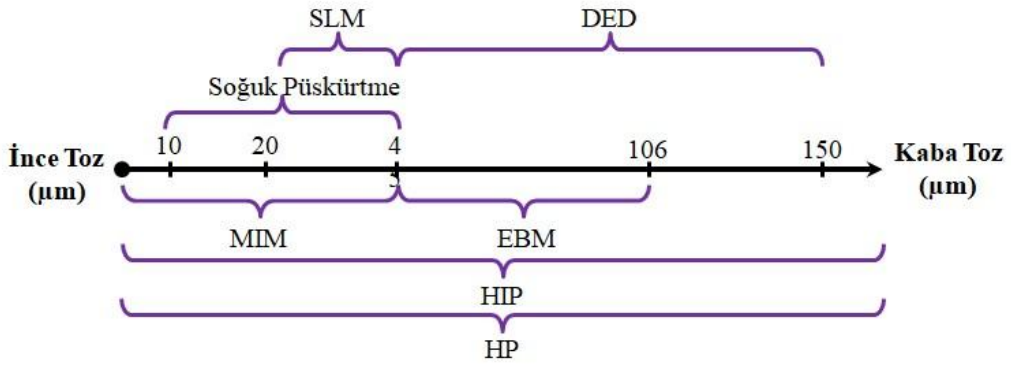


Şekil 3.2. Farklı partikül şekilleri (Woo ve diğ., 2022)

3.2. Partikül Boyutu

Toz metalurjisi ile üretilen metal tozlarının bir diğer önemli parametrisi olan partikül boyutu malzemelerin sinterleme sonrası nihai yoğunlukları üzerine etkin rol oynamaktadır (Chen ve diğ., 2022). Partikül boyutlarına bağlı olarak tozların reaktiflikleri değişkenlik göstermektedir. Yani toz boyutları inceldikçe (< 10 μm) partiküllerin yüzey enerjileri artmakta ve oksijene olan afiniteleri artmaktadır. Dolayısyla sinterleme öncesi ve sonrası mekanik özellikler olumsuz yönde

etkilenmektedir (Pranda ve diğ., 2000). Toz partikül boyutuna göre farklı kullanım alanları arasındaki ilişki Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Farklı yöntemleri için partikül boyut gereksinimleri (Sun ve diğ., 2017)

Birçok farklı üretim tekniği için farklı boyutlara sahip partiküller kullanılmaktadır. Farklı boyutlarda partiküllerin üretilmesinin en temel kaynağı üretim yöntemleridir. Üretim yöntemleri arasındaki farklı soğuma hızları, kimyasal süreçler ve mekanik kuvvetler partiküllerin boyutlarını ve şekillerini doğrudan etkilemektedir (Bassini ve diğ., 2022).

3.3. Partikül Saflığı

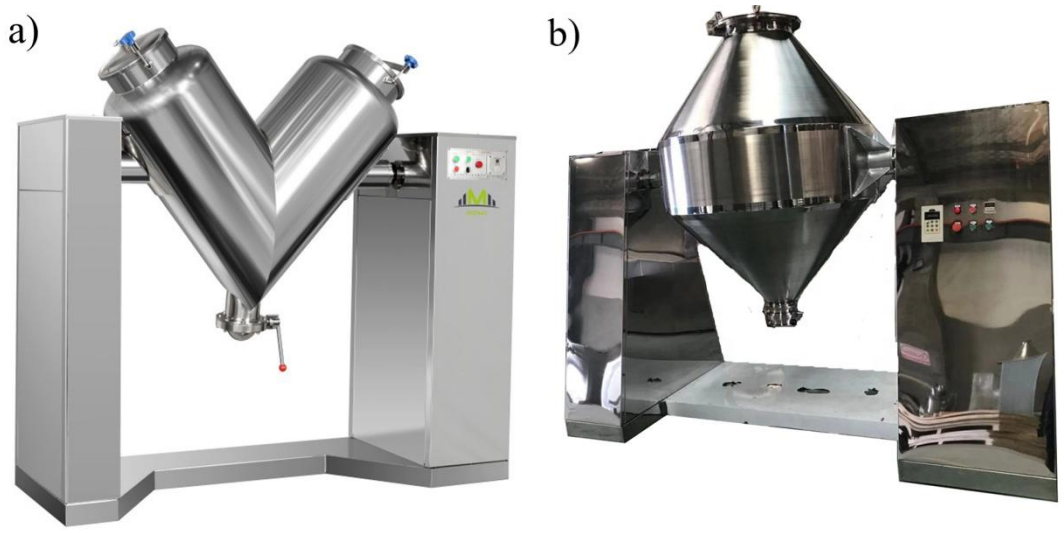
Bütün üretim tekniklerinde meydana gelen en büyük problemlerden biri olan safsızlık toz metalurjisinde de karşımıza çıkmaktadır. Özellikle üretim tekniklerine bağlı olarak kullanılan parametler partiküllerin safsızlık özellikleri üzerine etkisi kaçınılmazdır. Bu parametrelere atomizasyon ortamı, gaz türleri ve vakum ortamı örnek olarak verilebilir (Manotham ve Tesavibul, 2022). Çünkü toz üretimi esnasında meydana gelen kimyasal olaylar (oksitlenme) ve toz partiküllerin yüksek yüzey enerjilerinden dolayı özelliklerinden dolayı yapışan empürite atomları arasında bağlar oluşmaktadır. Bu bağlar sonucunda toz partiküllerindeki empürite atomları nedeniyle saflık değerleri düşmektedir (Vattur Sundaram ve diğ., 2022).

Özellikle nihai üretim yani sinterleme sonrası malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri incelendiğinde toz partiküllerine yapışan ve bağ oluşturan safsızlıklar nedeniyle nihai malzeme özellikleri olumsuz etkilenmektedir. Diğer yandan özelilkle mikroyapı incelemelerinde (Optik mikroskop, SEM) porozitelerin varlığı safsızlıklara

atfedilmektedir (Yu ve diğ., 2022). Bundan dolayı üretimden son işlem kademesine kadar tozların uygun ortamlarda saklanması önem arz etmektedir.

3.4. Boyut Dağılımı

Toz metalurjisinde farklı boyut aralıklarında (1 µm - 1000 µm) tozlar üretilmektedir. Üretilen bu tozlardan ince boyutlu olanlar topaklanmakta diğer yandan kaba tozlar ise poroziteye neden olmaktadır. Bundan dolayı sinterleme sonrası nihai yoğunluklar olumsuz etkilenmektedir (Tian ve diğ., 2017). Bu gibi dezavantajlarından dolayı ince ve kaba boyutlu tozların homojen bir şekilde harmanlanması gerekmektedir. Şekil 3.4'te farklı tip harmanlama cihazları verilmektedir. Bu harmanlama cihazlarında hem kaba hem de ince boyutlu tozlar birbiri içerisinde homojen bir şekilde karıştırılabilmektedir (Guo ve diğ., 2017). Ayrıca karıştırma esnasında farklı yağlayıcı ve bağlayıcıların da ilave edilmesi mekanik özelliklerin iyileştirilmesi açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır.



Şekil 3.4. Farklı tip harmanlama cihazları a) V-tipi b) Silindir tipi (Guo ve diğ., 2017)

Harmanlama işlemi esnasında homojen bir dağılımın sağlanması partikül şekli, boyutu, saflığı, karıştırıcı tipi, toz miktarı, karıştırma süresi ve ortam sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır. Özellikle karıştırma süresi yeterli zaman aralığında olmaz ise homojen bir dağılımın sağlanması mümkün değildir (Sankhla ve diğ., 2022). Diğer bir önemli parametre ise harmanlama cihazındaki ortam sıcaklığı miktarıdır. Özellikle ince partiküller yüksek yüzey enerjisine sahip olduklarından dolayı bağ yapma eğilimleri

artmaktadır. Dolayısıyla yeni bağların oluşması ile sistemin sıcaklığında artış meydana gelmektedir. Bu durumda homojenizasyon işlemi olumsuz etkilenmektedir ayrıca tozların oksitletnme eğilimi de artmaktadır (Asachi ve diğ., 2018).

4. METAL TOZLARININ DÜNYADAKİ PAZAR PAYI VE MARKET ANALİZİ

Toz metalurjisi ile üretilen metal tozları sadece metal endüstirisi için değil aynı zamanda otomobil ve elektronik gibi yüksek profilli endüstriyel sektörlerde de oldukça dikkat çekmektedir. Özellikle kompleks şekilli mikro parçaların toz metalurjisi ile üretimi diğer geleneksel üretim yöntemlerinden üstün olduğunu kanıtlar niteliktedir (Yamanoğlu, 2011). Bundan dolayı gelişen teknolojiye paralel olarak yeni bir üretim yöntemi olan eklemeli imalatta metal tozlarının hammadde olarak kullanılması toz metalurjisinin önemini artıran diğer bir önemli etkendir (Başçı ve Yamanoğlu, 2021). Tablo 4.1'de toz metalurjisi ile üretilen demir, alüminyum, bakır, nikel, tunsgten, kobalt ve kalay tozlarının ton bazında üretimi ve piyasa değeri (milyon $) karşılaştırmalı olarak verilmektedir (Capus, 2005; Pizon ve diğ., 2020).

Tablo 4.1. 2005-2020 yıllarında üretilen metal toz miktarları ve piyasa değerleri (Capus, 2005; Pizon ve diğ., 2020)

	2005		**2020**	
Metal Tozları	**Üretim (Ton)**	**Milyon ($)**	**Üretim (Ton)**	**Milyon ($)**
Demir	1060000	930	2600000	1950
Alüminyum	110000	550	250000	1200
Bakır	65500	330	150000	960
Nikel	50000	1000	110000	2100
Tungsten	37000	600	75000	1400
Kobalt	6000	300	9500	600
Kalay	2 600	32	3500	58

Görüldüğü gibi 2005 yılında henüz eklemeli imalatın tam olarak küresel piyasada varlığını hissettirmemesine rağmen yüksek tonajlarda metal tozları üretilmeye başlanmıştır. Özellikle diğer metal tozlarına göre demir tozlarının yüksek tonajda üretilmesi dikkat çekmektedir. Yeryüzünde bol miktarda bulunması ve endüstriyel olarak çok fazla alaşım türlerine sahip olması demiri ön planda tutmaktadır. Ayrıca demirin otomotiv sektöründe dişliler, kamlar, yataklar ve bağlantı çubukları gibi önemli parçalarda kullanılması önemini artıran diğer önemli etkenlerdir (Capus, 2005). Diğer

yandan endüstriyel olarak sırasıyla alüminyum ve bakır metal tozları boya, kaplama, roket ve füze yakıtları gibi önemli görevler üstlenmektedir. Bu gibi çok yönlü uygulamalarda ancak toz metalurjisi ile üretilen metal tozları kullanılabilmektedir (Pizon ve diğ., 2020). Bundan dolayı henüz 2000 yıllarında büyük bir piyasa değerine sahip olan toz metalurjisinin 2025 yılında bütün teknolojik uygulamalarda yaygın kullanılarak trend haline gelmesi beklenmektedir.

5. TOZ ÜRETİM TEKNİKLERİ

Metal tozu üretimi birbirinden farklı birçok teknik kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Toz üretiminde, tozun şekil, boyut ve boyut dağılım değerlerini istenilen aralıkta tutmak amaçlanmaktadır. Bununla birlikte üretilen tozun kimyasal yapısı ve saflığının korunması ana hedefler arasında yer almaktadır (Hitzler ve diğ., 2018). Belirtilen hedeflere ulaşılması istenilen kalitede parça üretimi için oldukça kritiktir. Tozlar temel olarak mekanik yöntemler, kimyasal yöntemler ve atomizasyon teknikleri olacak şekilde üç farklı yöntem kullanılarak üretilmektedir (Akra ve diğ., 2020). Bu bölümde farklı toz üretim tekniklerinin toz karakterizasyonuna olan etkisi incelenecektir. Diğer yandan tez kapsamında elementel ve alaşım tozlarının üretilmesinde kullanılan gaz atomizasyonu tekniği detaylıca ele alınacaktır.

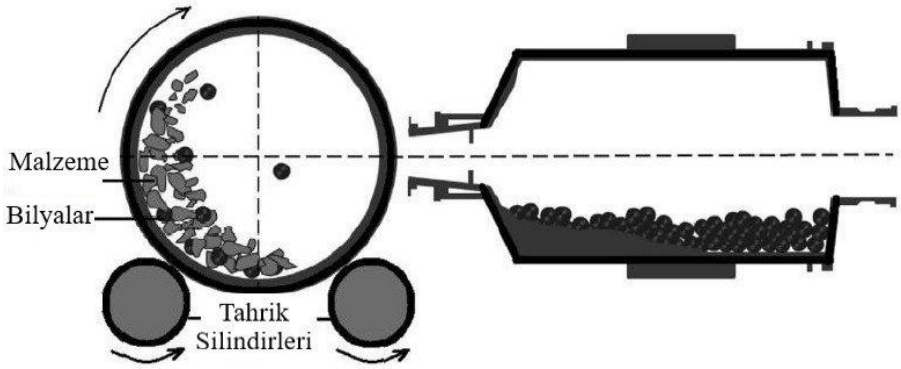
5.1. Mekanik Yöntemler

Mekanik yöntemler ile toz üretimi talaşlı imalat, mekanik alaşımlama ve öğütme olarak 3 grupta incelenmektedir. Bu yöntemler ile tozun üretilmesinde basma, darbe ve kesme kuvvetlerinden faydalanılmaktadır. Tornalama, frezeleme ve taşlama gibi talaşlı imalat teknikleri ile üretilen tozlar büyük boyutlu ve karmaşık şekillidir. Genellikle yüksek karbonlu çelik tozlarının üretildiği bu teknikte üretilen tozlarda oksidasyon, yağlanma, kir tutma ve kontaminasyon sorunları ile karşılaşılmaktadır (German, 2005). Hurdaların değerlendirilmesi için iyi bir yöntem olan talaşlı imalatta toz üretiminden elde edilen verim diğer yöntemlere kıyasla oldukça düşüktür.

Diğer bir mekanik toz üretim tekniği olan öğütme işlemi sert bilyalar, çubuklar veya çekiçler ile yapılan mekanik darbe işlemidir. Bu yöntem ile toz üretiminin yanı sıra herhangi bir yöntem ile üretilmiş tozun kırılması işlemi de gerçekleştirilebilmektedir. (Akra ve diğ., 2020). Bilyalı değirmenler kullanılarak gerçekleştirilen öğütme işlemiyle genellikle gevrek malzemelerden toz üretimi yapılmaktadır.

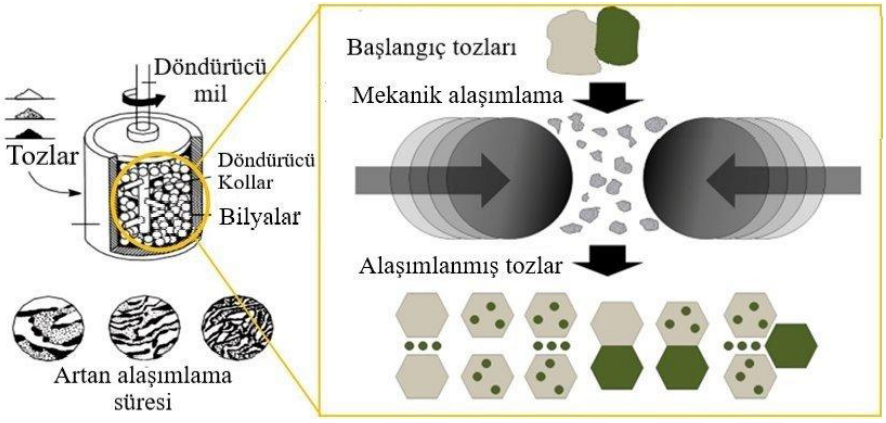
Şekil 5.1'de öğütme işleminin şematik görüntüsü verilmiştir. Bu işlemde sisteme verilen enerjinin büyük bir kısmı ses ve ısıya dönüşmektedir. Bu sebeple düşük verimli bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Optimum öğütme işleminin sağlanabilmesi amacıyla bilya çapı toz çapının yaklaşık 30 katı olmalı ve bilyalar kavanozun yarısını

doldurmalıdır. Öğütülecek malzemenin ise içine konulan kabın yaklaşık %25'ini doldurması önerilmektedir. Bu yöntem ile elde edilen tozlar sert ve düzensiz şekilli olarak karakterize edilmektedir. Ayrıca üretilen tozlar zayıf akıcılık ve paketlenme özelliği göstermektedir (German, 2005).



Şekil 5.1. Bilyalı değirmen prosesinin şematik gösterimi (Loh ve diğ., 2015)

Diğer bir mekanik toz üretim tekniği olan mekanik alaşımlama yönteminde ise mikroskobik ölçekte tekrarlanan çarpışmalar ile metal tozları soğuk kaynaklanmaktadır. Şekil 5.2'de mekanik alaşımlama tekniğinin şematik bir gösterimi verilmiştir.



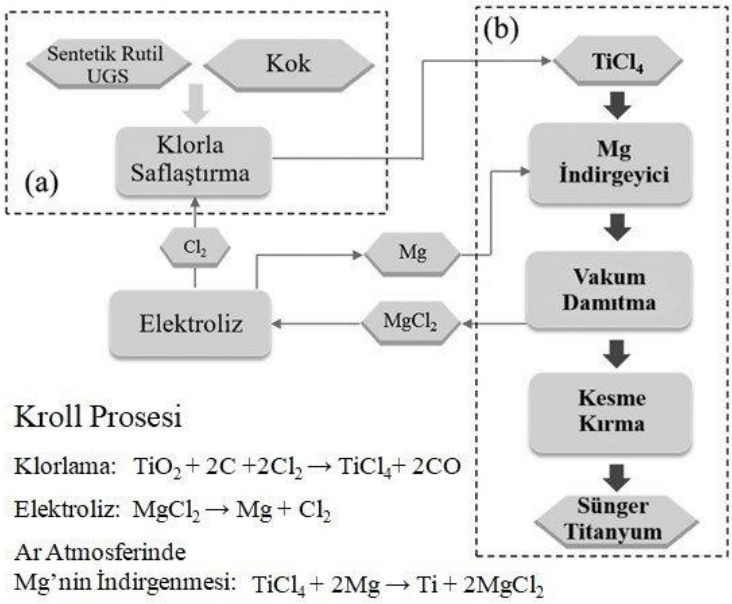
Şekil 5.2. Bilyalı değirmen prosesinin şematik gösterimi (Kozlik ve diğ., 2018)

Devam eden çarpışmalar kaynak noktalarının kırılmasına ve tekrar birleşmesine sonuçta homojen mikroyapıya sahip yüksek mukavemetli malzeme üretilmesini sağlamaktadır. Enerji kullanımı açısından verimli bir teknik olmamasına rağmen bu yöntem ile diğer teknikler ile üretilmesi zor veya imkansız olan özel kompozit formda tozlar üretilebilmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde mekanik yöntemler ile üretilen

tozlarda görülen kirlilik, kaba boyut, düzensiz şekil, düşük verim gibi olumsuz etkiler toz üretimi için farklı tekniklerin önünü açmıştır (Kozlik ve diğ., 2018).

5.2. Kimyasal Yöntemler

Kimyasal yöntemler ile metal tozu üretimi metal oksitlerin (Fe, Cu, W, Ti, Mo, Ni ve Co) karbon monoksit veya hidrojen gibi gazlar ile reaksiyona girerek kimyasal olarak indirgenmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemler ile toz sentezinde katı, sıvı veya gaz fazı tepkimeleri ile toz üretimi yapılabilmektedir (Kondoh, 2012). Şekil 5.3'de görüldüğü gibi kimyasal teknikler ile toz üretiminin örneği olarak titanyum tozunun üretimi verilmiştir. Bu yöntem ile üretilen tozların saflığı hammaddeye bağlı olsa da kimyasal yöntemler ile toz üretiminin en büyük avantajı yüksek saflık eldesi olarak kabul edilmektedir. Diğer yandan kimyasal teknikler ile yalnızca saf metal tozu üretilebilmektedir. Bu yöntemlerin kullanımı alaşım tozlarının üretimi için elverişli olmaması sebebiyle sınırlı kalmaktadır (Xia ve diğ., 2020).



Şekil 5.3. Kimyasal toz üretim yöntemi akış şeması (Xia ve diğ., 2020)

5.3. Atomizasyon

Mekanik ve kimyasal yöntemlerden farklı olarak ergimiş metalin yüksek basınçlı etkenler altında damlacıklar halinde parçalanması ve yüksek hızda katılaştırılması prensibine dayanan atomizasyon yöntemi toz metalurjisi için büyük bir öneme sahiptir (Liu ve diğ., 2022). Özellikle son yıllarda 3D yazılım sistemlerinin gelişmesi ve yeni bir

üretim yöntemi olan eklemeli imalat proseslerinde hammadde olarak tozların kullanılması atomizayon yönteminin önemini arttıran diğer bir etkendir (Rahman ve diğ., 2018). Bu yöntem ile 1mm altında (1 μm - 1000 μm) mükemmel boyut hassasiyetine ve şekline sahip toz partiküllerinin üretilmesi ile eklemeli imalat ile karmaşık şekilli parçaların üretilmesine olanak sağlamaktadır (Garboczi ve Hrabe, 2020). Gelişen teknoloji ile birçok atomizasyon yöntemi geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Bir sonraki bölümde yaygın kullanılan atomizasyon teknikleri geniş bir literatür taraması yapılarak verilmektedir.

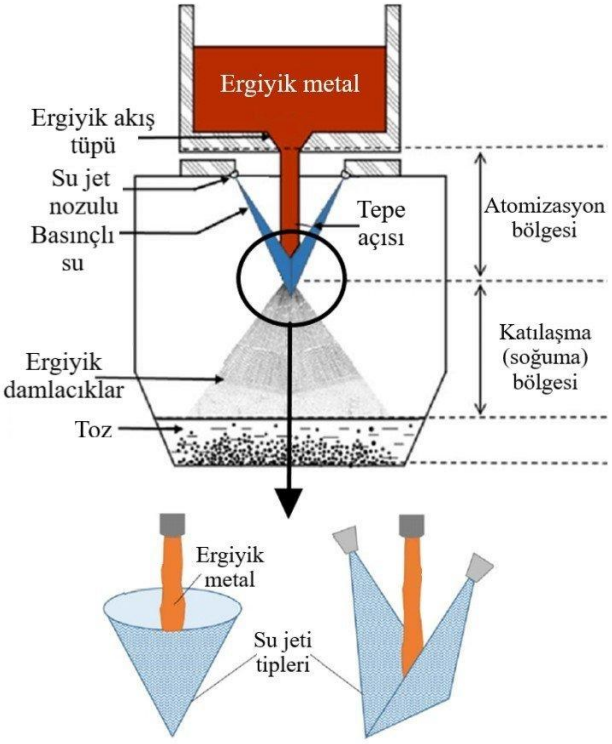
6. ATOMİZASYON TEKNİKLERİ

Genel olarak ergitilebilen her türlü metal atomizasyon tekniğiyle toz haline getirilebilmektedir. Endüstride kullanılan tozların % 60'tan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir (Yenwiset ve Yenwiset, 2011). Atomizasyon teknikleri ergiyik metalin parçalanma şekline göre değişkenlik göstermektedir. Endüstriyel olarak kullanılan çok farklı atomizasyon teknikleri mevcuttur. Bunların en yaygın olarak kullanılanları su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, plazma atomizasyonu ve plazma dönel elektrot prosesidir (PREP) (Lagutkin ve diğ., 2004). Bu yöntemler arasında yüksek basınç değerlerinde farklı sprey karakteristiklerine sahip su kullanılarak sıvı metalin partikül haline getirilmesi su atomizasyonu olarak tanımlanmaktadır. PREP atomizasyonu ise silindirik çubuk şeklindeki metal malzemenin, kendi ekseni etrafında yüksek hızlarda dönerken, koruyucu atmosfer veya vakum altında, uç kısmından plazma ile ergitilerek, ergimiş metalin merkezkaç kuvveti ile dağıtılarak, partiküller halinde katılaştırılması esasına dayanan atomizasyon yöntemidir. Plazma atomizasyonu son yıllarda oldukça revaçta olan bir diğer atomizasyon tekniğidir. Tel formuna getirilen hammaddenin yüksek enerjili plazma tabancaları ile ergitilmesi ve damlacıklar halinde katılaşması esasına dayanmaktadır.

