

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SU JETİ SOĞUTMALI DÖNER DİSK ATOMİZASYONU YÖNTEMİYLE HIZLI  
KATILAŞTIRILMIŞ BRONZ ALAŞIMI TOZ VE ŞERİTİ ÜRETİMİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Müh. Gönül USTA**

**ARALIK 2009  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SU JETİ SOĞUTMALI DÖNER DİSK ATOMİZASYONU YÖNTEMİYLE HIZLI  
KATILAŞTIRILMIŞ BRONZ ALAŞIMI TOZ VE ŞERİTİ ÜRETİMİNİN  
İNCELENMESİ**

**Mak. Müh. Gönül USTA**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Yüksek Lisans (Metalurji ve Malzeme Mühendisliği)”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26.11.2009  
Tezin Savunma Tarihi : 18.12.2009**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sultan ÖZTÜRK  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ekrem YANMAZ**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU**

**Trabzon 2009**

## ÖNSÖZ

Hızlı katılaştırma teknolojisi ile birlikte uygulanan toz metalurjisi üretim tekniği, dünyada giderek yaygınlaşmakta olup, gerek teknolojik, gerek ekonomik açıdan diğer metalurjik üretim yöntemlerine alternatif oluşturmaktadır. Bu üretim tekniğinin ilk aşaması olan metal veya alaşım tozu üretimi oldukça önemlidir. Döner disk atomizasyonu yöntemi ile kontrollü atmosferde oksijen oranı düşük, hızlı katılaştırılmış metal ve alaşım tozu üretimi yapmak mümkündür. Bu yöntem ile doğrudan toz üretimi yanında, hızlı katılaştırılmış şerit üretilip, bu şeritlerin öğütülmesiyle de toz üretimi yapılabilmektedir. Bu şekilde üretilen tozlarda soğuma hızı toz boyutuna bağlı olmamakta, homojen bir iç yapı elde edilmektedir. Hızlı katılaştırılmış tozlardan toz metalurjisi üretim tekniği ile elde edilen parçalar yüksek mukavemet, korozyon dayanımı, tokluk, aşınma dayanımı ve manyetik özelliklere sahip olup, havacılık, elektronik, sağlık, otomotiv ve savunma sanayii gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada atomizasyon işleminin soygaz atmosferi altında gerçekleşmesi ve atomizasyon diskinin ısı iletim katsayısı yüksek olan elektrolitik bakır malzemeden üretilerek alt kısımdan su jeti ile soğutulmasıyla hızlı katılaştırılmış toz ve şerit üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma boyunca değerli fikirleriyle ve tecrübesiyle bana yol gösteren, çalışmaların sonuçlanması için benimle yakından ilgilenen, danışman hocam sayın Doç. Dr. Sultan ÖZTÜRK'e teşekkür eder saygı ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım K.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Müh. Bölüm Başkanı sayın hocam Prof. Dr. Fazlı ARSLAN'a, Yrd. Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK'e, Yrd. Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI ve Yrd. Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'ya, Master Sizer analizlerinde yardımlarını gördüğüm Yrd. Doç. Dr. İbrahim ALP ve Sadiye YÜCE'ye, SEM incelemelerinde yardımlarını gördüğüm tekniker Mustafa KIRASLAN'a ve beni her zaman destekleyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Gönül USTA  
Trabzon 2009

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa no

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	V
SUMMARY .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Döner Disk Atomizasyonu .....	4
1.2.1. Atomizasyon Mekanizması .....	6
1.2.2. Döner Disk Atomizasyonunda Atomizasyon Değişkenleri.....	9
1.2.2.1. Disk Malzemesi ve Yüzey Durumu .....	9
1.2.2.2. Disk Geometrisi.....	10
1.2.2.3. Disk Hızı.....	11
1.2.2.4. Disk Çapı .....	11
1.2.2.5. Aşırı Isıtma Miktarı .....	13
1.2.2.6. Sıvı Metal Debisi .....	13
1.2.2.7. Metal veya Alaşım Türü .....	14
1.2.3. Döner Disk Atomizasyonunda Ortalama Toz Boyutunun Hesaplanması .....	15
1.2.4. Döner Disk Atomizasyonu ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	16
1.3. Hızlı Katılaştırma .....	20
1.3.1. Soğuma Hızı ile Mikroyapının Değişimi .....	23
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı .....	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	27
2.1. Kullanılan Metal ve Alaşımlar .....	27
2.2. Deney Düzenegi .....	28
2.2.1. Ergitme Ünitesi.....	30
2.2.2. Atomizasyon Odası.....	31

2.2.3.	Kontrol Ünitesi .....	33
2.2.4.	Soğutma Ünitesi .....	34
2.3.	Atomizasyon Deneylei .....	34
2.4.	Ortalama Toz Boyutu ve Verim Hesabı .....	35
2.5.	Üretilen Toz ve Şeritlerin Morfoloji ve Mikroyapı İncelemeleri .....	35
3.	<b>BULGULAR VE İRDELEME</b> .....	37
3.1.	Toz Boyut Dağılımı .....	37
3.2.	Üretilen Tozların Morfolojileri.....	42
3.3.	Atomizasyon Parametrelerinin Ortalama Toz Boyutuna ve Verime Etkisi .....	48
3.4.	Mikroyapı .....	59
3.5.	Üretilen Şeritlerin Özellikleri ve Mikroyapısı.....	67
4.	<b>SONUÇLAR</b> .....	80
5.	<b>ÖNERİLER</b> .....	82
6.	<b>KAYNAKLAR</b> .....	83
	<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	

## ÖZET

Bu çalışmada CuSn10 bronz alaşımı, su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu yöntemi ile soygaz atmosferi altında atomize edilerek hızlı katılaştırılmış toz ve şerit üretimi gerçekleştirilmiştir. Disk hızı, disk kanatçık sayısı, disk yüzey pürüzlülüğü, sıvı alaşım akış debisi ve aşırı ısıtma miktarı gibi atomizasyon parametrelerinin üretilen tozların morfolojisine, ortalama toz boyutuna ve verime etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte, üretilen toz ve şeritlerin mikroyapıları incelenerek soğuma hızları hesaplanmıştır.

Üretilen bronz tozları atomizasyon parametrelerine bağlı olarak 100–250 µm ortalama boyutta olup, toz üretim verimi % 65-85 arasında gerçekleşti. Artan disk hızı, kanatçık sayısı, yüzey pürüzlülüğü ve sıvı alaşım aşırı ısıtma miktarı ve azalan nozul çapı ile toz üretim veriminin arttığı, ortalama toz boyutunun azaldığı tespit edildi. En düşük ortalama boyutta ve en yüksek verimde toz üretimi 4 kanatçıklı ZrO<sub>2</sub> kaplanmış diskle, 2 mm nozul çapında, 300° C aşırı ısıtma miktarında ve 75 m/s disk hızında elde edildi.  $5,82 \times 10^5$  -  $0,20 \times 10^3$  K/s arasında soğuma hızına sahip tozların morfolojisi genellikle küresel, yuvarlak, ligamental, çubuksu, düzensiz, pulsulu ve yapraksı şekilli oldu. Bronz alaşımı için 2 kanatçıklı kaplamasız disk kullanılarak yapılan atomizasyon deneylerinde tozun yanısıra  $3 \times 10^6$  -  $2,8 \times 10^5$  K/s arasında soğuma hızına sahip, 15-95 µm kalınlıkta, 3-6 mm genişlikte ve 45-72 mm boyunda düz veya çok az miktarda eğrisel formda şeritler üretildi. Ortalama şerit kalınlığının artan disk hızı ve azalan nozul çapı ile azaldığı şerit üretim veriminin ise azalan disk hızı ve nozul çapı ile arttığı gözlemlendi. Azalan toz boyutu veya şerit kalınlığı ile hücre boyutunun azaldığı ve soğuma hızının arttığı tespit edildi.

**Anahtar Kelimeler:** Döner Disk Atomizasyonu, Hızlı Katılaştırma, Toz Üretimi, Şerit Üretimi, CuSn10 bronz tozu

## SUMMARY

### **Investigation of Producing Rapidly Solidified Bronze Powder and Ribbon by Water Jet Cooled Rotating Disc Atomization**

In this study, CuSn10 bronze alloy was atomized with water jet cooled rotating disc atomization method in high purity argon gas atmosphere and rapidly solidified powder and ribbon were produced. The effects of atomization parameters such as disc speed, disc fin number, surface roughness of the disc, flow rate and superheat of liquid metal on the properties of produced powders in terms of morphology, mean particle size and yield rate were investigated. Beyond this, the microstructure of produced powders and ribbons was also examined and cooling rates were calculated.

The mean particle sizes of the produced bronze powders were in the range of 100-250  $\mu\text{m}$  depending on atomization parameters. The yield rate values obtained were in the range of 65-85%. The mean particle size of powders decreased and yield rate increased with increasing disc speed and disc fin number, increasing surface roughness of the disc, increasing superheat of liquid alloy and decreasing flow rate of liquid alloy. The smallest mean particle size and the highest powder yield rate were obtained by using  $\text{ZrO}_2$  material coated disc with four fins, 2 mm nozzle diameter of flow rate, 300° C superheat and 75 m/s disc speed. The typical shapes of produced bronze powders were mostly appeared in the shapes of sphere, rounded, ligamental, irregular and flaky, being dependent on the particle size. The cooling rate of produced powders was calculated as  $5,82 \times 10^5 - 0,20 \times 10^3$  K/s depending on cell size. Apart from powder, bronze alloy ribbons with the size of 15-95  $\mu\text{m}$  thickness, 3-6 mm width and 45-72 mm length were produced with using uncoated disc with two fins. The ribbon thickness decreased with increasing disc speed and decreasing liquid alloy flow rate. The cooling rate of produced ribbons were in the range of  $3 \times 10^6 - 2,8 \times 10^5$  K/s depending on ribbon thickness.

**Key Words:** Rotating Disc Atomization, Rapid Solidification, Powder Production, Ribbon Production, CuSn10 Bronze Powder

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Değişik soğutma ortamlı döner disk atomizasyonu üniteleri. a) sıvı, b) katı, c) gaz soğutma ortamı.....	5
Şekil 1.2. Düz diskle atomizasyon mekanizmaları. a) direkt damlacık oluşumu, b) ligament parçalanması, c) sıvı film parçalanması .....	7
Şekil 1.3. Atomizasyon diskinden ayrılan sıvı metal damalcıklarının yörüngesi .....	8
Şekil 1.4. Kanatçıklı düz diskle atomizasyon mekanizması.....	9
Şekil 1.5. Disk geometrileri. a) düz, b) konik kanatçıklı, c) kanatçıklı.....	11
Şekil 1.6. Atomizasyon diskinin maruz kaldığı radyal ( $\sigma_r$ ) ve teğetsel gerilmelerin ( $\sigma_\theta$ ) değişimi .....	13
Şekil 1.7. Öztürk vd tarafından geliştirilen su soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesi.....	17
Şekil 1.8. Xie vd tarafından geliştirilen santrifüj atomizörü .....	18
Şekil 1.9. Eslamian vd tarafından geliştirilen döner disk atomizörü.....	18
Şekil 1.10. Fuqian vd tarafından geliştirilen atomizör .....	19
Şekil 1.11. Zhong vd tarafından geliştirilen hibrid atomizör .....	20
Şekil 1.12. Değişik üretim yöntemlerinde ikincil dendrit kol aralığı ile soğuma hızının değişimi .....	22
Şekil 1.13. Aşırı soğuma miktarı, çekirdeklenme ve büyüme hızı arasındaki ilişki .....	23
Şekil 1.14. Soğuma hızı - aşırı soğuma arasındaki ilişki ve oluşabilecek mikroyapılar .....	25
Şekil.1.15. Hızlı katılaştırma ile oluşabilecek mikro yapılar. a) dendritik (Ag-Zn alaşımı) b) eşeksenli hücreli (Co-Cr-Mo alaşımı), c) nano yapılı (Fe-Cu-Nb- Si-B alaşımı), d)amorfor yapılı (Ti-Ni-Cu alaşımı) .....	25
Şekil 2.1. Cu-Sn alaşımı denge diyagramı .....	28
Şekil 2.2. Su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesi şematik resmi.....	29
Şekil 2.3. Su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesi .....	29
Şekil 2.4. Ergitme ünitesi .....	30
Şekil 2.5. a) Pota, b) tıkaç boyutları .....	31
Şekil 2.6. Atomizasyon diskleri. a) iki kanatçıklı, b) dört kanatçıklı .....	32
Şekil 2.7. Kontrol ünitesi. a) indüksiyon ısıtma sistemi ve hidrolik motor üniteleri, b) döner disk motoru, hidrolik motor, pota ve tıkaç kontrol butonları ile disk hızı gösterge panosu .....	33



Şekil 2.8. Soğutma ünitesi .....	34
Şekil 3.1. Atomize edilen alaşım türünün, a) kümülatif boyut dağılımına etkisi (DKS: 2, DYD: ZrO <sub>2</sub> kaplanmış, DH: 75 m/s, NÇ: 2 mm, AIM: 300°C), b) normal dağılıma etkisi (DKS: 2, DYD: ZrO <sub>2</sub> kaplanmış, DH: 63 m/s, NÇ: 2 mm, AIM: 300°C).....	39
Şekil 3.2. Disk hızının, a) kümülatif boyut dağılımına etkisi (DKS: 4, DYD: ZrO <sub>2</sub> kaplanmış, NÇ: 2 mm, AIM: 300°C), b) normal dağılıma etkisi (DKS: 2, DYD: ZrO <sub>2</sub> kaplanmış, NÇ: 2 mm, AIM: 300°C).....	40
Şekil 3.3. Disk yüzey durumunun, a) kümülatif toz boyut dağılımına etkisi (DKS: 4, DH: 63 m/s, NÇ: 2 mm, AIM: 300°C), b) normal dağılıma etkisi (DKS: 2, DH: 75 m/s, NÇ: 2 mm, AIM: 300°C) .....	41
Şekil 3.4. Farklı boyutlardaki bronz tozları. a), b) -25 µm/tava, c), d) -36/+25 µm.....	44
Şekil 3.5. Farklı boyutlardaki bronz tozları. a) -45/+36 µm, b) -63/+45 µm, c) -90/+63 µm, d) -125/+90 µm .....	45
Şekil 3.6. Farklı boyutlardaki bronz tozları. a, b) -180/+125 µm, c, d) -250/+180 µm, e) 355/+250 µm, f) -500/+355 µm.....	46
Şekil 3.7. Farklı boyutlardaki paslanmaz çelik tozları. a), b) -45 µm/tava, c), d) -90/+45 µm, e) -180/+125 µm, f) -355/+180 µm.....	47
Şekil 3.8. Atomize edilen alaşım türünün, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DKS: 2, DYD: ZrO <sub>2</sub> kaplanmış, NÇ: 2 mm, AIM: 300 °C).....	52
Şekil 3.9. Disk hızının, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DKS: 2, DYD: kaplamalı, AIM: 300 °C) .....	53
Şekil 3.10. Disk kanatçık sayısının, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DYD: ZrO <sub>2</sub> kaplanmış, NÇ: 2 mm, AIM: 300 °C) .....	54
Şekil 3.11. Nozul çapının, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DKS: 2, DYD: ZrO <sub>2</sub> kaplanmış, AIM: 300 °C).....	55
Şekil 3.12. Aşırı ısıtmanın, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DKS: 2, DYD: ZrO <sub>2</sub> kaplanmış, DH: 70 m/s) .....	56
Şekil 3.13. Disk yüzey durumunun, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DKS: 2, NÇ: 2 mm, AIM: 300 °C).....	57
Şekil 3.14. Disk yüzey durumunun -500/+355 µm boyuta sahip tozların morfolojisine etkisi. a) DYD: ZrO <sub>2</sub> kaplanmış, b) DYD: kaplanmamış (DKS: 2, NÇ: 2 mm, DH: 75 m/s, AIM: 300 °C).....	58
Şekil 3.15. Kaplamalı ve kaplamasız disk kullanılarak yapılan deneylerin hurdaları, a) DYD: ZrO <sub>2</sub> kaplanmış, b) DYD: kaplanmamış (NÇ: 2 mm, DH: 75m/s, AIM: 300°C, DKS: 2).....	59
Şekil 3.16. a) CuSn10 bronz alaşımı tozu mikroyapısı (toz boyutu 18 µm), b) büyütülmüş mikroyapı (λ= hücre boyutu).....	61

Şekil 3.17. a) CuSn10 bronz alaşımı tozu mikroyapısı (toz boyutu 32 $\mu\text{m}$ ), b) büyütülmüş mikroyapı.....	62
Şekil 3.18. a) CuSn10 bronz alaşımı tozu mikroyapısı (toz boyutu 63 $\mu\text{m}$ ), b) büyütülmüş mikroyapı. ....	63
Şekil 3.19. Farklı boyutlardaki CuSn10 bronz alaşım tozu mikroyapıları. a) toz boyutu 84 $\mu\text{m}$ , b) toz boyutu 140 $\mu\text{m}$ , c) toz boyutu 302 $\mu\text{m}$ ..	64
Şekil 3.20. CuSn10 bronz alaşımının mikroyapısı.....	65
Şekil 3.21. CuSn10 bronz alaşımı tozlarında toz boyutuna bağlı olarak hücre boyutunun değişimi .....	66
Şekil 3.22. CuSn10 bronz alaşımı tozlarında toz boyutuna bağlı olarak soğuma hızının değişimi .....	66
Şekil 3.23. CuSn10 bronz alaşımı tozlarında hücre boyutuna bağlı olarak soğuma hızının değişimi. ....	67
Şekil 3.24. Üretilen CuSn10 bronz alaşımı şeritlerinin fotoğraf görüntüleri .....	69
Şekil 3.25. Üretilen şeritlerin stereo mikroskobu görüntüleri. a) diskle ile temas eden yüzey b) hava ile temas eden yüzey. ....	70
Şekil 3.26. Disk hızının ve nozul çapının, a) şerit kalınlığına, b) şerit verimine etkisi (DKS: 2, DYD: kaplanmamış, AIM: 300 °C) .....	71
Şekil 3.27. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 15 $\mu\text{m}$ ), b) büyük büyütmedeki mikroyapı.....	72
Şekil 3.28. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 30 $\mu\text{m}$ ), b) büyük büyütmedeki mikroyapı.....	73
Şekil 3.29. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 40 $\mu\text{m}$ ), b) büyük büyütmedeki mikroyapı.....	74
Şekil 3.30. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 60 $\mu\text{m}$ ), b) büyük büyütmedeki mikroyapı.....	75
Şekil 3.31. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 75 $\mu\text{m}$ ), b) büyük büyütmedeki mikroyapı.....	76
Şekil 3.32. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 95 $\mu\text{m}$ ), b) büyük büyütmedeki mikroyapı.....	77
Şekil 3.33. CuSn10 bronz alaşımı şeritlerinde şerit kalınlığına bağlı olarak hücre boyutunun değişimi .....	78
Şekil 3.34. CuSn10 bronz alaşımı şeritlerinde hücre boyutuna bağlı olarak soğuma hızının değişimi .....	79

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 2.1. Bronz alaşımı kimyasal kompozisyonu (Ağ. %) .....	27
Tablo 2.2. Paslanmaz çelik alaşımı kimyasal kompozisyonu (Ağ. %) .....	27
Tablo 2.3. Bronz ve paslanmaz çelik alaşımlarının bazı fiziksel özellikleri .....	27
Tablo 2.4. Atomizasyon parametreleri .....	35
Tablo 3.1. CuSn10 bronz alaşımı tozlarında toz boyutuna bağlı olarak hücre boyutunun ve soğuma hızının değişimi .....	65
Tablo 3.2. CuSn10 bronz alaşımı şeritlerinde toz boyutuna bağlı olarak hücre boyutu ve soğuma hızının değişimi.....	78

## SEMBOLLER DİZİNİ

TM	: Toz metalurjisi
HKT	: Hızlı katılaştırma teknolojisi
İDKA	: İkincil dendrit kol aralığı
DH	: Disk hızı
DKS	: Disk kanatçık sayısı
AIM	: Aşırı ısıtma miktarı
NÇ	: Nozul çapı (sıvı alaşım akış debisi)
DYD	: Disk yüzey durumu
$V_r$	: Damlacık radyal hızı
Q	: Sıvı metal akış debisi
R	: Disk yarıçapı
h	: Disk yüzeyinde kayan sıvı metal tabakasının kalınlığı
V	: Damlacık hızı
$V_t$	: Damlacık teğetsel hızı
$V_x$	: Damlacık yatay hızı
$V_s$	: Kayma hızı
Fc	: Santrifüj kuvvet
m	: Sıvı metal kütlesi
w	: Diskin açısal hızı
R	: Disk yarıçapı
W	: Harcanan güç
$\rho$	: Sıvı metal yoğunluğu
v	: Disk çevresel hızı
$\sigma_r$	: Radyal gerilme
$\sigma_\theta$	: Teğetsel gerilme
$T_{sph}$	: Damlacık küreselleşme süresi
$r_1$	: Küreselleşmeden sonraki toz yarıçapı
$r_2$	: Küreselleşmeden önceki damlacık yarıçapı
$\mu$	: Sıvı metal viskozitesi
$\sigma$	: Sıvı metal yüzey gerilimi

$V_p$	: Toz hacmi
$T_{sol}$	: Damlacık katılaşma süresi
$d$	: Toz çapı
$h_c$	: Isı iletim katsayısı
$(C_p)_m$	: Metal ısı kapasitesi
$T_i$	: Toz ilk sıcaklığı
$T_g$	: Gaz sıcaklığı
$T_m$	: Sıvı metal ergime sıcaklığı
$\Delta H_f$	: Ergime gizli ısısı
$d_m, d_{50}$	: Ortalama toz boyutu
$d_{10}$	: %10 kümülatif yüzdeye karşılık gelen toz boyutu
$d_{90}$	: %90 kümülatif yüzdeye karşılık gelen toz boyutu
$n$	: Disk dönme hızı
$D$	: Disk çapı
$\theta$	: Çanak disk açısı
$\varepsilon$	: Soğuma hızı
$z$	: Parçacık kesit kalınlığı
$r$	: Çekirdek yarıçapı
$\Delta T$	: Aşırı soğuma miktarı
$\lambda$	: İkincil dendrit kollar arası mesafe veya hücre boyutu

## 1.GENEL BİLGİLER

### 1.1.Giriş

Toz metalurjisi (TM), metalurjinin metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesiyle yapılan ürünlerin imalatı ile ilgili bölümüdür. TM üretim yöntemi ile farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal ve alaşım tozları sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülür. Bu işlem tozların karıştırılması, oda sıcaklığında veya belirli bir sıcaklıkta hassas kalıplarda preslenerek şekillendirilmesi, toz tanecikleri arasındaki metalurjik bağların oluşturulabilmesi için belirli sıcaklıklarda koruyucu bir atmosferde sinterlenmesi ve sinterleme sonrası çeşitli işlemleri (infiltrasyon, yağ emdirme, çapak alma vb.) içerir [1-3].

Sunduğu çeşitlilik açısından en kapsamlı şekillendirme ve üretim süreçlerine sahip olan TM teknolojisi ile genellikle karmaşık şekilli ve diğer üretim teknikleri ile üretimi mümkün olmayan mukavemet, aşınma ve korozyona karşı dayanımı yüksek parçalar, minimum toleransla ve diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha avantajlı bir şekilde imal edilebilir. TM ile üretilen parçaların içeriğinin kontrol edilebilir olması, homojen mikroyapı dağılımı ve birim maliyetinin düşük kalması gibi faktörler nedeni ile TM üretim tekniği verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırarak giderek döküm, kaynak, talaşlı imalat ve plastik şekil verme gibi geleneksel üretim yöntemlerinin yerini almaktadır. Bu avantajlarının yanında TM ile üretilmiş parçaların düşük mekanik özelliklere sahip olması, parça tasarımlarının sınırlı olması, parça kesiti boyunca özelliklerin değişim göstermesi, kullanılan teçhizatın maliyetinin nispeten yüksek olması bu yöntemin olumsuz taraflarını oluşturmaktadır [3, 4].

Günümüz imalat sektöründe TM'nin uygulama alanları oldukça geniştir. TM ürünlerinin yaklaşık %70'i otomotiv endüstrisinde, %10'u iş makinelerinde, %5'i tarım aletlerinde ve %15'i güncel aletlerde kullanılmaktadır [5]. Tungsten lamba filamentleri, kendinden yağlamalı yataklar, otomotiv güç aktarma dişlileri, fren diskleri, balatalar, biyel kolları, elektrik kontakları, nükleer güç yakıt elemanları, mıknatıslar, iş makinesi parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları, akü elemanları ve jet motor parçaları TM uygulamalarına örnek olarak verilebilir. Bunlara ek olarak takım çeliklerinin, sermetlerin (seramik+metal), sert metallerin, sürünme elemanlarının ve kesici uçların üretimleri de diğer TM uygulamaları olarak sayılabilir [6-8].

TM ürünlerinin ana hammaddesi tozlardır. Toz boyutu ve morfolojisi (şekli) önemli toz karakteristikleridir. Toz boyutu uzunluk birimi olarak belirtilir. Çoğu metal ve alaşım tozları bir mikrondan birkaç yüz mikrona kadar değişen boyutlara sahiptir. Toz morfolojisi, üretim yöntemine bağlı olarak küresel, köşeli, yuvarlak, çubuksu, ligamental, yapraksı, göz yaşı damlası, pulsü, dendritik, düzensiz vb. şekilli olabilmektedir [9].

Temel olarak dört değişik toz üretim yöntemi vardır. Bunlar, bileşik formdaki malzemelerin indirgenmesi esasına dayalı kimyasal yöntemler, yine bileşik formdaki malzemenin ayrıştırılması esasına dayalı elektrolitik yöntemler, malzemenin katı fazda küçük parçacıklara ayrıştırılması esasına dayalı mekanik yöntemler ve ilgili malzemenin sıvı fazdan küçük parçacıklara ayrıştırılması esasına dayalı atomizasyon yöntemleridir. Dünyada üretilen tozların %80'den fazlası atomizasyon yöntemleri ile üretilmektedir [9].

Atomizasyon yöntemi sıvı metale enerji vererek küçük parçacıklara ayırıp toz haline getirme işlemidir. Alaşımı oluşturan tüm metaller ergimiş durumda tamamen alaşımlandığı için, alaşımların toz halinde üretilmesinde faydalı bir yöntem olup, hemen hemen aynı kimyasal bileşime sahip toz taneciklerinin elde edilmesini sağlar. Ergitilebilen her metal ve alaşıma uygulanabilir olduğundan diğer toz üretim yöntemlerinden daha üstündür. Üretim kapasitesinin yüksek oluşu atomizasyon yöntemini çekici kılan bir diğer faktördür [9-11]. Atomizasyon yöntemi üç aşamada gerçekleşir:

1. Ergitme
2. Atomizasyon (ergiyik metal damlalarını daha küçük boyutlara parçalamak)
3. Katılaşma ve soğuma [9, 12].

İlk aşamada metal veya alaşım uygun koşullarda likidüs sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa aşırı ısıtılarak ergitilir. İkinci aşamada sıvı metale enerji verilerek atomizasyon işlemi gerçekleşir. Üçüncü aşamada atomizasyon işlemi sonunda daha küçük boyutlara parçalanan sıvı metal damlaları yüzey enerjilerini minimize etmek için atomizasyon koşullarına bağlı olan geometriler (küresel, pulsü, düzensiz vb.) oluşturarak katılaşır ve soğur [12]. Atomizasyon yöntemlerinde sıvı metalin parçalanması çeşitli şekillerde yapılabilir. Yüksek basınçlı su veya gaz kullanılarak yapılan atomizasyon su veya gaz atomizasyonu olarak adlandırılır. Santrifüj kuvvet etkisiyle sıvı metalin parçalanması santrifüj atomizasyonu, sıvı metalin vakum ortamında parçalanması vakum atomizasyonu, parçalanma etkisi için ultrasonik enerji kullanılırsa ultrasonik atomizasyon olarak adlandırılır [13, 14].

Santrifüj atomizasyonu yöntemi, özellikle kolay oksitlenen reaktif metallerin tozlarının üretimi için tercih edilmektedir. Bu yöntem sıvı metalin santrifüj kuvvet etkisiyle parçalanıp küçük tanecikler halinde savrulurarak katılaşması esasına dayanır [15]. Savrulan sıvı tanecikler ya toz toplama odasında ya da su veya soğutulmuş asal gaz gibi ortamlarda katılırlar. Santrifüj etki ile toz üretimi için döner disk, döner elek, döner kap, döner tekerlek, döner elektrot, vb. yöntemler geliştirilmiştir [11]. Santrifüj atomizasyonu tek veya iki aşamalı olarak gerçekleştirilir. Tek aşamalı işlemde, döner bir elektrot, santrifüj kuvveti sağlayacak ilave bir elemana gerek kalmadan doğrudan ergitilip atomizasyon gerçekleşir. İki aşamalı işlemde ise malzeme sabit bir fırında ergitilip santrifüj kuvveti sağlayan döner disk, döner elek veya döner kap üzerine dökülerek atomize edilir [16].

Döner disk atomizasyonu yönteminde üretim parametrelerinin kontrolü ile tozların katılaşma hızlarının kontrol edilebilmesi, bu yöntemin hızlı katılaştırılmış metal veya alaşım tozu üretilmesi için kullanılmasına imkan vermiştir. Bu yöntemle doğrudan toz üretimi yapılabildiği gibi, hızlı katılaşmış şerit üretimi de yapılarak, bu şeritlerin öğütülmesiyle de toz üretimi yapılabilmektedir. Bu şekilde şeritlerden üretilen tozlarda soğuma hızı toz boyutuna bağlı olmamakta, daha homojen ve hızlı katılaştırılmış bir içyapı elde edilebilmektedir [11]. Diğer taraftan, döner disk atomizasyonu yöntemi literatürde bilinen hızlı katılaştırma yöntemleri arasında en etkin olarak sayılan ve  $10^6$  K/s'den daha yüksek soğuma hızı ile soğumaya olanak sağlayan "splat quenching (soğutulmuş alt yüzeye çarptırma ile soğutma)" grubuna girmektedir [17].

Döner disk atomizasyonu yöntemi ile Cu, Al, Sn, Fe, Pb, Zn, Mg ve Ni metalleri ile alaşımlarının hızlı katılaştırılmış tozları üretilebilmektedir. Cu-Sn alaşımı (kalay bronz) tozları yüksek mekanik zorlanmalara karşı koyabilme, aynı zamanda iyi kayma özelliği ve aşınma dayanımı ile birlikte korozyon dayanımını bir arada bulundurabilme gibi özelliklere sahip olması nedeniyle otomotiv ve makine sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Kendinden yağlamalı yataklar, filtreler, sürtünme malzemeleri, çeşitli otomobil parçaları ve yapısal parçaların üretimi bu tozların kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir. Son yıllarda kendinden yağlamalı gözenekli yatak malzemelerinin üretimi ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. İlk ve en yaygın olarak kullanılan yatak malzemesi üstün tribolojik özelliklerinden (sürtünme, aşınma, yağlama) dolayı tercih edilen CuSn10 bronz alaşımıdır [18-20].

TM ile parça üretiminde hammadde olarak bakır alaşımı tozlarının yanısıra atomizasyon yöntemi ile üretilmiş paslanmaz çelik tozları da yaygın olarak



kullanılmaktadır [4]. Mükemmel şekillendirilebilirliği, sünekliği ve yeterli korozyon dayanımı ve ekonomik olması nedeniyle AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik tozlarından yapılan TM parçalar otomotiv, yapı, kimya ve denizcilik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [21, 22]. Belirtilen bu nedenlerden dolayı bu çalışmada atomize edilecek alaşım türü olarak CuSn10 bronz ve AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik alaşımları tercih edilmiştir.

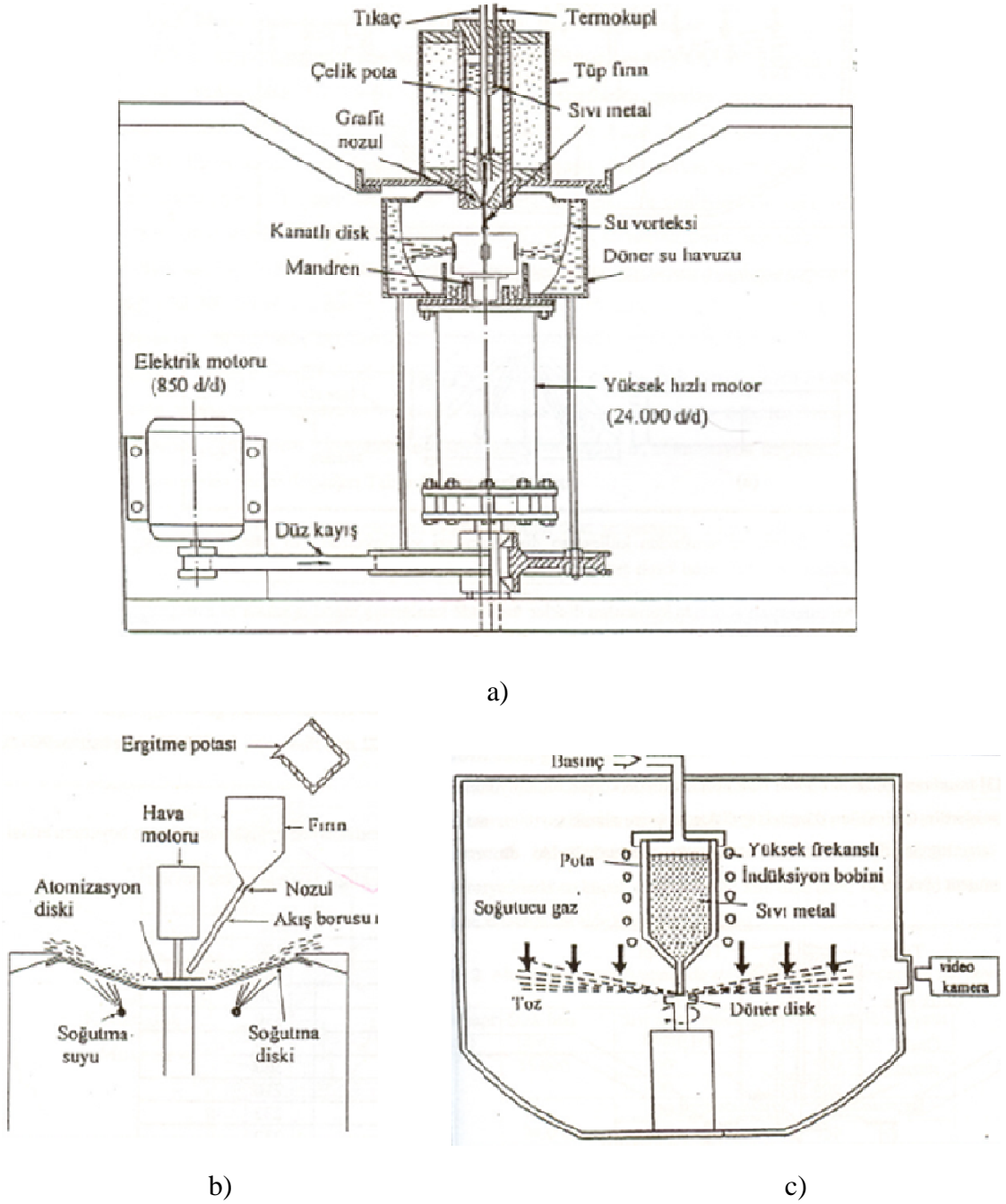
Bu çalışmada, su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu yöntemi ile soygaz atmosferi altında hızlı katılaştırılmış CuSn10 bronz ve AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik alaşım tozları üretilmiştir. Ayrıca atomizasyon parametrelerine bağlı olarak hızlı katılaştırılmış CuSn10 bronz alaşımı şerit üretimi de gerçekleştirilmiştir. Atomizasyon parametrelerinin üretilen tozların morfolojilerine, toz üretim verimine ve ortalama toz boyutuna etkileri araştırılmıştır. Diğer taraftan, üretilen toz ve şeritlerin mikroyapıları incelenerek, hücre boyutu veya ikincil dendrit kol aralıkları belirlenmiş ve buna bağlı olarak soğuma hızları hesaplanmıştır. Değişik disk hızı, disk kanatçık sayısı, disk yüzey pürüzlülüğü, sıvı alaşım türü, akış debisi ve aşırı ısıtma miktarlarında yapılan deneyler KTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde mevcut bulunan su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesinde gerçekleştirilmiştir.

## 1.2. Döner Disk Atomizasyonu

Döner disk atomizasyonu, ergitilerek sıvı hale getirilmiş metal veya alaşımın bir nozuldan, yüksek hızla dönmekte olan bir disk üzerine akıtılıp santrifüj (merkezkaç) kuvvet etkisiyle parçalanarak katılaşmasıyla toz üretme işlemidir [23-25]. Atomizasyon işlemi için kanatçıklı veya kanatçıksız düz, konik kanatçıklı veya çanak şekilli diskler kullanılabilir. Disk üzerine düşen sıvı metal damlacıkların katılaşması büyüklüklerine bağlı olarak disk üzerinde veya diskten savrulduktan sonra gerçekleşir [26]. Döner disk atomizasyonu yöntemi ile kontrollü atmosferde oksijen oranı düşük, çözünürlük sınırı artmış, daha homojen mikroyapıda ve yüksek verimde toz üretilebilir [11].

