

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Gaz Atomizasyonu Nozulunun Modellenmesi
ve Toz Üretiminin Deneysel Araştırılması

Mustafa Güleşen

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2013

Modeling of Gas Atomization Nozzle by Computational Fluid Dynamics and
Investigation of Powder Production by Experimentally

Mustafa Güleşen

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Mechanical Engineering

June 2013

Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği ile Gaz Atomizasyonu Nozulunun Modellenmesi
ve Toz Üretiminin Deneysel Araştırılması

Mustafa Güleşen

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışmanlar: Yrd.Doç.Dr. Melih Cemal Kuşhan
Prof.Dr. Rahmi Ünal

“Bu tez SANTEZ tarafından “00760.STZ-2010-2” no’lu proje ve DPÜ BAP birimi
tarafından “2011/26” no’lu proje çerçevesinde desteklenmiştir”

Haziran 2013

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Mustafa Güleşen'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Gaz Atomizasyonu İle Metal Tozu Üretiminde Yüksek Verimli Nozul Tasarımı Ve Üretilen Tozların Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd.Doç.Dr. Melih Cemal KUŞHAN

İkinci Danışman : Prof.Dr.Rahmi ÜNAL

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof.Dr. İbrahim USLAN

Üye : Prof.Dr. Rahmi ÜNAL

Üye : Doç.Dr. Necati MAHİR

Üye : Yrd.Doç.Dr. Melih Cemal KUŞHAN

Üye : Yrd.Doç.Dr. Osman Nuri ÇELİK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Gaz atomizasyon yöntemi metal tozu üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Günümüzde bu yöntem ile metal tozu üretim veriminin artırılması amacıyla araştırmalar devam etmektedir. Atomizasyon yönteminin başarısını etkileyen en önemli değişken nozul geometrisidir. Nozul geometrisi; boğaz açıklığı, boğaz alanı, çıkıntı mesafesi ve nozul açısı gibi değişkenlere sahiptir. Bu çalışmada nozulun gaz akış davranışı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi kullanılarak modellenmiştir. Modellemede metal akış borusu ucunda meydana gelen basınç, gaz debisi, gaz hızı verileri irdelenerek en verimli nozul tasarımı tespit edilmeye çalışılmıştır. Tespit edilen en iyi tasarıma göre nozul imal edildikten sonra nozul metal akış borusu uç basınç değerleri deneysel olarak ölçülmüştür. Tez çalışmasında çok sayıda tasarım için deneysel metal akış borusu uç basınç değerleri ile Reynolds Stres Modeli analizi sonuçları karşılaştırıldığında aralarında genellikle % 1 – 6 fark olduğu tespit edilmiştir. Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen saf kalay, gümüş amalgam, etial 141, AA 2014 ve AA7075 alüminyum alaşım tozlarının özellikleri incelenmiş ve nozul verimi açısından sonuçlar değerlendirilmiştir. Kalay ile yapılan deneylerde, aynı şartlarda metal akış borusu taban dış çapı 14 mm, 10 mm ve 8 mm nozullardaki deneyler sonucunda 10 mm çapa sahip nozul verimi diğerlerine göre daha yüksek bulunmuştur. Üretilen tozların küresel şekilli ve log normal dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalurjisi, Gaz atomizasyon, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Nozul tasarımı.

SUMMARY

Gas atomization method is widely used for metal powder production. This method is nowadays being investigated in order to increase the efficiency of metal powder production. The most important factor affecting the success of the atomization method is the nozzle geometry. Nozzle geometry has the parameters of throat opening, the throat area, nozzle angle and protrusion length. In this study, the gas flow behavior of the nozzle was modeled using Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. The most efficient nozzle design was tried to determine by discussing the melt base tip pressure, gas flow rate, and gas speed. According to the best determined design, nozzle was produced and the melt base tip pressure values were measured experimentally. It is found that there is 1 – 6 % difference in comparison of experimental data and theoretical Reynolds stress model analysis for the melt flow tube base pressure values. Pure tin, silver amalgam, etial 141, AA 2014 and AA7075 aluminum alloy powders were produced and discussed for the nozzle efficiency. It is found that 10 mm melt tip base diameter has higher nozzle efficiency than 14 mm and 8 mm diameter. Produced powders are spherical in shape and have log-normal powder distribution.

Keywords: Powder metallurgy, Gas atomization, Computational Fluid Dynamics, Nozzle design

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve yapıcı desteklerini esirgemeyen tez danışman hocalarım Prof.Dr. Rahmi ÜNAL ve Yrd.Doç.Dr. Melih Cemal KUŞHAN'a bu çalışmadaki değerli katkıları için teşekkür ederim. Ayrıca, HAD analiz için Fluent'i öğreten ve yardımlarını esirgemeyen hocalarım Prof.Dr. Zekeriya ALTAÇ, Doç.Dr. Necati MAHİR ve Yrd.Doç.Dr. Özer AYDIN'a, çalışmalarım sırasındaki desteklerinden dolayı mesai arkadaşlarıma ve hocalarıma teşekkür ederim.

Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği öğretim üyesi Prof.Dr. İbrahim USLAN ve Arş.Gör. Mehmet Alper SOFUOĞLU'na, İnci Dental Tıbbi Malzeme Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi'ne katkıları için teşekkür ederim.

Bu çalışma, 00760.STZ-2010-2 no'lu SANTEZ projesi ve 2011/26 no'lu DPÜ BAP projesi ile desteklenmiştir. Her iki proje yetkililerine şükranlarımı sunarım.

Son olarak, bugüne kadar yetişmemde büyük emeği olan değerli anneme ve babama, kardeşlerime, manevi desteklerini hiç esirgemeyen sevgili eşime ve çocuklarıma da teşekkürlerimi bir borç bilir, şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
2. GAZ ATOMİZASYON	3
2.1. Atomizasyon Sistemleri	4
2.2. Gaz Akış Modelleri	12
2.2.1. İdeal gazlarda şok dalgaları.....	12
2.2.2. Negatif basınç oluşumu.....	15
2.2.3. Geçiş bölgesinin gaz atomizasyonuna etkisi.....	17
2.2.4. Geri basınç oluşumu.....	18
2.2.5. Gaz atomizasyon mekanizmaları	20
2.3. Damlacık Oluşumu.....	23
2.3.1. İkincil atomizasyon	25
2.3.2. Gaz atomizasyonunda damlacık oluşumu	27
2.4. Enerji Gereksinimleri ve Verimlilik.....	32
2.5. Toz boyutu ve dağılımı	35
2.6. Nozula Yakın Bölgede Gaz Akışının Modellenmesi	40
3. SAYISAL MODEL ve DENEYSEL YÖNTEM	52
3.1. Sayısal Model ile Nozul Tasarımı.....	52
3.1.1. Tasarım kriterleri.....	53
3.1.2. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD).....	58
3.1.2.1. Türbülans modelleri	60
3.1.2.2. Sayısal çözüm teorisi	61
3.1.2.3. Sonlu hacim yöntemi	65

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.1.2.4. Çözüm alanının ayrıklaştırılması	66
3.1.2.5. Akış denklemlerinin çözümünde kullanılan temel yaklaşımlar	66
3.1.3. Nozul HAD modelleme yaklaşımı	68
3.1.3.1. Model geometrisinin oluşturulması.....	69
3.1.3.2. Model geometrisinde ağ yapısının oluşturulması	69
3.1.3.3. Sayısal çözüm.....	71
3.2. Deneysel Yöntem	74
3.2.1. Kontrol sistemi	75
3.2.2. Gaz sistemi	76
3.2.3. Ergitme	77
3.2.4. Nozul	77
3.2.5. Atomizasyon kulesi	78
3.2.6. Sistem temizliği ve toz tutma	78
3.2.7. Sıvı metal akış borusu uç basınç ölçümü	79
3.2.8. Gaz akış debisinin ölçümü	80
3.2.9. Metal akış debisinin ölçümü	80
3.2.10. Toz boyut analizi.....	81
3.2.11. Tozların şekil ve yüzey morfolojilerinin tespiti	81
4. BULGULAR ve DEĞERLENDİRME	83
4.1 HAD Sonuçları İle Deneysel Verilerin Karşılaştırılması.....	83
4.1.1. Reynolds stres modelinin referans geometriye uygulanması.....	83
4.1.2. RSM ile çözümde ağ yapısının iyileştirilmesi	85
4.2. Akış Ayrılması	89
4.3. HAD Model ile Nozul Geliştirme Çalışmaları.....	93
4.3.1. Nozul Açısının Etkisi	93
4.3.2. Nozul boğaz geometri değişiminin etkisi.....	96
4.3.3. Nozul boğaz açıklığı ve çıkıntı mesafesinin etkisi.....	100
4.4. Nozul Geliştirilme Çalışması (İNCİ Dental-SANTEZ).....	103
4.5. Nozul Geliştirilme Çalışması-(DPÜ BAP projesi)	104
4. 6. Toz Üretim Deneyleri	109
4.6.1. Toz üretim deneyleri (İnci Dental).....	109
4.6.2. Toz üretim deneyleri (DPÜ BAP Projesi).....	116
4.6.2.1. Gaz basınç değişiminin toz boyutuna etkisi.....	119
4.6.2.2. Boğaz alanı değişimine göre toz boyutu değişimi	122

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.6.2.3. Metal akış çapı değişimine göre toz boyut değişimi	126
4.6.2.4. Nozul boğaz çapı değişimine göre toz boyut değişimi	129
4.7. Farklı Metaller ile Yapılan Deneyler	135
4.7.1 AlSi 12Fe (Etial 141) tozu üretimi.....	135
4.7.1.1. Toz boyutu ve dağılımı	135
4.7.1.2. SEM çalışmaları	137
4.7.2. AA 2014 alüminyum alaşım tozu üretimi.....	139
4.7.2.1. Toz boyutu ve dağılımı	140
4.7.2.2. SEM çalışmaları	141
4.7.3. AA 7075 alüminyum alaşım tozu üretimi.....	142
4.7.3.1. Toz boyutu ve dağılımı	143
4.7.3.2. SEM çalışmaları	143
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	146
5.1. Sonuçlar	146
5.2. Öneriler	148
6. KAYNAKLAR DİZİNİ	149
ÖZGEÇMİŞ.....	158

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Atomizasyonu için içten karışımlı nozulun şematik gösterimi (Liu, 2000).	4
2.2. Serbest düşmeli nozul (a) ve Yakından eşlemeli nozulun (b) şematik gösterimi (ASM, 1998).	5
2.3. Yakından eşlemeli nozulların farklı tasarımları; a) HPGA, b) SIGMA, c) Ünal, d) USGA, e) NANOVAL f) Tepesi kesik tapa (Liu, 2000).	6
2.4. Serbest düşmeli nozulların farklı geometrik düzenlemeleri (Liu, 2000).	7
2.5. Nozul geometrisi tipleri: a) Laval tipi nozul (Uslan, 1999), b) Mannessmann tipi nozul (Ünal, 1995).	11
2.6. Bir normal şok dalgası. Sol tarafta $Ma > 1$ iken dalgadan sonra $Ma < 1$	13
2.7. Ani genişlemeye açılan nozul boyunca akış.	14
2.8. Düşük basınçlı geniş bölgeye açılan nozul boyunca akış.	15
2.9. Metal akış borusu çıkışında basınç oluşumu (Ting and Anderson, 2004).	16
2.10. Sesüstü jet etkili nozulda dolaşım bölgesinin şematik gösterimi.	17
2.11. Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi (Chen et al., 1998).	18
2.12. Gaz basıncına göre nozul uç basınç değişimi (Ünal, 2007).	19
2.13. Gaz/metal akış oranının toz boyutuna etkisi (Ünal, 2007).	20
2.14. Sıvı tabakasının bölünmesi ile damlacık oluşumu (Dobrowski and Johns, 1963).	21
2.15. Gaz atomizasyonunda mevcut üç aşamanın şematik gösterimi, See modeli (See and Johnston, 1978).	22
2.16. See modelinin German tarafından farklı gösterimi (German, 2007).	22
2.17. Atomizasyon işleminde durgun havada sıvı jeti altında parçalanma rejimi.	24
2.18. Damlacık parçalanma modları; solda: torba parçalanma; sağda: doğrudan parçalanma (Kennedy and Roberts, 1990).	26
2.19. Damlacığın ikincil parçalanma biçimi: (a) İkiz (Twins), $10,7 \leq We \leq 12,0$; (b) Torba (Bag), $12,0 \leq We \leq 100$; (c) Film sıyırma (Film stripping), $100 \leq We \leq 350$; (d) Felaket (Catastrophic), $350 \leq We$ (Ouyang et al., 2007).	27
2.20. Eriyiğin iki tür atomizasyonunda sıvı film tabaka parçalanması (sağda) ve sıvı jet-çubuksu parçalanmasının (solda) şematik gösterimi (Liu, 2000).	30

