

**YAKINDAN EŞLEMELİ LAVAL NOZUL KULLANILARAK YAPILAN
PÜSKÜRTME ŞEKİLLENDİRMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Volkan BOZDAĞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2008
ANKARA**

Volkan BOZDAĞ tarafından hazırlanan YAKINDAN EŞLEMELİ LAVAL NOZUL KULLANILARAK YAPILAN PÜSKÜRTME ŞEKİLLENDİRMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İbrahim USLAN

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Bedri TUÇ

Makine Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. İbrahim USLAN

Makine Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

Makine Müh. Anabilim Dalı, TOBB ETÜ

Tarih: 24/09/2008

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

Prof. Dr. Nermin ERTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Volkan BOZDAĞ

**YAKINDAN EŞLEMELİ LAVAL NOZUL KULLANILARAK YAPILAN
PÜSKÜRTME ŞEKİLLENDİRMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Volkan BOZDAĞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2008

ÖZET

Bu çalışmada, öncelikle yakından eşlemeli laval tipi nozul ve 4, 6 ve 8 mm uzunluğa sahip çıkıntı aparatları tasarlanıp imalatı yapılmıştır. Bu nozul kullanılarak gaz atomizasyonu yöntemi ile 20 barda 4 mm, 6 mm ve 8 mm çıkıntı uzunluğuna sahip çıkıntı aparatlarıyla kalay tozu üretilip, en küçük boyuttaki tozun üretildiği çıkıntı aparatı tespit edilmiş ve bu çıkıntı aparatıyla 10 bar ve 30 barda kalay tozu üretilmiştir. En küçük boyutta tozun üretildiği parametrelerle, Püskürtme Şekillendirme (PŞ) yöntemi kullanılarak çeşitli yüksekliklerde parça üretilmiştir. PŞ yöntemi kullanılarak üretilen parçalara, ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. PŞ işlemleri, 80-120 mm püskürtme mesafelerinde ve 30 bar gaz basıncında gerçekleştirilmiştir. Parçalar ekstrüze edilerek, 6 mm çapında çubuklar elde edilmiştir. Ekstrüze çubuklara çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testleri sonucunda, PŞ yöntemi ile üretilmiş parçaların çekme mukavemeti, döküm parçaların çekme mukavemetinden %16 ile %36,8 arasında değişen yüzdelerde yüksek bulunmuştur. Gaz atomizasyonu ile üretilen tozlar SEM ile incelenmiş, tozların genelinin küresel veya küresele yakın olduğu tespit edilmiş, PŞ değişkenlerinin ve ekstrüzyon işleminin içyapıya etkileri optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.

Bilim Kodu : 914.1.140
Anahtar Kelimeler : Gaz atomizasyonu, Püskürtme Şekillendirme, Ekstrüzyon
Sayfa Adedi : 87
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. İbrahim USLAN

**INVESTIGATION OF THE EFFECT ON MECHANICAL PROPERTIES
OF SPRAY FORMING BY USING CLOSE COUPLED LAVAL NOZZLE**

(M.Sc. Thesis)

Volkan BOZDAĞ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

September 2008

ABSTRACT

In this study, a Laval type closed coupled nozzle and 4, 6 and 8 mm length protrusion apparatuses were designed and manufactured. By operating this nozzle, with the help of gas atomisation method, tin powder was produced using 4 mm, 6 mm and an 8 mm protrusion apparatuses; then the protrusion apparatus which produces the smallest powder particle was determined and tin powder was produced under 10 bar and 30 bar pressure using this protrusion apparatus. Considering the parameters on which the smallest powder particle was produced some various pieces in length were formed by Spray Forming (SF) method. Extrusion process was then applied on these pieces. The processes of SF were held with the spray distance of 80-120 mm and under a gas pressure of 30 bar. Those samples were extruded and 6 mm in diameter rods were obtained. Then the tensile tests were examined on the extruded rods. It was observed from the tensile tests that the extruded SF pieces have higher tensile strength values between %16 to %36.8 than the extruded cast pieces. Atomized powder were analyzed by the SEM, and the effect of SF variables the extrusion processes were analyzed using an optical microscope.

Science Code	: 914.1.140
Key Words	: Gas atomisation, Spray Forming, Extrusion
Page Number	: 87
Adviser	: Assoc.Prof.Dr. İbrahim USLAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca benden yardım ve katkılarını esirgemeyen kıymetli hocam Doç. Dr. İbrahim USLAN'a, makine mühendisi arkadaşım Yusuf ATAK'a, Arş. Gör. Tefvik DEMİR'e ayrıca manevi destekleriyle her zaman yanımda olan annem Nurhan BOZDAĞ'a, babam Cemil BOZDAĞ'a ve kardeşim Zeynep BOZDAĞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. TOZ METALURJİSİ	3
2.1. Toz Metalurjisinin Üstün Ve Zayıf Yanları	3
2.2. Toz Metalurjisinde Temel Basamaklar	4
2.3. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları	4
2.4. Toz Üretim Yöntemleri	5
2.4.1. Atomizasyon yöntemleri	6
3. GAZ ATOMİZASYONU	8
3.1. Gaz Atomizasyon Mekanizmaları	10
3.2. Gaz Atomizasyonunda Üretim Parametreleri	11
3.2.1. Toz boyutu ve dağılımı	12
3.2.2. Toz şekli, yüzey yapısı ve içyapısı	14
3.3. Gaz Atomizasyonunda Kullanılan Nozul Tipleri	15
3.3.1. Serbest düşmeli nozul sistemi	15
3.3.2. Yakından eşlemeli nozul sistemi	16

Sayfa

3.3.3. Gaz atomizasyonunda nozul geometrisi.....	17
3.3.4. Nozul tasarımında temel parametreler.....	19
4. PÜSKÜRTME ŞEKİLLENDİRME.....	21
5. TAM YOĞUNLUK TEKNİKLERİ.....	26
5.1. Ekstrüzyon	27
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
6.1. Gaz Atomizasyon Ünitesi	31
6.1.1. Gaz sistemi	31
6.1.2. Isıtma ve ergitme.....	31
6.1.3. Atomizasyon kulesi.....	33
6.1.4. Siklon	34
6.1.5. Nozul.....	35
6.2. Atomizasyon Çalışmaları.....	38
6.3. Toz Boyutu Analizi	41
6.4. Toz Şekli Ve İçyapısı.....	41
6.5. Püskürtme Şekillendirme Deneyleri	41
6.6. Ekstrüzyon Deneyleri	42
6.7. Çekme Deneyi.....	44
6.8. Yoğunluk Ölçümü	45
7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	47
7.1. Toz Boyutu Ve Dağılımı.....	47
7.2. Toz Şekli Ve İçyapısı.....	51

	Sayfa
7.3. Püskürtme Şekillendirme	57
7.3.1. Yoğunluk Ölçümü	62
7.4. Ekstrüzyon	63
7.4.1. Yoğunluk Ölçümü	65
7.5. Çekme Deneyi	66
8. SONUÇ	68
KAYNAKLAR	70
EKLER	75
EK-1. Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nin şematik resmi	76
EK-2. 4 mm çıkıntı aparatı teknik resmi	77
EK-3. 6 mm çıkıntı aparatı teknik resim	78
EK-4. 8 mm çıkıntı aparatı teknik resim	79
EK-5. Nozul Alt kısım teknik resim	80
EK-6. Nozul Üst kısım teknik resim	81
EK-7. Akış Memesi teknik resim	82
EK-8. Püskürtme Şekillendirme aparatı teknik resim	83
EK-9. Nozul Montaj teknik resim	84
EK-10. 100 mm mesafeden üretilen parçanın çekme testi grafiği	85
EK-11. 100 mm mesafeden üretilen parçanın çekme testi sonucu	86
ÖZGEÇMİŞ	87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Al-Si alaşımlarının mekanik özellikleri	30
Çizelge 6.1. Laval tipi nozula ait büyüklükler	35
Çizelge 6.2. Laval tipi nozul için atomizasyon değişkenleri	40
Çizelge 6.3. PŞ Değişkenleri	42
Çizelge 7.1. Yapılan deneylerde elde edilen toz boyutlarıyla ilgili değerler	47
Çizelge 7.2. PŞ parçaların yoğunluk ölçüm sonuçları	63
Çizelge 7.3. PŞ + Ekstrüze parçaların yoğunluk ölçüm sonuçları.....	65
Çizelge 7.4. PŞ parçalar ile döküm parçaların çekme testi sonuçları	66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları.....	4
Şekil 2.2. Atomizasyon Yöntemleri a) Su atomizasyon ünitesi, b) Gaz atomizasyon ünitesi.....	7
Şekil 3.1. Yatay gaz atomizasyon birimi.....	9
Şekil 3.2. Düşey gaz atomizasyon birimi	9
Şekil 3.3. Yassı tabakadan damlacık oluşumu	10
Şekil 3.4. See modelinin German tarafından farklı bir gösterimi.....	11
Şekil 3.5. Nozul gaz jeti tipleri a) Dairesel Yarıklı; b) Dairesel Delikli.....	15
Şekil 3.6. Serbest düşmeli nozul sistemi	16
Şekil 3.7. Yakından eşlemeli nozul sistemi	16
Şekil 3.8. Nozul geometrisi a) Sonik geometrili (Mannesmann), b) Süpersonik Geometrili (Laval)	17
Şekil 3.9. Kesit alan oranı ile Mach sayısı arasındaki ilişki.....	18
Şekil 3.10. 1,47 MPa gaz basıncında üretilmiş azot atomize tozların genel görüntüsü.....	19
Şekil 4.1. PŞ yöntemi	22
Şekil 4.2. PŞ ile şerit üretimi	23
Şekil 4.3. PŞ ile dövme işlemi.....	23
Şekil 5.1. Mekanik özelliklerin gözenek miktarına göre değişimi	26
Şekil 5.2. Doğrudan ekstrüzyon.....	27
Şekil 6.1. Laval tipi nozuda, gaz çıkış bölgesinin şematik gösterimi.....	35
Şekil 7.1. Malvern Mastersizer E toz boyutu analiz raporu (Deney 4)	48

Şekil	Sayfa
Şekil 7.2. Malvern Mastersizer E toz boyutu analiz raporu (Deney 5).....	49
Şekil 7.3. 20 bar basınçla üretilen azot atomize kalay tozlarının farklı çıkıntı uzunluklarındaki toz boyutu değişimi.....	50
Şekil 7.4. 8 mm çıkıntı aparatıyla üretilen azot atomize kalay tozlarının farklı basınçlardaki toz boyutu değişimi.....	51
Şekil 7.5. PŞ ile üretilen bir parçaya ait bölgeler	57

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Toz metalurjisinin çeşitli uygulama alanları.....	5
Resim 5.1. Ekstrüzyon uygulanan bir külçenin boyuna kesiti	28
Resim 5.2. a)Sıkıştırılmış alüminyum alaşımı tozların içyapısı, b)ekstrüze edilmiş alüminyum alaşımı tozların içyapısı.....	29
Resim 5.3. Ekstrüze edilmiş alüminyum alaşımı tozların SEM görüntüleri a) Yüzeye yakın b) Merkeze yakın	29
Resim 6.1. Gazi Gaz Atomizasyon Birimi	32
Resim 6.2. Gaz sisteminde kullanılan teçhizatlar a)Yüksek basınçlı tüpler b)basınç ayar vanası.....	33
Resim 6.3. Isıtma ve ergitme sistemi a)Açma kapama mekanizması,b)Fırın	33
Resim 6.4. Siklon	34
Resim 6.5. Akış memesi-çıkıntı aparatı - nozul bağlantısı	36
Resim 6.6. 4 mm çıkıntı aparatı.....	37
Resim 6.7. PŞ biriktirme plakası.....	37
Resim 6.8. Voltaj değiştirici.....	38
Resim 6.9. Malvern Mastersizer E parçacık boyutu ölçme cihazı	41
Resim 6.10. Ekstrüzyon kalıbı a)Kapalı, b)Açık	43
Resim 6.11. INSTRON marka çekme-basma cihazı	44
Resim 6.12. INSTRON marka 50 kN kapasiteli hidrolik çekme-basma cihazı.....	45
Resim 7.1. Azot atomize kalay tozlarının genel görüntüleri.....	53
Resim 7.2. a) 20 barda 4 mm çıkıntı aparatı ile elde edilen kalay tozu SEM görüntüsü b) 20 barda 8 mm çıkıntı aparatı ile elde edilen kalay tozu SEM görüntüsü	54

Resim	Sayfa
Resim 7.3. a) 8 mm çıkıntı aparatı ile 10 barda elde edilen kalay tozu SEM görüntüsü b) 8 mm çıkıntı aparatı ile 30 barda elde edilen kalay tozu SEM görüntüsü.....	55
Resim 7.4. Tozlarda uydulaşma görüntüleri	56
Resim 7.5.h=8mm çıkıntı aparatı ile 30 barda üretilen PŞ parçalar a-b) 110 mm mesafe için, c-d) 120 mm mesafe için.....	57
Resim 7.6. Artan PŞ mesafesi ile gözenek miktarı değişimi	59
Resim 7.7.PŞ numunenin Şekil 7.5'te tanımlı bölgelerdeki gözenek durumu	61
Resim 7.8. PŞ numunede üst bölgeden alt bölgeye doğru tane yapısı değişimi ...	62
Resim 7.9. Ekstrüzyon sonucu oluşan 6 mm çapındaki çubuklar	64
Resim 7.10. Ekstrüzyona bağlı gözenek değişimi.....	65
Resim 7.11. a) 110 mm mesafe için kopmuş çekme numunesi b) döküm kalay için kopmuş çekme numunesi	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Kesit alan
A*	Boğaz alanı
D	Çekme numunesinin çapı
D₁	Ekstrüzyon kalıbı giriş çapı
D₂	Ekstrüzyon kalıbı çıkış çapı
H	Püskürtme mesafesi
L₁	Ekstrüzyon kanalı uzunluğu
P	Gaz basıncı
M	Mach Sayısı
σ_{UTS}	Son çekme dayanımı
Kısaltmalar	Açıklama
PŞ	Püskürtme Şekillendirme
T/M	Toz Metalurjisi

1. GİRİŞ

Mühendislik anlamında bakıldığında, toz metalurjisi (T/M), istenilen boyutta ve şekildeki parçayı, istenilen fiziksel ve kimyasal özelliklerde, ikincil işlemleri en düşük seviyede kullanarak üretebilme teknolojisidir. T/M'nin bu özelliği, bu yöntemi diğer üretim yöntemlerine göre daha avantajlı kılar. Bu yöntem, diğer yöntemlerle üretimi mümkün olmayan, karmaşık şekilli parçaların üretimine de imkan verir [1]. T/M ile parça üretiminde fire oranı ve enerji sarfıyatı diğer yöntemlere göre daha düşüktür ve günümüzde de bu konuda yapılan geliştirme çalışmalarına paralel olarak T/M üretim yöntemi sürekli gelişmektedir.

T/M'nde ilk aşama olan toz üretim aşaması, üretilecek olan parçanın özelliklerini etkileyeceği için en önemli aşamadır. T/M ile parça üretiminde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin bazılarında presleme ve sıvı faz sinterlemesi basamakları uygulanırken, bazı yöntemlerde de ergimiş metal atomize olduktan hemen sonra bir kalıp veya plaka üzerine biriktirme yapılarak parça üretimi gerçekleştirilir.

Püskürtme Şekillendirme (PŞ), sıvı metalin atomize olduktan hemen sonra bir plaka veya bir kalıp üzerinde toplanması prensibine dayanan bir T/M üretim yöntemidir. PŞ yöntemi ile üretilen parçalar üretim parametrelerine bağlı olarak %3 ile %15 arası gözenek içerir. Yapıdaki gözenek miktarındaki artış mekanik özelliklerin düşmesine sebep olur. Bu yapıdaki gözenek miktarını azaltmak ve yapının yoğunluğunu artırabilmek için çeşitli teknikler kullanılır. Bu teknikler arasında en önemlilerinden birisi ekstrüzyondur. Sıcak ekstrüzyon uygulanan parçalar tam yoğun parçanın yoğunluğunun %99'una yakın bir yoğunluğa sahip olur [2].

Bu çalışmada; öncelikle yeni bir yakından eşlemeli Laval tipi nozul tasarımı ve imalatı yapılmış, bu nozul kullanılarak üretilen gaz atomize kalay tozu özelliklerine bazı üretim parametrelerinin etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. PŞ deneylerini gerçekleştirmek için nozula monte edilebilen ve nozula olan mesafesi ayarlanabilen bir biriktirme plakası tasarlanıp imal edilmiştir. En küçük boyutta tozun üretildiği

parametrelerle farklı yüksekliklerde PŞ yöntemi ile parça üretilmiş, üretilen parçalar ekstrüzyon işlemine tabî tutulmuştur. Ekstrüzyon ürünü çubuklardan hazırlanan numunelere çekme testi uygulanmıştır. PŞ değişkenlerinin ve ekstrüzyon işleminin malzemelerin içyapılarına ve mekanik özelliklerine etkileri belirlenerek elde edilen sonuçlar döküm kalay ile karşılaştırılmıştır.

2. TOZ METALURJİSİ

T/M; metalin öncelikle istenilen boyutta, şekilde ve özelliklerde toz haline getirilmesi ve elde edilen tozlardan da parça üretilmesi prensibine dayanır [3]. T/M’de parça üretimi, birçok yöntem kullanılarak yapılabilir. Bunlardan biri, bir kalıp içerisine koyulan tozların basınç uygulanarak sıkıştırılması, ve daha sonrada sinterlenerek gerekli mukavemete sahip olmasının sağlanması aşamalarından oluşur. Sıkıştırma işlemi çoğu kez herhangi bir ısıtma işlemi gerektirmeksizin oda sıcaklığında yapılırken, sinterleme işlemi yüksek sıcaklıklarda yapılır. Bu sıcaklık metalin ergime noktasının altındaki bir sıcaklıktır. Bir diğer parça üretim yöntemi olan PŞ’de ise sıvı metalin atomize olmasından hemen sonra bir kalıp veya plaka üzerinde biriktirilerek katılaşması sağlanır.

Toz metalurjisinin başlangıç aşaması tozun üretilmesidir. 1 mm’den küçük katı parçacıklar toz olarak adlandırılır. Bir tozun en önemli özelliği, yüzey alanının hacmine oranının göreceli olarak yüksek olmasıdır. Tozlar katı ve sıvı arası, ortada bir davranış sergilerler. Tozlar, yer çekimi altında koyuldukları kapları doldurmak için akacaktır. Bu anlamda tozlar sıvı gibi davranırlar. Aynı zamanda tozlar bir gaz gibi sıkıştırılabilirler [4].

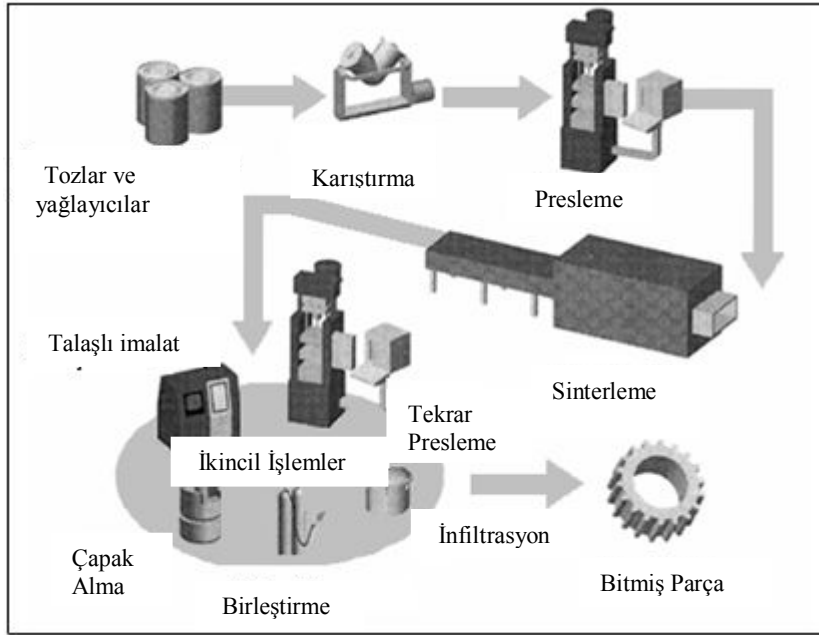
2.1. Toz Metalurjisinin Üstün ve Zayıf Yanları

T/M’nin diğer üretim yöntemlerine göre birçok üstünlüğü vardır. Ekonomik açıdan bakıldığında; hammaddenin yaklaşık %97’si ürüne dönüşür [5]. Çoğu zaman talaşlı imalat gerekmediğinden, fire oranı çok düşüktür. Seri üretim yapıldığında, sürekli aynı toleranslarla çalışabilme imkanı sağlar. Üretim açısından bakıldığında; üretilcek parçanın şekli ve boyutu çok üst seviyede denetlenebilir, karmaşık şekle sahip parçaların üretimi de T/M yöntemi ile daha kolaydır [6,7]. Bazı metallerin ergime sıcaklıklarının çok yüksektir ve bu sıcaklıklara ulaşamaz (tungsten, molibden gibi). Bu metallerden ancak T/M yöntemi ile parça üretilir. Kendinden yağlamalı yataklarda olduğu gibi bazı özellikler de sadece T/M ile sağlanabilir [8,9].

Bütün bu üstünlüklerinin yanında, metal tozlarının ve kullanılan takımların maliyetlerinin yüksek olması da T/M'nin zayıf bir yanıdır.

2.2. Toz Metalurjisinde Temel Basamaklar

T/M ile parça üretiminde genel olarak iki yöntem vardır. Birincisi önce tozu üretip daha sonra parça üretmek, ikincisi ise atomizasyon işlemi sırasında yığma yaparak parça üretmektir. İlk yöntemde genel olarak beş aşama mevcuttur [10]. Bu aşamalar sırasıyla tozun üretilmesi, tozların sıkıştırılması, sinterleme, gerekli durumlarda yapılan özel işlemler (yağ emdirme gibi) ve gerekirse üretilen parçanın yoğunluğunun artırılması (tam yoğunluğa getirme işlemleridir) (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları [10].

2.3. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları

T/M'nin kullanım alanı oldukça geniştir. Aydınlatma sistemleri üretiminde, otomotiv sektörü için dişli çark ve kasnak üretiminde, kesici elmas uç üretiminde, gözenekli metal ve filtre üretiminde, frenler için sürtünme elemanları ve daha birçok özel parça

üretiminde T/M kullanılmaktadır [5]. Şu an ticari olarak kullanılan uçakların motorlarında 680 ile 2000 kg arasında T/M ile üretilmiş parçalar kullanılmaktadır [5]. Bakır ve bakır esaslı alaşım tozları, alüminyum ve paslanmaz çelik tozu pazarları da giderek genişlemektedir. Alüminyum parçalar da özellikle otomobil üreticilerinin ilgisini çekmektedir. Resim 2.1’de T/M uygulamalarına ait bazı örnekler görülmektedir.



Resim 2.1. Toz metalurjisinin çeşitli uygulama alanları [11]

2.4. Toz Üretim Yöntemleri

T/M yönteminde üretilen tozun fiziksel ve kimyasal özellikleri oldukça önemlidir. Bu özellikleri belirleyen de tozların üretim yöntemleridir [12]. Hemen hemen bütün malzemeler toz haline getirilebilir. Fakat malzemeye uygun yöntemin seçilmesi gerekir. Tozların özelliklerinin değişmesi, bu tozlardan üretilecek parçaların özelliklerinin de değişmesi anlamına gelir. Mekanik yöntemler, elektroliz yöntemi, kimyasal indirgeme yöntemi ve atomizasyon yöntemi bir çok toz üretim yöntemi arasından, ticari olarak kullanılan dört yöntemdir.

Mekanik yöntemler; talaş kaldırma, öğütme ve mekanik alaşımlama yöntemi olmak üzere üç grupta incelenir. Kimyasal indirgeme yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntem, oksitlerin CO veya H₂ gibi indirgeyici gazlarla kimyasal olarak indirgenmesidir [4]. Metal tozlarının bir çoğu kimyasal tekniklerle üretilebilir.

Demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobaltın oksitlerinden indirgeme yoluyla tozların üretilmesi, çok bilinen endüstriyel yöntemlerdir. Elektroliz yöntemi ile bakır, demir, çinko, mangan ve gümüş gibi metallerin yüksek saflıklı tozları elde edilir. Ancak elektrolizin kullanım alanı, tozların pahalı olması nedeniyle sınırlıdır [3]. Atomizasyon, en çok kullanılan toz üretim yöntemidir.

2.4.1. Atomizasyon yöntemleri

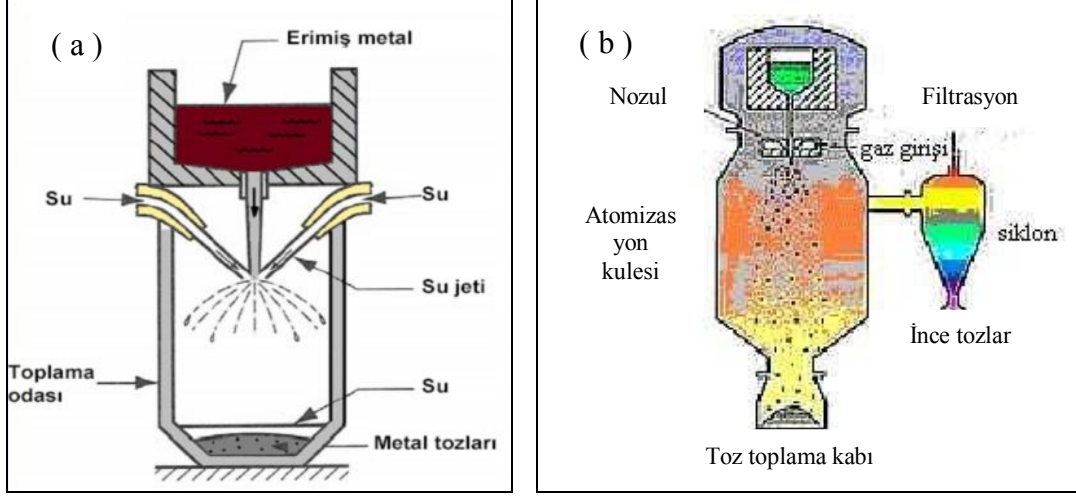
Atomizasyondaki temel ilke, bir potanın dibindeki delikten akmakta olan ergimiş sıvı metal üzerine yüksek basınçlı gaz veya sıvı püskürtülerek metalin toz haline getirilmesidir. Bu işlemle hem metal hem de alaşım tozu elde edilebilir.

Atomizasyon, metal tozlarının üretiminde etkin bir şekilde kullanılmakta olup, paslanmaz çelik, pirinç, demir, alüminyum, çinko, kalay ve kurşun gibi metal ve alaşımları için oldukça iyi sonuçlar verir [13,14]. Ayrıca atomizasyon, alüminyum alaşımlarının ticari miktarlardaki üretiminin en yaygın ve ucuz yoludur [15].

Atomizasyon yöntemleri ;

- 1) Gaz atomizasyonu,
- 2) Su Atomizasyonu,
- 3) Döner Disk Atomizasyonu,
- 4) Vakum Atomizasyonu,
- 5) Ses ötesi Gaz Atomizasyonu.

Farklı atomizasyon yöntemleri içinde en çok kullanılan iki yöntem gaz atomizasyonu ve su atomizasyonudur. Gaz atomizasyonunda gaz olarak genellikle hava, azot ve argon kullanılır.



Şekil 2.2. Atomizasyon Yöntemleri a) Su atomizasyon birimi [4] b) Gaz atomizasyon birimi [16].