Döner disk atomizasyonu yönteminde diskten savrulan sıvı metal damlacıklarının katılaşmasını hızlandırmak veya ısının süratle uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla sıvı, katı ve gaz olmak üzere üç değişik soğutma ortamı kullanılır. Sıvı ortamda soğutma işleminde genellikle su kullanılır. Ancak, bu şekilde katılaşan tozların yüzeylerinde yüksek oranda oksitlenme olur [26, 27]. Sıvı metal damlacıklarını, soğutulan bir katı yüzeye

çarpıtılarak yapılan soğutmada katı – sıvı ara yüzeyinde ısı iletimi katsayısı yüksek olduğundan soğuma hızı da yüksek olur [28, 29]. Gaz ortamında soğutma işlemi ise genellikle soygaz kullanılır. Bu sayede metal ve alaşımların oksitlenmesi de önlenmiş olur. En çok kullanılan gazlar He, N ve Ar'dur. Bu gazlar arasında He en yüksek ısı iletimi katsayısına sahip olduğundan en hızlı soğumayı sağlar [30, 31]. Şekil 1.1'de bu üç değişik soğutma ortamı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Değişik soğutma ortamlı döner disk atomizasyonu üniteleri. a) sıvı, b) katı, c) gaz soğutma ortamı [26, 29, 31].

### 1.2.1. Atomizasyon Mekanizması

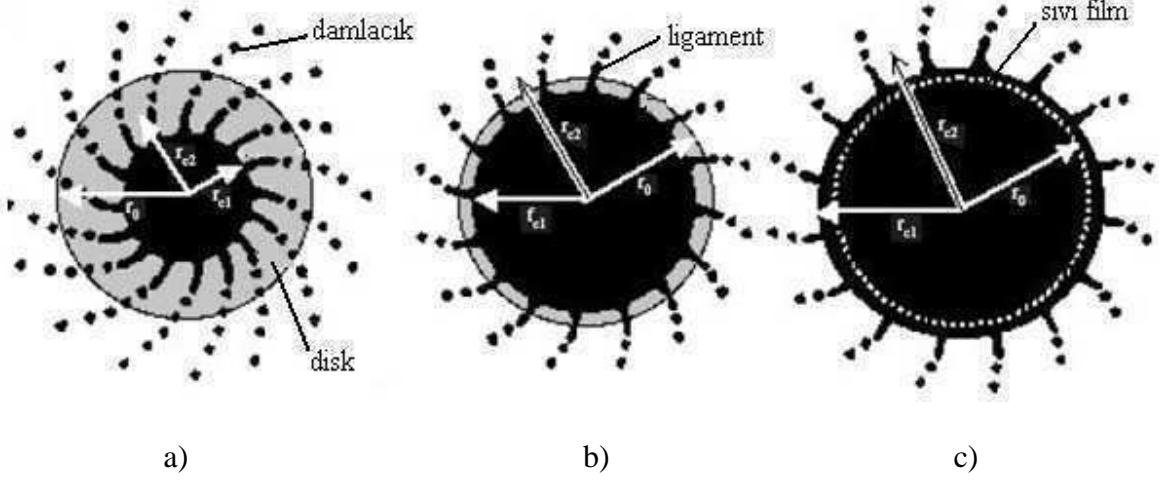
Düz diskle atomizasyonda sıvı metal, disk yüzeyinin merkezinden çevreye doğru gittikçe artan bir hızla hareket ederek diski terk eder. Bu hız artışından dolayı sıvı metal tabakası parabolik olarak incelir ve sonunda atomize olur [32]. Düz diskle atomizasyonu etkileyen faktörler şunlardır:

- a) Sıvı metalin viskozitesi ve yüzey gerilmesi,
- b) Sıvı metalin disk kenarındaki ataleti,
- c) Diski terk eden sıvı tanecikleri ile çevreleyen ortam arasındaki sürtünme,
- d) Sıvı damlacıkları içinde oluşan kayma gerilmelerinin tekrar ayarlanması,
- e) Sıvı metalin diski ıslatma durumu [27].

Yerçekimi ve santrifüj kuvvet dönen disk üzerinde oluşan sıvı metal filmini disk kenarından savurmaya; yüzey gerilmesi, viskozite ve sürtünmeden dolayı oluşan kuvvetler ise tutmaya çalışır. Santrifüj kuvvet, yüzey gerilmesi, viskozite ve sürtünmeden dolayı oluşan kuvvetlerin toplamını geçerse o noktada atomizasyon başlar. Sıvı metal, santrifüj kuvvetin daha baskın olması durumunda disk üzerinde film oluşturur, yüzey gerilimi kuvvetlerinin daha baskın olması durumunda ise disk kenarına ulaşmadan ligamentlere ve damlacıklara parçalanır. Düşük disk dönme hızlarında viskozite ve yüzey gerilmesi daha etkili oluken yüksek hızlarda atalet ve sürtünme daha etkilidir. Aynı disk dönme hızında daha düşük sıvı metal akış debisinde atomizasyon diskin kenarına daha yakın yerde oluşur [33, 34].

Kanatçıksız düz diskle atomizasyon sıvı metal akış debisine ve disk dönme hızına bağlı olarak üç farklı mekanizmadan biriyle gerçekleşir. Bunlar, direkt damlacık oluşumu (direct drop formation, DDF), ligament parçalanması (ligament disintegration, LD) ve sıvı film parçalanması (film disintegration, FD) ile atomizasyondur (Şekil 1.2). Uygulamada genellikle iki veya üç atomizasyon mekanizması birlikte gerçekleşebilir. Düşük sıvı metal akış debisinde veya yüksek disk dönme hızlarında, disk üzerinde ince bir film oluşarak atomizasyon diskin kenarından direkt damlacık oluşumu ile gerçekleşir (Şekil 1.2-a). Sıvı metal akış debisi arttıkça mekanizma, direkt damlacık oluşumundan ligament parçalanması ile atomizasyona dönüşür. Ligamentler disk kenarından yayılmaya başlar, sıvı metal akış debisi arttıkça boyları uzar ve ardından daha küçük damlacıklara ayrılırlar (Şekil 1.2-b). Sıvı film parçalanması ile atomizasyon, viskozitesi yüksek metaller için nispeten daha yüksek sıvı metal akış debilerinde gerçekleşir. Disk kenarında farklı ligamentler birleşir ve

önce bir sıvı filmi oluşturarak parçalanır (Şekil 1.2-c). Bu mekanizmaların oluşmasında disk hızı, sıvı metal akış debisinden daha etkilidir [34, 35-38].



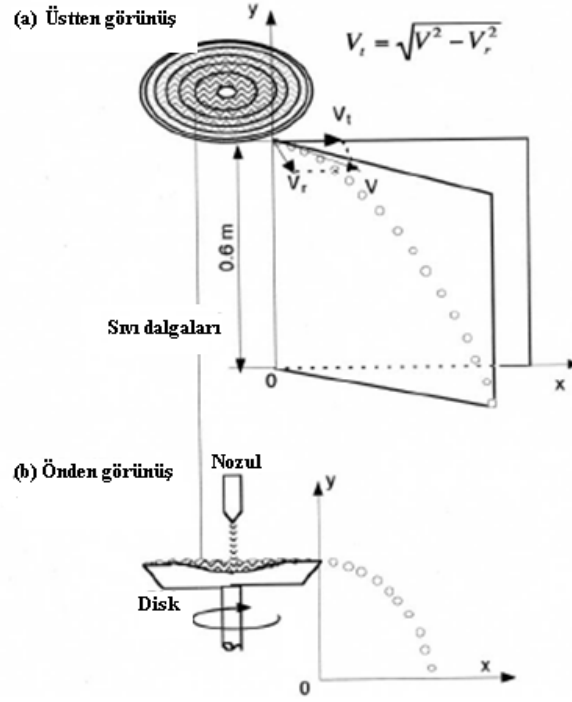
Şekil 1.2. Düz diskle atomizasyon mekanizmaları. a) direkt damlacık oluşumu, b) ligament parçalanması, c) sıvı film parçalanması [34].

Teunou ve Poncelet [24], atomizasyon diskinden savrulan damlacıkların yörüngesinin Şekil 1.3'de gösterildiği gibi parabol şeklinde olduğu ve artan mesafe (X) ile ortalama toz boyutunun da arttığını belirtmişlerdir. Diskten savrulan sıvı damlacığının hızının hesaplanmasında aşağıda verilen ampirik bağıntıları geliştirmişlerdir:

$$V_r = \frac{Q}{2\pi Rh} \quad (1)$$

$$V^2 = V_t^2 + V_r^2 \quad (2)$$

Bu eşitliklerde;  $V_r$ : damlacık radyal hızı (m/s),  $Q$ : sıvı metal akış debisi ( $m^3/s$ ),  $R$ : disk yarıçapı (m),  $h$ : disk yüzeyinde kayan sıvı metal tabakasının kalınlığı (m),  $V$ : damlacık hızı (m/s),  $V_t$  = damlacık teğetsel hızı (m/s).



Şekil 1.3. Atomizasyon diskinden ayrılan sıvı metal damalcıklarının yörüngesi [24].

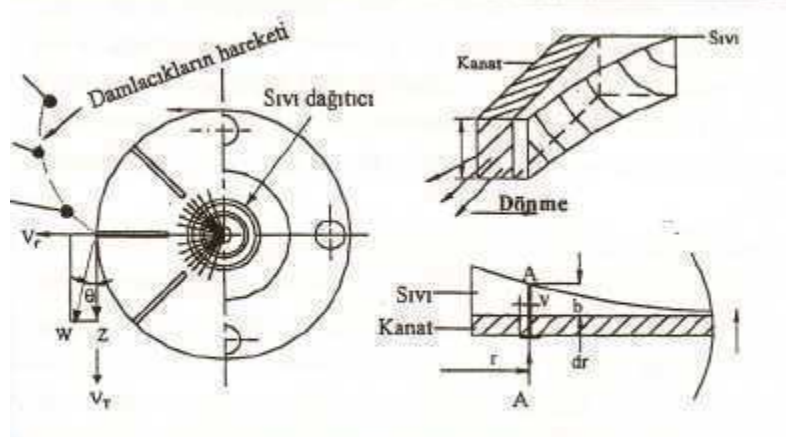
Yüksek hızda dönen düz ve pürüzsüz diskte hava sürtünmesine bağlı olarak sıvı metal ve disk yüzeyi arasında aşırı bir kayma oluşabilir ve disk kenarındaki sıvının hızı diskin çevresel hızından daha küçük olabilir. Kayma hızı disk çevresel hızının yaklaşık %10 'u kadardır. Bu durumda damlacıkların diskten ayrıldığı andaki yatay hızı aşağıdaki eşitlikten bulunur [24]:

$$V_x = V_t - V_s \quad (3)$$

Burada;  $V_x$ : damlacık yatay hızı (m/s),  $V_t$  = damlacık teğetsel hızı (m/s),  $V_s$ : kayma hızı (m/s).

Kanatçksız çanak diskle atomizasyon mekanizması düz diskle aynıdır. Ancak, diskin çanak şeklinde oluşu sıvı metalin kaymasını önleyerek daha iyi bir ıslatma sağlar. Merkezkaç kuvveti de metalin ince film oluşturmaya yardımcı olur. Çanak disk kenar açısının artmasıyla sıvı metal film kalınlığı ve dolayısıyla ortalama toz boyutu azalır. Bu tip disklerde atomizasyon ancak disk kenarında oluşabilir [39, 40].

Kanatçıklı düz diskle atomizasyonda sıvı metal kanatçıklar arasına girer. Kanatçiksız düz diskin tersine, kanatçıklı diskte radyal veya eğik kanatçıklar kaymayı önler ve sıvı metal, diskin maksimum çevre hızına ulaşmasıyla atomize olur. Sıvı metal üzerindeki radyal hız bileşeni teğetsel hız bileşenine göre çok küçüktür. Böylece, sıvı metal disk yüzeyini terk ederek kanatçığın üzerinde hareket eder ve atomize olur. Sıvı film tabakası hareket ettikçe kanatçığın ucuna doğru parabolik bir şekilde incelir [26, 27]. Şekil 1.4'de kanatçıklı düz diskle atomizasyon mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Kanatçıklı düz diskle atomizasyon mekanizması [27].

## 1.2.2. Döner Disk Atomizasyonunda Atomizasyon Değişkenleri

Döner disk atomizasyonunda, üretilen tozların özelliklerini belirleyen çok sayıda atomizasyon değişkeni vardır. Bunlar; disk malzemesi ve diskin yüzey durumu, disk geometrisi, disk hızı, disk çapı, sıvı metal sıcaklığı ve akış debisi, atomizasyon ve soğutma ortamları, metal veya alaşımın türü gibi değişkenlerdir. Bu değişkenler, tozun görünür yoğunluk, akıcılık, sıkıştırılabilirlik, sinterlenebilirlik gibi özelliklerine etki eden şekli, boyutunu, boyut dağılımını ve iç yapısını belirler [24, 25, 38, 41]. Bu değişkenlerin etkileri aşağıda açıklanmıştır.

### 1.2.2.1. Disk Malzemesi ve Yüzey Durumu

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

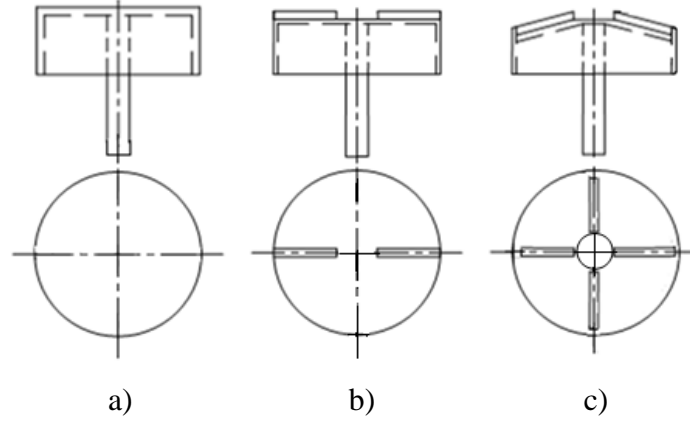
1. Yüksek sıcaklığa ve termal şoka dayanıklı olmalı,

2. Sıvı metal tarafından iyi ıslatılmalı,
3. Yüksek dönme hızına dayanabilecek mukavemete sahip olmalı,
4. Hafif olmalı,
5. Hızlı katılaştırma durumunda ısıl iletkenliği yüksek malzemedен olmalı [31].

Döner disk atomizasyonunda diskten sıvı metale enerji aktarımı için disk ile sıvı metal arasında belirli bir sürtünmenin olması gerekir. Bunun olabilmesi için, sıvı metalin disk ıslatma kabiliyetinin iyi olması gerekir. Islatmanın yeterli olmaması durumunda sıvı metal disk üzerinde kayar ve diskin kenarındaki sıvı metal hızı diskin çevresel hızından çok daha düşük olur. Dolayısıyla, diskten sıvı metale enerji transferi tam olarak gerçekleşmez; yani diskin dönmesinin bir önemi kalmaz [11, 24, 26, 27]. Islatma kabiliyeti sıvı metal, disk ve atomizasyon ortamı arasındaki ara yüzey gerilmelerinin yanı sıra disk sıcaklığı ve disk yüzey pürüzlülüğünden etkilenir [34,42]. Islatma kabiliyetinin artırılması için disk yüzeyleri kaplanabilir. Atomizasyon çalışmalarında genellikle bakır ve paslanmaz çelikten imal edilmiş, grafit, molibden ve seramik kaplı diskler kullanılmaktadır. Ancak, ısı iletim katsayısının yüksek olması dolayısıyla en başarılı atomizasyon bakır diskle yapılmaktadır [31].

#### **1.2.2.2. Disk Geometrisi**

Döner disk atomizasyonunda en etkili faktörlerin başında disk geometrisi gelir. Değişik geometriye sahip diskler kullanılarak atomizasyon yapılabilmektedir. Kanatçıklı veya kanatçıksız düz, konik kanatçıklı veya çanak şekilli diskler en çok kullanılanlarıdır [24, 26]. Şekil 1.5’de bazı disk geometrileri gösterilmektedir. Kanatçıklı disk kullanılması durumunda sıvı metal kanatçık yüzeyinde sınırlanır, böylece sıvı metalin disk üzerinde kayması önlenerek disk kenarından maksimum hızla savrulur atomize olması sağlanır [24, 36]. Kanatçıkların profili ve sayısı değişik olabilir. Çanak şekilli disklerde santrifüj kuvvet, sıvı metal filmini diskin duvarına doğru baskı yapıp yönlendirdiği için düz disklerle kıyaslandığında sıvı metalin disk üzerindeki yayılması artar [43]. Islatma kabiliyeti iyileştiğinden sıvı metal disk kenarında maksimum hıza ulaşabilir [36].



Şekil 1.5. Disk geometrileri a) düz, b) konik kanatçıklı, c) kanatçıklı [44].

### 1.2.2.3. Disk Hızı

Atomizasyonda etkili olan önemli parametrelerden bir diğeri de disk hızıdır [27]. Disk dönme hızının artmasıyla sıvı metale aktarılacak olan santrifüj kuvvet de artar. Diskin dönmesiyle oluşan santrifüj kuvvet aşağıdaki şekilde yazılabilir [45]:

$$F_c = mw^2R \quad (4)$$

Burada;  $F_c$ : santrifüj kuvvet ( $kg \cdot m/s^2$ ),  $m$ : sıvı metal kütlesi (kg),  $w$ : diskin açısal hızı (rad/s),  $R$ : disk yarıçapı (m)'dir.

Döner disk atomizasyonunda disk hızı genellikle 5.000 – 50.000 d/d arasındadır. Disk dönme hızı arttıkça sıvı metale iletilen enerji artacağından, ortalama toz boyutu küçülür. Diğer taraftan, diskin hızı arttıkça diskle ilgili balans problemleri meydana gelmektedir. Balansı bozuk bir diskle yapılan atomizasyonda aşırı derecede gürültü oluşmakta, diskte aşırı titreşim olmakta ve diski döndüren motor kısa sürede devre dışı kalmaktadır. Disk imalatında bu durum göz önünde bulundurulmalıdır [38, 43].

### 1.2.2.4. Disk Çapı

Disk çapı atomizasyonda etkili bir parametre olup genellikle 50-400 mm arasında değişmektedir. Disk çapının belirlenmesinde etkili olan faktörlerin başında kullanılan motorun gücü, atomizör boyutları ve disk malzemesi gelmektedir. Laboratuvar ölçeğinde



yapılan atomizasyonlarda nispeten küçük çaplı diskler kullanılırken, endüstriyel ölçekteki üretimlerde disk çapı artmaktadır.

Döner disk atomizasyonunda diske verilen enerji, sıvı metali disk kenarından yüksek hızla savurmak için harcanır. Burada harcanan güç:

$$W = \frac{1}{2} \rho Q v^2 \quad (5)$$

eşitliğinden hesaplanır. Bu eşitlikte; W: harcanan güç,  $\rho$ : sıvı metal yoğunluğu, v: disk çevresel hızı, Q: sıvı metal akış debisi'dir.

Disk kenarından savrulan damlacıkların hızı diskin çevresel hızına eşit kabul edilirse, oluşabilecek en yüksek sıvı metal hızı:

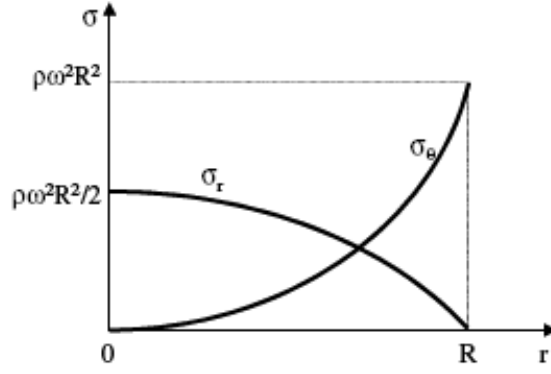
$$v = wR \quad (6)$$

eşitliğinden bulunur. Burada; v: sıvı metal hızı, w: disk açısal hızı, R: disk yarıçapı'dır.

Yukarıda verilen (5) ve (6) nolu eşitliklerden atomizasyon diski yarıçapı aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$R_{\max} = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{2W}{\rho Q}} \quad (7)$$

Disk çapının belirlenmesinde etkili olan bir diğer faktör de disk malzemesidir. Yüksek disk dönme hızlarında santrifüj kuvvete bağlı olarak disk hem radyal hem de teğetsel (çevresel) yönde yüksek gerilmelere maruz kalır. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi, radyal uzunluk boyunca radyal gerilme azalırken ( $\sigma_r$ ) teğetsel gerilme ( $\sigma_\theta$ ) artar [43].



Şekil 1.6. Atomizasyon diskinin maruz kaldığı radyal ( $\sigma_r$ ) ve teğetsel gerilmelerin ( $\sigma_\theta$ ) değişimi [43].

### 1.2.2.5. Aşırı Isıtma Miktarı

Saf metalin ergime sıcaklığının, alaşımın ise likidüs sıcaklığının üzerinde ısıtılmasına aşırı ısıtma denir. Aşırı ısıtma miktarının artması vizkoziteyi ve yüzey gerilimini düşürür. Yüzey geriliminin düşmesi sıvı metal ile disk arasındaki ıslatma açısını azaltır, daha ince bir sıvı film tabakası oluşur ve atomizasyon kolaylaşır. Bu durum ortalama toz boyutunun azalmasına yol açar. Ancak, çok yüksek aşırı ısıtma değerlerinde soğuma yavaşlayacağından, sıvı metal damlacıkları katılaştırmadan önce birbirine ve atomizörün duvarlarına çarparak, ortalama toz boyutu artabilir. Ayrıca, sıvı metal sıcaklığı arttıkça difüzyon hızlanacağından tozların oksitlenmesi de artar [25, 26, 46].

### 1.2.2.6. Sıvı Metal Debisi

Sıvı metal debisi arttıkça disk üzerinde oluşan film tabakası kalınlaşacağından ve verilen enerji daha fazla sıvı metal tarafından paylaşılacağından ortalama toz boyutu artar [25, 27]. Atomizasyon başlangıcında ve potanın dolu olduğu durumda sıvı metal akış hızı maksimum olur ve atomizasyon süresince giderek azalan bir seyir izler. Bunun sonucu olarak başlangıçta üretilen tozlar nispeten büyük boyutlu olur ve potadaki sıvı metal miktarı azaldıkça ortalama toz boyutu azalır [11].

### 1.2.2.7. Metal veya Alaşımın Türü

Döner disk atomizasyonunda etkili olan diğer bir değişken metal veya alaşım türüdür. Metal veya alaşım türüne göre öne çıkan değişkenler sıvı metalin yüzey gerilimi, yoğunluğu ve viskozitesidir [47-49]. Sıvı metal yoğunluğu sıcaklıkla pek değişmezken yüzey gerilimi ve viskozite sıcaklığın azalmasıyla artar [48]. Bazı araştırmacılar disk üzerine çarpma sırasında sıvı metalin viskozitesinin yükselmemesi için diski atomizasyon öncesi 300-500 °C aralığında ön ısıtmaya tabi tutmuşlardır [24, 26, 34, 36, 50, 51]. Ancak, diskin ön ısıtılması durumunda diske yapışan metal miktarı artmakta, bu da atomizasyonun verimini ve sürekliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum, ayrıca, elde edilen tozların soğuma hızlarını da düşürmektedir.

Sıvı metal diskten savrulduktan sonra, savrulan damlacığın diskten olan mesafesi arttıkça ve damlacık üzerindeki santrifüj kuvvet etkisi artan mesafe ile azaldıkça, yüzey gerilme kuvvetleri düzensiz formdaki sıvı damlacığını küreselleşmeye zorlar. Damlacık diski terk ettikten sonra santrifüj kuvvet etkisi ortadan kalkar ve yüzey gerilme kuvvetleri etkili olur. Bu etki, damlacığın viskozitesinin çok yükseleceği bir sıcaklığa soğuyuncaya kadar devam eder. Bu kritik sıcaklık noktasında yüzey gerilmesi ve viskoziteyi etkileyen damlacık sıcaklığı, soğuma hızı, damlacık boyutu ve atomizasyon odasındaki diğer kimyasal reaksiyonlar kritik öneme sahiptir. Eğer, damlacığın küreselleşme süresi ( $T_{sph}$ ) katılaşma süresinden ( $T_{sol}$ ) kısa ise, damlacık küreselleşme eğilimindedir. Diğer taraftan, küreselleşme süresi katılaşma süresinden daha uzun ise, damlacık düzensiz şekilli olarak katılaşır. Bu açıklamalar ışığında, damlacığın küreselleşme ve katılaşma sürelerini veren bağıntılar aşağıda gösterilmiştir [13]:

$$T_{sph} = \frac{3\pi^2\mu}{4V_p\sigma} (r_1^4 - r_2^4) \quad (8)$$

Burada;  $T_{sph}$  : damlacık küreselleşme süresi,  $r_1$ : küreselleşmeden sonraki toz yarıçapı,  $r_2$ : küreselleşmeden önceki damlacık yarıçapı,  $\mu$ : sıvı metal viskozitesi,  $\sigma$ : sıvı metal yüzey gerilimi,  $V_p$ : toz hacmi

$$T_{sol} = \frac{d\rho}{6h_c} (C_p)_m \ln \frac{T_i - T_g}{T_m - T_g} + \frac{\Delta H_f}{T_m - T_g} \quad (9)$$

Burada;  $T_{sol}$ : damlacık katılma süresi,  $d$ : toz çapı,  $\rho$ : sıvı metal yoğunluğu,  $h_c$ : ısı iletim katsayısı,  $(C_p)_m$ : metal ısı kapasitesi,  $T_i$ : toz ilk sıcaklığı,  $T_g$ : gaz sıcaklığı,  $T_m$ : metal ergime sıcaklığı,  $\Delta H_f$ : ergime gizli ısısı.

Yukarıda verilen bağıntılar toz şekline etki eden parametrelerin etkilerini tahmin etmede yardımcı olmaktadır. Örneğin, su atomizasyonunda toz şeklinin, küreselden ziyade geniş bir aralıkta değişken şekilde olması  $T_{sol}/T_{sph}$  oranının işlem parametrelerine bağlı olarak  $\gg 1$  ile  $< 1$  arasında olmasına bağlanmıştır. Demir ve bakır metalleri tozlarında  $T_{sol}/T_{sph}$  oranı  $\gg 1$  olurken, alüminyum ve çinkoda bu oran daha düşük düzeyde, 10-15 arasında olmaktadır. Ergime noktası nispeten düşük olan kurşun ve kalay metallerinde ise bu oran yaklaşık 0,1 değerindedir. Verilen bu değerler göz önünde bulundurulduğunda; demir ve bakır tozları küresel şekilli olarak katılma eğilimi gösterirken, kurşun ve kalay tozları ise düzensiz şekilli olarak katılmaktadır [13]. Göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus ise atomizasyon odası atmosferi bileşimidir. Hava ile yapılan atomizasyonda, toz yüzeyinde oluşan oksitlenme sebebiyle yüzey gerilmesinde meydana gelecek düşüş, küreselleşme için gerekli zamanı arttırır ve küreselleşmenin katılmadan önce tamamlanamaması nedeniyle karmaşık şekilli tozlar üretilir. Buna karşın, yüksek saflıkta soygaz atmosferi bulunan atomizasyon odasında tozlar daha çok küresel şekilli olarak katılırlar [52-54].

### 1.2.3. Döner Disk Atomizasyonunda Ortalama Toz Boyutunun Hesaplanması

Değişik araştırmacılar ortalama toz boyutu ile atomizasyon değişkenleri arasındaki ilişkileri veren ampirik formüller geliştirmişlerdir. Bu formüllerin genel geçerliliği olmamakla birlikte toz boyutunu etkileyen değişkenleri vermesi bakımından önemlidir. Schmitt [55] santrifüj atomizasyonunda ortalama toz boyutunu veren aşağıdaki formülü önermiştir.

$$d_m = \frac{1}{2\pi n} \sqrt{\frac{6\sigma}{\rho R}} \quad (10)$$

Labrecque vd [56] ise sıvı metal akış debisini de içeren aşağıdaki formülü vermiştir:

$$d_m = 4,27 \times 10^6 \frac{1}{w^{0,95}} \frac{1}{D^{0,61}} \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^{0,42} Q^{0,12} \quad (11)$$

Liu [57], direkt damlacık oluşumu, ligament parçalanması ve sıvı film parçalanması ile atomizasyon mekanizmaları için ortalama toz boyutunu sırasıyla aşağıdaki formüllerde vermiştir:

$$d_m = \left[ \frac{3Q\mu}{2\pi\rho(\pi Dw)^2 \sin\theta} \right]^{1/3} \quad (12)$$

$$d_m = \left[ 0,77 \frac{Q}{wD} \left( \frac{\rho w^2 D^3}{\sigma} \right)^{-5/12} \left( \frac{\rho \sigma D}{\mu^2} \right)^{-1/16} \right]^{0,5} \quad (13)$$

$$d_m = 4,42 \left( \frac{\sigma}{w^2} \rho D \right)^{0,5} \quad (14)$$

Bu eşitliklerde;  $d_m$ : ortalama toz boyutu ( $\mu\text{m}$ ),  $n$ : disk dönme hızı (d/s),  $R$ : disk yarıçapı (mm),  $\sigma$ : sıvı metal yüzey gerilimi (N/m),  $\rho$ : sıvı metal yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $w$ : diskin açılmal hızı (rad/s),  $D$ : disk çapı (m),  $Q$ : sıvı metal akış debisi ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\mu$ : sıvı metal viskozitesi,  $\theta$ : çanak disk açısı.

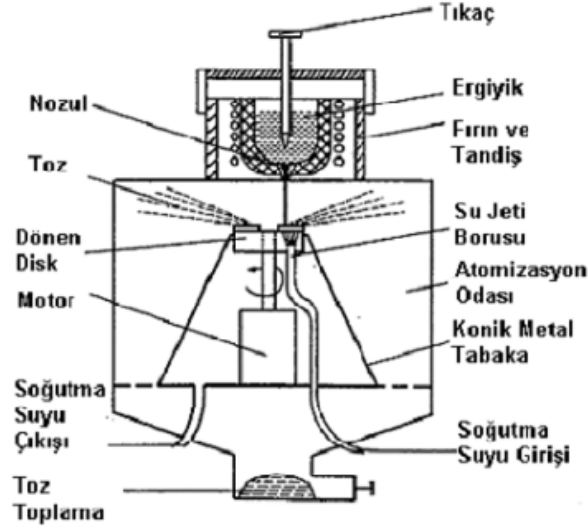
Bu eşitliklerden de anlaşılacağı gibi ortalama toz boyutu disk dönme hızı, disk çapı ve sıvı metal yoğunluğunun artması ise azalırken, yüzey gerilimi ve sıvı metal debisinin artması ile artmaktadır.

#### 1.2.4. Döner Disk Atomizasyonu İlgili Yapılan Çalışmalar

Döner disk atomizasyonu, diğer yöntemlerle kıyaslandığında dar parçacık boyut dağılımı, küresel parçacık oluşumu ve düşük üretim maliyeti gibi avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, gaz atomizasyonunun düşük oranda oksitlenme gibi avantajından dolayı

son yıllarda yapılan çalışmalarda gaz atomizasyonu ile döner disk atomizasyonunun birlikte uygulandığı hibrid atomizasyonu çalışmaları dikkat çekmektedir.

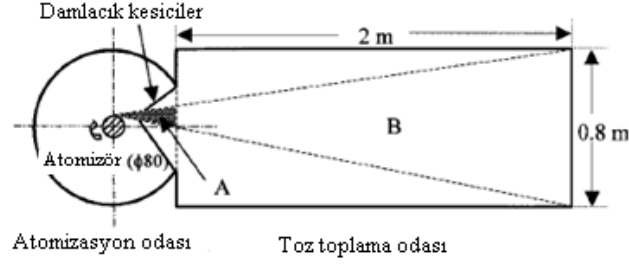
Öztürk vd [23, 40, 44, 58, 59] tarafından, Şekil 1.7’de gösterilen su soğutmalı döner disk atomizasyonu yöntemiyle ilgili yapılan çalışmalarda esas itibariyle kalay metali atomize edilmiş olup, disk şekli ve dönme hızı, kanatçık tipi ve sayısı, sıvı metal aşırı ısıtma miktarı ve akış debisi gibi atomizasyon parametrelerinin toz morfolojisine, ortalama toz boyutuna, toz boyut dağılımına ve toz üretim verimine etkileri incelenmiştir. Metal ve alaşım türünün etkisinin belirlenmesi için alüminyum, kurşun ve çinko metalleri atomize edilmiştir. Diğer taraftan, disk malzemesinin, disk soğutma suyu sıcaklığının ve aşırı ısıtma miktarının mikroyapıya etkilerini incelemek amacıyla AA2014 alaşımı atomize edilmiştir. Deneylerde 60 mm çapında elektrolitik bakır ve paslanmaz çelik malzemedan kanatçiksız düz, 2, 4, 6 kanatçıklı, ve konik diskler kullanılmıştır. Disk hızı 16.000-24.000 d/d arasında seçilmiş olup kanatçık profili eşkenar üçgen, ters üçgen ve dikdörtgen olarak seçilmiştir.



Şekil 1.7. Öztürk vd tarafından geliştirilen su soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesi [23].

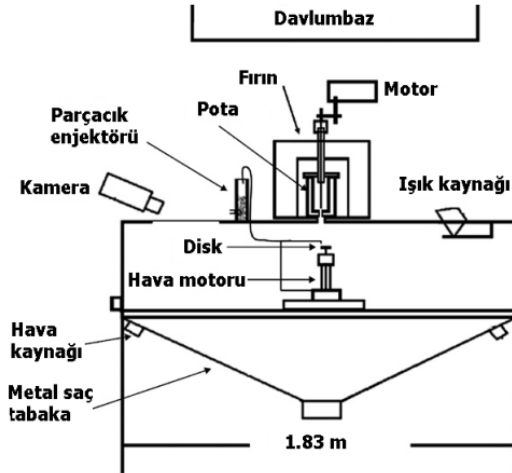
Xie vd [36], döner disk atomizasyonunda atomizör şeklinin ve işlem parametrelerinin üretilen tozların boyut dağılımına ve morfolojilerine etkilerini incelemiştir (Şekil 1.8). Geliştirilen düzenekte, potada ergitilen alaşım, serbest düşme ile 80 mm çapında sade karbonlu çelikten yapılmış disk üzerine yönlendirilmiştir. Diskin maksimum dönme hızı 18.000 d/d olup, atomizasyon odasında soy gaz kullanılmamıştır. Büyük boyutlu atomizasyon odası tasarımından kaçınmak amacıyla diskte atomize olan tozlar iki adet damlacık yönlendirici ile uzun, silindirik şeklindeki atomizasyon odasına yönlendirilmiştir.

Böylece tozların kısa mesafede atomizör duvarına çarparak büyük boyutlu olarak katılaşmalarının önüne geçilmiştir. Üretilen ince tozlar ( $<10 \mu\text{m}$ ) küresel şekilli olurken, parçacık boyutunun artmasıyla kısa çubuk, iğnemsî ve düzensiz şekilli tozlar elde edilmiştir. Azalan disk hızı ve artan sıvı metal akış debisi ile ortalama boyutu yüksek tozlar üretilmiştir.



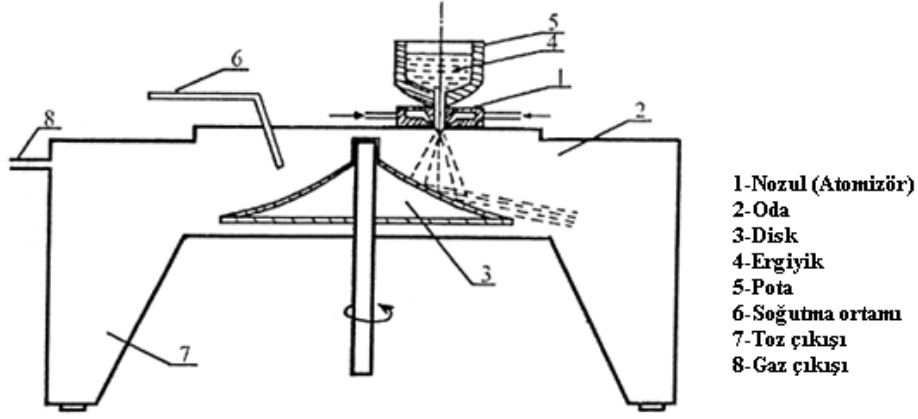
Şekil 1.8. Xie vd tarafından geliştirilen santrifüj atomizörü [36].

Eslamian vd [50] şematik şekli Şekil 1.9'da verilen döner disk atomizasyonu düzeneği ile 6061 alüminyum alaşımı ve kompozit tozları üretmişlerdir. Atomizasyon için 24.000 d/d dönme hızına sahip 76 mm çapında, 2,5 mm et kalınlığında çelik bir disk kullanılmıştır. Bir potada ergitilen sıvı metal kararlı bir akış sağlanması amacıyla yüksek basınçlı argon gazı yardımıyla disk üzerine gönderilmiştir. Deney öncesi atomizasyon diski ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Ayrıca metal matris kompozit tozları üretmek için matris malzemesi olarak kullanılacak alaşıma atomizasyondan önce silisyum karbid parçacıkları enjekte edilmiştir.



Şekil 1.9. Eslamian vd tarafından geliştirilen döner disk atomizörü [50].

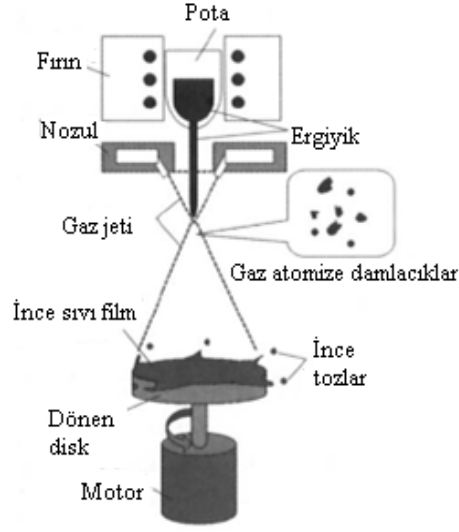
Fuqian vd [41] tarafından geliştirilen hibrid atomizasyonu yönteminde induksiyon fırınında ergiyik hale getirilen metal, pota çıkışında, önce yüksek basınçlı soy gaz ile küçük damlacıklara parçalanmış, daha sonra maksimum 7.000 d/d hız ile dönen konik şekilli bakır diske çarparak katılaşmasını tamamlamıştır. Soy gaz, aynı zamanda tozların soğumasına da katkı yaptığından ince damlacıklar diske ulaşmadan katılaşmış, sıvı durumda olan nispeten daha büyük boyutlu damlacıklar ise 7.000 d/d hız ile dönen konik şekilli bakır diske çarptıktan sonra ikincil parçalanma ile parçalanarak katılaşmıştır (Şekil 1.10). Atomizasyon odasının soy gaz ile doldurulduğu bu yöntemde 5-15  $\mu\text{m}$  boyut aralığında, küresel veya küresele yakın şekilli tozlar üretilmiş olup, elde edilen tozların soğuma hızının  $10^5$ - $10^7$  K/s aralığında gerçekleştiği belirtilmiştir.