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.21. Hava atomizasyonu için Lubanska bağıntısı (Lawley, 1992).	36
2.22. Helyum, argon ve azot kullanılarak üretilen alüminyum tozlarının frekans dağılımı (Ünal, 1989 a).	37
2.23. Farklı basınç ve ergiyik sıcaklıklarında alüminyumun ortalama toz boyutunun değişimi (German, 2007).	38
2.24. Azot atomize kalay tozlarının ortalama boyutuna gaz debisinin etkisi (metal debisi 3 kg/dk) (Yule and Dunkley, 1994).	38
2.25. Azot gazı hızının ve çarpma açısının ortalama toz boyutuna etkisi ($\circ$, $\diamond$: Pb; $\square$, $\triangle$: Sn) (Yule and Dunkley, 1994).	39
2.26. Özgül gaz tüketiminin ortalama toz boyutuna etkisi, : Stellite alaşımı, : Alüminyum alaşımı (Yule and Dunkley, 1994).	39
2.27. Ünal yakından eşlemeli daralan/genişleyen nozul tasarımı (Ünal, 1988).	40
2.28. Yakından eşlemeli nozula ait hız vertörü (sağda) ve gaz akışı (solda) (Liu, 1997 a).	42
2.29. Serbest düşmeli nozula yakın bölgenin modellenmesinde; birinci gaz basıncı 0,14 MPa, ikinci gaz basıncı 0,18 MPa alınmıştır. İkinci gaz nozulun sprej merkezi ile açısı 10° , birinci gaz nozulun sprej merkezi ile açısı ise (a) 0° , (b) $22,5^\circ$ ve (c) 30° olacak şekilde tasarlamıştır (Liu, 1997 b).	42
2.30. Farklı atomizasyon basınçlarında oluşan akışların schlieren görüntüleri : ...	44
2.31. Anderson ve Terpstra'nın elde ettiği debi değerlerinin karşılaştırılması (Anderson and Terpstra, 2002).	45
2.32. HAD modelleme için De laval nozulun geometrisi ve sınır şartları (Allimant et al., 2009).	46
2.33. HPGA nozulun HAD modellenmesi ile hız grafiğinin gösterimi (Ting and Anderson, 2004).	46
2.34. Hesaplanan bölgenin ağ yapısı ve sınır şartları (Zeoli and Gu, 2006; Zeoli and Gu, 2008).	47

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.35. Yakından eşlemeli nozulun ağ yapısı ve sınır şartları (XinMing et al., 2009).....	48
2.36. 0.7 MPa gaz basıncında hız vektör dağılımı (a) Tüp A, (b) Tüp C (Jeyakumar et al., 2008).	49
2.37. Çıkıntı mesafesine ve atomizasyon gaz basıncına göre deneysel ve modelleme sonucu elde edilen aspirasyon basınç değerlerinin kıyaslanması (Jeyakumar et al., 2008).	49
2.38. Nozul uç basıncının HAD ve deneysel veriler ile karşılaştırılması (Aydın and Ünal, 2011).	50
2.39. Kalay atomizasyonunda akış ayrılmasının gösterimi a) atomizasyon öncesi, b) 2,2 MPa gaz basıncında akış ayrılması, c) 1,3 MPa gaz basıncında akış ayrılması yoktur (Aydın and Ünal, 2011).	51
2.40. Realizable $k - \varepsilon$ model için akış davranışı: a) 1,3 MPa atomizasyon basıncındaki akış ayrılmasının olmadığı, b) 2,2 MPa atomizasyon basıncındaki akış ayrılması görüntüsü (Aydın and Ünal, 2011).	51
3.1. Nozul ve yayıcıların sesaltı ve sesüstü hızlarda basınç hız ilişkileri.....	54
3.2. İzentropik ve gerçek işlemler arasındaki fark.	56
3.3. Sayısal ağ üretiminde kullanılan eleman tipleri (Marshall and Bekker, 2003).....	66
3.4. Ayrık çözüm algoritması (Fluent User's Guide, 2005).....	67
3.5. Bütünleşik çözüm algoritması (Fluent User's Guide, 2005).....	68
3.6. HAD model geometrisi ve sınır bölgeleri.	69
3.7. Ağ yapısı ve sınır şartları.	70
3.8. Kritik bölgelerdeki ve cidarlardaki ağ yapıları.....	70
3.9. HAD modellemede nozul uç basınç değerlerini alınmasında kullanılan hatların pozisyonu.	71
3.10. Dumlupınar Gaz Atomizasyonu Ünitesinin genel görünümü.	74
3.11. Dumlupınar Gaz atomizasyon ünitesinin şematik resmi.	75
3.12. Kontrol panosu ve deney öncesi hazırlıktan bir görüntü.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.13. Gaz kaynağı olarak kullanılan 12’li azot paleti.....	76
3.14. Ergitme odası (a) ve ergitme fırının (b) görünüşü.....	77
3.15. Tasarlanarak imal edilmiş nozul resmi a) alttan ve b) üstten görünüşü.	78
3.16. Toz toplama kabı ve siklonun görünümü.	79
3.17. Daralan genişleyen geometrilili nozulun şematik gösterimi ve metal akış borusu uç basıncının ölçüm sistemi.	79
3.18. Kütlesel debi ölçüm cihazının fotoğrafı.	80
3.19. Malvern Mastersizer E partikül boyutu ölçme cihazı.....	81
3.20. ESOGÜ SEM cihazı.....	82
4.1. Nozul uç basıncının HAD ve deneysel veriler ile karşılaştırılması.....	84
4.2. Gaz kütlesel debisinin HAD ve deneysel veriler ile karşılaştırılması.	85
4.3. Farklı ağ yapısına sahip HAD modellerdeki veriler ile deneysel verilerin kıyaslanması.	86
4.4. Ağ niteliğini arttırmak suretiyle yapılan HAD sonuçları ile deneysel sonuçların kıyaslanması.	87
4.5. HAD modellemede nozulun ekseninde statik basınç değişimi.	87
4.6. Modellemedeki nozulun uç basınç ölçen hatların ortalama değerinin her bir iterasyon başına gösterimi.	88
4.7. HAD sonuçları ile deneysel sonuçların kıyaslanması	88
4.8. Nozulun ucunda gaz dolaşım bölgesinde hız vektörleri.....	89
4.9. 2,2 MPa atomizasyon basıncında elde edilen hız bölgeleri ve akış ayrılmasının görülmesi.	90
4.10. 2,2 MPa atomizasyon basıncında elde edilen basınç konturları ve akış ayrılmasının görülmesi	90
4.11. RSM model için akış davranışı: a) 1,3 MPa atomizasyon basıncındaki akış ayrılması yoktur, b) 2,2 MPa atomizasyon basıncındaki akış ayrılması vardır.	91
4.12. Realizable $k - \epsilon$ modelin farklı basınçtaki hız değerleri	92
4.13. Reynolds stres modelin farklı basınçtaki hız değerleri	92

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.14. Nozulun şematik gösterimi.....	93
4.15. Nozul boğaz açıklığına göre gaz hızının 1,3 MPa basınçta farklı nozul açılarına göre değişimi	94
4.16. Boğaz açıklık değerine göre Mach sayısındaki değişim (nozul açıları 10, 13, 16).....	95
4.17. Boğaz açıklık değerine göre gaz debisindeki değişim (nozul açıları 10, 13, 16).....	95
4.18. Farklı boğaz geometrisine sahip nozullar.....	96
4.19. Atomizasyon basıncına göre nozulların uç basınç değişimi	98
4.20. Atomizasyon basıncına göre nozulların gaz debisi değişimi	98
4.21. Atomizasyon basıncına göre nozulların Mach sayısı değişimi.	99
4.22. Atomizasyon basıncına göre nozulların hız değişimi	99
4.23. Atomizasyon basıncına göre nozulların “Mach sayısı/gaz debisi” oranının değişimi	100
4.24. HAD modellemede nozul uç basınç ve yoğunluk değerlerinin alınmasında kullanılan hatların pozisyonu	101
4.25. Farklı geometrili nozulların 1,3 MPa atomizasyon basıncında yoğunluk, gaz debisi ve Mach sayısına göre kıyaslanması.	102
4.26. Farklı geometrili nozulların 1,3 MPa atomizasyon basıncında uç basınç ve gaz hızlarının kıyaslanması	103
4.27. İnci Dental nozul uç basınçların kıyaslanması	104
4.28. İnci Dental Gaz Atomizasyon Ünitesi kule üst kısmı.	104
4.29. DPÜ BAP projesi kapsamında tasarlanan nozulun şematik görünümü.	105
4.30. Deneysel ve HAD verilerine göre atomizasyon basıncına göre uç basınç değerlerinin kıyaslanması. Çıkıntı mesafesi 4 mm (a), 5 mm (b), 6 mm (c), 7 mm (d).....	106
4.32. Farklı atomizasyon basıncında nozul ucunda gaz dolaşım bölgesinde hız konturleri. atomizasyon basıncı; a) 5,9 bar, b) 11 bar, c) 18,02 bar, d) 22,39 bar.....	108

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.33. Kalay atomizasyonu deney görüntüleri; a) atomizasyon öncesi, gaz basıncı; b) 9 bar, c) 12 bar, d) 18,5 bar	108
4.34. 22 bar gaz basıncı ile üretilmiş tozların boyut dağılım grafiği.....	111
4.35. Atomizasyon gaz basıncının (a) ve gaz/metal kütleli debi oranının (b) toz boyutuna etkisi.	112
4.36. Farklı basınçlarda üretilmiş gaz atomize toz resimleri (x100): (a) 12 bar, (b) 14 bar, (c) 20 bar.....	113
4.37. Farklı basınçlarda üretilmiş gaz atomize toz resimleri (x500): (a) 12 bar, (b) 15 bar, (c) 20 bar.....	114
4.38. Farklı basınçlarda üretilmiş gaz atomize toz yüzey yapıları: (a) 12 bar, (b) 15 bar, (c) 20 bar.	115
4.39. 8 bar basınçla üretilen azot atomize kalay tozu için toz dağılım eğrisi.....	118
4.40. 12 bar basınçla üretilen azot atomize kalay tozu için toz dağılım eğrisi (Deney 13).....	118
4.41. Toz boyut değişimi (a) Gaz basıncına göre, (b) G/M debi oranına göre.	120
4.42. Deney 2 azot atomize kalay tozu SEM görüntüsü a) (x3000), b) (x1600) c)(x800), d) (x400)	120
4.43. (a) Boğaz alanı değişimine göre verim, (b) G/M debi oranına göre toz boyut değişimi	123
4.44. Azot atomize kalay tozu SEM görüntüsü.....	124
4.46. (a) G/M debi oranına göre toz boyut değişimi, (b) Metal akış çapına göre verim.....	127
4.47. Azot atomize kalay tozu SEM görüntüsü	128
4.48. RSM ile deneysel uç basınç verilerinin kıyaslanması a) D= 8 mm nozul b) D=10 mm nozul.....	130
4.49. Farklı metal akış borusu taban çapına sahip nozulların 15 bar atomizasyon basıncındaki kalay tozu üretim görüntüleri; a) D=14 mm, b) D=10 mm, c) D=8 mm.....	131

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.50. Atomizasyon gaz basıncının (a) ve gaz/metal kütleli debi oranının (b) toz boyutuna etkisi.	132
4.51. 20 bar atomizasyon basıncında farklı geometrili nozullarda üretilmiş azot atomize kalay tozu görüntüleri (x400) a) D=14 mm, b) D=10 mm, c) D=8 mm.....	133
4.52. 20 bar atomizasyon basıncında farklı geometrili nozullarda üretilmiş azot atomize kalay tozu görüntüleri (x800) a) D=14 mm, b) D=10 mm, c) D=8 mm.....	134
4.53. Malvern Mastersizer E toz boyutu analiz raporu (Deney 6)	136
4.54. Etial 141'e ait SEM görüntüleri a) (x3000), b) (x200).....	137
4.55. Etial 141'e ait SEM görüntüleri a) Uydulaşma, b) Sıvanma.....	138
4.56. Azot atomize AA 2014 tozu için tek modlu toz dağılım eğrisi (Deney 1)...	140
4.57. Azot atomize AA 2014 alaşım tozlarının genel görüntüsü (Deney 3)	141
4.58. Azot atomize AA 7075 alüminyum alaşım tozu için tek modlu toz dağılım eğrisi (Deney 1).....	143
4.59. Azot atomize AA 7075 alüminyum alaşımının genel görüntüsü	144

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Gaz atomizasyonun geometrik değişkenleri (Liu, 2000)	8
2.2. Metal tozu üretimi için gaz atomizasyon değişkenleri (Liu, 2000).....	9
3.1. Sayısal çözümleme için azot gazının özellikleri (NIST).....	72
4.1. Farklı atomizasyon basınçlarında deneysel nozul uç basınç ve Reynolds Stres Model sonuçları	83
4.2. Farklı nozul açıları ve boğaz açıklığında gaz hızı ve uç basınç değerleri	94
4.3. Nozulların HAD çözüm değerleri	97
4.4. Tasarlanan nozul geometri değerleri	100
4.5. 1,3 MPa atomizasyon basıncında nozulların HAD çözüm değerleri	101
4.6. 12 farklı atomizasyon basıncı için HAD model verileri.....	105
4.7. Çıkıntı mesafesine göre HAD ve deneysel veriler ile % sapma değerleri ...	106
4.8. Farklı basınçlarda gaz atomizasyonu ile üretilmiş toz boyutu özellikleri	110
4.9. Farklı basınçlarda üretilen tozların özellikleri	110
4.10. Yakından eşlemeli nozul için atomizasyon değişkenleri	116
4.11. Yapılan deneylerde elde edilen toz boyutlarıyla ilgili değerler	117
4.12. Gaz basınç değişiminin toz boyutuna etkisi	119
4.13. Boğaz alanı değişimine göre toz boyutuna etkisi	122
4.14. Metal akış çapı değişimine göre toz boyutuna etkisi	126
4.15. Azot atomize kalay tozu üretimi için atomizasyon değişkenleri ve sonuçları (Metal akış çapı= 3 mm, Çıkıntı mesafesi= 5 mm)	131
4.16. Etial 141 tozu üretimi için atomizasyon değişkenleri ve sonuçlar	135
4.17. AA 2014 alaşım tozu üretimi için atomizasyon değişkenleri ve sonuçlar ...	140
4.18. Azot atomize AA 2014 alaşım tozu miktarları.....	140
4.19. AA 7075 alaşım tozu üretimi için atomizasyon değişkenleri.....	142
4.20. AA 7075 alaşım tozu üretimi için atomizasyon sonuçları	142