Her iki atomizasyon yönteminde de, üretim parametreleri ile tozun ortalama boyutu denetlenebilir. Su atomize tozlar genel olarak karmaşık şekillidir. Ortalama tane boyutu 30-1000 μm arasındadır. Su atomizasyonu ucuz bir yöntemdir, fakat küresel toz üretimi için uygun değildir [17].

Atomizasyon teknikleri içerisinde, ince ve küresel tozlar elde etmede en yaygın olarak kullanılan yöntem gaz atomizasyonu yöntemidir [7]. Gaz atomize tozların ortalama tane boyutu 20-300 μm arasındadır [18].

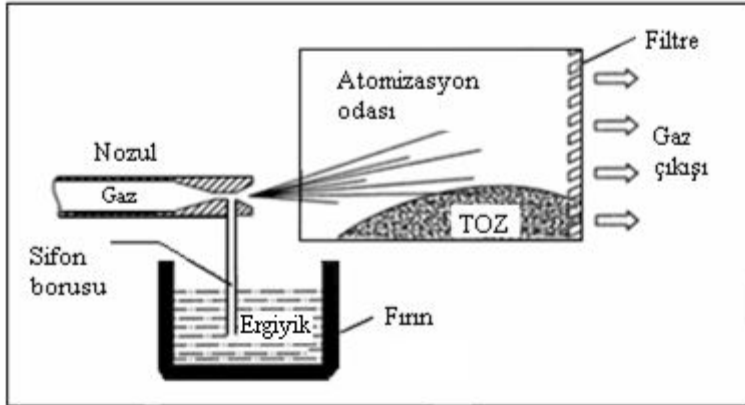
3. GAZ ATOMİZASYONU

Ergimiş metali, hava veya gaz ile parçalayarak metal tozu üretme işlemine gaz atomizasyonu denir. Sıvı metal, nozuldan çıkan yüksek hızlı gazın etkisi ile parçalanarak küçük tanelere ayrılır. Gaz atomizasyonu; küresel yapılı yüksek yoğunlukta, iyi akıcılıkta ve yüksek kalitede olan tozların üretilmesinde yaygın bir işlemdir. Aynı zamanda gaz atomizasyonu ile yüksek saflıkta az oksijen içeren metal tozu üretimi mümkündür. Böyle tozların püskürtme kaplama, püskürtme bağlama, kimya endüstrisi, tıp teknolojisi gibi geniş bir kullanım alanı vardır. Gaz atomizasyonu, süper alaşımlar ile yüksek alaşımlı metallerde de çok başarılı sonuçlar vermektedir. Gaz atomizasyonu birimlerinin tasarımları metal besleme mekanizması, ergitme ve biriktirme bölümlerinin şekline göre değişmekle beraber, ana amaç sıvı metale enerji vererek küçük tanecikler elde etmektir.

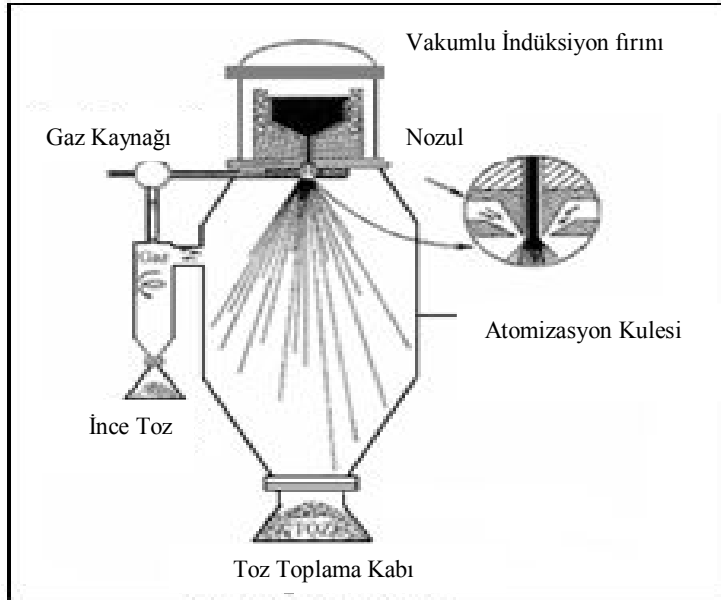
Gaz atomizasyonunda gaz jeti, sıvı metal demetini kesip parçalamak için gerekli kinetik enerjiyi damlacıklara aktarır, daha sonra damlacıkları gaz akışı içinde ivmelendirir ve uçuşma esnasında onların soğumasını sağlar [19]. Gaz atomizasyonunda hava veya N_2 , Ar, CO_2 ve He gibi asal gazlar kullanılabilir. Oksijen miktarının az olmasının istendiği durumlarda asal gazlar kullanılır [7].

Gaz atomize tozlar küresel toz şekli, ergitilen metalle aynı kimyasal bileşime sahip olma gibi çeşitli üstün özelliklere sahiptirler [20]. Bu üstün özelliklerinden dolayı gaz atomizasyonu yöntemi tercih edilen bir yöntemdir. [21].

Gaz atomizasyonunda yatay ve düşey gaz atomizasyon birimi olmak üzere iki farklı birim kullanılmaktadır. Yatay gaz atomizasyon birimleri düşük ergime sıcaklığına sahip metallerin atomizasyonunda kullanılır (Şekil 3.1). nozuldan geçen yüksek hızdaki gaz, vakum etkisi yapar ve ergiyik metal gaz genişleme bölgesine çekilir. Burada metal demetinin püskürtülüp parçalanmasıyla elde edilen damlacıklar, toz toplama odasındaki uçuşma sırasında soğur ve katılaşır. Birimin sonunda filtre mevcuttur ve bu filtre sayesinde gaz tahliye edilirken; toz, toplama odasında tutulur [4].



Şekil 3.1. Yatay gaz atomizasyon birimi [10].



Şekil 3.2. Düşey gaz atomizasyon birimi [10].

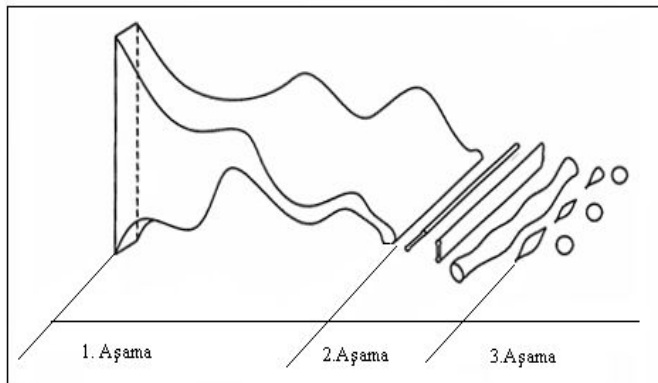
Düşey gaz atomizasyon birimlerinde (Şekil 3.2) ergimiş metal, nozul içerisine ısıya dayanıklı bir akış borusu yardımıyla nozul içerisine akıtılır. Nozul içerisinde gaz ile çarpışan sıvı metal, küçük parçalara ayrılarak kule içerisine doğru yönlendir. Atomizasyon kulesinin çapı bu çarpışma sonucu oluşan damlacıkların kule çeperine çarpmadan aşağı düşmesini sağlayacak şekilde, yeterince büyük olmalıdır. Düşey gaz atomizasyon biriminde üretilen tozların boyutları daha incedir [22].

Atomizasyon birimlerinde kullanılan siklon, çok ince tozların dışarı atılmadan tutulmasını sağlar [4].

3.1. Gaz Atomizasyon Mekanizmaları

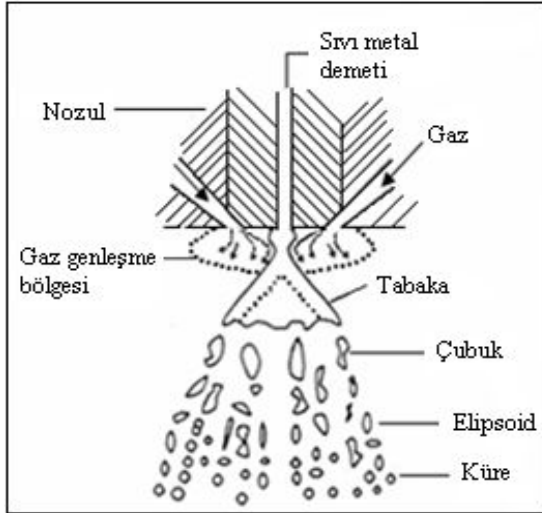
Gaz atomizasyonunda sıvı demetinin toz haline gelmesi üç aşamada gerçekleşir. Birinci aşama, sıvı metalin tabakalaşma aşamasıdır. İkinci aşamada tabakalar çubuk haline gelir, üçüncü aşamada ise çubuklar taneciklere dönüşür ve katılarak toz halini alır.

Atomizasyon işlemini modellemek için birçok çalışma yapılmıştır. Gordon [23], Mehrotra [24,25], Dombrowski ve Johns [26], See ve Johnston [27], Bürger ve ark. [28,29], Putimtsev [30] ve Ünal [31] bu konuda çalışmışlardır. Gordon [23] yapmış olduğu çalışmada, hava jetine maruz sıvı damlacıkların parçalanması, damlacıkların çapı ve bunun oluşum zamanıyla ilgili bir model ortaya koymuştur. Dombrowski ve Johns [26] ise yaptıkları çalışma sonucunda bu aşamaları fiziksel bir model haline getirmişlerdir (Şekil 3.3). Bu modelde öncelikle, tabaka üzerinde kritik bir genliğe ulaşıncaya kadar dalgalar büyür. Sonra dalganın tepe ve dip bölgelerinde yırtılmalar oluşur ve yarım dalga boyuna karşılık gelen kısımlar kırılır. Kırılan bu kısımlar yüzey gerilmesinin etkisiyle kararsız çubuk haline gelerek damlacıklar oluşur [18,26].



Şekil 3.3. Yassı tabakadan damlacık oluşumu [18,26].

See ve Johnston [27] tarafından geliştirilen model German [4] tarafından yapılan çalışma sonucunda daha açık bir şekilde ifade edilmiştir (Şekil 3.4). Gaz genleşme bölgesindeki emme basıncı sebebiyle erimiş metalin, önce içi boş ince bir konik tabaka şeklini, daha sonra da çubuk, elipsoid ve küre şeklini aldığı belirtilmiştir.



Şekil 3.4. See modelinin German tarafından farklı bir gösterimi [4,32].

Ünal [31] yaptığı çalışmada gaz atomizasyon işlemini fotoğraflayıp yorumlamıştır. Sonuç olarak birincil bölünmede yaklaşık olarak 500 μm çapındaki damlacıkların oluştuğunu, daha ince tozların ise ikincil bölünmenin ürünü olduğunu tespit etmiştir.

Bütün bu çalışmaların neticesinde, gaz atomizasyonu işleminin birkaç aşamada meydana geldiği sonucuna varılabilir. Tüm çalışmalarda, ilk aşamada sıvı metalin tabaka haline geldiği, ikinci aşamada tabakaların bölünerek daha küçük parçalar oluşturduğu ve son aşama olarak da parçaların daha çok bölünerek damlacıklara dönüştüğü ve katılaştığı ifade edilmektedir.

3.2. Gaz Atomizasyonunda Üretim Parametreleri

Gaz atomizasyonu parametrelerini, ergimiş sıvı metalle ilgili parametreler ve gaz sistemi ile ilgili parametreler olarak ayırabiliriz.

Sıvı metal ile ilgili olan üretim parametreleri; ergimiş metalin:

- a) sıcaklığı,
- b) viskozitesi,
- c) yüzey gerilmesi,
- d) akış debisidir.

Gaz sistemi ile ilgili üretim parametreleri ise; gazın:

- a) cinsi,
- b) basıncı,
- c) debisi,
- d) hızıdır.

Bunlara ilave olarak kullanılan nozulun geometrisi de atomizasyon işlemini etkileyen önemli bir parametredir [3]. Bu üretim parametreleri; tozun boyutunu, içyapısını, şeklini, yüzey yapısını ve kimyasal içeriğini belirler [32]. Toza ait bu özellikler de görünür yoğunluk, akıcılık, mukavemet, sıkıştırılabilirlik, sinterleme ve tokluk gibi özellikleri etkiler.

3.2.1. Toz boyutu ve dağılımı

Tozun boyutunu ifade etmek için çeşitli ortalama çap ölçüleri kullanılır [33]. Bunlardan en yaygın olarak bilinen, boyut dağılımı grafiğindeki toplam yüzde eğrisinin %50'sine karşılık gelen kütle ortalama çapıdır (d_m veya d_{50}). Ayrıca, Sauter ortalama çapı (d_{vs}) ve hacim ortalama çapı (d_{vm}) da kullanılmaktadır.

Literatürde toz özelliklerinin üretim parametreleriyle olan ilişkisini belirlemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Lubanska [34]; yaptığı çalışmalar sonucunda, ortalama toz boyutunun (d_m) sistem ve malzeme değişkenlerine bağlı olarak değişimini boyutsuz deneysel bir bağıntı geliştirerek göstermiştir:

$$\frac{d_m}{D} = K \left[\left(\frac{v_m}{v_g (We)} \right) \left(1 + \frac{M}{A} \right) \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

Burada; D, sıvı metal demeti çapı (μm); v_g , gazın kinematik vizkozitesi (m^2/s); v_m , sıvı metalin kinematik vizkozitesi (m^2/s); M/A , metal gaz debisi oranı; We, Weber sayısı ($We = \rho_m v_g^2 D / \sigma_m$); K ise, 40 ile 50 arası sabit bir katsayıdır.

Ancak Mehrotra [24], daha sonra yaptığı çalışmalarda deneysel olarak elde ettiği sonuçlarla Lubanska denkleminde hesaplanan sonuçların farklı olduğunu göstermiştir.

Benzer şekilde Ünal [33], Lubanska bağıntısından hesapladığı ortalama boyut değerinin, deneysel yolla elde ettiği değerden magnezyum tozu için çok yüksek, çinko için ise çok düşük olduğunu tespit etmiştir. Bu konuda Özbilen ve ark.[35] da çalışmış ve Mehrotra'nın [24] ve Ünal'ın [33] elde ettiği sonuçlara benzer sonuçlar elde etmiştir. Tüm çalışmaların ortak sonucu olarak, Lubanska denkleminin sıvı metalin fiziksel özelliklerinin toz boyutuna etkisini doğru bir şekilde temsil edemediği gösterilmiştir.

Toz boyutu, atomizasyon gaz basıncı ve ergimiş metalin sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Şekilde görüldüğü gibi gaz basıncının ve sıcaklığının artışı ortalama toz boyutunu küçültmektedir [7].

Ortalama toz boyutunu etkileyen bir diğer parametre de gaz jetinin açısıdır. Bu açı nozul geometrisine bağlı bir parametredir. Bu konu üzerine yapılan çalışmalar sonucunda, gaz jetinin açısının küçülmesiyle ortalama toz boyutunun da küçüldüğü görülmüştür. Azot ile atomize edilmiş kalay ve kurşun tozlarında 30° çarpma açısı, 60° çarpma açısına göre daha küçük ortalama boyutlu toz üretilmiştir.

Ergimiş sıvı metalin debisi de, ortalama toz boyutunu etkileyen etmenlerdendir. Bu değişken, metal film kalınlığını ve gaz ile sıvı metal arasındaki ısı transferini etkiler. Daha kalın metal filmi, birincil bölünme esnasında damlaların ortalama boyutunu

daha büyük yapar [36]. Bu parametre doğrudan üretim hızını denetlediği için ekonomik olarak da en önemli değişkenlerdendir [37].

Diğer önemli üretim değişkeni de özgül gaz tüketimidir [7]. Özgül gaz tüketimi, gaz/metal kütle oranı veya gazın hacminin metalin kütesine oranı olarak ifade edilir [6]. Gaz/metal kütleli debi oranındaki artış, ortalama toz boyutunu küçültmektedir.

3.2.2. Toz şekli, yüzey yapısı ve içyapısı

Tozun şekli, üretim yöntemi ve boyutuna bağlı olarak değişkenlik gösterir [4]. Tozun şeklinin küresel veya karmaşık şekilli olmasını katılma süresi belirler [12]. Küresel şekilli toz elde etmek için, sıvı damlacığının küreselleşme süresinin ($t_{küre}$), katılma süresinden ($t_{katı}$) daha kısa olması gerekir. Eğer küreselleşme süresi uzun ise, karmaşık şekle sahip tozlar oluşur. Tozun küresel veya karmaşık şekilli olması, tozların paketlenmesini, akıcılığını ve sıkıştırılabilirliğini etkileyen bir parametredir.

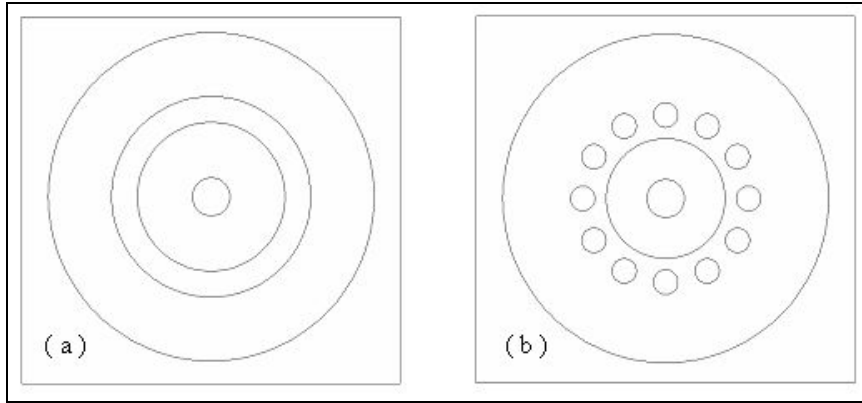
Ünal [31], helyum gazını kullanarak alüminyum tozu elde etmiştir. Bu tozlardan 30 μm 'nin altındaki bütün tozların küresel şekilli, daha iri tozların ise karmaşık şekle sahip olduğunu tespit etmiştir.

Genel olarak gaz atomizasyonu yöntemiyle üretilmiş tozlar düzgün yüzeylidir [18]. Ayrıntıda ise hücreli veya dallantılı bir içyapı mevcuttur.

Gaz atomizasyonu işlemi sırasında küçük tozların kendisinden daha büyük tozlarla çarpışması sonucu uydu oluşumları meydana gelir. Tozların birbiriyle çarpışması sonucunda; toz boyutu, boyut dağılımı ve toz şekli etkilenir [12]. Uydu oluşumları, büyük ve küçük parçacıkların katılma süreleri arasındaki fark ve farklı boyutlu damlacıkların atomizasyon gazının etkisiyle değişik oranlarda ivmelenmesi ile meydana gelir [38].

3.3. Gaz Atomizasyonda Kullanılan Nozul Tipleri

Gaz atomizasyonda nozul, akışkanın hızını arttırırken basıncını düşüren geometrik yapıdır. Nozul, atomizasyon ortamının akışını denetler ve onu istenen özelliklerdeki bir tozu üretmek için sıvı metalle temas ettirip, sıvı metalin parçacıklara ayrılmasını sağlar [39]. Nozul tipi, tozların boyutunu ve şeklini önemli derecede etkiler. Nozullar gaz jetinin çıkış şekline göre ikiye ayrılır, birincisi dairesel yarıklı nozul tipi ikincisi dairesel delikli nozul tipidir (Şekil 3.5).

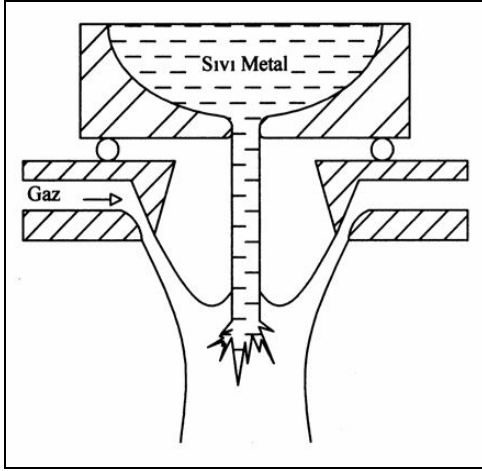


Şekil 3.5. Nozul gaz jeti tipleri a) Dairesel Yarıklı; b) Dairesel Delikli

Ayrıca nozullar, sıvı metalin gaz jetiyle buluşma noktasına göre de; a) serbest düşmeli b) yakından eşlemeli olmak üzere iki grupta toplanmaktadır [33, 34].

3.3.1. Serbest düşmeli nozul sistemi

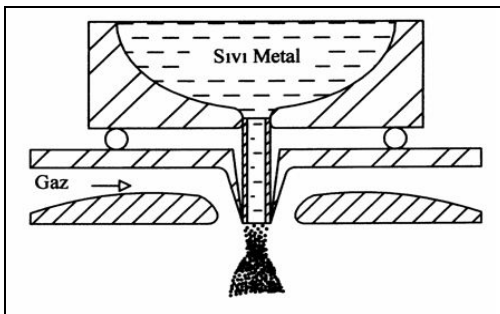
Serbest düşmeli nozul sistemlerinde sıvı metal ergitme potasının belli bir mesafe altına kadar yerçekiminin etkisiyle aktıktan sonra gaz jetiyle çarpışır. Sıvı metalle gazın çarpıştığı anda sıvı metal çok küçük damlacıklara ayrılır ve bu damlacıklar uçarken katılaşır. Bu sistemde sıvı metali çok küçük damlacıklara ayırmak için gerekli enerjinin aktarılmasıyla ilgili problemler olduğu için çok tercih edilen bir sistem değildir. Şekil 3.6'te serbest düşmeli nozul sistemi görülmektedir.



Şekil 3.6. Serbest düşmeli nozul sistemi [23].

3.3.2. Yakından eşlemeli nozul sistemi

Yakından eşlemeli nozullarda sıvı metal potadan metal akış borusuna akar ve metal akış borusunun hemen ucunda gaz jeti ile çarpışarak küçük damlacıklara ayrılır. [35,40]. Bu sistemlerde, serbest düşmeli nozul sistemlerinden farklı olarak gaz jetinin açısı büyük tasarlanabilir. Şekil 3.7’de yakından eşlemeli nozul sistemi gösterilmiştir.

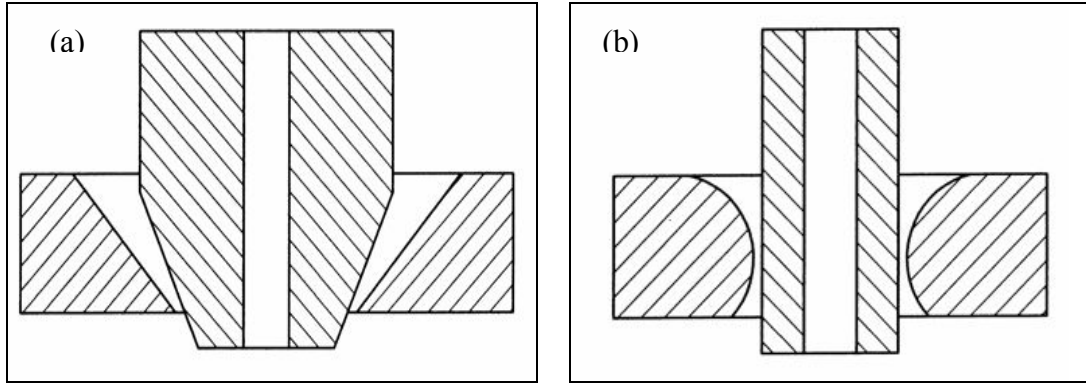


Şekil 3.7. Yakından eşlemeli nozul sistemi [23].

Yakından eşlemeli nozul sistemleri yüksek verimli ve çok ince tozların üretimi için uygundur. Çünkü gaz jeti, akmakta olan sıvı metale çok yakın olduğu için gazın kinetik enerjisi sıvı metale daha etkin olarak aktarılır ve bu nozul sistemi gaz jetinin daha büyük açılarında atomizasyon yapılabilmesine imkan verir [6].

3.3.3. Gaz atomizasyonunda nozul geometrisi

Nozul geometrisi gaz akışını denetlediği için önemli bir parametredir [41]. Nozul geometrisi, gaz hızını ses hızının altındaki hızlarla sınırlayan daralan tasarım (Mannesmann) [33] ve ses hızının üstündeki hızlara ulaşmasına imkan veren daralan/genişleyen tasarım (Laval) şeklinde olabilir [33]. Şekil 3.8’de ses hızının altındaki (sonik) ve üstündeki (süpersonik) akışlar için nozul geometrileri görülmektedir.



Şekil 3.8. Nozul geometrisi a) Sonik geometrili (Mannesmann), b) Süpersonik geometrili (Laval) [10].

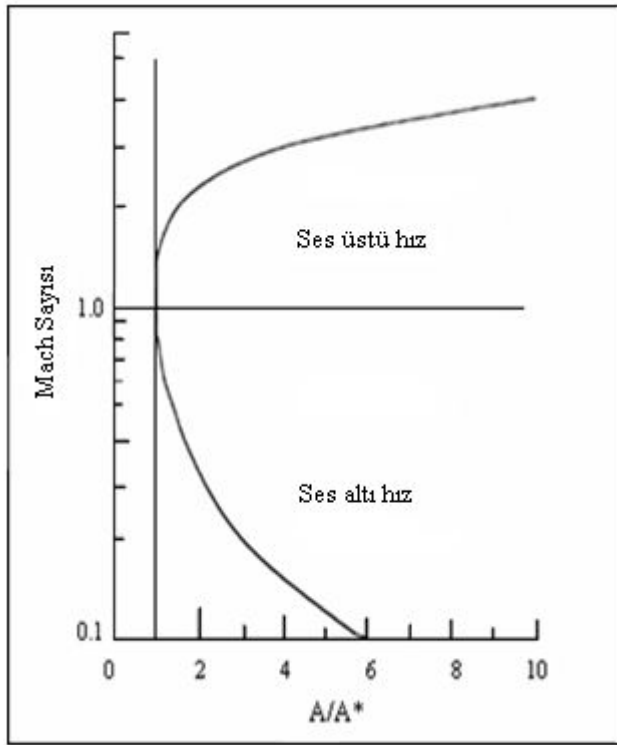
Gaz atomizasyonunda, gaz jetinin hızının ses hızının üstünde veya altında olmasına bağlı olarak akış özellikleri de değişir. Bu değerlendirme Mach sayısının değerine göre yapılır. Mach sayısı, akışkan hızının ses hızına oranıdır ve şu şekilde ifade edilir:

$$M = \frac{V}{c} \quad (3.2)$$

Mach sayısının (M) “1” olduğu nokta ($V=c$ (durgun akış)) önemlidir ve bu nokta sonik hız olarak isimlendirilir.. Mach sayısı 1’in altında ise ses altı akış ($V<c$), Mach sayısı 1’in üstünde ise ($V>c$) ses üstü akış olarak nitelendirilir. Ses altı hızlar için

akış yönünde kesit alanı azalmaktadır. $M=1$ durumunda ise, en düşük kesit alanı elde edilir. Ses üstü hızda azalan basınçla akış yönünde kesit alanı artmaktadır.

Şekil 3.9’de verilen, kesit alan oranı ile Mach sayısı arasındaki ilişki, $A/A^*>1$ için “M”nin ses altı ve ses üstü olmak üzere iki değeri olduğunu göstermektedir. Bunlardan biri, nozulun daralan kısmındaki “M” değeri, diğeri ise aynı kesit alan oranına genişleyen kısımda karşılık gelen noktaya ait M değeridir.