Diğer yandan gaz atomizasyon tekniği farklı basınçlara sahip gaz ya da hava nozulları kullanılarak sıvı metalin partikül haline getirilmesi işlemidir. Bu yöntemler arasında sıvı atomizasyonu rakiplerine kıyasla en ekonomik üretim tekniği olmasına rağmen üretilen tozların düzensiz şekilli olması ve tozların oksitlenmesi sebebiyle temiz tozların üretimi için uygun değildir (Yamanoğlu ve diğ., 2011; Broniarz-Press ve diğ., 2009; Hoeges ve diğ., 2017). Gaz atomizasyonu ise üretilen tozların küresel ve temiz olması sebebiyle diğer yöntemlere kıyasla daha çok tercih edilmektedir. Günümüzde gaz atomizasyonu özellikle eklemeli imalat teknolojisiyle üretilen parçalarda kullanılan tozların temel üretim tekniği olması sebebiyle oldukça önem taşımaktadır (Kassym ve Perveen, 2020). Bu sebeple tez kapsamında elementel ve alaşım tozlarının üretimi Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümün'de bulunan gaz atomizasyonu sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6.1. Su Atomizasyonu

Su atomizasyonu ergimiş metalin yüksek su basıncı ile parçalandığı, ardından hızlı katılaşma sonucunda toz partiküllerine dönüştürüldüğü bir yöntemdir. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi ergitilen metal bir tandiş yardımıyla akmaktadır. Belirli açılardan, su jetleri tarafından sağlanan yüksek basınç ile parçalama ve sonrasında hızlı katılaşma ile toz partiküllerinin üretimi gerçekleşmektedir (Başçı ve Yamanoğlu, 2019). Su atomizasyonunda en önemli parametre basınç değeridir. Yani 50 - 150 bar gibi bir su basıncı ile üretilen partikül boyutları 1 - 25 µm arasında değişmektedir. Diğer yandan basınç değerinin 5 - 20 bar olduğu durumlarda ise partikül boyutu daha kaba yani 30 - 150 µm olmaktadır. Bir değer önemli parametre ise gaz jetlerinin çıkış profilleri ve su jet nozullarının tepe açısıdır. V-tipi ve Konik-tipi piyasada kullanılan en yaygın su jet nozul tipleridir. Tepe açısında yapılan değişimler ise sıvının kinetik enerjisinin ergiyik demetine aktarımını doğrudan etkilemektedir. Düşük tepe açısına sahip su jetleri daha yüksek kinetik enerjiyi ergiyik demetine aktarabilmektedir. Bunun sonucunda daha ince partikül boyutuna sahip tozların üretimi mümkün olmaktadır (Asgarian ve diğ., 2020). Su atomizasyonu ile üretilen metalik malzemelere bakır, demir ve çinko ve bunların alaşımları örnek olarak verilebilir.



Şekil 6.1. Su atomizasyonu ile toz üretiminin şematik gösterimi

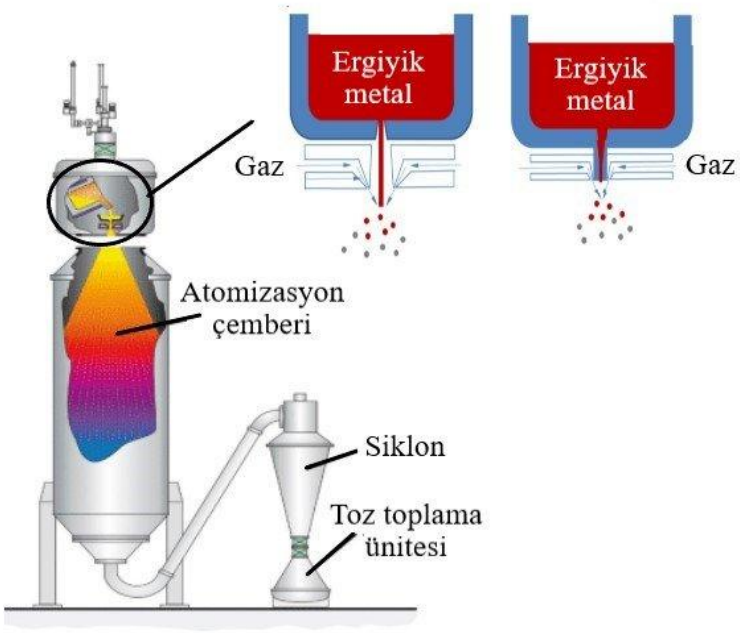
Yeryüzünde bol miktarda su kaynaklarının olduğu düşünüldüğünde diğer atomizasyon yöntemlerine göre oldukça ekonomik bir yöntemdir. Ancak su atomizasyon yönteminde üretilen metal tozlarında H_2O'nun parçalanmasından dolayı yüksek oranda oksit bulunmaktadır. Dolayısıyla üretilen tozların saflıkları açısından büyük bir dezavantaj oluşmaktadır. Özellikle su atomizasyonu yöntemi ile üretilen tozlarda yüksek soğuma hızlarından kaynaklı küreselliğin sağlanamaması diğer bir dezavantajdır (Person ve diğ., 2014). Bundan dolayı hem yüksek saflık hemde mükemmel küresel şeklin sağlanması açısından su atomizasyonuna alternatif olarak gaz atomizasyonu tercih edilmektedir.

6.2. Gaz Atomizasyonu

Gaz atomizasyonu, 1 μm ile 1 mm arasında küresel toz ihtiyacının karşılanması için tercih edilen en yaygın toz üretim yöntemlerinden birisidir. Gaz atomizasyonu tekniğinde prensip gaz akışı ile oluşturulan kinetik enerjinin eriyik metal demetine aktarılarak parçacıkların oluşturulması, soğutulması ve katılaştırılması esasına dayanmaktadır. Gaz ile atomize edilen partiküllerin soğuma hızları 10^2 $K.s^{-1}$ ile 10^5 $K.s^{-1}$ değerlerine ulaşabilmektedir. Belirtilen yüksek soğuma hızları sayesinde elde edilen tozlarda mekanik özelliklerin geliştirilmesi sağlanmaktadır (Ouyang ve diğ., 2007).

Geleneksel gaz atomizasyonu sistemlerinde gaz basıncı 0,6 ile 5 MPa basınç aralığında, nozul gazı hızı ise 1 ile 3 Mach arasında değişir. Ergiyik akış tüpünden geçen ortalama ergiyik akış hızı 1 ile 90 kg/dak arasında değişirken, ortalama gaz akış hızı 1 ile 50 m3/dak arasında değişir. Ergiyik aşırı ısıtma miktarı yani metal ergime sıcaklığı ile ergimiş metalin atomizasyon sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı yaklaşık 75 – 200 °C arasındadır (Zhen ve Lavernia, 2011).

Şekil 6.2'de gösterilmekte olan gaz atomizasyon tekniği, ergimiş metal kendisini parçalamak isteyen bir kuvvet ile karşılaştığında sırasıyla; (i) gazın ergimiş metal demetine çarpması sonucunda kararsız ergiyik bölgesi oluşumu, (ii) ilk aşamanın sonucunda ligament şekilli partiküllerin oluşumu, (iii) birincil atomizasyon sürecinde ligamentlerin dropletlere parçalanması, (iv) ikincil atomizasyon aşamasında dropletlerin daha küçük partiküllere parçalanması sonucu dört ana işlem adımı ile tamamlanmaktadır (Boeck ve diğ 2007).



Şekil 6.2. Gaz atomizasyonu ile toz üretiminin şematik gösterimi

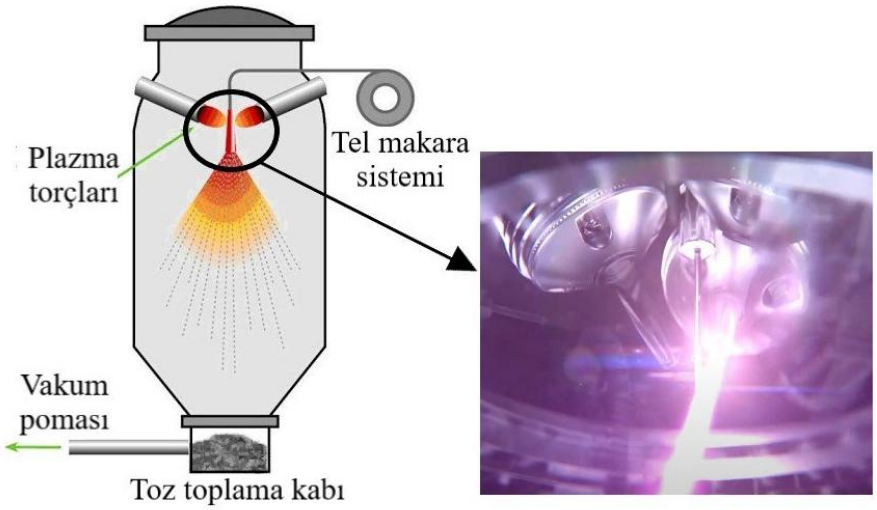
Belirtilen işlem adımlarının sorunsuz bir şekilde devam etmesi için yüksek bir gaz kinetik enerjisi, ergiyik akış tüpünün ucunda sürekli negatif basınç oluşumu ve metal akış borusu ucunda radyal basınç farkı gibi üç koşulun sağlanmış olması gerekmektedir. Bu yöntem ile üretilen tozların karakteristik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla birçok parametrenin optimize edilmesi gerekmektedir. Belirtilen parametreler genel hatlarıyla ergiyik metal ve gaz sistemi olacak şekilde iki ana grupta incelenebilir. Ergiyik metalin sıcaklığı, ergiyik metalin viskozitesi, ergiyik metalin yüzey gerilimi ve ergiyik metalin ergiyik akış tüpünden akış debisi doğrudan ergiyik metal ile ilgili parametreleri oluşturmaktadır. Öte yandan gazın cinsi, sisteme verilen gaz basıncı, gazın debisi, gazın hızı, gazın sıcaklığı ve kullanılan nozul geometrisi ise gaz sistemi ile ilgili optimize edilmesi gereken parametreler arasında yer almaktadır (Shi ve diğ., 2022).

Belirtilen parametreler arasında gaz nozulu ve ergiyik akış tüpünün tasarımı gaz atomizasyonu tekniği açısından kritik öneme sahiptir. Yüksek verimli atomizasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için en önemli aşama nozul tasarımının doğru yapılmasıdır. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde özellikle nozul tasarımı ve geometrisi hakkında genel geçer bilgilerin haricinde spesifik bir bilgi verilmediği ve ticari sır statüsünde olduğu görülmektedir.

Tez kapsamında üretilmesi hedeflenen tozlar gaz atomizasyonu tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Toz üretimi öncesinde nozul tasarımı da dahil birçok parametre için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Üretilen tozların karakterizasyonu ve üretim süreci hakkında detaylı bilgiler sonuçlar kısmında verilmiştir.

6.3. Plazma Atomizasyonu

Plazma atomizasyon yöntemi yüksek ergime sıcaklığına sahip titanyum (1668 °C) ve zirkonyum (1855 °C) gibi reaktif metal tozların üretilmesi için geliştirilmiş bir yöntemdir (Long ve diğ., 2022). Plazma atomizasyon yöntemi ile daha küresel ve ince partikül boyutuna sahip tozlar üretilmektedir. Şekil 6.3'te plazma atomizasyon yöntemi şematik olarak gösterilmektedir (Başçı ve Yamanoğlu, 2019). Görüldüğü gibi tel haline getirilmiş metal malzemeler plazma torçlarında meydana gelen ark ile yüksek sıcaklıklarda damlacıklar halinde ergitilmektedir. Daha sonra ergiyen metal plazma torçlarının ürettiği argon basıncı altında parçalanmaktadır. Son olarak toz haline gelen malzeme toz toplama ünitesinden toplanmaktadır (Entezarian ve diğ., 1996).



Şekil 6.3. Plazma atomizasyonu ile toz üretiminin şematik gösterimi

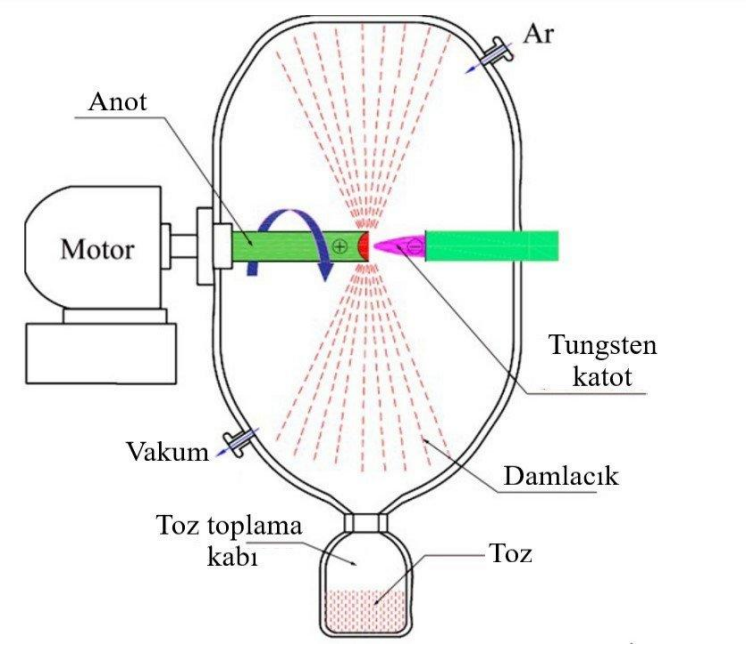
Plazma atomizasyon ile üretilen tozlar mükemmel küresellikte ve saflıkta oldukları için nihai ürün üretiminde (sinterleme) yüksek mekanik özellikler göstermektedirler. Bundan dolayı özellikle havacılık ve biyomedikal uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır. Ancak henüz üretim aşamasında kullanılacak malzemelerin tel formuna getirilmesi bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Birçok rijit malzeme tel

formuna getirilememektedir. Bundan dolayı plazma atomizasyonunun birçok endüstriyel malzeme için kullanımı sınırlanmaktadır.

6.4. Plazma Destekli Dönel Elektrot Yöntemi

Plazma destekli dönel elektrot yöntemi (PREP) ticari olarak endüstriyel uygulamalarda PREP olarak adlandırılmaktadır. PREP yönteminde yaklaşık 40 - 60 mm çaplarında çubuk metal malzemeler kullanılmaktadır (Yamanoğlu ve diğ., 2021). Bu malzemeler işlem sırasında yüksek devirlerde (> 8000 dev/dak) döndürülerek eş zamanlı olarak ergitilmektedir. Ergitilen metalin merkezkaç kuvveti nedeniyle küresel formunu kaybetmemesi için PREP haznesinin çapı oldukça önemlidir (Başçı ve Yamanoğlu, 2019). Bundan dolayı hazne duvarına çarpmadan havada küresel olarak katılaşması için yaklaşık 2400 - 2500 mm çapında PREP hazneleri kullanılmaktadır.

Bir diğer önemli nokta ise toz partiküllerin boyutunu etkileyen elektrot çapı ve dönme hızıdır. PREP yönteminde elde edilen toz partiküllerinin boyut aralığı 45 µm ile 350 µm'dir (Chen ve diğ., 2018). Bu boyut dağılımından dolayı özellikle hammaddesi toz olan eklemeli imalat yöntemlerinden elektron ışını ergitme tekniği (EBM) için mükemmel kaynak oluşturmaktadır. Şekil 6.4'te PREP atomizasyonunun şematik gösterimi verilmektedir.

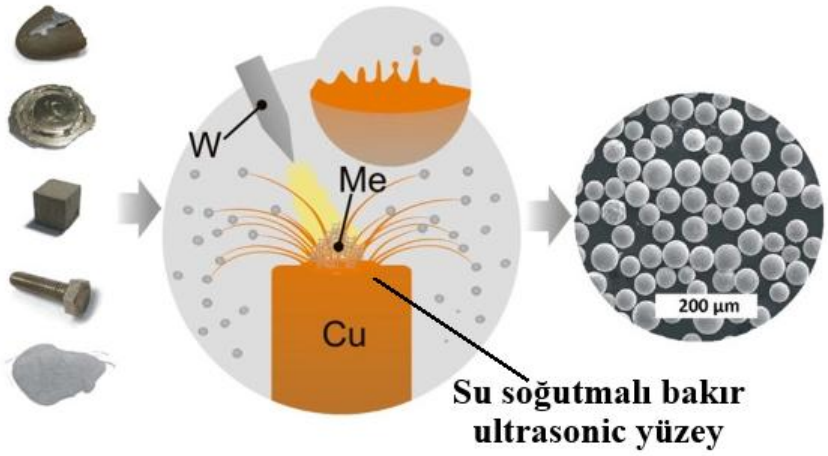


Şekil 6.4. PREP atomizasyonunun şematik gösterimi (Chen ve diğ., 2018)

Diğer atomizasyon yöntemlerine göre mükemmel küresel tozların elde edilmesinden dolayı eklemeli imalat ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerine önemli oranda etki etmektedir (Chen ve diğ., 2018). Diğer yandan ergitme potasının olmaması, vakum altında ve koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirilmesinden dolayı yüksek saflıkta tozlar üretilmektedir. Ancak özellikle 1 - 45 μm aralığında tozların üretim veriminin düşük olması ve yüksek enerji maliyetleri PREP atomizasyonunun dezavantajlarıdır.

6.5. Ultrasonik Atomizasyonu

Ultrasonik atomizasyon yöntemi yüksek gaz basınçlarından dolayı ses dalgalarından oluşan akım ile metal ergitme ve ardından ince toz partiküllerinin elde edilme esasına dayanmaktadır (Yasuda ve diğ., 2011). Şekil 6.5'te görüldüğü gibi diğer atomizasyon yöntemleri gibi ultrasonik atomizasyon yönteminde de uygun katılaşma hızlarına bağlı olarak küresel ve ince boyutlu partiküllerin üretimi sağlanmaktadır (Sokolowski ve diğç, 2022). Ultrasonik atomizasyon yöntemi ile ilgili çalışmalar yeterli düzeyde olmadığından kullanım alanı oldukça dar bir aralıkta kalmaktadır.



Şekil 6.5. Ultrasonik atomizasyonunun şematik gösterimi (Zrodowski ve diğ., 2021).

6.6. Atomizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması

Bir önceki bölümde yaygın olarak kullanılan gaz, su, PREP, ultrasonik ve plazma atomizasyon yöntemleri geniş bir literatür araştırması yapılarak incelenmiştir. Bu bölümde ise Tablo 6.1'de verilen partikül boyutu, partikül şekli, üretilen metal tozları ve maliyet gibi parametrelerin karşılaştırılması yapılmaktadır.

Tablo 6.1. Atomizasyon yöntemlerinin karşılaştırılması (Başçı ve Yamanoğlu, 2019)

Atomizasyon Teknikleri	Partikül Boyutu (μm)	Partikül Şekli	Üretilen Metal Tozları	Maliyet
Su	> 30	Düzensiz	Cu, Ni, Zn, Fe alaşımları	Düşük
PREP	> 50	Küresel	Ti, Zr, Al, Mg alaşımları	Yüksek
Ultrasonik	> 50	Küresel	Mg, Al, Ni, Sn, Cu alaşımları	Ortalama
Plazma	> 5	Küresel	Ti, Zr, Ta	Yüksek
Gaz	> 1	Küresel	Cu, Al, Zn, Ti, Ni, Co, Au, Ag alaşımları	Düşük

Su atomizasyon yöntemi ekonomik olarak bir avantaj sağlasa da atomizasyon esnasında oksitlenmeden dolayı metal tozlarının safsızlıkları düşmektedir. Bundan dolayı birçok ticari uygulamalarda tercih edilmemektedir. Çünkü spesifik ve karmaşık parça üretimlerinde yüksek mekanik özellikler gösteren yüksek saflıkta malzemeler istenmektedir. Ayrıca su atomizasyonu ile 30 μm altında toz partiküllerinin yüksek verimlilikte üretilememesi bir diğer dezavantajdır. Başka bir atomizasyon yöntemi olan PREP yönteminde oldukça küresel toz partikülleri üretilmektedir. Ancak 50 μm altı toz partiküllerinin yüksek verimlilikte üretilememesi ve plazma elektrot kullanımından dolay yüksek enerji maliyetleri kullanımını sınırlamaktadır.

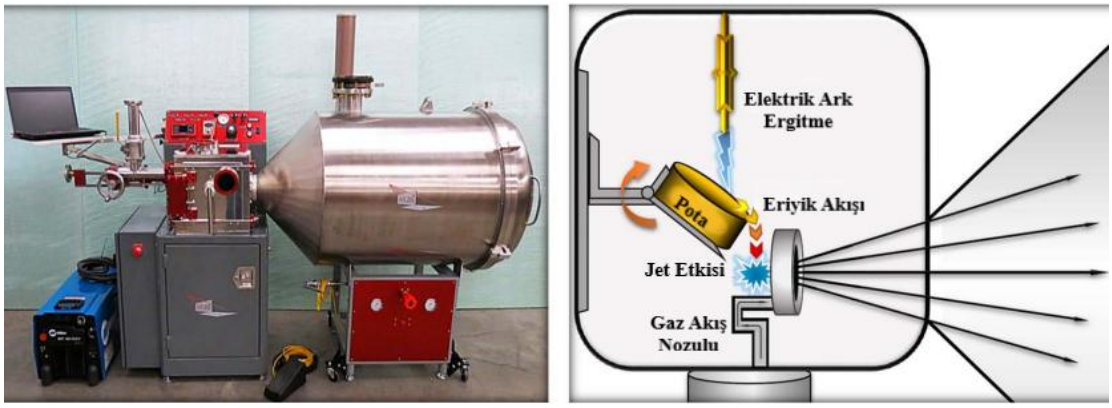
Bir diğer yöntem olan ultrasonik atomizasyonu oldukça reaktif olan magnezyum, alüminyum, titanyum ve alaşımlarının atomizayonunda oldukça dikkat çekmektedir. Bilindiği gibi partiküllerin incelmesi ile beraber yüzey alanı arttıkça reaktiflik özellikler ve dolayısıyla yüzey enerjisi artmaktadır. Hem reaktif hem de artan yüzey alanından dolayı büyük bir enerjiye sahip olan tozların üretilmesi nedeniyle diğer yöntemlere göre oldukça büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ancak yüksek enerji maliyetleri, yüksek hacimli üretimin mümkün olmaması ve 50 μm altı metal tozlarının düşük verimlilikte üretilmesi ultrasonik atomizasyonunun dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır (Başçı ve Yamanoğlu, 2019; Naidu ve diğ., 2022).

Plazma atomizasyon yönteminde ise ince partiküller (< 10 μm) ve küresel metal tozları üretilmektedir. Özellikle Ti, Zr ve Ta gibi yüksek reaktif tozların üretilmesi plazma

atomizasyonunu eşsiz kılmaktadır. Fakat diğer atomizasyon teknikleri gibi yüksek enerji maliyetleri bakımından bir dezavantaj sağlamaktadır. Son olarak bu tez çalışmasında da kullanıldığı gibi gaz atomizasyonu Cu, Al, Zn, Ti, Ni, Co, Au, Ag, Be gibi çok farklı karakteristik özelliklere sahip metal tozların üretiminde yaygın kullanılmaktadır. Partikül boyutu olarak ince ve küresel metal tozlarının üretilmesi gaz atomizasyonunu oldukça cazip hale getirmektedir. Diğer yandan özellikle argon, helyum veya azot gibi koruyucu gazların kullanımı yüksek saflıkta tozların üretilmesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca diğer atomizasyon tekniklerine göre maliyetin çok düşük olması gaz atomizasyonunun yaygın kullanılmasının diğer sebepleri arasında sayılabilir (Popovich ve Surfiiarov, 2016; Nakamura ve Yashima, 2008; Martin ve diğ., 2022; Ban ve diğ., 2023).

7. GAZ ATOMİZASYONU VE PARAMETRE ETKİLERİ

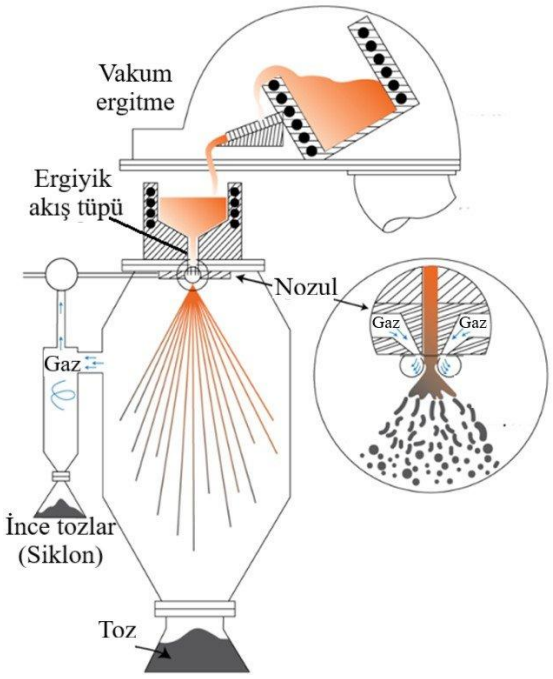
Metal tozlarının en önemli üretim yöntemi olan gaz atomizasyonu küresellik ve ince toz partikül boyutlarının üretimini sağladığından endüstriyel uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır (Meydanjı ve diğ., 2022). Tasarım olarak iki farklı şekilde gaz atomizasyonu yöntemleri vardır. İlk olarak düşük ergime sıcaklıklarına sahip kalay (231,9 °C) gibi metal tozların üretilmesinde Şekil 7.1'de yer alan yatay gaz atomizasyon yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 7.1. Yatay gaz atomizasyonunun şematik gösterimi (Mandal ve diğ., 2022)

Yatay gaz atomizasyon yönteminde görüldüğü gibi nozul bölgesinden yüksek hızlarda çıkan gaz büyük bir itme kuvveti uygulayarak sıvı metalin parçalanmasını sağlar. Damlacıklar haline gelen sıvı metal yüksek hızda soğuma nedeniyle toz partiküllerine dönüşür. Bu sistemde filtre yardımıyla mikron boyutlarda tozların çıkışı engellenerek sadece hava çıkışı ile işlem sonlandırılmaktadır (Mandal ve diğ., 2022).