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler Açıklama

A	Nozul gaz çıkış alanı (mm^2)
A^*, A_G	Boğaz alanı (mm^2)
c, U_s	Ses hızı (m/s)
D	Damlacık çapı (μm)
d_m, d_{50}	Ortalama toz boyutu (μm)
d_{vm}	Hacim ortalama çapı (μm)
d_{vs}	Sauter ortalama çapı (μm)
E	Enerji
h, A	Çıkıntı mesafesi (mm)
K	Sabit sayı
Ma	Mach sayısı
N	Damlacık sayısı
r	radyal koordinat
R	İdeal gaz sabiti; Nozulun çeperlerinden akışkana uygulanan kuvvet (kgm/s^2)
Re	Reynolds sayısı
s	Saniye
T	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$, K)
t	Zaman (s; dk)
U_{G0}	Gaz nozulun çıkış sırasındaki ilk hızı (m/s)
V	Akışkanın hızı (m/s)
v_r	Radyal hız (m/s)
v_x	Eksenel hız (m/s)
v_z	Swirl hızı
We	Weber sayısı
x	Eksenel koordinat
Z, Oh	Ohnesorge sayısı
α	Gaz çıkış açısı ($^{\circ}$)
ρ	Gaz yoğunluğu (kg/m^3)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler Açıklama

P_a	Atomizasyon basıncı (MPa, bar)
γ	Gazın özgül ısı oranı
σ_g	Standart sapma
ν_g	Gazın kinematik viskozitesi (m ² /s)
ν_m	Sıvı metalin kinematik viskozitesi (m ² /s)
M_G	Gazın moleküler ağırlığı (kg/kmol)
k	Türbülans kinetik enerji
ε	Türbülans yitim hızı

Kısaltmalar Açıklama

2B	2 Boyutlu
3B	3 Boyutlu
CPU	Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit)
DNS	Direkt Nümerik Simulasyon (Direct Numerical Simulation)
DoD	İsteğe uygun damlacık (Droplet-on Demand)
DPÜ	Dumlupınar Üniversitesi
et al	Ve diğerleri
G/M	Gaz Debisinin Metal Debisine Kütlesel Oranı
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
HPGA	Yüksek basınçlı gaz atomizer High Pressure Gas Atomization)
LDV	Lazer Dopler Hız Ölçer (Laser Doppler Velocitimeter)
LES	Büyük Girdap Simulasyonu (Large Eddy Simulation)
NIST	Uluslar arası Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (National Institute of Standards and Technology)
RNG	Renormalizasyon Grup
RSM	Reynolds Stres Modeli
SEM	Taramalı elektron mikroskobu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
T/M	Toz Metalurjisi
USGA	Ultra Sesüstü Gaz Atomizasyon (Ultra Supersonic Gas Atomization)

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Gaz atomizasyon yönteminde amaç yüksek hızda genleşen gazın kinetik enerjisini sıvı metale aktararak metali küçük damlacıklara ayırmaktır. Düzenli ve yüksek verimli bir atomizasyon işleminin gerçekleşmesi gaz kinetik enerjisinin yüksek olması ve metal akış borusu ucunda negatif basınç oluşumu ile sağlanır. Gaz atomizasyon yöntemi çok sayıda atomizasyon değişkenlerine sahiptir (sıvı metal debisi, gaz debisi, gaz basıncı ve nozul geometrisi). Bu değişkenlerden en önemlisi nozul geometrisidir (Ünal, 2007 a). Nozul en basit kelime anlamıyla simetri eksenini boyunca hareket eden akışkanın hızını artırırken basıncını düşüren geometrik yapıya verilen isimdir. Gaz atomizasyonunda kullanılan nozullar farklı geometrilere sahiptirler. Genel olarak kullanılan nozullar, daralan veya daralan-genişleyen geometriye sahiptirler. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bilgilere göre daralan-genişleyen geometrili nozullar, daralan geometrili nozullara göre daha iyi gaz genleşme davranışı gösterirler. Böylelikle daralan-genişleyen nozullarda daha ince boyutta toz üretimi gerçekleştirilir. Yüksek verimli nozullar mümkün olduğu kadar düşük atomizasyon basınçlarında daha küçük çapta toz üretimine imkan sağlarlar. Yakından eşlemeli sistem ile toz üretimi fiziksel olarak oldukça karmaşık bir işlemdir. Yakından eşlemeli sistemlerde gaz dolaşım bölgesi ve bu bölgenin atomizasyona olan etkisi araştırma konusu olmuştur.

Günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımları kullanılarak gaz atomizasyon işleminde kullanılan nozulun gaz davranışı tek akışkanlı simülasyonlar ile araştırılmaktadır. Gaz atomizasyon işleminin daha iyi anlaşılması, daha küçük toz boyut dağılımına sahip tozların üretimi ve atomizasyon işleminin veriminin artırılması amacıyla gaz akış dinamiği konularında yapılan araştırmalar giderek artmaktadır. Günümüz araştırmacıları HAD analizleri ile elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla doğrulanması konusunda araştırmalar yapmaktadırlar. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile laminar akışlar kolayca çözümlenebilirken, uygulamadaki türbülanslı akışları türbülans modellerini kullanmaksızın çözmek imkansızdır. Genel bir türbülans modeli yoktur ve bir türbülanslı HAD çözümü, sadece türbülans modelinin uygunluğu kadar iyidir. Bu sınırlamaya rağmen, standart türbülans

modelleri uygulamadaki çoğu mühendislik problemlerinde makul çözümler verir. Sayısal ve deneysel olarak bulunan genel büyüklüklerin karşılaştırılması yoluyla HAD çözümlerini doğrulamak için çoğunlukla deneysel veriler kullanılır. HAD, daha sonra, dikkatlice kontrol edilen parametrik incelemeler yoluyla, gerekli deneysel test sayısını düşürerek tasarım sürecini kısaltmak amacıyla kullanılır (Çengel ve Cimbala, 2008). Nozula yakın bölgede atomizasyon gazının akış ve hız bölgelerinin modellenmesi atomizasyon parametrelerinin optimizasyonu için temel kurallar sağlar. Bu durumda modelleme sonuçları farklı atomizasyon işlemlerinin modellenmesinde başlangıç koşulları sağlar (Liu, 2000).

Bu çalışmada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı Fluent kullanılarak nozul gaz akışının teorik modellenmesi yapılmıştır. İlk olarak DPÜ Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilen toz üretim çalışmalarında kullanılan nozulun deneysel verileri ile modellemenin doğruluğu tespit edilmeye çalışılmıştır. HAD model verileri ile deneysel veriler yaklaşımı en iyi olacak şekilde model üzerinde çeşitli parametrelerin etkileri incelenmiştir. Daha sonra nozul tasarımında önemli olan geometri ve gaz çıkış alanı değişkenleri değiştirilerek gaz hızının ve akış borusu uç basıncının en uygun olduğu nozul geometrisi bulunmaya çalışılmıştır. Gaz davranışına göre en uygun olduğu değerlendirilen tasarıma sahip nozullar imal edildikten sonra DPÜ Gaz Atomizasyon Ünitesinde nozul ölçümleri ve toz üretim deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu tasarımlar içinden bir nozul SANTEZ projesi kapsamında imal edilmiştir. Bu nozul ile dental amalgam tozu üretim deneyleri İnci Dental firması bünyesinde kurulan gaz atomizasyon ünitesinde gerçekleştirilmiştir. DPÜ Gaz atomizasyon ünitesinde üretilen saf kalay, gümüş amalgam, etial 141, AA 2014 ve AA 7075 alüminyum alaşım tozlarının özelliklerine bazı üretim parametrelerinin etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

Bu çalışmanın sonucunda teorik olarak gerçekleştirilen HAD sonuçları irdelenerek verimli nozul şartlarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Deneyler sonucunda üretilen tozların mikro yapısı ve toz şekli, toz tane büyüklüğü ve dağılımı tespit edilerek nozul performansı deneysel verilere dayalı olarak değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2

2. GAZ ATOMİZASYON

Gaz atomizasyon metal ergiyik ve atomizasyon gazının birbiri ile etkileşimini içeren iki akışkanlı atomizasyon işlemidir. Gaz atomizasyon işleminde, sıvı metal akışına yüksek enerjili atomizasyon gazının çarpması ile gazın kinetik enerjisinin sıvı metale aktarılması sonucunda damlacıkların oluşması ve sonrasında katılaşması ile metal tozları elde edilir. Bu yöntem, saf malzemeler ve özellikle alaşımlı malzeme tozlarının üretiminde yaygın olarak kullanılır. Atomizasyon bu sürecin en önemli aşamasıdır. Atomizasyonu, başlangıç şartları ve toz boyut dağılımı belirler.

Basıncılı akışkan olarak su veya gaz kullanılan atomizasyon türü genellikle iki akışlı atomizasyon olarak adlandırılır. İki akışlı gaz atomizasyonun gelişimi ilk zamanlarında yağlar, kimyasal solüsyonlar, merhemler, ayrıştırıcılar, sulu çimentolar ve jeller gibi çeşitli sıvıların kimyasal işleme endüstrisindeki atomizasyonu ile başlamıştır. Kurşun ve kalay gibi demir dışı metallerin hava ile atomizasyonu 1920'li yılların başlarında başlamıştır (Gummesson, 1972; Beddow, 1978). Bu atomizasyon işleminde, lehim pastasında kullanılan tozların üretimi için bir nozul geliştirilmişlerdir. Benzer teknik kullanılarak, patlayıcı üretiminde kullanılan çinko ve alüminyum tozları atomize edilmiştir. II. Dünya Savaşı sırasında Almanya'da R. Z. Mannesmann tarafından yeni bir gaz atomizasyon metodu icat edilmiş, demir ergiyiği hava ile atomize edilerek demir tozu üretilmiştir. 1960'da inert gaz atomizasyon yöntemi, uzay endüstrisi uygulamalarında kullanılan metal tozlarının elde edilmesinde kullanılmıştır. Son yıllarda gaz atomizasyon tekniği hızla gelişmektedir. Gaz atomizasyon hem metallere hem de metal olmayan malzemelere; askeri malzemelere, değerli madenlere, bakır, demir, alüminyum, magnezyum, kobalt ve bu metallerin alaşımlarına, süper alaşımlara, intermetalik bileşiklere ve seramikler (alümina) gibi farklı malzemelere uygulanmaktadır. (Lawley, 1992; Yule and Dunkley, 1994; Gummesson, 1972; Beddow, 1978; Klar, 1972; Klar, 1984; Howells, 1988; Reinshagen, 1989).

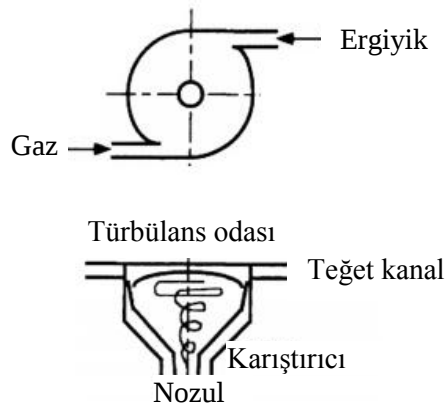
Azot, argon, helyum, hava veya iki gazın karışımı gibi farklı gazlar ergiyiğin atomizasyonu için kullanılır. Bu gazların sıvı metal demetini parçalamada kullanılması çok yönlü toz üretim tekniği sağlar. Azot ve hava gaz atomizasyonunda, azot ve argon

ise daha çok püskürtme şekillendirme işleminde yaygın olarak kullanılır. Asal gazlar düşük oksijen içermesi gereken uygulamalarda, süper alaşımlar ve titanyum gibi reaktif malzemelerin atomizasyonunda tercih edilir. Reaktif ergiyiklerde ergitme vakum altında gerçekleştirilir. Reaktif alaşımlarda ergiyik kirliliklerini en aza indirmek için argon gazı tercih edilir. Alternatif bir gaz da helyum gazıdır. Helyum gazı aynı zamanda soğuma hızını da artırır (Ünal,1995). Gaz karışımları düşük maliyet istenen toz üretiminde bir tercih sebebidir. Atomizasyonda kullanılan gaz ya geri dönüşür ya da atmosfere uçar. Atomizasyon kulesini veya tankını temizlemek için kullanılan gaz genelde atomizasyon gazı ile aynıdır. Kule genellikle paslanmaz çelikten imal edilir ve iç yüzeyi minimum toz kirlenmesi (tutunması) için parlatılır.