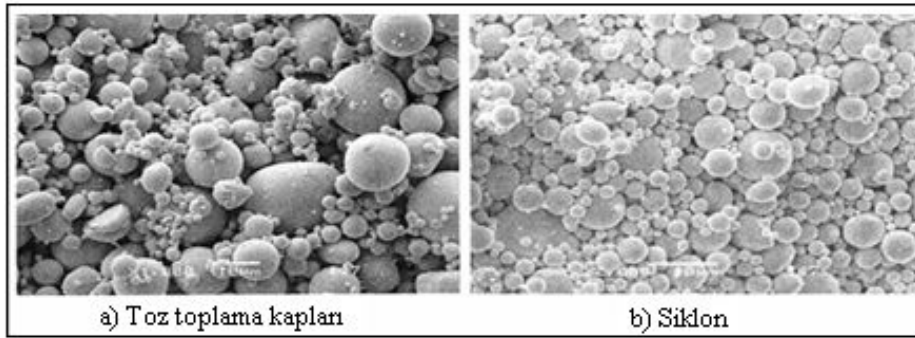


Şekil 3.9. Kesit alan oranı ile Mach sayısı arasındaki ilişki [42].

Uslan [10], yaptığı çalışmada nozul geometrisinin yakından eşlemeli nozullara etkisini araştırmıştır. Yapılan bu çalışmada metal akış borusu çapı 4 mm olarak sabit tutulmuş ve en kaba tozlar A/A^* oranının 1 olduğu daralan nozulda üretilmiştir. En iyi sonuçlar ise, A/A^* oranının 3’e eşit olduğu daralan/ genişleyen nozul tasarımında elde edilmiştir.

Ekici, yaptığı çalışmalar sonucunda gaz basıncının temel bir parametre olmadığı fakat gazın debisini ve hızını etkilediğinden dolayı tozların inceliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Basınç artışı, sıvı metal üzerine daha yüksek enerji aktarılmasına neden olduğundan daha küçük ortalama toz boyutuna sahip alüminyum tozları üretmiştir. Aynı çalışmada gaz çıkış alanının artışı, gaz debisini arttırmış ve daha ince tozların üretilmesi sağlanmıştır. Yine aynı çalışmada nozul gaz çıkış açısının daralmasıyla toz boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir [2].

Aydın [16], nozul boğaz alanı, gaz çıkış alanı ve açısı ve nozul geometrisi gibi temel parametreleri birbirinden farklı daralan/genişleyen geometriye sahip iki farklı Laval tipi nozulla çalışmıştır. Bu çalışmanın sonucu olarak, metal akış borusunun konumuna göre gaz çıkış alanın küçülmesiyle geri basınç oluşumunun önlendiği ve atomizasyon gaz basıncındaki artışların, ortalama toz boyutunu küçülttüğü tespit edilmiştir. En küçük tozlar 1,47 MPa gaz basıncında üretilmiş ve ortalama toz boyutu (d_{50}) 12,63 μm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. 1,47 MPa gaz basıncında üretilmiş azot atomize tozların genel görüntüsü [16].

3.3.4. Nozul tasarımında temel parametreler

Nozul tasarımında temel parametrelerden birisi kesit alanının daraldığı boğaz kısmında Mach sayısı 1 olacak şekilde sistemi boyutlandırmaktır. Boğaz alanı, verilen bir debi için durgunluk şartları (P_o , T_o) ve akışkan özelliklerine göre

belirlenir. Bir mükemmel gazın izentropik akışında Mach sayısına ve durgunluk koşullarına bağlı olarak aşağıdaki denklemler yazılır:

$$\frac{T}{T_o} = \frac{1}{1 + [(k-1)/2]M^2} \quad (3.5)$$

$$\frac{P}{P_o} = \frac{1}{[1 + [(k-1)/2]M^2]^{k/(k-1)}} \quad (3.6)$$

Bu denklemler gerektiğinde izentropik olmayan akışlarda Mach sayısına göre gerçek durgunluk değerlerinin belirlenmesinde kullanılır [43]. Boğaz boyutlandırıldıktan sonra nozul tasarımında önemli bir nokta da kesit alan oranlarının belirlenmesidir. A^* , boğaz alanını temsil etmek üzere kesit alan oranları için:

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}} \quad (3.7)$$

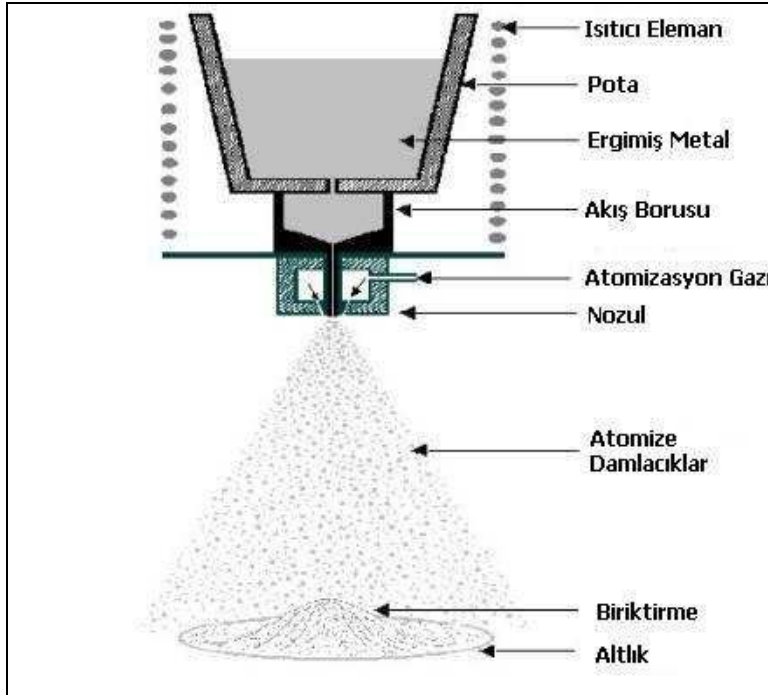
bağıntısı yazılır. Bu bağıntı kullanılarak çıkış basıncı ve Mach sayısı tayin edilir. Tasarım esnasında çıkış basıncı yaklaşık olarak atmosfer basıncına eşit alınır. Durgunluk şartları, çıkış basıncı ve debisi için farklı akış geometrisine sahip, çok sayıda tasarım yapılabilir.

4. PÜSKÜRTME ŞEKİLENDİRME

Püskürtme Şekillendirme (PŞ), hızlı katılaşma yoluyla ergimiş sıvı metalden alaşım ve kompozit malzemelerin üretilmesi yöntemidir. PŞ, metalin toz haline geldikten sonra katılaşmadan önce bir kalıp üzerinde biriktirilmesi prensibine dayanır. PŞ yöntemi Osprey Ltd. şirketi tarafından 1960'lı yıllarda geliştirilmiştir. PŞ parametreleri, üretilcek olan malzemelerin tane boyutu ve gözenek miktarına, dolaşısıyla mekanik özelliklerine etki etmektedir. PŞ parçalar, üretim parametrelerine bağlı olarak %3 ile %15 arasında gözenek içerir. Bu gözeneklerin kapatılmasında kullanılan tam yoğunluk işlemlerinden en önemlisi ekstrüzyondur. Sıcak ekstrüzyon ile malzemeler %99 üzeri yoğunluklara çıkarılabilir. Bu yöntemle geleneksel olarak yapılamayan alaşımların ve ürünlerin üretimi mümkündür.

Püskürtme şekillendirme yönteminin iki önemli üstünlüğü vardır. Bunlardan birincisi ergimiş metalden doğrudan, tek bir işlemle istenilen fiziksel özelliklerde ürün elde etme imkanıdır. PŞ ile üretilen malzemeler üstün mekanik özelliklere sahip olarak üretilir. PŞ ile üretilen birçok ürünün özellikleri T/M işlemi ile üretilen ürünlerle benzerlik gösterir. PŞ işleminin üstünlüklerinden biri de yüksek malzeme biriktirme oranıdır (0.2-2 kg/s). PŞ işleminin diğer üstünlükleri de küçük tane boyutu ve daha iyi mekanik özelliklerdir [44].

PŞ birimi, bir gaz atomizasyonu birimi ile metal tozunu biriktirme işinde kullanılacak bir biriktirme mekanizmasından oluşur (Şekil 4.1). Bütün PŞ uygulamaları, gaz atomizasyonu yöntemi ile sıvı metalin veya alaşımlarının atomize edilmesi ilkesine dayanır. Atomize olmuş sıvı metal damlacıkları soğutucu bir ortamda soğutulurlar [44,45]. Atomize olmuş sıvı damlacıklar, henüz katılaşmadan önce önlerine eğer bir plaka koyulursa üst üste yığılarak katılırlar. Eğer damlacık demeti, yollarına yerleştirilmiş dönmekte olan bir milin yüzeyine çarparsa onu kaplamaya başlar. Mil aynı zamanda döndüğünden, katılan damlacıklarla elde edilen kaplama çevresel olarak eşit kalınlıkta oluşur. Böylece çeşitli kalınlıklarda borular üretmek mümkündür.

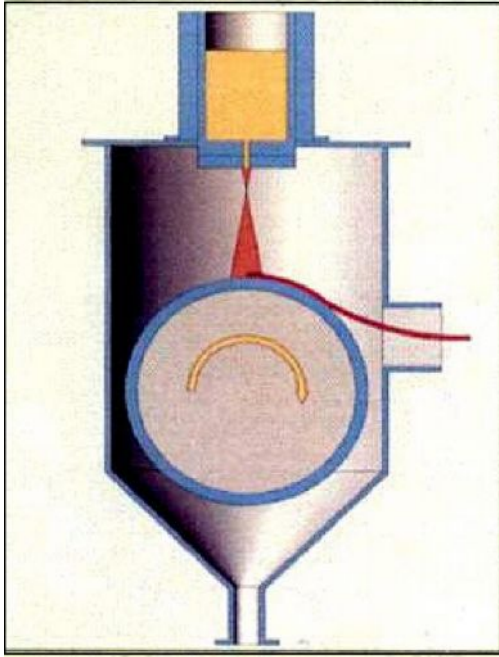


Şekil 4.1.PŞ yöntemi [46]

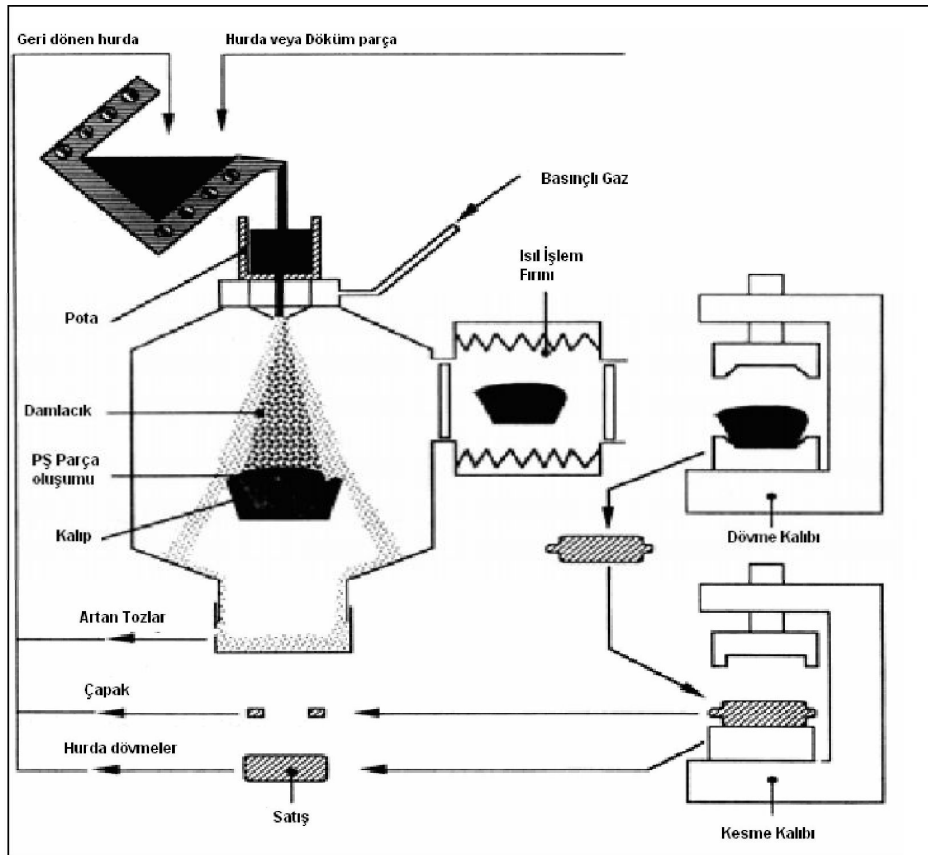
Püskürtme şekillendirme yöntemleri: Endüstriyel alanda da uygulanan ana PŞ yöntemleri aşağıda açıklanmıştır. Bunlara ek olarak halen araştırma halinde olan değişik uygulamalar da vardır.

Püskürtme sarma: Bu yöntemle, üretilcek parçanın özelliğine bağlı olarak sürekli veya kesikli olarak kalınlığı 1mm'nin üzerinde şeritler halinde parçalar üretilmektedir (Şekil 4.2.). Çeşitli sürtünme elemanları ve aşınmaya dirençli malzemeler bu yöntemle şerit halinde üretilmektedir.

Püskürtme dövme: Bu işlemde gaz atomize metal doğrudan bir kalıba yöneltilir veya bazı durumlarda hareket ettirilebilen düzlem şeklinde bir tabaka üzerine yönlendirilir (Şekil 4.3). Yüksek yoğunluklu püskürtme kullanılarak gözenek miktarı yaklaşık %1 civarında tutulur, böylece malzemede oluşacak oksitlenmeler azaltılarak dövme işlemi dışarıda yapılabilir [6]. Dövme işleminden sonra parça tam yoğunluğa ulaşır. Böylece üretilen parçalar, normal dövme ile üretilen parçalara göre daha yüksek mekanik özellikte olur.



Şekil 4.2. PŞ ile şerit üretimi [2]



Şekil 4.3. PŞ ile dövme işlemi [2]

Püskürtme kaplama: Ergime noktası düşük olan Al ve Zn gibi metallerle çeliği kaplama işlemi; çeliğin üstündeki oksit tabakasını yüksek sıcaklıkta indirgeme ile azaltıp daha sonra çeliği sıcakken ergimiş Al, Zn veya Al–Zn banyosuna daldırılarak yapılır.

Püskürtme şekillendirme ürünleri; silindir kütükler, borular, kaplanmış ürünler, alüminyum, bakır, nikel, demir ve silikon bazlı alaşımlar, otomotiv, elektronik ve uzay teknolojileri gibi şekil, alaşım ve pazar açısından geniş bir alana sahiptir.

PŞ ile ilgili literatürde birçok çalışma vardır. Lavernia vd. [34] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak düşük karbonlu çeliklerde PŞ işlemi süresince ısı transferini ve katılma davranışını incelemişlerdir. PŞ yöntemiyle biriktirme işlemi yapılırken yığılan parçanın üst yüzeyinin sıcaklığının hesaplamalarda oldukça önemli bir parametre olduğu; bu sıcaklığın yayılım yoluyla birleşmeyi sağlayacak, ancak içyapıda tane büyümesine neden olmayacak büyüklükte olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca yığılan parçanın kesit alanının sürekli değişmesi sebebiyle işlemin kararsız olduğu tespit edilmiştir.

Kasama ve arkadaşları [47], Fe-Si alaşımı ile yaptıkları çalışmada PŞ yöntemiyle ürettikleri parçaların içyapılarını incelemiş ve parçaların tabanındaki gözenek miktarının üst noktadaki gözenek miktarından fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Ferrarini ve arkadaşları [48], AlFeSi alaşımı ile çalışmışlar ve PŞ yöntemi ile ürettikleri parçanın dökme parçaya göre çekme mukavemetinin daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

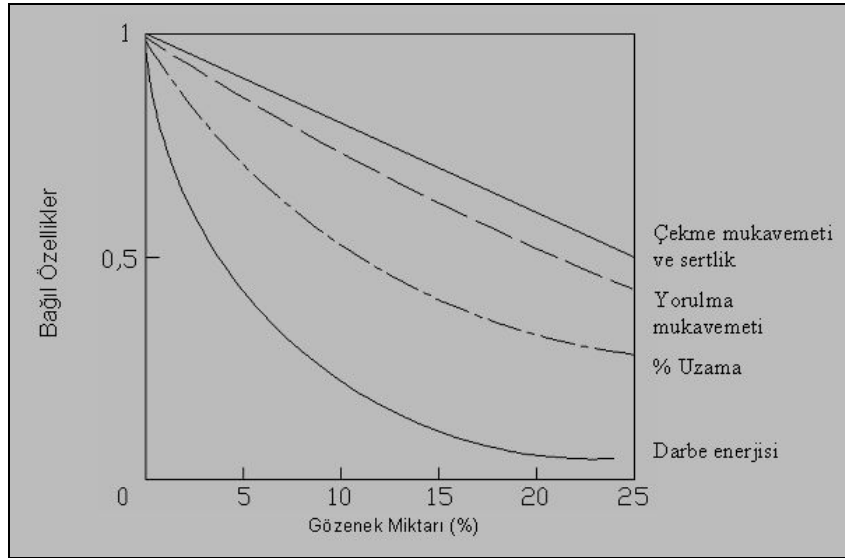
Takahara [36], PŞ ile üretilmiş ötektoid üstü Al-Si alaşımlarının özelliklerini araştırdığı çalışmada; gaz/metal debisi oranının 5'ten büyük olduğu durumlarda katılma hızının ve eğme mukavemeti değerinin arttığını belirtmiştir. Yapılan diğer mekanik testlerle de, PŞ malzemenin dayanımının geleneksel T/M malzemelere göre daha fazla olduğu gösterilmiştir.

Srivastava ve arkadaşları [38] tarafından yapılan bir başka çalışmada PŞ ile üretilmiş Al-Si alaşımlarının içyapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Üretilen parçalara 480°C sıcaklıkta ekstrüzyon uygulanmıştır. Oda sıcaklığında çekme deneyi uygulanan PŞ alaşımların mukavemetleri ile süneklikleri, döküm alaşımlara göre önemli ölçüde iyileşme göstermiştir.

Ekici [2] yapmış olduğu çalışmada, PŞ yöntemiyle alüminyum kullanarak parçalar üretmiştir. Bu parçaları ekstrüzyonla tam yoğunluk işlemi uygulamış ve ekstrüzyon sonrası elde ettiği çubuklara çekme deneyi uygulamıştır. Sonuç olarak ekstrüze edilmiş parçaların çekme mukavemetlerinin, ekstrüze edilmiş döküm parçalara göre %10'a varan bir iyileşme gösterdiği tespit edilmiştir.

5. TAM YOĞUNLUK TEKNİKLERİ

T/M yöntemi ile üretilmiş malzemelerin mekanik özellikleri, içindeki gözenek miktarına bağlı olarak değişir. Gözenek miktarı arttıkça parçanın mekanik özellikleri azalır.



Şekil 5.1. Mekanik özelliklerin gözenek miktarına göre değişimi [2]

Mekanik özellikler, parça içindeki gözenek miktarıyla ters orantılı olarak değişmektedir (Şekil 5.1). Gözenek miktarının yanı sıra, gözenek tipi ve büyüklüğü de malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen parametrelerdir. Gözenek miktarıyla, malzemenin çekme mukavemeti arasındaki ilişki incelendiğinde, diğer mekanik özelliklere göre daha az bir değişim vardır. Darbe enerjisindeki değişim en fazladır (Şekil 5.1).

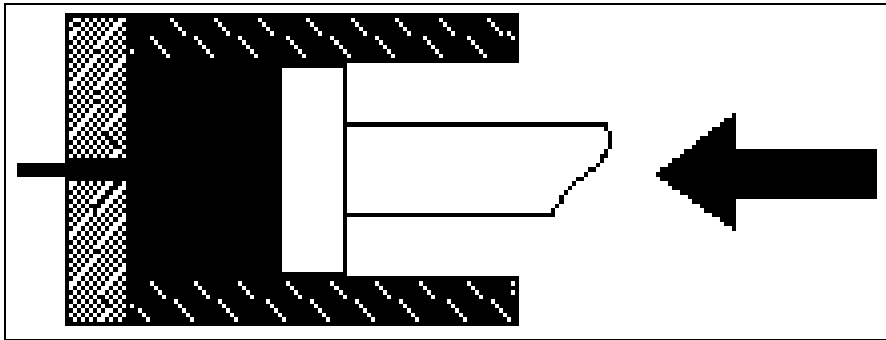
Yüksek başarımlı istenen bütün uygulamalarda gözenek miktarının düşük olması gerekir. PŞ parçalar üretim yöntemine de bağlı olarak %3-15 arasında gözenek içerir. Parçadaki gözenek miktarını azaltmak için tam yoğunluk işlemleri uygulanmaktadır.

T/M yöntemiyle üretilmiş gözenek içeren yapıya, gözenek miktarını azaltmak için uygulanan bazı tam yoğunluk işlemleri şunlardır:

- 1) *İzostatik presleme:* Parçaya her yönden eşit basınç uygulanır. Bu durumda gözenek tamamen kapanmaz, ancak boyutu küçülür.
- 2) *Presleme:* Parçaya her yandan basınç uygulanır, alt ve üst basınçlar yanlardaki basınçlardan fazladır, gözenek yana hareketle kısmen kapanabilir.
- 3) *Açık kalıpta toz dövme:* Parçaya alttan ve üstten basınç uygulanır, gözenekler yana hareketlerle tamamen kapanır ancak, parçada fiçilaşma ve çatlak oluşumuna yol açar.
- 4) *Kapalı kalıpta toz dövme:* Yığma ve presleme tekniklerinin birleşimi şeklindedir. Parça önce yığmaya maruz kalır, fiçilaşma ve çatlak oluşumundan önce presleme başlar.
- 5) *Ekstrüzyon:* Gözenek kapatmak için en iyi tekniklerden biridir. Yanal malzeme akışı en üst seviyededir ve yüzey çatlağı da oluşmaz.

5.1 Ekstrüzyon

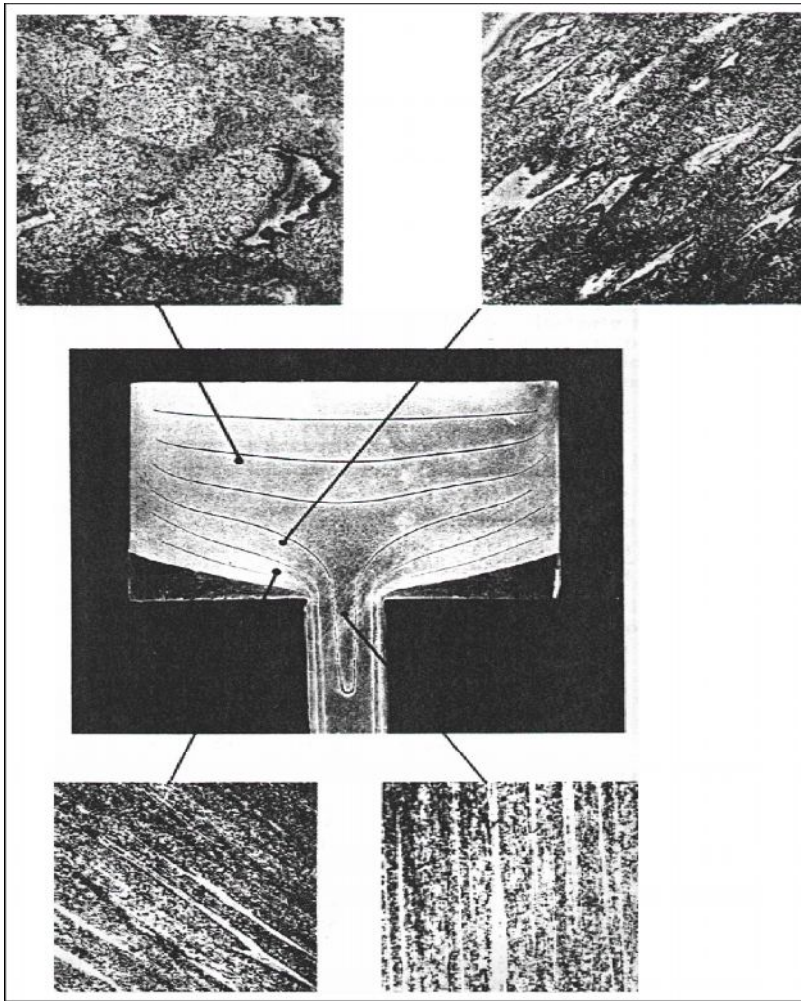
Ekstrüzyon, katı bir parçanın istenilen şekle sahip, kesit alanı daralan bir kalıp içerisinde basınç yardımıyla itilerek şekillendirilmesi işlemine denir (Şekil 5.2). Ekstrüzyon, sıcak ve soğuk ekstrüzyon olmak üzere ikiye ayrılır. Soğuk ekstrüzyon, kurşun, kalay gibi yumuşak malzemelere uygulanır.



Şekil 5.2. Doğrudan ekstrüzyon

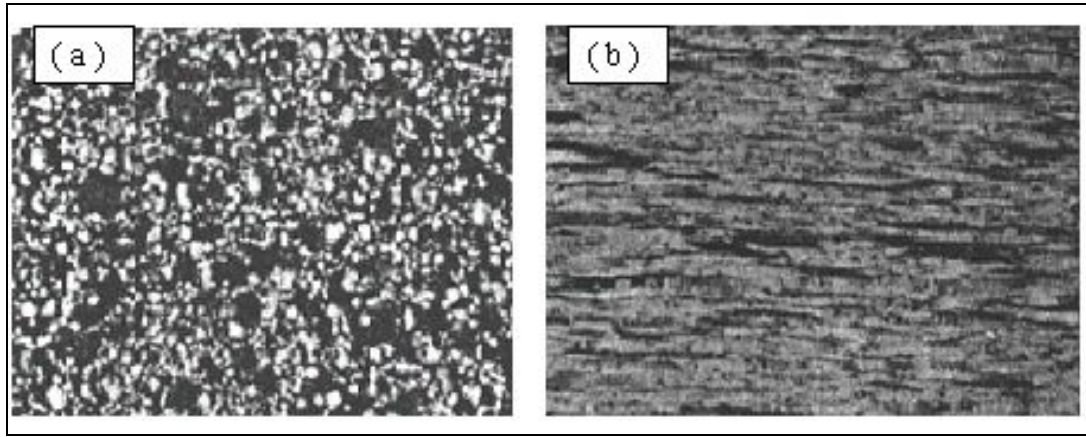
Ekstrüzyon, T/M malzemeleri tam yoğun hale getirmek için kullanılan yöntemlerden biridir. %85-90 yoğunluğa çıkarılmış ve sinterlenmiş toz metal kütlelerin sıcak ekstrüzyon ile %99 üzeri yoğunluğa çıkarılması için kullanılır.

Sıcak ve soğuk ekstrüzyonda önemli noktalar vardır. Çok yüksek sıcaklık malzeme içyapısını etkiler ve ekstrüzyon kalıbının ömrünü azaltabilir. Buna karşılık çok düşük sıcaklık, yüksek kuvvet gerektirdiğinden ekstrüzyonu zorlaştırır. Ekstrüzyonu başlatmak için gereken kuvvet, akışı sürdürürken gerekli olan kuvvetten daha fazladır. Resim 5.1'de, ekstrüze edilen bir döküm malzemede içyapının bölgesel olarak değişimi gösterilmiştir. Ekstrüzyon tam yoğunluğu sağlayan bir sıkıştırma işlemidir.