Şekil 1.10. Fuqian vd tarafından geliştirilen atomizör [41].

Zhong vd [39], düşük basınçlı gaz atomizasyonu ile döner disk atomizasyonunun birleşimi olan hibrid atomizasyon yöntemini kullanmışlardır (Şekil 1.11). Bu yöntemde bir pota içerisinde, argon gazı atmosferi altında ergiyik hale getirilen metal veya alaşım potanın dip kısmında bulunan nozuldaki geçerek önce düşük basınçlı soy gaz atomizasyonu ile kaba sıvı damlacıklara parçalandıktan sonra alt kısımda bulunan döner disk üzerine yönlendirilmektedir. Döner diskte atomize olan damlacıklar daha ince parçacıklar halinde katılaşmaktadır.





Şekil 1.11. Zhong vd tarafından geliştirilen hibrid atomizör [39].

### 1.3. Hızlı Katılaştırma

Geleneksel döküm yöntemleriyle elde edilemeyen faz ve mikroyapıları oluşturmak amacıyla sıvı metalin  $10^2$  K/s' den daha büyük hızla soğutulması işlemi hızlı katılaştırma olarak tanımlanabilir [60]. Hızlı katılaştırmanın temel prensibi, malzemenin ergiyik haline geldikten sonra, ani olarak, yüksek termal iletkenliğe sahip soğuk bir alt yüzeye düşürülerek, ergiyikten hızla ısı transfer edilmesi ile katılaşma süresinin mümkün oldukça az olmasını sağlamaktır [61, 62].

Hızlı katılaştırma teknolojisi (HKT) yeni gelişmekte olan bir üretim yöntemi olup bu teknoloji ile birlikte alaşım dizaynı, bileşim ve mikroyapı alanında yeni bir çığır açılmıştır. Bu yöntemle üretilen ürünlerin sahip oldukları üstünlükler şunlardır [63]:

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

Hızlı katılaştırma işleminde soğuma hızı genellikle  $10^3$ – $10^6$  K/s arasında olmakla beraber özel şartlar altında  $10^9$  K/s gibi yüksek soğuma hızına ulaşılabilmektedir [60]. Eşitlik (15)'de katılaşma süresince soğuma hızının ( $\epsilon$ ) üretilen parçacığın kesit kalınlığıyla ( $z$ ) değişimi verilmiştir [64] :

$$\varepsilon=10^4 z^{-2} \quad (15)$$

Bu bağıntıdan da anlaşılacağı gibi, hızlı katılaştırmanın gerçekleştirilebilmesi için [64, 65]:

- (a) Katılaştıran malzeme en az bir yönde küçük boyuta veya büyük bir yüzey/hacim oranına sahip olmalıdır. Bu boyut bazen 10-50  $\mu\text{m}$  kadar küçük olabileceği gibi, en az  $10^2$  K/s'lik soğuma hızını sağlayacak şekilde birkaç yüz mikron mertebesinde de olabilir.
- (b) Katılaştıran malzemedeki ısının çok kısa zamanda alınmasına imkan veren soğutma şartları olmalıdır.

Hızlı katılaştırma ile malzemenin iç yapısında meydana gelen değişimler şunlardır [10, 11, 65]:

1. Mikro ve makro segregasyon azalır: Normal soğuma hızlarında segregasyon sonucu oluşan fazlar ortadan kalkar.
2. Katı haldeki çözünürlük miktarları ve sınırları genişler. Bunun olabilmesi için soğuma hızının belli bir değerin üzerinde olması gerekir.
3. İç yapıda bulunan ikincil fazların büyüklüğü, şekli ve dağılımı değişir: Tane büyüklüğü, ikincil dendrit kol aralığı ve çökelen faz parçacıklarının ve dispersoidlerin boyutları küçülür.
4. İç yapıda yarı kararlı fazlar oluşur. Daha sonra uygulanan ısı işlemlerle bu fazlar başka kararlı, yarı kararlı veya kararlı fazlara dönüşebilir. Bunun olması için katılma hızının genellikle  $10^4$  K/s üzerinde olması gerekir.
5. Camsı yapıda veya nano boyutta tane yapısına sahip alaşımlar üretilebilir. Camsı yapıların oluşabilmesi için soğuma hızının  $10^5$  K/s' nin üzerinde olması gerekir. Camsı yapıda segregasyon oluşmaz.

Değişik üretim yöntemlerinde elde edilebilecek yaklaşık soğuma hızları aşağıda verilmiştir [66]:

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

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

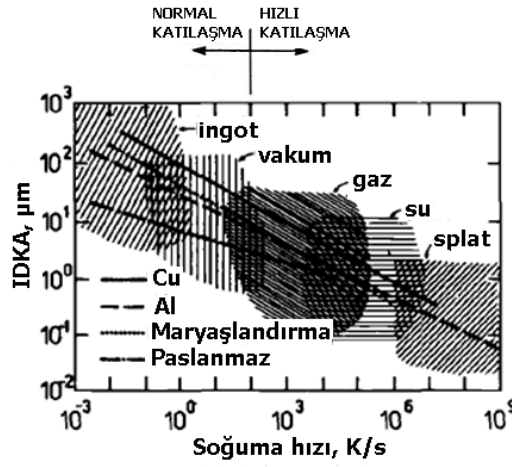
c) Gaz atomizasyonu (ultrasonik):  $10^3 - 10^5$  K/s,

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

e) Soğutulan metalik alt yüzeye çarptırma (20  $\mu\text{m}$  üzerinde parçacıklar):  $10^4 - 10^6$  K/s,

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

Değişik üretim yöntemlerinde ikincil dendrit kol aralığının (İDKA) soğuma hızıyla değişimi Şekil 1.12’de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, soğuma hızı arttıkça yani katılma süresi azaldıkça ikincil dendrit kol aralığı azalmaktadır. En yüksek soğuma hızı, soğutulan metalik alt yüzeye çarptırma yöntemiyle (splat quenching) elde edilmektedir. Soğutulan metalin ısıl iletkenliği de soğuma hızını etkilemektedir. Ayrıca toz boyutu arttıkça soğuma hızı yavaşlayacağından ikincil dendrit kol aralığı da artmaktadır [10, 65].



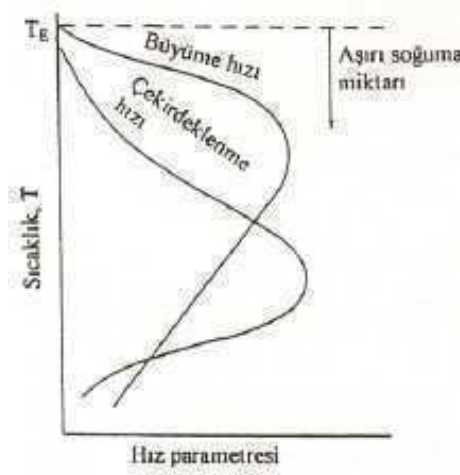
Şekil 1.12. Değişik üretim yöntemlerinde ikincil dendrit kol aralığı ile soğuma hızının değişimi [10].

Hızlı katılaştırma yöntemlerini iki temel gruba ayırmak mümkündür. Birincisi, sıvı metalin küçük parçacıklara (toz) ayrılma mekanizmalarını içine alan atomizasyon yöntemleridir. İkinci grup ise atomizasyon dışı yöntemler olarak adlandırılır ve sıvı metalin parçacıklara ayrılmadan, genellikle şerit halinde hızlı katılaştırılması esasına dayanır [67, 68].  $10^5$  K/s soğuma hızlarına kadar çıkılabilen atomizasyon yöntemlerinde malzeme toz halinde katılaştırılır. Atomizasyon dışı yöntemler amorf yapıli metalik camların üretiminde yaygın olarak başvurulan şerit dökümü yöntemleridir ve bu yöntemlerin tümünde sıvı metal, yüksek devir hızlarında dönen bir disk yüzeyinde katılaştırılır. Ancak sıvının disk yüzeyine beslenme şekli ve buna bağlı olarak pota ve nozul tasarımı yönünden belirgin farklılıklar görülmektedir. Bu yöntemlerde elde edilen soğuma hızları, başta diskin devir hızı olmak üzere diğer işlem parametrelerine bağlı olarak  $10^5 - 10^7$  K/s arasında değişmektedir [65].

Hızlı katılaştırma yöntemleri ile soğuma hızına bağlı olarak çok ince mikroyapılı veya amorf yapılı ürünler üretilebilir. Bu ürünler genellikle mikron ile ölçülebilen kalınlık veya boyutta olup toz, şerit, folyo, elyaf, flaman, lamel, pul, kaplama veya tel formunda olabilir [61, 67]. Bunlar, daha sonra uygulanan presleme, ekstrüzyon, dövme, ısıl işlem vb. gibi T/M üretim aşamalarından geçerek nihai parça elde edilir.

### 1.3.1. Soğuma Hızı ile Mikroyapının Değişimi

Hızlı katılaştırma yöntemleriyle elde edilen ürünlerin mikroyapısı çekirdeklenme ve büyüme olaylarına bağlıdır [11, 69]. Artan aşırı soğuma miktarı ile çekirdeklenme ve büyüme hızı arasındaki ilişki Şekil 1.13’de gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Aşırı soğuma miktarı, çekirdeklenme ve büyüme hızı arasındaki ilişki [69].

Katılma olmaksızın sıvı metalin katılma sıcaklığının altına soğutulmasına aşırı soğuma denir. Aşırı soğuma, sıvı metalde katı fazın oluşmasına fırsat vermeksizin ısı çıkışı ile oluşur [67]. Aşırı soğumanın artması durumunda, aşağıda homojen çekirdeklenme için verilen eşitlikten de anlaşılacağı gibi, çekirdek sayısı ve çekirdeklenme hızı artar [70].

$$r = \frac{2\sigma T_m}{\Delta H_f \Delta T} \quad (16)$$

Burada:  $r$ : çekirdek yarıçapı (m),  $\sigma$ : sıvı metal yüzey gerilimi ( $J/m^2$ ),  $T_m$ : sıvı metal ergime sıcaklığı (K),  $\Delta H_f$ : ergime gizli ısısı ( $J/m^3$ ),  $\Delta T$ : aşırı soğuma miktarı (K).

Soğuma hızı arttıkça, Şekil 1.14'de gösterildiği gibi, aşırı soğuma miktarı da artar ve sırasıyla dendritik, eşeksenli, mikrokristalli, nanokristalli ve amorf yapılar elde edilebilir. Soğuma hızına göre oluşan mikroyapı örnekleri Şekil 1.15'de verilmiştir. Yavaş soğumanın karakteristik bir özelliği dendritik mikroyapının oluşumudur (Şekil 1.15-a). Bu durumda segregasyonlu kaba taneler oluşur. Daha hızlı soğumada yüksek katılma hızı, sıvı metal içinde difüzyon oluşumuna fırsat tanımaz. Bu durum segregasyonu önlemekte olup, daha homojen ve eş eksenli bir mikroyapı elde edilir (Şekil 1.15-b). Mikro kristalli malzemeler de hızlı soğutulmuştur; ancak tane büyüklüğü eş eksenli yapılara göre daha küçüktür. Nanokristalli bir mikroyapıda, tane sınırı alanları yapının büyük bir kısmını oluşturur (Şekil 1.15-c). Kısa sürelerde büyük aşırı soğumalar ( $>10^6$  K/s) ile ısı çıkışının kristal oluşumundan daha hızlı olmasından dolayı atomlar difüze olamazlar ve kristal şeklinde düzenlenemeden sıvı haldeki yapılarında katılaştıklarından amorf (camsı) yapı oluşur (Şekil 1.15-d). Amorf yapılarda atomik diziliş tamamen gelişigüze'dir [10, 71, 72].

Sıvı metalin katılması sırasında çekilen ısı miktarı arttıkça daha ince bir mikroyapı (hücre boyutu veya dendrit kol aralığı) oluşur [77]. Değişik araştırmacılar, Cu-Sn alaşımları için dendritik kol aralığı veya hücre boyutuyla soğuma hızının değişimini veren bağıntılar geliştirmişlerdir. Bu bağıntılardan bazıları aşağıda gösterilmiştir:

Freyberg vd [78] tarafından geliştirilen, Cu-Sn alaşımı tozlarında hücre boyutuna bağlı olarak soğuma hızını veren bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$\lambda = 62,8\epsilon^{-0,3641} \quad (17)$$

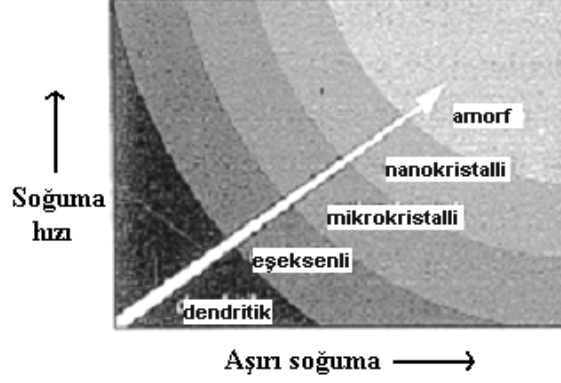
Yine Cu-Sn alaşımı için Tiedje vd [79] tarafından verilen hücre boyutu-soğuma hızı bağıntısı aşağıda verilmiştir:

$$\lambda = 37,312\epsilon^{-0,33} \quad (18)$$

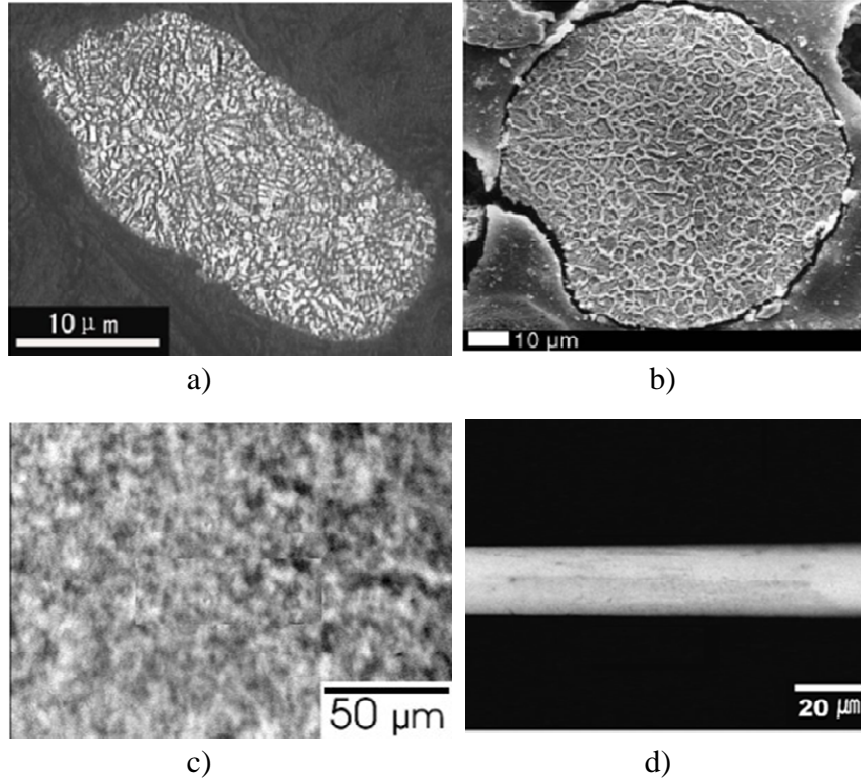
Choi [80] ve Kallien [81] Cu-Sn alaşımı için dendrit kol aralığı-soğuma hızı arasındaki ilişkiyi aşağıdaki şekilde vermiştir:

$$\lambda = 34e^{-0,323} \quad (19)$$

Bu eşitliklerde;  $\lambda$ : ikincil dendrit kollar arası mesafe veya hücre boyutu ( $\mu\text{m}$ ),  $\varepsilon$ : soğuma hızı (K/s).



Şekil 1.14. Soğuma hızı - aşırı soğutma arasındaki ilişki ve oluşabilecek mikroyapılar [10].



Şekil. 1.15. Hızlı katılaştırma ile oluşabilecek mikro yapılar a) dendritik (Ag-Zn alaşımı) [73], b) eşeksenli hücresel (Co-Cr-Mo alaşımı) [74], c) nano yapı (Fe-Cu-Nb-Si-B alaşımı) [75], d) amorf yapı (Ti-Ni-Cu alaşımı) [76].

#### 1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Yapılan literatür incelemesi, döner disk atomizasyon yöntemiyle yapılan çalışmaların genellikle diskte atomize olan sıvı metal damlacıkları üzerine soygaz göndererek hızlı soğutma esasına dayandığını ortaya koymuştur. Bunun dışında, son yıllarda değişik yöntemler denenerek yapılan çalışmalara da rastlanmaktadır. Atomizasyon diskinden savrulan sıvı metal damlacıkları, döndürülerek oluşturulan su havuzu duvarına veya su ile soğutulan ikinci bir diske çarptırarak hızlı soğutmanın yapıldığı yöntemler örnek olarak verilebilir. Bununla birlikte, sıvı metali, önce soy gaz ile atomize edip ardından dönen disk üzerine çarptırarak hızlı katılaştırmanın gerçekleştirildiği hibrid atomizasyon yöntemleri de mevcuttur. Gazla yapılan soğutmada, soğuma hızı nispeten düşük olmakta ve kullanılan gazlar toz üretim maliyetini artırmaktadır. Su ile yapılan soğutmada ise üretilen tozların oksijen oranı yüksek olmaktadır. İkinci diske çarptırarak yapılan soğutmada ise çubuksu şekilli tozlar üretilmekte, ortalama toz boyutu yüksek olmakta ve üretim kapasitesi nispeten düşük olmaktadır. Bazı araştırmacılar, atomizasyon öncesi diski ön ısıtmaya tabi tutarak veya seramik disk malzemeleri kullanarak sıvı metalin viskozitesinin düşük kalmasını sağlayıp ortalama toz boyutunu azaltma ve verimi artırmayı denemişlerdir. Ancak, bu uygulama soğuma hızını azalttığı gibi, sıvı metalin diske yapışmasına da neden olmaktadır. Yukarıda da açıklandığı gibi, üretim verimi yüksek, oksijen oranı düşük, hızlı katılaştırılmış metal tozu üretimi konusunda literatürde yeterli çalışma mevcut değildir. Özellikle, soygaz atmosferi altında su jeti soğutmalı döner disk yöntemiyle toz ve şerit üretimi konusunda çalışmalara rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın amacı, soygaz atmosferi altında su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu yöntemiyle hızlı katılaştırılmış metal ve alaşım tozu üretmek, atomizasyon parametrelerinin üretilen tozların ortalama boyutuna, boyut dağılımına, verimine ve mikroyapılarına (soğuma hızına) etkilerini araştırmaktır. Ayrıca, metal şerit üretimini ve soğuma hızlarını etkileyen parametreleri ortaya koymaktır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Kullanılan Alaşımalar

Bu çalışmada, atomizasyon parametrelerinin üretilen tozların verimine, ortalama toz boyutuna, boyut dağılımına ve soğuma hızına etkisini incelemek amacıyla, bileşimi Tablo 2.1’de verilen CuSn10 bronz alaşımı atomize edilmiştir. Bu alaşımla ilgili olan Cu-Sn faz diyagramı Şekil 2.1’de verilmiştir. Atomize edilen alaşım özelliklerinin (viskozite, yoğunluk, yüzey gerilimi vb.) atomizasyona etkilerini incelemek amacıyla bileşimi Tablo 2.2’de verilen AISI 304 paslanmaz çelik alaşımı atomize edilmiştir. Atomize edilen alaşımların bazı fiziksel özellikleri Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Bronz alaşımı kimyasal kompozisyonu (Ağ. %)

Tip	Sn	Zn	Fe	Mn	P	S	Al	As	Ni	Co	Cr	Sb	Si	Cu
CuSn10 kalay bronzu	11,408	0,327	0,038	0,040	0,039	0,011	0,025	0,015	0,038	0,005	0,003	0,045	0,009	Kalan

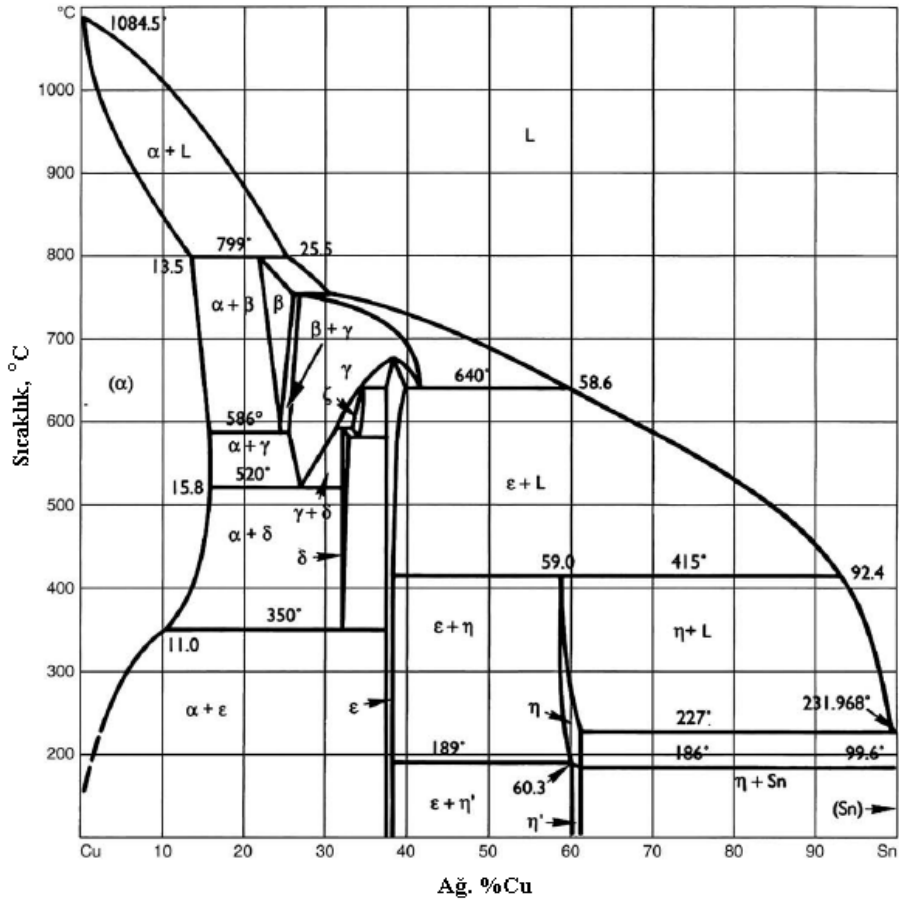
Tablo 2.2. Paslanmaz çelik alaşımı kimyasal kompozisyonu (Ağ. %)

Tip	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Fe
AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik	0,08	2	0,05	0,03	1	18	10	Kalan

Tablo 2.3. Bronz ve paslanmaz çelik alaşımlarının bazı fiziksel özellikleri [82-85].

Alaşım	Solidüs-likidüs sıcaklığı ( $T_s-T_L$ ) (°C)	Yoğunluk ( $g/cm^3$ )	Isıl iletkenlik ( $W/m.°K$ )	Isı kapasitesi ( $J/kg.°K$ )	Viskozite (mPa.s)	Yüzey gerilimi (mN/m) ( $T=T_{erg}$ )
CuSn10	831-998	8,77	70,6	377	4,60	999
AISI 304	1398-1454	7,9	16,2	503		1352





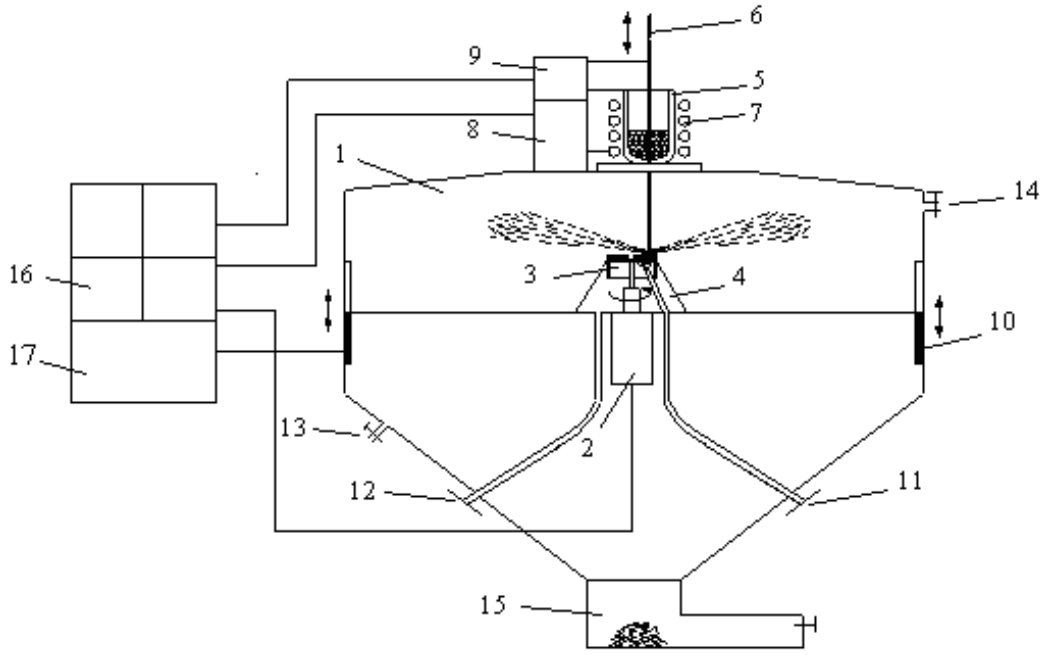
Şekil 2.1. Cu-Sn alaşımı denge diyagramı [86].

## 2.2. Deney Düzenegi

Bu çalışma, KTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde mevcut bulunan su jeti soğutmalı döner disk atomizasyon ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Şematik resmi Şekil 2.2'de ve fotoğraf görüntüsü Şekil 2.3'de verilen atomizasyon ünitesi, prensip olarak, sıvı metali su jeti ile soğutulan ve yüksek hızda dönmekte olan disk üzerine akıtarak atomize etme esasına dayanmaktadır. Atomizasyon ünitesi dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar:

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

Bu üniteler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.



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

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



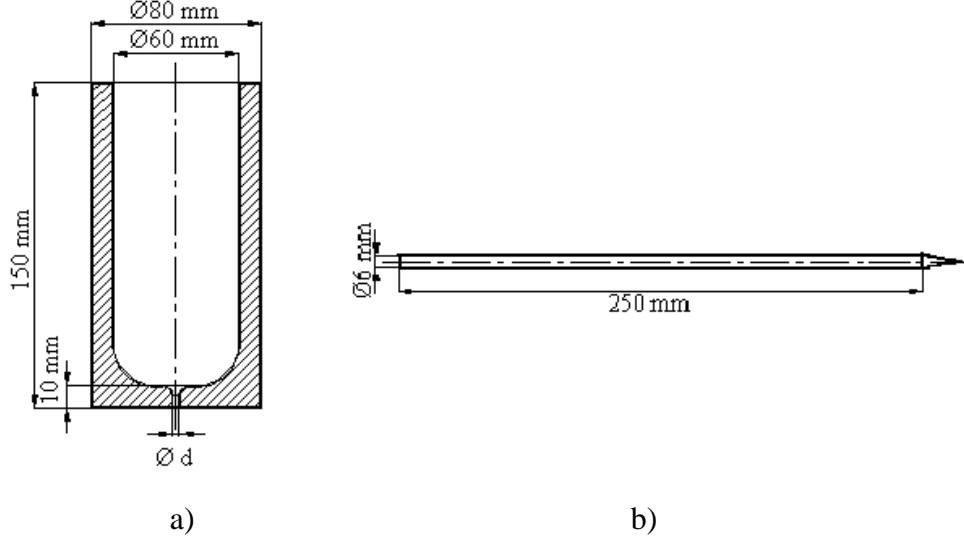
Şekil 2.3. Su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu ünitesi

### 2.2.1.Ergitme ünitesi

Ergitme ünitesi, indüksiyon bobini, grafit pota, seramik tıkaç ve istenildiğinde pota içine soy gaz göndermeye yarayan seramik bir borudan oluşmaktadır (Şekil 2.4). İndüksiyon bobini olarak 10 mm çapında bakır boru kullanılmış olup, sarılmış haldeki iç çapı 95 mm ve yüksekliği ise 120 mm'dir (sarım sayısı=12). Metal ve alaşımı ergitmek için 50 KW gücünde yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma sistemi kullanılmıştır. Ergitme işlemi, şematik resmi Şekil 2.5-a'da gösterilen grafit malzemeden imal edilen potada yapılmış olup, alaşımın sıcaklığı infrared sıcaklık kontrol cihazıyla kontrol edilmiştir. Potanın dip kısmına açılan delik (nozül) aracılığıyla sıvı alaşım disk üzerine akıtılmıştır. Ergitme işlemi süresince seramik tıkaç (Şekil 2.5-b) deliği kapatmakta olup, istenilen sıcaklığa çıkıldığında kontrol ünitesindeki butona basılarak tıkaç delikten kaldırılmaktadır. Bu çalışmada 2, 2,5, 3 ve 3,5 mm nozul çaplarında deneyler yapılmış olup, her bir çap için ayrı potalar kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda, Cu-Sn10 alaşımı 150, 250, 300, 350 ve 450 °C olmak üzere beş farklı sıcaklığa aşırı ısıtılarak, aşırı ısıtmanın etkisi incelenmiştir (Cu-Sn10 alaşımı için  $T_L = 998$  °C'dir).



Şekil 2.4. Ergitme ünitesi



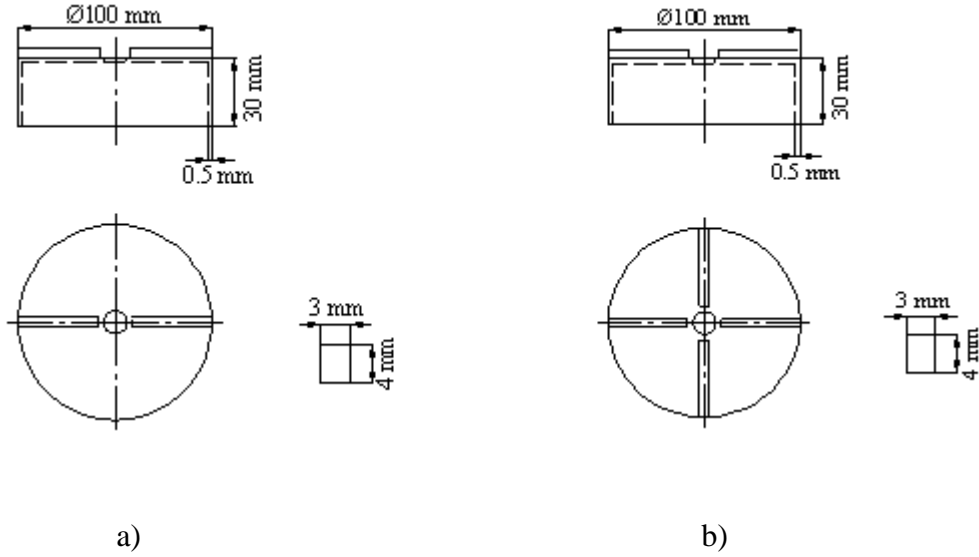
Şekil 2.5. a) Pota, b) tıkaç boyutları

### 2.2.2. Atomizasyon Odası

Sıvı alaşımın toz halinde üretiminin gerçekleştiği bölüm, atomizasyon odası olarak adlandırılmaktadır. Atomizasyon odası iki bölümden oluşmaktadır; düzgün dairesel şekilde olan üst kısım ve aşağıya doğru daralan konik dairesel alt kısım. Düzgün dairesel olan üst kısım 4 adet hidrolik piston-silindir mekanizması yardımıyla yukarı-aşağı hareket ettirilerek atomizasyon odası açılıp kapanmaktadır. Atomizasyon odasında atomizasyon disk, disk tahrik motoru, saç koni, disk soğutma suyu ile argon gazı giriş-çıkış boru ve hortumları mevcuttur.

Disk üzerine akıtılan sıvı alaşımın atomizasyon diskinde parçalanmasıyla oluşan damlacıklar atomizasyon odasında katılaşırlar. Katılma işlemi damlacık boyutuna göre hemen disk üzerinde, havada veya nispeten büyük boyutlu olanlar için atomizörün duvarına çarpma esnasında gerçekleşir. Atomizörün duvarına sıvı halde çarpan damlacıklar çarpmanın etkisiyle yassı şekilde ve büyük boyutlu olarak katılaşmaktadır. Bu tür tozların varlığı üretilen tozların ortalama boyutunu yükseltmekte ve verimi düşürmektedir. Bu durum göz önüne alınarak, atomizasyon odası dairesel formda ve nispeten büyük çaplı olarak üretilmiştir. Düzgün dairesel formda olan atomizasyon odasının çapı 2.500 mm, yüksekliği 600 mm olup, alt kısmı konik olarak tasarlanarak atomize olan tozların kolaylıkla toz toplama bölgesine ulaşması amaçlanmıştır. Konik olan alt kısmın yüksekliği ise 1.500 mm'dir. Üretilen tozlara herhangi bir kirliliğin bulaşmaması için atomizasyon ünitesinin tamamı AISI 304 paslanmaz çelik sacdan imal edilmiştir.

Döner disk atomizasyonunda, atomizasyon diskleri en önemli üretim değişkenidir. Bu nedenle, bu çalışmada atomizasyon diski kanatçık sayısı ve yüzey durumu incelenen en önemli parametrelerdir. Yapılan deneylerde, disk malzemesi olarak ısı iletim katsayısı yüksek olan elektrolitik bakır seçilmiş olup, 100 mm çapında 0,5 mm et kalınlığında düz formda diskler kullanılmıştır. Ayrıca, su ile soğutmanın yapılabilmesi için diskler ters kap şeklinde tasarlanmıştır. Kanatçık sayısının etkisini incelemek amacıyla dikdörtgen profile (3×4 mm) sahip 2 ve 4 kanatçıklı olmak üzere iki farklı kanatçık sayısı denenmiştir (Şekil 2.6). Disk yüzey durumunun üretilen tozların ortalama boyutuna ve verime etkisi kaplanmamış ve ZrO<sub>2</sub> kaplanmış diskler kullanılarak araştırılmıştır. Kaplanmamış ve ZrO<sub>2</sub> kaplanmış disklerin yüzey pürüzlülükleri Mahr model yüzey pürüzlülüğü cihazıyla ölçülmüş olup, sırasıyla 1 ve 6 µm olarak bulunmuştur. Disk soğutma suyunun sıvı alaşım ve üretilen tozlarla temasını engellemek için metal sac koni kullanılmıştır. Atomizasyon esnasında sıvı metal disk merkezinden yaklaşık 35 mm uzağa akıtılarak disk kenarından maksimum hızla atomize olması sağlanmıştır.



Şekil 2.6. Atomizasyon diskleri, a) iki kanatçıklı, b) dört kanatçıklı

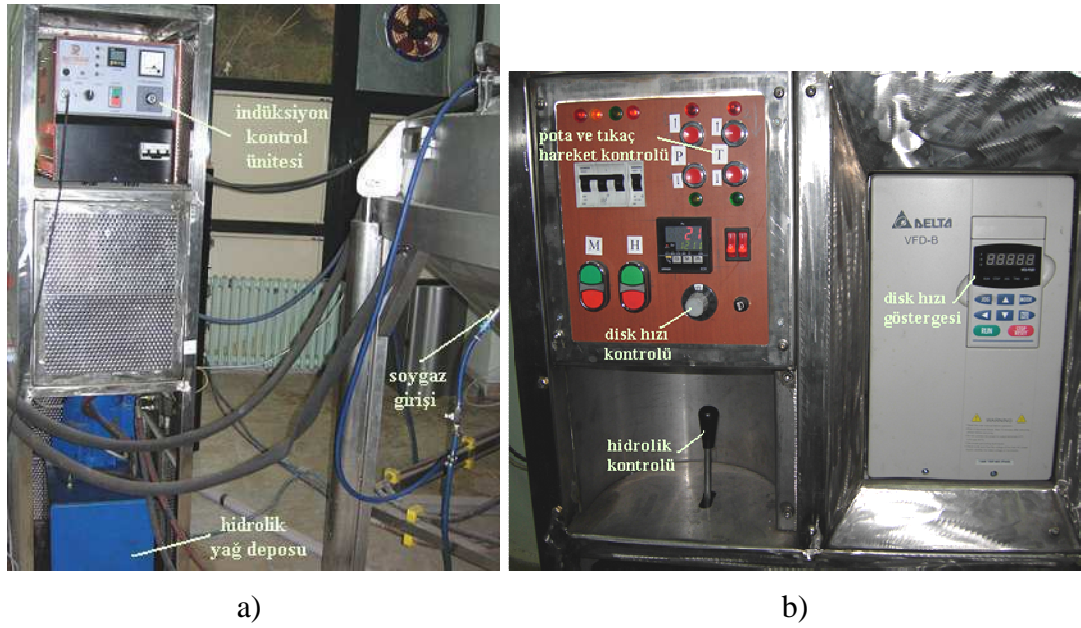
Atomizasyon diski, 3.2 KW gücünde ve 24.000 d/d devir sayısına sahip bir AC elektrik motoru ile döndürülmektedir. Disk dönme hızı, kontrol ünitesinden 0-24.000 d/d aralığında istenen devir sayısına ayarlanabilmektedir. Atomizasyon esnasında disk üzerine akıtılan sıvı alaşım, diskin kenarında maksimum hıza ulaşarak atomize olmaktadır. Bu bakımdan, diskin çevresel hızı olarak en dış çapa (100 mm) karşılık gelen disk hızı alınmıştır. Bu çalışmada, 9.600, 10.800, 12.000, 13.200 ve 14.400 d/d devir sayılarında deneyler yapılmış

olup, bu devir sayılarına karşılık gelen disk çevresel hızları sırasıyla 50, 57, 63, 70 ve 75 m/s'dir.