2.1. Atomizasyon Sistemleri

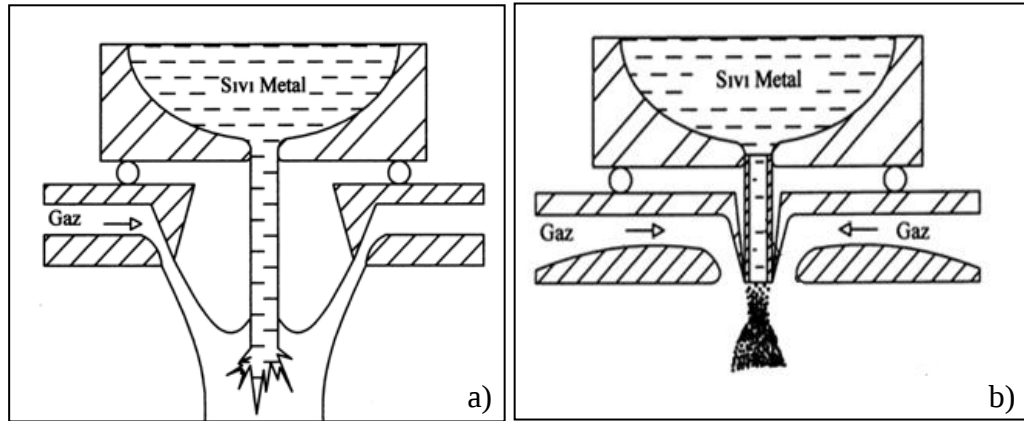
Nozul tasarımlarındaki farklılık ince toz verimini arttırmak ve toz boyut dağılımını kontrol için geliştirilmeye devam etmektedir. Ergiyik atomizasyonunda kullanılan gaz nozulları atomizasyon esnasında sıvı metal ile atomizasyon gazının birbiriyle etkileşimine göre iç karışım ve dış karışım olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılabilir.

İçten karışımlı atomizasyonda (örneğin santrifüj-pnömatik atomizasyon), sıvı metal ve gaz, jet nozul yüzeyine basınç altında girer (Şekil 2.1) (Sheikhaliev, 1996). İki akışkan dönerken karışır ve ivmelenir. Güçlü santrifüj kuvvetinden dolayı, sıvı metal gazın tesiri olmaksızın nozul çıkışında bir film tabakası oluşturur. Sıvı metal filmi uygulanan gaz ile nozul çıkışında ince toz tanelerine ayrışmasıyla atomizasyon gerçekleşir.



Şekil 2.1. Atomizasyonu için içten karışımlı nozulun şematik gösterimi (Liu, 2000).

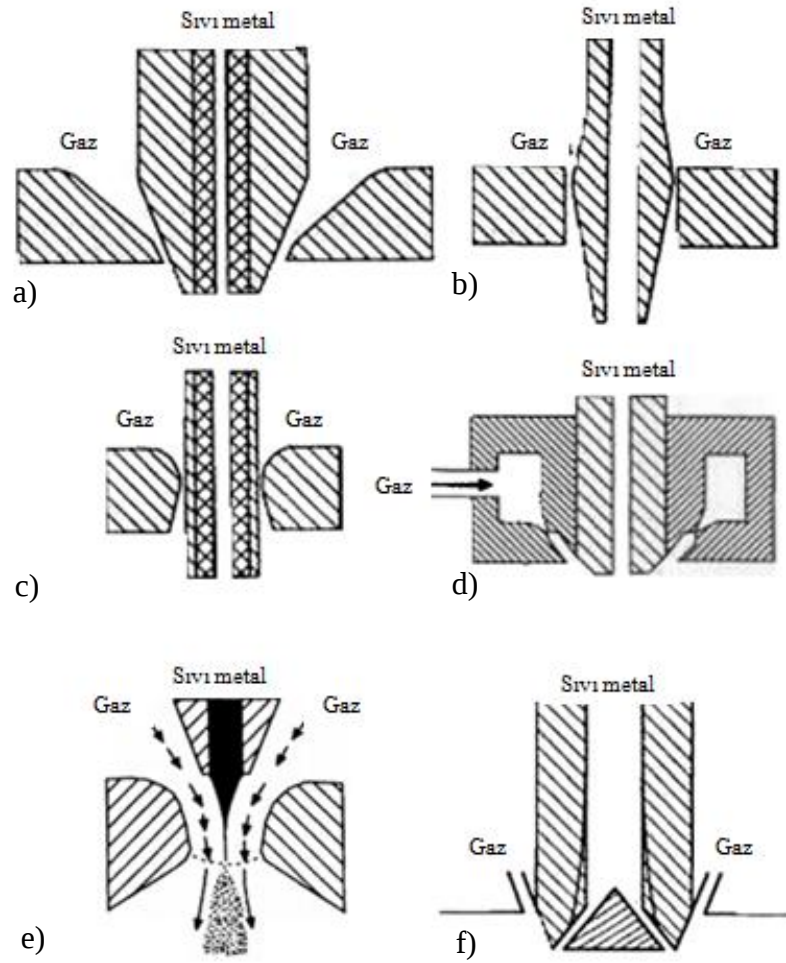
Dıştan karışimli atomizasyon ise, nozuldan çıkan sıvı metal akımının nozul dışında bir atomize gaz ile çarpıştırılması işlemidir. Farklı nozul tasarımları, çeşitli dizilimli veya çevre boyunca dairesel yarık veya ayrı orifislere sahip gaz jetlerinden meydana gelir. Bundan sonra dairesel yarık şeklindeki nozula, annüler-jet etkili nozul ve ayrı orifisli annüler nozula, ayrı-jet etkili nozul denilecektir. Sıvı metal ve gazın bir biriyle olan etkileşimi geometrik konum olarak adlandırılan nozulların konfigürasyonuna ve geometrisine göre dıştan karışmalı nozullar iki önemli tipe ayrılır. Bunlar serbest düşmeli (free fall) ve yakından eşlemelidir (closed-coupled). Serbest düşmeli nozulda (Şekil 2.2 a) sıvı metal ile gazın etkileşimi, gaz ile sıvı metal demeti potadan ayrıldıktan sonra gerçekleşir. Yakından eşlemeli nozulda (Şekil 2.2 b) ise bu etkileşim potanın tabanında metal akış borusunun ucunda gerçekleşir. Yakından eşlemeli nozul işçilik ve maliyetin artmasına rağmen nispeten yüksek atomizasyon verimi ve toz veriminden dolayı tercih edilirken, serbest düşmeli nozul geleneksel gaz atomizasyonuna uygunluğundan dolayı daha çok kullanılır. Nozulların her ikisi içinde gaz basıncına, nozul geometrisine ve konfigürasyonun uygunluğuna bağlı olarak gaz hızı sesaltı veya sesüstü hızlara ulaşabilir. Sesüstü yakından eşlemeli nozullar sesaltı nozullara göre daha yüksek verimli olup ince tozların elde edilmesinde verimli bir üretim metodu olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.2. Serbest düşmeli nozul (a) ve Yakından eşlemeli nozulun (b) şematik gösterimi (ASM, 1998).

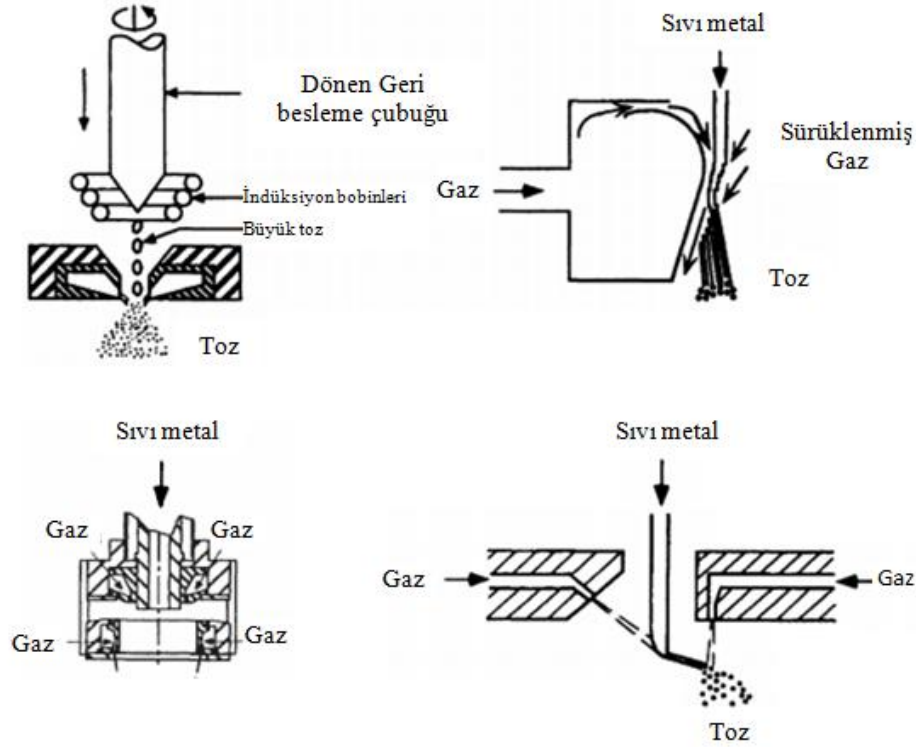
Yakından eşlemeli nozulların konfigürasyonu Şekil 2.3'te gösterildiği üzere yüksek basınçlı gaz nozul (HPGA) (Anderson, 1988; Ting, 1996), SIGMA (Ridder,

1992; Biancaniello, 1990), Ünal nozul (Ünal, 1992; Ünal, 1987; Ünal, 1989 a; Ünal, 1989 b; Ünal, 1989 c), tepesi kesilmiş tapa nozul (Mates, 1995) NANOVAL nozul (Schulz, 1996), halkalı tabaka atomizer ve ultrasonik gaz nozul (Liu, 1994; Zeng, 1992; Liu, 1993) gibi pek çok çeşitliliğe sahiptir.



Şekil 2.3. Yakından eşlemeli nozulların farklı tasarımları; a) HPGA, b) SIGMA, c) Ünal, d) USGA, e) NANOVAL f) Tepesi kesik tapa (Liu, 2000).

Serbest düşmeli nozul tasarımları farklı geometrik düzenlemeleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Serbest düşmeli atomizasyon sistemlerinde ilk tasarımlar aşağı doğru akan sıvı metale dik olarak çarpması için yatay olarak konumlandırılan tekli gaz jeti veya çoklu gaz jeti kullanılmıştır. Son tasarımlar ise çoklu ayrı-jet etkili nozul, annüler-jet etkili nozul gibi eş merkezli konik şeklinde daralan nozullardır.



Şekil 2.4. Serbest düşmeli nozulların farklı geometrik düzenlemeleri (Liu, 2000).

Atomize damlacıkların kuleden aşağı doğru soğuması ile toz elde edilir. Tüm tozların belirli sıcaklığın altına tamamen soğuması ve katılaşmasını sağlamak için, kulenin yeterli yükseklikte olması gerekir (2-10 m). Bu yüzden dikey gaz atomizasyon ünitesinin ev gibi yüksek yapılması gerekebilir. İlave çözüm olarak değerli madenlerin veya takım çeliklerinin gaz atomize tozları eldesi için sıvı azot veya su ile kulenin tabanı doldurulabilir. Gaz atomize tozun su ile temasından dolayı su atomizasyona benzer şekilde tozu kurutma işlemi gerekmektedir.

Pahalı inert gaz kullanımı (argon gibi), daha yüksek gaz hızı, toz boyutunda küçüklük, ince tozlarda daha yüksek verim sağladığı gibi üretim maliyetini artırır. Atomizasyon gazının maksimum enerjisinden yararlanmak ve gaz atomizasyonun maksimum verime ulaşmak için, gaz jetinin çekirdeğinde yüksek hızlı laminar akış olması istenir. Diğer bir ifade ile maksimum verim için sıvı metale maksimum hızda gazın yani nozuldan gazın sıvı metale ulaşması için gaz akışının minimum mesafede çarpması gerekir. Çünkü jet merkezinden akış yönündeki mesafenin artması ile gaz hızı ve kinetik enerji hızlı bir şekilde bozulur. Bundan dolayı yakından eşlemeli nozullar, serbest düşmeli nozullardan daha verimlidir ve içten karışımli atomizerlerde, yakından

eşlemeli nozullara göre daha verimlidirler. Genelde, içten karışimli atomizasyon dıştan karışimli atomizasyondan daha verimlidir. Örneğin Sheikhaliev and Dunkley tarafından geliştirilen sentrifüj-pnömatik nozul içten karışimli atomizasyon olarak adlandırılır (Sheikhaliev and Dunkley, 1996). Bu nozul ile daha düşük gaz debisi ve daha düşük gaz basınç değerlerinde yüksek verimli yakından eşlemeli gaz nozul ile benzer boyutta metal tozları üretilebilir. Bu sistem kalay, çinko, bakır-çinko, alüminyum ve magnezyumun atomizasyonu için kullanılabilir.

Gaz atomizasyonunda kontrol edilen değişkenler nozul geometri değişkenlerini ve pek çok işlem değişkenlerini içerir. Bu değişkenlerin listesi Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de parametre dizileri ve/veya tipik değerleri ile birlikte verilmiştir (Liu, 2000).

Çizelge 2.1. Gaz atomizasyonun geometrik değişkenleri (Liu, 2000).

	Parametreler	Değer/Aralık
Nozul Yapısı	Nozul Sayısı	1, 2, 4, 12, 16, 18, 20, 24 veya dairesel
	Nozul Çapı (mm)	0,25 - 0,5 - 0,7 - 0,8 - 1 - 3
	Gaz ile Metal Akışı Arasındaki Açık (°)	7 - 45 (Düşey) 90 (Yatay)
	Konfigürasyon	Dıştan Karışmalı: Yakından Eşlemeli: SIGMA HPGA USGA Ünal Tepesi kesik tapa (Truncated Plug) Annüler Serbest Düşmeli: Yatay Osprey Ultrasonik İçten Karışmalı: Santrifüj - Pnömatik
	Nozul Tipleri	Düz Daralan Daralan - Genişleyen (Laval) Şok Dalgalı (Ultrasonik)
Metal Akış Borusu	Çap (mm)	1 - 15
	Konfigürasyon	Daire kesitli sıvı demeti Halka şekilli tabaka

Çizelge 2.2. Metal tozu üretimi için gaz atomizasyon değişkenleri (Liu, 2000).