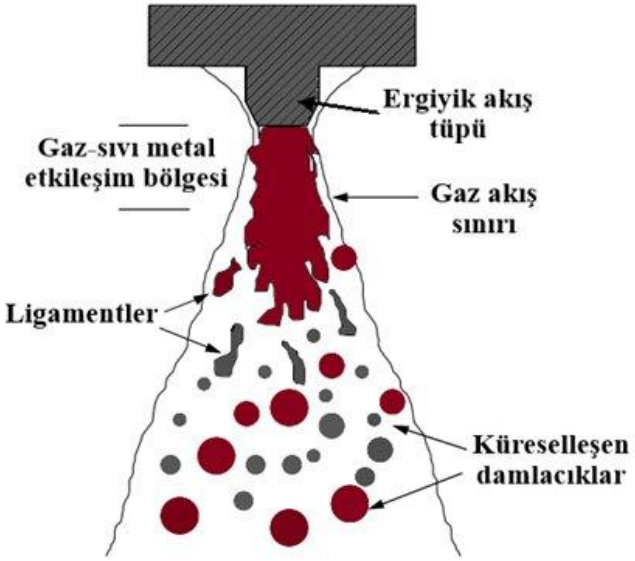
Bir diğer gaz atomizasyon yöntemi yüksek ergime sıcaklıklarına sahip çelik (1538 °C), bakır (1085 °C) ve titanyum (1668 °C) gibi metal tozların üretilmesinde kullanılan Şekil 7.2'de verilmekte olan dikey atomizazyon yöntemidir (German, 2007; Moskal ve diğ., 2022). İndüksiyon ocağı ile ergitilen metal ardından dikey eksenli atomizasyonda toz partiküllerine dönüştürülmesi için ergiyik akış tüpünden akıtılmaya hazır hale getirilir. Çoğu durumlarda metallerin erken katılaşmasını önlemek için aşırı ısıtma yani ergime sıcaklığının ~ 100 - 200 °C gibi üzerinde bir sıcaklıkta tutulması sağlanır. Daha sonra gaz basınç değerleri belirlenir ve inert gazlar yardımıyla atomizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 7.2. Dikey atomizasyon yönteminin şematik gösterimi (Qiu, 2021)

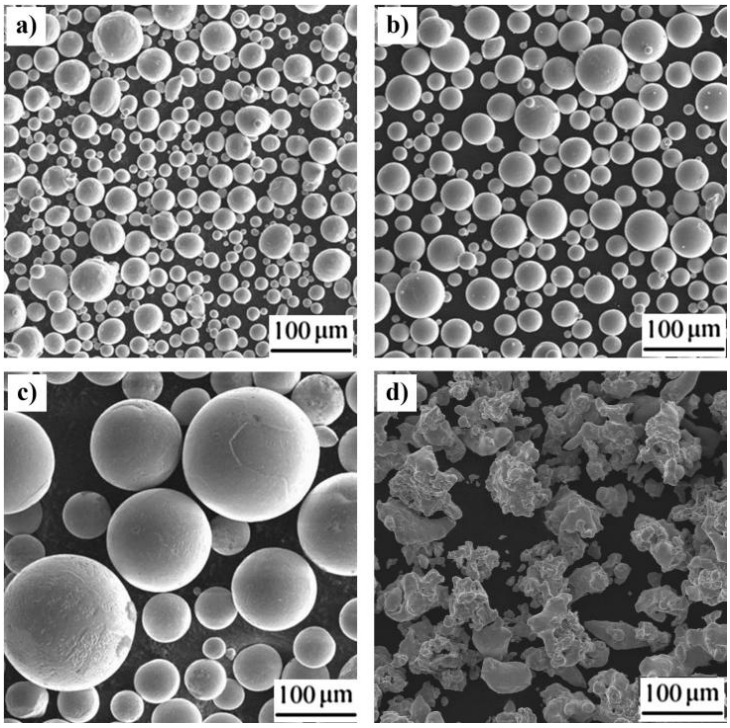
Gaz atomizasyonu esnasında ergiyik sıcaklığı, nozul çapı, nozul açısı, ergiyik akış tüpü açısı, gaz basıncı ve gaz cinsi en önemli parametrelerdir. Ortam şartlarından dolayı birçok ergiyik sıvı metal henüz atomize edilmeden katılaşmaya başlamaktadır. Nozule döküm esnasında yeterli akışkanlığa sahip olmayan başka bir değişle viskozitesi artmış sıvı metal gaz ile teması sırasında donarak sıvı metalin akışını engelleyebilmektedir. Bir diğer önemli parametre ise ergiyik akış tüpü çıkışında oluşan pozitif ve negatif basınçlardır (Qiu, 2021). Dolayısıyla aşırı ısıtma ve ergiyik akış tüpü açılarının optimum ayarlanması bu gibi sorunlara bir çözüm yoludur. Diğer yandan uygun nozul çapı da ergiyik sıvı metalin akmasını kolaylaştırarak işlemin tamamlanmasını sağlar. Bir diğer önemli parametre olan gaz basıncı ise partikül boyutlarına etki eden en temel faktördür. Çünkü düşük basınç değerleri (5 bar - 10 bar) kaba partiküllerin oluşmasına neden olurken yüksek basınç değerleri ise (30 bar - 100 bar) optimum ince partikül boyutlarının üretilmesini sağlamaktadır. Ayrıca kullanılacak gazın cinsi ve saflığı metal tozlarının safsızlığı bakımından büyük önem arz etmektedir (Mandal ve diğ., 2022).

Genellikle argon ve helyum gibi inert gazlar tercih edilirken maliyet açısından birçok durumda azot, oksijen veya karbondioksit tercih edilmektedir. Ancak O_2 ve CO_2 ile üretilen partiküllerin yüksek oksit miktarları nedeniyle safsızlıkları düşüktür. Şekil 7.3'te sıvı metal demetinin küresel partiküllere dönüşümü şematik olarak verilmektedir.



Şekil 7.3. Sıvı metal demetinin toza dönüşümünün şematik gösterimi (Antipas, 2006)

Diğer yandan şekil 7,4'te görüldüğü gibi farklı atomizasyon yöntemleri ile üretilen toz partiküllerin farklı şekilleri verilmiştir. Yukarıdaki parametreler dahilinde en optimum özellik sergileyen partikül şekli nitekim küresel olandır. Birçok endüstriyel parça üretiminde yüksek mekanik özellikler gösterdiğinde küresel partiküller tercih sebebi olmaktadır (Mandal ve diğ., 2022).



Şekil 7.4. Atomizasyon sonrası farklı partikül şekilleri a) gaz b) plazma c) PREP d) su atomizasyonu (Khoshnaw ve diğ., 2021)

7.1. Atomizasyon Mekanizmaları

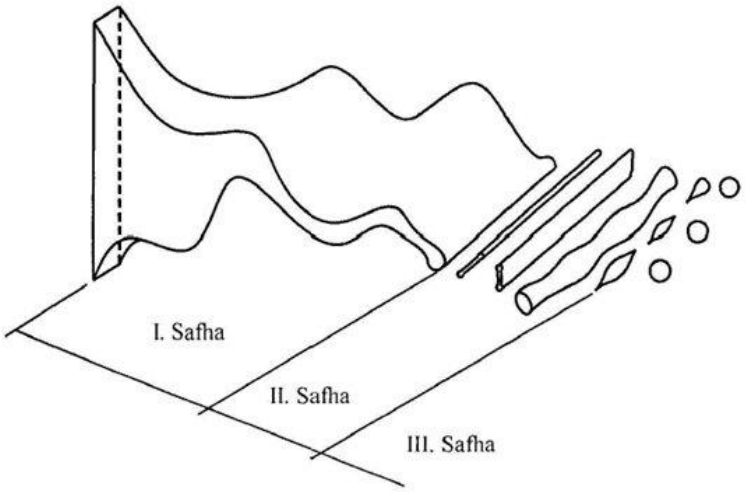
Atomizasyon esnasında ergimiş metalin farklı tasarımlara sahip ergiyik akış tüplerinden akması ve yine farklı tasarımlara sahip nozullardan geçirilen yüksek basınçlı gaz ile parçalanması sonucu toz partikülleri oluşmaktadır.

Gaz atomizasyonunda ergimiş metal kendisini parçalamak isteyen bir kuvvetle karşılaştığında proses 4 adımda tamamlanır,

1) Atomizasyon gazının ergimiş metal demetine çarpması ile stabil olmayan ergiyik bölgenin oluşması,
2) İlk aşamanın sonucunda ligament şekilli partiküllerin oluşması,
3) Birincil atomizasyon süresince ligamentlerin dropletlere parçalanması
4) İkincil atomizasyon süresince dropletlerin daha küçük partiküllere parçalanması

Şekil 7.5'te şematik olarak atomizasyon sonucu oluşan toz partiküllerin farklı safhalardaki formları verilmektedir. Bu safhalar sırasıyla;

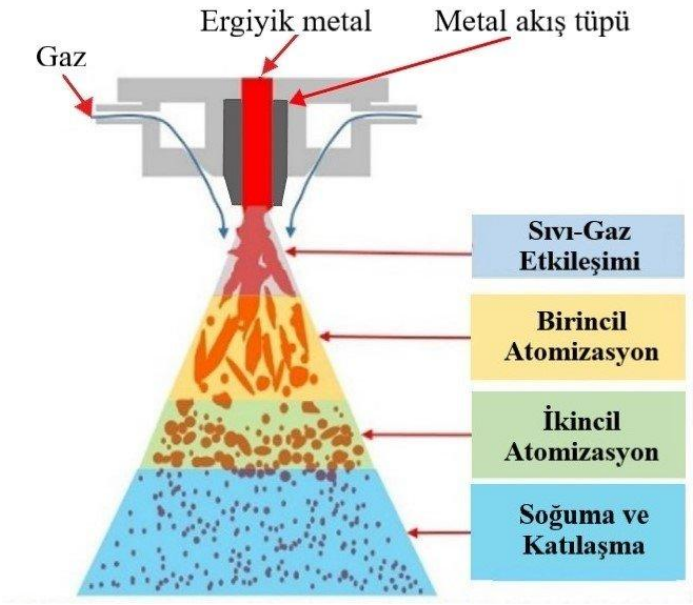
1. Yüksek basınç nedeniyle artan genlik ve sinüs dalgasının oluşması (film oluşumu),
2. Bu oluşan sinüs dalgasının kısa süre içerisinde büyümesiyle ligament oluşumu,
3. Son olarak ligamentin bölünmesiyle küresel damlacıklar (droplet) oluşmaktadır (Mi ve diğ., 1997).



Şekil 7.5. Ergiyik demetinin parçalanması; I. film oluşumu, II. ligament oluşumu, III. droplet oluşumu (Mi ve diğ., 1997)

Yukarıda verilmekte olan şematik gösterim Dombrowski ve Johns tarafından modellenmişitir. Yaptıkları çalışma hava jeti kullanılarak ergimiş sıvı metalin parçalanması ve son olarak dropletlerin oluşumu prensibine dayanmaktadır. Başka bir deyişle belirli kritik genlik değerlerine ulaşan dalgalar büyümeye başlar. Ardından oluşan yüzey gerilmelerin sonucunda sıvı metal parçalanması ile damlacıklar oluşur. Son olarak hızlı katılaşma neticesinde oldukça küresel ve farklı boyut dağılımlarına sahip toz partikülleri oluşur.

Diğer yandan Luo ve ark. tarafından da atomizasyon sonucu oluşan partiküller ile ilgili farklı bir modelleme geliştirilmiştir. Üç aşamadan oluşan bu modelleme Şekil 7.6'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.6. Gaz atomizasyonu sonucu oluşan partiküllerin şematik gösterimi (Luo ve diğ., 2021)

Üç aşamadan oluşan bu modellemede gaz jetleri tarafından yüksek gaz basıncı altında sıvı metal demetleri oluşur. Birici aşamada yüksek gaz basıncı ve sıvı metalin ilk teması gerçekleşir ve ardından sıvı metal demetleri akış bölgesine hareket eder. Bu noktada yüksek basınç nedeniyle sıvı metal demetinden kopmalar başlar.

Diğer yandan eğer gaz basıncı sıvı metalin yüzey enerjisinden dolayı yapılanma enerjisini aşarsa ikinci aşamaya direkt geçilir. İkinci aşamada damlacıklar yüksek hızlı

gazlar ile daha küçük damlacıklara ayrılır. Son olarak üçüncü aşamada ise gerekli zaman diliminde ayrışmaya başlayan sıvı metal demetleri oldukça küresel şekle ve ince partikül boyutuna sahip toz parçacıklarına dönüşür (Luo ve diğ., 2021).

Gaz atomizasyonu işleminin düzenli bir şekilde devam etmesi için aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır.

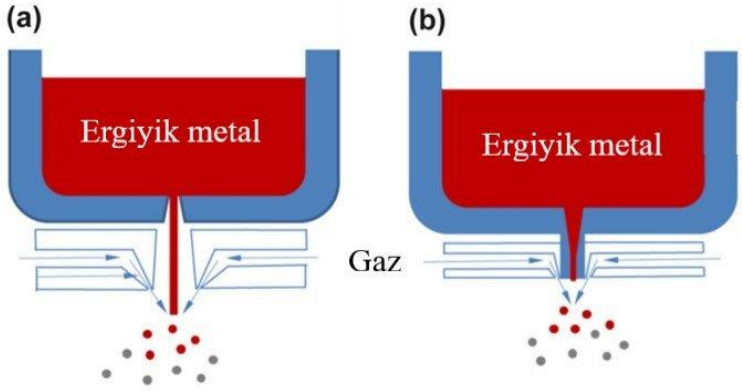
1) Yüksek gaz kinetik enerjisi,

2) Metal akış borusunun ucunda daima bir negatif basınç oluşumu,

3) Metal akış borusu ucunda radyal basınç farkı,

4) Uygun sıvı metal viskozitesi.

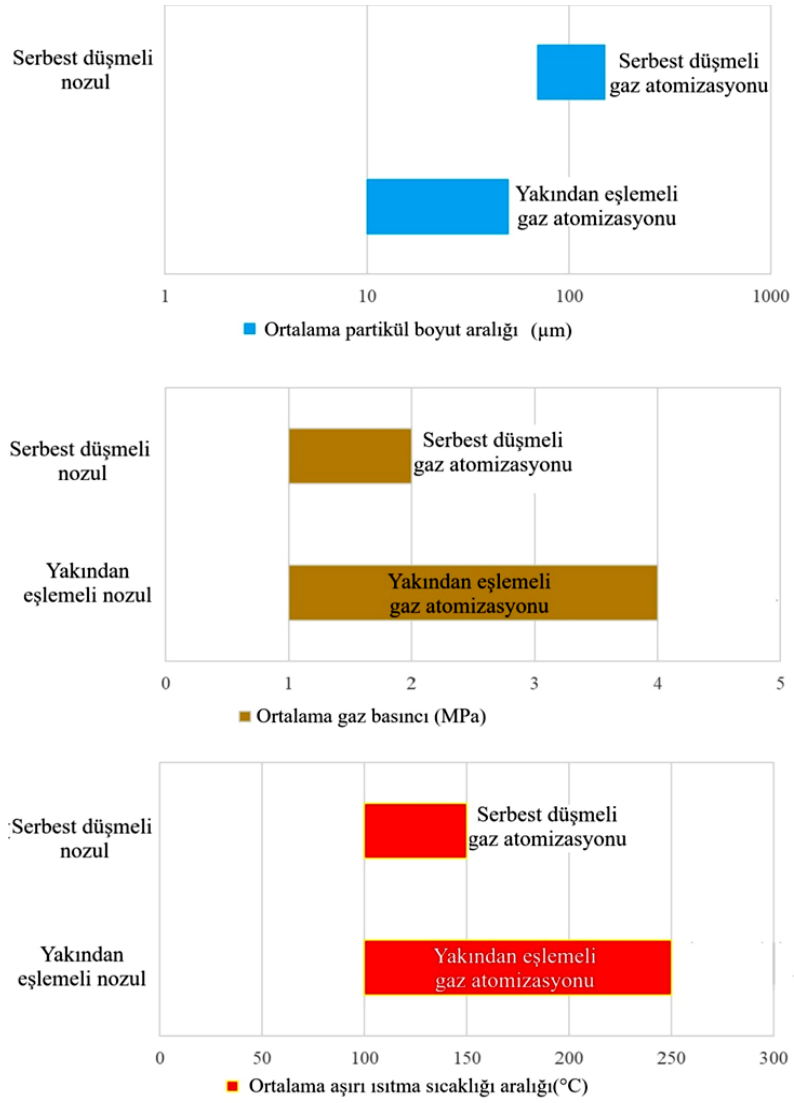
Atomizasyon sistemleri, serbest düşmeli (free-fall) ve yakından eşlemeli (Closed couple) olarak iki şekilde tanımlanabilir.



Şekil 7.7. a) Serbest düşmeli, b) close-coupled (yakından eşlemeli) nozul sistemleri (Sun ve diğ., 2017)

Serbest düşmeli sistemlerde sıvı metal, gaz jeti ile temas edinceye kadar serbest olarak akar. Sıvı metal yerçekiminin etkisinde belirli bir mesafe (2 – 20 cm) boyunca aktıktan sonra gaz jeti ile temas eder. Yakından eşlemeli sistemlerde, sıvı metal nozul gaz çıkış bölgesine bir ergiyik akış tüpü ile gönderilir. Serbest düşmeli sistemlerde 10 – 20 bar arası gaz basınçları kullanılır. Yakından eşlemeli sistemler ile karşılaştırıldığında serbest düşmeli sistemler daha avantajlı toz üretim maliyetine sahiptir ancak toz kalitesi ve ince toz verimi düşüktür. Yakından eşlemeli sistemlerde gazın kinetik enerjisi ergiyik

demetine daha iyi enerji aktardığı için atomizasyon verimleri yüksektir (Sun ve diğ., 2017). Yakından eşlemeli sistemler yüksek verimde çalışmalarına rağmen bazı zorluklara sahiptir. Bunlardan en önemlisi metal akış borusu ucunda oluşan basınç farkıdır. Basınç farkı negatif ya da pozitif olabilir. Yüksek atomizasyon basınçlarında, sıvı metal akışının kararlılığı, nozul ve metal akış borusunun boru ucunda daima bir negatif basınç oluşturacak geometride tasarlanmasıyla kontrol edilebilir (Wolf ve Bergmann, 2002). Serbest düşmeli ve yakından eşlemeli gaz atomizasyon sistemleri hakkındaki literatür incelemesine dayanarak, bu iki tip gaz atomizasyon sistemi için üretilen partikül boyutları, gaz basınçları ve ergiyik aşırı ısıtma sıcaklıkları için aralıklar Şekil 7.8'de özetlenmiştir.

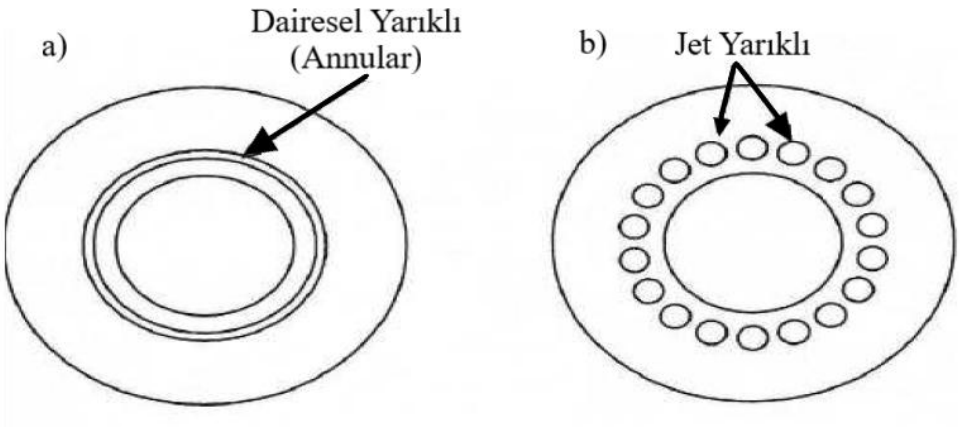


Şekil 7.8. Serbest düşmeli ve yakından eşlemeli gaz atomizasyonları için üretilen partikül boyutları, gaz basınçları ve ergiyik aşırı ısıtma sıcaklıkları için aralıklar.

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 malzemelerden imal edilen ergiyik akış borusunun içinden geçer. Sıvı metalin ergiyik akış borusu içersinde katılaşmasını önlemek amacıyla seramik boru ısıtılır. Bu sistemlerde serbest düşme sistemlerine göre daha kolay parçalanma gerçekleşir ve küresel şekle sahip tozlar üretilir. Yakından eşlemeli sistemlerde gaz dolaşım bölgesi ve bu bölgenin atomizasyona olan etkisinin araştırılması, kritik bir konu olmuştur (Liu ve Altan, 2002; Wei ve diğ., 2020).

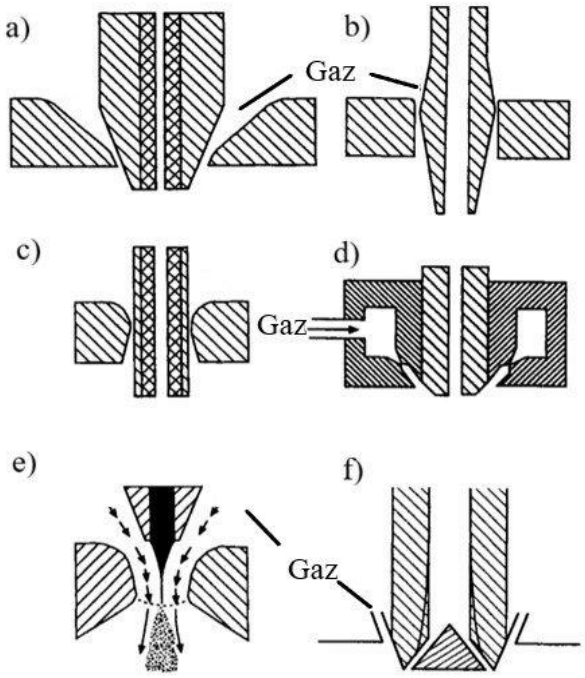
7.2. Nozul Sistemleri

Yukarıda bahsedilen etkenler incelendiğinde bir gaz atomizasyon sisteminin en önemli ve sır gibi saklanan parçalarının nozul ve metal akış tüpü olduğu görülmektedir. Gaz atomizasyon sistemlerinde çok farklı geometrilere sahip nozul tasarımları üzerine çalışılmaktadır. Nozullar genel olarak sahip oldukları gaz çıkış geometrilerine göre jet yarıklı ve dairesel yarıklı olmak üzere ikiye ayrılırlar (Liu ve Altan, 2002). Şekil 7.9'da nozul gaz çıkış geometrilerine göre nozul tiplerinin şematik çizimleri verilmiştir.



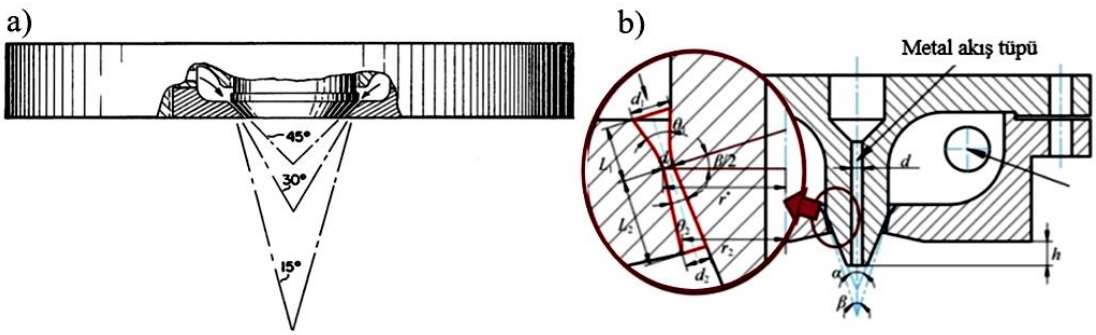
Şekil 7.9. Nozul gaz çıkış geometrileri a) daieresel yarıklı, b) jet yarıklı (Liu ve Altan, 2022)

Nozul tipleri ile ilgili bilgilerin sır gibi saklanmasından dolayı nozul tipleri genel olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 7,10'da farklı nozul tasarımı örnekleri verilmiştir.