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

### 2.2.3. Kontrol Ünitesi

Atomizasyon esnasında gerekli olan kumanda ve ayar işlemlerinin tamamı ayrı bir ünite olarak tasarlanmış olan kontrol ünitesinden yapılmaktadır. Kontrol ünitesi; induksiyon ısıtma sistemi, hidrolik kumanda, disk dönme hızı ayarı, tıkaç ve potanın aşağı-yukarı hareket kontrolü bölümlerinden oluşmaktadır (Şekil 2.7).



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

### 2.2.4. Soğutma Ünitesi

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



Şekil 2.8. Soğutma ünitesi

### 2.3. Atomizasyon Deneyleri

Yüksek saflıkta soygaz atmosferi altında su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu yöntemiyle toz üretme ve üretim parametrelerinin toz özelliklerine ve verime etkisinin incelendiği bu çalışmada, esas itibarıyla CuSn10 bronz alaşımı atomize edilmiştir. Disk hızı (DH), disk kanatçık sayısı (DKS), aşırı ısıtma miktarı (AIM), nozul çapı (sıvı alaşım akış debisi) (NÇ), disk yüzey durumu (DYD) vb., toz özelliklerine ve verime etki eden başlıca parametrelerdir. Diğer taraftan, disk geometrisi ve yüzey durumuna bağlı olarak sıvı alaşım şerit şeklinde elde edilebilmektedir. Belirtilen bu parametrelerin toz ve şerit üretimine ve özelliklerine etkilerini incelemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Atomizasyonda diğer bir önemli değişken atomize edilen metal veya alaşım türüdür. Alaşımın yoğunluğu, viskozitesi, yüzey gerilimi, ergime noktası veya aralığı vb. etkili olan özelliklerdir. Bu çalışmada, CuSn10 bronz alaşımı dışında AISI 304 paslanmaz çelik alaşımı atomize edilerek alaşım özelliklerinin atomizasyona etkisi incelenmiştir. İncelenen parametrelerin tamamı Tablo 2.4’de gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Atomizasyon parametreleri

Parametreler		Alaşım					Paslanmaz çelik			
		Bronz								
Aşırı ısıtma miktarı (°C)		150	250	300	350	450	300			
Disk	Çevresel hızı (m/s)	75	70	63	57	50	75	70	63	57
	Kanatçık sayısı	2		4			2			
	Yüzey Durumu	ZrO <sub>2</sub> kaplanmış		Kaplanmamış			ZrO <sub>2</sub> kaplanmış			
Nozul çapı (mm)		2	2,5	3	3,5		2			

#### 2.4. Ortalama Toz Boyutu ve Verim Hesabı

Atomizasyon işleminde yaklaşık 250 g alaşım ergitilerek deneyler yapılmıştır. Deneyler sonrasında, toz toplama bölümünde biriken ve atomizörün iç duvarlarına tutunmuş olan tozlar toplanarak 500 µm elek açıklığına sahip eleklerle elenmiştir. Eleme neticesinde 500 µm elek üstü tozlar ve diğer kaba parçalar hurdaya ayrılmıştır. Toz verimi, 500 µm elek altı tozların pota altına geçen toplam alaşım miktarına oranlanmasıyla bulunmuştur. Benzer şekilde, şerit oluşumunun gerçekleştirildiği deneylerde, üretilen şerit miktarının pota altına geçen toplam alaşım miktarına oranlanmasıyla şerit verimi hesaplanmıştır.

Ortalama toz boyutu ve boyut dağılımının hesaplanmasında 500 µm elek altı tozlar hesaba katılmıştır. Bu amaçla Malvern Mastersizer 2000 model parçacık boyut analiz cihazı kullanılmıştır. Yapılan analiz neticesinde tozların ortalama boyutu ( $d_{50}$ ),  $d_{10}$  ve  $d_{90}$  hesaplanmış ve boyut dağılımı grafikleri çizilmiştir. Bu işlem için tozlardan konileme-dörtleme yöntemiyle yaklaşık 5-7 g numune alınmıştır. Ayrıca, tozların boyutlarına göre sınıflandırılması amacıyla Retch marka titreşimli eleme cihazı kullanılmıştır. Tozlar 25, 36, 45, 63, 90, 125, 180, 250, 355 µm'luk elek serisinde 30 dakika süreyle elenmiştir.

#### 2.5. Üretilen Toz ve Şeritlerin Morfoloji ve Mikroyapı İncelemeleri

Üretilen CuSn10 bronz alaşımı ve AISI 304 paslanmaz çelik tozlarının morfoloji incelemeleri için Jeol, JSM 6400 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Eleme sonucu her bir elek aralığından alınan tozlar çift taraflı karbon



bandına yataklanarak morfoloji incelemeleri için hazır hale getirilmiştir. Üretilen CuSn10 bronz alaşımı şeritlerinin morfoloji incelenmeleri için Leica MZ16 model stereo mikroskop kullanılmıştır.

Üretilen toz ve şeritlerin mikroyapıları Leica DM4000 model optik mikroskop ve SEM kullanılarak belirlenmiştir. Bu işlem için değişik boyutlardaki toz ve şeritler soğuk sertleşen epoksi reçinede yataklanmış, daha sonra sırasıyla 800, 1000 ve 1200 numaralı zımparalarla zımparalanmıştır. Ardından numuneler 1 µm'luk alümina süspansiyonu ile parlatılmıştır. CuSn10 bronz alaşımı toz ve şeritler, önce 2 gr  $K_2Cr_2O_7$ , 8 ml  $H_2SO_4$ , 4 ml doymuş NaCl çözültisi ve 100 ml  $H_2O$ 'den oluşan dağlama ayırıcında 6-8 s, hemen ardından 5 gr  $FeCl_3$ , 50 ml HCl ve 100 ml  $H_2O$  dan oluşan dağlama ayırıcında ise 10-12 s süre ile dağlanmıştır. AISI 304 paslanmaz çelik toz numuneler ise  $FeCl_3$  ile doymuş HCl çözültisinde 10-12 s dağlanmıştır. Optik mikroskopta yapılan ön incelemelerin ardından numuneler SEM incelemeleri için altın kaplanmıştır. Toz ve şeritlerin hücre büyüklükleri veya ikincil dendrit kol aralıkları SEM mikrofotografaları üzerinde doğrusal kesiştirme yöntemi ile belirlenmiştir.

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

#### 3.1. Toz Boyut Dağılımı

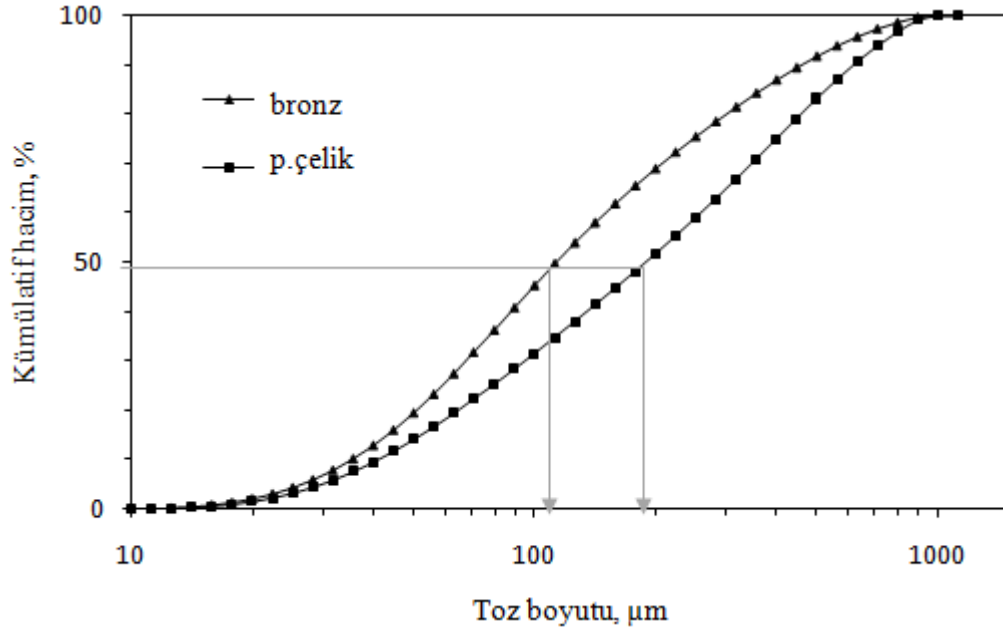
Bu çalışmada, atomizasyon deneyleri sonrasında üretilen tozlar 500 µm elek açıklığına sahip eleklerle elenip 500 µm elek altı tozlar ayrılarak değerlendirmeye alınmış, 500 µm elek üstü olanlar ise hurdaya ayrılmıştır. Konileme-dörtleme yöntemiyle 500 µm elek altı ana kütleden belli miktarda alınan tozlar lazerli parçacık boyut analiz cihazında (master sizer) analize tabi tutulmuş, bu analiz neticesinde her bir deneyin ortalama toz boyutu ( $d_{50}$ ) ve bunun yanında  $d_{10}$  ve  $d_{90}$  değerleri hesaplanmış, kümülatif boyut dağılımı ve normal dağılım eğrileri çizilmiştir. Atomizasyon parametrelerine bağlı olarak çizilen bu eğrilerden bazıları Şekil 3.1-3.3'de verilmiştir.

Atomize edilen alaşım türünün kümülatif toz boyut dağılımına ve normal dağılıma etkisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Yapılan atomizasyon deneylerinde, CuSn10 bronz alaşımı ile, AISI 304 paslanmaz çeliğe göre daha ince boyutta ve daha yüksek verimde toz üretilmiştir. 75 m/s disk hızı ve 2 mm nozul çapı şartlarında  $d_{50}$  değerleri bronz alaşımı için 113 µm olurken, paslanmaz çelikte (p. çelik) 188 µm olarak bulunmuştur. Bölüm 2.1, Tablo 2.3'de her iki alaşıma ait fiziksel özellikler incelendiğinde; bronz alaşımına ait özelliklerin (yoğunluk, viskozite, yüzey gerilimi) daha düşük boyutta toz üretiminde ana etkenler olduğu düşünülmektedir. Kümülatif ve normal dağılım eğrilerinden, paslanmaz çelik tozlarına ait eğrilerin bronz tozlarına oranla bir miktar sağa kaydığı gözlenmektedir. Ancak, aradaki fark, 113 ve 188 µm olan ortalama toz boyutlarındaki kadar yüksek değildir. Bunun sebebi; nispeten büyük boyutlu bronz alaşımı tozları düşük yüzey geriliminden dolayı küreselleşmeden düzensiz şekilli olarak katılaştırken, büyük boyutlu paslanmaz çelik tozları bronz alaşımına göre daha yüksek yüzey gerilimine sahip olmasından dolayı, küresel veya küresele yakın şekilli olarak katılaşmaktadır [13, 33, 41, 52]. Toz şekillerindeki bu farklılık kümülatif eğriler arasındaki farkı azaltmaktadır. Diğer taraftan, 500 µm elek üstü tozlar elenerek hurdaya ayrılmasına rağmen, her iki alaşıma ait master sizer çıktıları kümülatif ve normal dağılım eğrilerinde 500 µm'dan daha büyük boyutlu tozların bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum bize elek analizi ve lazerli parçacık boyut analizi yöntemleri arasındaki farkı göstermektedir. Elek analizi yönteminde, eleme işlemi esnasında çubuksu tozlar dikey doğrultuda, en küçük çaplarından eleğin deliklerinden geçebilmektedir. Bu yöntemde herhangi bir eşdeğer çap dikkate alınmadığından, çubuksu tozların sadece bir boyutu (çubuk çapı) etkili olmaktadır.

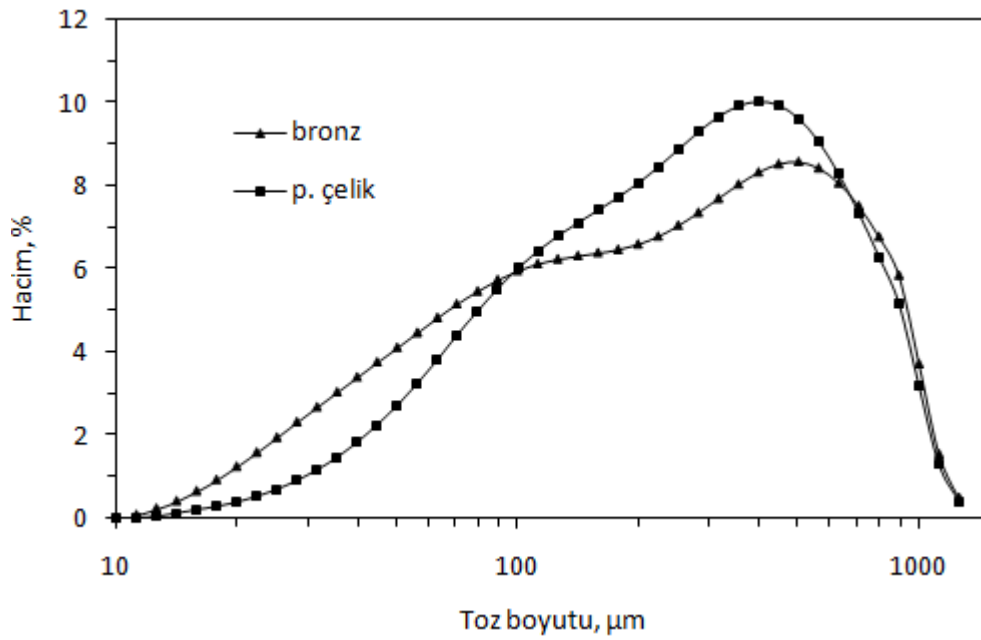
Ancak, daha hassas olan lazerli parçacık boyut analizi yönteminde ışık saçılımı ve kırınımı prensibine göre eşdeğer küresel hacim çapı ölçüldüğünden gerçeğe daha yakın toz boyutu ve dağılımı hesaplanır [87, 88]. Bunun sonucu olarak, elek analizinde 500 µm elek altına geçen çubuksu şekilli tozlar master sizer ile yapılan ölçümde daha büyük boyutlu olarak hesaplanmaktadır. Sonuçta, lazerli parçacık boyut analiz yönteminde ortalama toz boyutu ve boyut dağılımı elek analizine göre daha büyük çıkmaktadır [36, 54].

Disk dönme hızının kümülatif toz boyut dağılımına ve normal dağılıma etkisi Şekil 3.2'de verilmiştir. Kümülatif boyut dağılım ve normal dağılım eğrileri disk hızının artmasıyla veya azalmasıyla şekil bakımından önemli bir değişikliğe uğramamaktadır. Ancak, artan disk hızıyla kümülatif boyut dağılım eğrisi sol tarafa kayıp daha dik olurken, normal dağılım eğrisinde yığılma ince boyutlu tozlarda meydana gelmekte ve eğri sola kaymaktadır.

Disk yüzey durumunun kümülatif toz boyut dağılımına etkisi kaplanmamış ve ZrO<sub>2</sub> kaplanmış 4 kanatçıklı diskler için; normal dağılıma etkisi ise kaplanmamış ve ZrO<sub>2</sub> kaplanmış 2 kanatçıklı diskler açısından incelenmiştir (Şekil 3.3). Disk yüzeyinin pürüzlü olması sıvı metalin yüzeye tutunması açısından önemlidir. Dönen diskin santrifüj enerjisi yüzeye iyi tutunan sıvı metale daha kolay aktarılır ve atomizasyon daha verimli gerçekleşir. Şekil 3.3-a incelendiğinde; 4 kanatçıklı ZrO<sub>2</sub> kaplanmış ve kaplanmamış disklere ait kümülatif toz boyut dağılımında çok belirgin bir fark yoktur. Burada kanatçık sayısının yüksek oluşu kaplama malzemesine gerek olmadan diskin enerjisinin sıvı metale aktarımını sağlamaktadır. Aynı durum 2 kanatçıklı disk için geçerli değildir. Zira, ZrO<sub>2</sub> kaplanmış diskle yapılan atomizasyonda ince boyutlu ve tek modlu bir dağılım elde edilirken, kaplamasız diskle kaba boyutlu ve iki modlu bir dağılım elde edilmektedir (Şekil 3.3-b).

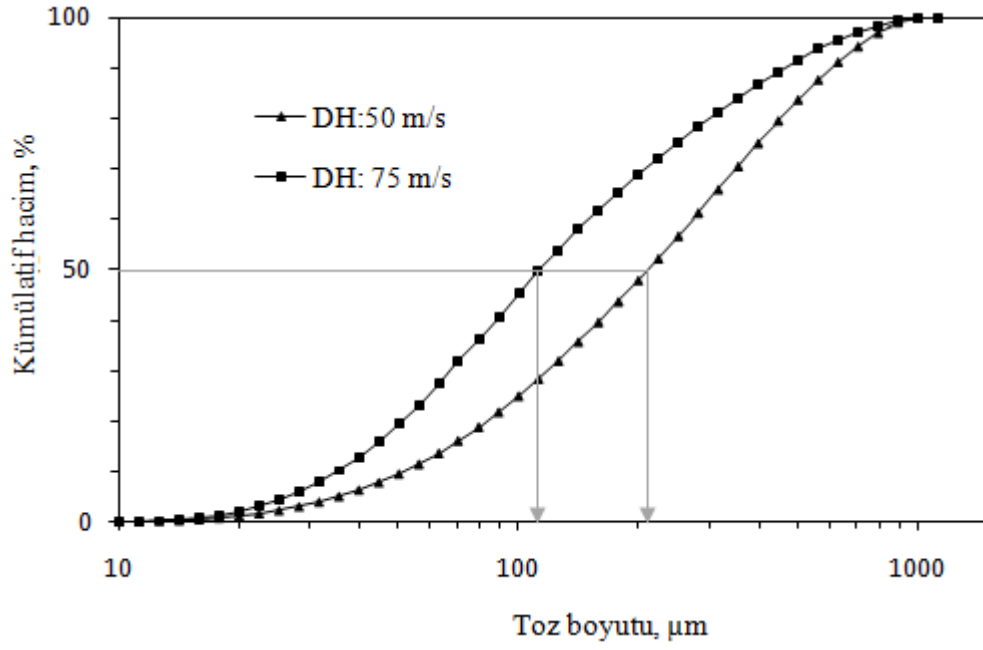


a)

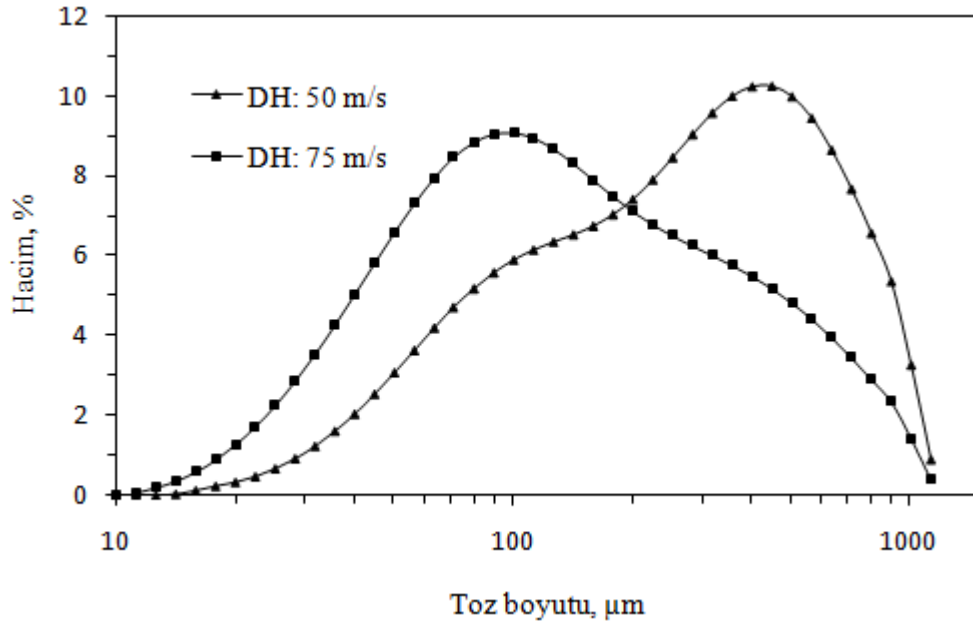


b)

Şekil 3.1. Atomize edilen alaşım türünün, a) kümülatif boyut dağılımına etkisi (DKS: 2, DYD: ZrO<sub>2</sub> kaplanmış, DH: 75 m/s, NÇ: 2 mm, AIM: 300°C), b) normal dağılıma etkisi (DKS: 2, DYD: ZrO<sub>2</sub> kaplanmış, DH: 63 m/s, NÇ: 2 mm, AIM: 300°C)

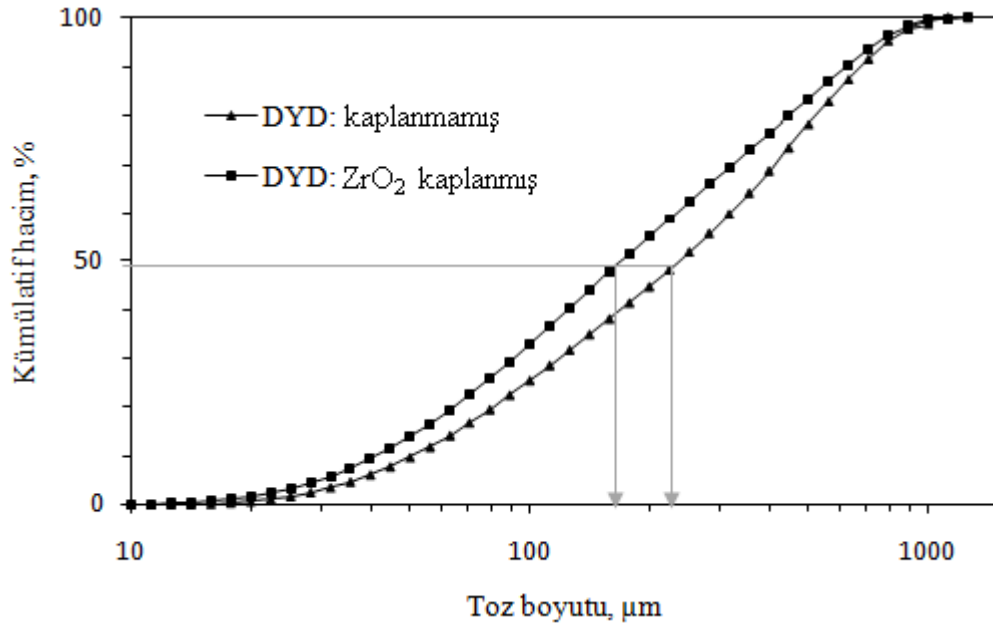


a)

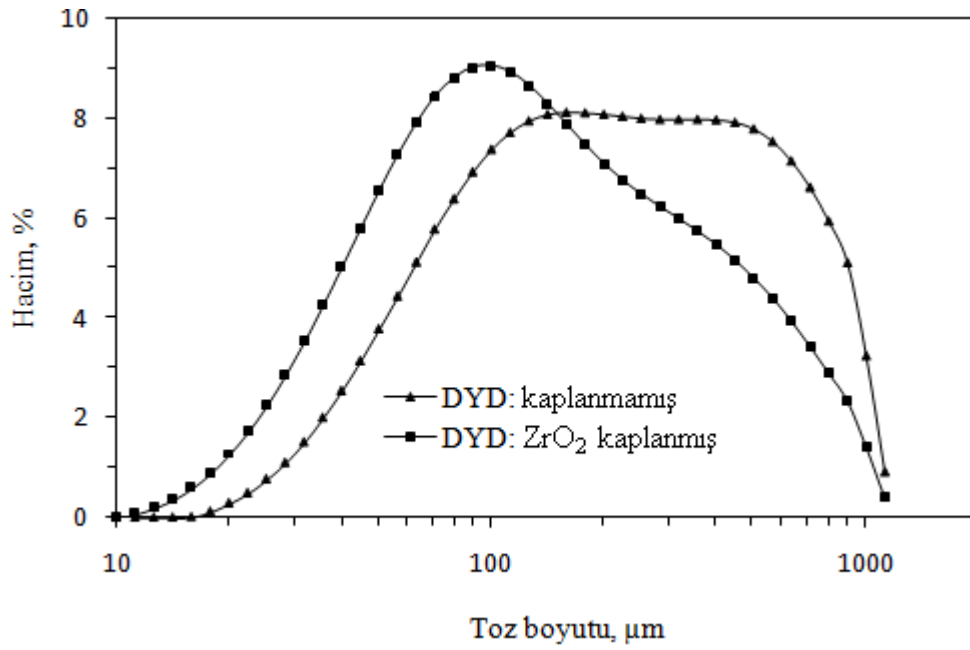


b)

Şekil 3.2. Disk hızının, a) kümülatif boyut dağılımına etkisi (DKS: 4, DYD:  $\text{ZrO}_2$  kaplanmış, NÇ: 2 mm, AIM:  $300^\circ\text{C}$ ), b) normal dağılıma etkisi (DKS: 2, DYD:  $\text{ZrO}_2$  kaplanmış, NÇ: 2 mm, AIM:  $300^\circ\text{C}$ )



a)



b)

Şekil 3.3. Disk yüzey durumunun, a) kümülatif toz boyut dağılımına etkisi (DKS: 4, DH: 63 m/s, NÇ: 2 mm, AIM: 300°C), b) normal dağılıma etkisi (DKS: 2, DH: 75 m/s, NÇ: 2 mm, AIM: 300°C)

### 3.2. Üretilen Tozların Morfolojileri

Bu çalışmada üretilen CuSn10 bronz alaşımı tozlarının genellikle küresel, yuvarlak, ligamental, çubuksu, düzensiz, pulsü ve yapraksı şekilde olduğu, morfolojinin parçacık boyutuna bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Disk hızı, disk geometrisi, sıvı metal akış debisi vb. atomizasyon parametrelerinin toz morfolojisini etkilemediği tespit edilmiştir. Tozların çarpışmasıyla oluşan uydulaşma, damlacık toz çarpışmasıyla oluşan sıvanmalar ve topaklanmalar görülmemiştir. Ayrıca, bazı toz üretim yöntemlerinde toz yüzeylerinde görülen çekilme boşluklarına rastlanmamıştır. Yapılan deneylerde, atomizör şekli ve boyutlarının toz şekli oluşumunda önemli oranda kısıtlayıcı bir etkiye sahip olmadığı gözlenmiştir. Döner disk atomizasyonu yüksek enerjili bir toz üretme yöntemidir. Disk üzerine akıtılan sıvı metal diskin santrifüj enerjisiyle parçalanarak damlacıklar halinde disk kenarından diskin çevresel hızına eşit bir hızla savrulur [34]. Sıvı alaşım önce ligamentlere daha sonra küçük ligamentlere ve damlacıklara parçalanır [37, 50, 89]. Damlacıkların katılaşması boyutlarına bağlı olarak diskten savrulma anında, havada ve atomizör duvarına çarpma esnasında gerçekleşir. Katılaşma işleminde ve toz şekli oluşumunda atomizasyon odasının çapı kritik bir öneme sahiptir. Nispeten küçük çaplı atomizörlerde tozların çoğu katılaşmalarını tamamlayamadan sıvı halde veya sıvıya yakın sıcaklıkta atomizör duvarlarına çarparak yassı veya pulsü şekil alırlar. Bu durumda elde edilecek tozların ortalama boyutu yüksek olur. Bu çalışmada, Bölüm 2.3.2’de belirtildiği gibi 2.500 mm çapa sahip, dairesel şekilli olan atomizasyon odasında atomizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Diskten savrulan sıvı metal damlacıkları atomizör duvarına olan 1.250 mm’lik uçma mesafesinde büyük oranda katılaşmalarını tamamlamaktadır. Atomizör duvarına çarpan parçacıklar, katılaşmış halde olduklarından herhangi bir şekil değişikliğine uğramamaktadır.

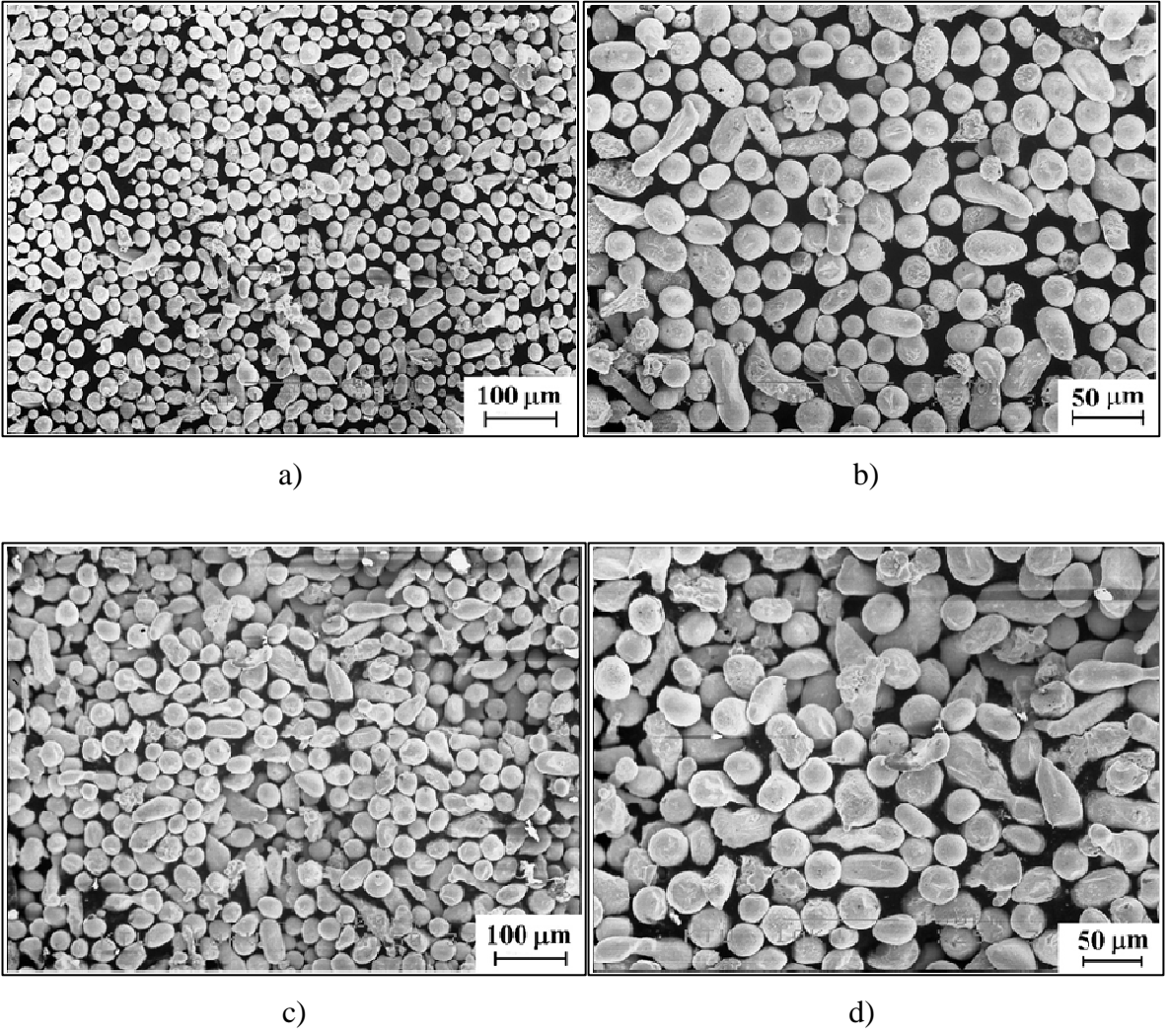
Üretilen tozların önemli bir kısmı ve nispeten küçük boyutlu olanları ( $< 45 \mu\text{m}$ ) küresel şekle sahiptir (Şekil 3.4).  $25 \mu\text{m}$  elek altı tozların yaklaşık tamamı küresel şekilli olurken, toz çapı büyüdükçe ( $25\text{-}45 \mu\text{m}$  arası) çok az da olsa yuvarlak ve kısa ligament şekilli tozlara rastlanmaktadır. Atomizasyon işlemi yüksek saflıktaki (% 99,999) argon gazı atmosferi altında yapılarak tozların oksitlenmesi azaltılmaya çalışılmıştır. Düşük orandaki oksijen miktarının küresel toz oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu durum başka araştırmacılar tarafından da gözlenmiştir [30, 36, 39, 52, 54].

Toz boyutu arttıkça (45-125  $\mu\text{m}$  arası) toz şekli küreselden sapmakta, boyut büyümesine bağlı olarak patates şekilli, kısa ligament, düzensiz ve çubuksu şekle dönüşmektedir (Şekil 3.5). Yapılan incelemelerde 90  $\mu\text{m}$ 'dan büyük tozlarda küresel şekilli tozlar gözlenmemiş olup daha çok yuvarlak, patates ve kısa ligament şekilli tozlar gözlenmiştir. Ayrıca, 45-125  $\mu\text{m}$  boyut aralığındaki tozlar arasında yassı şekilde gözenekli tozların bulunmaması bu tozların tamamının diskte atomize olduktan sonra atomizörün duvarına çarpmadan havada katılaştığını göstermektedir [30].

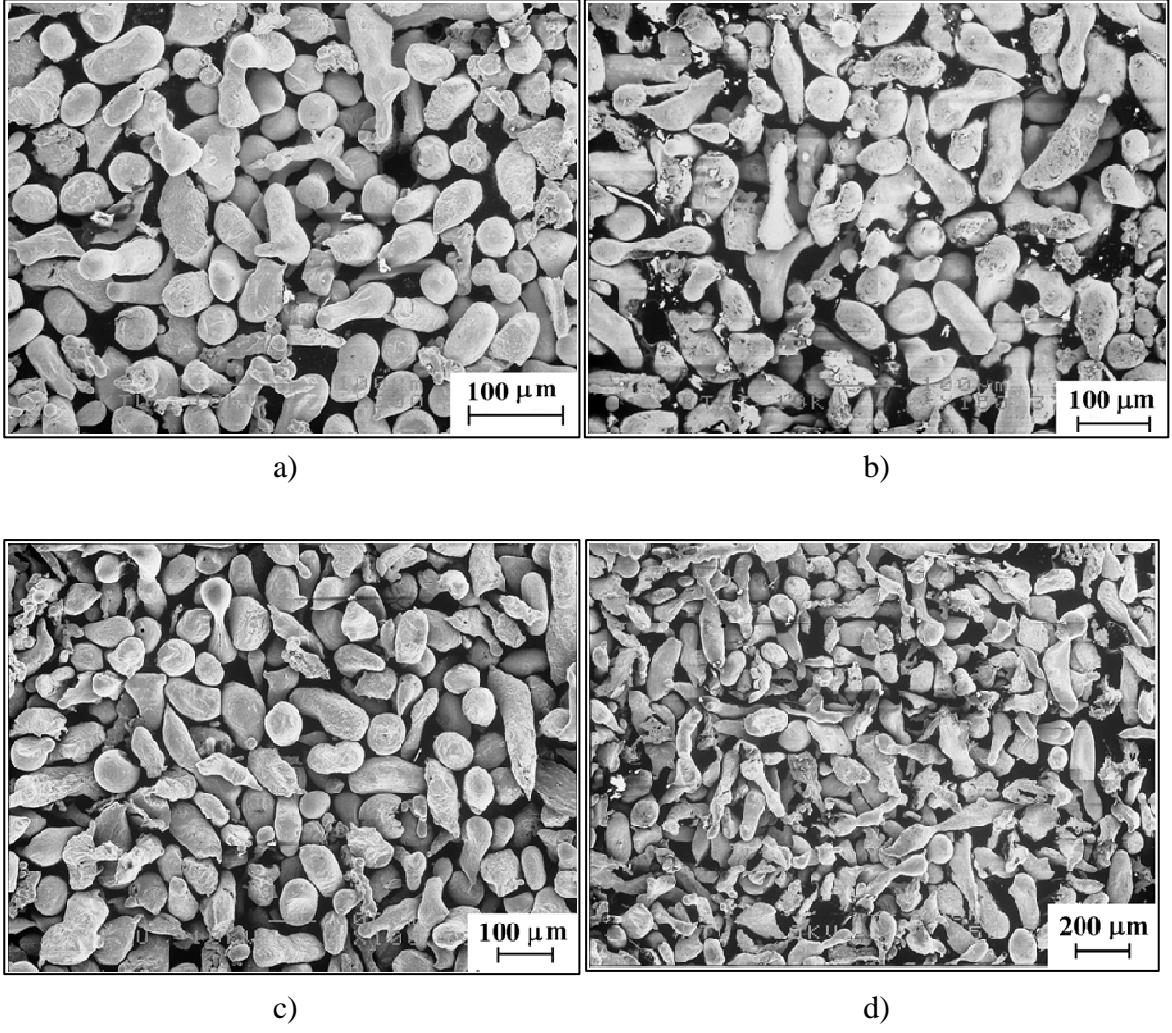
Toz boyutunun 125  $\mu\text{m}$ 'dan 500  $\mu\text{m}$ 'a büyümesiyle toz şekli de belirgin olarak değişmiştir. Boyut büyüdükçe çubuk ve ligamentlerin boylarının uzadığı, düzensiz, yassı ve yapraksı şekilli tozların miktarının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 3.6). Ayrıca, 250-500  $\mu\text{m}$  arası tozlar arasında gözenekli yassı şekilli tozlar gözlenmiştir. Diğer toz şekillerine göre miktarı çok düşük düzeyde olan bu tozların sıvı halde atomizör duvarına çarparak oluştukları anlaşılmaktadır. Yüzeylerinin düz olması, bu tozların sıvı damlacık halinde atomizör duvarına çarparak sıvı olduğu ve gözenekli olarak katılaştıklarını göstermektedir (Şekil 3.6- e).