Değişkenler	Değerler
Sıvı metal sıcaklığı	Alaşım ergime sıcaklığının (75 – 150) °C üzeri (aşırı ısıtma)
Atomizasyon basıncı	0,5 – 9 MPa
Atomizasyon gazı	Hava, azot, argon ve helyum
Gaz akış debisi	1 – 50 m ³ /dk
Nozul çıkışında gaz hızı	50 – 150 m/s (1 – 3 Mach)
Sıvı metal debi	1 – 90 kg/dk
Ortalama parçacık boyutu	10 – 300 μ m

Gaz atomizasyonunda metal akış debisi normalde 1–70 kg/dk, metal akış çapı 2–15 mm arasında değişir. Düşük ergime sıcaklığına sahip metallerin akış debisi sürekli atomizasyon işlemi sırasında 8 ila 33 kg/dk aralığında değişmektedir. Geleneksel gaz atomizasyon işleminde, gaz basıncı 0,5 – 9 MPa, gaz akış debisi ise 0,02 – 0,24 m³/s aralığındadır. Yakından eşlemeli nozul tasarımları ile 18 MPa ve üzeri yüksek gaz basınçlarına kadar toz üretimi araştırılmıştır. Yüksek basınçlı gaz atomizasyon işlemi ile 10 μ m altı ortalama toz boyutuna sahip ince tozların üretilebildiği gözlenmiştir. Gaz hızı nozul geometrisi ve konfigürasyonuna bağlı olarak değişir. Metalin aşırı ısıtma miktarı normalde 75 – 150 °C arasındadır. Standart sapmanın 2 olması durumunda ortalama toz boyutu normalde 50 – 300 μ m aralığında değişir.

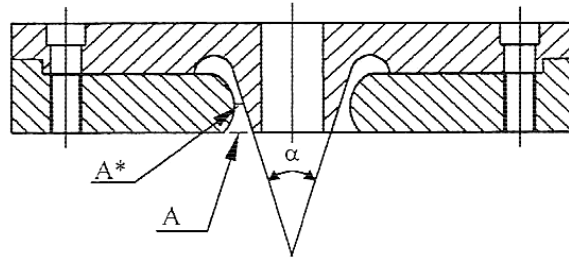
Nozul ile metal akış borusu arasındaki izafi açı gaz atomizasyonu etkileyen önemli bir etkidir. Metal akışı ile eşmerkezli annüler gaz nozulu için, aşırı yatık gaz jetleri (büyük çarpma açısı) geniş sprej konikliği ve metal akışına karşı geri basınç oluşumuna sebep olabilir. Aksine, aşırı dik gaz jetleri (küçük çarpma açılı) gaz akışının nozulda sıvı metale ulaşması için büyük bir mesafe gerektirebilir, türbülans oluşturarak ve gaz verimini düşürebilir. Çarpma açısı kullanılan gaza ve metale bağlı olarak 15° ila 80° arası değişebilir. Çizelge 2.3’de geleneksel atomizasyon tekniklerinin özelliklerinin kıyaslanması verilmiştir. Bu kıyaslamada ortalama toz boyutu, uygulanan metal/alaşımlar, soğuma hızları, dakikada elde edilen ürün miktarı (metal debisi), kapasite, üstünlükler ve sınırlamalar verilmiştir (Liu, 2000).

Çizelge 2.3. Geleneksel atomizasyon tekniklerinin özelliklerinin kıyaslanması (Lawley, 1994; Yule and Dunkley, 1994).

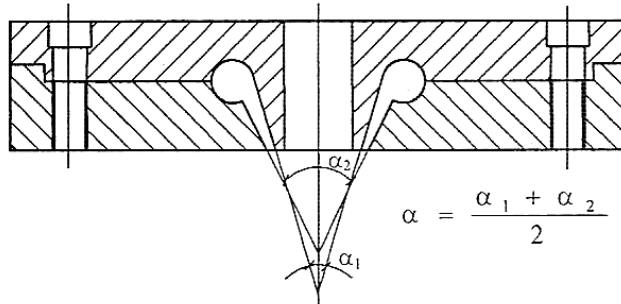
Yöntem	Toz Boyutu	Metal/Alaşım	Soğuma Hızı ($^{\circ}\text{C/s}$)	Metal debisi (kg/dk)	Kapasite (ton)	Üstünlükler	Sınırlamalar
Gaz Atomizasyon	50-300 μm yakından eşlemeli nozul ile yüksek gaz basıncında 10-50 μm standart sapma 1,9-2,5	Lehim malzemeleri, Değerli metaller, Cu, Fe, Al, Mg, Co, Ti, Zn, alaşımlar, yüksek hız çelikleri, intermetallikler	$10^3 - 10^5$	1-70	~6	Küresel & pürüzsüz partikül, temiz, Hızlı katılaşmış yapı, kabul edilebilir üretim miktarı	Yüksek maliyet, düşük hacim, enerji verimliliği düşük, gözenekli tane oluşumu
Ultrasonik gaz atomizasyon	<30 μm	Düşük ergimeye sahip alaşımlar, Fe, Paslanmaz çelik, Ni, Co alaşımları, karbonlu çelikler	$10^4 - 10^6$	2,4-15	Çelik için ~2,4 Al için ~0,45	İnce pürüzsüz taneler, yüksek gaz verimi	Yüksek maliyet
Su atomizasyon	~100 μm standart sapma: 1,7-2,4	Fe, Cu, Cu alaşımlar, Paslanmaz çelik, takım çelikleri, Ni alaşımlılar, değerli metaller	$10^4 - 10^6$	≤ 400	15-60 çelik & demir, 0,5-5 paslanmaz çelik & Cu alaşımlar	Yüksek hacim, düşük maliyet	Toz saflığı ve şekli, düşük enerji verimliliği
Yağ Atomizasyon	50-70 μm	Yüksek hız çelikleri	$10^3 - 10^5$	>125	~3	Düşük oksijen içermesi	Şekil, topaklanma, orta enerji verimi
Vakum atomizasyon	40-70 μm	Ni, Co süperalaşımlar, Al, Cu, Fe alaşımlar	$\sim 10^2$	5-100	~0,9	Küresel, pürüzsüz, temiz partikül	Kontrolü zor, enerji verimi orta
Döner elektrot Atomizasyon	~20 μm standart sapma: 1,3-1,5	Fe, Cu, Al, Zn, Co-Cr, Ti, Zr, Ni alaşımları, Düşük Karbonlu çelikler	$\leq 10^2$	1-10	~0,04	Küresel, çok pürüzsüz partikül, ultra temiz, enerji verimi iyi	Yüksek maliyet, düşük kapasite ve hacim, kaba taneler

Gaz atomizasyon için farklı tip nozullar geliştirilmiştir. Bunlar düz, daralan, daralan genişleyen ve ultrasonik nozullardır. Daralan ve daralan-genişleyen nozullar yüksek gaz basıncında çalışan sesüstü gaz atomizasyonunda, düz nozul ise sesaltı gaz atomizasyonunda kullanılır (Lawley, 1992). Daralan-genişleyen tasarım Laval nozulu olarak bilinir (Şekil 2.5 a). Gaz çıkışı, eş merkezli halka biçiminde olan daralan tasarıma sahip nozullar ise Mannesmann nozulu olarak adlandırılır (Şekil 2.5 b).

Yüksek yüzey gerilmesine sahip sıvı metallerin atomizasyonlarında genellikle daralan genişleyen geometrili nozullar kullanılır. Daralan geometriye sahip nozullar ile oldukça yüksek basınç değerlerinde sesüstü hızlara ulaşılırken, daralan genişleyen geometriye sahip nozullarda ise daha düşük atomizasyon basınçlarında sesüstü hızlara ulaşmak mümkündür.



a) Laval tipi nozul



b) Mannesman tipi nozul

Şekil 2.5. Nozul geometrisi tipleri: a) Laval tipi nozul (Uslan, 1999), b) Mannesmann tipi nozul (Ünal, 1995).

Yüksek verimli atomizasyon işlemi için yapılması gereken en önemli aşama uygun şartlarda çalışabilecek bir nozul tasarımının yapılmasıdır. Bunun için nozul performansının araştırılması gerekir. Nozul performansının incelenmesi için nozula

sadece gazın gönderilmesi sonucu oluşan gaz akış bölgeleri incelenir (Mates and Settles, 1995)

Gaz atomizasyonunun en önemli özelliği temiz ve küresel toz üretmesidir. Spreyde türbülanslı iki fazlı akışta tozlar arasında çarpışmadan dolayı kaba tanecikler üzerinde uydulaşma görülür. Bu durum toz paketleme ve akış özelliklerini olumsuz etkiler. İkinci önemli problem gaz atomizasyonunda karşılaşılan atomizasyon gazının toz içerisinde hapsolması ve çözünmesidir.

2.2. Gaz Akış Modelleri

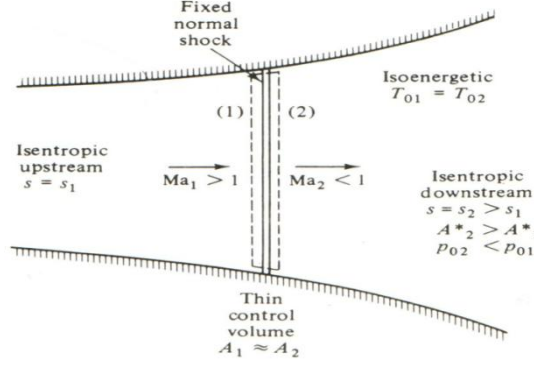
Atomizasyon işlemi sırasında sıvı metal akış borusu ucundaki basınç ölçümü oldukça zordur. Genellikle iki akışkanlı (sıvı metal + gaz) sistemin incelenmesi karmaşık olduğu için yapılan araştırmalarda sadece gazın olduğu akış bölgeleri incelenmektedir. Atomizasyon nozullarında gaz; hızın maksimum olduğu bölgede tamamen genişerek sıvı metal ile temas eder (Straus, 1999). Atomizasyon işleminde genişleme her zaman nozul çıkışında gerçekleşir. Genleşmenin etkisiyle gaz hızı sesüstü hıza ulaşır. Genleşme sonucu olarak gaz jeti basıncı ortam basınç değerine düşer. Bu türde bir genişleme Denklem 2.1'deki gibi ifade edilmektedir;

$$\frac{P_2}{P_a} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2 \right)^{(-\gamma / (\gamma - 1))} \quad 2.1$$

Burada P_2 genişleme basınç değerini, P_a atomizasyon basıncını, M_2 genişmiş gazın Mach sayısını ve γ gazın özgül ısı oranını belirtmektedir (Cui, 2002).

2.2.1. İdeal gazlarda şok dalgaları

Hem sesaltı hem sesüstü bölgeler içeren bir akışta bu bölgeleri ayıran akış çizgileri oluşur. Bunlara şok dalgaları denir. Normal şok dalgaları akışa dik yönde oluşur. Bu konuda araştırmalar yapan Fanno ve Rayleigh, h-s diyagramında normal şok dalgalarını göstermişlerdir. Buna göre, sadece ilk durumda sesüstü hıza sahip akışkanlar ($Ma > 1$) şok dalgası oluşturabilir. Şekil 2.6'da bir şok dalgasının oluşumu ve iki tarafındaki özellikler gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Bir normal şok dalgası. Sol tarafta $Ma > 1$ iken dalgadan sonra $Ma < 1$ (White, 1988).

Sesüstü hızla normal şok dalgasına giren akışkan bu çizgiden sonra sesaltı hızla hareket etmeye başlar. Bir ideal gaz için termodinamiğin birinci yasası yazılırsa ve şok dalgasının her iki tarafında (sesaltı ve sesüstü bölgeler) geçerli olduğu görülürse:

$$(T_0)_1 = T_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma_1^2 \right) = (T_0)_2 \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma_2^2 \right) \quad 2.2$$

Denklem 2.2 elde edilir. Terimler düzenlenirse Denklem 2.3'teki gibi:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + [(k-1)/2] Ma_1^2}{1 + [(k-1)/2] Ma_2^2} \quad 2.3$$

olduğu görülür. Şok dalgalarının iki tarafındaki basınç Denklem 2.4 ile hesaplanır:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{Ma_1}{Ma_2} \frac{\left\{ 1 + [(k-1)/2] Ma_1^2 \right\}^{1/2}}{\left\{ 1 + [(k-1)/2] Ma_2^2 \right\}^{1/2}} \quad 2.4$$

eğik (Oblique) şok dalgaları ise akışa dik olmayan dalgalardır. Şok dalgasına V_1 hızıyla gelen akışkanın hız bileşenlerinden V_{1t} şok dalgasından etkilenmez ancak V_{1n} için normal şok dalgası gibi olduğundan V_{1n} azalır. Dolayısıyla akışkan şok dalgasını geçtikten sonra yatayla β kırılma açısı yaparak yoluna devam eder. Eğik şok dalgalarından geçen akışkanlar daima dalgaya yaklaşacak şekilde kırılırlar. Ancak bazı çok zayıf şok dalgalarından sonra da akışkan sesüstü hıza sahip olabilir. Nozulun ıraksayan kısmında gazın akışı Prandtl ve Meyer genişlemesi ile açıklanmaktadır. Açılı

bir yüzeyde gazın akışında genleşme açısını (ν) veren Denklem 2.5 kullanılarak analiz yapılmıştır.