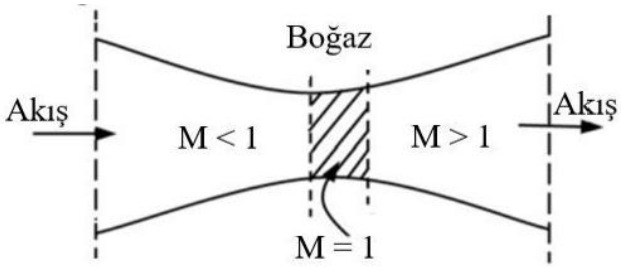
Şekil 7.10. Farklı nozul tasarımları a) HPGA b) SIGMA c) Ünal nozul d) laval e) NANOVAL f) halkalı levha nozul (Mates ve Settles, 1995)

Yüksek verimli atomizasyon işlemi için yapılması gereken en önemli aşama uygun şartlarda çalışabilecek bir nozul tasarımının yapılmasıdır. Bunun için nozul performansının araştırılması gerekir (Mates ve Settles, 1995). Sektörde ve araştırmalarda iki nozul tipi üzerinden farklı çalışmalar yapılmaktadır. Daralan-genişleyen tasarıma sahip nozullar Laval nozulu olarak bilinir. Gaz çıkısı, es merkezli halka biçimende olan daralan tasarıma sahip nozullar ise Mannessmann nozulu olarak adlandırılır (Xu ve diğ., 2020; Howells ve diğ., 1989). Şekil 7.11'de iki farklı tip nozul tasarım görselleri verilmiştir.



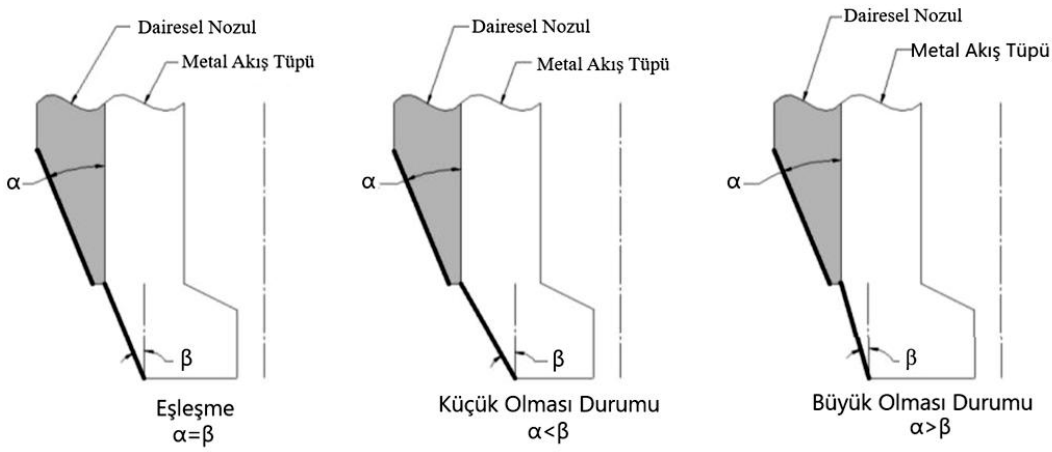
Şekil 7.11. a) Daralan geometriye sahip dairesel nozul tasarımı (Mannessmann) b) daralan-genişleyen (Laval tipi) nozul tasarımı (Xu ve diğ., 2020; Howells ve diğ., 1989)

Atomizasyon gazının nozuldan çıkısı, gaz hızını ses hızının altındaki hızlarla (Mach<1) sınırlayan daralan tasarım veya ses hızının üstündeki hızlara (Mach>1) ulaşmasına imkan veren daralan-genişleyen tasarım seklinde olabilir.



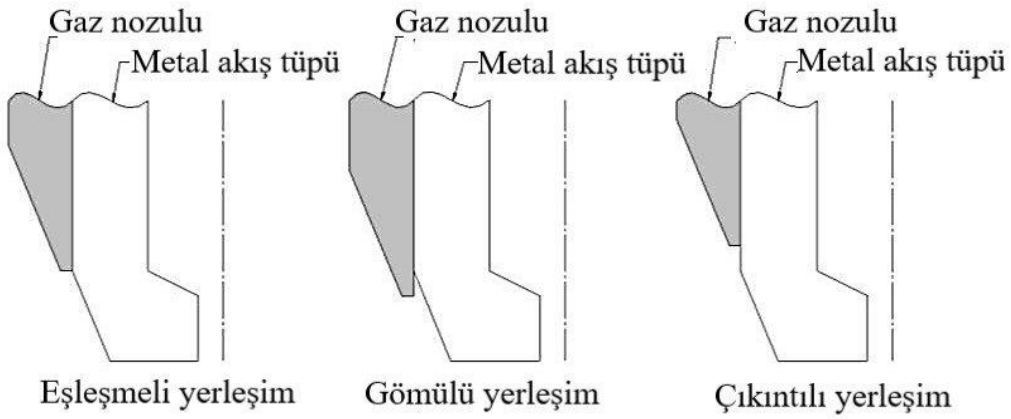
Şekil 7.12. Nozul tasarımı ile gaz akış hızının değişiminin şematik gösterimi (Howells ve diğ., 1989)

Nozul tasarımının dışında bir diğer önemli konu ise metal akış tüpünün tasarımıdır. Metal akış tüpü genellikle seramik bir malzemeden üretilir. Metal akış tüpünün iç çapı, nozul çıkışına göre çıkıntı mesafesi ve nozul tepe açısı ile arasındaki açı uyuşmazlığı elde edilecek olan metal tozunun boyutunu, şeklini ve verimini doğrudan belirler. Gaz atomizasyon sistemlerin genel bir yaklaşım ile metal akış tüpünün iç çapı 1 - 15 mm, metal akış tüpü çıkıntı mesafesi 0 - 15 mm ve gaz nozulu ve metal dağıtım nozulu arasındaki bağıl açı 7 - 45° arasında değişir (Strauss, 2013; Mullis ve diğ., 2011). Nozul ile metal akış tüpü arasında ki uyum ve uyuşmama durumu Şekil 7.13'te verilmiştir (Strauss, 2013). Bu uyum ve uyuşmazlık tüm atomizasyon sürecini etkileyen son derece önemli bir bilgidir. Doğru açıların seçilmesi partikül şeklini, verimini ve sürecin devamlılığını doğrudan etkilemektedir.



Şekil 7.13. Atomizasyon nozulu ve ergiyik akış tüpü arasındaki açı eşleşme durumları (Strauss, 2013)

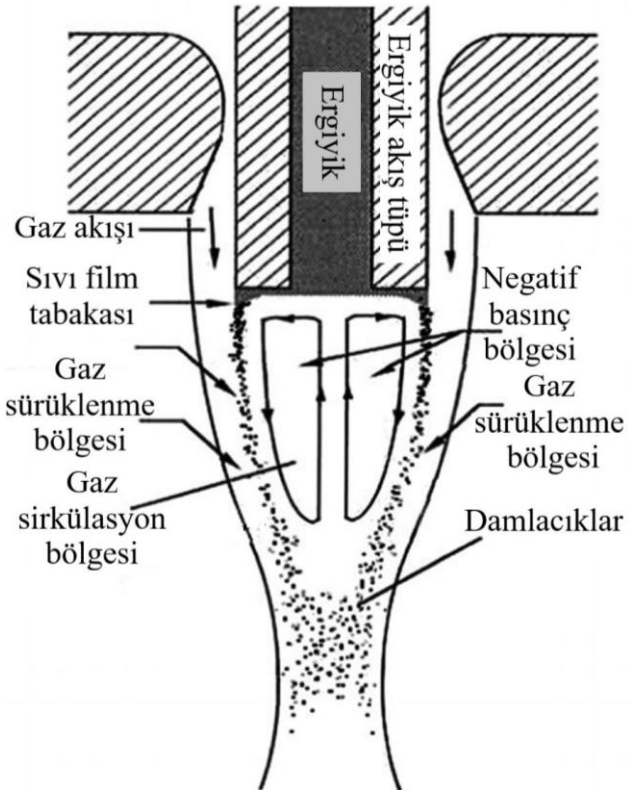
Bir diğer önemli konu ise metal akış tüpü çıkıntı mesafesinin doğru ayarlanmasıdır. Metal akış tüpü çıkıntı mesafesi atomizasyon işleminin sürekliliği için gerekli negatif basıncın oluşturulmasında önemli bir parametredir. Yanlış ayarlamalar atomizasyon sırasında geri tepmeye (Lick-Back) sebep olarak metal ergiyik filminin geri akmasına ve akış tüpünün tahrip olmasına veya tıkanmasına neden olacaktır. Sonuç olarak atomizasyon işleminin yarıda kesilmesi ile sonuçlanacaktır. Şekil 7.14'de atomizasyon nozulu ile metal akış tüpü yerleşimlerinin şematik bir gösterimi verilmiştir.



Şekil 7.14. Atomizasyon nozulu konumuna göre metal akış tüpünün konumu (Strauss, 2013)

7.3. Negatif ve Pozitif Basınç Etkileri

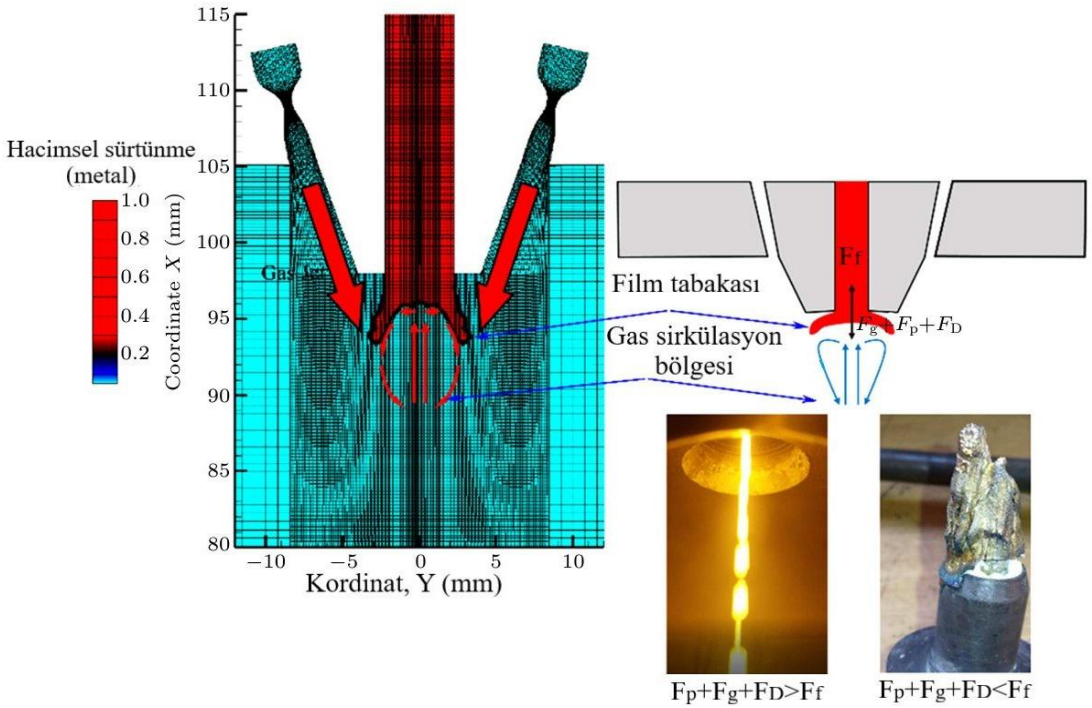
Metal tozlarının atomizasyon yöntemi ile üretilmeleri esnasında sıvı metalin nozul ucundan akması ile gazın dinamiğine bağlı olarak negatif (emme basıncı) veya pozitif (itme basıncı) basınç meydana gelmektedir. Atomizasyon esnasında prosesin devamlılığı için negatif basıncın oluşması istenmektedir. Negatif basınç yani aspirasyon basıncı ile ergiyik metalin erigiyik tüpünden sabit bir debiyle akması sağlanmaktadır. Şekil 7.15'te ergiyik akış tüpünün ucunda oluşan sirkülasyon bölgesinin modeli verilmiştir. Aspirasyon basıncının etkisi ile ergiyik metal gaz akımı tarafından birincil atomizasyon evresine geçirilir. Bu durum ergiyik akış tüpünün hemen ucunda bir sıvı film tabakası oluşturarak bu tabakanın damlacıklar halinde parçalanmasını sağlar yani ikincil atomizasyon evresini başlamasına neden olur.



Şekil 7.15. Aspirasyon etkisine sahip yakından eşlemeli bir atomizasyonda gaz akışı ve füzyon modelleri (Zhen ve Lavernia, 2011)

Gaz ile ergiyik metal demetinin devamlı etkileşimi sonucu kesintisiz bir atomizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Negatif basıncın oluşmasının nedeni sıvı metalin aktığı bölgede oluşan gaz akış kuvvetinin toplamı olarak kabul edilmektedir. Ancak diğer yandan basınç değerinin atmosfer değerinden daha büyük olması nedeniyle akış sırasında pozitif basınç oluşmaktadır. Bundan dolayı sıvı metal aşağı doğru akmadığı gibi geriye doğru bir püskürtme hareketi gerçekleştirir. Bu geri püskürtme hareketinden dolayı nozul ucu hızlı katılaşma nedeniyle tıkanır. Böylelikle atomizasyon işlemlerinde pozitif değil de negatif basıncın oluşması ile metal tozları üretilir. Negatif basınç oluşumu etkileyen bir dizi kompleks parametre bulunmaktadır (Wang ve diğ., 2022).

Yakın eşlemeli nozul sistemlerinde birincil atomizasyon işlemi, ergiyik akış tüpünden akan ergiyik metal, gaz sirkülasyon bölgesi ile temas ettiğinde başlar. Metalik sıvı sirkülasyon bölgesinin üstüne aktığında, sirkülasyon bölgesindeki gaz akışının direnci nedeniyle aşağı doğru akış kademeli olarak yavaşlar. Böylece metalik sıvı radyal yönde akmaya başlar. Ergiyik akış tüpünden akan sıvı metalin gaz ile etkileşime girmesi sonucu oluşan kuvvetler Şekil 7.16'da verilmiştir.



Şekil 7.16. Birincil atomizasyon sırasında sıvı metal ile gaz arasında oluşan kuvvetler Wang ve diğ., 2021)

Bu sırada, metalik sıvı akışı esas olarak basınçtan (Fp) (üstteki gaz basıncı ve hidrolik basınç dahil), ergiyik akış tüpünündeki gaz sürükleme kuvvetinden (F_D), yer çekiminden (Fg) ve gaz sirkülasyon bölgesisinin kaldırma kuvvetinden (F_f) etkilenir. Ergiyik akış tüpünde aşağı doğru bir gaz emme hızı vardır (aspirasyon basıncı) ve ergiyik metalin akış tüpünden düzgün bir şekilde geçmesi için ön koşul olan aşağı doğru bir gaz sürükleme kuvveti oluşturur. $Fp + Fg + F_D > Ff$ ise, genel ergiyik metal akışı sorunsuz bir şekilde atomize edilebilir. Ancak $Fp + Fg + F_D < Ff$ ise ergiyik metal akışı kademeli olarak yavaşlar ve ergiyik metal katılaşarak ergiyik akış tüpününün tıkanmasına neden olacaktır. $Fp + Fg + F_D > Ff$, yakından eşlemeli nozul sistemlerinde ergiyik akışının düzgün bir şekilde oluşması ve atomizasyonun devam etmesi için temel koşuldur. Bu kuvvetler Şekil 7.16'da şematik olarak verilmiştir edilmiştir. Bu faktörlerden basınç Fp doğrudan potasının ve tandişin bulunduğu üst hazne tarafından kontrol edilir, ancak kaldırma kuvveti ve sürükleme kuvveti esas olarak gaz sirkülasyon bölgesinden etkilenir. Bu nedenle, gaz sirkülasyon bölgesi üzerinde etkisi olan nozül püskürtme gaz basıncı, püskürtme açısı (nozul tepe açısı) ve ergiyik akış tüpü çıkıntı uzunluğu, nozulun düzgün atomizasyonunu kontrol etmek için anahtar faktörlerdir.

Kaldırma kuvveti oluşturan gaz sirkülasyon bölgesi, basınç, sürükleme kuvveti ve yerçekimi etkisi altında kademeli olarak sabit bir boyuta küçülür ve sabit, halka şeklinde şemsiye benzeri bir film oluşturur (Wang ve diğ., 2021; Wang ve diğ., 2021).

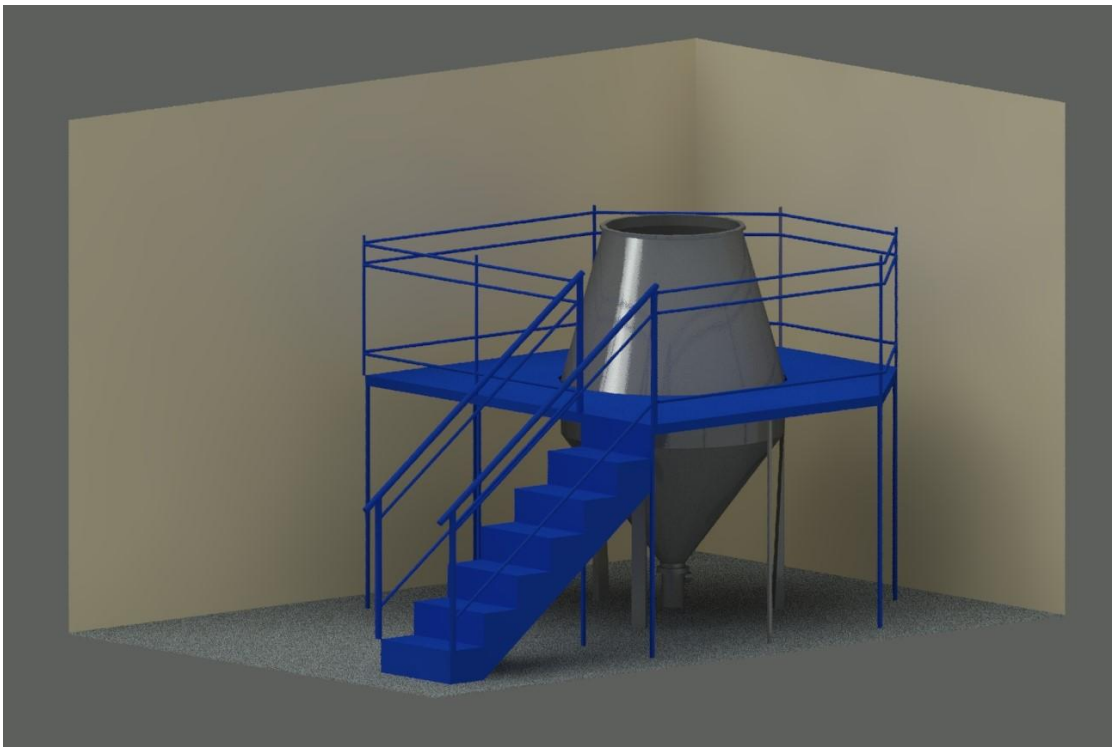
8. MALZEME VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında gaz atomizasyonu yöntemi ile farklı metal tozlarının üretilebilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında kalay, babit (Sn-Sb-Cu), bakır ve CuCrZr tozları üretilmiştir. Tozların üretimi Kocaeli Üniversitesi Toz Metalurjisi Laboratuvar'ında gerçekleştirilmiştir.

Atomizasyon işlemi için Hall tipi dairesel yarıklı nozul kullanılmıştır. Farklı alaşımların üretilebilmesi amacı ile farklı ergiyik akış tüpü tasarımları gerçekleştirilerek atomizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

8.1. Atomizasyon Sistemi

Çalışma kapsamında atomizasyon kulesi imal edilmiştir. Kulenin boyutları farklı ergime sıcaklığına sahip tozların katılaşma süreleri ön görülerek çemberin yüzeylerine çarpmadan üretime imkân verecek şekilde seçilmiştir. Tozların atomizasyon işleminden sonra çemberin iç yüzeylerine yapışmasının önlenmesi amacı ile tüm yüzeyler parlatılmıştır. Atomizasyon kulesinin görüntüsü Şekil 8.1'de verilmiştir.



Şekil 8.1. Kocaeli Üniversitesi'nde bulunan gaz atomizasyon sistemi

8.2. Ergitme ve gaz sistemi

Tozu elde edilecek elementlerin veya alaşımların ergitme işlemi atomizasyon sistemine bağlı indüksiyon ocağında seramik potalar içerisinde gerçekleştirilmiştir. Ergimiş metalin sıcaklığı grafit stoper içerisine daldırılan termal eleman yardımıyla belirlenmiştir. Yapılan atomizasyon denemelerinde aşırı ısıtma miktarı 75 ºC, 150 ºC ve 200 ºC olacak şekilde ayarlanmıştır. Ergitme ve atomizasyon işlemi sırasında oksidasyonu önlemek amacı ile sistem argon gazı ile süpürülmüştür. Şekil 8.2'de farklı hammaddeler için ergitme sistemi ve termal eleman ile sıcaklık ölçüm sistemi verilmiştir.



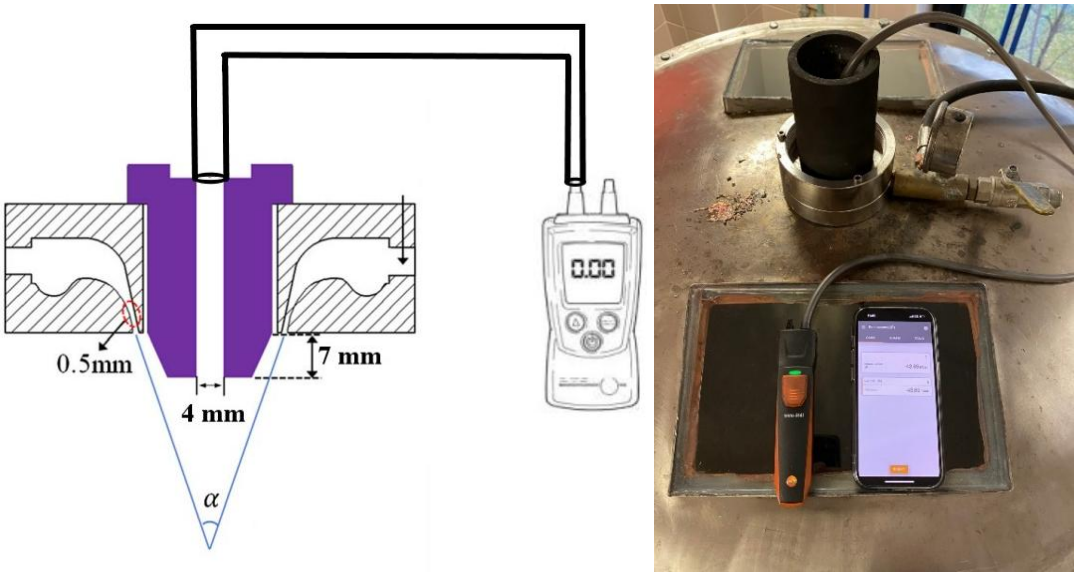
Şekil 8.2. 13 KW indüksiyon ergitme ocağı sisteminin görüntüsü

Atomizasyon işlemi için gereken basıncın sisteme verilmesi amacı ile 0 - 50 bar, basınç düşürücü regülatör kullanılmıştır. Yapılan atomizasyon işlemleri sırasında gaz basıncı 20, 30 ve 35 bar olarak belirlenmiştir. Atomizasyon gazı olarak yüksek saflıkta %99.999 argon gazı kullanılmıştır.

8.3. Nozul ve ergiyik akış tüpü

Atomizasyon işlemi için Hall tipi geometriye sahip dairesel yarıklı nozul kullanılmıştır. Sıvı metalin nozul çıkışındaki yüksek basınçlı gaz ile temas etmesi amacı ile seramik ergiyik akış tüpü tasarlanmıştır. Ergiyik akış tüpü tasarımı atomizasyon işleminin

devamlılığı ve yüksek basınçlı gazın sıvı metal demeti ile buluşması amacı ile özel olarak tasarlanarak kullanılmıştır. Kullanılan ergiyik akış tüpünün demet çapı 3 ve 4 mm olacak şekilde üretilmiştir. Atomizasyon işleminin devamlılığının sağlanması amacı ile ergiyik akış tüpü ucundaki basınç oluşum miktarı ve değerleri dijital basınç fark ölçer cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 8.3'te ölçüm tekniğinin görseli verilmiştir.