Atomize edilen alaşım türünün toz şekline etkisini incelemek amacıyla AISI 304 paslanmaz çelik alaşımı atomize edilmiştir. Şekil 3.7'de üretilen AISI 304 paslanmaz çelik alaşımına ait tozlar verilmiştir. Genel olarak küresel, yuvarlak, patates şekilli, çubuksu, iğnemsiz, ligamentel, düzensiz ve yassı gözenekli şekilde tozlar üretilmiştir. Küçük boyutlu tozlarda (-90  $\mu\text{m}$ ) yuvarlak ve küresel şekilli tozlar görülmekle birlikte, bunların miktarları aynı boyut aralığındaki CuSn10 bronz alaşımı tozlardakinden daha düşük düzeydedir. Küresel tozların yanısıra patates şekilli, boy/çap oranı bronz tozlarına oranla nispeten büyük olan ligament şekilli tozlar gözlenmiştir (Şekil 3.7- a,b,c,d). Daha yüksek toz boyutlarında (-355/+90  $\mu\text{m}$  ) toz şekli çubuksu, düzensiz şekilli, pulsu, gözenekli yassı, yuvarlak ve küresel şekilde oluşmuştur (Şekil 3.7- e,f). Nispeten büyük boyutlu (90  $\mu\text{m}$  üzeri) tozlar arasında belirgin şekilde küresel şekilli tozlar bulunmaktadır. Diğer taraftan, yapılan incelemelerde 90  $\mu\text{m}$ 'dan daha büyük bronz alaşımı tozlarda ise küresel şekilli tozların olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum her iki alaşıma ait toz şekillerini birbirinden ayıran en önemli özelliktir. Yüksek boyutlu tozlarda küresel şekilli toz oluşumunun paslanmaz çelik alaşımının fiziksel özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle, bronz alaşımına göre daha yüksek olan viskozite ve yüzey gerilimi etkili olmaktadır [62].

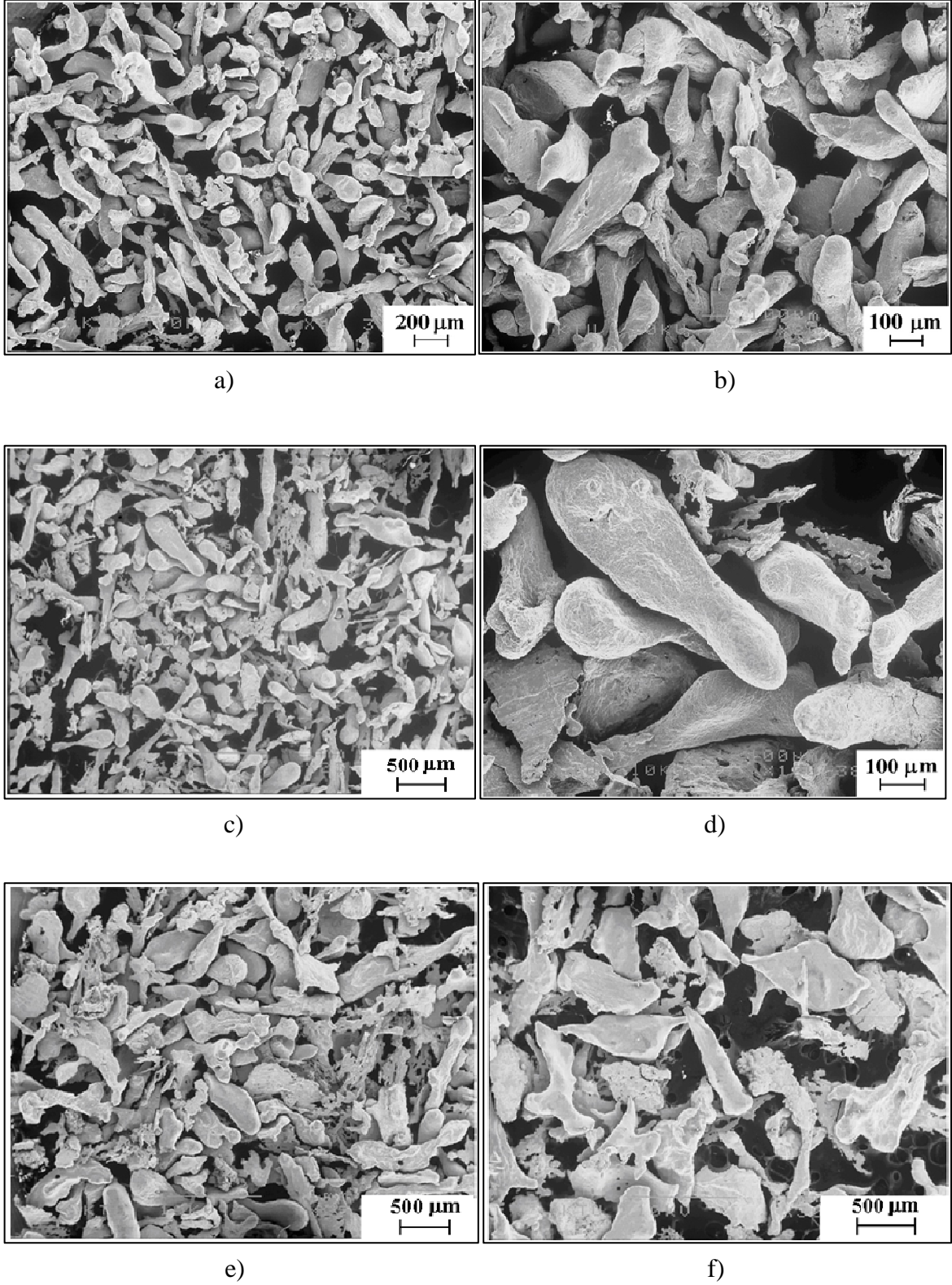




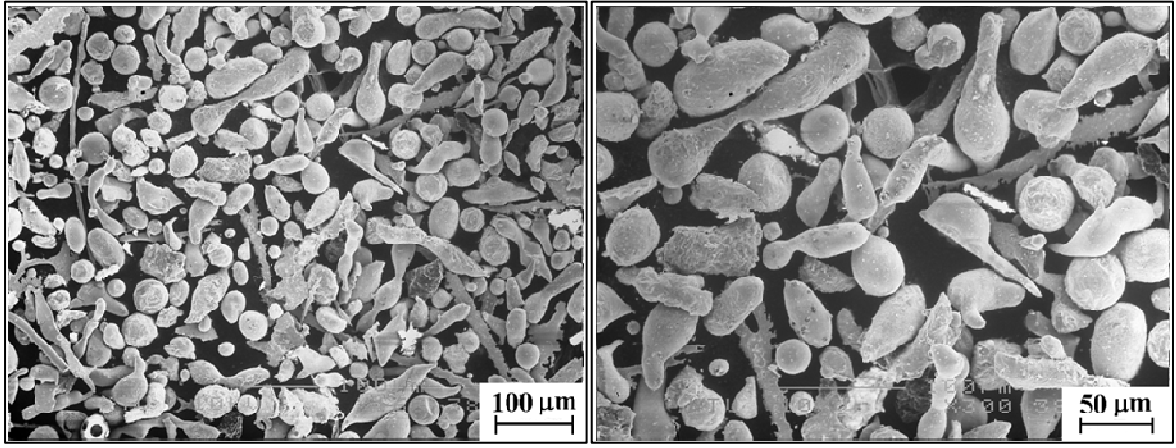
Şekil 3.4. Farklı boyutlardaki bronz tozları, a), b)  $-25 \mu\text{m}/\text{tava}$ , c), d)  $-36/+25 \mu\text{m}$



Şekil 3.5. Farklı boyutlardaki bronz tozları, a)  $-45/+36 \mu\text{m}$ , b)  $-63/+45 \mu\text{m}$ , c)  $-90/+63 \mu\text{m}$ , d)  $-125/+90 \mu\text{m}$

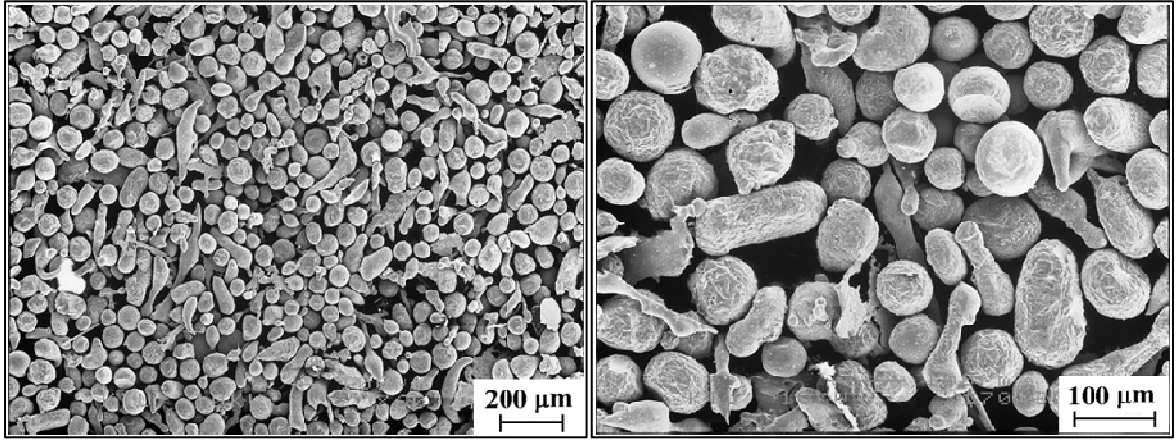


Şekil 3.6. Farklı boyutlardaki bronz tozları, a, b)  $-180/+125\ \mu\text{m}$ , c, d)  $-250/+180\ \mu\text{m}$ , e)  $-500/+250\ \mu\text{m}$ , f)  $-500/+355\ \mu\text{m}$



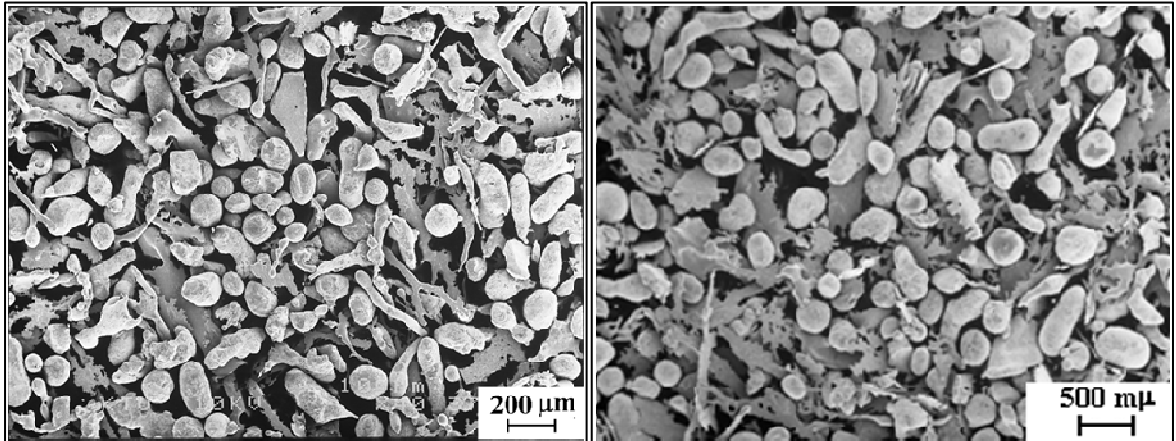
a)

b)



c)

d)



e)

f)

Şekil 3.7. Farklı boyutlardaki paslanmaz çelik tozları, a), b) -45 μm/tava, c), d) -90/+45 μm, e) -180/+125 μm, f) -355/+180 μm

### 3. 3. Atomizasyon Parametrelerinin Ortalama Toz Boyutuna ve Verime Etkisi

Bu çalışmada atomizasyon parametrelerinin ortalama toz boyutuna ve atomizasyon verimine etkilerini incelemek amacıyla CuSn10 bronz alaşımı atomize edilmiştir. Disk hızı, disk kanatçık sayısı, disk yüzey durumu, nozul çapı ve sıvı alaşım aşırı ısıtma miktarı incelenen atomizasyon parametreleridir. Ayrıca, ortalama toz boyutu ve verimin atomize edilen alaşım türüne göre değişimini incelemek amacıyla AISI 304 paslanmaz çelik alaşımı atomize edilmiştir.

Yapılan deneylerde, atomizasyon parametrelerine bağlı olarak 100–250 µm ortalama boyutta ve % 65–85 verimde CuSn10 bronz alaşımı tozları üretilmiştir. Denenen parametreler arasında en düşük ortalama boyutta ve en yüksek verimde toz üretimi 4 kanatçıklı, ZrO<sub>2</sub> kaplanmış diskle, 2 mm nozul çapında, 300° C aşırı ısıtma miktarında ve 75 m/s disk hızında elde edilmiştir. Atomizasyon esnasında, atomizasyonu olumsuz şekilde etkileyen disk üzerine sıvı metal tabakası oluşumu bu çalışmada gözlenmemiştir. Denenen her bir parametre ile ilgili sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

Alaşım türünün ortalama toz boyutuna ve verimine etkisi bronz ve paslanmaz çelik alaşımları için Şekil 3.8’de verilmiştir. 2 mm nozul çapında, 300° C aşırı ısıtma miktarında, 2 kanatçıklı, ZrO<sub>2</sub> kaplanmış diskle 57, 63, 70 ve 75 m/s disk hızlarında yapılan atomizasyonda, CuSn10 bronz alaşımına ait ortalama toz boyutunun AISI 304 paslanmaz çelik alaşımına göre belirgin şekilde düşük, verimin ise yüksek olduğu gözlenmiştir. 57, 63, 70 ve 75 m/s disk hızlarında bronz alaşımı için elde edilen ortalama toz boyutu değerleri sırasıyla 237, 201, 169 ve 113 µm olurken, paslanmaz çelik için 267, 233, 223 ve 188 µm olarak gerçekleşmiştir. Aynı disk hızlarında verim değerleri bronz alaşımı için % 75, 78, 81 ve 83 olarak gerçekleşirken, paslanmaz çelik için % 66, 68, 72 ve 74 olarak elde edilmiştir. Bunun sebebinin Bölüm 2.1, Tablo 2.3’de verilen alaşım özelliklerinde bronz alaşımının paslanmaz çeliğe göre yoğunluğunun yüksek, viskozite ve yüzey gerilmesinin daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [13, 33, 54, 63, 66, 90, 91]. Bölüm 1.2.3’de verilen ortalama toz boyutuna ait (11) nolu eşitlik de bunu desteklemektedir.

Disk hızının ortalama toz boyutuna ve verimine etkisi 50–75 m/s arasında değişen disk hızlarında, 2 ve 3 mm nozul çaplarında yapılan deneylerle incelenmiştir. Disk hızı arttıkça ortalama toz boyutunun azaldığı ve verimin yükseldiği gözlenmiştir (Şekil 3.9). Bu durum, disk hızının artmasıyla, bölüm 1.2.2.3’de verilen (4) nolu eşitlik uyarınca, santrifüj

kuvvetin artmasından kaynaklanmıştır. Sıvı metale verilen enerji artacağından, sıvı metal daha küçük damlacıklara parçalanıp katılaşır, daha küçük ortalama boyutta ve daha yüksek verimde tozlar elde edilir [13, 32-35, 37, 47, 90, 92, 93]. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, 50, 57, 63, 70 ve 75 m/s disk hızlarında, 2 kanatçıklı ZrO<sub>2</sub> kaplanmış diskle, 2 mm nozul çapında yapılan deneylerde ortalama toz boyutları sırasıyla 241, 237, 201, 169 ve 113 µm olarak bulunmuştur. Artan disk hızıyla ortalama toz boyutu belirgin bir şekilde azalmaktadır. Aynı eğilim toz verimi açısından da söz konusu olup, 50, 57, 63, 70 ve 75 m/s disk hızlarında sırasıyla % 73, 75, 78, 81 ve 83 olarak gerçekleşmiştir.

Disk kanatçık sayısının etkisini incelemek amacıyla 2 ve 4 kanatçık sayısı kullanılmıştır. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, kanatçık sayısının artmasıyla ortalama toz boyutu azalmakta, toz verimi artmaktadır. Disk kanatçık sayısının artmasıyla sıvı metal radyal kanatçıklar arasında daha iyi sınırlanır ve disk üzerinde kaymaya fırsat bulamadan disk kenarından daha büyük bir santrifüj kuvvetle savrulur. Bir başka ifade ile, 2'den 4'e artan kanatçık sayısı ile diskin santrifüj enerjisi sıvı metale daha verimli olarak aktarılmaktadır [26, 36]. Bu durum, elde edilen tozun ortalama boyutunun azalmasına ve 500 µm elek altı toz miktarının yani toz veriminin artmasını sağlamaktadır. 2 kanatçıklı diskle 70 ve 75 m/s disk hızlarında 2 mm nozul çapında elde edilen ortalama toz boyutu değerleri sırasıyla 169 ve 113 µm olurken, verim değerleri % 80 ve 81 olarak gerçekleşmiştir. 4 kanatçıklı disk için aynı disk hızlarında ve yine 2 mm nozul çapında elde edilen ortalama toz boyutu değerleri 143 ve 105 µm, verim ise % 81 ve 83 olarak elde edilmiştir.

Nozul çapının ortalama toz boyutuna ve verime etkisi 2, 2,5, 3 ve 3,5 mm nozul çaplarında, 63 ve 70 m/s disk hızlarında yapılan deneylerle belirlenmiştir (Şekil 3.11). Nozul çapının 2 mm'den 3,5 mm doğru artmasıyla ortalama toz boyutunun arttığı ve toz veriminin azaldığı görülmektedir. Bu, beklenen bir sonuç olup başka araştırmacılar tarafından da aynı etki gözlenmiştir [13, 26, 27, 35, 36, 90]. Şekilde görüldüğü gibi, 2 kanatçıklı ZrO<sub>2</sub> kaplanmış diskle 70 m/s disk hızında yapılan deneylerde 2 mm nozul çapında 169 µm ortalama boyutunda ve % 80 verimde toz üretilirken, aynı şartlarda 3,5 mm nozul çapında bu değerler sırasıyla 220 µm ve % 70 olarak gerçekleşmiştir. Nozul çapının artmasıyla atomizasyon diski üzerine akıtılan sıvı metal debisi artmakta, disk tarafından sıvı metalin birim hacmine verilen enerji miktarı azalmaktadır. Bir başka ifade ile, atomizasyon diskinin santrifüj enerjisi daha fazla sıvı metal tarafından paylaşılmakta ve

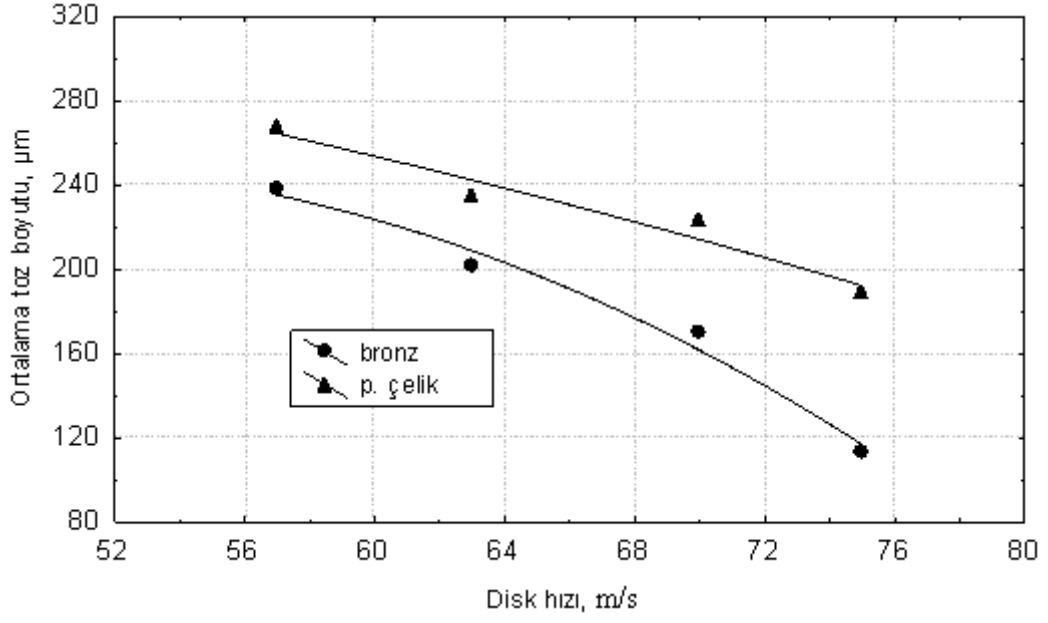
sıvı metal daha düşük bir enerji ile disk kenarından atomize edilmektedir. Sonuç olarak, üretilen tozlar daha kaba boyutlu ve toz verimi de daha düşük olmaktadır.

Aşırı ısıtma miktarının ortalama toz boyutuna ve verimine etkisi 150, 250, 300, 350 ve 450 °C'lik aşırı ısıtma miktarlarında yapılan deneylerle ortaya konmuştur (Şekil 3.12). 300 °C'lik aşırı ısıtma miktarında en düşük ortalama toz boyutu ve en yüksek toz verimi elde edilmiştir. Aşırı ısıtma miktarının artmasıyla sıvı metalin yüzey gerilimi ve viskozitesi azalmaktadır [29, 60, 66]. Bu durumun ortalama toz boyutunu azaltıcı yönde etki yapması beklenir [46, 48]. Ancak, aşırı ısıtmanın bu etkisi sınırsız değildir. Çok yüksek aşırı ısıtma miktarlarında sıvı metalin viskozitesi önemli miktarda düşer. Bu durum sıvı metalin atomizasyon esnasında disk üzerinde tutunamayıp kaymasına sebep olur ve sıvı metale enerji aktarımı zorlaşır [26, 27, 51]. Ayrıca, aşırı ısıtmanın artması sıvı metaldeki oksitlenmeyi artıracak gibi tozların soğuma hızını da azaltır. Yüksek aşırı ısıtma miktarlarında diskte atomize olan sıvı metal damlacıkları katılaşmalarını tamamlayamadan atomizör duvarına çarparak yassı şekilde ve büyük boyutlu olarak katılaşır. Bu durum ortalama toz boyutunu artırıcı yönde ve toz verimini azaltıcı yönde etki yapar [36]. Şekil 3.12, 300°C civarındaki aşırı ısıtmanın en optimum sonuçları verdiğini göstermektedir. Bu nedenle diğer atomizasyon parametrelerinin incelenmesinde aşırı ısıtma değeri 300°C olarak alınmıştır.

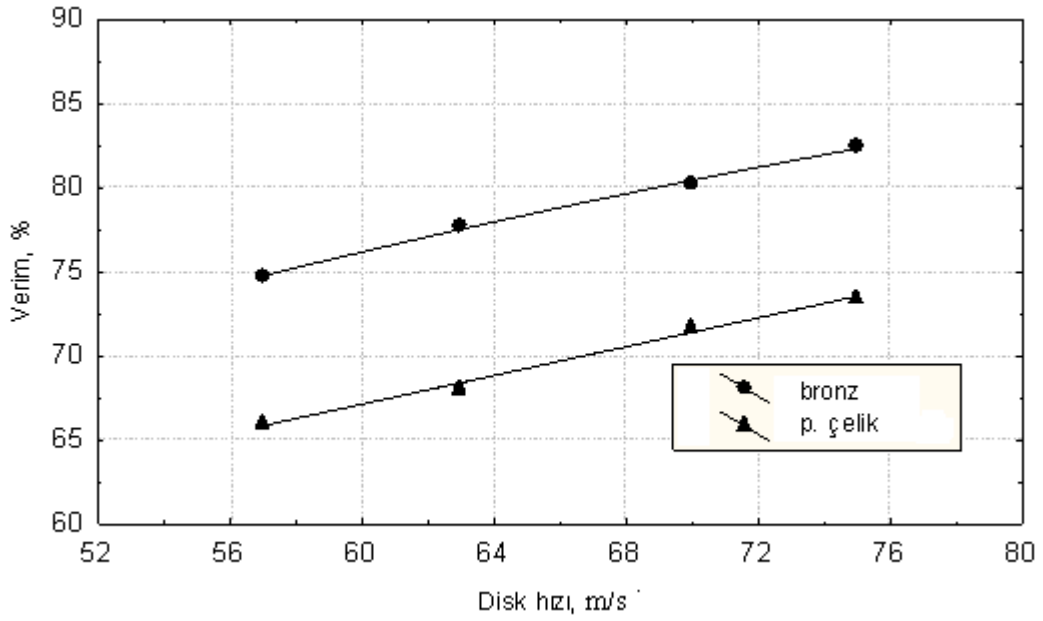
Disk yüzey durumunun etkisini incelemek amacıyla kaplanmamış diskin yanında ZrO<sub>2</sub> malzeme kaplanmış diskler kullanılmıştır. Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde, kaplanmamış diskin yüzey pürüzlülüğü 1 µm ve ZrO<sub>2</sub> malzeme kaplanmış diskin yüzey pürüzlülüğü ise 6 µm olduğu tespit edilmiştir. Atomizasyon deneylerinde, ZrO<sub>2</sub> malzeme kaplanmış diskin yüzeyi kaplanmamış diske göre daha düşük toz boyutu ve daha yüksek verim değerlerini sağladığı ve aradaki farkın büyük olduğu gözlenmiştir. 2 mm nozul çapında, 2 kanatçıklı ve 75 m/s disk hızında ZrO<sub>2</sub> malzeme kaplanmış diskle yapılan atomizasyonda 113 µm ortalama boyutta ve % 83 verimde tozlar üretilirken, kaplanmamış diskte bu değerler sırasıyla 180 µm ve % 69 olmuştur (Şekil 3.13). Disk hızı azaldıkça kaplanmış ve kaplanmamış diskler için verim değerleri arasındaki fark artmıştır. Kaplanmamış diskte tozun yanında önemli miktarda şerit (ribon) üretilmiştir. 50 ve 63 m/s disk hızlarında verim değerleri ZrO<sub>2</sub> malzeme kaplanmış diskte % 73 ve 78 olurken, kaplanmamış diskte % 45 ve 60 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum atomizasyonda diskin yüzey pürüzlülüğünün önemini ortaya koymaktadır. Disk yüzeyinin kaplanarak pürüzlülüğünün artırılması durumunda sıvı alaşım diski daha iyi ıslatır [31, 34, 36, 38, 54].

Böylece, sıvı alaşım disk yüzeyine daha iyi tutunur ve diskin santrifüj enerjisi sıvı metale daha verimli şekilde aktarılır. Sonuç olarak üretilen tozların ortalama boyutu düşer ve atomizasyon verimi de artar [13, 36, 90]. Diğer taraftan, 2 kanatçıklı kaplanmamış ve  $ZrO_2$  malzeme kaplanmış disklere ait -500/355  $\mu m$  boyuttaki tozların stereo mikroskobu görüntüleri toz şekillerinde belirgin bir farklılığı ortaya çıkarmıştır (Şekil 3.14).  $ZrO_2$  kaplanmış diskle yapılan atomizasyonda elde edilen tozlar pulsu şekilde oluşurken, aynı şartlarda kaplamasız diskle üretilen tozların boyları uzun olup fiber şeklindedir. Bu durumdan, yüzeyi kaplanmamış ve pürüzlülük değeri düşük diske yapılan atomizasyon esnasında sıvı metalin diske tutunamadığı, bu sebeple de tam olarak parçalanamadığı anlaşılmaktadır. Sıvı metal parçalanmasının tam olarak gerçekleşmediği şartlarda toz üretiminin yanında fiber şekilli toz ve şerit (ribon) şeklinde ürün elde edilmektedir. Öte yandan, disk yüzey durumunun atomizasyona etkisi atomizasyon diski kanatçık kenarına kısa süreli tutunarak katılmış ve atomizasyon anında diskten fırlatılmış metal parçacıklar üzerinde incelenmiştir (Şekil 3.15).  $ZrO_2$  malzeme kaplanmış diske ait parçacıkların nispeten daha uzun ve kalın olduğu, kaplanmamış diske ait olanların ise daha ince ve şerit biçiminde olduğu görülmektedir. Bu durum sıvı metalin  $ZrO_2$  malzeme kaplanmış diski daha iyi ıslatması sonucu parçacıkların daha uzun süre disk kanatçık kenarında tutunduğunu göstermektedir. Kaplanmamış diskte ise, sıvı metalin diski zayıf ıslatması sonucu parçacıklar disk kanatçık kenarına uzun süre tutunamamakta ve bu sebeple boyutları küçük olmaktadır. Ayrıca,  $ZrO_2$  malzeme kaplanmış diskle yapılan deneylerde, disk kanatçık kenarına tutunan malzeme kalınlığının azalan disk hızıyla arttığı gözlenmiştir. Disk hızının azalması kanatçık kenarına tutunan metal parçacığa daha düşük bir santrifüj enerji uygular ve parçacık kolaylıkla diskten ayrılmaz. Ancak, belli bir boyuta kadar büyüyen parçacık artık kanatçık kenarına tutunamaz ve diskten ayrılır.



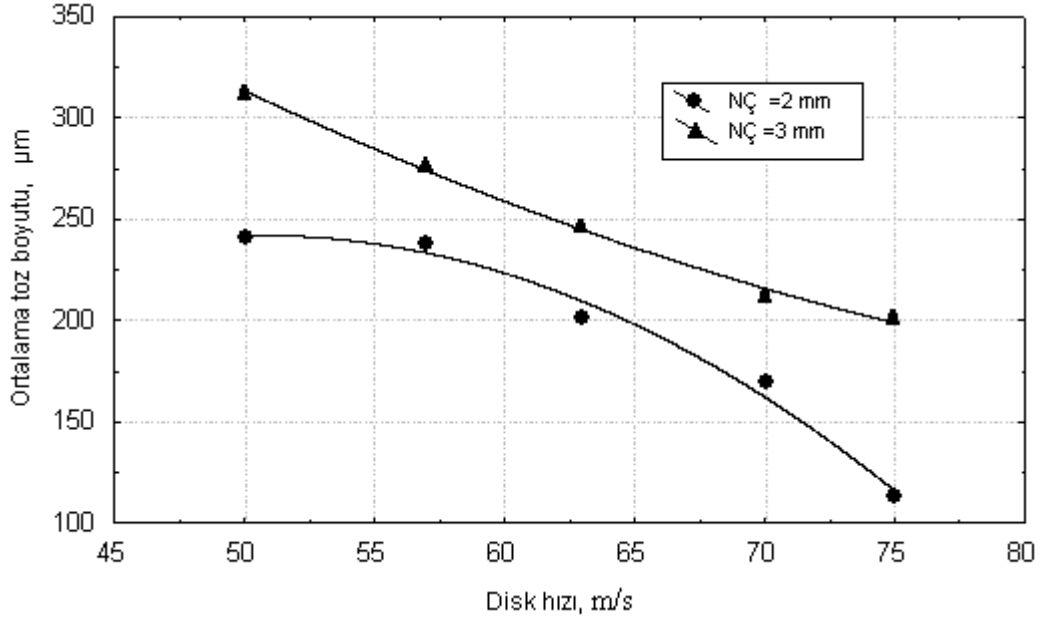


a)

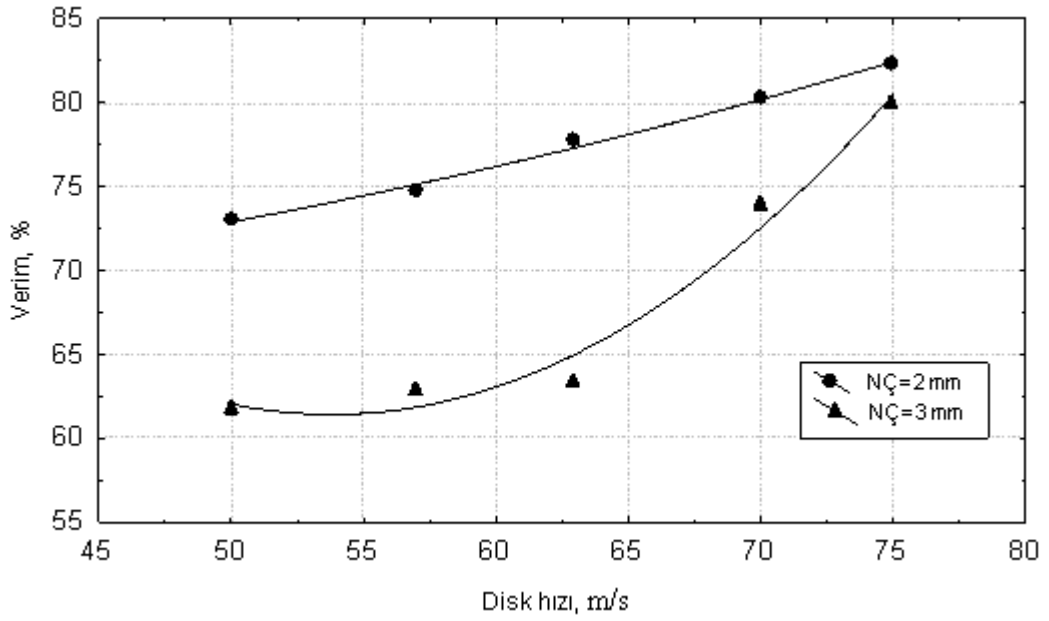


b)

Şekil 3.8. Atomize edilen alaşım türünün, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DKS: 2, DYD:  $\text{ZrO}_2$  kaplanmış, NÇ: 2 mm, AIM:  $300\text{ }^\circ\text{C}$ )

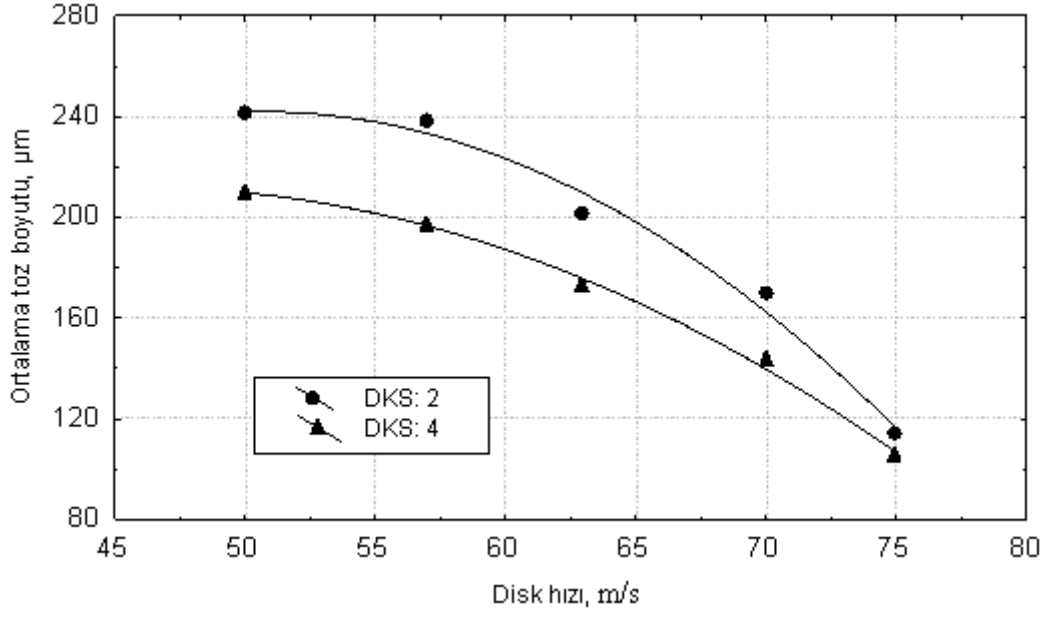


a)

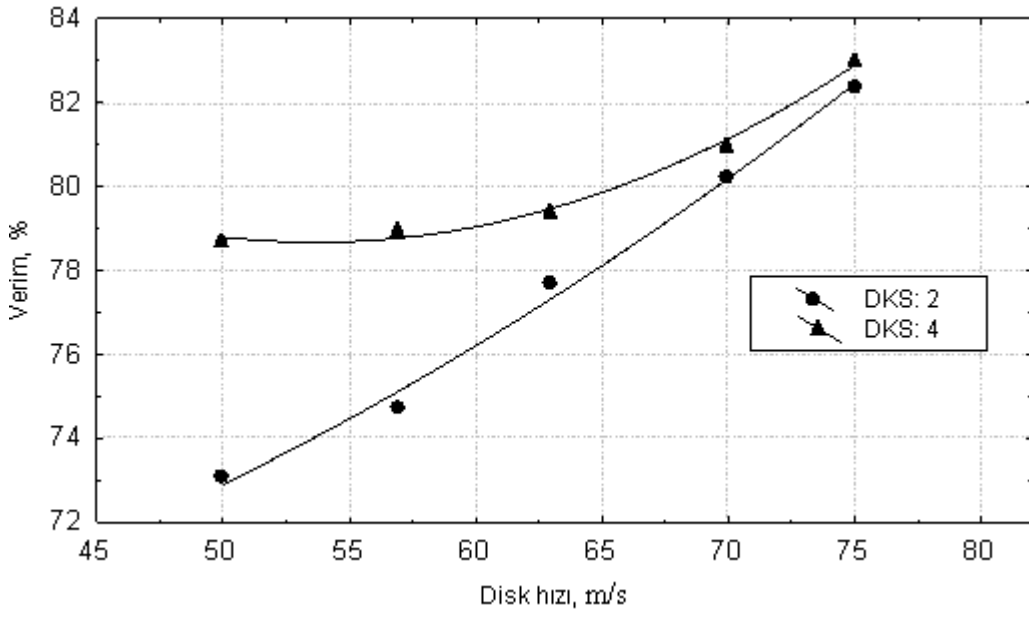


b)