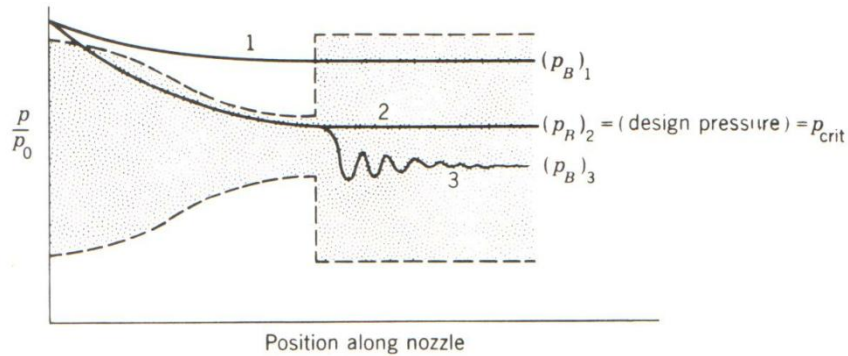
$$\nu = \kappa \tan^{-1} \left(\frac{\cot \alpha}{\kappa} \right) - (90^\circ - \alpha) \quad 2.5$$

Burada, Mach açısı α 'dır: $\alpha = \sin^{-1} \frac{1}{Ma}$ ve $\kappa^2 = \frac{\gamma+1}{\gamma-1}$

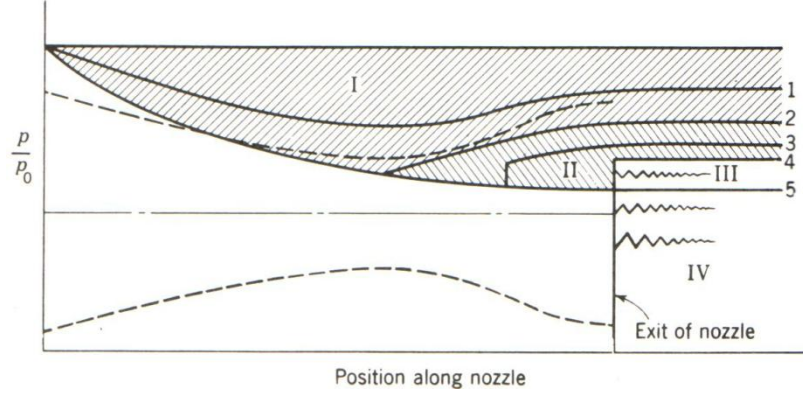
Nozulların tasarım ve çalışma şartları arasındaki farklılıkların etkilerini görmek için Şekil 2.6'da verilen bir nozul ve boğazdan sonra oldukça geniş bir tank düşünülebilir. Nozula giriş basıncı P_0 olmak üzere, geri basınç olarak adlandırılan geniş tank basıncı P_T , P_0 'dan küçük bir miktar daha az olarak ayarlanır. Bu durumda nozul içindeki $\frac{P}{P_0}$ oranı Şekil 2.7'de görülen 1 yolunu izler. P_T basıncı düşürüldükçe akışın

Mach sayısı artar ve bu artış $Ma = 1$ olana kadar devam eder. Şekil 2.7'deki 2 yolu bu durumu ifade eder. Bundan sonra P_T basıncı ne kadar düşürülse de nozul içindeki akış değişmez ancak tank içinde basınç farkından kaynaklanan dalgalı bir akış olur (3 nolu yol). Buradan çıkarılan sonuç, nozulda akış ve boğaz koşullarını sınırlayan parametrelerin durgun bölge özellikleri olduğudur. $Ma = 1$ 'de azami debi söz konusudur ve durgun bölge özellikleri değiştirilmeden bu debi artırılmaz.

Bundan sonra bir Laval nozul aynı şartlarda incelenirse Şekil 2.8'de görüldüğü gibi yüksek bir tank basıncı, sesaltı bir hıza izin verecektir ve akış 1 yolunu izleyecektir. Basınç düşürüldükçe boğazda sonik koşullar elde edilecek ve boğazdan sonra hız tekrar azalacak, sesaltı olacaktır (2 nolu yol). Bu 2 yolu tamamen sesaltı akışın sınır bölgesidir.



Şekil 2.7. Ani genişlemeye açılan nozul boyunca akış (Ünal, 2008).



Şekil 2.8. Düşük basınçlı geniş bölgeye açılan nozul boyunca akış (Ünal, 2008).

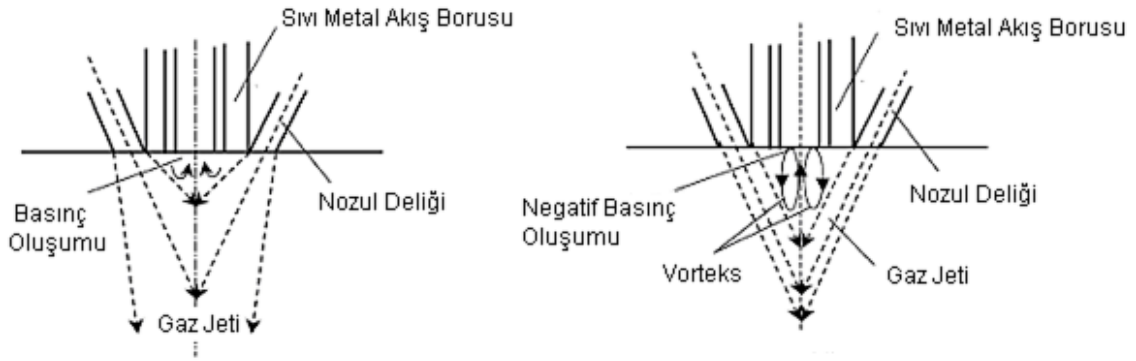
Dolayısıyla basıncın daha fazla düşürülmesi, nozulun yakınsak kısmında bir akış değişikliğine yol açmayacak ancak yayıcı kısmında sesüstü hızlar elde edilecektir. Örneğin 3 nolu yolda yayıcı tarafında basınç daha da düşürülmüştür. Buna bağlı olarak boğazı geçtikten sonra keskin bir normal şok dalgası tesiriyle hız sesüstü seviyelere ulaşacaktır. Çıkış bölgesindeki basıncın daha da düşürülmesi ise şok dalgalarını nozul dışına taşır. Dolayısıyla tasarım şartlarında nozulun ayarlanması gereken çıkış basıncı, nozulun çalışacağı şartlardaki çıkış basıncı olmalıdır. Aksi takdirde nozul gereğinden kısa veya uzun durumuna gelmiş olacaktır ve aşırı genleşme veya yetersiz genleşme sonucunu verecektir. Bu nedenle roket veya jet uçağı tasarımlarında, bu araçlar çok değişken şartlarda kullanılacağı için değişken boğazlı nozul tasarlanır. Bu ise bilgisayar destekli çözümlemeleri gerektirir (Ünal, 2008).

2.2.2. Negatif basınç oluşumu

Sıvı metal akış borusu ucunda oluşan gaz akışı ve negatif basınç oluşumu gaz dinamiğine bağlıdır. Gaz atomizasyonu işlemi esnasında sıvı metal akış borusunun ucundaki gaz basıncı atomizasyon değişkenlerinin durumuna göre pozitif veya negatif olabilir (Şekil 2.9). Negatif basınç oluşumu sonucunda sıvı metal potadan metal akış borusuna doğru çekilir. Pozitif basınç oluşumu sonucu metal akışı gerçekleşmediği gibi pota içinde püskürme oluşabilir. Bu yüzden negatif basınç oluşumu istenen bir durumdur (Cui, 2002). Metal akış borusu ucunda oluşan negatif basınç, sıvı metale etki eden dolaşım bölgesindeki gaz akış kuvvetlerinin toplamıdır (Ting and Anderson 2004). Atomizasyon işleminde gaz akışı nozul geometrisine bağlıdır. Yapılan araştırmalarda,

daralan genişleyen geometrili nozulların, daralan geometrili nozullara göre daha kuvvetli negatif basınç oluşumu gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir (Cui, 2002).

Negatif basınç oluşumuna etki eden en önemli faktörlerden biri metal akış borusunun nozul gaz çıkışına göre konumudur. Genel olarak metal akış borusu çıkıntı mesafesinin artması sonucu daha etkili negatif basınç oluşumu gerçekleşir fakat borunun uzaması sıvı metalin donması problemini beraberinde getirir. Le and Henein (1996), yaptıkları araştırmalarda, metal akış borusunun nozul çıkışının 10 mm altında olduğu konumda maksimum negatif basıncın oluştuğunu tespit etmişlerdir (Le and Henein, 1996).



Şekil 2.9. Metal akış borusu çıkışında basınç oluşumu (Ting and Anderson, 2004).

Negatif basınç ölçümleri atomizasyon işleminin verimliliğinin araştırılması açısından oldukça önemlidir. Yüksek basınçlı gaz atomizasyonunda negatif basınç bölgesi, metal akış borusu ucundaki sıvı metal beslemesini kontrol eder. Negatif basınç oluşumu daha dengeli bir sıvı metal beslemesi sağlar ve böylelikle toz boyut dağılımı daha kolay kontrol edilir (Ting and Anderson, 2004).

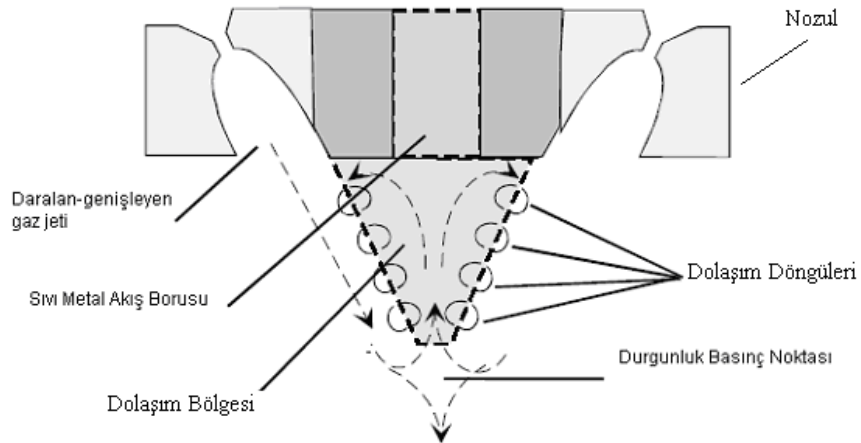
James et al. (1993), yaptıkları çalışmada atomizasyonda kullanılan gazdan daha fazla miktarda fan ile emiş yaparak kule içinde bir miktar vakum oluşturmuşlardır. Yakından eşlemeli nozul ile atomizasyonda, atomizasyon gazının sıvı metal akış borusu ucunda meydana getirdiği basınç önemlidir. Emme basıncı (negatif basınç) oluşursa daha küçük toz üretilmesine katkıda bulunur (Baram, 1988; Biancianiello et al., 1990). İtme basıncı (pozitif basınç) oluşursa metal akışını engelleyerek atomizasyonu durdurur.

2.2.3. Geçiş bölgesinin gaz atomizasyonuna etkisi

Yüksek basınçlı gaz atomizasyon nozulları belli bir basınç değerinde kapalı geçiş bölgesi denilen ve atomizasyon işlemini etkileyen geniş bir gaz genişleme bölgesi oluşturur (Mates, 1995). Geçiş bölgesinin kapandığı basınç değerlerinin bulunması oldukça önemlidir. Bu basınç değerinin üzerinde gerçekleşen atomizasyon işlemlerinde bu değer altında gerçekleşen atomizasyon işlemlerine göre daha küçük toz boyutu ortalaması ve daha dar bir toz dağılımı elde edilmiştir. Metal akış borusu çıkıntı mesafesinin daha kısa olduğu durumlarda geçiş bölgesinin daha düşük basınçlarda kapandığı gözlemlenmiştir (Ting et al., 2002).

Geçiş bölgesinin kapanması olayı ve sıvı metal atomizasyonunda fark edilir damlacık incelmesinin ifade edilebilmesi için gaz dolaşım bölgesinin ve etrafını çevreleyen gaz akışının modellenmesi gerekir. Kontrol hacmi yaklaşımına göre gaz, geçiş bölgesine durgunluk noktasından girer ve metal akış borusunun dairesel çevresinden çıkar. Durgunluk noktasındaki atomizasyon gazının radyal hız bileşeni nozul açısına bağlıdır ve durgunluk basıncını kuvvetli bir şekilde etkiler. Yüksek radyal hız bileşeni daha yüksek durgunluk basıncına sebep olur (Ting et al., 2002).

Gaz dolaşım bölgesi, atomizasyon gazı tarafından metal akış borusu ucunda oluşur. Dolaşım bölgesinde gaz, durgunluk noktasından metal akış borusuna doğru, merkez akış çizgisine paralel olarak akar ve metal akış borusuna ulaştığında radyal olarak ivmelenerek borunun dış yüzeyine doğru hareket eder (Şekil 2.10) (Ting et al., 2002; Ünal, 2006).