Şekil 8.3. Testo basınç farklı ölçer ile negatif ve pozitif basınç ölçüm tekniğinin şematik gösterimi

8.4. Gaz Atomizasyonu Parametre Çalışmaları

Sistemin tasarlanması ile birlikte farklı ergime sıcaklığına sahip tozların üretimleri gerçekleştirilmiştir. Atomizasyon sıralaması ergime dereceleri düşükten yükseğe baz alınarak üretimler sırasıyla kalay, babit alaşımı, bakır ve CuCrZr olacak şekilde ayarlanmıştır. Sistemin devamlı ve stabil çalışması amacıyla her bir parametre (gaz basıncı, ergiyik akış tüpü çapı, ergiyik akış tüpü açısı ve nozul açısı) tek tek denenerek optimum parametreler belirlenmiştir.

8.4.1. Gaz Atomizasyonu ile Kalay ve Babit Alaşımı Üretimi

Atomizasyon işlemi için gereki olan kalay çubukları ve babit çubukları ergitme işlemi için indiksiyon ocağına alınmıştır. Ergime sıcaklıkları, atomizasyon gazı ve atomizasyon basıncı karşılaştırmaları Tablo 8.1'de verilmiştir.

Tablo 8.1. Kalay ve kalay alaşımlarının atomizasyon parametreleri

Deneme No	Atomize Edilen Malzeme	Atomizasyon Sıcaklığı (º)	Gaz Basıncı (bar)	Ergiyik Akış Tüpü Çapı (mm)	Atomizasyon Gazı
Sn 1	Kalay	232 + 75 ºC	20	3	Argon
Sn 2	Kalay	232 + 150 ºC	20	3	Argon
Sn 3	Kalay	232 + 75 ºC	30	3	Argon
Sn 4	Kalay	232 + 150 ºC	30	3	Argon
Babit 1	Babit Alaşımı	235 + 75 ºC	20	3	Argon
Babit 2	Babit Alaşımı	235 + 150 ºC	20	3	Argon
Babit 3	Babit Alaşımı	235 + 75 ºC	30	3	Argon
Babit 4	Babit Alaşımı	235 + 150 ºC	30	3	Argon

Atomizasyon işlemi sırasında nozul ve ergiyik akış tüpü ölçüleri sabit tutulmuştur. Böylece gaz basıncının, gaz cinsinin ve aşırı ısıtma miktarının toz özelliklerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Aşırı ısıtma miktarının tozların özelliklerine etkisinin belirlenmesi amacı ile 2 farklı aşırı ısıtma miktarı belirlenmiştir. Gaz basıncının etkisinin belirlenmesi amacı ile 20 bar ve 30 bar olmak üzere 2 farklı basınç uygulanarak toz özellikleri araştırılmıştır. Atomizasyon işleminin tamamlanmasının ardından toplama ünitesinden alınan tozları 300 μm elekten geçirilerek elek analiz sistemine aktarılmıştır.

8.4.2. Gaz atomizasyonu ile Bakır ve Bakır Alaşımlarının Üretimi

İlk olarak ergime derecesi temel alınarak alaşımın atomizasyonu yapılmıştır Ergime sıcaklıkları ve atomizasyon basınçlarının karşılaştırılmaları Tablo 8.2'de verilmiştir.

Tablo 8.2. Bakır ve bakır alaşımlarının atomizasyon parametreleri

Deneme No	Atomize Edilen Malzeme	Atomizasyon Sıcaklığı (º)	Gaz Basıncı (bar)	Ergiyik Akış Tüpü Çapı	Atomizasyon Gazı
Bakır 1	Bakır	1085 + 200 ºC	30	4	Argon
Bakır 2	Bakır	1085 + 200 ºC	35	4	Argon
CuCrZr (1)	CuCr1Zr	1085 + 200 ºC	30	4	Argon
CuCrZr (2)	CuCr1Zr	1085 + 200 ºC	35	4	Argon

Bakır ve alaşımları nispeten yüksek ergime derecesine sahip oldukları için aşırı ısıtma miktarı 200 ºC olacak şekilde sabit tutularak atomizasyon gaz basıncının toz özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Gaz basıncının etkilerinin tamamen anlaşılması amacı ile tüm atomizasyon parametreleri (nozul tipi ve ergiyik akış tüpü ölçüleri) sabit tutulmuştur. Her bir malzeme için gaz basınçları 30 ve 35 bar olacak şekilde ayarlanarak toplamda 4 farklı üretim yapılmıştır.

Atomizasyon işleminin tamamlanmasının ardından toplama ünitesinden alınan tozları 300 µm elekten geçirilerek elek analiz sistemine aktarılmıştır.

8.5. Elek Analizi ve Toz Boyut Dağılımları

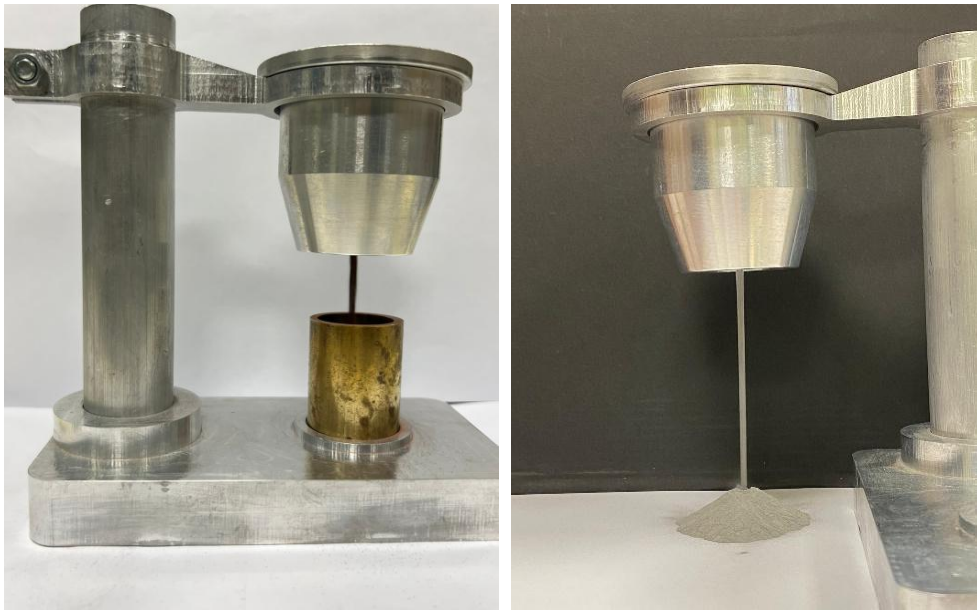
Gaz atomizasyon prosesi sonrasında elde edilen tozların boyut dağılımlarının ve verimliliğinin belirlenebilmesi amacı ile elek analizi ve lazer boyut ölçümü yapılmıştır. Elek sistemi ve lazer boyut ölçüm sistemi Şekil 8.4'te verilmiştir. Elek analizi işlemi için sırasıyla 45 µm, 75 µm, 106 µm, 150 µm ve 250 µm'luk elekler kullanılmıştır.



Şekil 8.4. Retch marka elek analiz sistemi ve Malvern Mastersizer partikül boyut dağılım cihazı

8.6. Hall Akış Analizleri

Hall akış ölçer, toz metalurjisi endüstrisinde kullanılan standart test yöntemidir ve temel olarak, 2.5 mm açıklık çapına sahip standart bir huniden bilinen bir toz kütlesini (50g) boşaltmak için geçen süreyi belirler. Tez kapsamında üretilen bakın ve alaşım tozlarına ASTM B213-20 standardına göre Hall akış testi uygulanmıştır. Şekil 8.5'te Hall akış ölçer düzeneği verilmiştir.



Şekil 8.5. Hall akış ölçer düzeneği

8.7. Mikroyapısal Karakterizasyon

8.7.1. SEM Analizi

Çalışma kapsamında üretilen Sn, Babit, Cu, ve CuCrZr tozlarının görüntüleri JEOL marka JSM-6060 model ve ZEIS marka EVO-10 model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Şekil 8.6'da SEM cihazlarının görüntüleri verilmiştir.



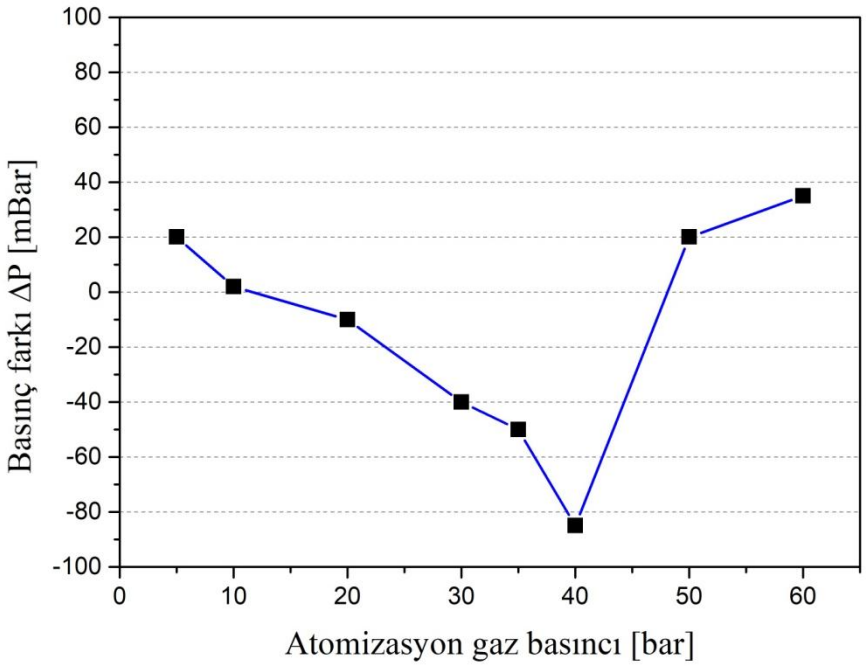
Şekil 8.6. JEOL JSM-6060 ve ZEIS EVO-10 model taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

9. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel süreçlerin detaylı bir şekilde değerlendirmesi yapılmış ve elde edilen sonuçlar literatür çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. Gaz atomizasyonu parametre değişkenlerinin elde edilen tozların partikül boyut dağılımlarına, yığın yoğunluklarına, akış özelliklerine ve partikül şekillerine olan etkileri ortaya konmuştur. Üretilen tozların ilk olarak yığın açıları ortaya konmuştur. Elek analizi ve lazer toz boyutu ölçümleri yapılmıştır. Tozların mikroyapısal karakterizasyonları Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

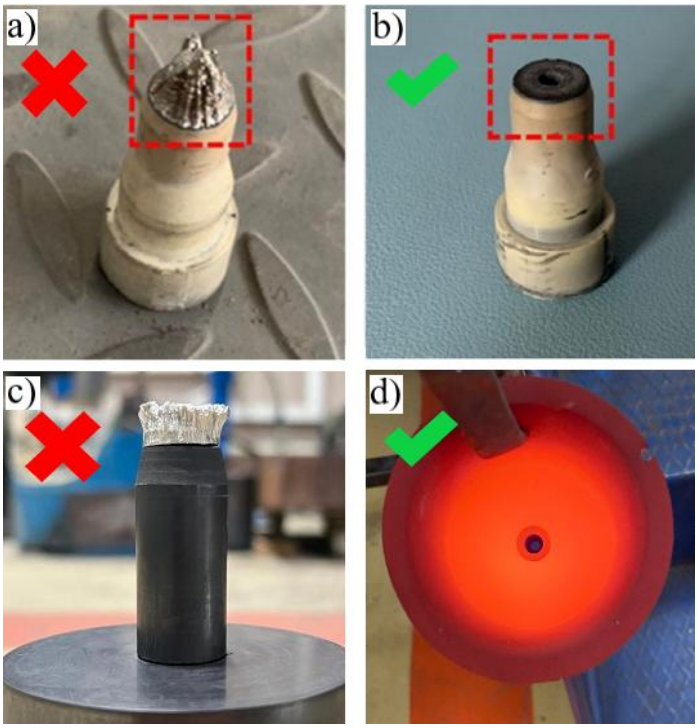
9.1. Negatif Basınç ve Basınç Farkı Ölçümü

Ergiyik akış tüpü ucunda oluşan basınç değerleri ergiyik akış tüpünün geometrisi, gaz basıncı, ortam basıncı gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Ergiyik akış tüpünün ucunda oluşan pozitif basınç değerleri sıvı metalin boru boyunca yer çekimi kuvveti altında akmasını engelleyerek sıvı metalin akış tüpüne geri itilmesine ve sonuç olarak sıvı metalin donarak tıkanmasına neden olmaktadır. Gaz atomizasyonu ile toz üretimi öncesinde prosesin devamlılığının sağlanması amacıyla ergiyik akış tüpünün ucunda oluşan basınç farkı değerleri ölçülmüştür. Basınç farkı grafiği Şekil 9.1'de verilmiştir.



Şekil 9.1. Ergiyik akış tüpünün çıkış ucunda oluşan basınç farkı değerleri

Yapılan atomizasyon denemeleri sırasında ergiyik akış tüpünün ucunda pozitif (+) basınçlar oluştuğu görüldü. Bu denemeler sırasında ergiyik akış tüpü ile sıvı metalin etkileşime girdiği ve geri yalama (Lick-Back) sonucu akış tüpünün ucunda sıvı metalin katılaştığı gözlemlendi. Şekil 9.2'de bu etkileşim ile oluşan tıkanma durumlarının görselleri verilmiştir.



Şekil 9.2. Pozitif (+) ve Negatif (-) basınç değerlerinde sıvı metal – ergiyik akış tüpü etkileşimi a) pozitif basınç b) negatif basınç c) pozitif basınç d) negatif basınç

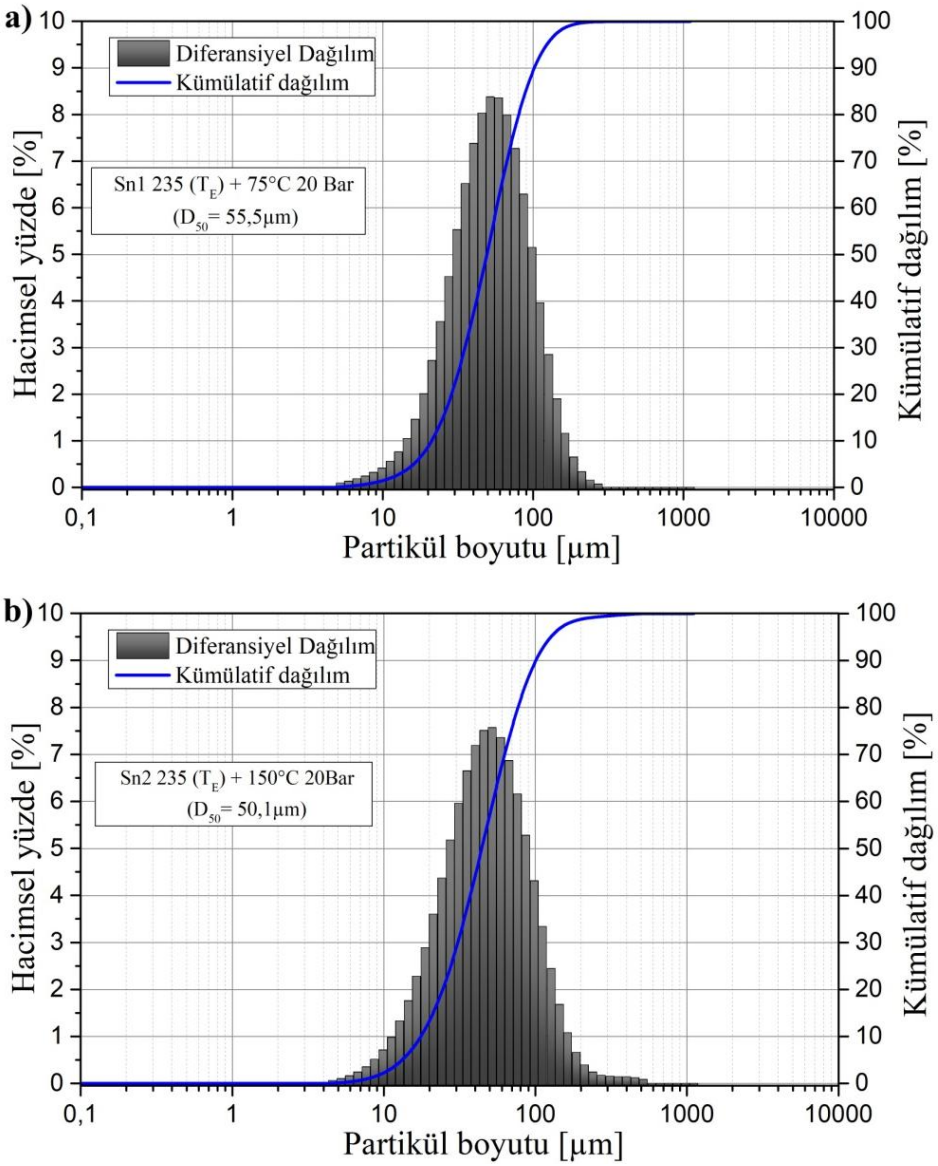
9.2. Saf Kalay Tozlarına Farklı Aşırı Isıtma ve Farklı Gaz Basınçlarının Etkisi

Gaz atomizasyonu ile üretilen kalay tozlarına gaz basıncının ve aşırı ısıtma miktarının etkisi Tablo 9.1'de görülmektedir. Gaz basıncı ve aşırı ısıtma miktarı toz partikül boyut dağılımını ve partikül şeklini doğrudan etkileyen atomizasyon parametrelerinin başında gelmektedir. Gaz basıncı aşırı ısıtmaya göre sıvı metal demetinin parçalanmasında daha büyük bir etkiye sahiptir. Aşırı ısıtma sayesinde sıvı metalin viskozitesi azalmaktadır. Azalan viskozite ile beraber sıvı metal demetinin parçalanması kolaylaşmakta ve birincil atomizasyon adımının başlaması hızlanmaktadır (Wang ve diğ., 2021). Tablo 9.1'de artan aşırı ısıtma miktarı ve artan gaz basıncı ile partikül boyutlarının inceldiği ortaya konmuştur.

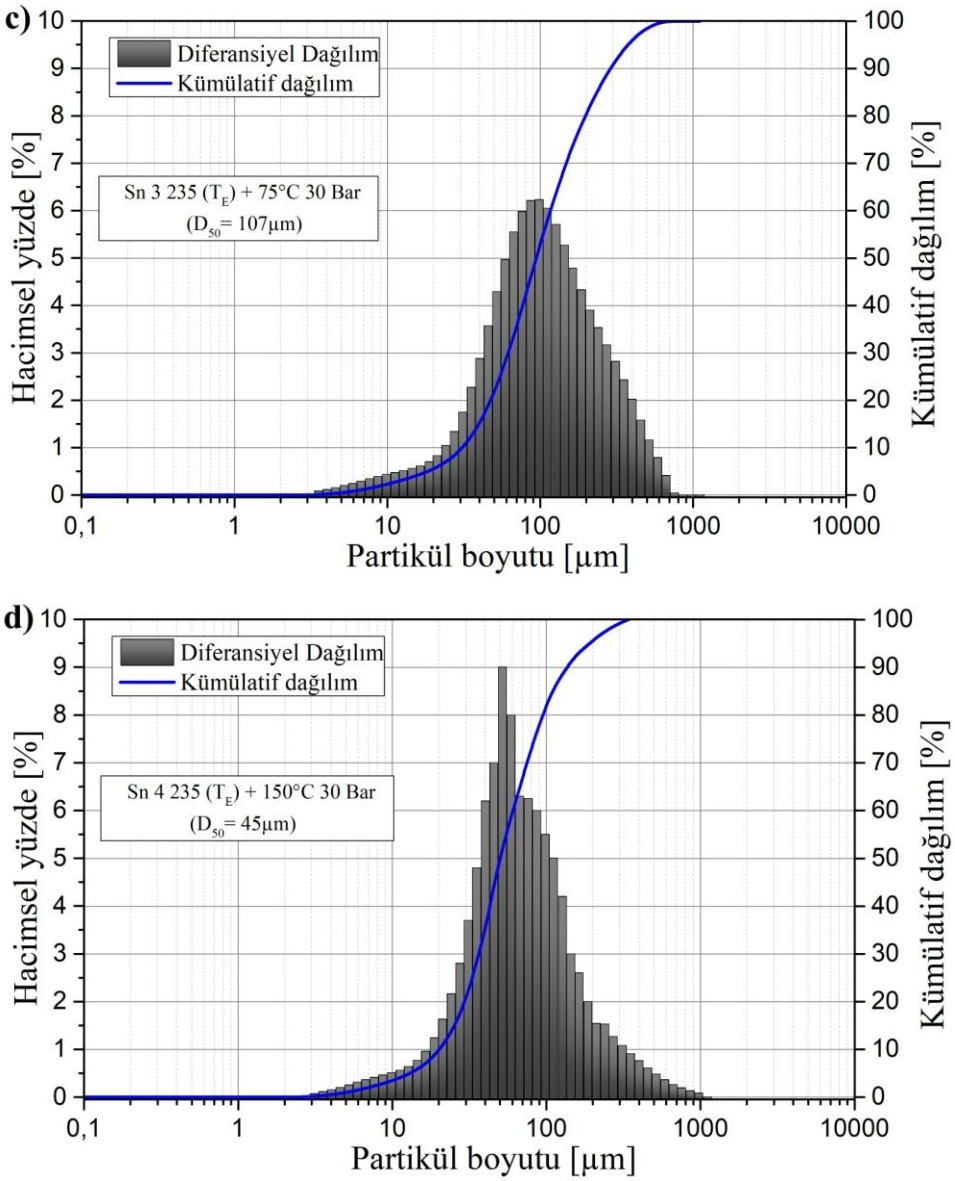
Tablo 9.1. Kalay tozlarının atomizasyon parametreleri ve toz özellikleri

Deneme No	Atomizasyon Sıcaklığı (°)	Gaz Basıncı (bar)	Ortalama Partikül Boyutları (µm)
Sn1	235 (T_E) + 75	20	55,5
Sn2	235 (T_E) + 150	20	50,2
Sn3	235 (T_E) + 75	30	107
Sn4	235 (T_E) + 150	30	45

Tablo 9.1'de verilen sonuçlar Lazer Difraksiyon Partikül Boyutu Analiz sonuçları ile detaylı olarak grafik haline getirildi. Farklı atomizasyon parametreleri ile üretilen Kalay tozlarının partikül boyut dağılım grafikleri Şekil 9.3'te verilmiştir.