Şekil 3.9. Disk hızının, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DKS: 2, DYD:  $ZrO_2$  kaplanmış, AIM: 300 °C)

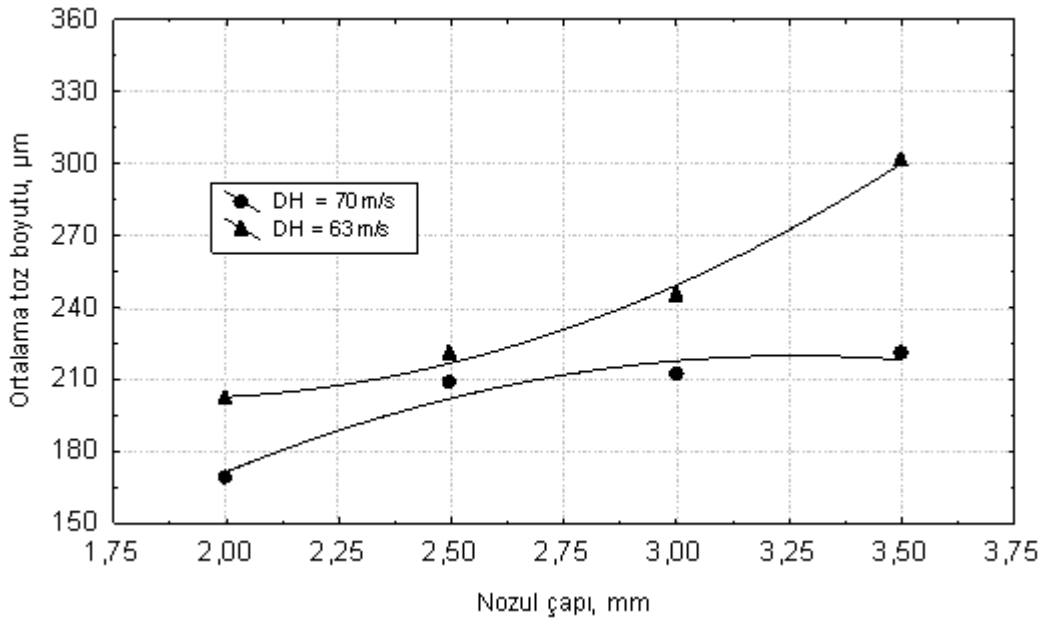


a)

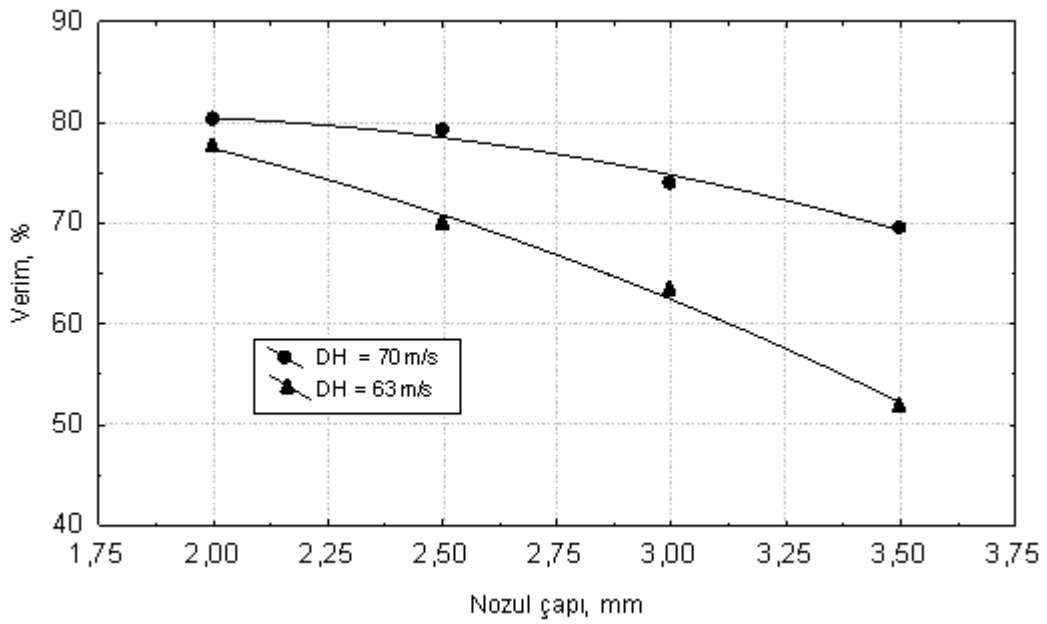


b)

Şekil 3.10. Disk kanatçık sayısının, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DYD:  $\text{ZrO}_2$  kaplanmış, NÇ: 2 mm, AIM:  $300^\circ\text{C}$ )

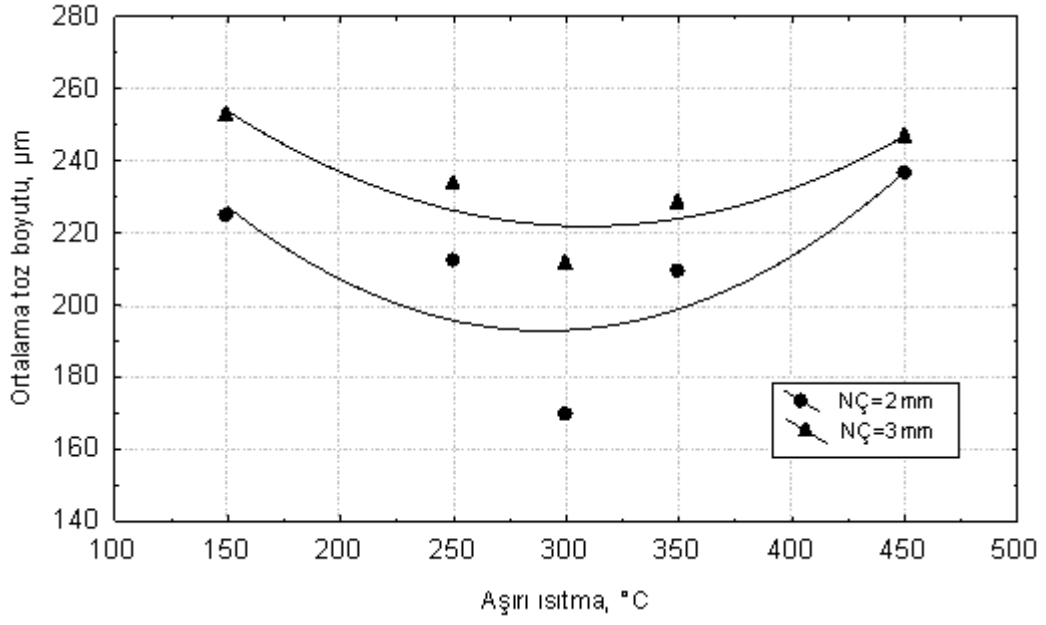


a)

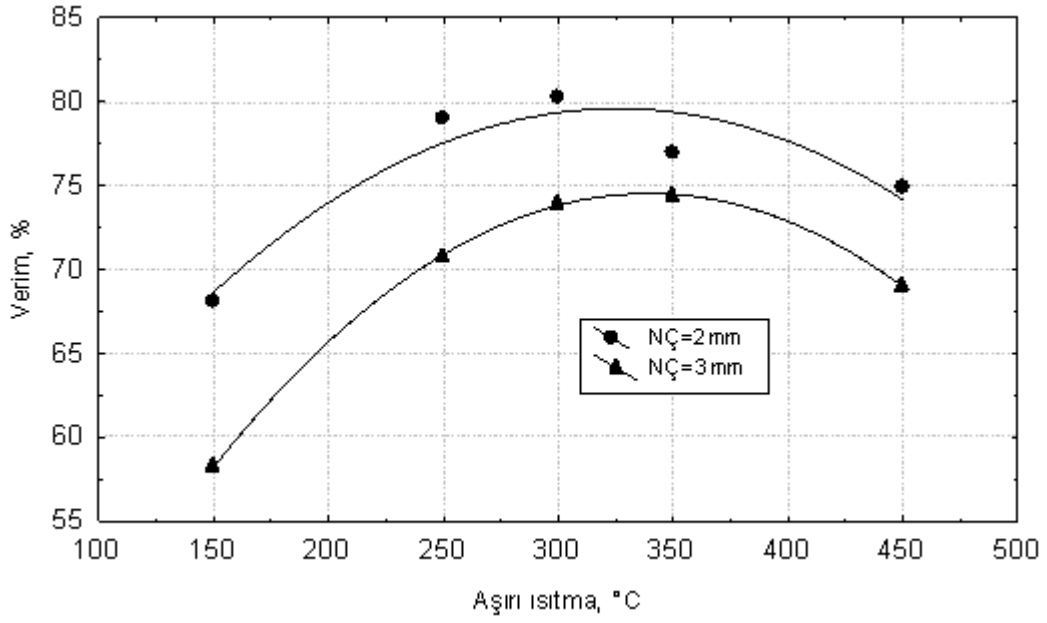


b)

Şekil 3.11. Nozul çapının, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DKS: 2, DYD: ZrO<sub>2</sub> kaplanmış, AIM: 300 °C)

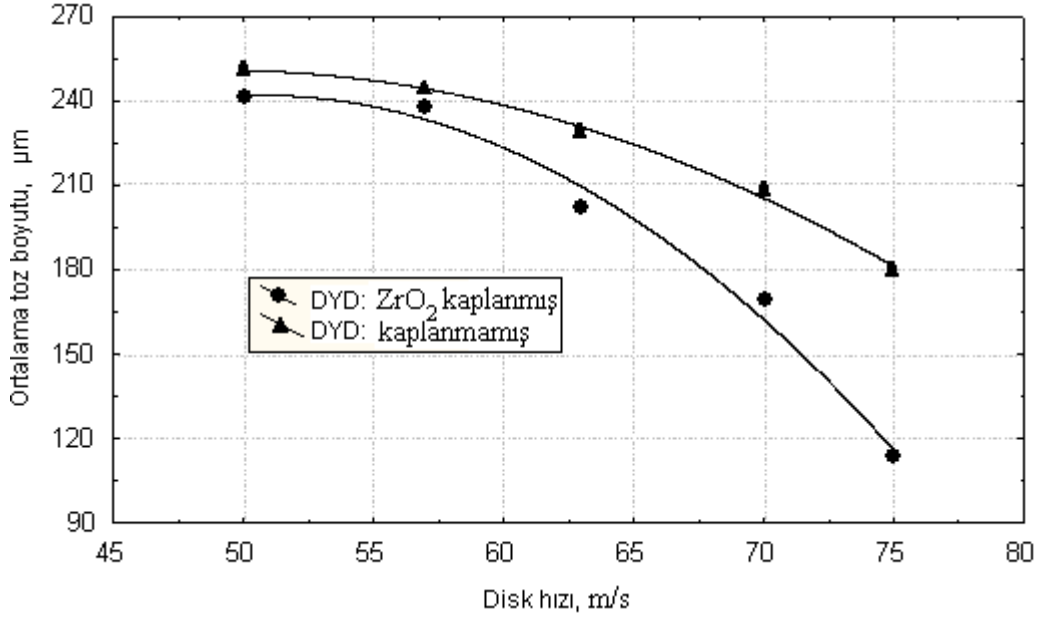


a)

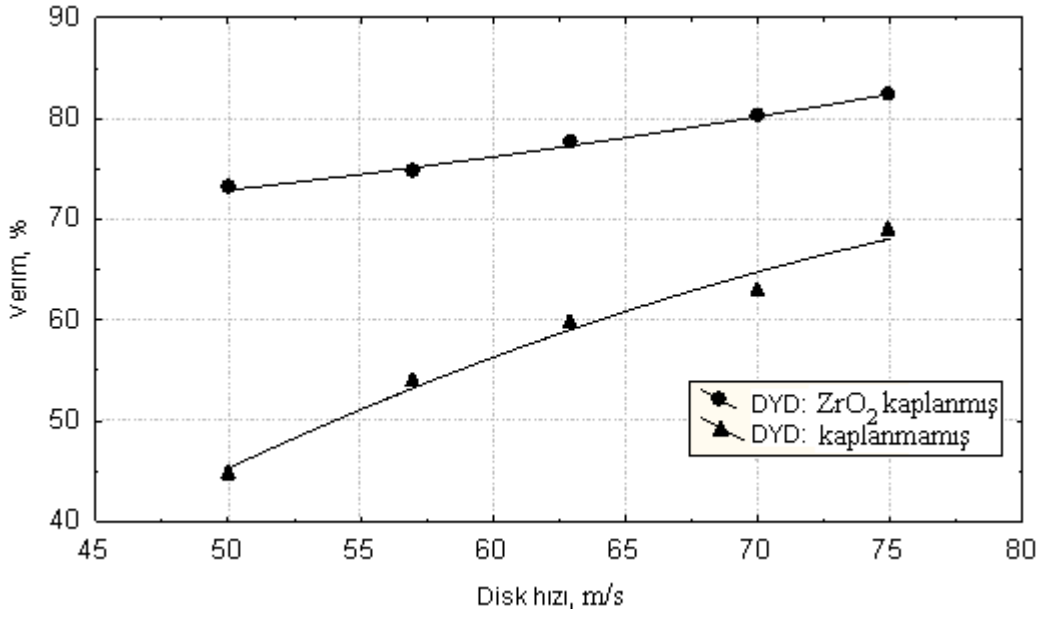


b)

Şekil 3.12. Aşırı ısıtmanın, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DKS: 2, DYD:  $\text{ZrO}_2$  kaplanmış, DH: 70 m/s)

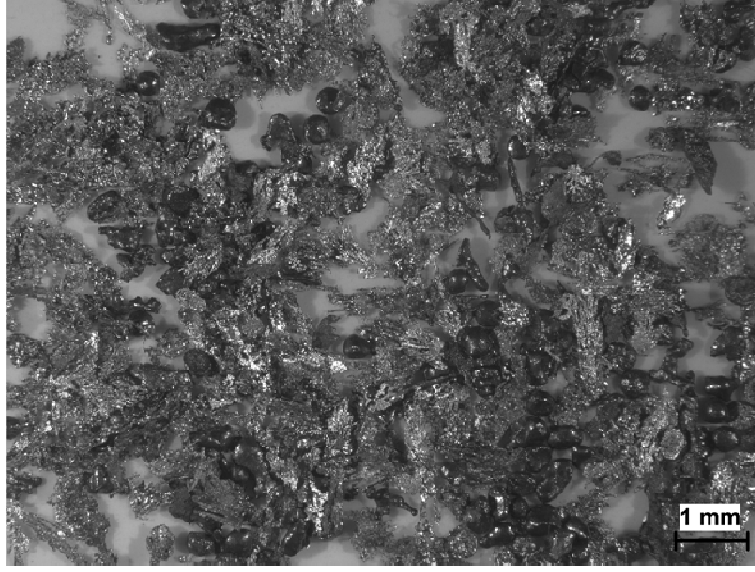


a)

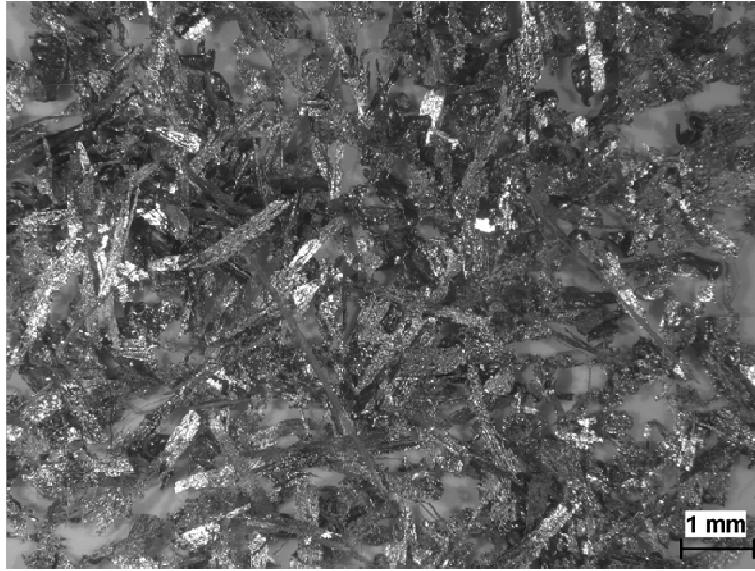


b)

Şekil 3.13. Disk yüzey durumunun, a) ortalama toz boyutuna, b) verime etkisi (DKS: 2, NÇ: 2 mm, AIM: 300 °C)

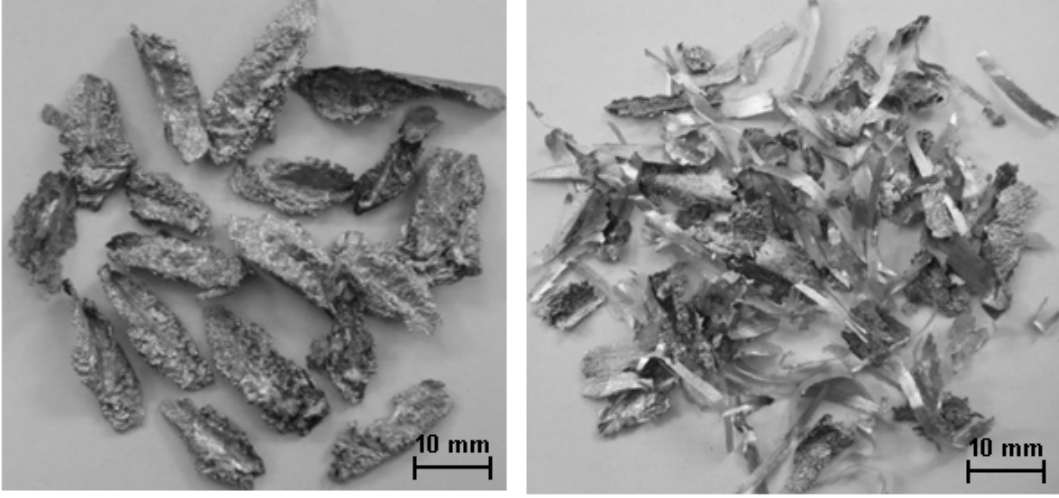


a)



b)

Şekil 3.14. Disk yüzey durumunun -500/355  $\mu\text{m}$  boyuta sahip tozların morfolojisine etkisi. a) DYD:  $\text{ZrO}_2$  kaplanmış, b) DYD: kaplanmamış (DKS: 2, NÇ: 2 mm, DH: 75 m/s, AIM: 300  $^\circ\text{C}$ )



a)

b)

Şekil 3.15. Kaplamalı ve kaplamasız disk kullanılarak yapılan deneylerin hurdaları. a) DYD: ZrO<sub>2</sub> kaplanmış, b) DYD: kaplanamış (NÇ: 2 mm, DH: 75m/s, AIM: 300°C, DKS: 2)

### 3.4. Mikroyapı

Bu çalışmada kullanılan su jeti soğutmalı döner disk atomizasyonu yönteminde sıvı metal disk yüzeyine belirli bir yükseklikten düşerek çarptıktan sonra hız kazanıp disk kenarından atomize olur. Bu yöntem bu şekliyle, literatürde en etkili hızlı katılaştırma yöntemi olarak belirtilen soğutulmuş alt yüzeye çarptırma yöntemine (splat quenching) benzemektedir [92, 94, 95]. Bu yöntemin soğutma açısından en önemli farklılığı; atomizasyon diskinin alt kısmından yeterli miktarda su ile soğutulması ve etkili soğutma için disk malzemesinin ısı iletim katsayısı yüksek olan elektrolitik bakır malzemedен üretilmiş olmasıdır. 15 lt/dak gibi yüksek debideki soğutma suyunun ve bakır disk malzemesi kullanılması, atomizasyonun her anında diskin soğuk kalmasını sağlamaktadır. Böylece çok yüksek soğuma hızlarına (yaklaşık 10<sup>6</sup> K/s) ulaşılmış, çok ince mikroyapıya sahip hızlı katılaştırılmış toz ve şeritler üretilmiştir.

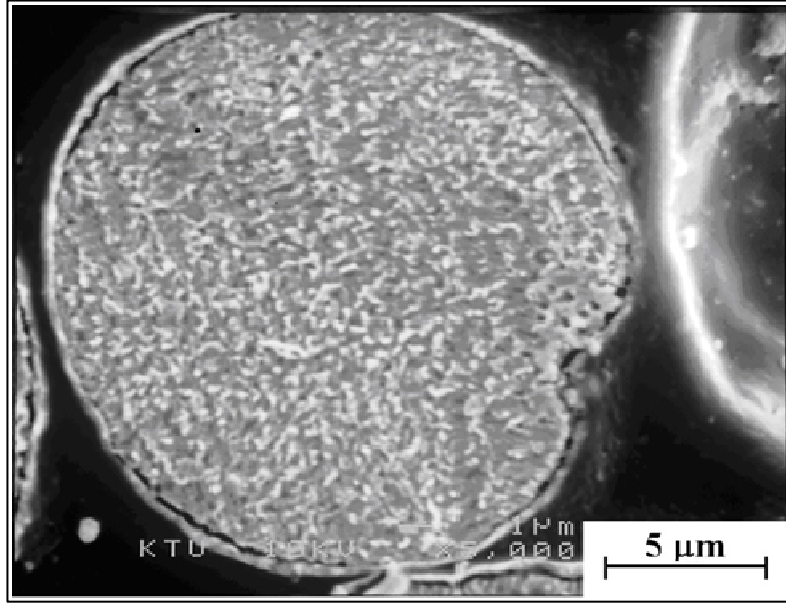
Üretilen CuSn10 bronz alaşımına ait 18-463 µm boyut aralığında değişen tozların SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 3.16-19'da verilmiştir. Elde edilen fotoğraflar üzerinde doğrusal kesiştirme yöntemi ile tozların hücre boyutları hesaplanmıştır. Yapılan ölçümlerde hücre boyutunun toz boyutuna bağlı olarak 0,5 µm - 9,09 µm arasında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca, mikroyapının genellikle eşeksenli hücreli olduğu, toz boyutunun



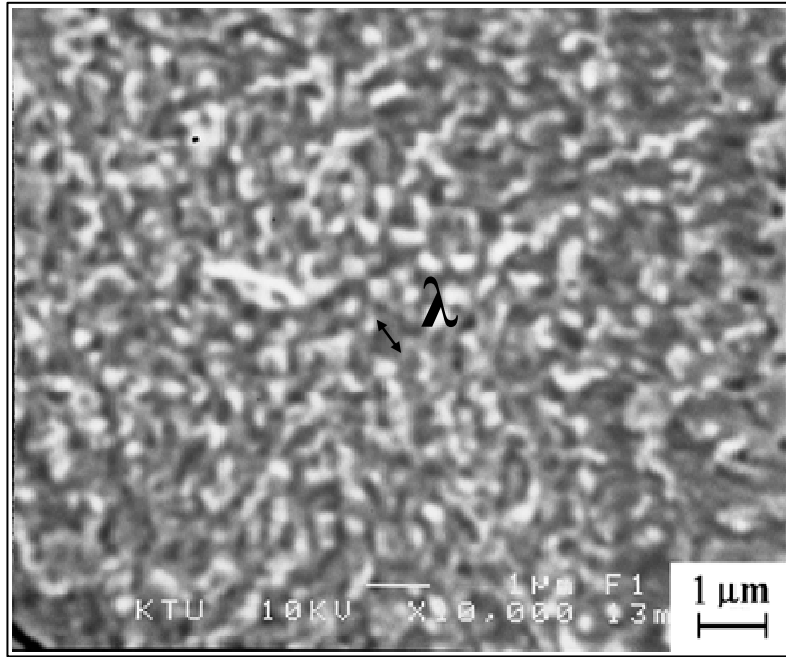
büyümesiyle hücre boyutunun büyüdüğü ve nispeten büyük boyutlu tozlarda mikroyapının hücresel-dendritik şekilli oluştuğu gözlenmiştir.

Deneylerde kullanılan aynı alaşımın piyasadan alındığı durumdaki iç yapısı Şekil 3.20’de verilmiştir. Dendritik bir mikroyapı mevcut olup ortalama İDKA yaklaşık 20  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür.

Tozların soğuma hızlarının hesaplanmasında Freyberg vd. [78] tarafından bronz alaşımı tozları için geliştirilen (17) nolu eşitlik kullanılmıştır. Bu eşitlikte belirtilen ikincil dendrit kol aralığı ( $\lambda$ ) olarak burada hücre boyutu alınmıştır. Yapılan incelemelerde, artan toz boyutu ile ortalama hücre boyutunun arttığı ve soğuma hızının azaldığı bulunmuştur. Bu durum başka araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir [50, 52, 58, 77, 81]. Tablo 3.1’de hücre boyutunun ve soğuma hızının toz boyutuyla değişimi verilmiştir. 18  $\mu\text{m}$  toz boyutu için ( $\lambda= 0,5 \mu\text{m}$ ) soğuma hızı  $5,82 \times 10^5 \text{ K/s}$  iken, 463  $\mu\text{m}$  toz boyutunda ( $\lambda= 9,09 \mu\text{m}$ )  $0,20 \times 10^3 \text{ K/s}$  hesaplanmıştır. Öte yandan, Prasad ve Henein [77] tarafından impuls atomizasyon yöntemiyle üretilen 200 – 1000  $\mu\text{m}$  boyut aralığındaki CuSn bronz alaşımı tozlarında hücre boyutu 5 – 20  $\mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. Freyberg vd. [78], 100 – 1000  $\mu\text{m}$  boyutundaki bronz alaşımı tozlarının hücre boyutunun 2,5 – 10  $\mu\text{m}$  arasında değiştiğini, soğuma hızının ise  $10^2 - 10^4 \text{ K/s}$  olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum bu çalışmada kullanılan yöntemin yüksek soğuma hızına sahip bronz alaşımı tozu üretimi konusunda literatürde yapılan çalışmalardan farkını ortaya koymaktadır.

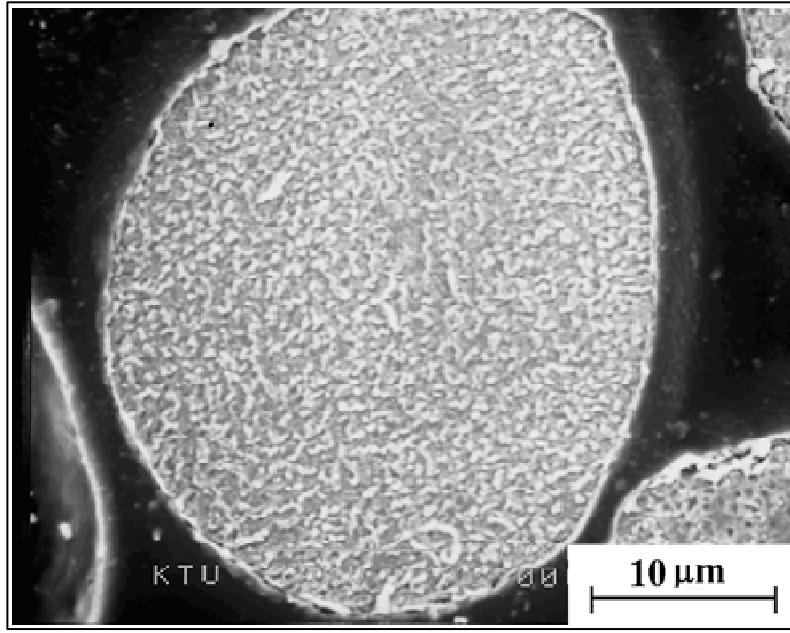


a)

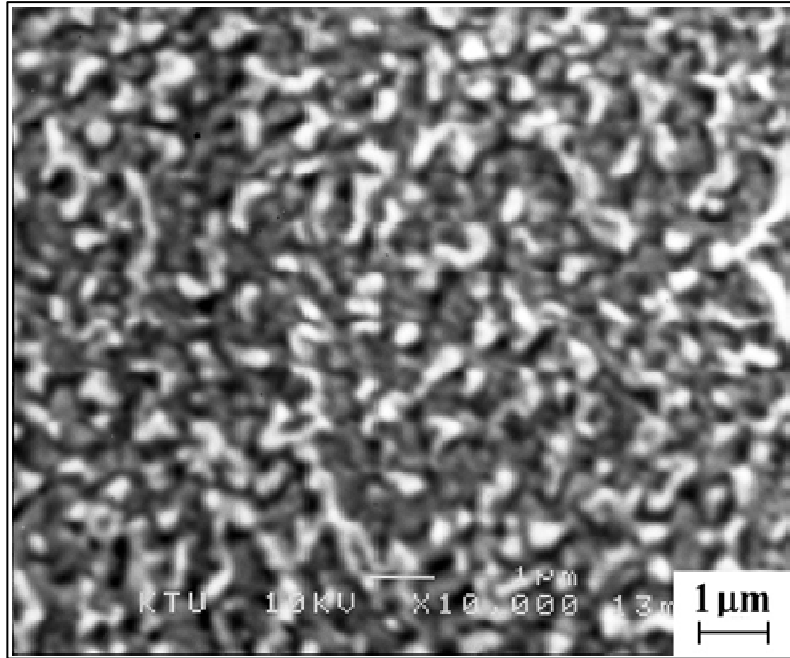


b)

Şekil 3.16. a) CuSn10 bronz alaşım tozu mikroyapısı (toz boyutu 18  $\mu\text{m}$ ),  
b) büyütülmüş mikroyapı ( $\lambda$ = hücre boyutu)

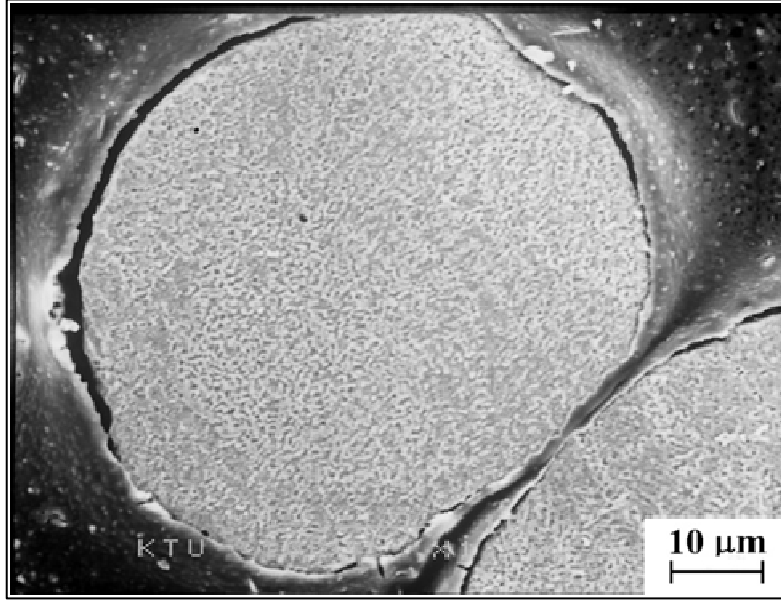


a)

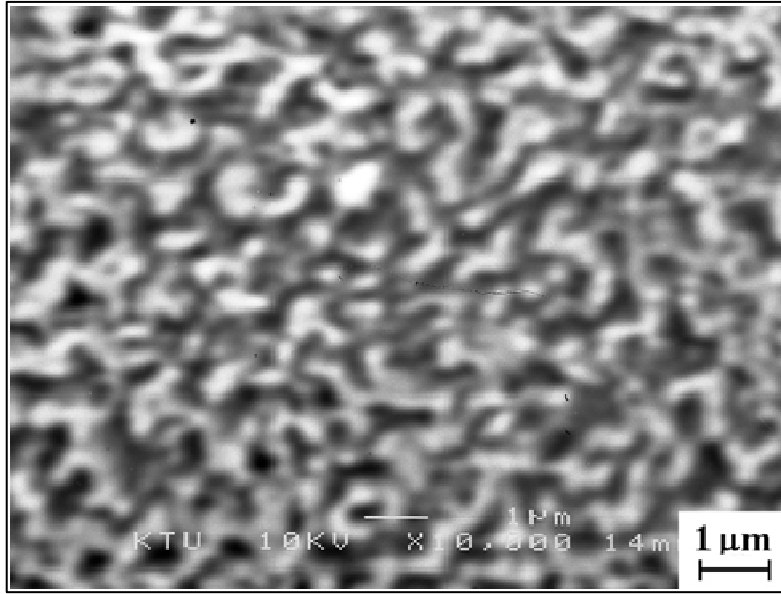


b)

Şekil 3.17. a) CuSn10 bronz alaşım tozu mikroyapısı (toz boyutu 32 μm),  
b) büyütülmüş mikroyapı

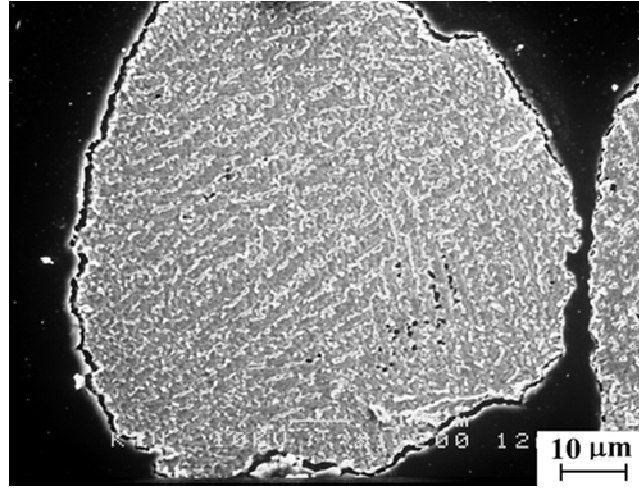


a)

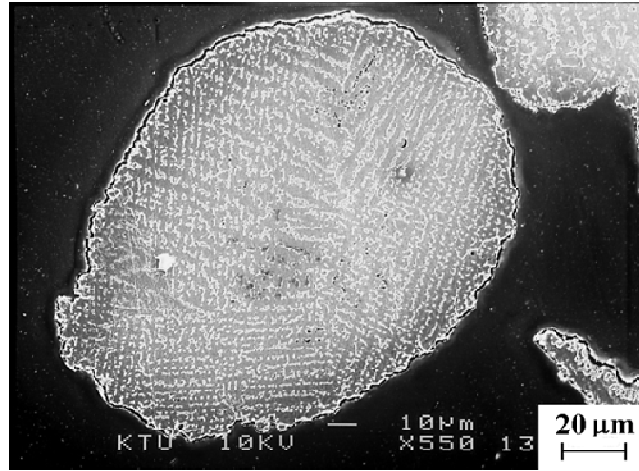


b)

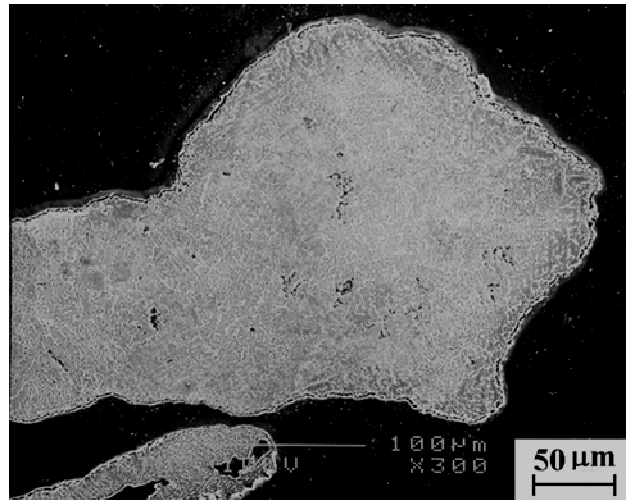
Şekil 3.18. a) CuSn10 bronz alaşım tozu mikroyapısı (toz boyutu 63 μm),  
b) büyütülmüş mikroyapı.



a)

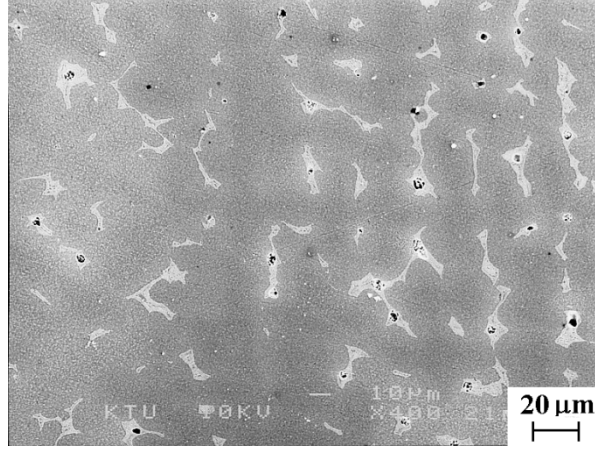


b)



c)

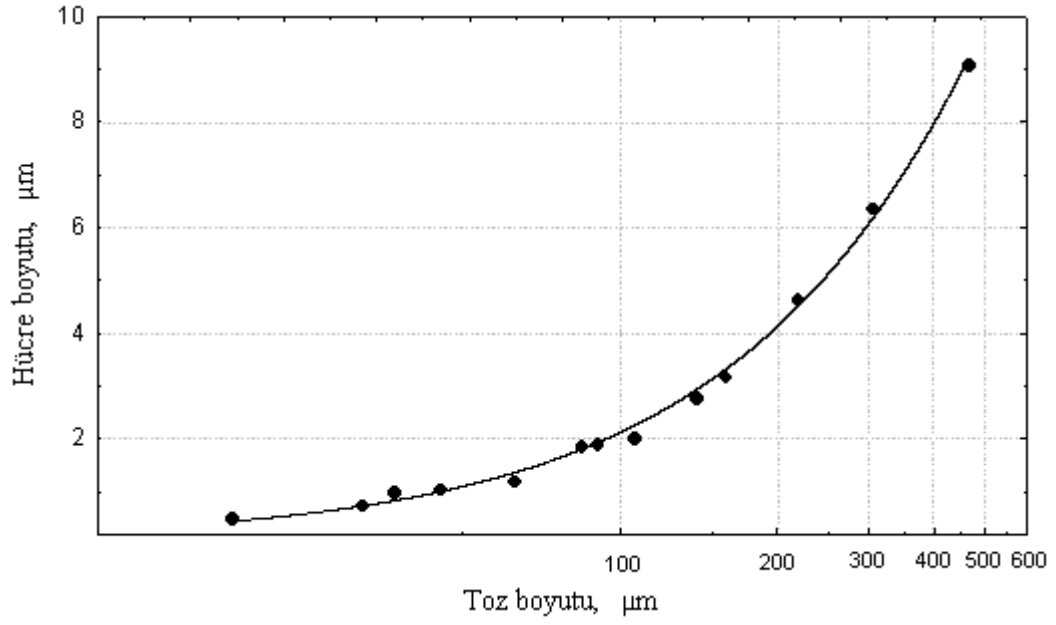
Şekil 3.19. Farklı boyutlardaki CuSn10 bronz alaşım tozu mikroyapıları. a) toz boyutu 84  $\mu\text{m}$ , b) toz boyutu 140  $\mu\text{m}$ , c) toz boyutu 302  $\mu\text{m}$