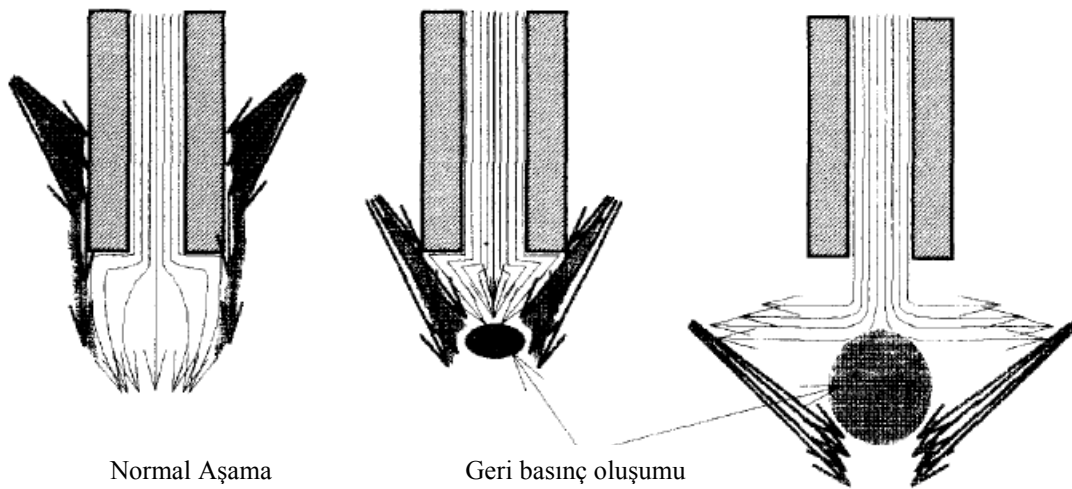


Şekil 2.10. Sesüstü jet etkili nozulda dolaşım bölgesinin şematik gösterimi (Ting et al., 2002).

2.2.4. Geri basınç oluşumu

Atomizasyon işlemi esnasında akış borusunun ucunda oluşan basınç değerinin pozitif olması durumunda sıvı metal akışı yavaşlar hatta bazı durumlarda durur ya da ters yönde akış özelliği gösterir. Bu basınç değerinin atmosfer basıncından büyük olması durumunda gaz, akış borusu içerisine girer ve bu durum genellikle metalin katılaşmasına sebep olur. Bu duruma ters akış durumu denir.

Chen et al. (1998) yaptıkları araştırmalarda metal akış borusu çıkıntı mesafesinin değişmesi ile birlikte atomizasyon işleminde 3 farklı aşamanın gerçekleşebileceğini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.11). Metal akış borusu, nozul gaz çıkışının alt bölgelerinde yerleştirilmesi sonucu gaz boru çeperlerine çarpar ve bu çeperler boyunca hareket ederek sıvı metal ile buluşur. Bu aşamaya normal aşama denir. Metal akış borusu çıkıntı mesafesi azaldıkça atomizasyon hızı azalır ve sıfır olur. Bu aşama geri basınç oluşumu aşamasıdır. Bu aşamada gaz jetleri metal akış borusunun uç çevresinde buluşurlar ve sıvı metalin akmasına izin vermezler. Geri basınç oluşumu atomizasyon gaz basıncına, nozul geometrisine ve metal akış borusu çıkıntı mesafesine bağlıdır. Metal akış borusu çıkıntı mesafesinin daha da azalmasıyla birlikte gaz jetlerinin buluşma noktası bir miktar aşağı yönde kayar. Bu aşamada da geri basınç bölgesi mevcuttur fakat metal akış borusunun hemen ucunda değil belli bir miktar alt bölgededir (Chen et al., 1998).



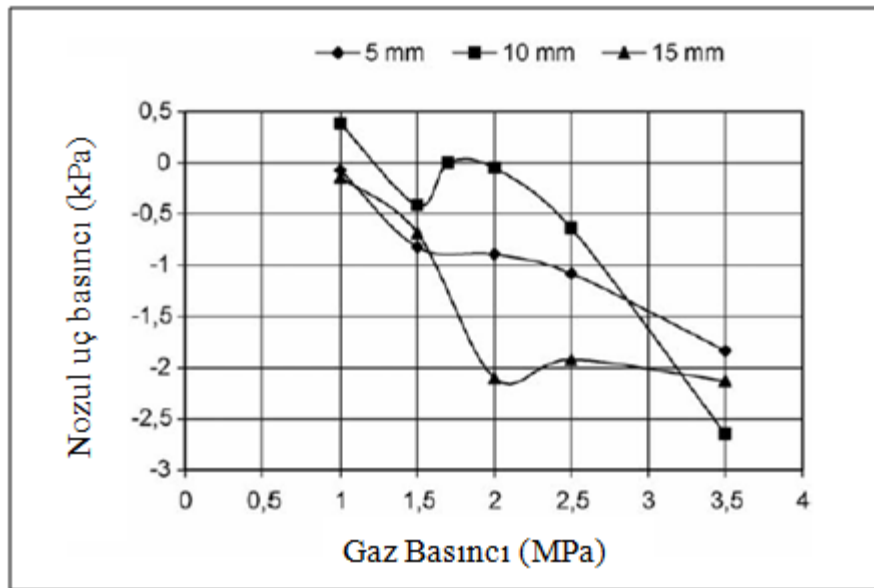
Şekil 2.11. Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi (Chen et al., 1998).

Ünal (2007), Dumlupınar gaz atomizasyon ünitesinde yapmış olduğu çalışmada tasarlamış olduğu yakından eşlemeli sesüstü nozul sistemini kullanarak kalay tozu üretimini gerçekleştirmiş ve 5 mm, 10 mm, 15 mm çıkıntı uzunlukları için sıvı metal akış borusu ucunda meydana gelen basınç değişimlerini araştırmıştır. Bu çalışmada atomizasyon gazı olarak azot kullanılmış ve 1–3,5 MPa arası basınçlarda, 3 mm iç çapa sahip sıvı metal akış borusu kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre;

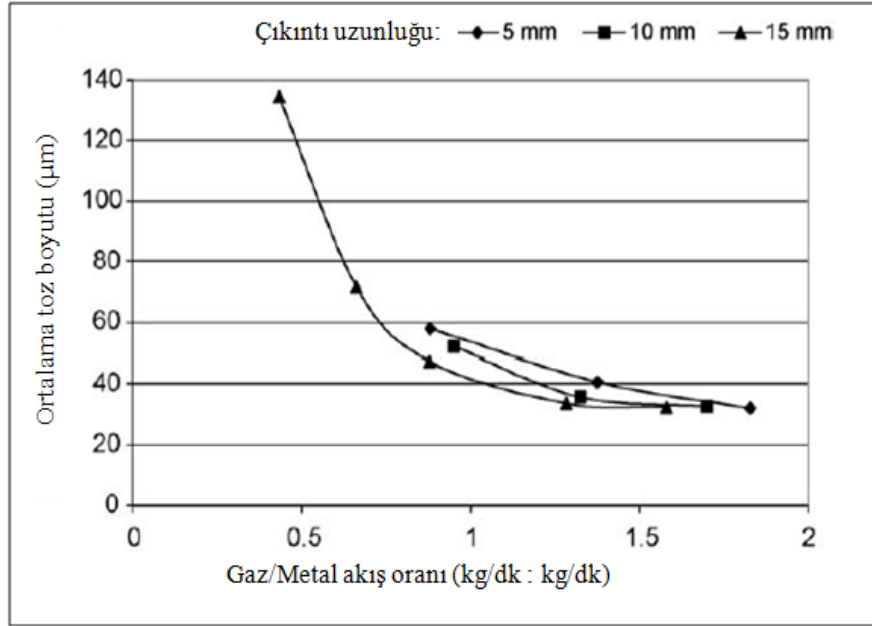
a) 5 ve 15 mm çıkıntı uzunluğunda ve 1–3,5 MPa gaz basınç aralığında sıvı metal akış borusu ucunda daima negatif bir basınç olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 10 mm çıkıntı uzunluğunda ve 1-2 MPa arası basınçlarda sıvı metal akış borusu uç basıncının negatif ve pozitif değerler arasında sürekli değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır (Şekil 2.12).

b) Atomizasyon işlemi 15 mm çıkıntı uzunluğu için, 5 mm ve 10 mm çıkıntı uzunluklarına göre daha durgundur. Bunun nedeni, 15 mm çıkıntı uzunluğunda sıvı metal akış borusu ucunda daima negatif basıncın oluşmasıdır.

c) Atomizasyon gazı basıncı arttıkça, ergimiş kütle akış hızı azalmaktadır. Bundan dolayı gaz/metal debisi oranı aynı çıkıntı uzunluklarında artmaktadır ve bu orandaki artış daha ince tozların üretilmesini sağlamaktadır (Şekil 2.13). Ayrıca gaz jetleri sesüstü hızlara ulaşmıştır (Ünal, 2007).



Şekil 2.12. Gaz basıncına göre nozul uç basınç değişimi (Ünal, 2007).

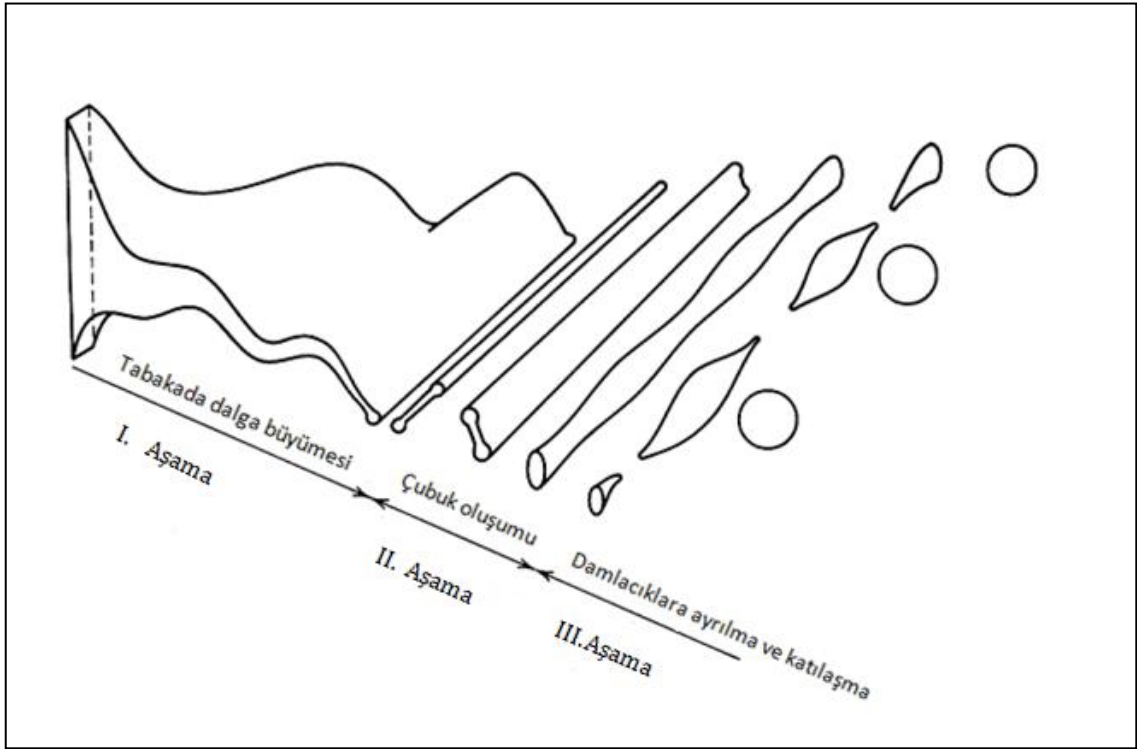


Şekil 2.13. Gaz/metal akış oranının toz boyutuna etkisi (Ünal, 2007).

2.2.5. Gaz atomizasyon mekanizmaları

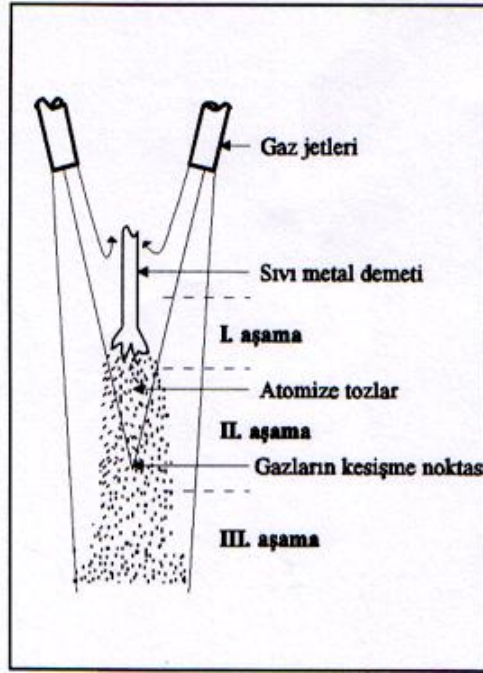
Atomizasyon mekanizmaları damlacık oluşumu yönünden tam olarak bilinmemektedir. Fakat genel olarak kabul gören iki değişik atomizasyon mekanizması vardır. İlki Dombrowski and Johns (1963) tarafından ileri sürülen mekanizmadır. Şekil 2.14'te yassı tabakadan damlacık oluşumu için bir fiziksel model geliştirilmiştir. Burada önce, tabaka üzerinde kritik bir genliğe ulaşana kadar dalgalar büyür, sonra dalğanın tepe ve dip bölgelerinde yırtılmalar oluşur ve yarım dalga boyuna karşılık gelen kısımlardan kırılır. Kırılan bu kısımlar yüzey gerilmesinin etkisiyle karasız çubuk haline gelerek damlacıkları oluşturur. Bu mekanizmanın fiziksel modeli üç aşamadan meydana gelir.