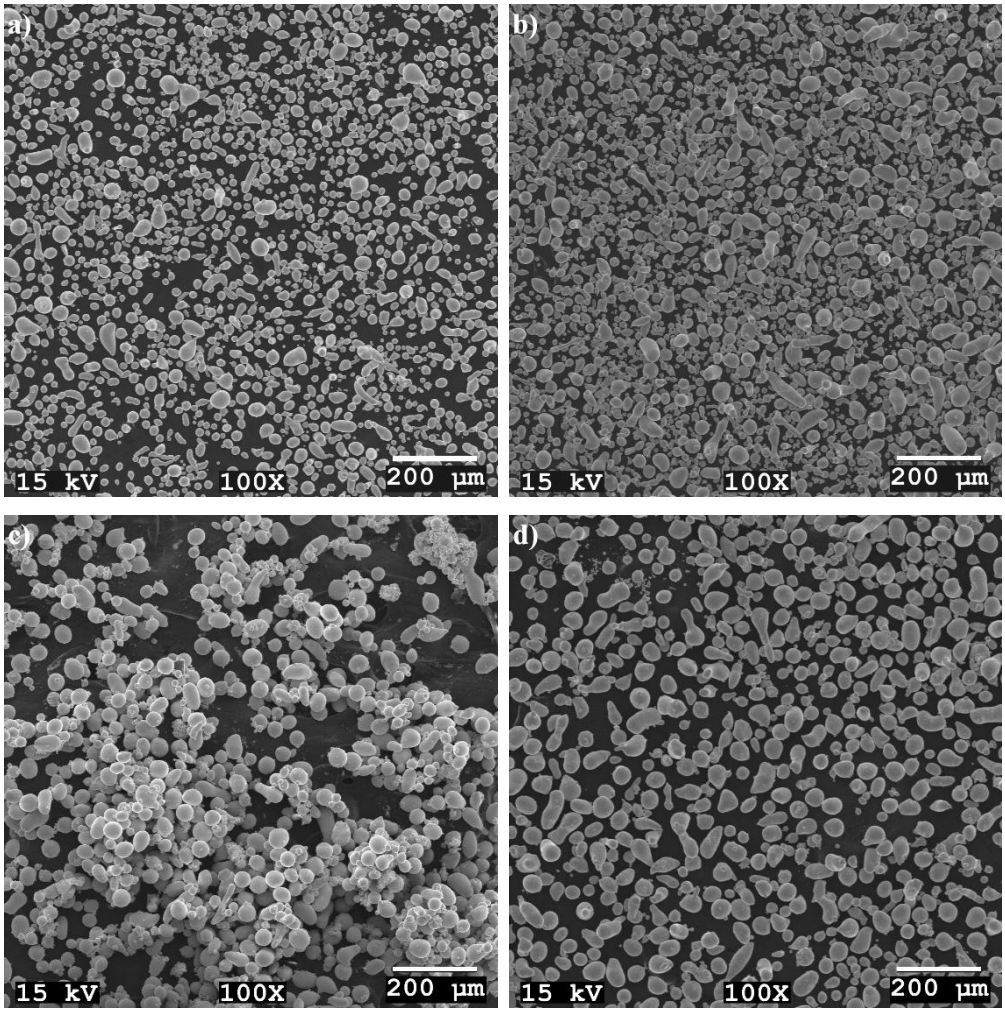


Şekil 9.3. Farklı atomizasyon parametreleri için kalay tozlarının partikül boyut dağılımları a) Sn1 b) Sn2 c) Sn3 d) Sn4



Şekil 9.3. (Devam) Farklı atomizasyon parametreleri için kalay tozlarının partikül boyut dağılımları a) Sn1 b) Sn2 c) Sn3 d) Sn4

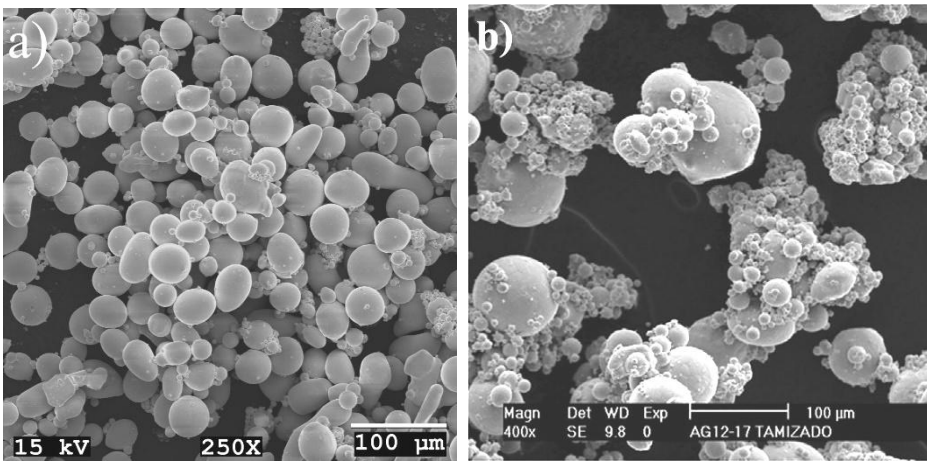
Partikül boyut dağılım grafikleri incelendiğinde Sn3 numaralı deney için artan atomizasyon gaz basıncı ile partikül boyut dağılımının incelmesi beklenmektedir. Ancak deney sonucunda tam tersi artan gaz basıncı ile partikül boyut dağılımının aşırı miktarda kabalaştığı görülmektedir. Ortaya çıkan bu sonuç için detaylı bir SEM incelemesi gerçekleştirilmiş olup nedeni SEM görüntüleri ile ortaya konmuştur. Şekil 9.4'te farklı atomizasyon parametreleri ile üretilen kalay tozlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Tozların üretimi sırasında argon gazı kullanıldığından toz yüzeyleri oldukça pürüzsüzdür ve oksitlenme izlerine rastlanmamıştır.



Şekil 9.4. Farklı atomizasyon parametreleri için kalay tozlarının SEM görüntüleri a) Sn1 b) Sn2 c) Sn3 d) Sn4

Şekil 9.4'te Sn1, Sn2 ve Sn4 numaralı tozlara ait SEM görüntüleri incelendiğinde tozların küresel, küresele yakın ve az miktarda ligament şekle sahip partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Sn3 numaralı tozlara ait SEM görüntülerinde ise tozların çoğunlukla kendi içlerinde küresel partiküllerden oluştuğu ancak agrega bir yapıda birbirlerine bağlandıkları görülmektedir. Bu durum aşırı ısıtmanın yüksek basınçlar ile bir araya gelmesiyle açıklanmaktadır. Gaz atomizasyonun doğası gereği yüksek basınçlarda atomizasyon çemberi içerisinde oluşan yüksek sirkülasyon etkileri kaba ve ince partiküllerin katılaşma süreleri arasında farklar nedeniyle uydu oluşumunu ve agregasyon eğilimini arttırmaktadır. Bu nedenle her bir partikül kendi içerisinde ince olmasına rağmen agregasyon nedeniyle daha kaba bir partikül boyut dağılımı ile sonuçlanmaktadır. Deneyler sırasında bu durum fark edilmiş olup atomizasyon çemberi içerisine verilen yüksek basınçlı gazın tahileyesi için daha kuvvetli bir siklon sistemine

ihtiyaç doğmuştur. Sn4 numaralı üretim bu etkinin fark edilmesi ile içeride oluşan basıncın azaltılmasının bir sonucu olarak daha ince bir partikül boyut dağılımını ortaya koymaktadır. Ernesto ve ark. yaptıkları çalışmada gaz atomizasyonu yöntemi ile bakır tozlarını üretmişlerdir. Artan gaz basıncı ve aşırı ısıtma ile partiküllerin kendi içlerinde inceldiğini ancak yüksek bir agregasyon ve uydu oluşum eğilimi gösterdiğini belirtmişlerdir (Urionabarrentxea ve diğ., 2021). Şekil 9.5'te literature kapsamında üretilen bakır tozlarına ve çalışma kapsamında üretilen Sn3 tozlarına ait SEM görüntüleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 9.5. Gaz atomizasyon tekniği ile üretilen tozlara ait SEM görüntüleri a) Sn3 b) Ernesto ve ark. Cu tozu (Urionabarrenetxea ve diğ., 2021)

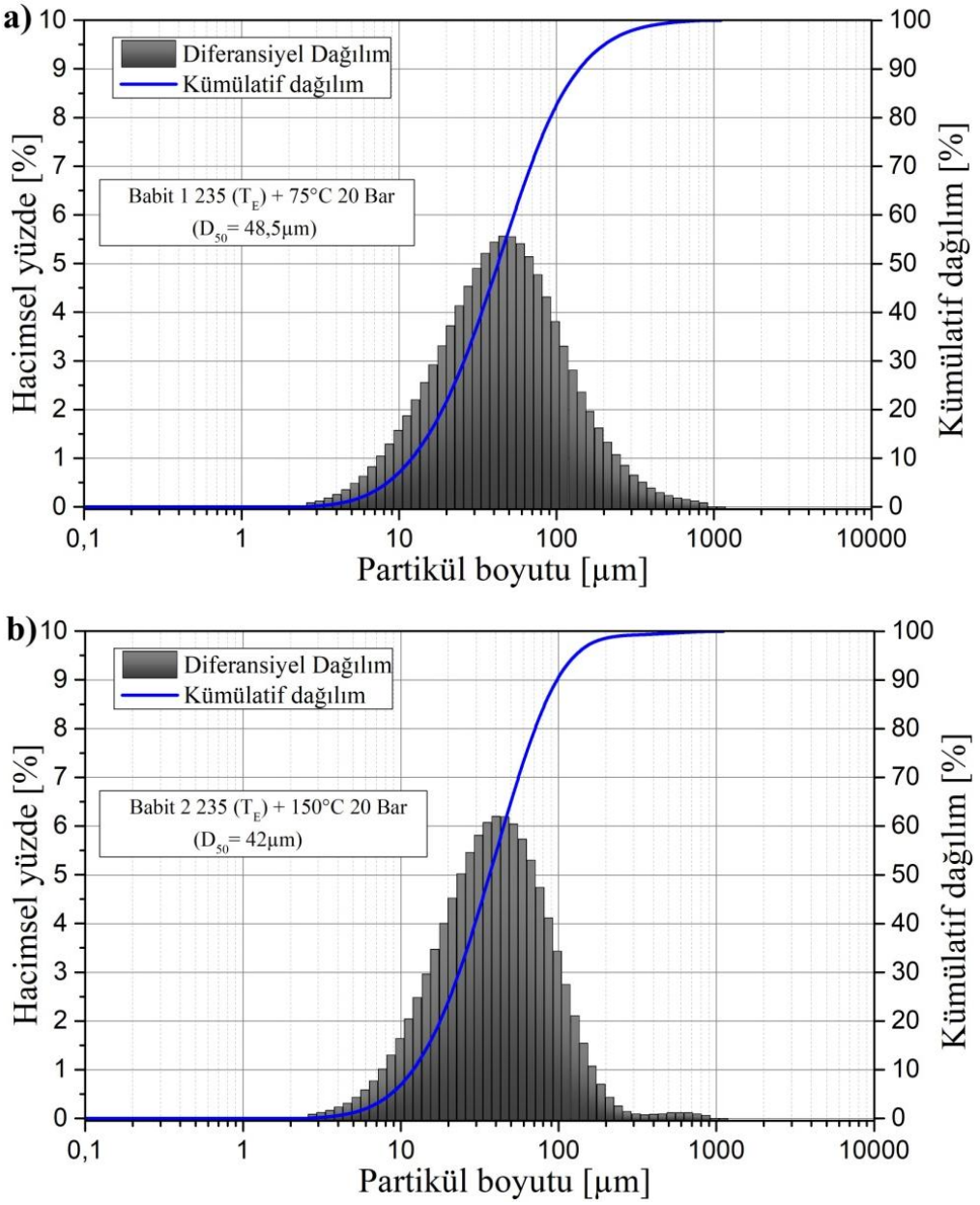
9.3. Babit Alaşım Tozlarına Farklı Aşırı Isıtma ve Farklı Gaz Basınçlarının Etkisi

Gaz atomizasyonu ile üretilen babit alaşım tozlarına gaz basıncının ve aşırı ısıtma miktarın etkisi Tablo 9.2'de verilmiştir. Tablo 9.2'de artan aşırı ısıtma miktarı ve artan gaz basıncı ile partikül boyutlarının inceldiği ortaya görülmektedir.

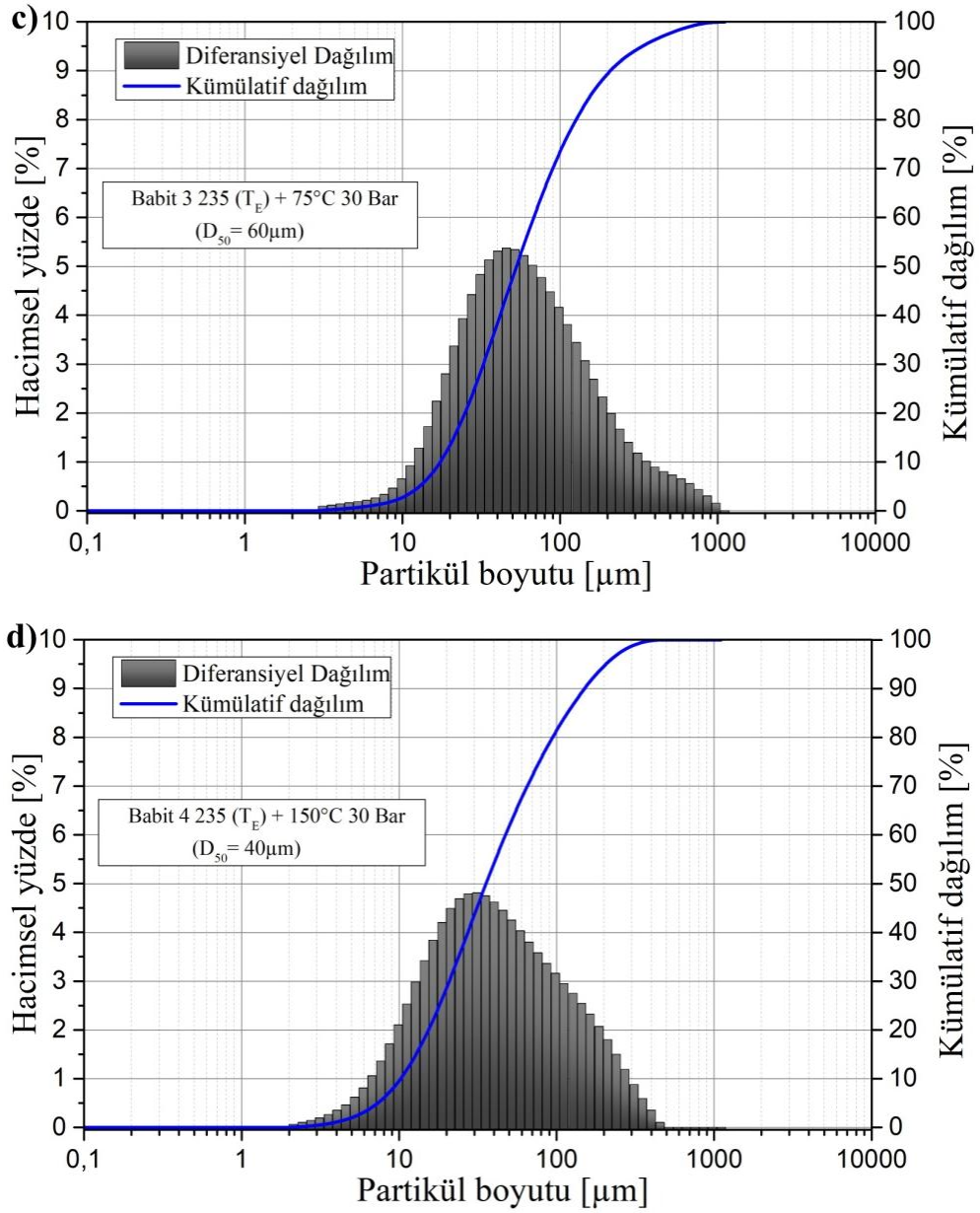
Tablo 9.2. Babit alaşım tozlarının atomizasyon parametreleri ve toz özellikleri

Deneme No	**Atomizasyon Sıcaklığı (°)**	**Gaz Basıncı (bar)**	**Ortalama Partikül Boyut (µm)**
Babit1	235 (T_E) + 75	20	48,5
Babit2	235 (T_E) + 150	20	42
Babit3	235 (T_E) + 75	30	60
Babit4	235 (T_E) + 150	30	40

Tablo 9.2'de verilen sonuçlar Lazer Difraksiyon partikül boyutu analiz sonuçları ile detaylı olarak grafik haline getirildi. Farklı atomizasyon parametreleri ile üretilen babit alaşım tozlarının partikül boyut dağılım grafikleri Şekil 9.6'da verilmiştir.

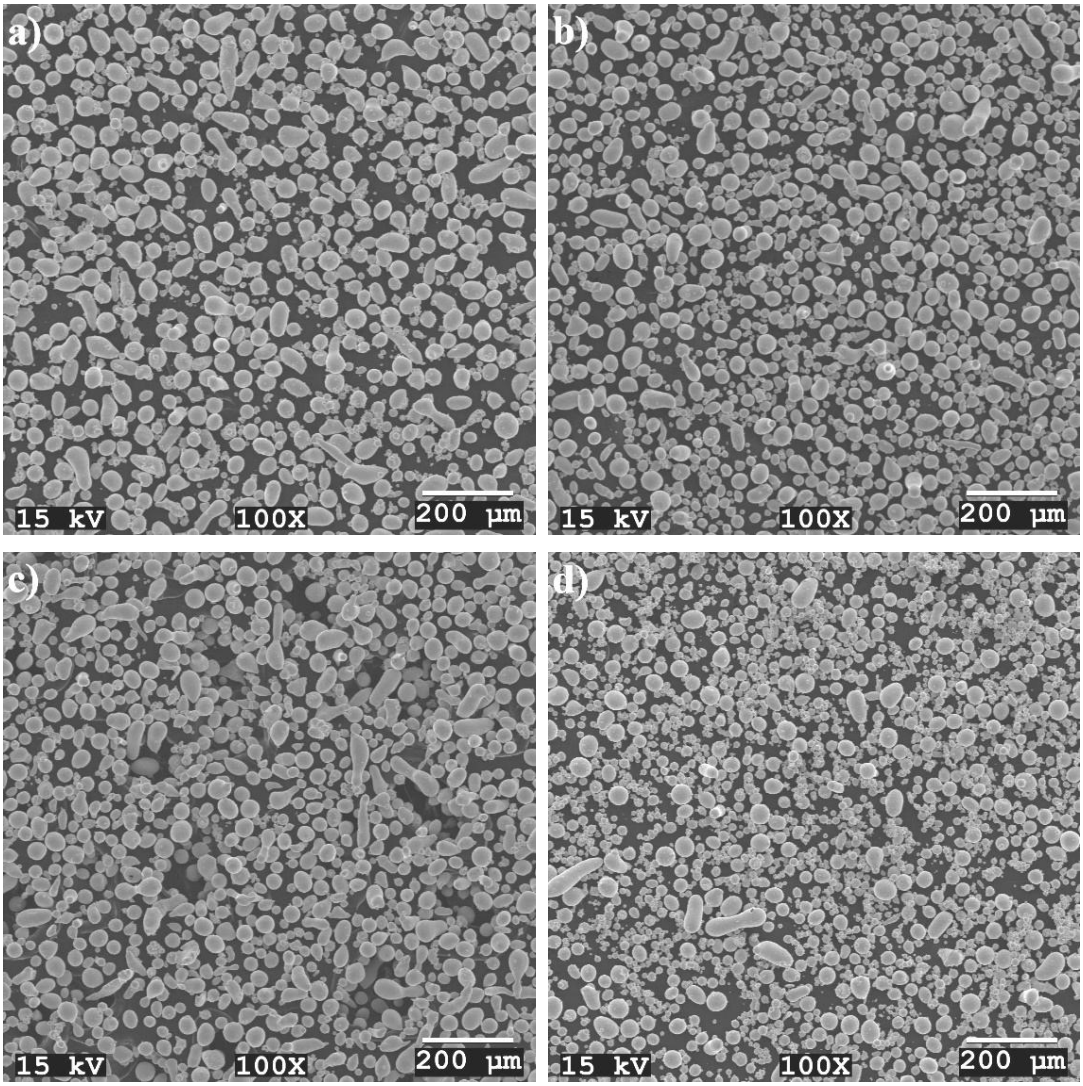


Şekil 9.6. Farklı atomizasyon parametreleri için babit alaşım tozlarının partikül boyut dağılımları a) Babit1 b) Babit2 c) Babit3 d) Babit4



Şekil 9.6. (Devam) Farklı atomizasyon parametreleri için babit alaşım tozlarının partikül boyut dağılımları a) Babit1 b) Babit2 c) Babit3 d) Babit4

Partikül boyut dağılım grafikleri incelendiğinde babit 3 numaralı üretimin artan basınca rağmen partikül boyutlarında kabalaşma dikkat çekmektedir. Benzer şekilde bu durum kalay tozlarının partikül dağılım sonuçlarında da bulunmuştu. Tozların SEM görüntüleri detaylı incelendiğinde kalay tozlarına benzer bir durumun babit alaşım tozlarında da görülmektedir. Şekil 9.7'de farklı atomizasyon parametreleri ile üretilen babit tozlarının SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 9.7. Farklı atomizasyon parametreleri için babit alaşım tozlarının SEM görüntüleri a) Babit1 b) Babit2 c) Babit3 d) Babit4

Özellikle alaşımların farklı katılaşma sıcaklıklarının olmasından dolayı aşırı ısıtma ve artan gaz basıncı ile beraber, kaba ve ince partiküllerin katılaşma süreleri arasındaki fark ve değişken boyutlardaki damlacıkların atomizasyon gazının sirkülasyonuyla farklı oranlarda ivmelenmeleri uydulaşmada ve agregasyon oluşumunda önemli bir etkendir (Muratal ve Yamanoğlu, 2022). Monnapas ve ark. yaptıkları çalışmada gaz atomizasyonu kalay ve babit alaşım tozlarını başarılı bir şekilde üretmişlerdir. Benzer şekilde artan gaz basıncı ve aşırı ısıtma miktarı ile babit alaşım tozlarında uydulaşmanın ve agrega oluşumunu ortaya koymuşlardır. (Morakotjinda ve diğ., 2010).

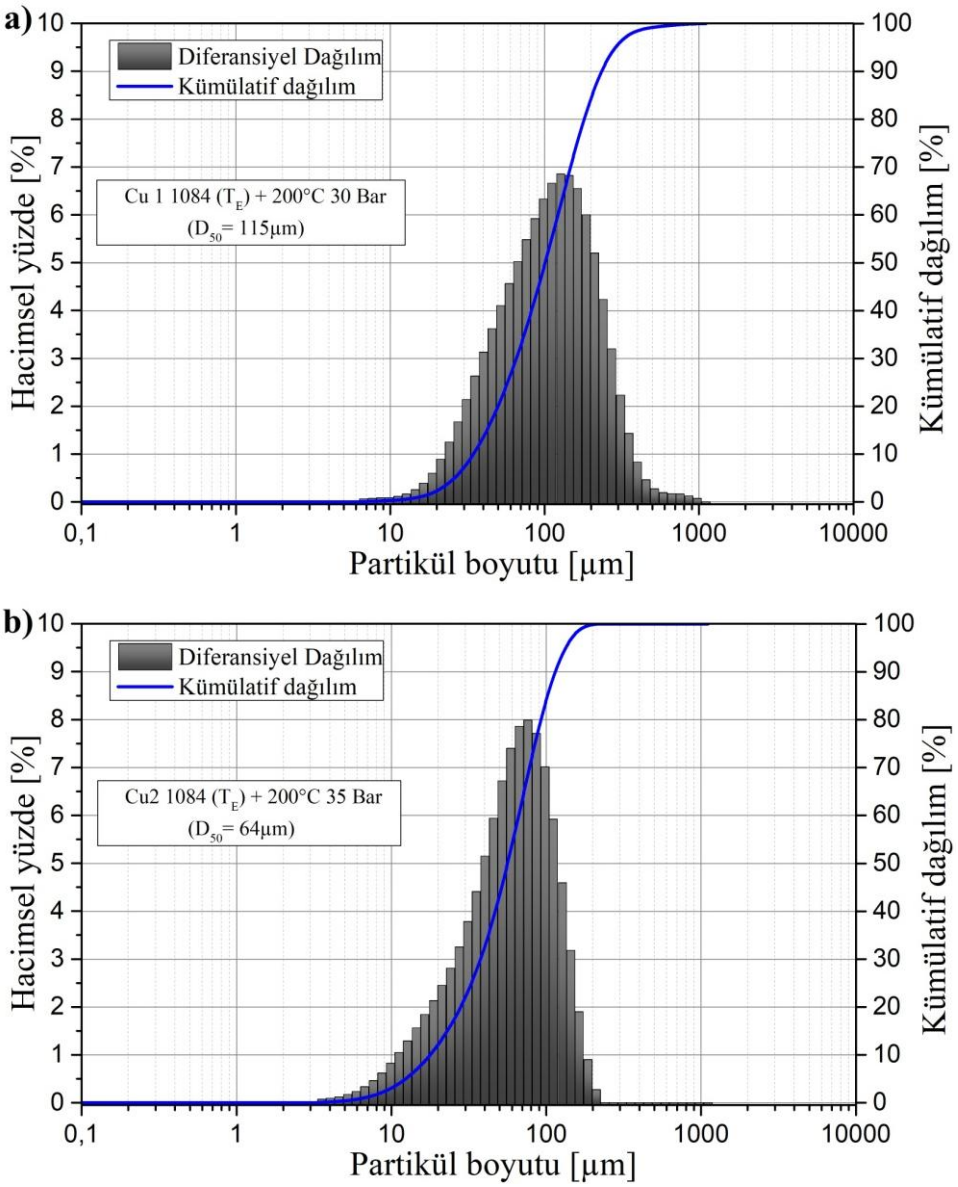
9.4. Saf Bakır Tozlarına Farklı Aşırı Isıtma ve Farklı Gaz Basınçlarının Etkisi

Yapılan saf bakır tozu denemelerinde, gaz basıncının aynı aşırı ısıtma koşullarında partikül boyut dağılımına olan etkisi Tablo 9.3'de açıkça görülmektedir. Artan gaz basıncı ile sıvı metal demetine aktarılan kinetik enerji artmaktadır. Artan kinetik enerji ile birlikte sıvı metal demeti daha şiddetli bir şekilde parçalanarak birincil atomizasyon evresinde ligament oluşumunu azaltmaktadır. Ligament oluşumunun azalması ve ikincil atomizasyon evresinde ligamentlerin damlacıklara dönüşmesi sonucu oluşan damlacıkların boyutlarının küçülmesi ile beraber ortalama partikül boyut dağılımı incelmektedir.