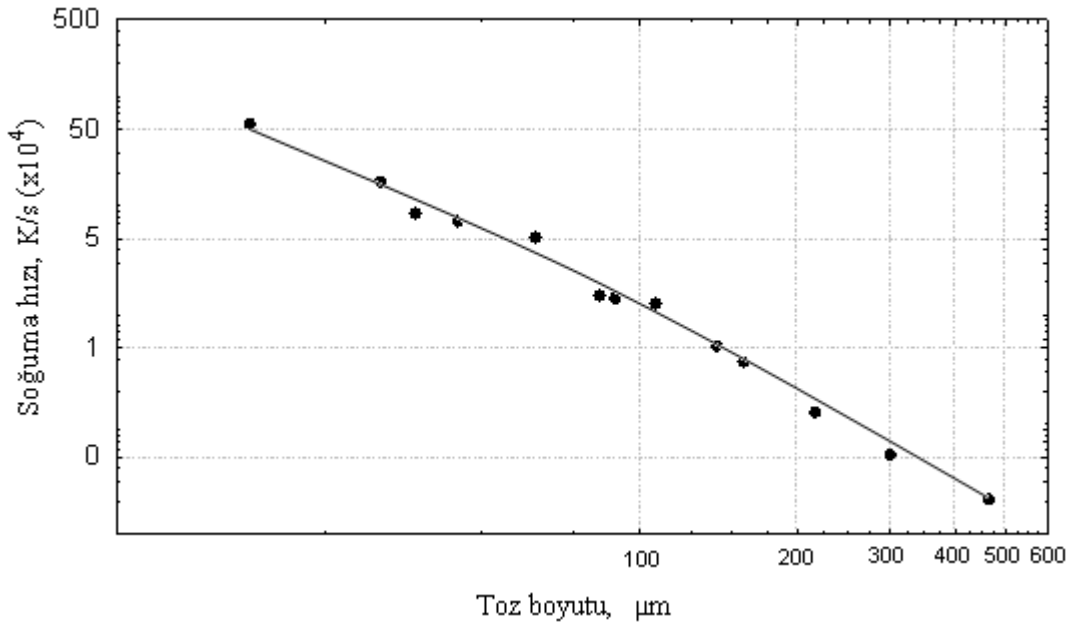
Şekil 3.20. CuSn10 bronz alaşımının mikroyapısı

Tablo 3.1. CuSn10 bronz alaşımı tozlarında toz boyutuna bağlı olarak hücre boyutunun ve soğuma hızının değişimi

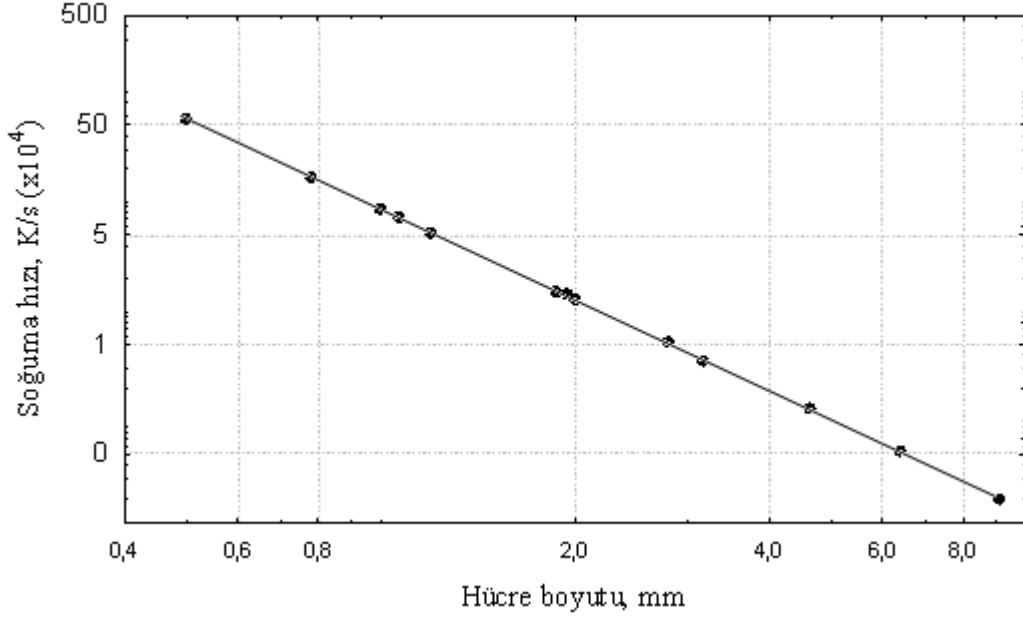
Toz boyutu ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$\epsilon$ ( $^{\circ}\text{K/s}$ )
18	0,50	$5,8 \times 10^5$
32	0,78	$1,7 \times 10^5$
37	1	$8,7 \times 10^4$
45	1,07	$7,2 \times 10^4$
63	1,20	$5,3 \times 10^4$
84	1,88	$1,5 \times 10^4$
90	1,94	$1,4 \times 10^4$
107	2	$1,3 \times 10^4$
140	2,78	$5,2 \times 10^3$
158	3,16	$3,7 \times 10^3$
217	4,63	$1,3 \times 10^3$
302	6,38	$0,5 \times 10^3$
463	9,09	$0,2 \times 10^3$



Şekil 3.21. CuSn10 bronz alaşımı tozlarında toz boyutuna bağlı olarak hücre boyutunun değişimi



Şekil 3.22. CuSn10 bronz alaşımı tozlarında toz boyutuna bağlı olarak soğuma hızının değişimi



Şekil 3.23. CuSn10 bronz alaşımı tozlarında hücre boyutuna bağlı olarak soğuma hızının değişimi

### 3.5. Üretilen Şeritlerin Özellikleri ve Mikroyapısı

Bu çalışmada CuSn10 bronz alaşımı ile yapılan deneylerde toz üretiminin yanısıra atomizasyon değişkenlerine bağlı olarak şerit üretimi de gerçekleştirilmiştir. 2 kanatçıklı kaplamasız disk kullanılarak yapılan deneylerde 15-95  $\mu\text{m}$  kalınlıkta, 3-6 mm genişlikte ve 45-72 mm boyunda düz veya çok az miktarda eğrisel formda şeritler üretilmiştir. Üretilen şeritlerden bazı örnekler Şekil 3.24'de gösterilmiştir.

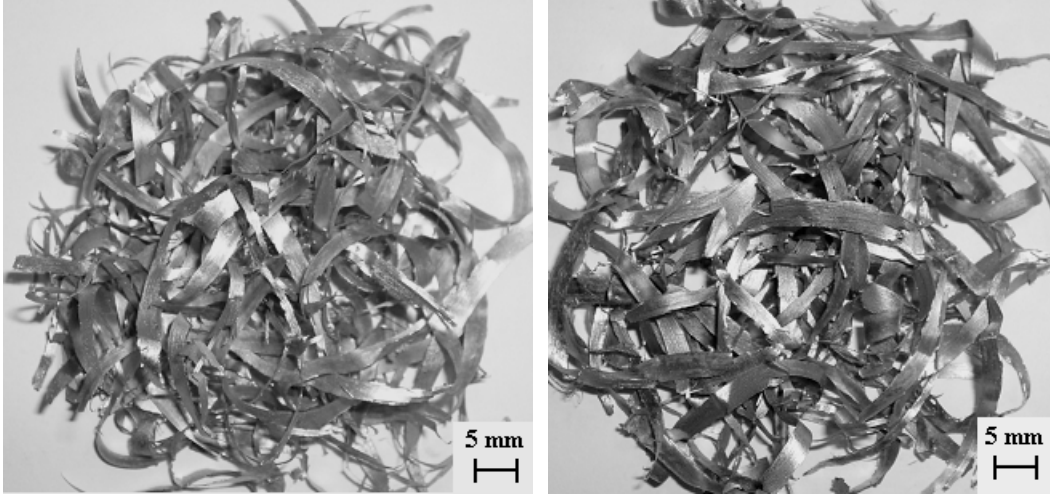
Üretilen şeritlerin diske temas eden alt yüzeyleri ile hava ile temas eden serbest yüzeylerinin stereo mikroskopta çekilen görüntüleri Şekil 3.25'de verilmiştir. Şeritlerin disk ile temas eden alt yüzeylerinde mikro düzeyde çukurcukların oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 3.25-a). Bu çukurcukların disk yüzey pürüzlülüğü, sıvı alaşım yüzey gerilmesi ve disk-şerit arayüzündeki oksitlerden dolayı oluşan zayıf ısı transferi bölgelerini temsil eden hava cepleri olduğu düşünülmektedir [90, 96, 97]. Şeritlerin hava ile temas eden serbest yüzeylerinde ise sıvı metalin akışı ile şekillenmiş olduğu izlenimini veren boylamasına çizgisel çıkıntılar bulunmaktadır (Şekil 3.25-b).

Disk hızının ve nozul çapının ortalama şerit kalınlığına ve verimine etkisi 50 – 75 m/s arasında değişen disk hızlarında, 2 ve 3 mm çapa sahip nozullar kullanılarak yapılan deneylerle incelenmiştir. Şekil 3.26-a'da görüldüğü gibi, 50, 57, 63, 70 ve 75 m/s disk



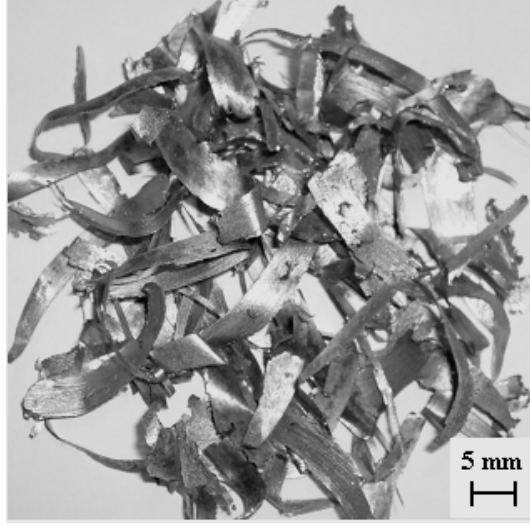
hızlarında ve 2 mm nozul çapında yapılan deneylerde, ortalama şerit kalınlığı sırasıyla 75, 59, 47, 45 ve 34  $\mu\text{m}$  olarak bulunurken, aynı disk hızlarında 3 mm nozul çapı kullanılarak yapılan deneylerde şerit kalınlığı sırasıyla 89, 70, 57, 46 ve 35  $\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir. Artan disk hızıyla ve azalan nozul çapıyla ortalama şerit kalınlığı azalmıştır. Bu durum, Bölüm 3.3'de açıklandığı üzere, sıvı metale verilen enerji ile ilgilidir. Artan disk hızı ile sıvı metale aktarılan santrifüj enerji artacağından, disk üzerine yayılan sıvı metal daha ince şerit halinde elde edilir. 50, 57, 63, 70 ve 75 m/s disk hızlarında ve 2 mm nozul çapında yapılan deneylerde şerit üretim verimi sırasıyla % 42, 35, 28, 22 ve 20 olarak bulunmuştur. Aynı disk hızlarında 3 mm nozul çapı için ise verim değerleri % 29, 24, 22, 16 ve 7 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.26-b). Yukarıdaki verilerden, disk hızının ve nozul çapının artmasıyla şerit üretim veriminin azaldığı anlaşılmaktadır. Yapılan deneylerde, aşırı ısıtma miktarındaki değişimin şerit boyutlarında ve veriminde önemli bir değişikliğe yol açmadığı belirlenmiştir.

Şekil 3.27-32'de üretilen CuSn10 bronz alaşımı şeritlerin SEM mikroyapı fotoğrafları 15, 18, 25, 30, 40, 53, 60, 75 ve 95  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki şeritler için verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, yüzey alanı geniş olan şeritlerin çok hızlı soğumalarından dolayı çok ince taneli ve eş eksenli bir mikroyapı elde edilmiştir. Literatürde belirtilen, şeritler üzerinde farklı hücre boyutu bölgeleri (diskle temas eden, orta kısım ve hava ile temas eden), bu çalışmada elde edilen şeritlerde belirgin şekilde değildir [14, 40, 97, 98, 99]. Şeritlerin ortalama hücre boyutu doğrusal kesiştirme yöntemiyle hesaplanmıştır. Şeritlerin tüm kesitlerini gösteren fotoğraflarda çok küçük görünen hücreler sayılmadığından, şeritlerin üzerinden yüksek büyültmede ikinci bir görüntü alınarak hücre sayma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hücre boyutuna bağlı olarak soğuma hızı Freyberg vd [78] tarafından CuSn alaşımları için geliştirilen (17) nolu eşitlik kullanılmıştır. Şerit kalınlığına bağlı hücre boyutu ( $\lambda$ ) ve hücre boyutuna bağlı soğuma hızı değerleri Tablo 3.2'de ve Şekil 3.33-3.34'de verilmiştir. Yapılan incelemelerde, artan şerit kalınlığıyla ortalama hücre boyutunun arttığı ve soğuma hızının azaldığı bulunmuştur. 15, 25, 40, 60 ve 95  $\mu\text{m}$  kalınlıktaki şeritler için ortalama hücre boyutları 0,37, 0,45, 0,50, 0,56 ve 0,65  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Belirtilen bu hücre boyutlarına karşılık gelen soğuma hızları ise  $1,3 \times 10^6$ ,  $7,8 \times 10^5$ ,  $5,8 \times 10^5$ ,  $4,3 \times 10^5$  ve  $2,8 \times 10^5$  K/s'dir.



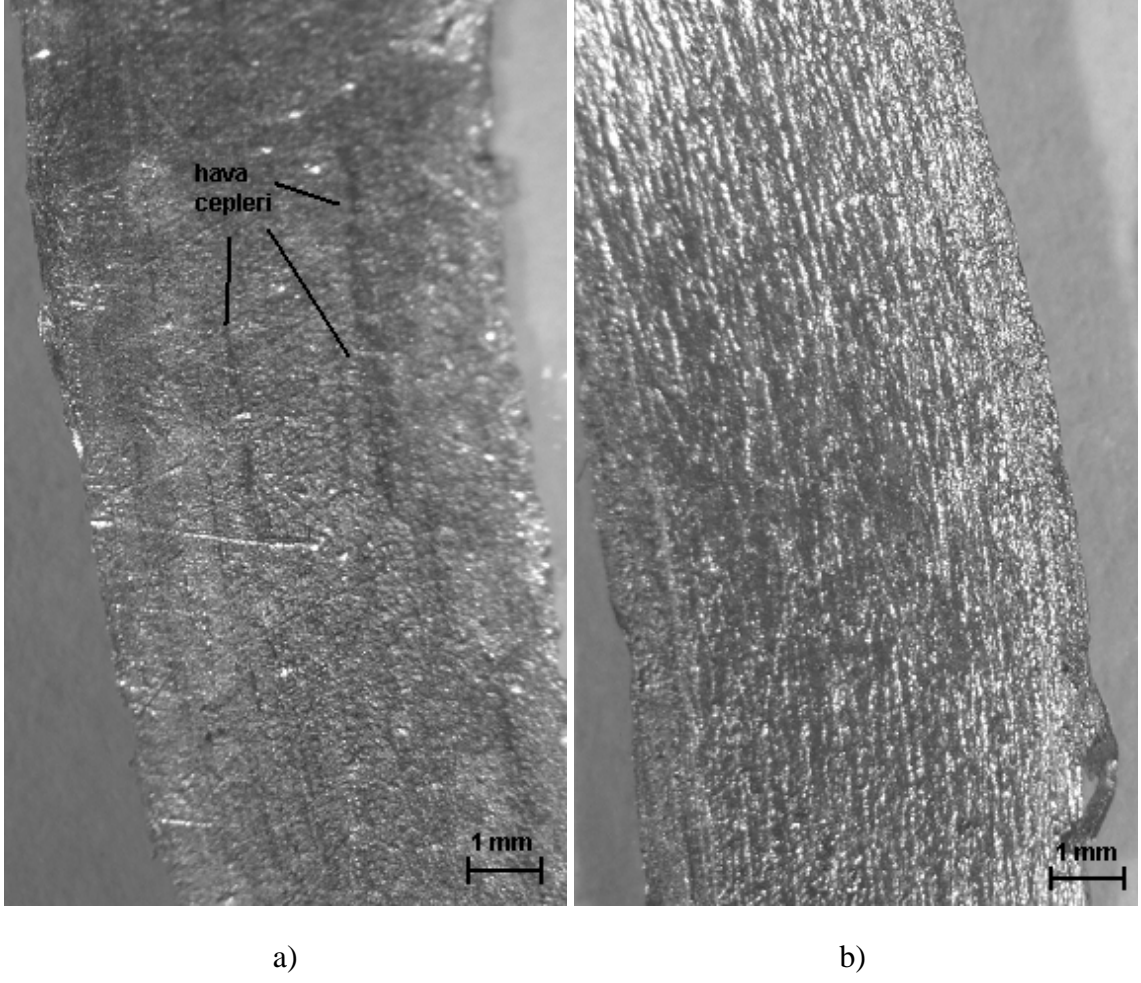
a)

b)

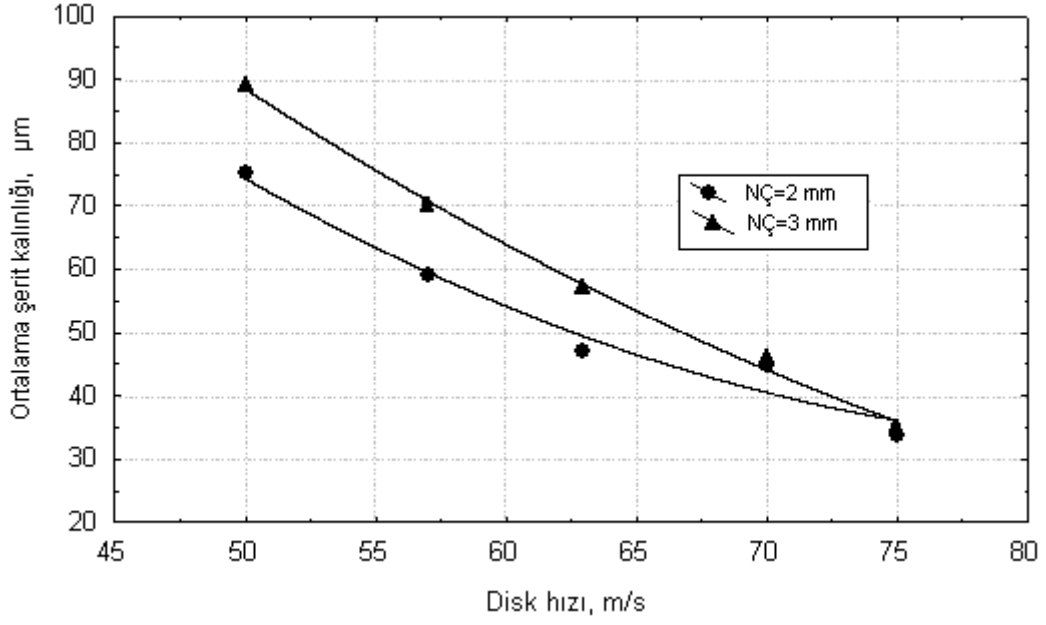


c)

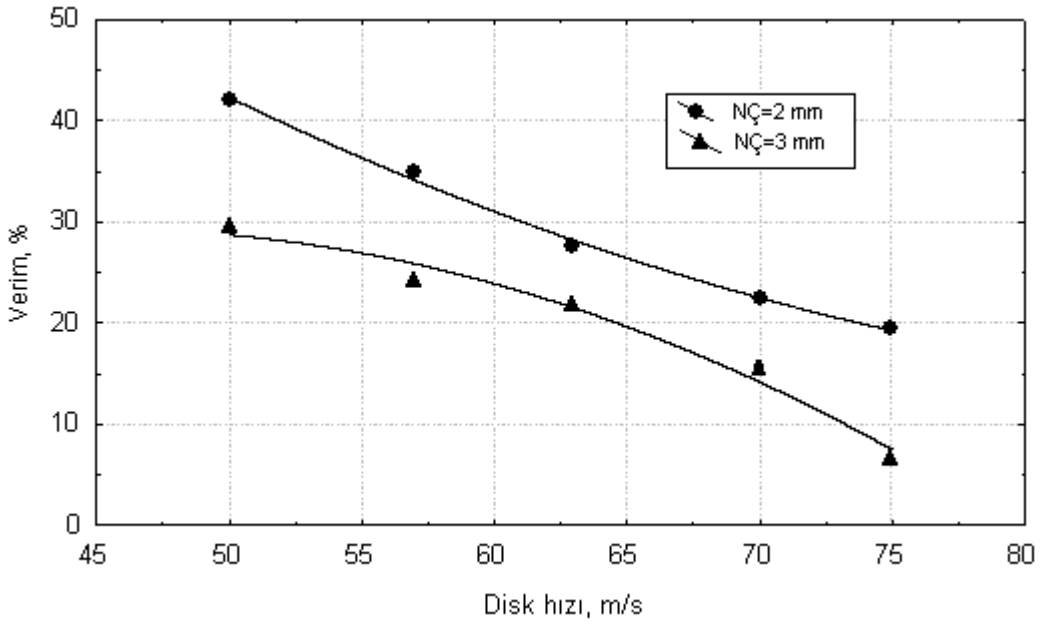
Şekil 3.24. Üretilen CuSn10 bronz alaşımı şeritlerinin görüntüleri a) ince, b) orta, c) kalın şeritler



Şekil 3.25. Üretilen şeritlerin stereo mikroskobu görüntüleri. a) diskle ile temas eden yüzey, b) hava ile temas eden yüzey

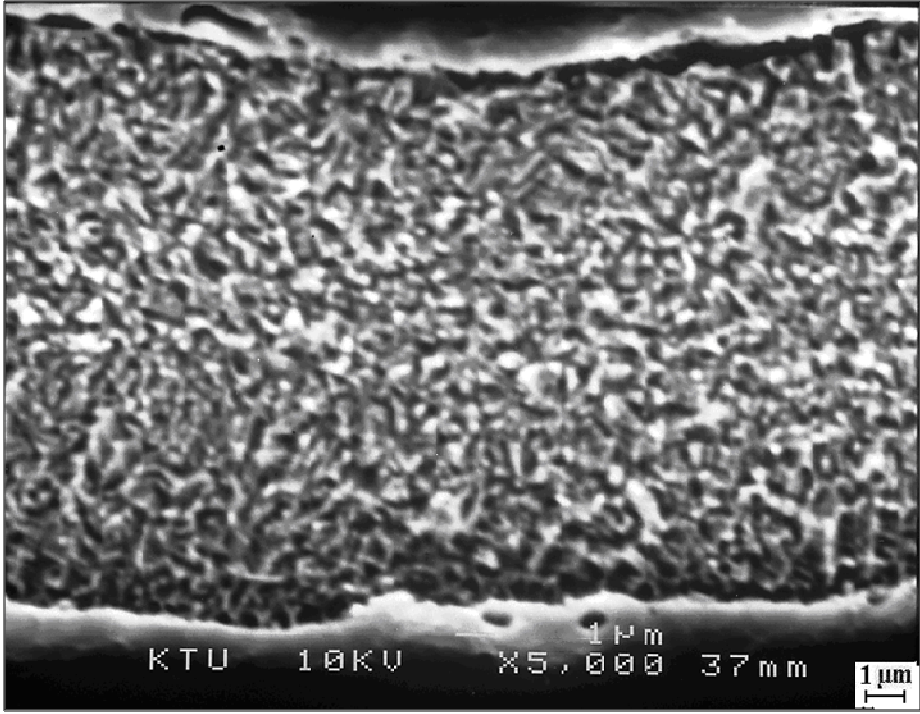


a)

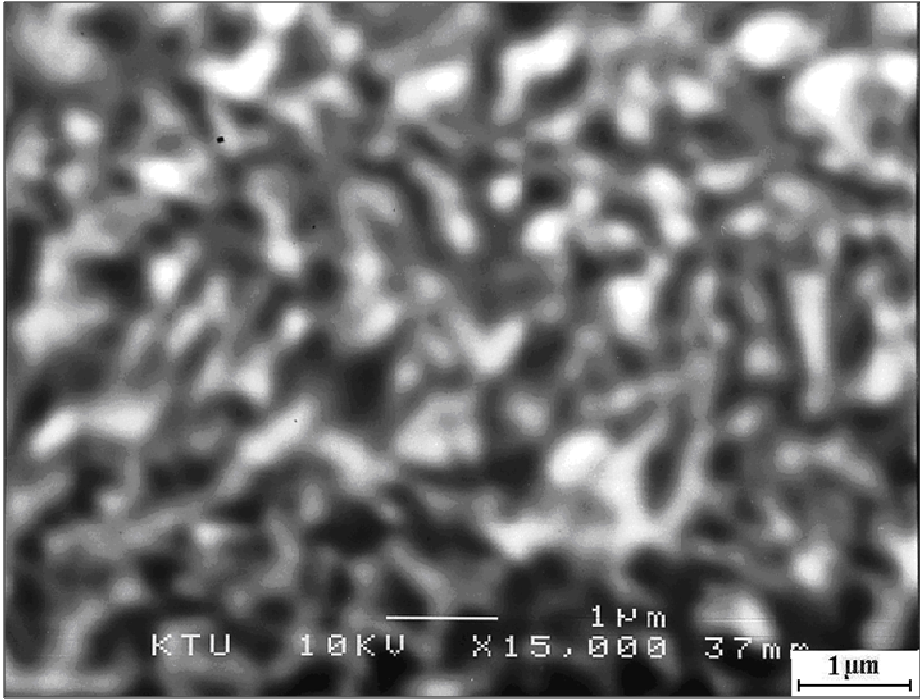


b)

Şekil 3.26. Disk hızının ve nozul çapının, a) Şerit kalınlığına, b) Şerit verimine etkisi (DKS: 2, DYD: kaplanmamış, AIM: 300  C)

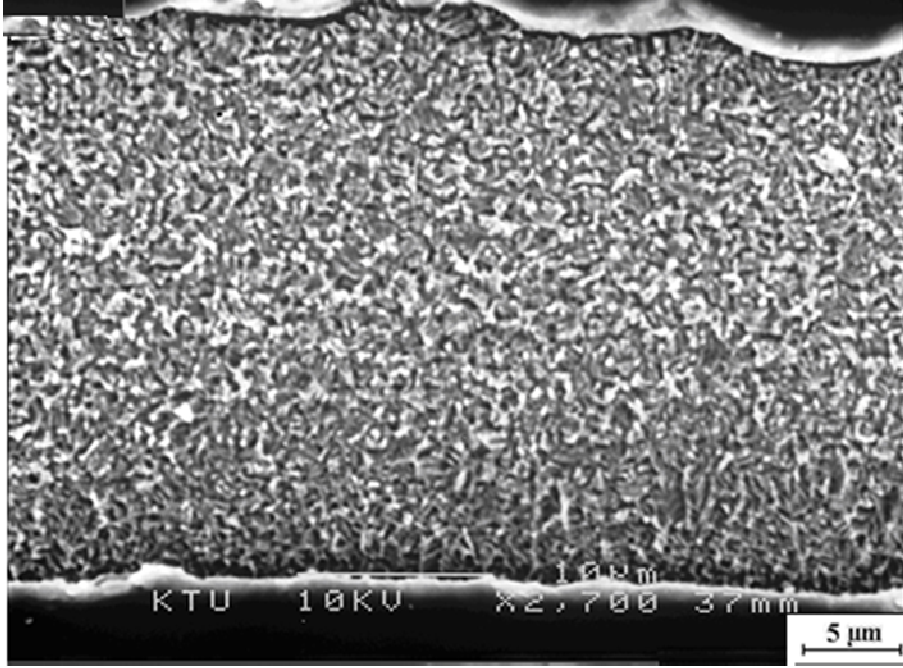


a)

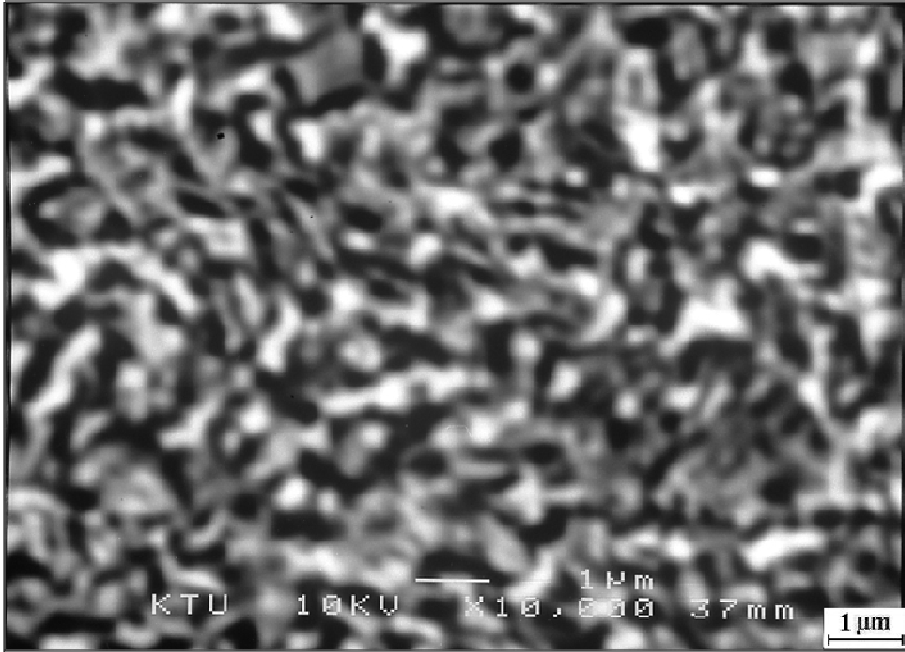


b)

Şekil 3.27. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 15 µm),  
b) büyük büyütmedeki mikroyapı

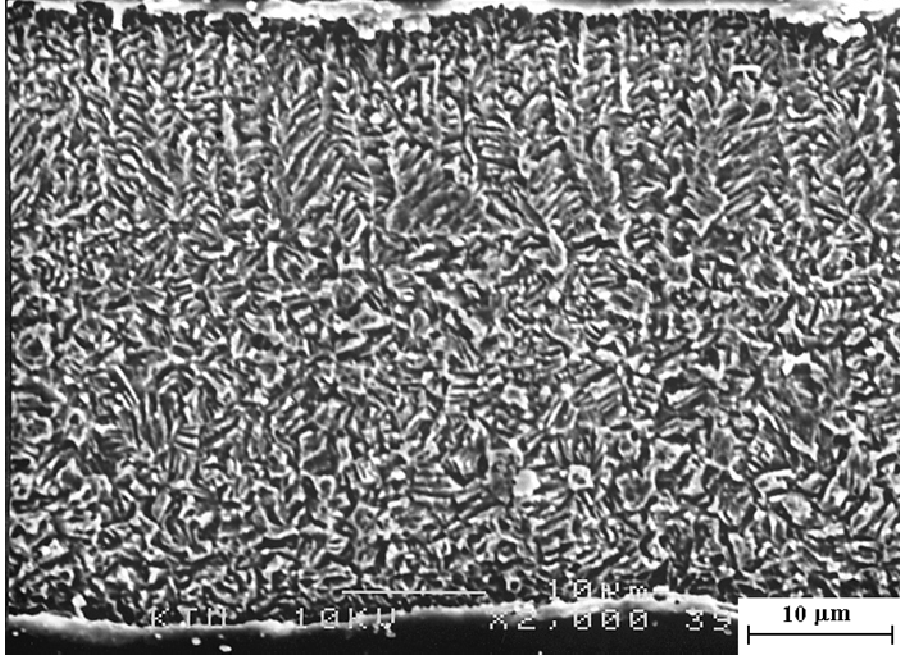


a)

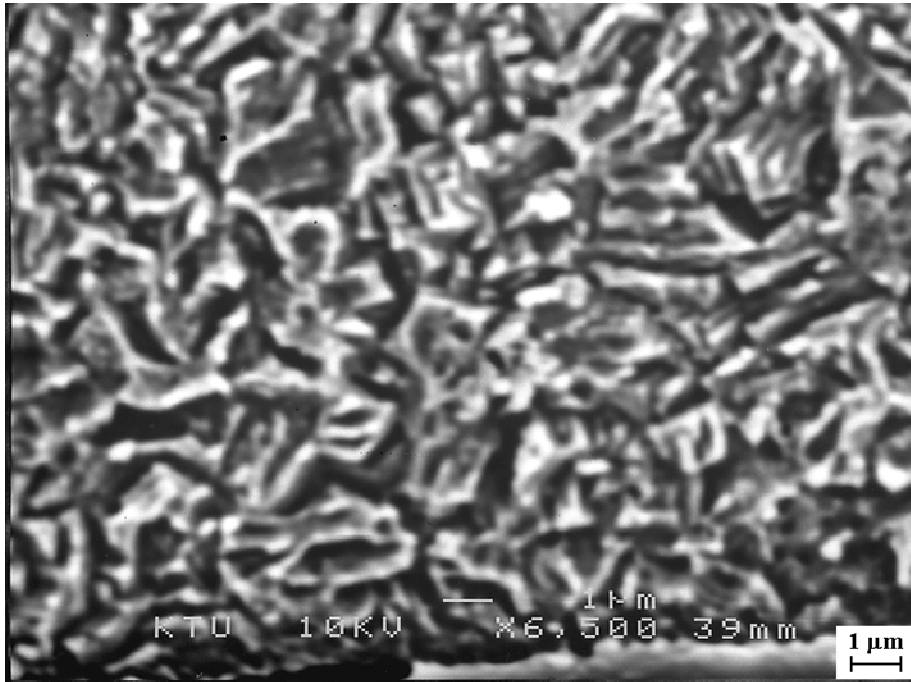


b)

Şekil 3.28. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 30 µm),  
b) büyük büyütmedeki mikroyapı

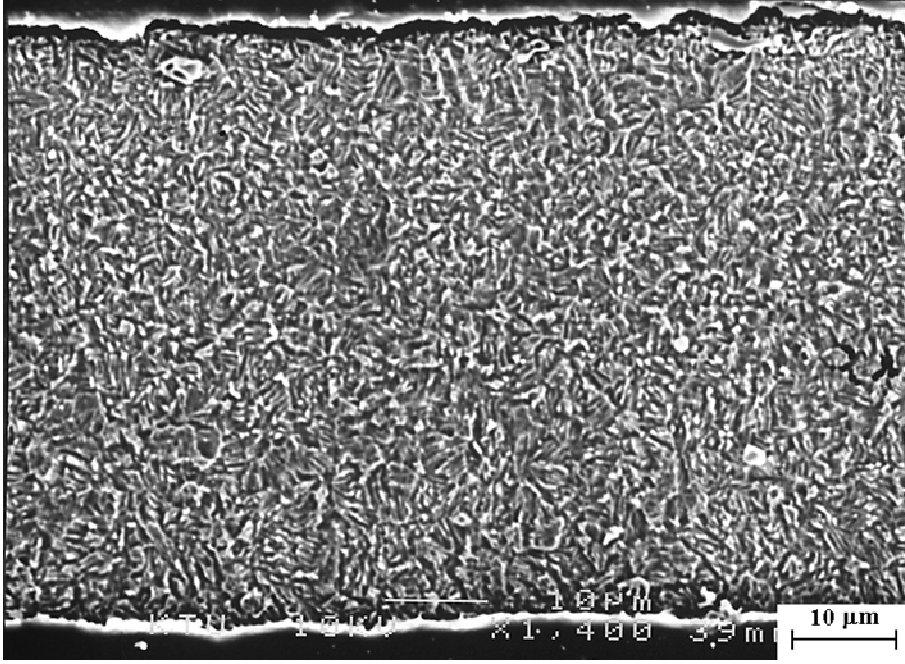


a)

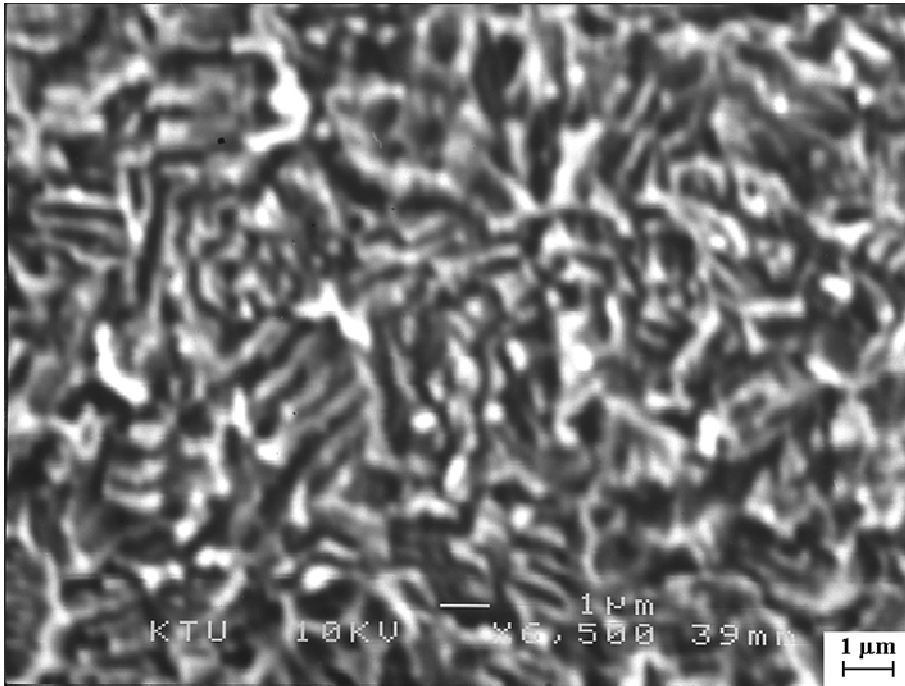


b)