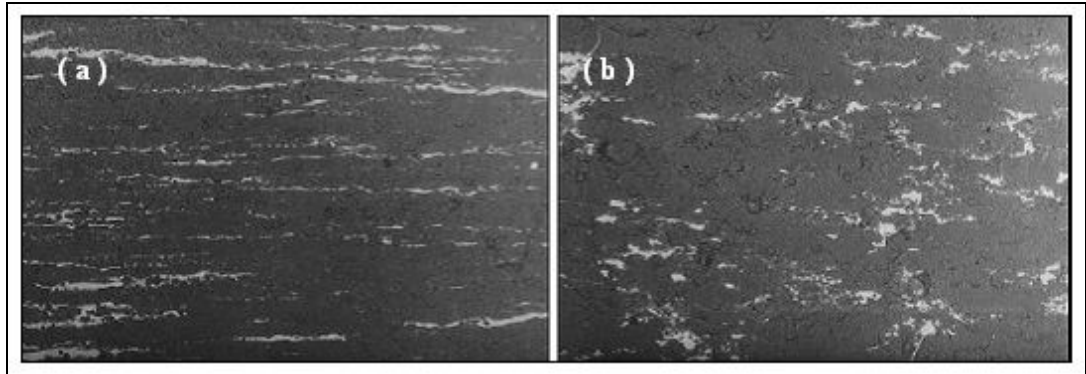


Resim 5.1. Ekstrüzyon uygulanan bir külçenin boyuna kesiti [49]

Ektstrüzyon işlemi ile ilk olarak, uygulanmaya başlanan basınçla beraber tozların tekrar yerleşmesi ve yoğunlaştırılması sağlanır. Gözeneklerin kapatıldığı bölgenin yapısındaki küçük değişimler dışında toz parçaları sürekli bir yapıdaki külçenin şekil değiştirmesinde olduğu gibi şekil değiştirirler. Şekil değiştirmeye beraber parçalar uzar ve uzadıkça yüzeyleri gerginleşir. Resim 5.2’de preslenip sıkıştırılan ve ekstrüze edilmiş iki farklı alüminyum alaşımının içyapıları gösterilmiştir [50].



Resim 5.2.a) Sıkıştırılmış alüminyum alaşımı tozların içyapısı b) Ekstrüze edilmiş alüminyum alaşımı tozların içyapısı [50]



Resim 5.3. Ekstrüze edilmiş alüminyum alaşımı tozların SEM görüntüleri a) Yüzeye yakın b) Merkeze yakın [50]

Püskürtme şekillendirme ve ekstrüze edilmiş parçaların mekanik özellikleri ve içyapıları ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur. Seok vd. [49] düşük gaz/metal debisi oranı ile (yaklaşık $0.8 \text{ m}^3/\text{kg}$) ürettikleri azot atomize ötektik üstü PŞ Al-Si-X

kompozitlerin ekstrüzyonundan elde edilen numunelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Düşük gaz/metal oranında PŞ parçaların yüksek oranda gözenek içerdiğini bildirmişlerdir. Ekstrüzyon sıcaklığının gözenek yok etmedeki etkisinin çok belirgin olmadığı, fakat ekstrüzyonun yüksek sıcaklıkta yapılması durumunda daha düşük basınçların uygulanabileceği belirtilmiştir.

Lianxi vd. [51], atomize 2024 alüminyum alaşım tozlarının sıcak hidrostatik ekstrüzyonundan elde edilen çubukların mekanik ve içyapı özelliklerine, ekstrüzyon sıcaklığının etkisini araştırmışlar; alaşım tozlarının yoğunlaştırılması için optimum ekstrüzyon sıcaklığının 430-450 °C gerektiğini bildirmişlerdir.

Murai vd. [52], ekstrüze AZ31B magnezyum alaşımlarının (Mg-%3.3Al-%0,88Zn) içyapı ve mekanik özellikleri üzerinde ekstrüzyon şartlarının etkisini incelemişler ve düşük ekstrüzyon hızlarında yapılan ekstrüzyon işleminin tane boyutunu küçülttüğünü belirtmişlerdir.

Bir diğer çalışmada Srivastava ve arkadaşları [38], ekstrüzyon uyguladıkları Al-6.5Si ve Al-18Si PŞ alaşımlarını çekme deneyine tabi tutarak, PŞ alaşımlarının mukavemetleri ile sünekliklerini döküm ve döküm+ekstrüzyon numunelerin mekanik özellikleri ile karşılaştırmışlardır (Çizelge 5.1). Sonuç olarak PŞ+ekstrüze alaşımın mekanik özelliklerinin belirgin şekilde iyi olduğunu göstermişlerdir.

Çizelge 5.1. Al-Si alaşımlarının mekanik özellikleri [38]

İçerik	Uygulanan işlem	Çekme özellikleri		
		Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	% Uzama
Al-6.5Si	Döküm	77,2	130,9	9,0
Al-6.5Si	PŞ+Ekstrüzyon	75,5	132	34,3
Al-18Si	Döküm+Ekstrüzyon	97,5	129	6,7
Al-18Si	PŞ+Ekstrüzyon	119,5	158	18,7

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, öncelikle yeni bir yakından eşlemeli laval tipi nozul tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Bu nozul kullanılarak gaz atomizasyonu yöntemiyle azot atomize kalay tozu üretilmiş ve üretim parametrelerinin toz özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, en küçük toz boyutuna ulaşılan parametrelerde çeşitli yüksekliklerde püskürtme şekillendirme (PŞ) deneyleri yapılmıştır. PŞ ile üretilen parçalara, bir tam yoğunluk işlemi olan ekstrüzyon işlemi uygulanmış ve ekstrüzyon sonrası elde edilen parçaların mekanik özellikleri, döküm+ekstrüzyon işlemi uygulanmış parçaların mekanik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Tüm bu çalışmalar Gazi Gaz Atomizasyon Birimi'nde gerçekleştirilmiştir.

6.1. Gaz Atomizasyon Birimi

Gazi Gaz Atomizasyon Birimi beş ana bölümden meydana gelmektedir (Resim 6.1).

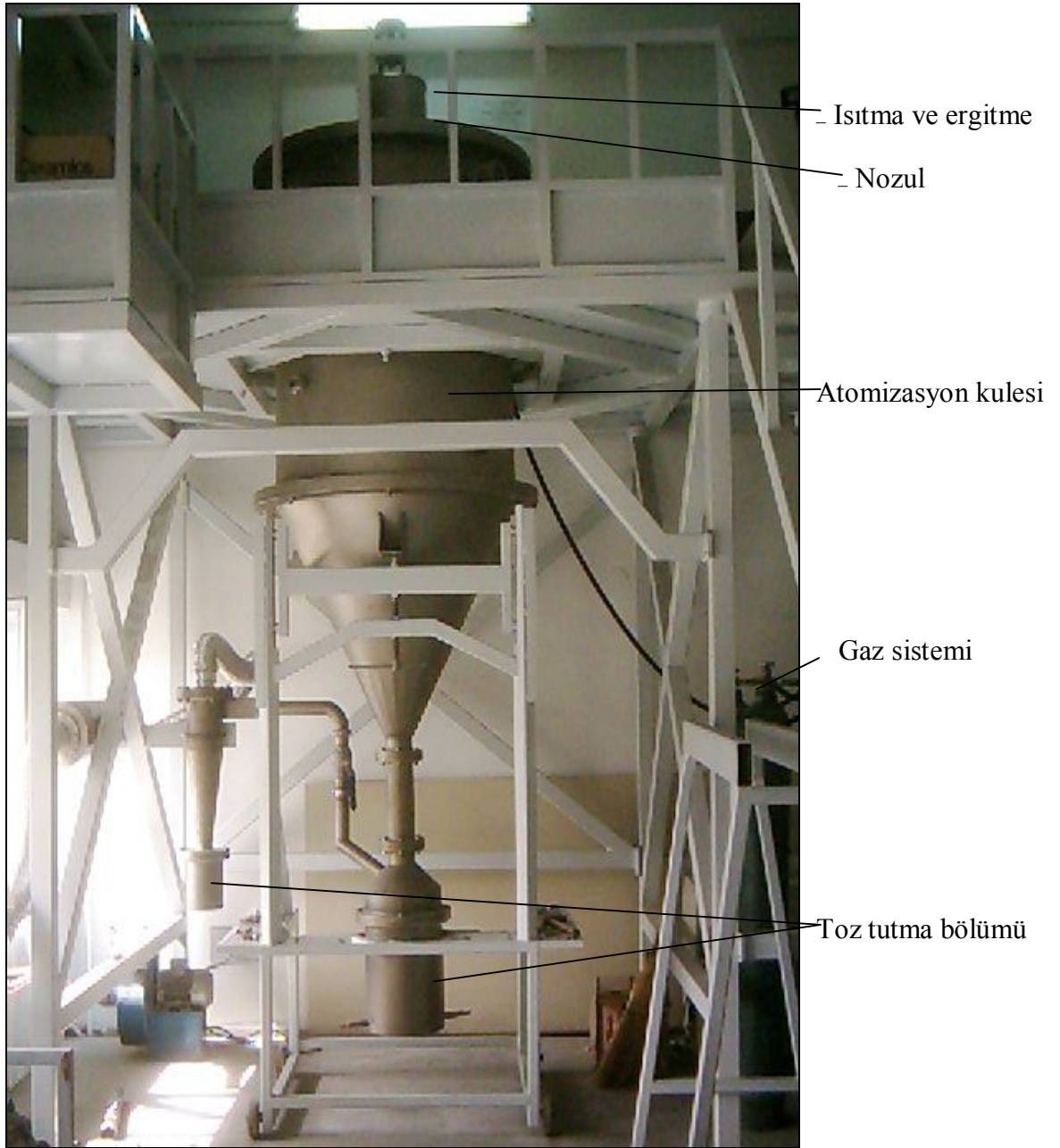
6.1.1. Gaz sistemi

Gaz sistemi; atomizasyon için gerekli olan basınçlı gazı birime veren sistemdir. Deneyler sırasında kullanılan gaz sistemi, birbirine paralel bağlanmış 4 adet tüpten oluşmaktadır. Bu tüpler 150 bar işletme basıncına sahiptir (Resim 6.2.a). Gazı istenilen basınç değerine ayarlamak için, basınç ayar vanası kullanılmaktadır. Gaz basıncı ayarı regülatörün giriş ve çıkış tarafında bulunan manometrelerin yardımıyla yapılmaktadır (Resim 6.2.b). Deneyler sırasında atomizasyon gazı olarak azot kullanılmıştır.

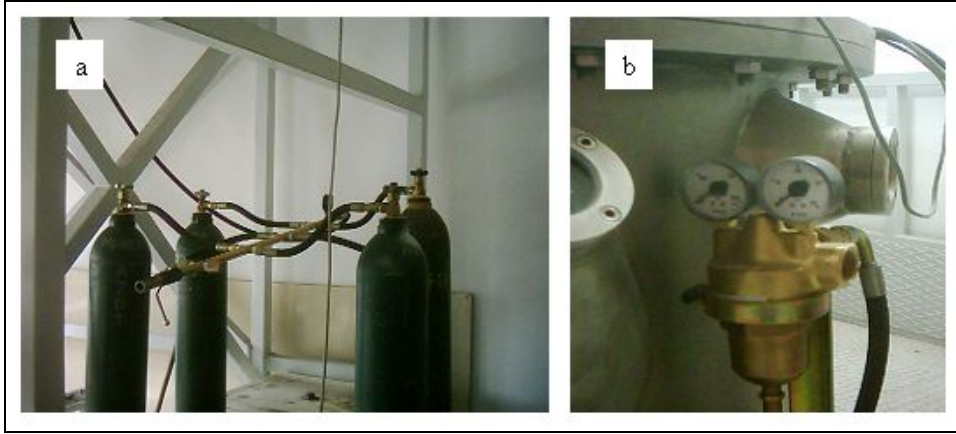
6.1.2. Isıtma ve ergitme

Deneyler sırasında saf kalay, fırının (Resim 6.3b) içine yerleştirilmiş olan paslanmaz çelik potada ergitilmiştir. Ergiyen metalin sıcaklık denetimi, serbest hareket ettirilebilen bir ısılıçift vasıtasıyla yapılmıştır. Sistem üzerinde, metalin ergidikten

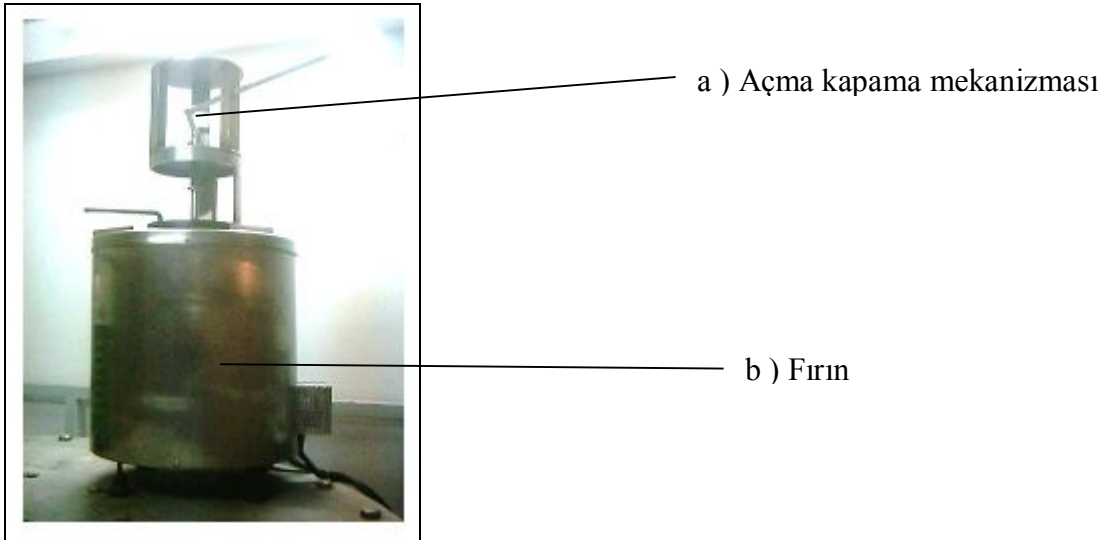
sonra kule içersine denetimli bir şekilde akmasını sağlayan bir açma kapama mekanizması mevcuttur (Resim 6.3a). Mekanizma, çelik potanın altındaki deliği açıp kapatmayı mekanik olarak sağlayabilecek bir çubuktan oluşur. Normalde bir yay yardımıyla deliği kapalı tutan bu sistem, yukarıdan çubuğa kuvvet uygulandığında deliği açıp ergimiş metalin nozula doğru akmasını sağlar.



Resim 6.1. Gazi Gaz Atomizasyon Birimi



Resim 6.2. Gaz sisteminde kullanılan teçhizatlar, a)Yüksek basınçlı tüpler
b) Regülatör



Resim 6.3. Isıtma ve ergitme sistemi

6.1.3. Atomizasyon kulesi

Gaz atomizasyon işlemiyle toz üretiminde toza ait bazı özellikleri etkileyen atomizasyon kulesi; nozulda sıvı metalin, basınçlı atomizasyon gazı yardımıyla atomize edildikten sonra katılaşarak toz haline geldiği kapalı ortama denir. Kullanılacak metalin katılaşma süresine göre atomizasyon kulesinin boyutları belirlenir. Katılaşma süresine uygun olmayacak kadar küçük boyutta bir kule tasarımı yapılırsa tozlar daha katılaşmadan kuleye çarpar ve yassılaşır. Kule boyutları

olması gerekenden fazla ise yatırım maliyetini artıracak için ucuz olmaz [10]. Bu yüzden metalin katılaşma süresi, kule tasarımı yapmadan önce tespit edilmelidir. Gazi gaz atomizasyon biriminin çapı ve yüksekliği tozların kuleye çarpmadan katılaşmasına imkan verecek boyutlardadır. Gazi gaz atomizasyon biriminin kulesi paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Bu, sistem temizliği açısından önemlidir [10].

Gazi gaz atomizasyon kulesinin alt yarısı, tabana doğru koni şeklinde daralan konik bir yapıya sahiptir. Kulenin en altındaki haznede iri tozlar toplanır. Daha ince tozlar ise siklonda toplanır. Siklon, aynı zamanda atomizasyonda kullanılan gazın dışarı tahliye edilmesini de sağlamaktadır.

6.1.4. Siklon

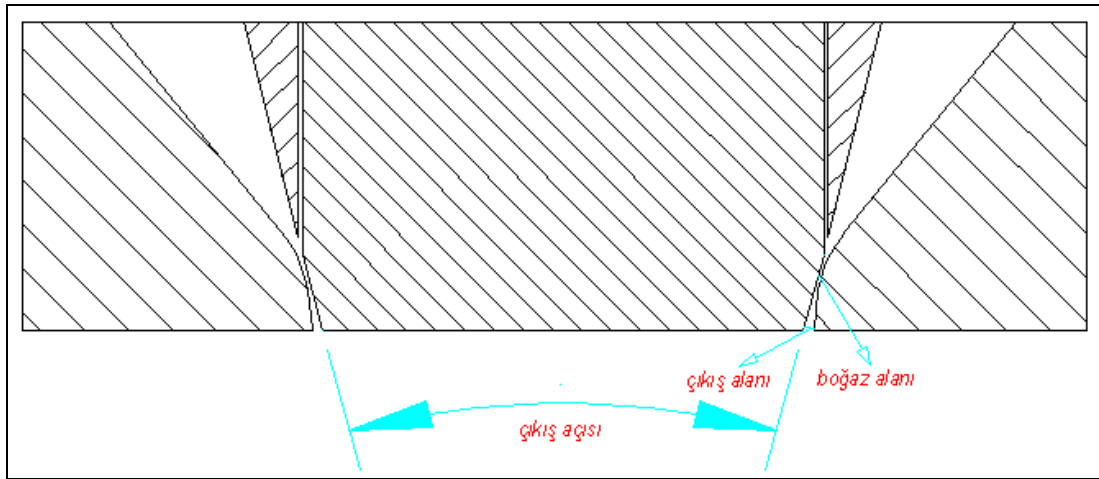
Siklon, gaz atomizasyon işleminde, tozların atomizasyon gazından ayrılmasını sağlayan önemli bir bölümdür (Resim 6.4). Siklon tasarımında en önemli ölçüt, atomizasyon gazı içerisindeki çok küçük çaplı tozların en üst düzeyde ayrıştırabilmesidir [53].



Resim 6.4. Siklon

6.1.5. Nozul

Nozul, gaz atomizasyonu yönteminde, atomizasyon biriminin, tozların boyutlarını, şekillerini kısacası fiziksel tüm özelliklerini etkileyen bir parçasıdır. Nozul tasarımında geometri çok önemlidir. Bu çalışma kapsamında yakından eşlemeli “Laval” tipi nozul tasarımı yapılmış ve imal edilmiştir. Deneysel çalışma boyunca bu nozul kullanılmıştır. Kullanılan nozula ait büyüklükler Çizelge 6.1’de, tüm teknik resimler ekler kısmında verilmiştir.



Şekil 6.1. Laval tipi nozuda, gaz çıkış bölgesinin şematik gösterimi

Çizelge 6.1. Laval tipi nozula ait büyüklükler

Nozul tipi	Nozul gaz çıkış açısı α (°)	Nozul gaz çıkış alanı (A) (mm ²)	Nozul boğaz alanı (A*) (mm ²)	Mach sayısı
Laval	30	29	9,6	2,53

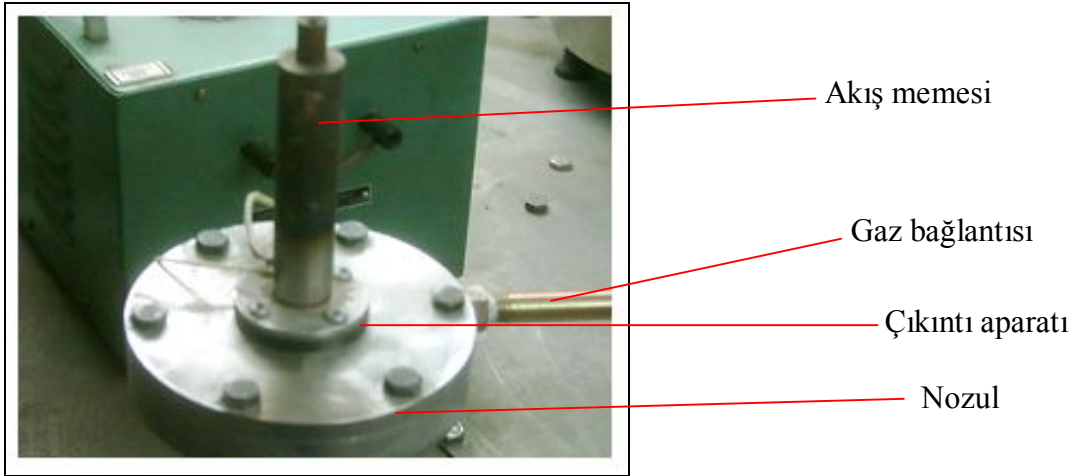
Bu çalışmada kullandığımız nozul beş parçadan oluşmaktadır.

- 1) Akış memesi,
- 2) Çıkıntı aparatı,
- 3) Seramik tüp,
- 4) Nozul üst parçası,
- 5) Nozul alt parçası.

Bu çalışma kapsamında, akış memesi ve çeşitli uzunluklara sahip çıkıntı aparatı tasarımı ve imalatı yapılmıştır (Resim 6.5). Akış memesi içine delik çapı 4 mm olan seramik akış borusu yerleştirilmiştir.

Ergimiş metal, çelik potadan akış memesine doğru akar ve seramik tüpten geçer. Çıkıntı aparatının ucunda gazla buluşur ve atomizasyon gerçekleşir. Atomizasyon işlemi nozulda gerçekleştiğinden, nozul atomizasyon biriminin en önemli parçalarından biridir. Nozula ait parçalar arasından, çıkıntı aparatının uzunluğu da atomizasyon gazının, sıvı metalle karşılaşma noktasını değiştirdiği için önemli bir parametredir (Resim 6.6).

PŞ işlemiyle ilgili farklı bir tasarım olarak, biriktirme plakası da nozulla birleştirilebilir bir sistem olarak tasarlanmış ve imal edilmiştir (Resim 6.7).



Resim 6.5. Akış memesi-çıkıntı aparatı - nozul bağlantısı



Resim 6.6. 4 mm çıkıntı aparatı



Biriktirme Plakası

Resim 6.7. PŞ biriktirme plakası

6.2. Atomizasyon Çalışmaları

Gaz atomizasyonu çalışmalarında, tasarımı ve imalatı yapılmış olan yakından eşlemeli laval tipi nozul kullanılmıştır. Çıkıntı aparatı olarak farklı uzunluklara sahip üç adet parça, tozu üretilecek metal olarak kalay, atomizasyon gazı olarak ise azot kullanılmıştır.

Kalayın ergime sıcaklığı 232 °C'dir. Yapılan atomizasyon çalışmalarında ergimiş kalay 400 °C'ye kadar aşırı ısıtılmıştır. Ergimiş kalay, çelik potanın altından atomizasyon gazıyla buluşma noktasına doğru seramik tüpün içinden akarken sıvı metalin sıcaklığının değişmemesi için akış memesi (EK-7) içerisindeki seramik tüpün etrafına, iki ucu voltaj değiştiriciye (Resim 6.7) bağlı olan direnç teli sarılmıştır. Sıvı metal sıcaklığı 300 °C'ye ulaştığında voltaj değiştirici 10 V'a yükseltilmiştir ve atomizasyon işlemi boyunca bu değerde sabit tutulmuştur.



Resim 6.8. Voltaj değiştirici

Gaz atomizasyonu çalışmalarında şu yol izlenmiştir:

1. Seramik tüpün etrafına direnç teli sarılmış, seramik tüp akış memesinin içine yerleştirilmiştir.
2. Seramik tüpün diğer ucuna çıkıntı aparatı yerleştirilmiş ve akış memesi ile çıkıntı aparatı birbirine bağlanmıştır.
3. Seramik tüpün iki ucundaki direnç telleri yanmaz kablo ile kaplanarak akış memesi üzerindeki delikten dışarı çıkarılmış ve telin iki ucu voltaj değiştiriciye bağlanmıştır.
4. Nozulun alt parçası ile üst parçası birbirinin üzerine geçirilerek bağlanmıştır.
5. Daha önce birleştirilen çıkıntı aparatı ve akış memesi, nozulla birleştirilmiştir.
6. Gaz hattı-nozul bağlantısı yapılmıştır.
7. Dışarıda birleştirilmiş nozul atomizasyon kulesi üzerine yerleştirilmiştir.
8. Çelik pota fırın içine yerleştirilmiştir.
9. Çelik pota akış memesi üzerine yerleştirilmiştir (EK-7).
10. Ergitilecek olan kalay pota içerisine atılmıştır. Yapılan çalışmalarda yaklaşık olarak her deney için 400 g kalay kullanılmıştır.
11. Açma-kapama mekanizmasına ait çubuk pota altındaki deliği kapatacak şekilde yerleştirilmiştir.
12. Fırın çalıştırılmış ve kalay 400 °C'ye aşırı ısıtılmıştır. Ergimiş metalin sıcaklığı ısılıçift yardımıyla ölçülerek ısıtma işlemi yapılmıştır.

13. Ergimiş kalayın sıcaklığı 300 °C'ye ulaştığında seramik akış borusu üzerindeki telin üzerinden geçen voltaj 10 V'a çıkarılmıştır.
14. Atomizasyon gaz basıncı, basınç ayar vanası yardımı ile istenilen basınç değerlerine ayarlanmış ve nozula gaz gönderilmiştir.
15. Kalay sıcaklığı 400 °C'ye ulaştığında açma-kapama mekanizması üzerindeki çubuğun kaldırılarak, sıvı metalin atomizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.
16. Nozul atomizasyon kulesi üzerinden alınarak gerekli denetimler yapılmıştır.
17. Toz toplama kabındaki ve siklonda biriken tozlar, gerekli bağlantılar sökülerek alınmıştır.
18. Tozlar 297 µm'lik (50 meş) elekten elenerek, elek altı tozlar ayrılmış ve kilitli poşetler içinde muhafaza edilmiştir.
19. Bir sonraki deney için, kule içi temizlenerek bağlantılar tekrar yapılmıştır.

Bu çalışma esnasında kullanılan farklı uzunluklara sahip çıkıntı aparatları ve gaz basıncı değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Laval tipi nozul için atomizasyon değişkenleri

Deney no	Gaz basıncı (bar)	Çıkıntı uzunluğu h (mm)
1	20	4
2	20	6
3	20	8
4	10	8
5	30	8

6.3. Toz Boyutu Analizi

Gaz atomizasyonu işleminden elde edilen tozların birimin iki farklı bölümünde toplanır. Birincisi toz toplama kabıdır. Bu kap, iri tozların biriktiği bölümdür. İkinci bölüm ise siklondur. Siklon toplama kabında tutulamayan ince tozların toplandığı bölümdür. Atomizasyon işlemi neticesinde bu iki bölümde toplanan tozlar alınmış ve 297 μm 'lik (50 meş) elekten geçirilmiştir. Daha sonra, elek altındaki tozların boyut ve dağılımları “Malvern Mastersizer E” (Resim 6.9) lazerle parçacık boyutu ölçme cihazı yardımıyla ölçülmüştür.



Resim 6.9. Malvern Mastersizer E parçacık boyutu ölçme cihazı

6.4. Toz Şekli ve İçyapısı

Üretilen tozların şekli ve iç yapısı Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde bulunan SEM'de incelenmiştir.

6.5. Püskürtme Şekillendirme Deneyleri

Atomizasyon işleminde elde edilen damlacıkların üst üste yığılarak biriktirebilmesi için, nozul altına birleştirilebilen bir biriktirme plakası kullanılmıştır. Biriktirme plakasının çapı 98 mm'dir ve istenilen yüksekliğe ayarlanabilmektedir (EK - 8).