Tablo 9.3. Saf Bakır (Cu) tozlarının atomizasyon parametreleri ve toz özellikleri

Deneme No	**Atomizasyon Sıcaklığı (°)**	**Gaz Basıncı (bar)**	**Yığın Açısı (°)**	**Hall Akış (s)**	**Ortalama Partikül Boyut (µm)**
Cu (1)	1084 (T_E) + 200	30	27	16,40	115
Cu (2)	1084 (T_E) + 200	35	31	17,60	64

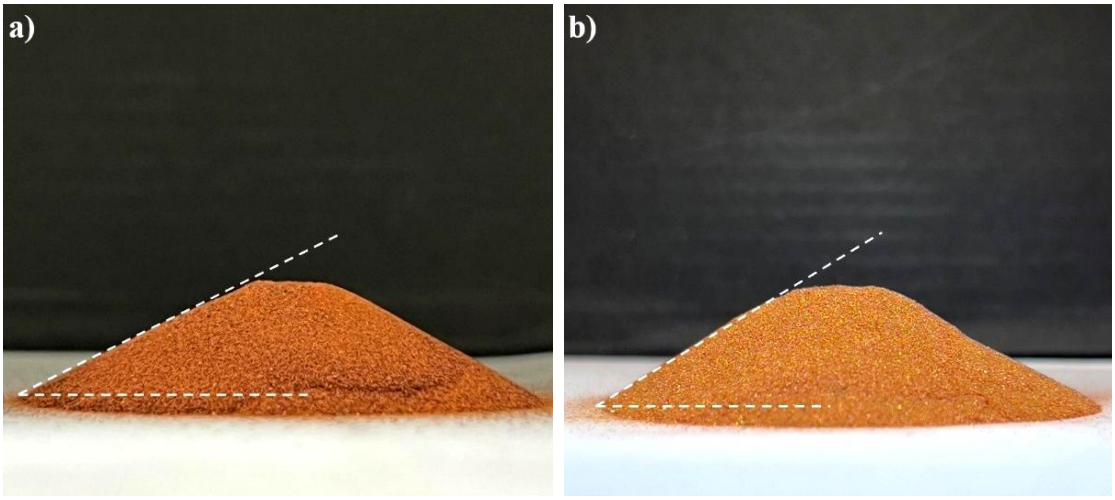
Şekil 9.8'de saf bakır tozlarının üretimi sonrası partikül boyut dağılım grafikleri verilmişir. Artan gaz basıncı ile ortalama partikül boyutlarının inceldiği ve partikül boyut dağılım aralığının daraldığı görülmektedir. Wei ve ark. yaptıkları çalışmalada 24CrNiMoY tozunu 6.0, 7.5, 9.0 ve 10.5 MPa olmak üzere 4 farklı basınç değeri kullanarak atomize etmişlerdir. Artan gaz basıncı ile birlikte ortalama partikül boyutunun azaldığını en düşük ortalama partikül boyutunun 10.5 MPa basınç altında oluştuğunu ortaya koymuşlardır (Wei ve diğ., 2020).



Şekil 9.8. Farklı atomizasyon parametrelerine sahip saf bakır tozlarının partikül boyut dağılımları a) Cu1 b) Cu2

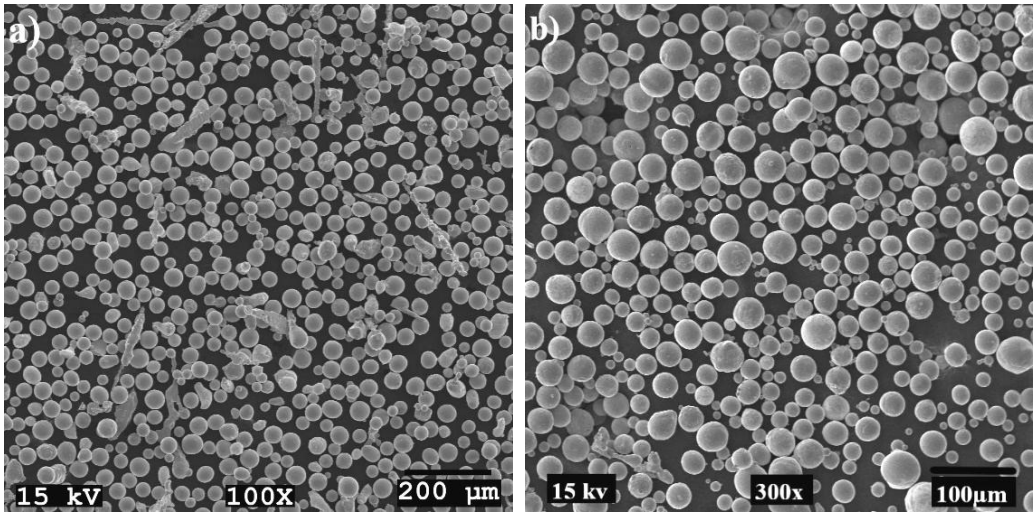
Farklı gaz basınçlarında üretilen saf bakır tozlarının akış özelliklerinin incelenmesi amacı ile yığın açıları ve hall akış özellikleri ölçülmüştür. Şekil 9.9'da yığın açılarının ölçüm yaklaşımı gösterilmiştir (Muratal ve Yamanoğlu., 2022). Tozun akışkanlığı, tozun partikül boyutu dağılımı, şekli ve yüzey özellikleri ile yakından ilişkilidir (Zegzulka ve diğ., 2020). Gaz basıncın artmasıyla beraber toz partikül boyutunun inceldiği dolayısıyla tozların akış özelliklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Mahdi ve ark. Yaptıkları çalışmada plasma atomizasyonu ile farklı partikül boyut dağılımlarına sahip Ti6Al4V alaşımlarının üretimini gerçekleştirmişlerdir. Azalan partikül boyutu ile tozlar

arasında sürtünmenin arttığını ve artan yüzey enerjisi ile beraber tozların topaklanma eğiliminde olduğunu ortaya koymuşlardır (Habibnejad-korayem ve diğ., 2021).



Şekil 9.9. Farklı atomizasyon parametreleri için saf bakır yığınları ve yığın ölçümleri a) Cu1 b) Cu2

Şekil 9.10'da farklı gaz basınçlarında üretilen saf bakır tozlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde 30 bar basınç altında üretilen bakır tozlarının çoğunlukla küresel şekle sahip olduğu görülmektedir ancak görüntü içerisinde uzun ligament partiküller dikkat çekmektedir. Ligament yapılar genellikle 2 parametre nedeniyle oluşmaktadır. Bunlar yüksek sıvı metal viskozitesi ve gaz basıncının yetersiz kalması nedeniyle birincil atomizasyon bölgesinde sıvı metale yetersiz kinetik enerjinin aktarılmasından dolayı ligament yapılar gözükmektedir (Barreto ve diğ., 2022). Çalışma kapsamında her iki alaşımda 200 °C'lik bir aşırı ısıtmaya maruz bırakılmıştır. Dolayısıyla viskozitelerinin aynı olduğu ön görülmektedir. Bu nedenle Şekil 9.10'da 30 bar basınç ile üretilen tozlarda gazın kinetik enerjisinin sıvı metal demetine aktarımında yetersiz kalması sonucu ligament yapılar görülmüştür. Basıncın 35 bara çıkarılması ile bu yapıların kaybolduğu net bir şekilde görülmektedir. Çetin ve ark. yaptıkları çalışmada gaz atomizasyonu ile AM60 alaşım tozlarını farklı gaz basınçları altında üretmişlerdir. Artan gaz basıncı ile toz şekillerin ligament, çubuksu ve karmaşık şekilden, pulsu, damlaması ve küresel'e doğru değiştiğini ortaya koymuşlardır (Çetin ve diğ., 2020).



Şekil 9.10. Farklı atomizasyon parametreleri için saf bakır tozlarının SEM görüntüleri a) Cu1 b) Cu2

9.5. Bakır Alaşım Tozlarına Farklı Aşırı Isıtma ve Farklı Gaz Basınçlarının Etkisi

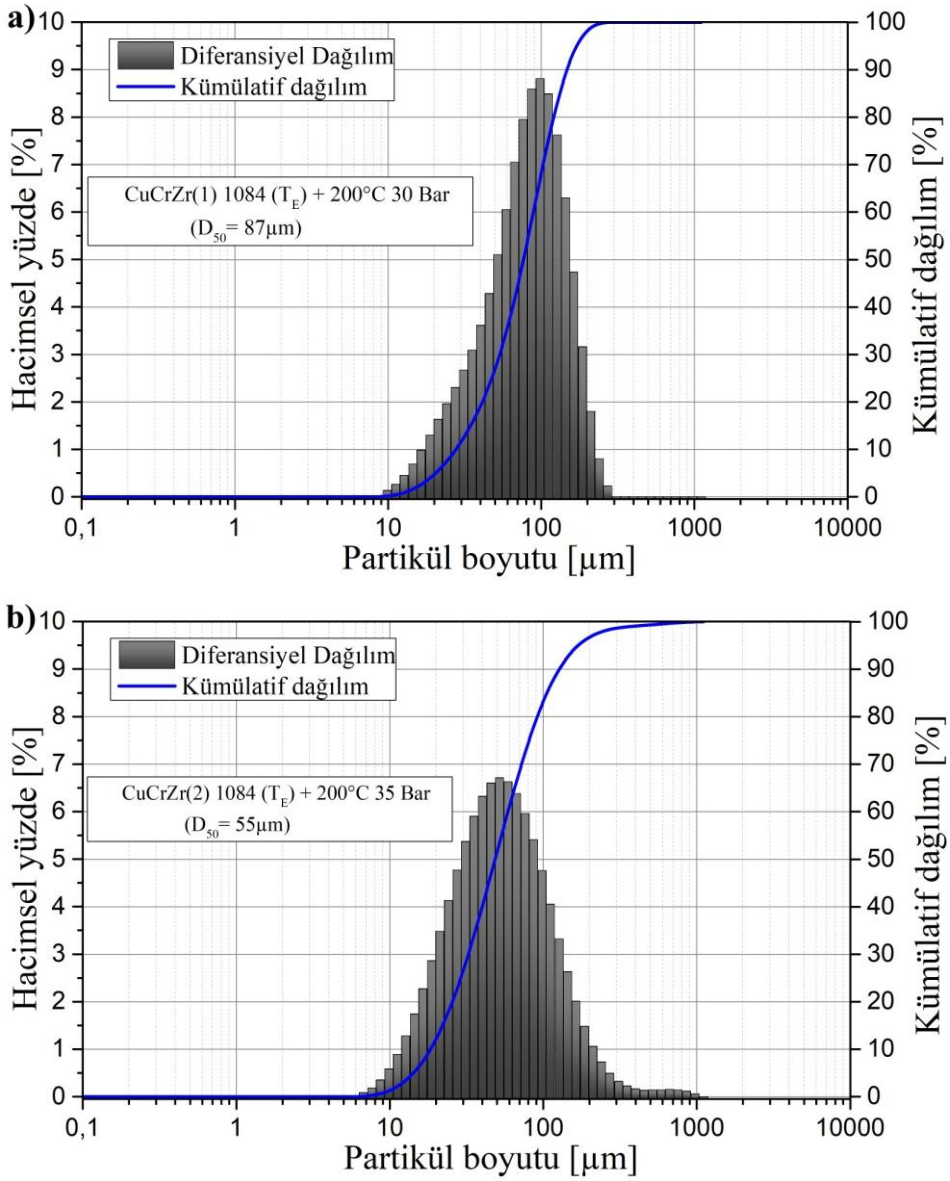
CuCrZr1 alaşımı son yıllarda eklemeli imalat tekniklerinin gelişmesi ile birlikte son derece popüler bir alaşım haline gelmiştir. Özellikle iletkenlik istenen uygulamalarda saf bakırın yetersiz mekanik özellikler gösterdiği noktalarda CuCrZr alaşımı yüksek mukavemeti ve bakır ile benzer iletkenliği sayesinde ön plana çıkmaktadır (Jahns ve diğ., 2020).

Yapılan CuCrZr1 tozu denemelerinde, gaz basıncının aynı aşırı ısıtma koşullarında partikül boyut dağılımına olan etkisi Tablo 9.4'te açıkça görülmektedir. Bakır tozu üretimine benzer şekilde artan gaz basıncı ile sıvı metal demetine aktarılan kinetik enerji artmaktadır. Artan kinetik enerji ile birlikte sıvı metal demeti daha şiddetli bir şekilde parçalanarak birincil atomizasyon evresinde ligament oluşumunu azaltmaktadır. Ligament oluşumunun azalması, oluşan damlacıkların boyutlarının küçülmesi ile beraber partikül boyut dağılımı incelmektedir.

Tablo 9.4. CuCrZr alaşım tozlarının atomizasyon parametreleri ve toz özellikleri

Deneme No	**Atomizasyon Sıcaklığı (°)**	**Gaz Basıncı (bar)**	**Yığın Açısı (°)**	**Hall Akış (s)**	**Ortalama Partikül Boyutları (µm)**
CuCrZr (1)	1084 (T_E) + 200	30	31	22	87
CuCrZr (2)	1084 (T_E) + 200	35	37	27	55

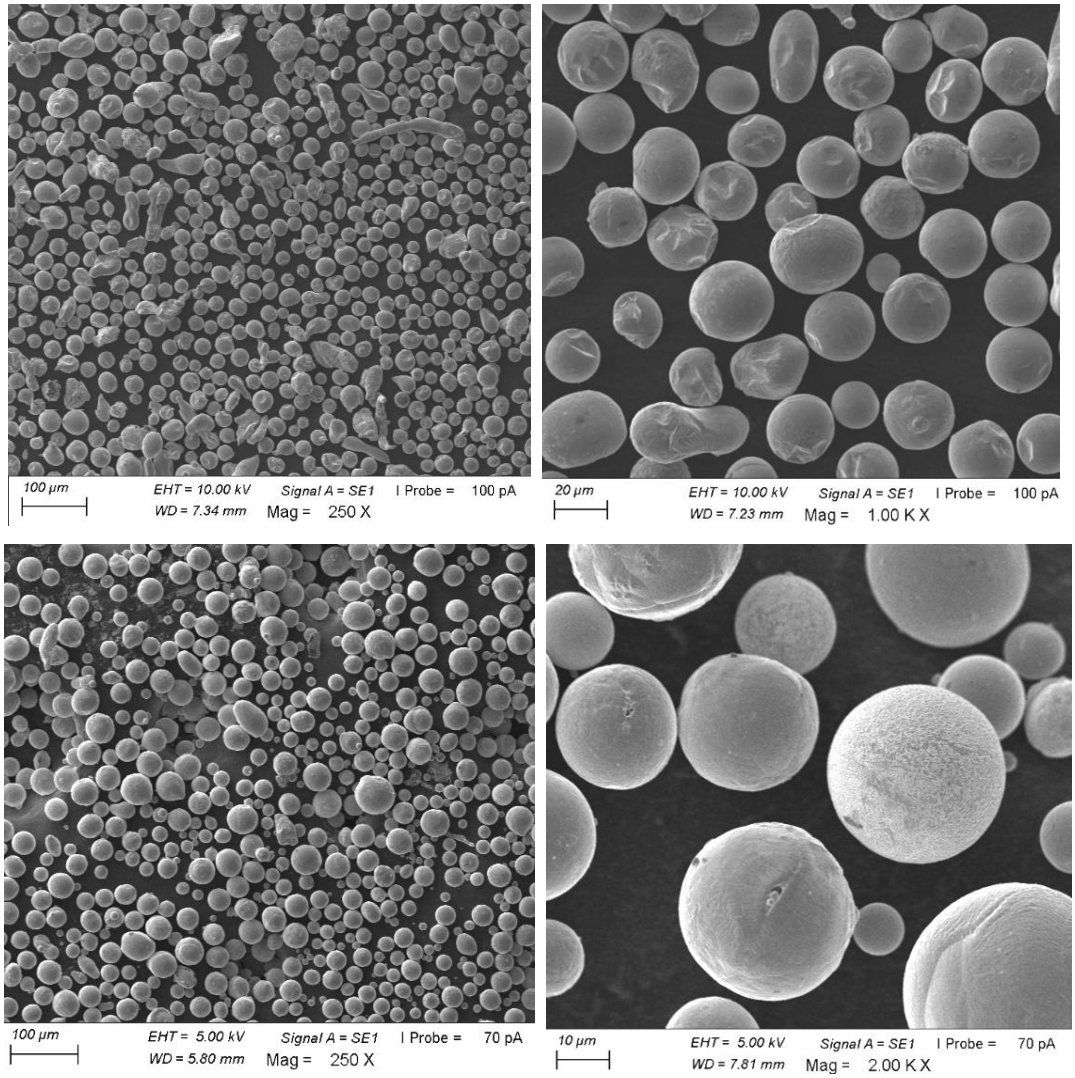
Şekil 9.11'de CuCrZr alaşım tozlarının üretimi sonrası partikül boyut dağılım grafikleri verilmişir. Artan gaz basıncı ile ortalama partikül boyutlarının inceldiği ve partikül boyut dağılım aralık dağılımının homojen bir görünüm aldığı görülmektedir.



Şekil 9.11. Farklı atomizasyon parametrelerine sahip CuCrZr alaşım tozlarının partikül boyut dağılımları a) CuCrZr(1) b) CuCrZr(2)

Şekil 9.12'de farklı basınç parametreleri kullanılarak üretilen CuCrZr1 alaşım tozlarının SEM görüntüleri veirlmiştir. Görüntüler incelendiğinde 30 bar'a basınç altında üretilen tozların küresel ve çubuksu yapılardan oluştuğu gözlemlenmektedir. Ayrıca gazın kinetik enerjisinin yetersiz şekilde sıvı demetine aktarılması ve tozların katılaşma ve küreselleşme zamanını tamamlayamaması sonucu partiküllerin bazılarının atomizasyon

çemberine çarparak partiküller üzerinde deformasyona neden olduğu görülmektedir. Basınç değerenin 35 bar'a çıkarılması ile tozların boyutlarının inceldiği ve bunun sonucunda tozların daha hızlı soğuduğu görülmektedir. Hızlı soğuma sayesinde tozlar atomizasyon çemberine çarpmadan katılaşmış ve deformasyon görülmemiştir. Ayrıca artan gaz basıncı ile çubuksu ligament yapıların kaybolduğu Şekil 9.11c'de net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 9.12. CuCrZr tozlarının farklı büyütmelerde SEM görüntüleri a) 30 bar, 250x b) 30 bar, 1kx c) 35 bar 250x d) 35 bar 2kx

Fank ve ark. yaptıkları çalışmada nikel süper alaşım tozlarını gaz atomizasyon tekniği ile başarılı bir şekilde üretmişlerdir. Çalışma kapsamında aşırı ısıtma miktarını sabit tutarak 2 farklı atomize edici gaz kullanmışlardır. Gazların farklı partikül boyutlarına sahip tozların soğuma hızına etkilerini detaylandırmışlardır. Her iki gaz cinsi içinde

incelen toz boyutuyla beraber soğuma hızlarının arttığını tespit etmişlerdir. İncelen toz boyutu ile beraber tozların havada uçma mesafesinin kısaldığı ve kaba partiküllere göre daha kısa mesafede katılaştığını SEM görüntüleri ile desteklemişlerdir (Pengjun ve diğ., 2018).

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tezin amacı eklemeli imalat teknolojileri başta olmak üzere diğer toz metalurjik üretim teknikleri (sıcak pres, lazer/plazma cladding, termal sprey ve kaynak) için gerekli elementel ve alaşım tozların üretilmesidir. Eklemeli imalat teknolojisi son yıllarda birçok firma ve akademisyen tarafından üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan bir alan haline gelmiştir. Bunların yanında, eklemeli imalat teknolojileri devletler için de stratejik bir alan olarak ifade edilmektedir. Kişiye özgü parçaların kalıba gerek olmadan üretimi, gizlilik gerektiren parçalar için kalıba ihtiyaç duymadan bu gizliliğin korunarak firmanın bünyesinde üretimin yapılabilmesi, içi boş fakat dayanımı yüksek parçaların imalatı bu teknolojiyi ön plana çıkaran bazı avantajlardan birkaçıdır. Özellikle metal sektörü açısından son yıllarda oldukça fazla gelişme olmasında rağmen bu yöntemlerin endüstriyel uygulamalarda kullanımı henüz yaygın hale gelmemiştir. Bunun en önemli sebeplerinden birisi kullanılan hammaddelerin temininden kaynaklanmaktadır.

Metal toz üretimi için çok farklı teknikler bulunmaktadır. Fakat mevcut durumda eklemeli imalat teknolojileri için genel beklenti, 100 μm altında ve küresel şekle sahip tozlara olan ihtiyaçtır. Birçok yöntem bu beklenen kriterleri sağlayan metal tozlarının üretimine izin vermektedir.

Atomizasyon teknikleri toz üretim teknikleri arasında son zamanlarda oldukça revaşta olan üretim yöntemlerinden biridir Tozların özelliklerinin üretim esnasında istenilen şekilde yönlendirilebilmesine ve değiştirilebilmesine olanak sağlar. Gaz atomizasyonu yukarıda bahsedilen isterleri karşılayabilecek en optimum teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Gaz atomizasyon yöntemlerinde toz özelliklerini etkileyen ana parametreler bulunmaktadır;

Erigiyik metal ile ilgili olanlar: Ergimiş metalin sıcaklığı ve viskozitesi, yüzey gerilimleri ve akış debisidir. Diğer ana parametreler ise: Gazın cinsi, basıncı, debisi, hızı gaz nozul geometrisi ve ergiyik akış tüpü geometrisidir.

Bu çalışmada farklı metal tozları gaz atomizasyonu tekniği ile başarılı bir şekilde üretilmiştir. Aşırı ısıtma miktarının ve gaz basıncının toz partikül boyut dağılımını etkilediği belirlenmiştir. Bu çalışmada, yakından eşlemeli Hall tipi dairesel yarıklı nozul

kullanılarak, metal tozlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan gaz atomizasyonu yöntemiyle kalay, babit, bakır ve CuCrZr tozlarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen tozların boyutuna ve dağılımına, şekline ve yüzey morfolojisine üretim parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneylerde ergimiş metalin sıcaklığı (aşırı ısıtma miktarı) ve gaz basınç değişimlerinin etkileri incelenmiştir.

Atomizasyon deneyleri sırasında farklı aşırı ısıtma denemeleri yapılmıştır. Aşırı ısıtma sıcaklığı arttıkça gaz atomizasyonunda tozların yüzey görünümünde düzgünleşme ve ortalama partikül boyutunda düşüş görülmüştür. Ergitilen metale uygulanan yüksek miktardaki aşırı ısıtmalar, daha küresel tozların üretilmesini sağlamaktadır. Ancak belirli bir aşırı ısıtma değerinin üzerinde uygulanan sıcaklıklar gaz ile etkileşim sırasında tozların sirkülasyon ile beraber uydu ve agrega oluşumunun tetiklediği görülmüştür. Gaz basıncı değişimlerinde ise gaz basıncı arttırıldığında toz boyutunun inceldiği, ince toz miktarı arttıkça yığın yoğunluğunun düştüğü görülmüştür. Daha önce de bahsedildiği gibi; gaz basıncı temel bir parametredir ve aynı nozul geometrisinde, gazın debisi ve hızını etkilediğinden dolayı tozların inceliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Gaz basıncını arttırmak ya da aşırı ısıtma miktarını arttırmak her zaman istenilen şekle ve kaliteye sahip tozların üretilmesini sağlamayabilir. Üretilen tozların kullanım alanlarına göre bu parametreleri belirlemek gerekmektedir. Boyut açısından eklemeli imalat teknikleri genel bir yaklaşım ile 15 - 45 µm boyut aralığına sahip küresel tozlar tercih edilmektedir. Soğuk sprey kaplama teknikleri için ise 10 - 45 µm boyuta sahip tozlar kullanılmaktadır. İleri bir sinterleme tekniği olan basınc destekli sinterleme tekniklerinde ise 10 - 150 µm geniş bir boyut aralığına sahip tozlar tercih edilmektedir. Safsızlık açısından bakacak olursak toz yüzeyindeki oksitler eklemeli imalat tekniklerinde yüzey pürüzlülüğüne neden olabilir. İnce tozlarda oksijen miktarı daha fazla olmaktadır. Bu nedenle yüksek basınçlı gaz kullanmak gereksizdir. Kullanılabilir toz miktarında yüksek verim sağlamaya çalışırken, ince toz miktarı artacağından ekonomik olarak faydasız olacaktır. Üretim parametreleri belirlenirken öncelikle üretilecek tozun hangi amaçla kullanılacağını bilmek ve üretim parametrelerini ona göre tasarımlamak son derece önem arz etmektedir.

İlerleyen çalışmalarda atomizasyon parametrelerini etkileyen ana parametreler üzerinde çalışılarak farklı denemeler yapılması planlanmaktadır. Özellikle ergiyik akış tüpü geometrisi, sıvı metal akış çapı ve gaz nozuluna göre konumu değişirilerek farklı alaşımların üretilmesi ve bu parametrelerin tozlara olan etkilerinin incelenmesi faydalı olacaktır.