Şekil 3.29. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 40 μm),  
b) büyük büyütmedeki mikroyapı



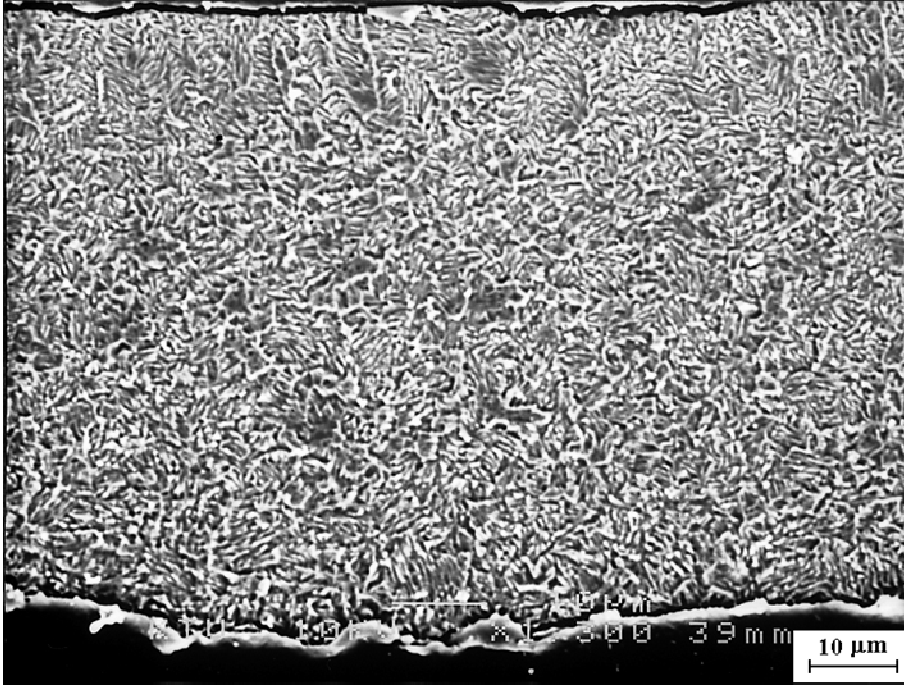
a)



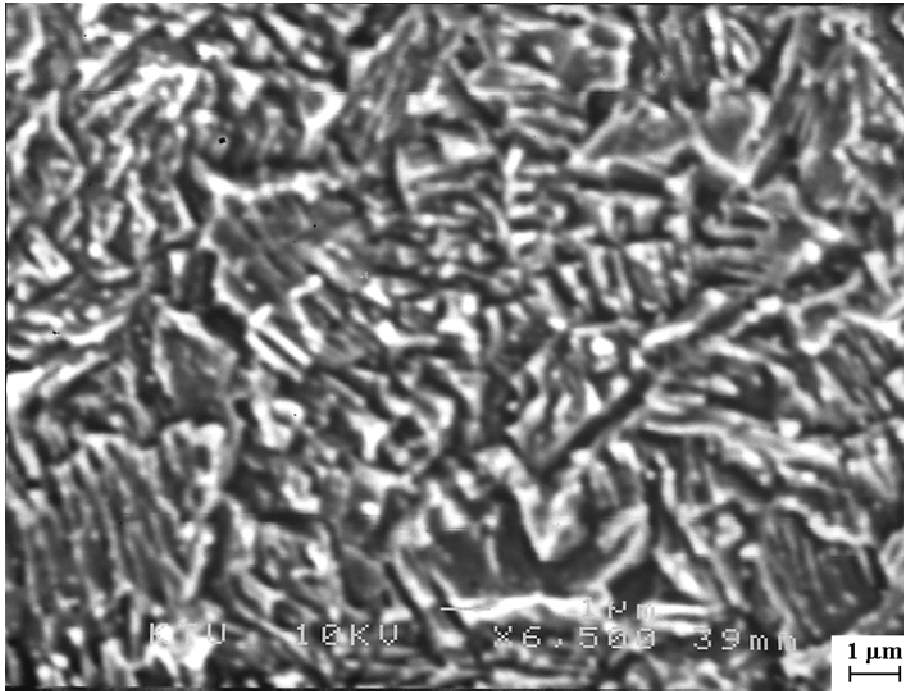
b)

Şekil 3.30. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 60  $\mu\text{m}$ ),  
b) büyük büyütmedeki mikroyapı



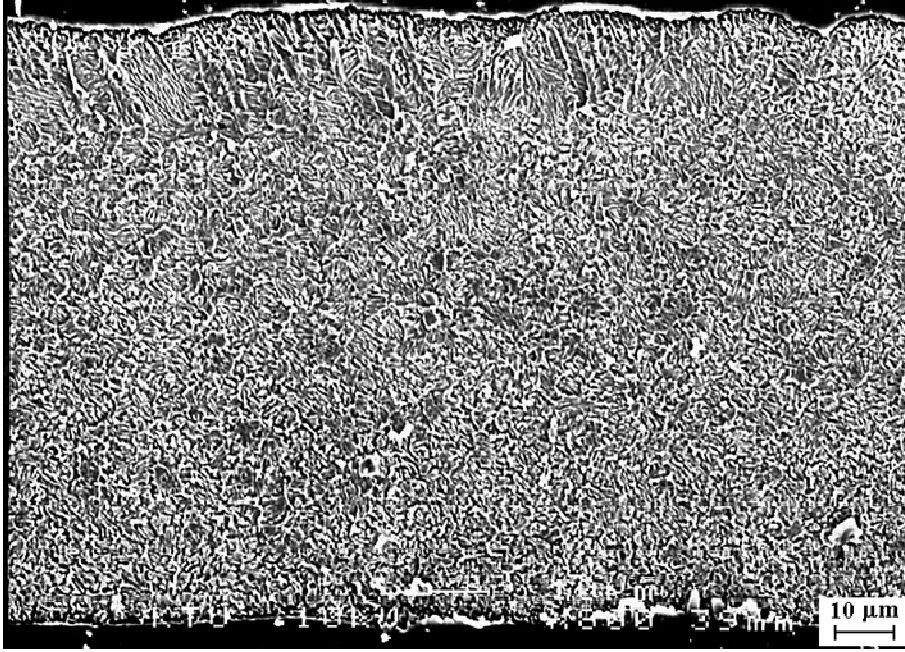


a)

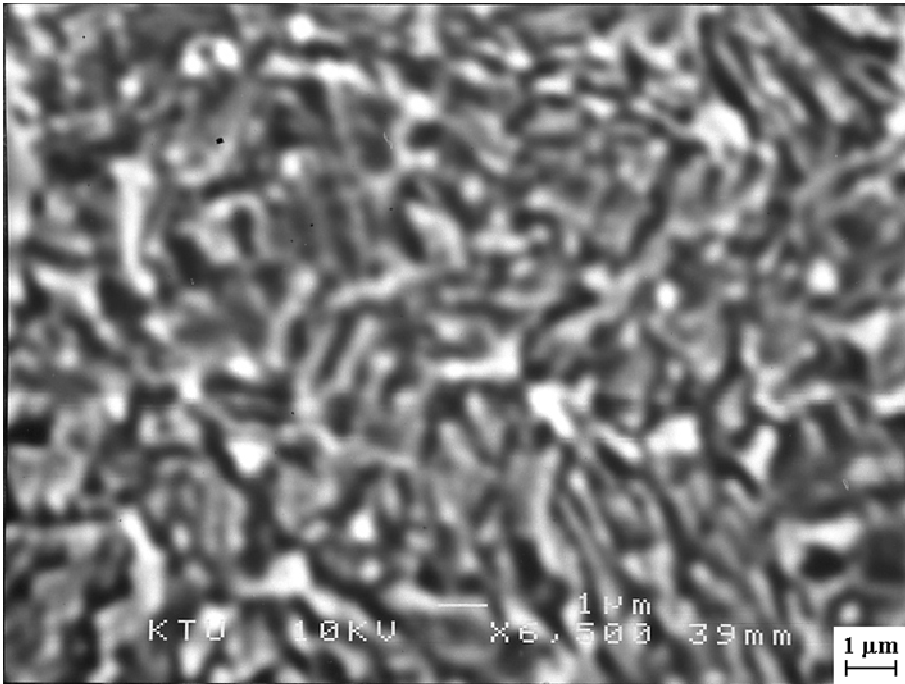


b)

Şekil 3.31. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 75  $\mu\text{m}$ ),  
b) büyük büyütmedeki mikroyapı



a)

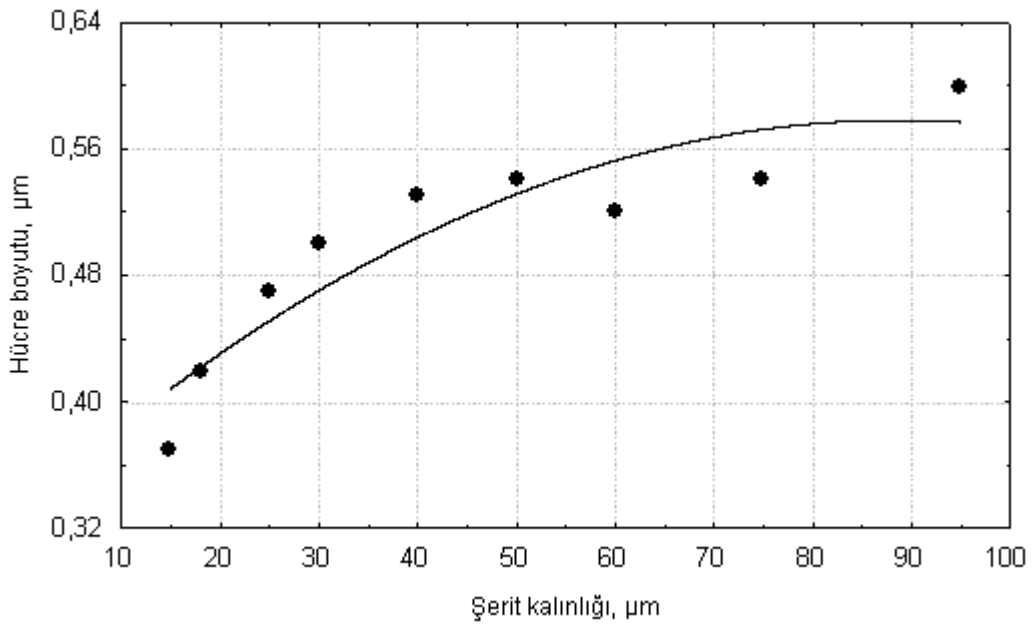


b)

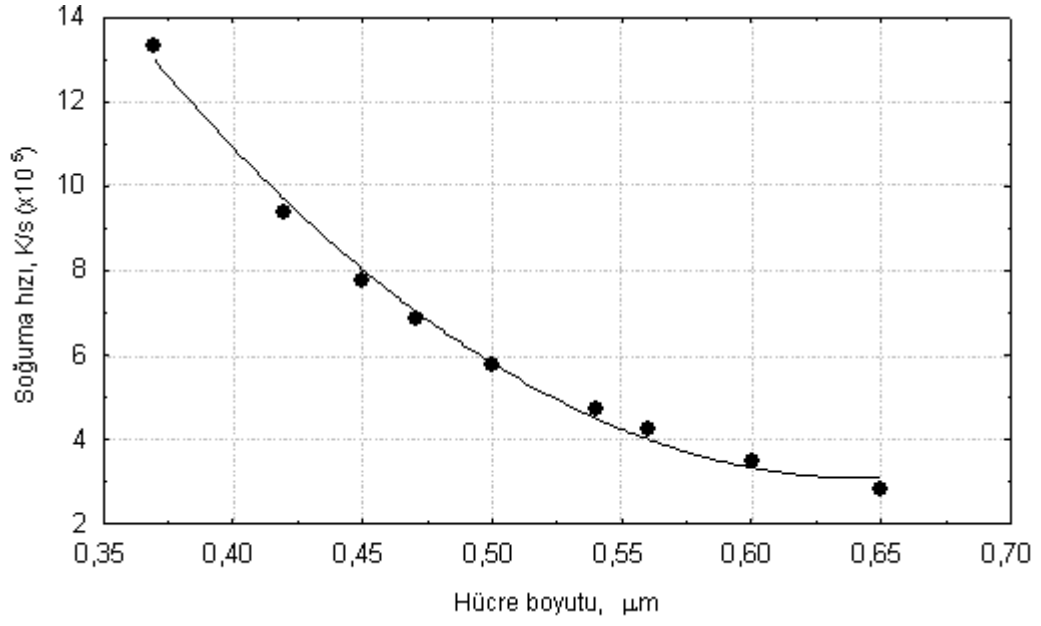
Şekil 3.32. a) CuSn10 bronz alaşımı şeriti mikroyapısı (şerit kalınlığı 95 µm),  
b) büyük büyütmedeki mikroyapı

Tablo 3.2. CuSn10 bronz alaşımı şeritlerinde şerit kalınlığına bağlı olarak hücre boyutu ve soğuma hızının değişimi

Kalınlık ( $\mu\text{m}$ )	15	18	25	30	40	53	60	75	95
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,37	0,42	0,45	0,47	0,50	0,54	0,56	0,60	0,65
$\epsilon$ ( $^{\circ}\text{K/s}$ )	$1,3 \times 10^6$	$9,4 \times 10^5$	$7,8 \times 10^5$	$6,9 \times 10^5$	$5,8 \times 10^5$	$4,7 \times 10^5$	$4,3 \times 10^5$	$3,5 \times 10^5$	$2,8 \times 10^5$



şekil 3.33. CuSn10 bronz alaşımı şeritlerinde şerit kalınlığına bağlı olarak hücre boyutunun değişimi



Şekil 3.34. CuSn10 bronz alaşımı şeritlerinde hücre boyutuna bağlı olarak soğuma hızının değişimi

#### 4. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalardan ve elde edilen bulguların değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Üretilen CuSn10 bronz alaşımı tozları genellikle küresel, yuvarlak, ligamental, çubuksu, düzensiz, pulsü ve yapraksı şekilde olup, toz şekli parçacık boyutuna bağlı olarak değişmiştir.
2. Üretilen AISI 304 paslanmaz çelik tozları küresel, yuvarlak, patates şekilli, çubuksu, iğnemsî, ligamental, düzensiz ve gözenekli yassı şekildedir.
3. Disk hızı, disk geometrisi, sıvı metal akış debisi vb. atomizasyon parametrelerinin toz şeklini etkilemediği tespit edilmiştir. Atomizör şekli ve boyutlarının toz şekli oluşumunda önemli oranda kısıtlayıcı bir etkiye sahip olmamıştır.
4. Üretilen CuSn10 bronz alaşımı tozları atomizasyon parametrelerine bağlı olarak 100–250 µm ortalama boyutta olup, toz üretim verimi % 65-85 arasında gerçekleşmiştir.
5. Üretilen AISI 304 paslanmaz çelik tozların ortalama toz boyutu CuSn10 bronz alaşımı tozlarına göre daha yüksek, toz üretim verimi ise daha düşük bulunmuştur.
6. Denenen parametreler arasında en düşük ortalama boyutta ve en yüksek verimde toz üretimi 4 kanatçıklı, ZrO<sub>2</sub> kaplanmış diskle, 2 mm nozul çapında, 300° C aşırı ısıtma miktarında ve 75 m/s disk hızında elde edilmiştir.
7. Atomizasyon esnasında, atomizasyonu olumsuz şekilde etkileyen disk üzerine sıvı metal tabakası oluşumu bu çalışmada gözlenmemiştir.
8. Üretilen tozların mikroyapıları genellikle eş eksenli hücreli olup, toz boyutunun büyümesiyle hücre boyutu da büyümüştür.
9. Üretilen tozların ortalama hücre boyutu toz boyutuna bağlı olarak 0,5 - 9,09 µm arasında değişmiştir. Hücre boyutuna bağlı olarak soğuma hızları  $5,82 \times 10^5$  -  $0,20 \times 10^3$  K/s arasında değişmiştir.
10. 2 kanatçıklı kaplamasız disk kullanılarak yapılan deneylerde 15-95 µm kalınlıkta, 3-6 mm genişlikte ve 45-72 mm boyunda düz veya çok az miktarda eğrisel formda şeritler üretilmiştir.
11. Artan disk hızıyla ve azalan nozul çapıyla ortalama şerit kalınlığı azalmıştır. Şerit üretim verimi azalan disk hızıyla ve nozul çapıyla artmıştır.

12. Şeritlerin mikroyapıları eŐksenli hücresel olarak elde edilmiştir. Ortalama hücre boyutu Şerit kalınlığına bağlı olarak deđiŐmiŐ olup 0,37–0,65  $\mu\text{m}$  arasında bulunmuştur. Şeritlerin soğuma hızları Şerit kalınlığına ve ortalama hücre boyutuna bağlı olarak  $1,3 \times 10^6 - 2,8 \times 10^5$  K/s arasında elde edilmiştir.

## **5. ÖNERİLER**

Metal ergitme ve atomizasyon işlemi vakum altında yapılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Bozkurt, Ç. ve Ünal, R., Gaz Atomizasyon Yöntemi ile Metal Tozu Üretiminde Gaz Akış Modelleri, 1. Ulusal Metalurji ve Malzeme Günleri, Mayıs 2004, Eskişehir, Bildiriler Kitabı, 125-142.
2. Öveçoğlu, M.L., Toz Metalurjisi: Tarihsel Gelişimi, Üretim Aşamaları ve Yeni Eğilimler, 9. Uluslararası Metalurji ve Makine Kongresi, Haziran 1997, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 449-475.
3. <http://www.turktoz.gazi.edu.tr/makale.htm> TTMD-Türk Toz Metalurjisi Derneği Online Yayını, Toz Metalurjisi, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. 12/03/2009.
4. Özduval, H., Toz Metal Ticaret ve Sanayi A.Ş., 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Eylül 1996, Ankara, Bildiriler Kitabı, 725-729.
5. Koç, V., Toz Metalurjisi Tekniği ile Üretilen Bir Paslanmaz Çelikte Katkı Elemanlarının Aşınma Direncine Etkileri, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006.
6. German, R.M., Powder Metallurgy Science, Second edition, Metal Powder Industries Federation, USA, 1994.
7. Sarıtaş, S., PM Gathers Pace in Turkey, Metal Powder Report, 54, 9 (1999) 34-37.
8. Özgün, Ö., Toz Metalurjisi ile Üretilen Alaşımli Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
9. Kurt, A.O., Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, [http://www.sakarya.edu.tr/~aokurt/dersler/toz/ders\\_notu.doc](http://www.sakarya.edu.tr/~aokurt/dersler/toz/ders_notu.doc).11/10/2009.
10. German, R.M., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, ed:Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N., Birinci Basım, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları:05, Ankara, 2007
11. Öztürk, S., Su Soğutmalı Döner Disk Atomizasyon Yöntemiyle Toz ve Şerit Üretiminde İşlem Parametrelerinin Etkisi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.
12. Antony, L.V.M. ve Reddy, R.G., Process for Production of High-Purity Metal Powders, JOM, March (2003) 14-18.
13. Klar, E., Fesko, J.W., Atomization, Metals Handbook, 9<sup>th</sup> ed., Vol.7, Ohio, 1984, 25-39.



14. Dunkley, J.J., Atomization of Metal Powders, *Powder Metallurgy: An Overview*, 1991, 2–21.
15. Putting Some Spin Into Atomisation, *Metal Powder Report*, 60,12 (2005) 28–30.
16. Matei, G., Matei, D. ve Moraru, V., Studies on the Metal and Alloys Atomization Methods, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Eylül 1996, Ankara, Bildiriler Kitabı, 67 – 87.
17. Öztürk, S.Ö., Arslan, F. ve Öztürk, B., Su Soğutmalı Döner Disk Yöntemiyle Hızlı Katılaştırılmış Şerit Üretiminin İncelenmesi, Third International Powder Metallurgy Conference, September, 2002, Ankara, 1084-1100.
18. Backensto, A.B., Strength of Sintered Bronze as Premix Components Change, *Modern Developments in Powder Metallurgy*. Vol. 19, USA, 1988, 641-653.
19. Kurt, A., Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1992.
20. Ünlü, B.S., Yılmaz, S.S., Kurgan, N., Bronz-Demir, T/M Döküm Yatakların Mikroyapı, Aşınma ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Mayıs, 2009, Bildiriler Kitabı.
21. Reinshagen, J.H., Neupaver, A.J., Fundamentals of P/M Stainless Steels, *Proceedings of the 1989 PM Conference & Exhibition*, California, June, 1989, 283 – 295.
22. <http://www.saritas.com.tr/ktlg/pdf/Paslanmaz%20Celik%20Saritas%2004.pdf>  
Paslanmaz Çeliklerin İç Yapıları ve Temel Türleri. 30 Ekim 2009.
23. Öztürk, S., Arslan, F. ve Öztürk, B., Effect of Process Parameters on Production of Metal Powders by Water Jet Cooled Rotating Disc Atomisation, *Powder Metallurgy*, 48,2 (2005) 163–170.
24. Teunou, E. ve Poncelet, D., Rotary Disc Atomisation for Microencapsulation Applications-Prediction of the Particle Trajectories, *Journal of Food Engineering*, 71 (2005) 345-353.
25. Ho, K.H. ve Zhao, Y.Y., Modelling Thermal Development of Liquid Metal Flow On Rotating Disc in Centrifugal Atomisation, *Materials Science & Engineering A*, 365 (2004) 336-340.
26. Doğan, C. ve Sarıtaş, S., Metal Powder Production by Centrifugal Atomization, *The International Journal of Powder Metallurgy*, 3, 4 (1994) 419–427.
27. Doğan, C. ve Sarıtaş, S., Döner Disk Atomizasyon Yöntemiyle Kurşun Tozu Üretimi, 4. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, Eylül 1990, Ankara, Bildiriler Kitabı, 307 – 316.

28. Patterson, R.J., Rotating Disc Atomization, *Metals Handbook*, 9<sup>th</sup> ed., Vol.7, Ohio, 1984, 45 – 47.
29. Shue, K.Y. ve Yeh, J.W., The Characterization of the Al-12 wt Pct Si Flake Powder Produced by a Double – Disk Process, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26A (1995) 1571-1581.
30. Sahu, S.N., Harikishore, S. ve Korla, S.C., Solidification Behaviour of Droplets In Spray Deposition, *Powder Metallurgy*, 48,3 (2005) 270–276.
31. Satoh, T., Okimoto, K. ve Nishida, S., Material of Rotating Disk in Centrifugal Atomization Method, *Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress*, 730 – 733.
32. Angers, R., Tremblay, R. ve Dube, D., Formation of Irregular Particles During Centrifugal Atomization of AZ91 Alloy, *Materials Letters*, 33 (1997) 13-18.
33. Mackaplow, M.P., Zarraga, I.E. ve Morris, J.F., Rotary Spray Congealing of a Suspension: Effect of Disk Speed and Dispersed Particle Properties, *Journal of Microencapsulation*, 23,7 (2006) 793-809.
34. Zhao, Y.Y., Analysis of Flow Development In Centrifugal atomization: Part II. Disintegration of a Non-Fully Spreading Melt, *Modelling and Simulation In Materials Science and Engineering*, 12 (2004) 973-983.
35. Willauer, H.D., Ananth, R. ve Hoover, J.B., Critical Evolution of Rotary Atomizer, *Petroleum Science and Technology*, 24 (2006) 1215-1232.
36. Xie, J.W., Zhao, Y.Y. ve Dunkley, J.J, Effects of Processing Conditions on Powder Particle Size and Morphology in Centrifugal Atomisation of Tin, *Powder Metallurgy*, 47,2 (2004) 168-172.
37. Li, H. ve Deng, X., Prediction of Powder Particle Size During Centrifugal Atomisation Using a Rotating Disk, *Science and Technology of Advanced Materials*, 8 (2007) 264-270.
38. Huang, L.X. ve Mujumdar, A.S., The Effect of Rotary Disc Atomizer RPM on Particle Size Distribution in a Semi-Industrial Spray Dryer, *Drying Technology*, 26 (2008), 1319-1325.
39. Yun-Zhong, L., Minagawa, K., Kakisawa, H. ve Halada, K., Melt Film Formation and Disintegration During Novel Atomization Process, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17 (2007) 1276-1281.
40. Öztürk, S., Arslan, F. ve Öztürk, B., Effect of Production Parameters on Cooling Rates of AA2014 Alloy Powders Produced by Water Jet Cooled, Rotating Disc Atomisation, *Powder Metallurgy*, 46,4 (2003) 342-348.

41. Fuqian, Z., Ming, X., Jianliang, L., Xianyong, L., Weiming, G., An, S. ve Zhongmin, D., Study of Rapidly Solidified Atomization Technique and Production of Metal Alloy Powders, Materials Science and Engineering A, 304-306 (2001) 579-582.
42. Fukai, J., Shiiba, Y., Yamamoto, T., Miyatake, O., Poulikakos, D., Megaridis, C.M. ve Zhao, Z., Wetting Effects on the Spreading of a Liquid Droplet Colliding with a Flat Surface: Experimental and Modeling, Phys. Fluids, 7, 2 (1995) 236-247.
43. Zhao, Y.Y., Considerations in Designing a Centrifugal Atomiser for Metal Powder Production, Materials & Design, 27 (2006) 745-750.
44. Öztürk, S. ve Arslan, F., Production of Rapidly Solidified Metal Powders by Water Jet Cooled Rotating Disc Atomisation, Powder Metallurgy, 44, 2 (2001) 171-176.
45. Tonberg, C., Particle Size Prediction in an Atomization System, Powder Production and Spray Forming Advances in Powder Metallurgy, 1 (1992) 137 – 150.
46. Quyang, H., Chen, X. ve Huang, B., Influence of Melt Superheat on Breakup Process of Close-coupled Gas Atomization, Transaction of Nonferrous Metals and Society of China, 17 (2007) 967-973.
47. Salyani, M., Effects of Flow Rate and Rotational Speed on Performance of Two Rotary Atomizers, Pesticide Formulations and Application Systems, Vol.18, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, Philadelphia, 1998 .
48. Sirignano, W.A. ve Mehring, C., Reiew of Theory of Distortion and Disintegration of Liquid Streams, Progress in Energy and Combustion Science, 26 (2000) 609-655.
49. Sternowsky, S., Shulte, G., Guardani, R. ve Nascimento, C.A.O., Experimental Study and Neutral Network Modeling of the Ligament Disintegration In Rotary Atomization, Atomization and Sprays, 12 (2002) 107-121.
50. Eslamian, M., Rak, J. ve Ashgriz, N., Preparation of Aluminium/Silicon Carbide Metal Matrix Composites Using Centrifugal Atomization, Powder Technology, 184,1 (2008) 11-20.
51. Czisch, C. ve Fritsching, U., Atomizer Design For Viscous-Melt Atomization, Materials Science & Engineering:A, 477,1-2 (2008) 21-25.
52. Uslan, İ. ve Sarıtaş, S., Gaz Atomize Alüminyum Tozlarında Soğuma Hızının Toz Boyutuyla Değişiminin Araştırılması, Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Eylül, 1999, Ankara, Bildiriler Kitabı, 400-408.
53. Giuranno, D., Ricci, E., Arato, E. ve Costa, P., Dynamic Surface Tension Measurements of an Aluminium-oxygen System, Acta Materialia, 54 (2006), 1625-2630.
54. Sheikhaliev, S.M., Sheikhalieva, Z.I. ve Dunkley, J.J., Spin Atomisation Makes Tighter, Safer Aluminium, Metal Powder Report, 63, 2 (2008) 28-30.

55. Schmitt, H., Mathematical – Physical Considerations Regarding the Production of Metal Powders for Powder Metallurgy, Powder Metallurgy International, (1979) 17-68.
56. Labrecque, C., Angers, R., Tremblay, R. ve Dube, D., Inverted Disk Centrifugal Atomization of AZ91 Magnesium Alloy, Canadian Metallurgical Quarterly, 36,3 (1997) 169-175.
57. Liu, H., Science and Engineering of Droplets: Fundamentals and Applications. William Andrew Pub.Park Ridge, New York, 2000.
58. Öztürk, S., Arslan, F. ve Öztürk, B., Su soğutmalı Döner Disk Atomizasyonu ile Üretilen AA 2014 Alaşımı Tozlarının Soğuma Hızına Atomizasyon Parametrelerinin Etkisi, Third International Powder Metallurgy Conference, September, 2002, Ankara, 863-875.
59. Öztürk, S. ve Arslan, F., Su Soğutmalı Döner Disk Atomizasyonu Yöntemiyle Hızlı Katılaştırılmış Metal Tozu Üretiminin İncelenmesi, Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Eylül, 1999, Ankara, Bildiriler Kitabı, 409-415.
60. Ray, R., Ultra Rapid Solidification Process, Metals Handbook, 9<sup>th</sup> ed., Vol.7, Ohio, 1984, 47 – 51.
61. Okumuş, M., Al-Ni-Si Alaşımlarının Hızlı Katılaştırma ile Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2006.
62. Singh, R.P., Lawley, A. ve Friedman, S., Microstructure and Properties of a P/M Processed Cu-Zr Alloy, Proceedings of the 1989 Powder Metallurgy Conference & Exhibitron, June, 1989, San Diego, Calif.
63. Suryanarayana, C., Froes, F.H. ve Quist, W.E., Non - Equilibrium Processing of Powder Alloys for Aerospace Applications, Advances in Powder Metallurgy, 6 (1991) 15 – 29.
64. Koch, C.C., Nanostructured Materials - Processing, Properties, and Applications Structure Formation and Mechanical Behavior of Two-Phase Nanostructured Materials, 2nd Edition, William Andrew Publishing, 2007.
65. Lee, S.M., Handbook of Composite Reinforcements: Metal Matrix Composites, Rapid Solidification Processing, John Wiley & Sons, 1993.
66. Grant, N.J., Powder and Particulate Production of Metallic Alloys, Advances in Powder Technology, ASM Materials Science Seminar, Ohio, 1981, 1 – 21.
67. Jones, H., Rapid Solidification of Metals and Alloys, The Institution of Metallurgist, Monograph, No: 8, London, 1982.

68. Sheichaliev, S.M., Production of Amorphous Metal Powders by Centrifugally – Hydraulic Atomization of Melt, Uluslararası Katılımlı 2. Toz Metalurji Konferansı, Eylül 1999, Ankara, Bildiriler Kitabı, 101-107.
69. Beeley, P.R. ve Met, B., Foundry Technology. Department of Metallurgy, University of Leeds, London, 1979.
70. Askeland D.R., The Science and Engineering of Materials, University of Missouri-Rolla.
71. Trivedi, R., Jin, F. ve Anderson, I.E., Dynamical Evolution of Microstructure in Finely Atomized Droplets of Al-Si Alloys, Acta Materialia, 51 (2003) 289-300.
72. Bergmann, D., Fritsching, U. ve Bauckhage, K., A Mathematical Model for Cooling and Rapid Solidification of Molten Metal Droplets, Int. J. Therm. Sci., 39 (2000) 53-62.
73. Wu, C.P., Yi, D.Q., Li, J., Xiao, L.R., Wang, B. ve Zheng, F., Investigation on Microstructure and Performance of Ag/ZnO Contact Material, Journal of Alloys and Compounds, (2007), Article in Press.
74. Ozols, A., Barreiro, M., Forlerer, E. ve Sirkin, H.R., Coating of Co-Cr-Mo Alloy for Surgical Implants by Centrifugal Spray: Preliminary Evaluation, Surface & Coatings Technology, 200 (2006) 5884-5888.
75. Flohrer, S., Schafer, R., Polak, C. ve Herzer, G., Interplay of Uniform and Random Anisotropy In Nanocrystalline Soft Magnetic Alloys, Acta Materialia, 53 (2005) 2937-2942.
76. Kim, Y., Yun, Y. ve Nam, T., Microstructures and Shape Memory Characteristics of Rapidly Solidified Ti<sub>50</sub>Ni<sub>30</sub>Cu<sub>20</sub> Alloy Ribbons, Materials Science and Engineering A 438-440 (2006) 540-544.
77. Prasad, A. ve Henein, H., Droplet Cooling in Atomization Sprays, Journal of Materials Science, 43 (2008) 5930-5941.
78. Freyberg, A., Henein, H., Uhlenwinkel, V. ve Buchholz, M., Droplet Solidification and Gas-Droplet Thermal Coupling in the Atomization of a Cu-6Sn Alloy, Metallurgical and Materials Transactions B, 33B (2003) 243-253.
79. Tiedje, N., Hansen, P.N. ve Pedersan, A.S., Metallurgical and Materials Transactions A, 27A (12) (1996) 4085-4093.
80. Choi, J.O., Einfluss der Erstarrungsgeschwindigkeit auf Gefüge und Eigenschaften technischer Kupferlegierungen, Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart, 1987.
81. Kallien, L., Herstellung Schnell Erstarrter und Hochunterkühlter Metallpulver , VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.

82. Tan, M., Xiufang, B., Xianying, X., Yanning, Z., Jing, G. ve Baoan, S., Correlation Between Viscosity of Molten Cu-Sn Alloys and Phase Diagram, Physica B, 387 (2007) 1-5.
83. Amore, S., Ricci, E., Lanata, T. ve Novakovic, R., Surface Tension and Wetting Behaviour of Molten Cu-Sn Alloys, Journal of Alloys and Compounds, 452 (2008) 161-166.
84. Gale, W.F. ve Totemeier, T.C., Smithells Metals Reference Book: General Physical Properties, 8th Edition, Elsevier, 2004
85. <http://www.ssina.com> Designer Handbook, Design Quidelines for the Selection and Use of Stainless Steel, Specialty Steel, Industry of North America. 30 Ekim 2009.
86. Park, J.S., Park, C.W., Lee, K.J., Implication of Peritectic Composition in Historical High-Tin Bronze Metallurgy, Materials Characterization, (2009), Article in Press.
87. Pease, L.F. ve West, W.G., Fundamentals of Powder Metallurgy, Princeton, Metal Powder Industries Federation, 2002.
88. Narasimhan, K.S., Encyclopedia of Materials - Science and Technology, Volumes 1-11, Powder Characterization, Edited by: Buschow, K.H. Jürgen; Cahn, Robert W.; Flemings, Merton C.; Ilschner, Bernhard; Kramer, Edward J.; Mahajan, Subhash, Elsevier, 2001, 7781-88.
89. Wang, G.X and Matthys, E.F., Experimental Determination of the Interfacial Heat Transfer During Cooling and Solidification of Molten Metal Droplets Impacting on a Metallic Substrate: Effect of Roughness and Superheat, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45 (2002) 4967-4981.
90. Shue, K.Y., Yeh, J.W. ve Liu, K.S., Centrifugal Atomization/Substrate Quenching of Rapidly Solidified Particles, The International Journal of Powder Metallurgy, 31,2 (1995) 145-152.
91. Rajan, R. ve Pandit, A.B., Correlations to Predict Droplet Size in Ultrasonic Atomisation, Ultrasonics, 39 (2001) 235-255.
92. Zhao, Y.Y., Dowson, A.L., Johnson, T.P., Young, J.M. ve Jacobs, M.H., Prediction of Liquid Metal Velocities on a Rotating Disk in Spray Forming by Centrifugal Spray Deposition. In: Cadle TM, Narasimhan KS, editors, Advances in Powder Metallurgy&Particulate Materials, vol.3, Princeton: Metal Powder Industries Federation; 2001, 979-989.
93. Zhao, Y.Y., Analysis of Flow Development in Centrifugal Atomisation Part I: Film Thickness of a Fully Spreading Melt, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 12 (2004) 959-971.

94. Parkinson, R.D. ve Sheppard, T., Production of Engineering Materials From Rapidly Solidified AA7050 Al-Zn-Mg-Cu Powders, Powder Metallurgy, 28, 4 (1985) 189-197.
95. Madejski, J. Droplets on Impact with a Cold Surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, 26 (1983) 1096-1098.
96. Sivtsova, P.A. ve Shepelevich, V.G., A Study of Rapidly Solidified Foils of an Alloy of the Al-Cr-Fe System, Metal Science and Heat Treatment, 49, 5-6 (2007) 284-287.
97. Kramer, M.J., Mecco, H., Dennis, K.W., Vargonova, E., McCallum, R.W. ve Napolitano, R.E., Rapid Solidification and Metallic Glass Formation-Experimental and Theoretical Limits, Journal of Non- Crystalline Solids, 353 (2007) 3633-3639.
98. Arslan, F., Öztürk, S. ve Öztürk, B., Rotating Disc Production of Aluminium Alloy Ribbon, The International Journal of Powder Metallurgy, 39, 2 (2003) 53-62.
99. Chu, M.G. ve Granger, D.A., Solidification and Microstructure Analysis of Rapidly Solidified Melt-Spun Al-Fe Alloys, Metallurgical Transactions, 21 A (1990) 205-212.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Gönül USTA 1985 yılında Giresun'da doğdu. 2003 yılında Giresun Hamdi Bozbağ Anadolu Lisesi'ni bitirdi ve Trabzon Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesinden "Makine Mühendisi" ünvanı ile mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2007-2008 yılında Tübitak Araştırma Geliştirme Projesinde burslu yüksek lisans öğrencisi olarak yer aldı. 2009 yılında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü 50/d kadrosuna atanmış olup halen görevine devam etmektedir. Gönül USTA iyi dercede ingilizce bilmektedir.