PŞ deneyleri esnasında, herbir deney için 400 g kalay kullanılmıştır. Kalayı ergitme işlemi, deney esnasında atomizasyon kulesi üzerinde duran fırın içindeki çelik potada yapılmıştır. Tüm deneylerde kalay yaklaşık 400 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Kalay istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra atomizasyon gazı belirlenen değere ayarlanmıştır. Atomizasyon işlemi ile oluşan damlacıkların katılaşmadan, nozul altındaki biriktirme plakası üzerine birikmesi sağlanmış ve plaka üzerinde PŞ parçalar elde edilmiştir.

PŞ deneyleri, nozul altından itibaren beş farklı mesafede yapılmıştır. Tüm deneylerde atomizasyon gaz basıncı 30 bar olarak sabit tutulmuştur. Atomizasyon gazı olarak azot kullanılmıştır. Yapılan PŞ deneylerine ait, gaz basıncı ve biriktirme mesafesi bilgileri Çizelge 6.3.'de verilmiştir.

Çizelge 6.3. PŞ değişkenleri

DENEY NO	6	7	8	9	10
GAZ BASINCI (bar)	30	30	30	30	30
BİRİKTİRME MESAFESİ (mm)	80	90	100	110	120

PŞ deneylerinden elde edilen parçalardan içyapı incelemesi için örnekler alınmıştır ve bu örnekler sırası ile 1000, 1200 ve 1500 meşlik zımparalar kullanılarak zımparalanıp 6 µm, 3 µm ve 1 µm'lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Hazır hale gelen parçalar optik mikroskopta 50, 100, 500 ve 1000 büyütme ile incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Tüm bu işlemler TOBB-ETÜ laboratuvarlarında yapılmıştır.

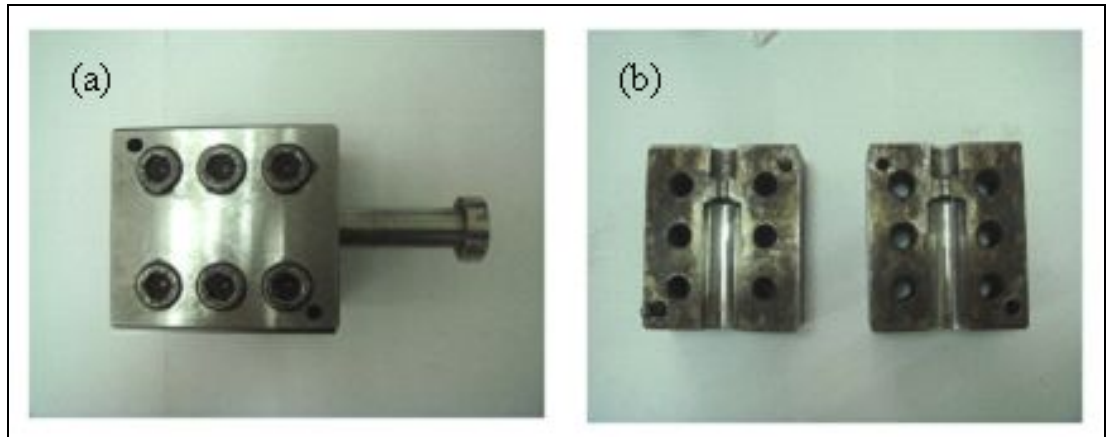
6.6. Ekstrüzyon Deneyleri

PŞ ile üretilen parçaların gözenek miktarını azaltmak için ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Ekstrüzyon işleminde, Resim 6.10'da gösterilen kalıp kullanılmıştır. Kalıbın giriş çapı 20 mm, çıkış çapı 6 mm'dir. Kalıbın boyu ise 9,5 mm'dir. PŞ ile üretilmiş parçalar öncelikle kalıbın giriş çapı olan 20 mm'ye girecek şekilde kesilmiştir. İşleme başlamadan önce kalıp açılıp içi alkolle temizlendikten sonra çinko stearat ile yağlanmış ve kapatılarak civataları, kalıbın iki parçası arasında

boşluk kalmayacak şekilde kapatılmıştır. Kalıp basma cihazına yerleştirilmiş ve içerisine ekstrüze edilecek parça koyularak basma işlemine başlanmıştır. Basma işleminin sonunda, kalıbın çıkış çapı olan 6 mm çapında kalay çubuklar elde edilmiştir.

Ekstrüzyon işlemi 60 ton kapasiteli INSTRON marka hidrolik çekme-basma cihazı ile yapılmıştır (Resim 6.11). Hem döküm kalay parçalara hem de PŞ ile üretilmiş kalay parçalara ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Ekstrüzyon deneylerinin tamamı Emek Boru Fabrikası laboratuvarlarında yapılmıştır.

Ekstrüzyon sonucunda elde edilen 6 mm çapındaki çubuklardan, ekstrüzyon yönüne dik ve paralel örnekler alınarak içyapıları incelenmiştir. Zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra örnek parçalar Nital (95 ml etil alkol + 5 ml HNO_3) çözeltisi ile dağlandıktan sonra optik mikroskop yardımıyla içyapıları incelenmiştir.



Resim 6.10. Ekstrüzyon kalıbı a) Kapalı kalıp b) Kalıp, açılmış halde



Resim 6.11.INSTRON marka çekme-basma cihazı

6.7. Çekme Deneyi

PŞ ile üretilmiş parçalara ve döküm parçalara ekstrüzyon işlemi uygulandıktan sonra elde edilen 6mm çapındaki çubuklar, çekme deneyine tabi tutulmuştur. Beş farklı mesafede yapılan her bir PŞ deneyinden elde edilen parçalardan ikişer adet ve döküm kalaydan iki adet çekme numunesi elde edilmiştir. Toplam on iki numuneye çekme testi uygulanmıştır. Çekme testlerinde TOBB-ETÜ'deki INSTRON marka 50 kN kapasiteli hidrolik çekme-basma cihazı kullanılmıştır (Resim 6.12).



Resim 6.12. INSTRON marka 50 kN kapasiteli hidrolik çekme-basma cihazı

6.8. Yoğunluk Ölçümü

PŞ parçaların yoğunlukları TS 2305'e göre ölçülmüştür. Buna göre numuneler, %5'lik parafin mumu içeren kloroform çözeltisine batırılarak suyun ıslatmadığı bir yüzey elde edilir. Daha sonra deney parçasının kuruması beklenir. Kuru deney parçası havada ve sonra suda tartılır. Deney parçasının yoğunluğu aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$\rho = \frac{m_1 \times \rho_w}{m_2 - m_3} \quad (6.1)$$

Burada;

ρ = Deney parçasının yoğunluğu

m_1 = Kuru deney parçasının havadaki kütlesi

m_2 = Kaplanmış deney parçasının havadaki kütlesi

m_3 = Kaplanmış deney parçasının sudaki kütlesi

ρ_w = Suyun yoğunluğu

7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Toz boyutu ve Dağılımı

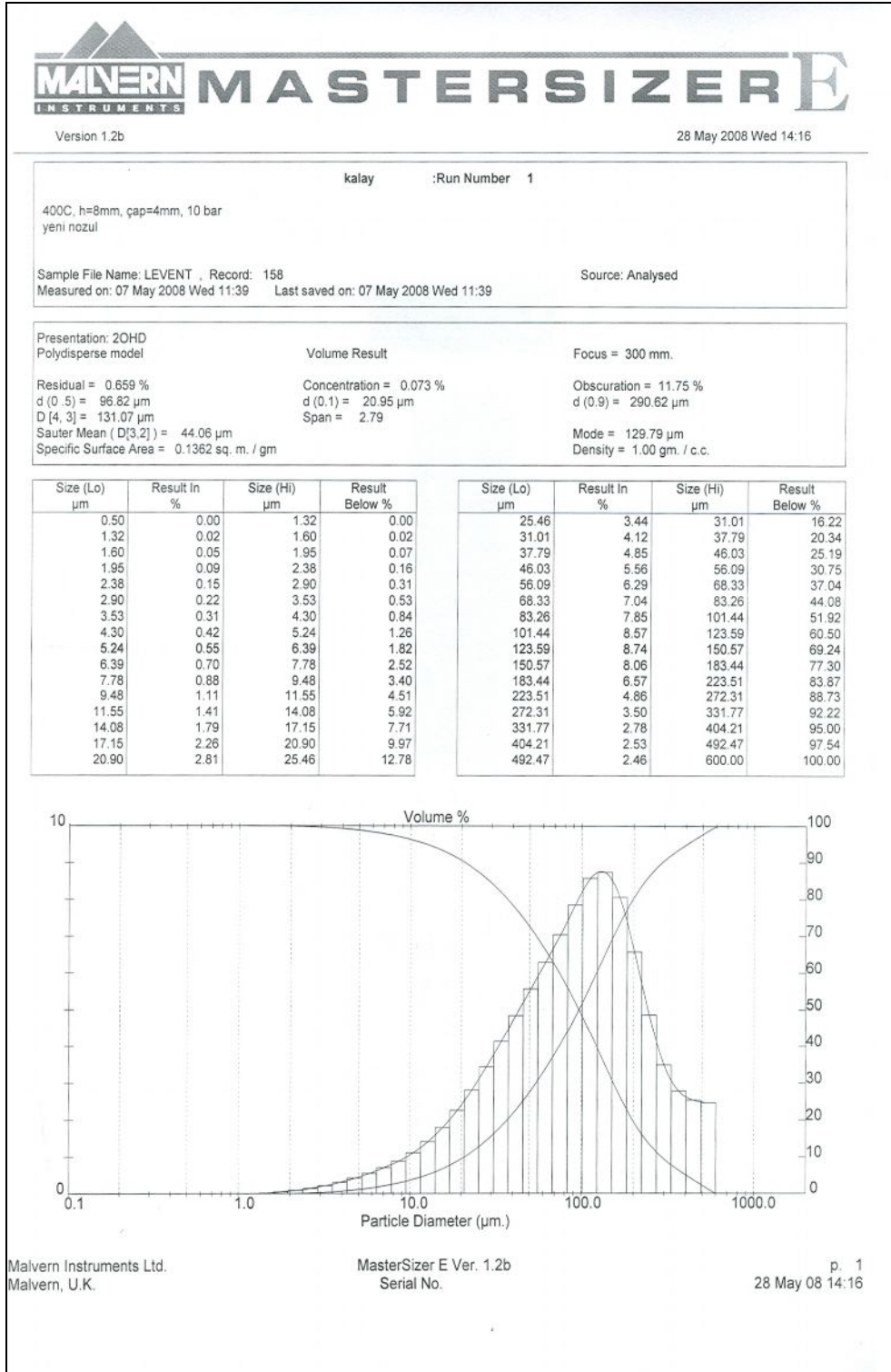
Üretilen tozlar 297 μm (50 meş) elek ile elenmiştir. Elek altında kalan tozların boyut ölçümü Gazi Üniversitesi Toz Metalurjisi Laboratuvarında bulunan “Malvern Mastersizer E” (Resim 6.9) lazerli boyut analizi cihazıyla yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen analiz raporlarından örnekler, Deney-4 için Şekil 7.1’de, Deney-5 için Şekil 7.2’de gösterilmiştir.

Raporlarda; $d(0,5)$ ortalama boyutu, $d(0,1)$ tozların %10’unun kendisinden küçük olduğu toz boyutunu, $d(0,9)$ tozların %90’ının kendisinden küçük olduğu toz boyutunu, $D[3,2]$ sauter ortalama çapını, $D[4,3]$ ise hacim ortalama çapını temsil etmektedir.

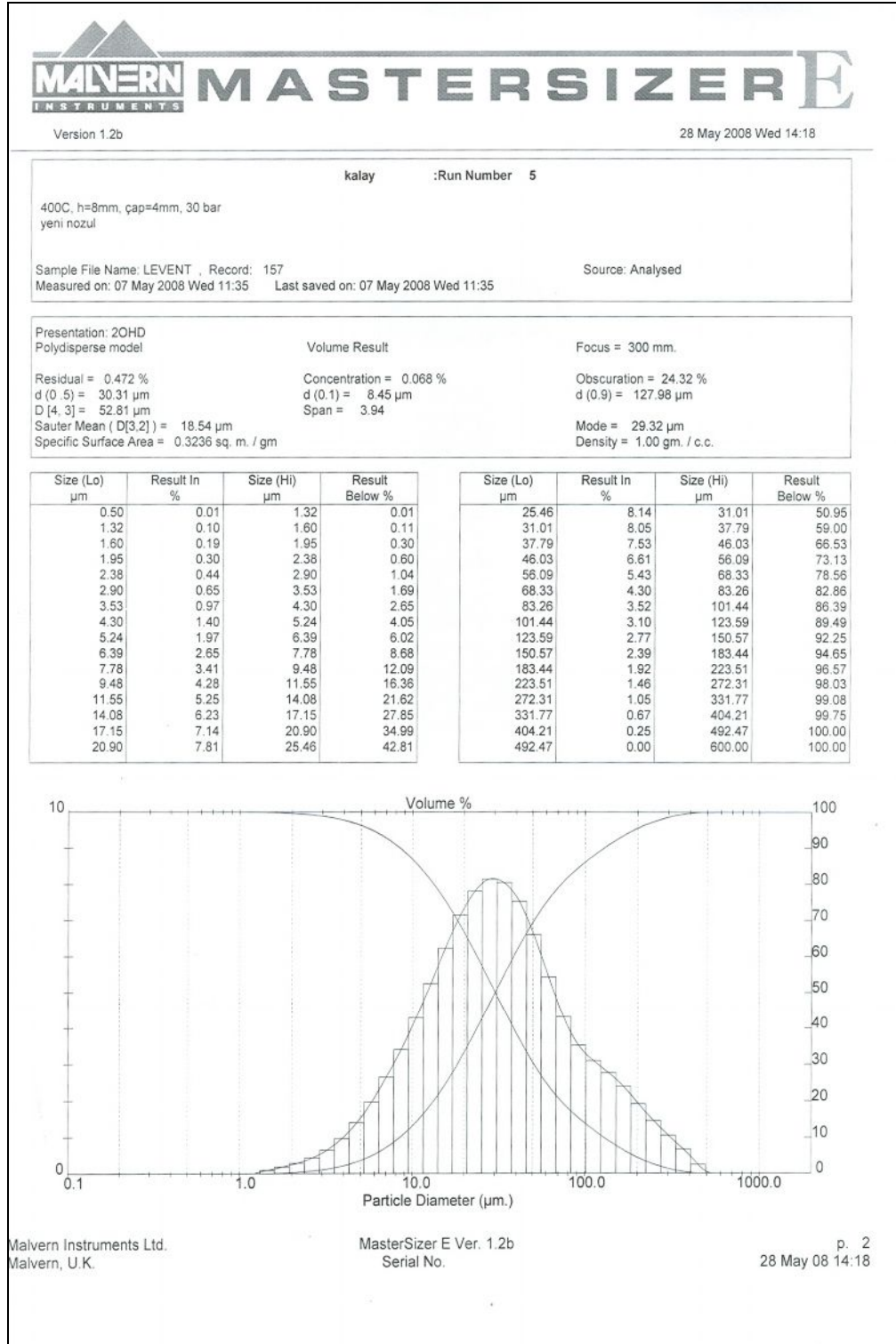
Bu raporlarda; 2. sütunda yer alan değerler, 1. sütunla 3. sütundaki boyutlar arasındaki toz yüzdesini, 4. sütundaki değerler ise 3. sütundaki boyuttan daha küçük, birikimli toz yüzdesini göstermektedir. Buna göre; Şekil 7.1’deki analiz raporunda 11,55 μm ile 14,08 μm arasındaki toz yüzdesi % 1,41, tozların % 5,92’si ise 14,08 μm ’den küçüktür. Üretilen tozların ortalama boyutları Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Yapılan deneylerde elde edilen toz boyutlarıyla ilgili değerler

Deney no	d_{50} (μm)
1	79,75
2	64,47
3	60,26
4	96,82
5	30,31

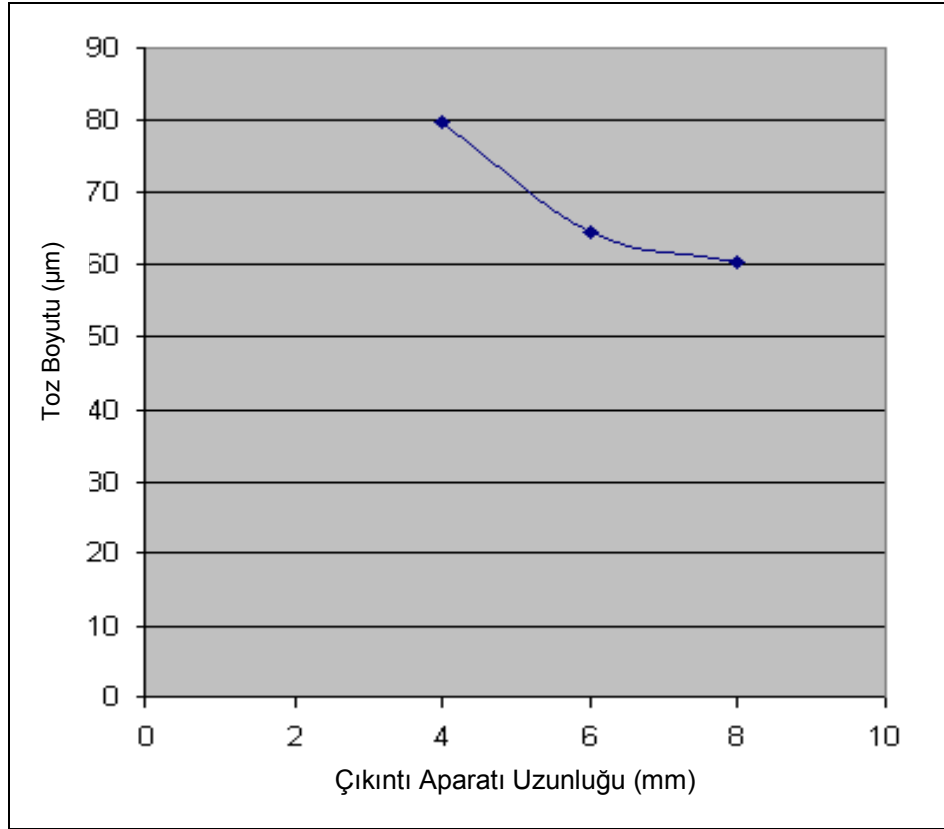


Şekil 7.1. Malvern Mastersizer E toz boyutu analiz raporu (Deney 4)



Şekil 7.2. Malvern Mastersizer E toz boyutu analiz raporu (Deney 5)

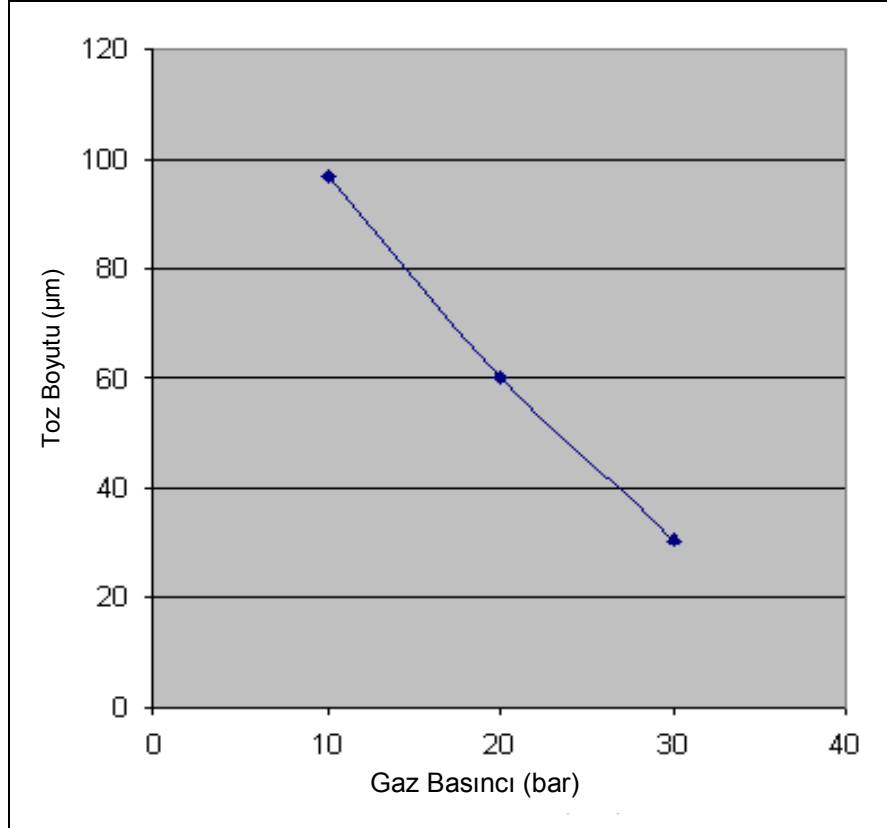
1., 2. ve 3. deneylerde basınç 20 barda sabit tutularak çıkıntı aparatı uzunluğu değiştirilmiş, çıkıntı aparatı uzunluğu arttıkça toz boyutunun küçüldüğü belirlenmiştir (Şekil 7.3). En küçük toz boyutuna sahip tozlar 8 mm uzunluğa sahip çıkıntı aparatıyla yapılan deneyde 60,26 μm olarak elde edilmiştir. Bu duruma bakıldığında; çıkıntı aparatının uzunluğu arttıkça gazın enerjisi sıvı metalle buluşana kadar azalır, ancak gaz akışı doğrusal bir hal alır. Dolayısıyla çıkıntı aparatının optimum bir uzunluğu vardır Bu uzunluk, gazın sıvı metale aktaracağı enerjiyi fazla düşürmemelidir.



Şekil 7.3. 20 bar basınçla üretilen azot atomize kalay tozlarının farklı çıkıntı uzunluklarındaki toz boyutu değişimi

4. ve 5. deneyde ise çıkıntı aparatı uzunluğu sabit tutulmuş, basınç değeri değiştirilmiş, basınç arttıkça toz boyutunun küçüldüğü belirlenmiştir. En ince tozlar 30 bar gaz basıncıyla yapılan deneyde 30,31 μm olarak elde edilmiştir (Şekil 7.4). Basınç artışı, sıvı metale daha yüksek enerjinin aktarılmasını sağlayarak daha küçük

boyutlu toz üretilmesini sağlar. Literatüre bakıldığında Aydın [16], laval tipi nozul kullanarak kalay tozu elde etmiştir. Çalışmasında, gaz basıncını artırarak deneyler yapmış ve basınç artışıyla beraber ortalama toz boyutunun da küçüldüğünü tespit etmiştir.



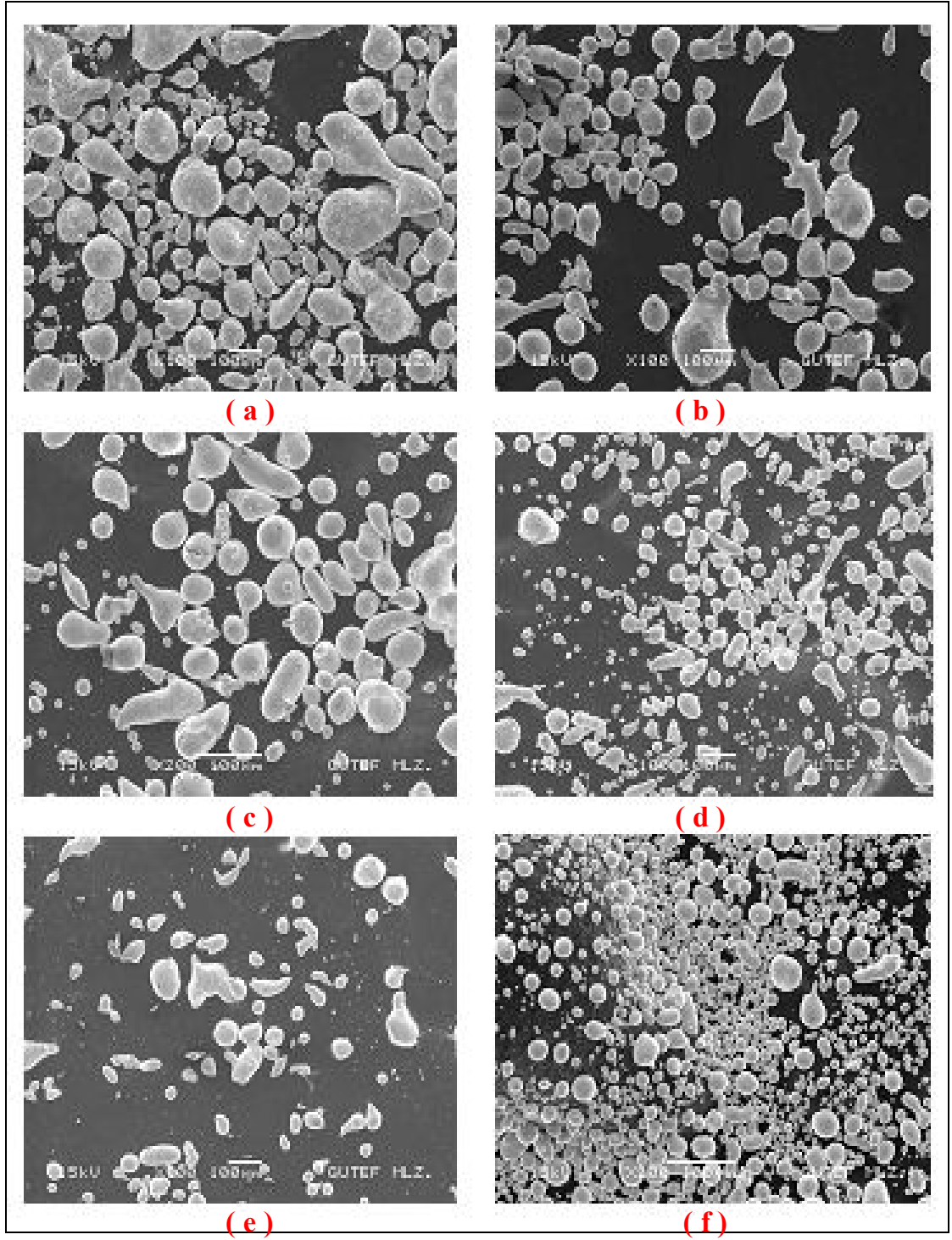
Şekil 7.4. 8 mm çıkıntı aparatıyla üretilen azot atomize kalay tozlarının farklı basınçlardaki toz boyutu değişimi

7.2. Toz şekli ve içyapısı

Üretimi yapılan azot atomize kalay tozlarının SEM çalışmaları sonucu elde edilen genel görüntülerini incelediğimizde,

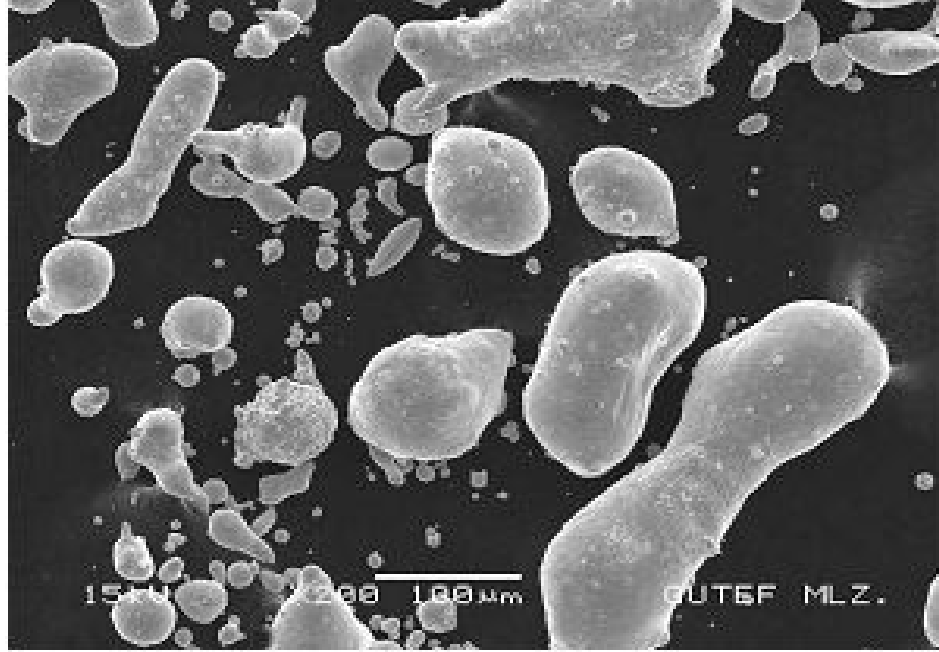
- 1) Tozların boyutlarının küçük olmasından dolayı yüzey gerilmesinin de fazla olduğu ve bununda küresel veya küresele yakın şekilli tozların elde edilmesini sağladığı (Resim 7.1),

- 2) Çıkıntı aparatı uzunluğunun artmasıyla gazın sıvı metale çarpmadan önce daha doğrusal bir akışa sahip olması sağlandığından dolayı tozların küreselleştiği ve boyutlarının küçüldüğü (Resim 7.2),
- 3) Çıkıntı aparatı uzunluğu sabit tutulup basınç artırıldığında sıvı metale aktarılan enerji de arttığı için tozların küreselleştiği ve boyutlarının küçüldüğü (Resim 7.3).,
- 4) Küçük boyutlu tozların daha büyük tozlara göre daha önce katılaşmasından dolayı, küçük boyutlu tozların büyük boyutlu tozların üzerinde uydulaşma meydana getirdikleri tespit edilmiştir (Resim 7.4).