Özgün ve yenilikçi alaşımların üretilmesi için tüm parametrelerin optimize edilmesi ve yüksek ergime sıcaklığına sahip metal tozlarının üretilebilmesi için atomizasyon çemberi ve ergitme ocağı gibi sistemlerin revize edilmesi ön görülmektedir.

Son olarak üniversite kapsamında edinilen bu bilgiler ile yerli ve milli atomizasyon sistemlerinin geliştirilmesi nihai olarak hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

Antipas, G. S. E. (2006). Modelling of the break up mechanism in gas atomization of liquid metals. Part I: The surface wave formation model. *Computational Materials Science*, *35*(4), 416-422.

Asachi, M., Nourafkan, E., Hassanpour, A. (2018). A review of current techniques for the evaluation of powder mixing. *Advanced Powder Technology, 29(7),* 1525-1549.

Asgarian, A., Tang, Z., Bussmann, M., Chattopadhyay, K. (2020). Water atomisation of metal powders: effect of water spray configuration. *Powder Metallurgy*, *63*(4), 288-299.

Ayyıldız, C. (2008). Demir (Fe) esaslı toz metal (TM) parçaların farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde kaynak bölgesinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 238185.

Balla, V. K., Kate, K. H., Satyavolu, J., Singh, P., Tadimeti, J. G. D. (2019). Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects. *Composites Part B: Engineering*, *174*, 106956.

Ban, T., Ohya, Y., Takahashi, Y. (2003). A simple synthesis of metallic Ni and Ni–Co alloy fine powders from a mixed-metal acetate precursor. *Materials chemistry and physics*, *78*(3), 645-649.

Barreto, E. S., Frey, M., Wegner, J., Jose, A., Neuber, N., Busch, R., Uhlenwinkel, V. (2022). Properties of gas-atomized Cu-Ti-based metallic glass powders for additive manufacturing. *Materials & Design*, *215*, 110519.

Bassini, E., Galech, U., Soria, T., Aristizabal, M., Iturriza, I., Biamino, S., Ugues, D. (2022). Effect of the particle size distribution on physical properties, composition, and quality of gas atomized Astroloy powders for HIP application. *Journal of Alloys and Compounds*, *890*, 161631.

Başçı, U., Yamanoğlu, R. (2021). Yeni nesil üretim teknolojisi: FDM ile eklemeli imalat. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, *5*(2), 339-352.

Başcı, U. G., Yamanoğlu, R. (2019). Eklemeli metal imalat teknolojileri için metal tozu üretim yöntemleri, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, 26-28 Nisan.

Boeck, T., Li, J., López-Pagés, E., Yecko, P., Zaleski, S. (2007). Ligament formation in sheared liquid–gas layers. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, *21*, 59-76.

Broniarz-Press, L., Ochowiak, M., Rozanski, J., Woziwodzki, S. (2009). The atomization of water–oil emulsions. Experimental Thermal and Fluid Science, 33(6), 955-962.

Capus, J. M. (2005). *Metal Powders: A Global Survey of Production, Applications and Markets 2001-2010*. Elsevier.

Chen, X., Sun, J., Guo, B., Wang, Y., Yu, S., Wang, W., Bai, J. (2022). Effect of the particle size on the performance of BaTiO3 piezoelectric ceramics produced by additive manufacturing. *Ceramics International*, *48*(1), 1285-1292.

Chen, G., Zhao, S. Y., Tan, P., Wang, J., Xiang, C. S., Tang, H. P. (2018). A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization. *Powder technology*, *333*, 38-46.

Chia, H. Y., Wu, J., Wang, X., Yan, W. (2022). Process parameter optimization of metal additive manufacturing: A review and outlook. *Journal of Materials Informatics*, *2*(4), 16.

Çetin, T., Akkaş, M., Boz, M. (2020). Gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen AM60 magnezyum alaşım tozunun toz karakterizasyonu üzerine gaz basıncının etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *35*(2), 967-978.

Dai, L., Chan, Y. R., Vastola, G., Khan, N., Raghavan, S., Zhang, Y. W. (2021). Characterizing the intrinsic properties of powder–a combined discrete element analysis and Hall flowmeter testing study. *Advanced Powder Technology*, *32*(1), 80-87.

Dérand, T., Herø, H. (1992). Bond strength of porcelain on cast vs. wrought titanium. *European Journal of Oral Sciences*, *100*(3), 184-188.

Dunkley, J. J. (2013). Advances in atomisation techniques for the formation of metal powders. In *Advances in Powder Metallurgy*, 3-18.

Em Akra, K. M., Akkaş, M., Boz, M., Seabra, E. (2020). The Production of AZ31 Alloys by Gas Atomization Method and Its Characteristics. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, *61*, 332-345.

Entezarian, M., Allaire, F., Tsantrizos, P., Drew, R. A. L. (1996). Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders. *Jom*, *48*, 53-55.

Furuya, K., Jitsukawa, S., Saito, T. (2022). Application of the Sinter-HIP Method to Manufacture Cr–Mo–W–V–Co High-Speed Steel via Powder Metallurgy. *Materials*, 15(6), 2300.

Garboczi, E. J., Hrabe, N. (2020). Particle shape and size analysis for metal powders used for additive manufacturing: Technique description and application to two gas-atomized and plasma-atomized Ti64 powders. *Additive Manufacturing*, *31*, 100965.

German, R. M. (2005). *Powder metallurgy and particulate materials processing: the processes, materials, products, properties and applications*. Metal powder industries federation.

German, R. M., Saritaş, S., Türker, M., Durlu, N. (2007). *Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri: işlemleri, malzemeler, ürünler, özellikler ve uygulamalar*. Türk Toz Metalurjisi Derneği.

Guo, B., Song, M., Yi, J., Ni, S., Shen, T., Du, Y. (2017). Improving the mechanical properties of carbon nanotubes reinforced pure aluminum matrix composites by achieving non-equilibrium interface. *Materials & Design*, *120*, 56-65.

Habibnejad-korayem, M., Zhang, J., Zou, Y. (2021). Effect of particle size distribution on the flowability of plasma atomized Ti-6Al-4V powders. *Powder Technology*, *392*, 536-543.

Haferkamp, L., Haudenschild, L., Spierings, A., Wegener, K., Riener, K., Ziegelmeier, S., Leichtfried, G. J. (2021). The influence of particle shape, powder flowability, and powder layer density on part density in laser powder bed fusion. *Metals*, *11*(3), 418.

Hayman, R. (2004). *The Shropshire wrought-iron industry c1600-1900: a study of technological change*, University of Birmingham, Doctoral dissertation, Birmingham.

Hitzler, L., Merkel, M., Hall, W., Öchsner, A. (2018). A review of metal fabricated with laser-and powder-bed based additive manufacturing techniques: Process, nomenclature, materials, achievable properties, and its utilization in the medical sector. *Advanced Engineering Materials*, *20*(5), 1700658.

Hoeges, S., Zwiren, A., Schade, C. (2017). Additive manufacturing using water atomized steel powders. *Metal powder report*, *72*(2), 111-117.

Howells, R.A., Stoner, G. H., Stockunas, J. (1989). Gas atomization nozzle for metal powder production, U.S. Patent No. 4,880,162. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Jahns, K., Bappert, R., Böhlke, P., Krupp, U. (2020). Additive manufacturing of CuCr1Zr by development of a gas atomization and laser powder bed fusion routine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *107*, 2151-2161.

Kassym, K., Perveen, A. (2020). Atomization processes of metal powders for 3D printing. *Materials today: proceedings*, *26*, 1727-1733.

Khoshnaw, F., Yamanoglu, R., Basci, U. G., Muratal, O. (2021). Pressure assisted bonding process of stainless steel on titanium alloy using powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics*, *259*, 124015.

Kondoh, K. (Ed.). (2012). *Powder metallurgy*. BoD–Books on Demand.

Kostornov, A. G., Fushchich, O. I. (2007). Sintered antifriction materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, *46*, 503-512.

Kozlík, J., Stráský, J., Harcuba, P., Ibragimov, I., Chráska, T., Janeček, M. (2018). Cryogenic milling of titanium powder. *Metals*, *8*(1), 31.

Kulkarni, P. A., Berry, R. J., Bradley, M. S. A. (2010). Review of the flowability measuring techniques for powder metallurgy industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, *224*(3), 159-168.

Lagutkin, S., Achelis, L., Sheikhaliev, S., Uhlenwinkel, V., Srivastava, V. (2004). Atomization process for metal powder. *Materials Science and Engineering: A*, *383*(1), 1-6.

Letenneur, M., Imbrogno, P., Molavi-Kakhki, A., Brailovski, V. (2020). Laser powder bed fusion with intentionally-seeded porosity for prototyping of powder metallurgy parts. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, *4*(4), 119.

Liu, H., Altan, M. C. (2002). Science and engineering of droplets: fundamentals and applications. *Appl. Mech. Rev.*, *55*(1), B16-B17.

Liu, J. Q., Dong, Y. N., Wang, P., Zhao, H., Pang, J., Li, X. Y., Zhang, J. Q. (2022). Simulation and experiment investigations on fabrication of Fe-based amorphous powders by a novel atomization process equipped with assisted gas nozzles. *Journal of Iron and Steel Research International*, 1-14.

Loh, Z. H., Samanta, A. K., Heng, P. W. S. (2015). Overview of milling techniques for improving the solubility of poorly water-soluble drugs. *Asian journal of pharmaceutical sciences*, *10*(4), 255-274.

Long, J., Wang, Y., Zeng, Y., Xiong, X., Li, X., Lun, H., Zhang, J. (2022). Surface tension measurement of Ti–Zr and Ti–Hf alloys at high-temperature by the pendant drop method. *Vacuum*, *200*, 111045.

Luo, S., Wang, H., Gao, Z., Wu, Y., Wang, H. (2021). Interaction between high-velocity gas and liquid in gas atomization revealed by a new coupled simulation model. *Materials & Design*, *212*, 110264.

Mandal, S., Sadeghianjahromi, A., Wang, C. C. (2022). Experimental and numerical investigations on molten metal atomization techniques–A critical review. *Advanced Powder Technology*, *33*(11), 103809.

Manotham, S., Tesavibul, P. (2022). Effect of particle size on mechanical properties of alumina ceramic processed by photosensitive binder jetting with powder spattering technique. *Journal of the European Ceramic Society*, *42*(4), 1608-1617.

Martin, A., Vilanova, M., Gil, E., San Sebastian, M., Wang, C. Y., Milenkovic, S., Cepeda-Jiménez, C. M. (2022). Influence of the Zr content on the processability of a high strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy by laser powder bed fusion. *Materials Characterization*, *183*, 111650.

Mates, S. P., Settles, G. S. (1995). A flow visualization study of the gas dynamics of liquid metal atomization nozzles. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials--1995.*, *1*, 1.

Meydanju, N., Pirsa, S., Farzi, J. (2022). Biodegradable film based on lemon peel powder containing xanthan gum and TiO2–Ag nanoparticles: Investigation of physicochemical and antibacterial properties. *Polymer Testing*, *106*, 107445.

Mi, J., Figliola, R. S., Anderson, I. E. (1997). A numerical investigation of gas flow effects on high-pressure gas atomization due to melt tip geometry variation. *Metallurgical and Materials transactions B*, *28*, 935-941.

Moskal, M., Migas, P., Karbowniczek, M. (2022). Multi-Parameter Characteristics of Electric Arc Furnace Melting. *Materials*, *15*(4), 1601.

Morakotjinda, M., Fakpan, K., Yotkaew, T., Tosangthum, N., Krataithong, R., Daraphan, A., Tongsri, R. (2010). Gas atomization of low melting-point metal powders. *Chiang Mai J. Sci*, *37*(1), 55-63.

Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, *119*, 100707.

Mullis, A. M., McCarthy, I. N., Cochrane, R. F. (2011). High speed imaging of the flow during close-coupled gas atomisation: effect of melt delivery nozzle geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, *211*(9), 1471-1477.

Muratal, O., Yamanoglu, R. (2022). Babit Alaşım Tozlarının Gaz Atomizasyonu ile Üretimi. 1st International Conference on Innovative Academic Studies, Konya, 10-13 September 2022.

Naidu, H., Kahraman, O., Feng, H. (2022). Novel applications of ultrasonic atomization in the manufacturing of fine chemicals, pharmaceuticals, and medical devices. *Ultrasonics Sonochemistry*, *86*, 105984.

Nakamura, K., Yashima, M. (2008). Crystal structure of NaCl-type transition metal monocarbides MC (M= V, Ti, Nb, Ta, Hf, Zr), a neutron powder diffraction study. *Materials Science and Engineering: B*, *148*(1-3), 69-72.

Ortner, H. M., Ettmayer, P., Kolaska, H. (2014). The history of the technological progress of hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *44*, 148-159.

Ouyang, H. W., Xin, C. H. E. N., Huang, B. Y. (2007). Influence of melt superheat on breakup process of close-coupled gas atomization. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *17*(5), 967-973.

Pengjun, F., Yi, X., Xinggang, L., Ya, C. (2018). Influence of atomizing gas and cooling rate on solidification characterization of nickel-based superalloy powders. *Rare Metal Materials and Engineering*, *47*(2), 423-430.

Persson, F., Eliasson, A., Jönsson, P. G. (2014). Oxidation of water atomized metal powders. *Steel research international*, *85*(12), 1629-1638.

Pizoń, J., Gołaszewski, J., Alwaeli, M., Szwan, P. (2020). Properties of concrete with recycled concrete aggregate containing metallurgical sludge waste. *Materials*, *13*(6), 1448.

Plotkin, S. Y. (1966). Petr Grigor'evich Sobolevskii. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, *5*, 993-995.

Popovich, A., Sufiiarov, V. (2016). Metal powder additive manufacturing. In *New trends in 3D printing*. IntechOpen.

Pranda, P., Prandova, K., Hlavacek, V. (2000). Particle size and reactivity of aluminum powders. *Combustion science and technology*, *156*(1), 81-96.

Qiu, Z. (2021). Improving gas flow in gas atomization. Degree Project KTH Royal Institute of Technology, School Of Industrial Engineering and Management, Stockholm.

Rahman, Z., Barakh Ali, S. F., Ozkan, T., Charoo, N. A., Reddy, I. K., Khan, M. A. (2018). Additive manufacturing with 3D printing: progress from bench to bedside. *The AAPS journal*, *20*, 1-14.

Sankhla, A. M., Patel, K. M., Makhesana, M. A., Giasin, K., Pimenov, D. Y., Wojciechowski, S., Khanna, N. (2022). Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route. *Journal of materials research and technology*, *18*, 282-292.

Shi, Y., Lu, W., Sun, W., Zhang, S., Yang, B., Wang, J. (2022). Impact of gas pressure on particle feature in Fe-based amorphous alloy powders via gas atomization: Simulation and experiment. *Journal of Materials Science & Technology*, *105*, 203-213.

Sokołowski, P., Kustroń, P., Korzeniowski, M., Sajbura, A., Piwowaczyk, T., Szostak-Staropiętka, R., Kiełbasiśnki, R. (2022). Ultrasonic atomization as an alternative route for metal powder production. In *ITSC2022* (pp. 716-722). ASM International.

Sun, P., Fang, Z. Z., Zhang, Y., Xia, Y. (2017). Review of the methods for production of spherical Ti and Ti alloy powder. *Jom*, *69*, 1853-1860.

Strauss, J. T. (2013). Lick back in close-coupled atomization: A phenomenological study. *Spray Deposition and Melt Atomization. Bremen, Germany: Universität Bremen*.

Tambe, S., Jain, D., Meruva, S. K., Rongala, G., Juluri, A., Nihalani, G., Bolla, P. K. (2022). Recent Advances in Amorphous Solid Dispersions: Preformulation, Formulation Strategies, Technological Advancements and Characterization. *Pharmaceutics*, *14*(10), 2203.

Tian, L., Anderson, I., Riedemann, T., Russell, A. (2017). Production of fine calcium powders by centrifugal atomization with rotating quench bath. *Powder Technology*, *308*, 84-93.

Tsukerman, S. A. (2013). *Powder metallurgy*. Elsevier, England.

Urionabarrenetxea, E., Avello, A., Rivas, A., Martín, J. M. (2021). Experimental study of the influence of operational and geometric variables on the powders produced by close-coupled gas atomisation. *Materials & Design*, *199*, 109441.

Van Der Merwe, N. J., Avery, D. H. (1982). Pathways to steel: Three different methods of making steel from iron were developed by ancient peoples of the Mediterranean, China, and Africa. *American Scientist*, *70*(2), 146-155.

Vattur Sundaram, M., Hryha, E., Chasoglou, D., Rottstegge, A., Nyborg, L. (2022). Effect of density and processing conditions on oxide transformations and mechanical properties in Cr–Mo-alloyed pm steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1-13.

Wang, J., Xia, M., Wu, J., Ge, C. (2022). Nozzle Clogging in Vacuum Induction Melting Gas Atomization: Influence of the Delivery-Tube and Nozzle Coupling. *Archives of Metallurgy and Materials*, 1359-1370.

Wang, P., Li, J., Wang, X., Liu, H. S., Fan, B., Gan, P., Wang, M. H. (2021). Close-coupled nozzle atomization integral simulation and powder preparation using vacuum induction gas atomization technology. *Chinese Physics B*, *30*(2), 027502.

Wang, P., Li, J., Liu, H. S., Wang, X., Du, B. R., Gan, P., Wang, M. H. (2021). Process modeling gas atomization of close-coupled ring-hole nozzle for 316L stainless steel powder production. *Chinese Physics B*, *30*(5), 057502.

Wei, M., Chen, S., Sun, M., Liang, J., Liu, C., Wang, M. (2020). Atomization simulation and preparation of 24CrNiMoY alloy steel powder using VIGA technology at high gas pressure. *Powder technology*, *367*, 724-739.

Wolf, G., Bergmann, H. W. (2002). Investigations on melt atomization with gas and liquefied cryogenic gas. *Materials Science and Engineering: A*, *326*(1), 134-143.

Woo, H. J., Ahn, J. H., Kim, C. P., Choi, D. H., Kim, S., Lee, B. W. (2022). Effect of the particle size classification of FeSiCrB amorphous soft magnetic composites to improve magnetic properties of power inductors. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *577*, 121309.

Xia, Y., Lefler, H. D., Fang, Z. Z., Zhang, Y., Sun, P. (2020). Energy consumption of the Kroll and HAMR processes for titanium production. In *Extractive Metallurgy of Titanium* (pp. 389-410). Elsevier.

Xu, L., Zhou, X., Li, J., Hu, Y., Qi, H., Wen, W., Yu, Y. (2020). Numerical simulations of molten breakup behaviors of a de laval-type nozzle, and the effects of atomization parameters on particle size distribution. *Processes*, *8*(9), 1027.

Yamanoglu, R., Bahador, A., Kondoh, K. (2021). Fabrication methods of porous titanium implants by powder metallurgy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 1-13.

Yamanoglu, R. (2019). Pressureless spark plasma sintering: A perspective from conventional sintering to accelerated sintering without pressure. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, *57*, 513-525.

Yamanoğlu, R. (2011). Atomizasyon Teknikleri ile Toz Üretimi, Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 290440.

Yamanoglu, R., German, R. M., Karagoz, S., Bradbury, W. L., Zeren, M., Li, W., Olevsky, E. A. (2011). Microstructural investigation of as cast and PREP atomised Ti–6Al–4V alloy. *Powder metallurgy*, *54*(5), 604-607.

Yamanoglu, R., Bahador, A., Kondoh, K. (2021). Effect of Mo Addition on the Mechanical and Wear Behavior of Plasma Rotating Electrode Process Atomized Ti6Al4V Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *30*, 3203-3212.

Yasuda, K., Honma, H., Xu, Z., Asakura, Y., Koda, S. (2011). Ultrasonic atomization amount for different frequencies. *Japanese Journal of Applied Physics*, *50*(7S), 07HE23.

Yenwiset, S., Yenwiset, T. (2011). Design and construction of water atomizer for making metal powder. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, *21*(1).

Yu, W., Xiao, Z., Zhang, X., Sun, Y., Xue, P., Tan, S., Zheng, H. (2022). Processing and characterization of crack-free 7075 aluminum alloys with elemental Zr modification by laser powder bed fusion. *Materials Science in Additive Manufacturing*, *1*(1), 4.

Zegzulka, J., Gelnar, D., Jezerska, L., Prokes, R., Rozbroj, J. (2020). Characterization and flowability methods for metal powders. *Scientific Reports*, *10*(1), 1-19.

Zheng, B., Lavernia, E. J. (2011). Melt atomization. *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications*, 837-848.

Zhuang, X., Lu, S., Li, L., Feng, Q. (2020). Microstructures and properties of a novel γ′-strengthened multi-component CoNi-based wrought superalloy designed by CALPHAD method. *Materials Science and Engineering: A*, *780*, 139219.

Żrodowski, Ł., Wróblewski, R., Choma, T., Morończyk, B., Ostrysz, M., Leonowicz, M., Pomian, K. (2021). Novel cold crucible ultrasonic atomization powder production method for 3D printing. *Materials*, *14*(10), 2541.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Khoshnaw F., Yamanoglu R., Basci U G., **Muratal O.**, (2021). Pressure assisted bonding process of stainless steel on titanium alloy using powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics*, *259*, 124015.

Kıraç M., **Muratal O.**, Koç F., Başçı Ü., Özdemir Y., Özer G., Yamanoğlu R., Basınç Destekli Sinterleme ile CoCr Alaşımının Üretimi, *ICASEM IV. Uluslararası Uygulamalı Bilimler, Mühendislik ve Matematik Kongresi***,** Tekirdağ, 20-23 Ekim 2022.

Muratal O., Duran C., Çabuşoğlu O; Khoshnaw F., Yamanoğlu R., Toz Metalurjisi ile Ni-Cr-Si-Fe-B-C Tozlarının Ti6Al4V Alaşımı Üzerine Kaplanması, *Imascon Gress (Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi Sonbahar 2019),* Kocaeli, 1-3 Kasım 2019.

Muratal O., Gümüş S., Yamanoğlu R., Ti4Al4Mo Alaşımının Toz Metalurjisi ile Üretimi ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, *Imascon Gress (Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi Bahar 2019),* Kocaeli, 26-28 Nisan 2019.

Muratal O., Gümüş S., Yamanoğlu R., Mg50Al50 Partikül Takviyeli Saf Magnezyumun Sıcak Pres ile Üretimi ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, *Imascon Gress (Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi Bahar 2019),* Kocaeli, 26-28 Nisan 2019.

Muratal O., Efendi E., Yamanoğlu R., Bakır Tel İlaveli Saf Titanyum Tozlarının Sıcak Pres ile Üretimi, *Engineers of Future International Student Symposium,* Zonguldak, 7-9 Haziran 2018.

Muratal O., Yamanoğlu R., Farklı Toz Partikül Boyutlarının Saf Titanyumun Mekanik Özelliklerine Etkisi, *2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT),* Ankara, 19-21 Ocak 2018.

Muratal O., Yamanoğlu R., Hurda Bakır Tellerin Mekanik Özelliklere Etkisi, *2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT),* Ankara, 19-21 Ocak 2018.

Muratal O., Yamanoğlu R., Production Of 316L Stainless Steel used in Biomedical Applications by Powder Metallurgy, *Scientific Meeting on Electrical-Electronics & Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT 2019),* İstanbul, 24-26 Nisan 2019.

Muratal O., Yamanoglu, R., Babit Alaşım Tozlarının Gaz Atomizasyonu ile Üretimi. *1st International Conference on Innovative Academic Studies*, Konya, 10-13 Eylül 2022.

Yamanoğlu R., Bozbaş S., Kolayli F., Erkan S., Uzuner H., **Muratal O.**, Yavuz İ., (2020). Toz Metalurjisi ile Biyomedikal Ti5Ag Alaşımının Üretimi. *Ejons International Journal, 4*(15), 549-559.

Yamanoglu R., Bahador A., Kondoh K., Gumus S., Gokce S., **Muratal O.**, (2021). New Magnesium Composite with Mg17Al12 Intermetallic Particles. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 60*(3), 216-224.

Topçu A., Meıer B., **Muratal O.**, Lackner J., Yamanoğlu R., SLM Tekniği ile Üretilen Ti-6Al-4V Alaşımının Aşınma Özellikleri, *Biltek Uluslararararası Bilim Teknoloji ve Sosyal Bilimlerde Güncel Gelişmeler Sempozyumu,* Ankara, 21-22 Aralık 2019.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Silivri'de tamamladı. 2014 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2019 yılından Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak mezun oldu. 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2021 Nisan-Ekim ayları arasında ASAŞ Alüminyum firmasında Hadde İşletme Mühendisi olarak görev yaptı. 2021 yılının Kasım ayında TOYOTA TOYOTETSU firmasına QA Malzeme Analiz ve Geliştirme Uzmanı olarak transfer oldu. Şuan bu firmada aynı pozisyonda çalışmaya devam etmektedir.