Resim 7.1. Azot atomize kalay tozlarının genel görüntüleri

a) Deney 1 (x100) b) Deney 2 (x100) c) Deney 3 (x200)
d) Deney 3 (x100) e) Deney 4 (x100) f) Deney 5 (x100)

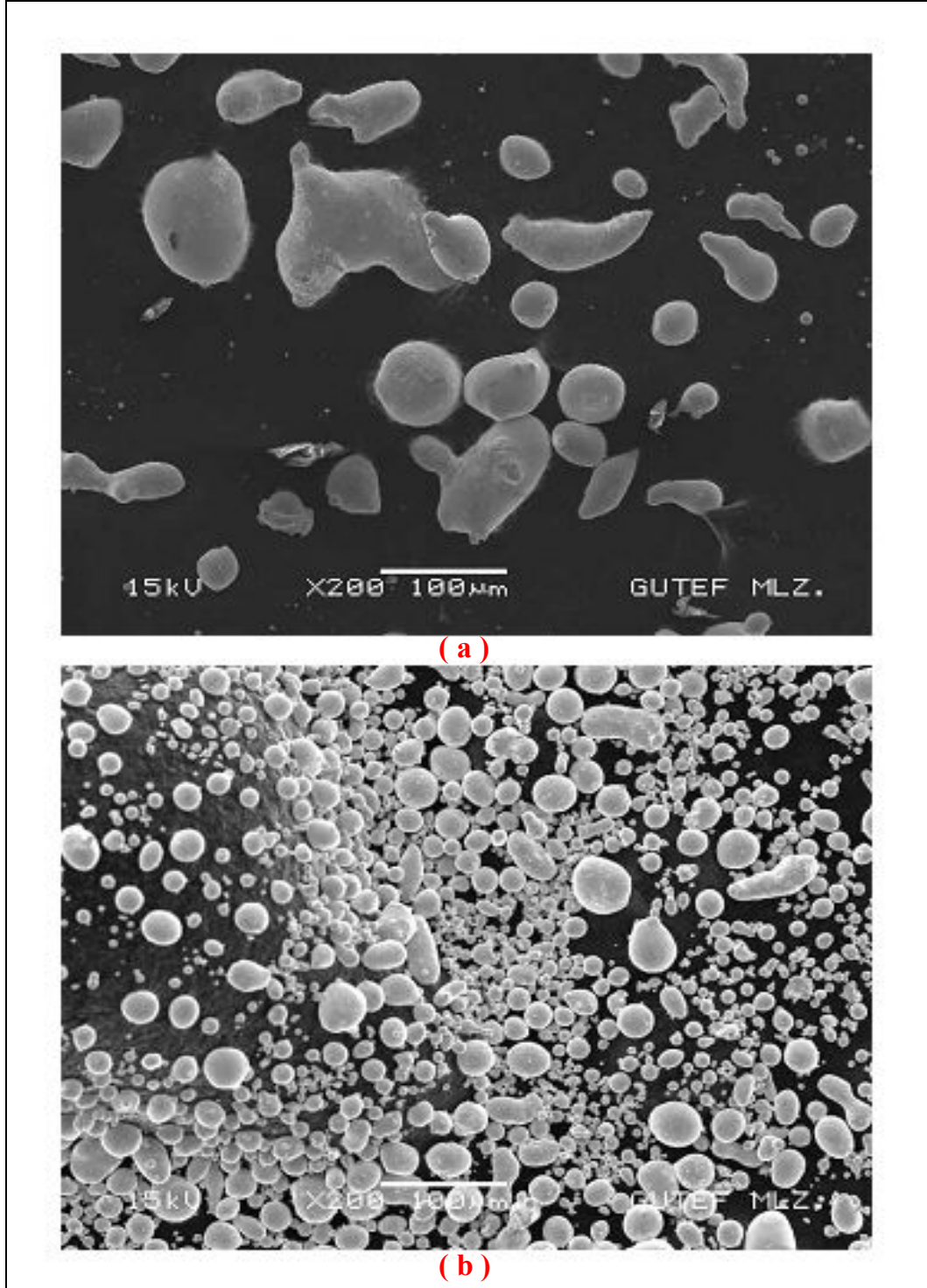


(a)

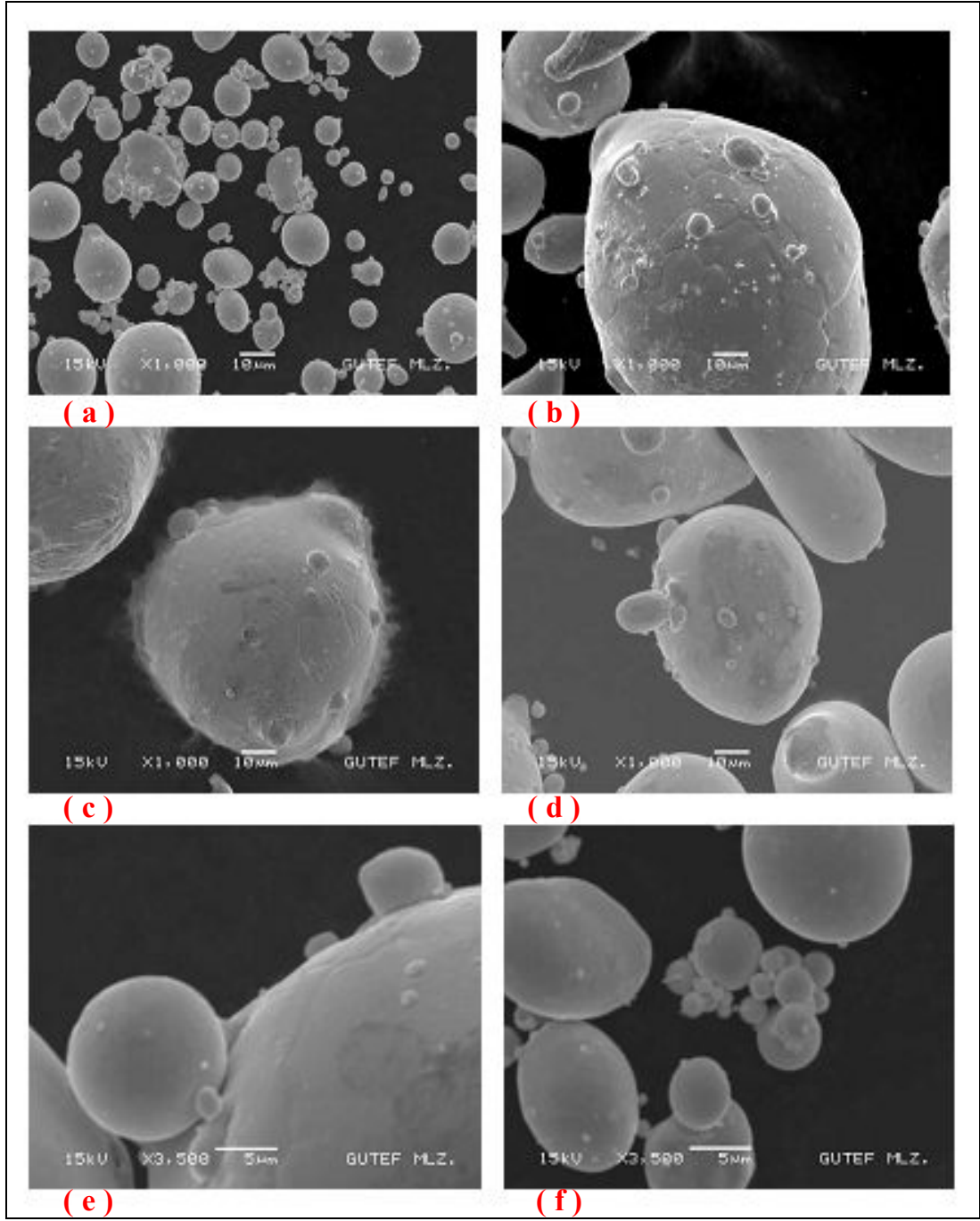


(b)

Resim 7.2. a) 20 barda 4 mm çıkıntı aparatı ile elde edilen kalay tozu SEM görüntüsü
b) 20 barda 8 mm çıkıntı aparatı ile elde edilen kalay tozu SEM görüntüsü



Resim 7.3. a) 8 mm çıkıntı aparatı ile 10 barda elde edilen kalay tozu SEM görüntüsü
b) 8 mm çıkıntı aparatı ile 30 barda elde edilen kalay tozu SEM görüntüsü

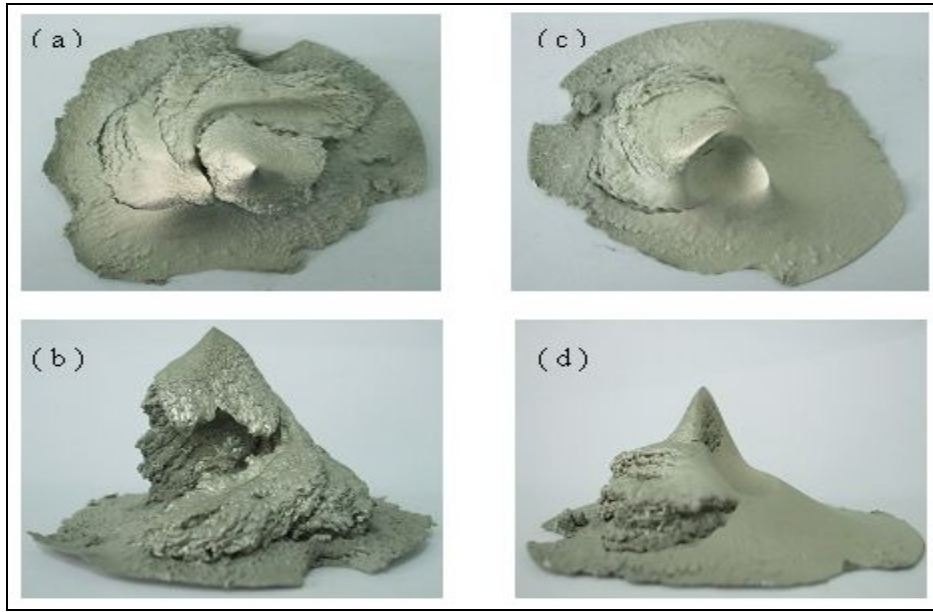


Resim 7.4. Tozlarda uydulaşma görüntüleri

a) Deney 5 (x1000) b) Deney 1 (x1000) c) Deney 4 (x1000)
d) Deney 3 (x1000) e) Deney 2 (x3500) f) Deney 5 (x3500)

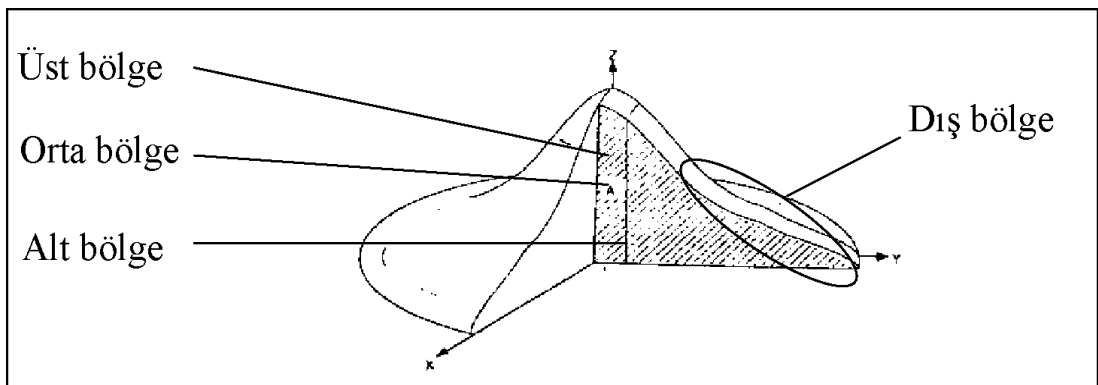
7.3. Püskürtme Şekillendirme

En küçük toz boyutuna sahip tozların üretildiği parametrelerle, beş farklı yükseklikte PŞ deneyi yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen parçaların üstten (a,c) ve önden (b,d) çekilmiş fotoğraflar, Resim 7.5'te verilmiştir.



Resim 7.5. $h=8\text{mm}$ çıkıntı aparatı ile 30 barda üretilen PŞ parçalar a-b) 110 mm mesafe için, c-d) 120 mm mesafe için

Şekil 7.5'te ise PŞ yöntemiyle üretilen bir parçadaki bölgeler temsili olarak gösterilmiştir.

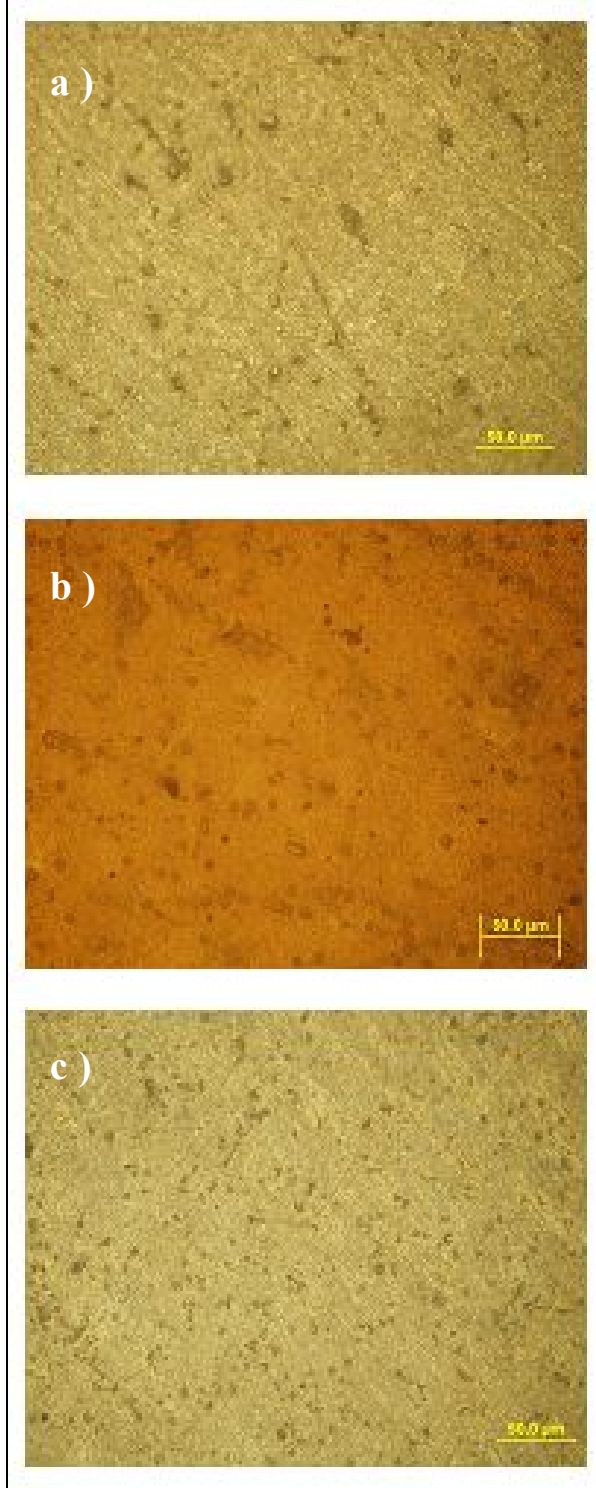


Şekil 7.5. PŞ ile üretilen bir parçaya ait bölgeler

Püskürtme şekillendirme ile üretilen parçaların üst bölgelerinden alınan örneklerle yapılan optik mikroskop incelemeleri sonucunda, püskürtme mesafesinin artmasıyla gözenek miktarının arttığını göstermiştir (Resim 7.6). PŞ yönteminde mesafenin artmasıyla gözenek miktarının da artması şöyle açıklanabilir :

Atomizasyon gazı üst üste yığılarak oluşan parçanın içinde hapsolür [53] ve gözenekli yapının oluşmasını sağlar. Atomize olan kalay damlacıkları soğumadan ne kadar önce bir plakaya temas ederse, viskozitesi o kadar düşük olur ve atomizasyon gazı da daha rahat çıkabilir. Yani mesafe arttıkça damlacıklar daha fazla katılaşır ve plaka üzerine biriktiğinde vizkozitesi yüksek olur ve gözenek miktarı artmış olur. Literatüre bakıldığında, Ekici [2]'de PŞ mesafesinin artmasıyla gözenek miktarının arttığını belirtmiştir.

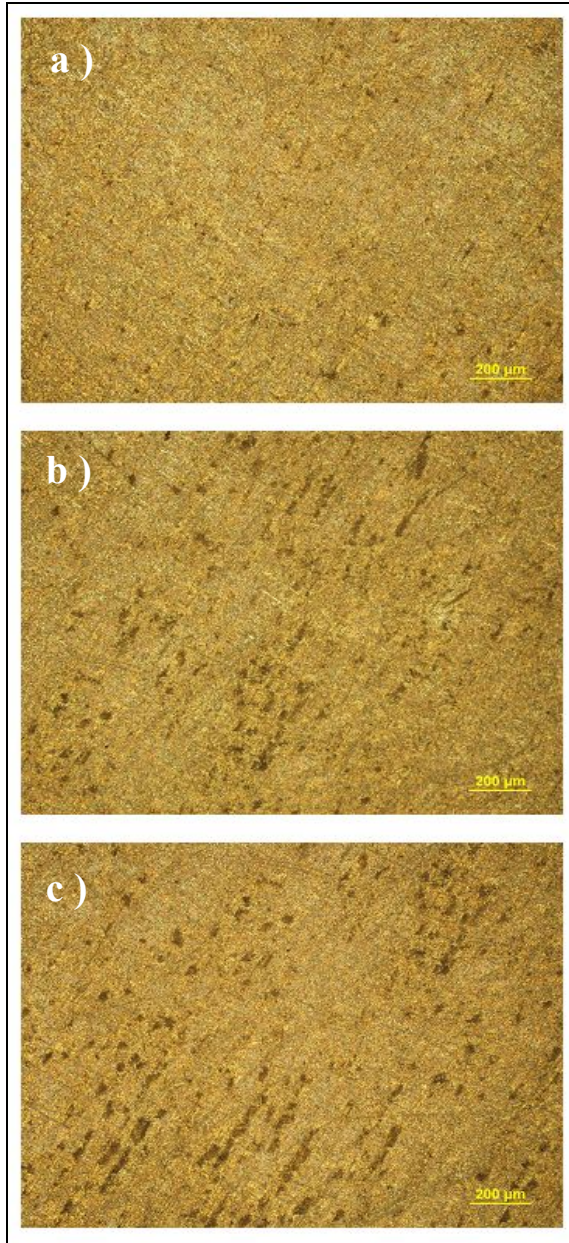
Resim 7.6'de optik mikroskop görüntülerinden örnekler gösterilmektedir. Resimlere bakıldığında, 100mm, 110 mm ve 120 mm mesafede yapılan PŞ sonucunda elde edilen parçadaki gözenek miktarlarının, mesafe arttıkça arttığı görülmektedir.



Resim 7.6. Artan PŞ mesafesi ile gözenek miktarı değişimi

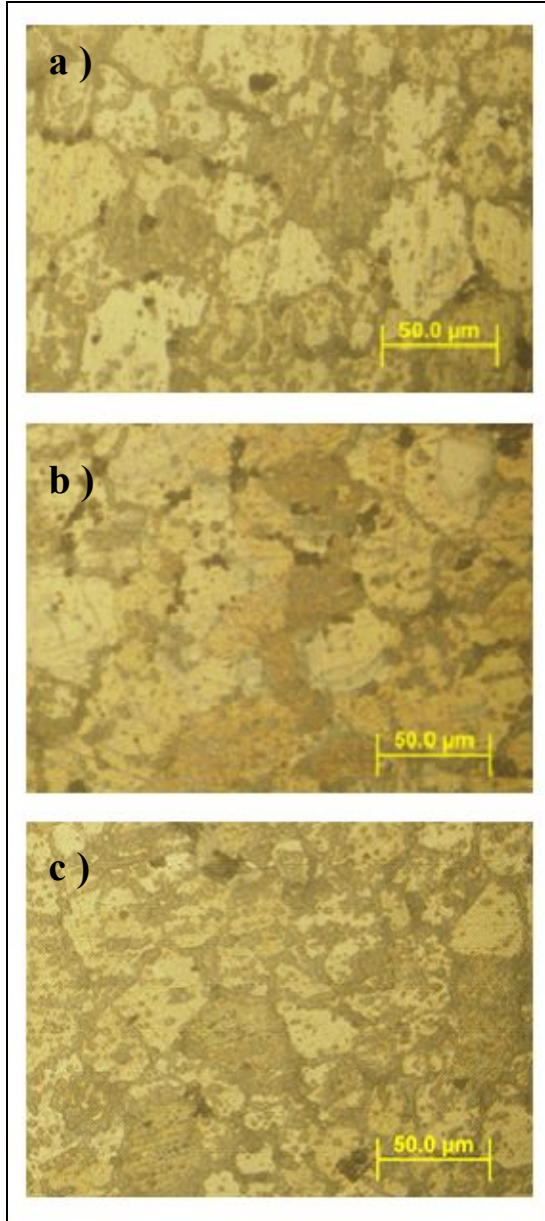
a) Deney 8, 100 mm b) Deney 19, 110 mm, c) Deney 10, 120 mm

PŞ parçalarda; genel olarak tabana yakın bölgelerde gözenek miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum Kasama ve arkadaşlarının [47] çalışması ile uyum göstermektedir. Bunun sebebi, biriktirme plakasının PŞ işlemi boyunca yerinin sabit olması nedeniyle üst üste yığılan sıvı damlacıkların yüksekliği arttıkça bir sonraki atomize olmuş sıvı damlasının daha az soğuyarak yüzeye ulaşmasıdır. Böylece, aynen biriktirme mesafesi artışıyla olduğu gibi altlarda daha fazla, üstlerde ise daha az gözenek oluşmaktadır (Resim 7.7). Ayrıca başlangıçta plakanın soğuk olması nedeniyle birikmenin önce olduğu bölgelerde, katılaşmanın üst bölgelere göre daha hızlı olması da bu duruma sebep olarak gösterilebilir.



Resim 7.7.PŞ numunenin Şekil 7.5'te tanımlı bölgelerdeki gözenek durumu (Deney 8)
a) üst bölge, b) orta bölge, c) alt bölge

PŞ parçalarda içyapıya bakıldığında; üst ve orta kısımlarda daha büyük olan tane yapısının, tabana doğru bir miktar küçüldüğü görülmektedir. Bu durumun, alt bölgeye yakın mesafede sıvı metal damlacığının ikincil bölünme sonucu daha küçük hale gelmesinden ve soğuk altlığa çarpan bu damlacığın daha hızlı soğumasından kaynaklandığı ifade edilebilir (Resim 7.8).



Resim 7.8. PŞ numunede üst bölgeden alt bölgeye doğru tane yapısı değişimi
(Deney 6) a) üst bölge, b) orta bölge, c) alt bölge

7.3.1. Yoğunluk ölçümü

PŞ parçaların yoğunluğu içindeki gözenek miktarıyla ters orantılıdır. PŞ parçalarda mesafenin artmasıyla gözenek miktarının da artmasından dolayı, üretilen parçanın yoğunluğu azalmıştır. PŞ parçaların yoğunluk ölçümlerine ait sonuçlar Çizelge 7.2'deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 7.2. PŞ parçaların yoğunluk ölçüm sonuçları

Deney No	1	2	3	4	5
Gaz Basıncı (bar)	30	30	30	30	30
Püskürtme Mesafesi (mm)	80	90	100	110	120
% Teorik Yoğunluk	92,1	91,3	91,1	87,2	85,3

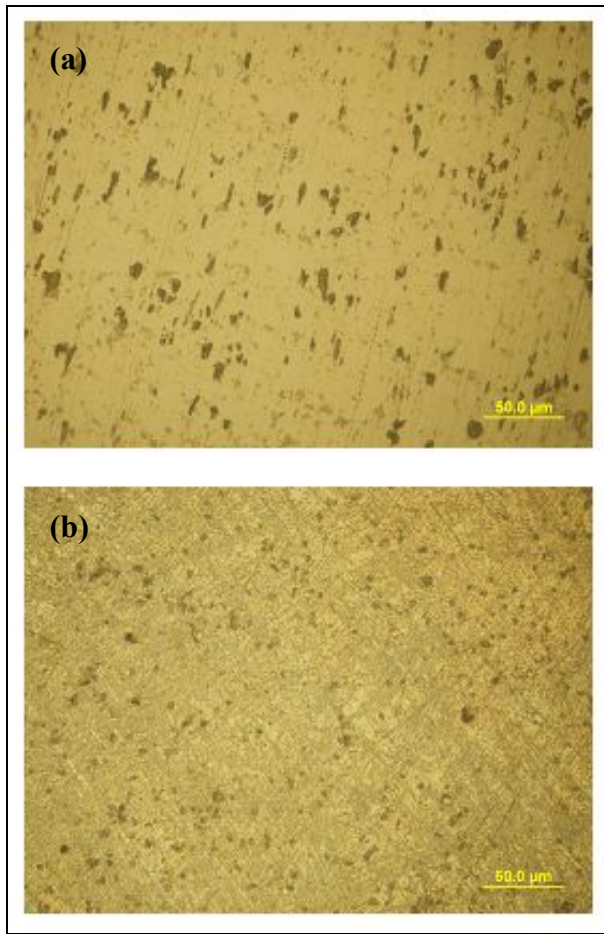
7.4. Ekstrüzyon

PŞ deneylerinden elde edilen parçalara ve döküm kalaya ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Ekstrüzyon deneylerinde kullanılan kalıbın (Resim 6.10) giriş çapı 20 mm olduğundan, PŞ ile üretilen parçalar 20 mm çapa girebilmesi için kesilmiştir ve ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Ekstrüzyon sonrası, kalıbın çıkış çapına eşit 6 mm çapında çubuklar elde edilmiştir (Resim 7.9). Uygulanan bu işlemde ekstrüzyon oranı (3,3:1) dir.



Resim 7.9. Ekstrüzyon sonucu oluşan 6 mm çapındaki çubuklar

Ekstrüzyon işlemi, bir tam yoğunluk işlemi olduğundan, yapı içerisindeki gözenek miktarını azaltacak bir işlemdir. Yapılan deneyler, PŞ sonrası ekstrüze edilmiş parçalarda gözenek miktarının azaldığını göstermektedir (Resim 7.10). Benzer şekilde Ekici [2], PŞ yöntemiyle ürettiği parçalara ekstrüzyon işlemi uygulamış ve ekstrüzyon sonrasında yapı içindeki gözenek miktarının azaldığını tespit etmiştir.



Resim 7.10. Ekstrüzyona bağlı gözenek değişimi (Deney 8)
a) ekstrüzyon öncesi, b) ekstrüzyon sonrası

7.4.1. Yoğunluk ölçümü

PŞ+Ekstrüze parçaların yoğunluk ölçümlerine ait sonuçlar Çizelge 7.3'deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 7.3. PŞ + Ekstrüze parçaların yoğunluk ölçüm sonuçları

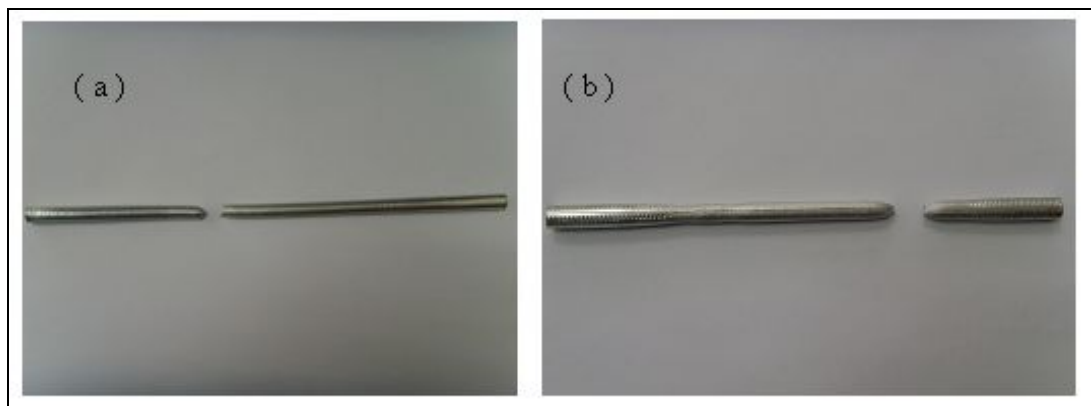
Deney No	1	2	3	4	5	saf kalay
Gaz Basıncı (bar)	30	30	30	30	30	
Püskürtme Mesafesi (mm)	80	90	100	110	120	
% Teorik Yoğunluk	98,1	97,6	97,2	96,3	95,1	98,6

7.5. Çekme Deneyi

Beş farklı PŞ mesafesinden her bir mesafe için iki adet çekme testi numunesi elde edilmiştir. Ortalama çekme mukavemetleri Çizelge 7.4’de verilmiştir. Yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen kopmuş çekme deneyi numuneleri Resim 7.11’de görülmektedir.

Çizelge 7.4. PŞ parçalar ile döküm parçaların çekme deneyi sonuçları

Uygulanan İşlem	Son çekme dayanımı $\sigma_{\text{Çekme}}$ (MPa)
80 mm, 30bar, Ekstrüzyon	36,4
90 mm, 30bar, Ekstrüzyon	35,1
100 mm, 30bar, Ekstrüzyon	40,15
110 mm, 30bar, Ekstrüzyon	34,05
120 mm, 30bar, Ekstrüzyon	35,1
Döküm kalay, Ekstrüzyon	29,35



Resim 7.11. a) 110 mm mesafe için kopmuş çekme numunesi b) döküm kalay için kopmuş çekme numunesi

Döküm malzemeye yapılan ekstrüzyon sonrası elde edilen çubuğa uygulanan çekme deneyi neticesinde, döküm malzemenin çekme mukavemetinin 29,35 MPa olduğu tespit edilmiştir. Hiçbir PŞ parçanın çekme mukavemeti döküm malzemenin çekme mukavemetinden düşük çıkmamıştır. PŞ sonrası ekstrüzyon işleminden elde edilmiş çubuklar için en yüksek çekme mukavemet değerinin 40,15 MPa ile 100 mm mesafede yapılan PŞ işleminden elde edilen parçaya ait olduğu görülmüştür. 100 mm'den daha büyük mesafelerde yapılan PŞ işlemlerine ait çekme mukavemet değerlerinin 100 mm'de yapılandan daha küçük olması, bu mesafeler için yoğunluk değerlerinin daha düşük olmasından (Çizelge 7.3) kaynaklanmaktadır. 100 mm'den daha küçük mesafelerdeki çekme mukavemetlerinin daha düşük olmasının ise; PŞ mesafesi azaldıkça biriktirme plakasına çarpıp katılan damlacıkların daha iri olmasından, böylece daha kaba taneli bir yapı elde edilmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Ekici de [2], yaptığı çalışmada daha büyük tane yapılarında çekme mukavemetinin düştüğünü tespit etmiştir. Yapılan çekme deneylerine ait örnek raporlar EK-10 ve EK-11'de verilmiştir. PŞ parçaların çekme mukavemetinde döküm malzemeye göre % 19,5 ile % 36,8 arasında değişen oranlarda artış sağlanmıştır. Literatüre bakıldığında, Ekici [2], alüminyum kullanarak yaptığı çalışma sonucunda, ekstrüze edilmiş PŞ parçaların çekme mukavemetlerinin, ekstrüze edilmiş döküm parçaların mukavemetine göre yaklaşık %10 daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Bu çekme mukavemeti değerindeki iyileşme, Ekici [2] çalışmasında 10 bar olan atomizasyon basıncının çalışmamızda 30 bar seçilmesi sonucu tane boyutunun küçülmesinden kaynaklanmaktadır.

8. SONUÇ

Bu çalışmada, tasarımı ve imalatı yapılan yakından eşlemeli Laval tipi nozul kullanılarak, T/M yöntemiyle kalay tozu üretilmiştir. En iyi parametrelerde yeni tasarım ve imalatı yapılan ayarlanabilir biriktirme plakası kullanılarak PŞ yöntemiyle parçalar üretilmiştir.

Gaz basıncı sabit tutularak çeşitli uzunluklara sahip çıkıntı aparatlarıyla yapılan deneyler sonucunda, çıkıntı uzunluğu arttıkça toz boyutunu küçüldüğü tespit edilmiştir. 20 bar için en ince tozlar 8 mm uzunluğundaki çıkıntı aparatı ile üretilen tozlarda 60,26 μm olarak elde edilmiştir. Aynı basınçta, çıkıntı aparatı uzunluğu 4 mm'ye doğru azaldıkça toz boyutu artmıştır.

Çıkıntı aparatı uzunluğu sabit tutulup farklı gaz basınçlarında yapılan deneyler sonucunda, basınç arttıkça toz boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir. 8 mm uzunluğundaki çıkıntı aparatı ile 10 bar ve 30 barda kalay tozu üretilmiştir. Bu mesafede en ince tozlar, 30 bar için 30,71 μm olarak elde edilmiştir.

PŞ parçalardaki gözenek miktarı, tabana yakın bölgelerde üst bölgelere göre daha fazladır.

Püskürtme mesafesi arttığında gözenek miktarı artmaktadır. En yüksek teorik yoğunluk 80 mm püskürtme mesafesi için % 92,1, en düşük teorik yoğunluk ise 120 mm için % 85,3 olarak belirlenmiştir. Ekstrüzyon sonrası bu değerler sırasıyla % 98,1 ve % 95,1 olarak ölçülmüştür.

PŞ yöntemiyle üretilmiş parçalara uygulanan ekstrüzyon işleminden sonra elde edilen çubuklara uygulanan çekme deneyi sonucunda, PŞ yöntemi ile üretilmiş parçaların çekme mukavemeti, döküm parçaların çekme mukavemetinden %16 ile %36,8 arasında değişen yüzdelerde yüksek bulunmuştur. En büyük iyileşme 100 mm mesafede 30 bar basınç ile yapılan PŞ işleminde sağlanmıştır.

PŞ parçalara ait numunelere yapılan çekme deneyi sonuçlarının tamamı döküm kalay numunesinin çekme deney sonuçlarından yüksek çıkmıştır. Ekstrüze edilmiş döküm kalay numune için ortalama çekme mukavemeti 29,35 MPa olarak belirlenmiş iken; bu değer, püskürtme mesafesi 100 mm olan ve 30 barda üretildikten sonra ekstrüze edilmiş PŞ parça için 40,15 MPa olarak saptanmıştır.

KAYNAKLAR

1. Küçükarslan, S., " Gaz atomize kalay tozu üretim parametrelerinin deneysel olarak araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 36-46 (2006).
2. Ekici, A.A., "Ekstrüzyonla tam yoğunlaştırılmış püskürtme şekillendirme alüminyumun mekanik özelliklerinin deneysel olarak araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1 (2005).
3. Sarıtaş, S., Toz Metalurjisi, "Makina Müh. El Kitabı", **MMO**, 2.Baskı, I.Cilt, 2/64-2/82 (1994).
4. German, R.M., "Powder Metallurgy Science 2nd edition", **Metal Powder Industries Federation**, USA, 16-20, 76-90 (1984).
5. İnternet : European Powder Metallurgy Association. <http://www.epma.org> (2006).
6. Ünal, R., "Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretim parametrelerinin araştırılması",Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-6, 24-25, 57-58 (1995).
7. Lawley, A., "Atomization: The production of metal powders" **Metal Powder Industries Federation**, Princeton, New Jersey, USA, 21-33, 100-106 (1992).
8. Sarıtaş, S., Turan, H., "Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi", **VI. Uluslararası Makina Tasarımı ve İmalat Kongresi**, ODTÜ, Ankara, 61-73 (1994).
9. Sarıtaş, S., Uslan, İ., "Gaz atomizasyonunda nozul geometrisi, gaz cinsi ve basıncının alüminyum tozu boyutuna etkisinin araştırılması", I.Ulusal Toz Metalurji Konferansı Bildiri Kitabı, **Gazi Üniversitesi, Ankara**, 217-226 (1996).
10. Uslan, İ. "Gaz atomize alüminyum tozlarının özelliklerine üretim değişkenlerinin etkisinin araştırılması", Doktora tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 4, 58-65, 69-71, 82-100 (1999).
11. İnternet : Jiaying Intec Hardware & Electronics Co.,Ltd. <http://www.intecmetal.org> (2006).
12. Alier, A.J., Losada, A., "Characteristics of atomized powders", **Powder Metallurgy Int.**, 21(5): 15-19 (1985).

13. Doğan, C., Sarıtaş, S., “Metal powder production by centrifugal atomization”, *Int. J. Powder Metallurgy*, 30: 419-427 (1994).
14. Pandey, O.P., Ojha, S.N., “Production and characterization of rapidly solidified powders of Al-Si alloys”, *Powder Metallurgy Int.*, 23(5): 291-295 (1991).
15. Kim, Y.W., Griffith, W.M., Froes, F.H., “Surface oxides in P/M aluminium alloys”, *J. Metals*, 37: 27-33 (1985).
16. Aydın, M., “Gaz atomizasyon yönteminde yeni bir nozul tasarımı ve toz üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 1-48 (2005).
17. Achelis, L., Lagutkin, S., Sheikhaliev, S., Srivastava, V., Uhlenwinkel, V., “Atomization process for metal powder”, *Materials Science and Engineering A*, 383(1):1-6 (2004).
18. Connor, J., Ridder, S., Ting, J., “High-speed cinematography of gas-metal atomization”, *Materials Science and Engineering A*, 390(1-2): 452-460 (2005).
19. Singh, S.N., Ojha, S.N., “Microstructural investigation on rapidly solidified cast iron powders”, *Int.J. Rapid Solidification*, 7(33): 201-217(1992).
20. Miller, S.A., “Close-coupled gas atomization of metals and alloys”, *Metal Powder Report*, 42(10): 702-715 (1987).
21. Howells, R.I.L., Dunstan, G.R., Moore, C., “Production of gas atomized metal powders and their major industrial uses”, *Powder Metallurgy*, 31(4): 259-265 (1988).
22. Hohmann, M., Jonsson, S., “New concepts for inter gas atomization plants”, *Metal Powder Report*, 45: 47-50 (1990).
23. Yule, A.J., and Dunkley, J.J., “Atomization of Melts”, *Oxford Univ. Press*, New York, USA, 165-189 (1994).
24. Mehrotra, S.P., “Review 15: Mathematical Modelling of Gas Atomization Process for Metal Powder Production”, Part 1, *Powder Metallurgy Int.*, 13(2): 80-84 (1981).
25. Mehrotra, S.P., “Review 15: Mathematical Modelling of Gas Atomization Process for Metal Powder Production”, Part 2, *Powder Metallurgy Int.*, 13(3): 132-135 (1981).

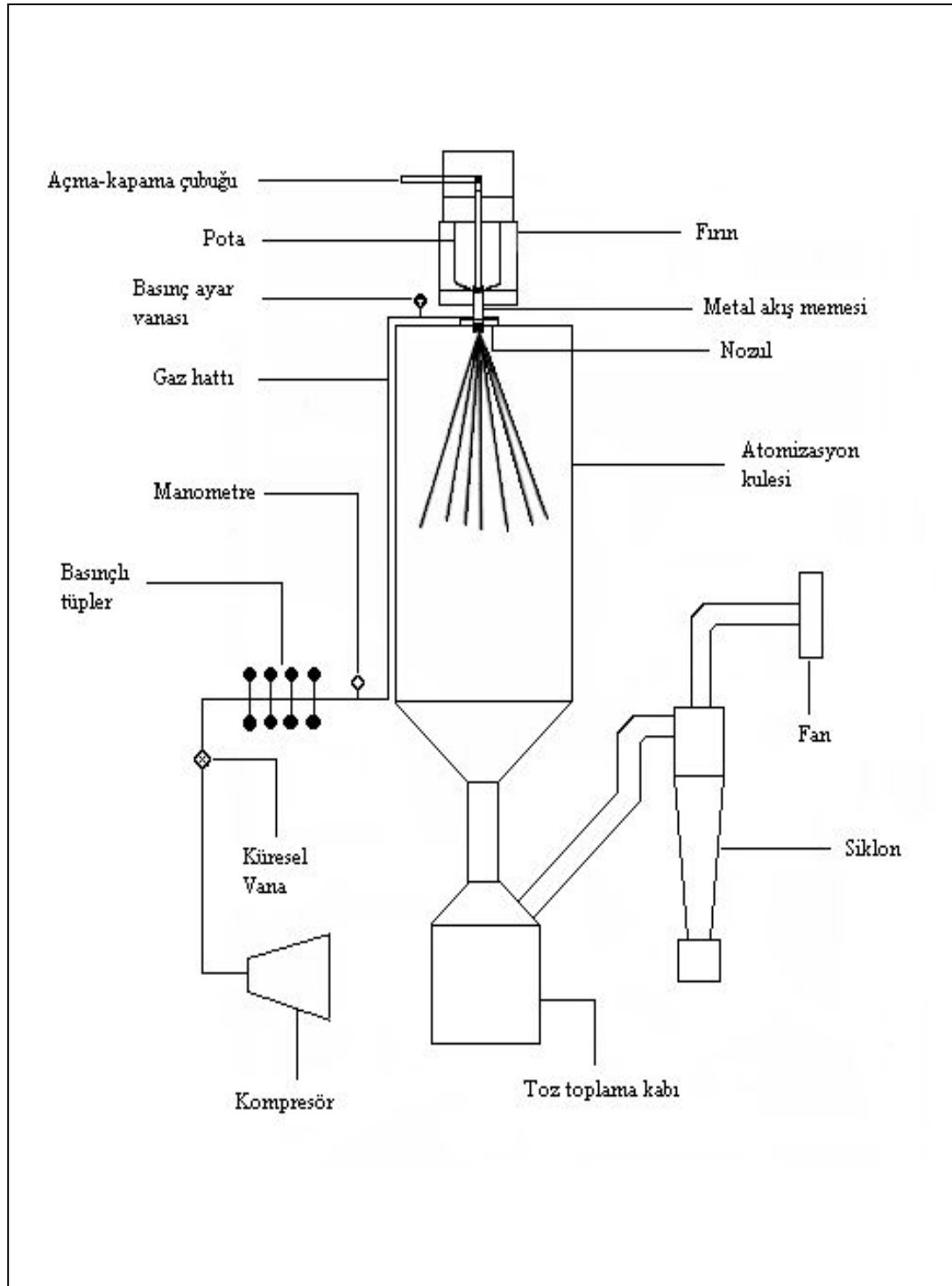
26. Dombrowski, N., Johns, W.R., "The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets", *Chemical Engineering Science*, 18: 203-214 (1963).
27. See, J.B., Johnston, G.H., "Interactions between nitrogen jets and liquid lead and tin streams", *Powder Metallurgy*, 21: 119-133 (1978).
28. Burger, M., Berg, E.V., Cho, S.H., Schatz, A., "Fragmentation processes in gas and water atomization plants for process optimization purposes: I. Discussion of the main fragmentation processes", *Powder Metallurgy Int*, 21(6): 10-15 (1989).
29. Burger, M., Berg, E.V., Cho, S.H., Schatz, A., "Fragmentation processes in gas and water atomization plants for process optimization purposes: II. Modelling of growth and stripping of capillary waves in parallel shear flows-the basic fragmentation mechanism", *Powder Metallurgy Int.*, 24(1): 32-38 (1992).
30. Putimtsev, B.N., "Effect of blast parameters on the mechanism of disintegration of a molten metal jet and on the properties of atomized powders", *Soviet Powder Metallurgy and Ceramics*, 11: 85-88 (1972).
31. Ünal, A., "Liquid break-up in gas atomization of fine aluminium powders", *Metallurgical Transactions B*, 20(11): 61-69 (1989).
32. Antipas, G.S.E., "Modelling of the break up mechanism in gas atomization of liquid metals.Part I: The surface wave formation model", *Computational Materials Science*, 35(4): 416-422 (2006).
33. Ünal, A., "Production of rapidly solidified aluminium alloy powders by gas atomisation and their applications", *Powder Metallurgy*, 33(1): 53-64 (1990).
34. Lubanska, H., "Correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals", *J. Metals*, 38: 45-49 (1970).
35. Özbilen, S., "Gaz atomizasyonunda birincil bölünme mekanizması üzerinde optik kamera incelemesi", *I. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı Bildiri Kitabı*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 207-215 (1996).
36. Takahara, T., "Properties of Al-High Si Alloys Produced by Spray Forming Process and its Application", *EURO PM'95 Spray Forming*, Birmingham, 143-149, (1995).
37. Dube, R.K., Korla, S.C., Singh, D., "Study of free fall gas atomisation of liquid metals to produce powder", *Powder metallurgy*, 44(2): 177-184 (2001).

38. Srivastava, V.C., Mandal, R.K., Ojha, S.N, "Microstructure and mechanical properties of Al-Si alloys produced by spray forming process", *Materials Science and Engineering A*, 304-306, 555-558, (2001).
39. Ünal, A., "Effect of processing variables on partide size in gas atomization of rapidly solidified aluminium powders", *Materials Science and Technology*, 3:1029-1039 (1987).
40. Ünal, A., "Production of metal powders by gas atomization", *I. Ulusal Toz Metalurji Konferansı Bildiri Kitabı*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 111-157 (1996).
41. Clyne, T.W., Ricks, R.A., Goodhew, P.J., "The production of rapidly solidified aluminium powder by ultrasonic gas atomization. Part I: Heat and fluid flow", *Int. J. Rapid solidification*, 1: 59 - 80 (1984).
42. Ünal A., Robertson, D.G.C., " Pilot plant gas atomizer for rapidly solidified metal powders", *Int. J. Rapid Solidification*, 2: 219-229 (1986).
43. Henein H., Le T., "Effect of nozzle geometry and position on gas atomization", *The International Journal of Powder Metallurgy*, 32(4): 353-364 (1996).
44. Klar, E., Fesko, J.W., "Production of metal powders", Metals Handbook 9th ed., *Powder Metallurgy*, Ohio, 7: 25-51 (1984).
45. Anderson, J, D., "Modern Compressible Flow with Historical Perspective", *Mc Graw-Hill Book Company*, USA, 127-131 (1982).
46. Ünal, A., "Influence of nozzle geometry in gas atomization of rapidly solidified aluminium alloys", *Materials Science and Technology*, 4: 909-915 (1988).
47. A.H. Kasamaa, A. Moreira J.J.a, W.J. Botta Fa, C.S. Kiminamia and C. Bolfarini., "Influence of the atomization gas on the microstructure and magnetic properties of spray-formed Fe-3%Si-3.5%Al alloys", *Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais*, Brazil, 72-83 (2007).
48. C.F. Ferrarini, C. Bolfarini, C. S. Kiminami and W. J. Botta F., "Microstructure and mechanical properties of spray deposited hypoeutectic Al-Si alloy", Departamento de Engenharia de Materiais, *Universidade Federal de São Carlos*, Brazil, 63-74 (2003).
49. Seok, H. K., Lee, J. C. and Lee, H. I., "Extrusion of spray-formed Al-25Si-X composites and their evaluation", *Journal of Materials Processing Technology*, 160, (3), 354-36, (2005).

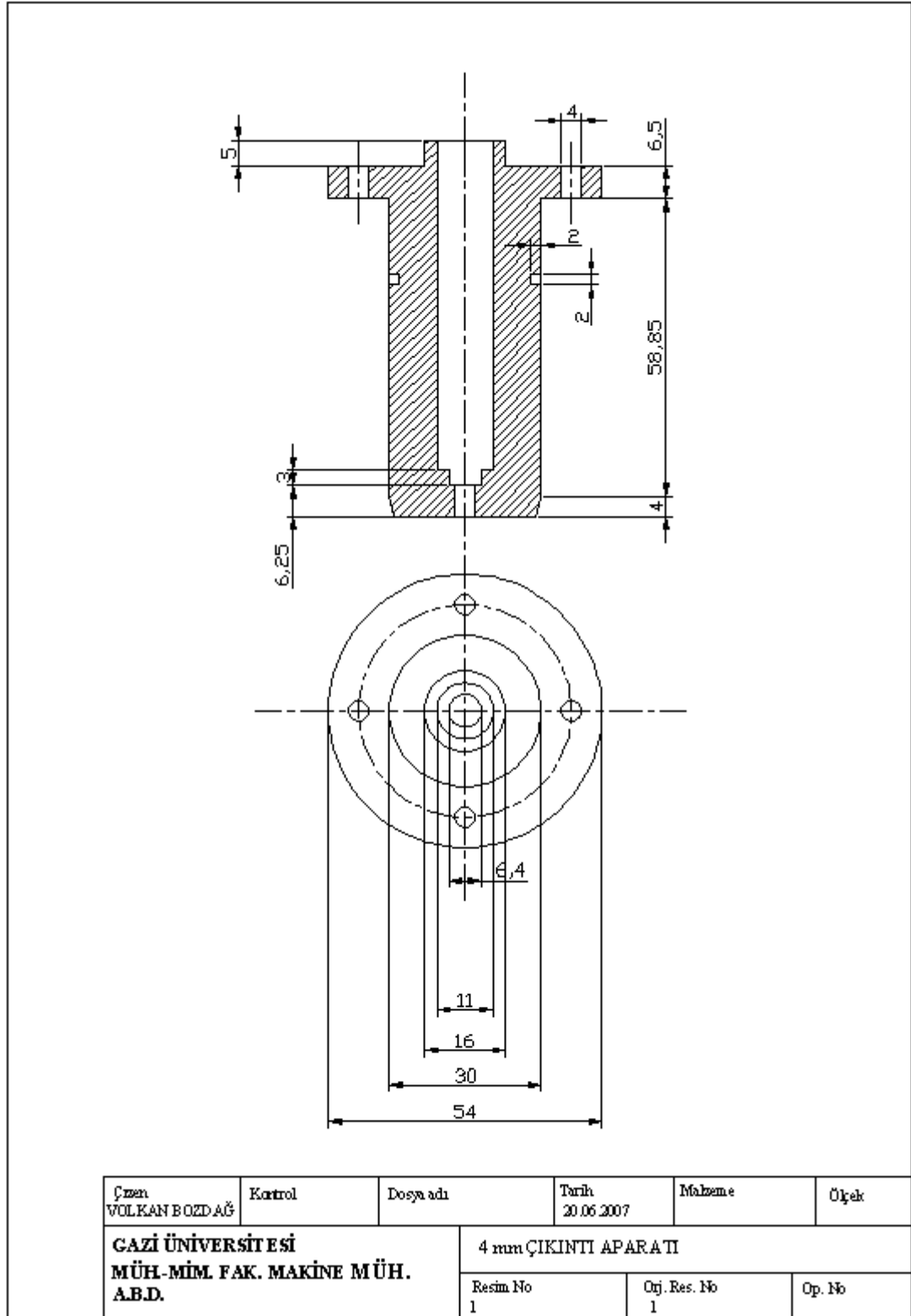
50. Yu, F. , “Microstructure and mechanical properties of spray-formed Al-Si-Pb alloys” *Northeastern University*, Shenyang, China, 70-74 (2007)
51. Lianxi, H., Zuyan, L., Erde, W., “Microstructure and mechanical properties of 2024 aluminum alloy consolidated from rapidly solidified alloy powders”, *Materials Science and Engineering A*, 323, 213-217, (2002).
52. Murai, T., Matsuoka, S., Miyamoto, S., Oki, Y., “Effects of extrusion conditions on microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium and extrusions”, *Journal of Materials Processing Technology*, 141, 207-212, (2003).
53. Lawley, A., “The Science, Technology and Applications of Spray Forming”, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı Kitabı, *Türk Toz Metalurjisi Derneği, Gazi Üniversitesi*, ANKARA, 1-19, (1996).

EKLER

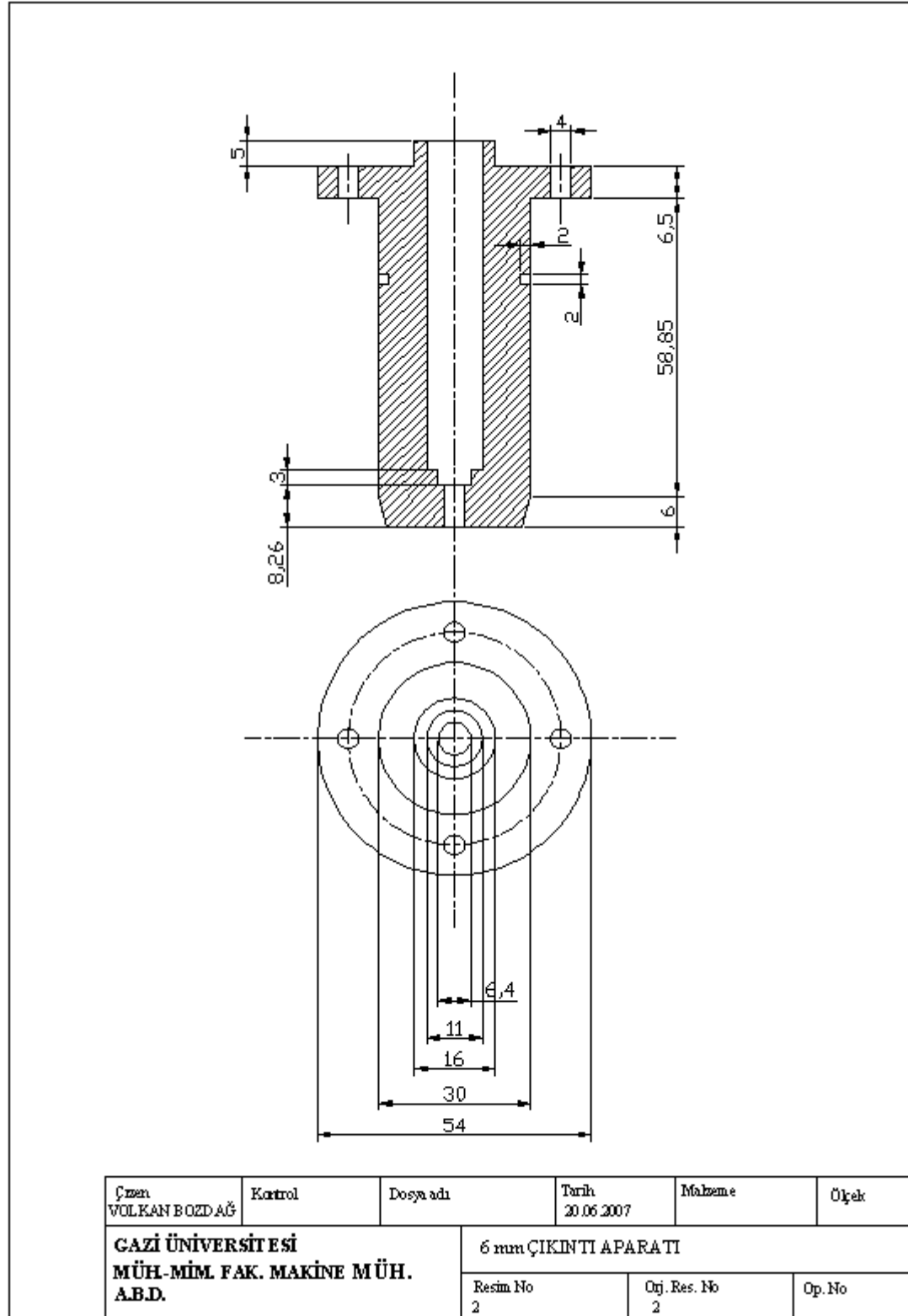
EK-1. Gazi Gaz Atomizasyon Birimi'nin şematik resmi



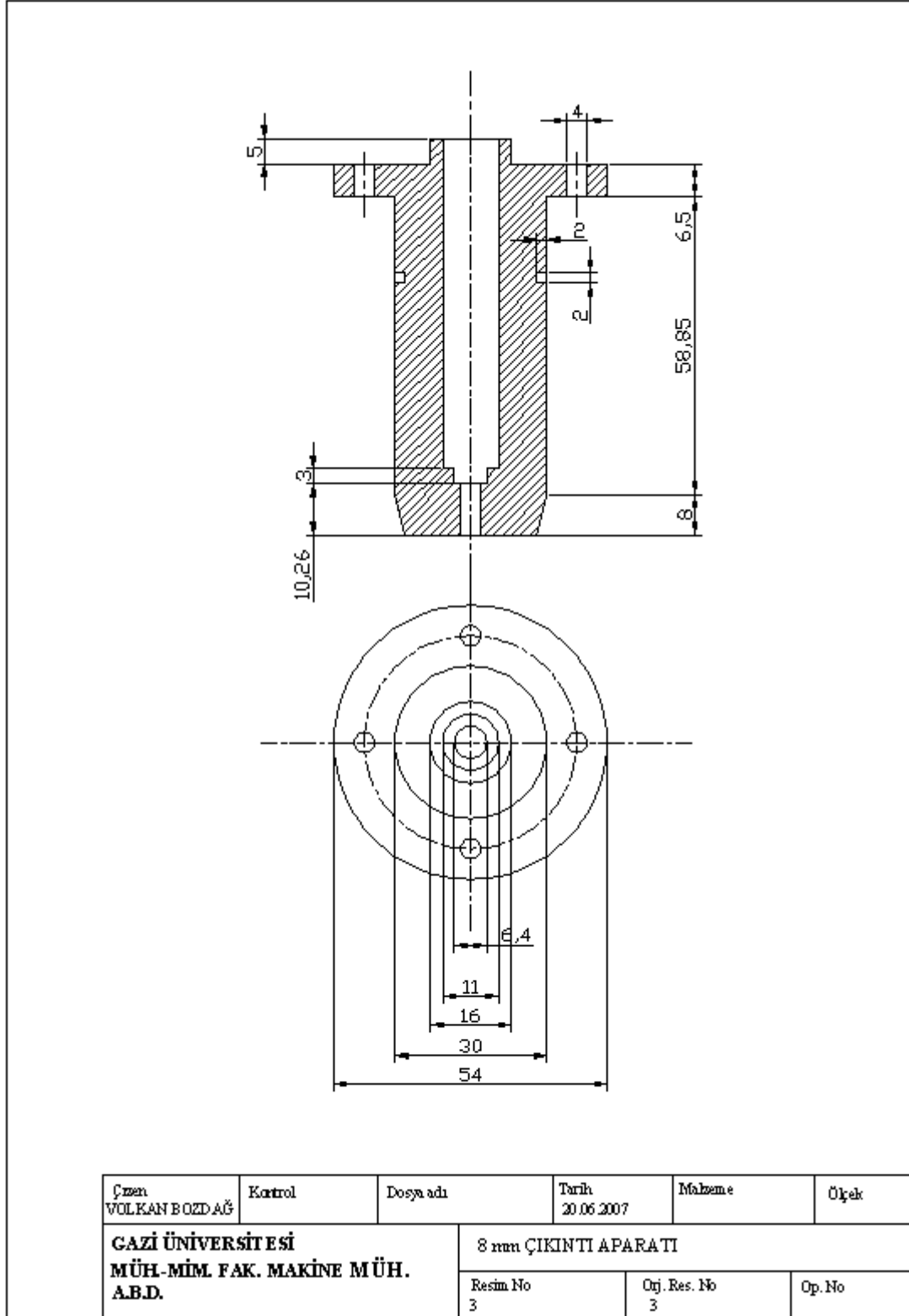
EK-2. 4 mm çıkıntı aparatı teknik resmi



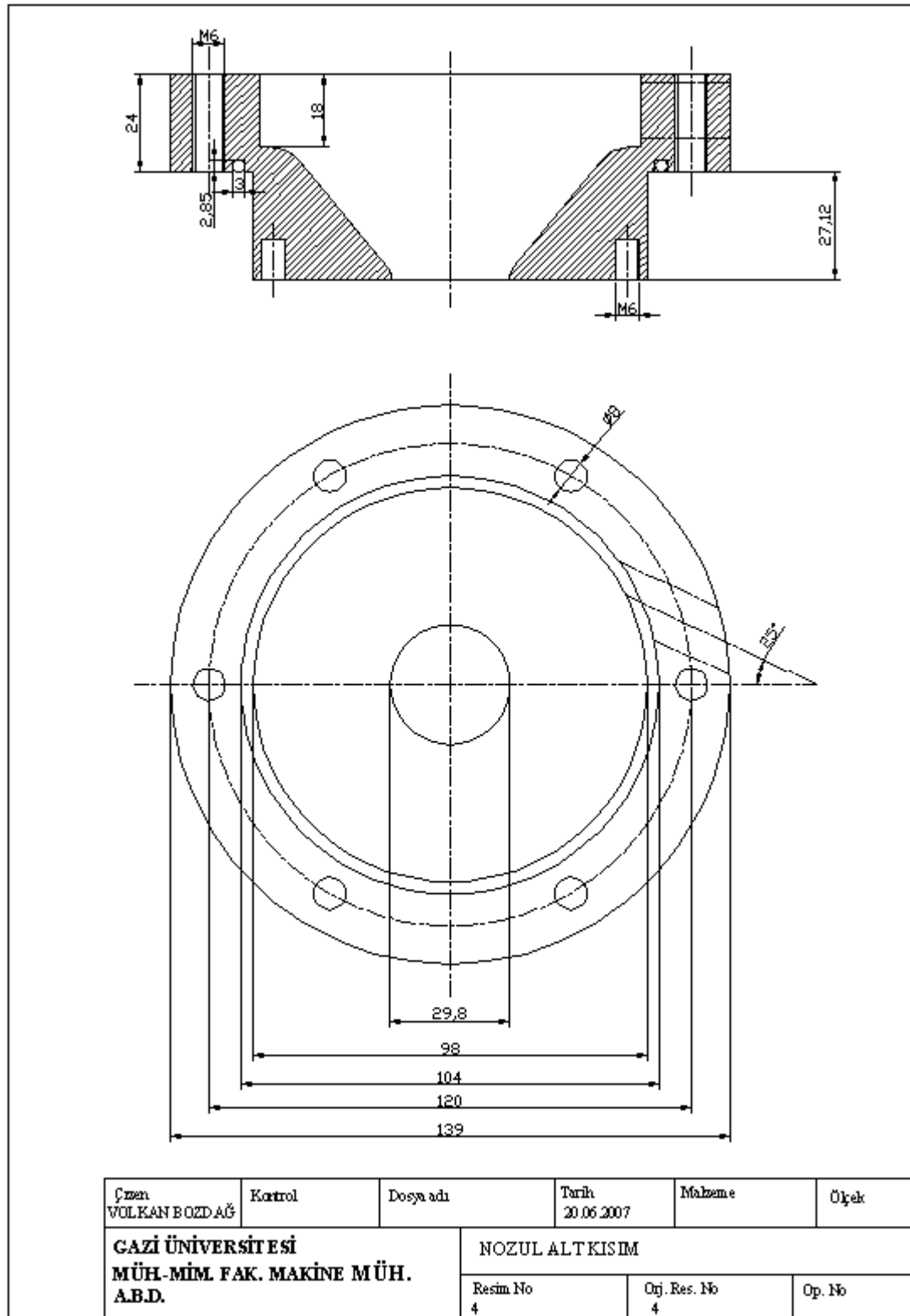
EK-3. 6 mm çıkıntı aparatı teknik resmi



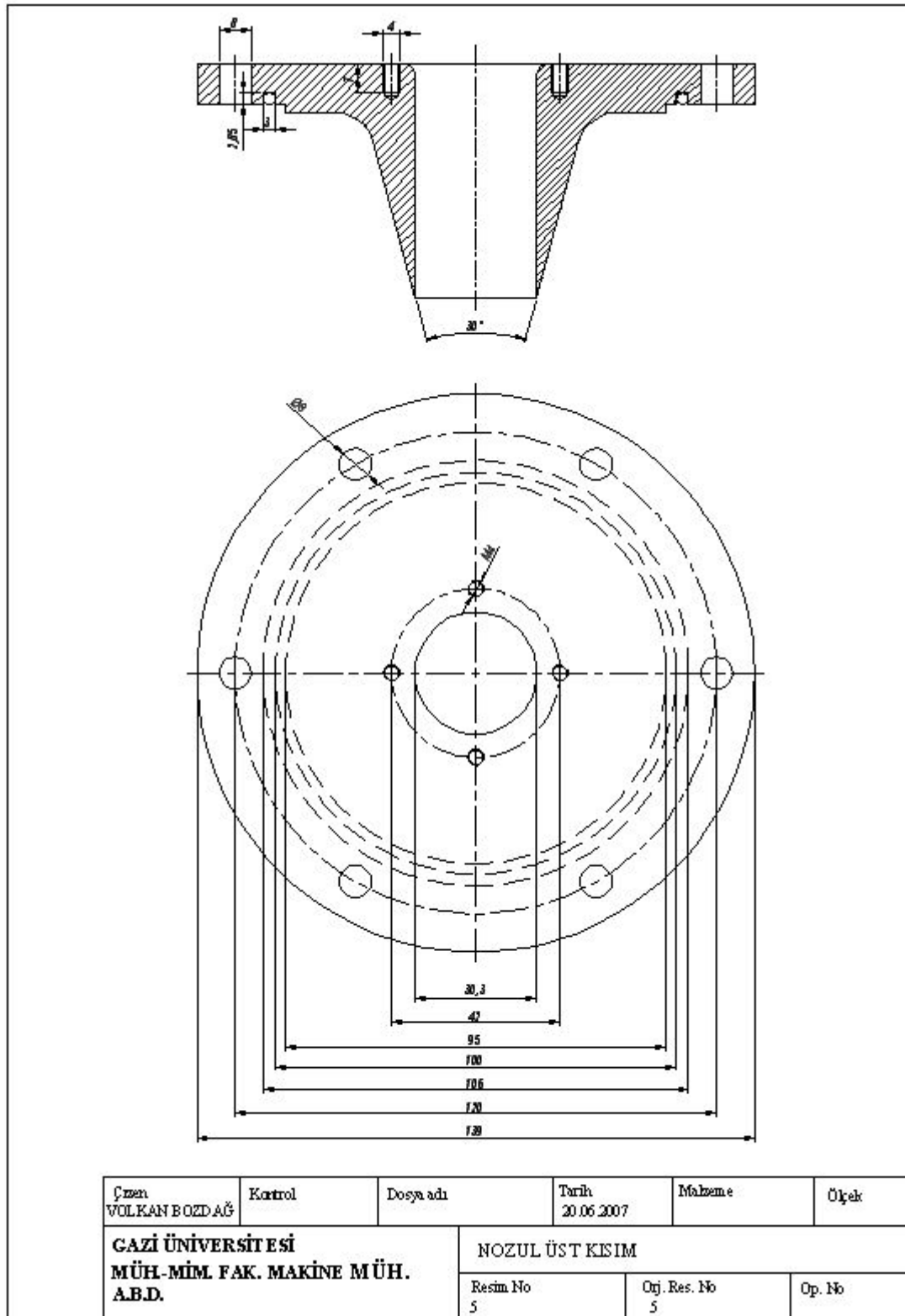
EK-4. 8 mm çıkıntı aparatı teknik resmi



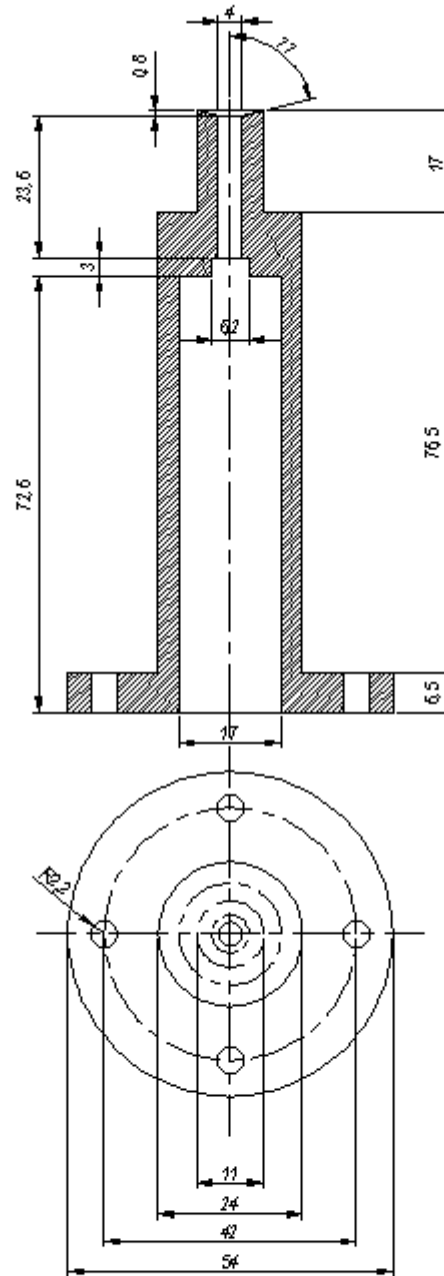
EK-5. Nozul Alt kısım teknik resim



EK-6. Nozul Üst kısım teknik resim

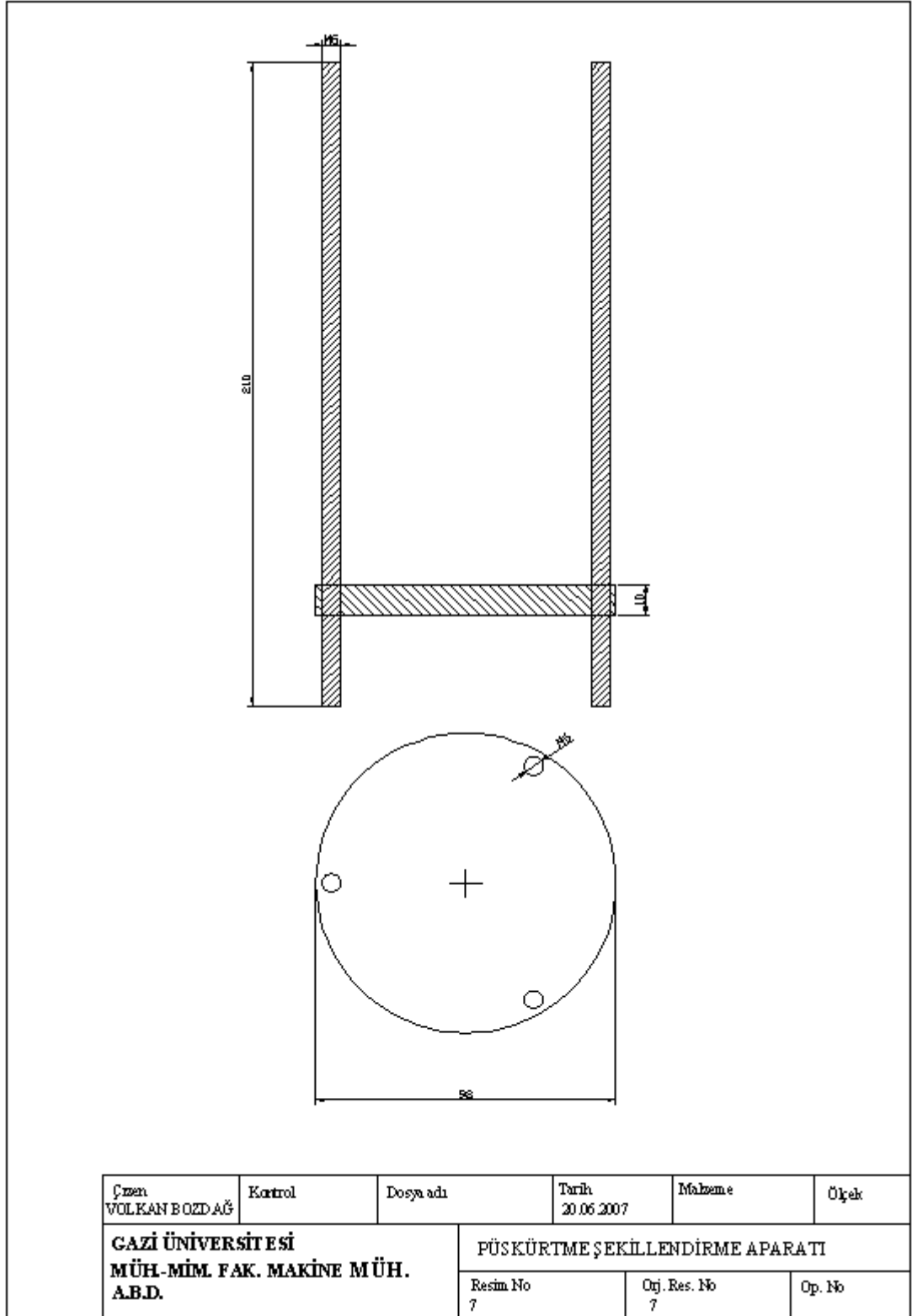


EK-7. Akış Memesi teknik resim

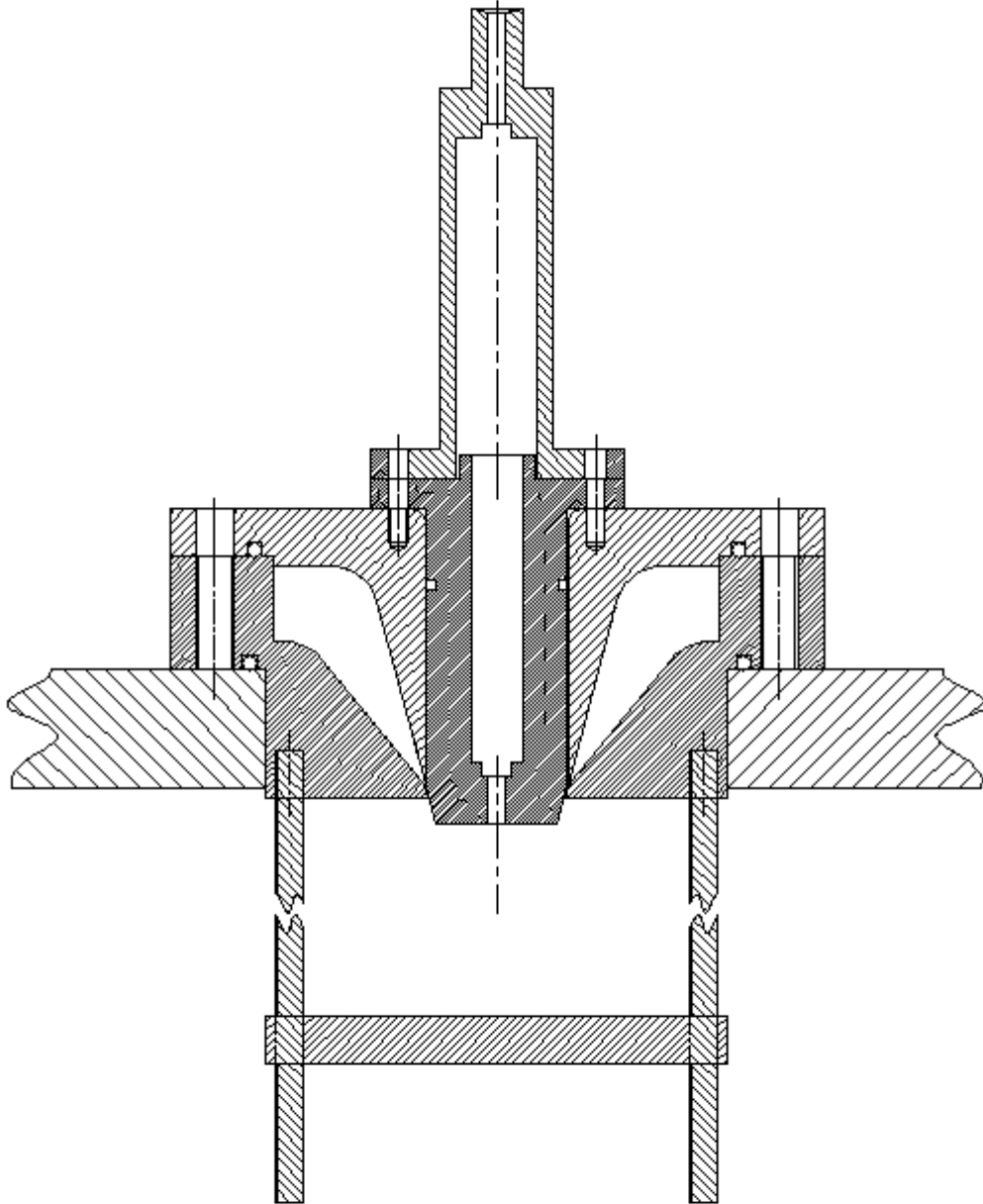


Çizen VOLKAN BOZDAĞ	Kontrol	Dosya adı	Tarih 20.06.2007	Malzeme	Ölçek
GAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.-MİM. FAK. MAKİNE MÜH. A.B.D.			AKIŞ MEMESİ		
			Resim No 6	Özj. Res. No 6	Op. No

EK-8. Püskürtme Şekillendirme aparatı teknik resim

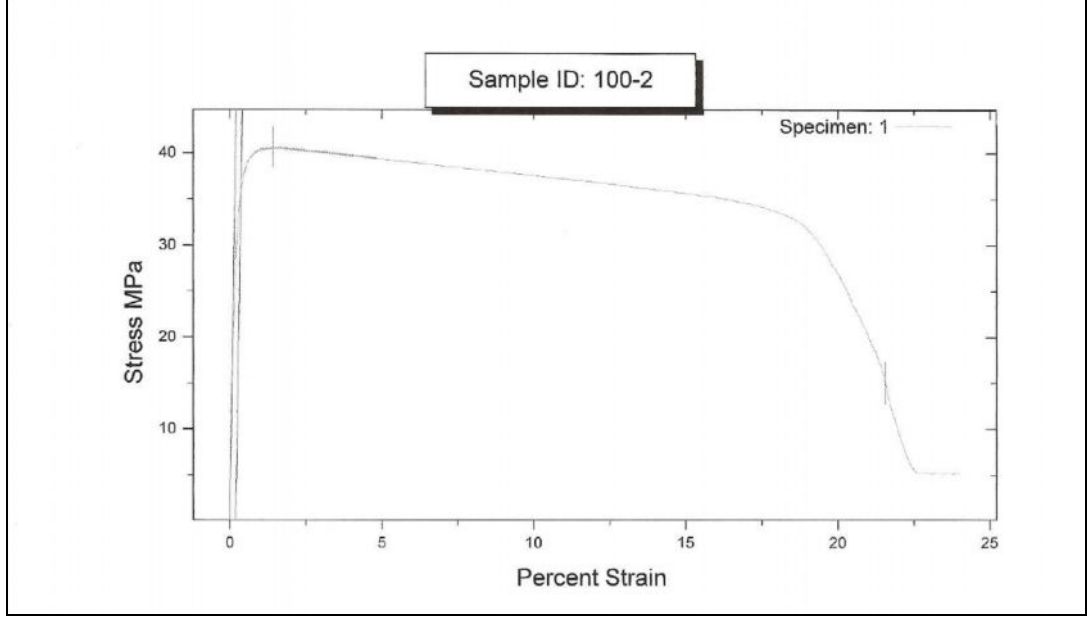


EK-9. Nozul Montaj teknik resim



Çizen VOLKAN BOZDAĞ	Kontrol	Dosya adı	Tarih 20.06.2007	Malzeme	Ölçek
GAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜH.-MİM. FAK. MAKİNE MÜH. A.B.D.			NOZUL MONTAJ		
			Resim No 8	Çiz. Res. No 8	Op. No

EK-10. 100 mm mesafeden üretilen parçanın çekme deneyi grafiği



EK-11. 100 mm mesafeden üretilen parçanın çekme deneyi sonucu

volkanbozdog

Test type: Tensile
 Operator name: makina müh
 Sample Identification: 100-2
 Interface Type: 2300/3300

Instron Corporation
 Series IX Automated Materials Testing System 8.33.00
 Test Date: 23 May 2008

Sample Rate (pts/secs): 4.0000
 Crosshead Speed: 2.0000 mm/min
 Second Speed: 0.0000 mm/min
 Third Speed: 0.0000 mm/min
 Full Scale Load Range: 50.0000 kN

Humidity (%): 50
 Temperature: 25 C

Sample comments:

	Stress at Max. Load (MPa)	Load at Max. Load (kN)	Stress at offset Yield 1 (MPa)	Modulus (NanYoung) (MPa)	Modulus (AutYoung) (MPa)	% Strain at Auto. Break (%)	Energy to Yield Point (J)
1	40.703	1.151	36.123	-	19994.920	21.566	0.130
Mean	40.703	1.151	36.123		19994.920	21.566	0.130
S.D.	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
Minimum	40.703	1.151	36.123		19994.920	21.566	0.130
Maximum	40.703	1.151	36.123		19994.920	21.566	0.130

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BOZDAĞ, Volkan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 14.04.1980 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 380 73 36
e-posta : volkanbozdag80@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Makine Mühendisliği Bölümü	2005
Lise	Özel Yükseliş Koleji	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-Devam etmekteyim	Emek Boru A.Ş.	İmalat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

İlgi Alanları

Tenis, Bilgisayar, Basketbol, Otomobil Sporları