1. Birinci Aşama: Sıvıdan tabakaların oluşması
2. İkinci Aşama: Tabakalardan çubuk oluşması
3. Üçüncü Aşama: Çubuklardan damlacık oluşumu ve katılaşma (Ünal, 1995; Beddow, 1978; Ando, 1998).



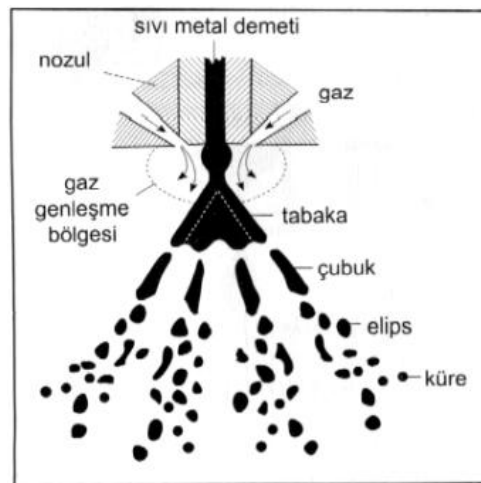
Şekil 2.14. Sıvı tabakasının bölünmesi ile damlacık oluşumu (Dobrowski and Johns, 1963).

İkinci mekanizma See and Johnston (1978) tarafından önerilmiştir (Şekil 2.15). Dairesel olarak yerleştirilmiş gaz jetleriyle yapılan atomizasyon sırasında, gaz jetlerinin birbirleriyle etkileşimi negatif yönde basınç eğilimini ortaya çıkarır. Bu negatif yöndeki basınç, jetlerin kesişme noktasının üzerinde sıvı metalin içi boş koni şekline dönüşmesine sebep olur. Sıvı metal yerçekiminin etkisi altında aşağıya doğru iner ve gaz hızının yüksek olduğu bölgeye girerken, viskoz ve yüzey gerilmesi kuvvetlerinin malzemeyi bir arada tutmasının sona ermesine kadar koni yanlamasına yayılır. Bu aşamada damlacıklar ana metalden düzensiz olarak ayrılır. Bir koni parçalandıktan sonra yeni bir koni oluşur ve bu olay tekrarlanır. Gaz jetleriyle temas halindeki sıvı metalin yüzey alanını belirleyen başlangıç genişlemesi atomizasyonda önemli bir basamaktır (See and Johnston, 1978).



Şekil 2.15. Gaz atomizasyonunda mevcut üç aşamanın şematik gösterimi, See modeli (See and Johnston, 1978).

See and Johnston tarafından yukarıda açıklanan gaz atomizasyonu ile metal tozu oluşum modelinin aşamaları, German (2007) tarafından daha açık bir şekilde gösterilmiştir (Şekil 2.16). Gaz genişleme bölgesindeki emme basıncı sebebiyle ergiyiğin, önce içi boş ince bir konik tabaka şeklini, daha sonra da çubuk, elipsoid ve küre şeklini aldığı görülmektedir.



Şekil 2.16. See modelinin German tarafından farklı gösterimi (German, 2007).

2.3. Damlacık Oluşumu

Damlacık oluşumu; atalet, yüzey gerilimi ve viskozite kuvvetlerinin karmaşık bir etkileşimidir. Bir damlanın sıvı akımından kopması yıllardır incelenmesine rağmen halen tam olarak açıklanamamıştır. İsteğe uygun damlacık (Droplet-on Demand, DoD), mürekkep püskürtmeli yazıcılarda ve mikro-ölçekli cihazlarda DNA analizi gibi çok farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. DoD, son derece üniform damlacık boyutları, kontrol edilebilir hızlar ve yörüngelerin yanı sıra yüksek ardışık damlacık oluşum hızı gerektirir. Örneğin mürekkep püskürtmeli yazıcılarda tipik damlacık boyutları 20 ile 50 mikron arasında (çıplak gözle zor görülebilir), hızı 10 m/s mertebelerinde ve damlacık oluşum hızı saniyede 20000'den fazla olabilmektedir.

Damlacık oluşturma yöntemi, bir sıvı akımını ivmelendirmeyi ve ardından yüzey geriliminin akımda bir kararsızlık meydana getirmesini sağlayarak sıvıyı damlacıklara ayırmayı esas alır. 1789 yılında Lord Rayleigh, bu parçalanma ile ilişkili kararsızlık için klasik bir teori geliştirmiştir. Bu teori damlacık parçalanması şartlarını anlamada bugün de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir sıvı akımının yüzeyinde meydana gelen küçük bir titreşim, akım boyunca dalgalı bir desen meydana getirir. Bu dalgalı desen, akımın damlacıklara ayrılmasına yol açar. Oluşan damlacıkların boyutları akımın yarıçapı ve sıvının yüzey gerilimi tarafından tayin edilir. Ancak çoğu DoD sistemi, akımın bir lüle girişinde basınç dalgası şeklinde zamana-bağlı zorlayıcı fonksiyonlarla ivmelendirilmesine bağlıdır. Eğer basınç dalgası çok hızlıysa, çeperlerdeki viskoz etkiler önemsizdir (Liu, 2000).

Bir lüleden çıkan akış yüzeyinin şekli, basınç genliği ve titreşim zaman ölçeğine bağlıdır. Basınç yeterince yüksek ve darbe yeterince hızlı olduğunda yüzey dalgalanır ve en sonunda damlacıklara ayrılacak olan bir jet akımı meydana getirir. Saniyede binlercesi meydana gelirken bu damlacıkların boyutunun ve hızının nasıl kontrol edileceği güncel bir araştırma konusudur. Damlacık özellikleri damlacık üretiminde önemli bir etkiye sahiptir. Damlacık üretim sürecinde konunun temelini, prensiplerini ve mekanizmalarının iyi anlaşılması, damlacık özelliklerinin kontrolü ve damlacık üretim veriminin geliştirilebilmesi için gereklidir.

Ortamdaki havanın etkisi altında damlacık oluşumunu ve yüksek hızlı jet parçalanmayı hesaplamak için pek çok araştırmacı tarafından Weber teorisi kullanılmıştır (Tanasawa and Toyoda, 1955; Miesse, 1955; Reitz, 1978). İşlem

şartlarının değişmesi gibi jet parçalanmaya neden olan baskın kuvvetleri tanımlamak ve jetlerin görünümündeki farklılıkları yansıtmak için parçalanma türleri oluşturulmuş ve farklı jet parçalanma mekanizmaları geliştirilmiştir (Tanasawa and Toyoda, 1955; Faragó, 1992; Miesse, 1955; Reitz, 1978; Reitz, 1987).

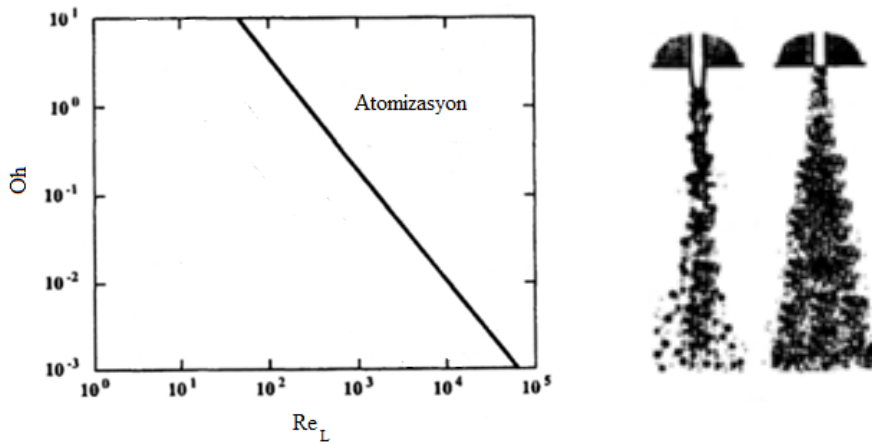
Durgun havada dairesel orifisli tek bir nozul boyunca sıvının kararlı enjeksiyonu için jet parçalanma mekanizmaları; ataletin izafi önemi, yüzey gerilmesi, viskoz kuvvetler ve aerodinamik kuvvetlerin etkisine göre dört tür parçalanma rejimine sınıflandırılır (Tanasawa and Toyoda, 1955; Miesse, 1955; Reitz, 1978). Şekil 2.17’de atomizasyon için durgun havada sıvı jetin parçalanma türü gösterilmektedir. Sınıflandırma için en yaygın kriter bilgi Ohnesorge tarafından önerilmiştir. Her bir rejim Re_L Reynold sayısı Denklem 2.6 ve Z (Ohnesorge sayısı) boyutsuz sayı Denklem 2.7 ile karakterize edilmiştir.

$$Re_L = \frac{\rho_L U_L d_0}{\mu_L} \quad 2.6$$

$$Z = Oh = We_L^{0.5} Re_L^{-1} = \frac{\mu_L}{(\rho_L \sigma d_0)^{0.5}} \quad 2.7$$

$$We_L = \frac{U_L^2 \rho_L d_0}{\sigma} \quad 2.8$$

U_L nozul çıkışındaki sıvının hızı, We_L Weber sayısı, Z Ohnesorge sayısı (Oh) (aynı zamanda durgunluk sayısı olarak da adlandırılır); Ohnesorge sayısı, yüzey gerilim kuvvetlerinin iç viskoz kuvvetlere oranını ifade eder. Ohnesorge sayısı, viskoz kuvvetlerin yüzey gerilimi kuvvetlerinin yanında önemli olup olmadığını tayin eder. Oh sayısı jet hızına, nozul çapına ve sıvı metalin ve gazın özelliklerine bağlıdır.



Şekil 2.17. Atomizasyon işleminde durgun havada sıvı jeti altında parçalanma rejimi.

2.3.1. İkincil atomizasyon

İkincil atomizasyon (ikinci parçalanma veya ikinci ayrışma), çevre ortamı (sürekli faz) ile damlacık (dağınık faz) arasındaki etkileşim sonucu damlacığın daha küçük parçacıklara bölünmesi sürecidir. Bu hareket sırasında damlacık, üzerindeki aerodinamik kuvvetlerin etkisi ile deformasyona uğrayabilir ve belirli şartlar altında içsel kohesif kuvvetlerin aşılması ile damlacık küçük taneciklere parçalanır. Atomizasyonda son tanecik boyut dağılımı, hem birincil (ön), hem de ikincil parçalanma sonrasında elde edilir. Aerodinamik kuvvetlerin etkisi altında tek bir damlacığın ikincil parçalanması için farklı mekanizmalar geliştirilmiştir.

Atomizasyonla üretilen bir damlacık kararsız olabilir ve damlacık yüzeyinin herhangi bir noktasında viskozite ve yüzey gerilmesinden dolayı, iç aerodinamik kuvvetler ve iç kuvvetler arasındaki etkileşime bağlı olarak, daha küçük damlacıklara bölünebilir. Bundan dolayı damlacık deformasyon analizi ve ikincil parçalanmada damlacığın üzerinde kuvvet dağılımının detaylı bir şekilde bilinmesi gerekir. Damlacık üzerindeki kuvvet dağılımı, bu kuvvetlerin sebep olduğu deformasyonun bir sonucu olarak damlacık şeklinde zamanla değişimlere neden olur. Damlacık yüzeyinde herhangi bir noktadaki iç kuvvetler, dış aerodinamik kuvvetlerle dengede olduğunda, denge durumu sağlanmış olur. Ancak dış kuvvetler değişir ve çok büyük olursa, iç kuvvetlerdeki benzer değişim ile dengelenemez, dış kuvvetler damlacığı deforme eder ve sonradan damlacığı daha küçük taneciklere parçalar. Bozulma sonrası küçük bir taneciğin büyük yüzey gerilme basıncı dış kuvvetler ile iç kuvvetleri dengeler böylece kararlı bir durumun elde edilmesi sonucunda daha fazla parçalanma meydana gelmez. Denge durumu elde edildiğinde, tanecik kararlıdır. Bu tanecik boyutu kritik tanecik boyutu olarak ifade edilir. Hatta kritik tanecik boyutundan daha küçük damlacığa bölünme gerçekleşmez. Damlacık üzerinde dış aerodinamik kuvvetler, akış şartlarındaki değişim veya iç kuvvetlerin artmasından dolayı azalır, yüzey gerilme ve/veya viskozitedeki değişimden dolayı dış aerodinamik kuvvetler artar.

Damlacığın parçalanması konusunda çalışmalar havada serbest düşen damlacığı araştıran Lenard'la başlar. Damlacık parçalanması uzun süre araştırılan geniş teorik ve deneysel çalışmaları olan bir konudur. Yüksek kuleden düşmeyi içeren, dikey rüzgar tüneline damlacığın askıda tutulması gibi parçalanma çalışmalarında kullanılan farklı deneysel metotlar geliştirilmiştir. Bu teorik ve deneysel çalışmalarla damlacık etrafında

akış şekli, gaz ve sıvının yoğunluğu, viskozite ve yüzey gerilmesi gibi fiziksel özelliklere bağlı olarak aerodinamik kuvvetlerin etkisi altında farklı modlarda damlacık parçalanmaları ortaya çıkarılmıştır.

Hinze'ye göre damlacık parçalanması üç temel biçimde meydana gelir.

(1) Damlacık yassılaşıma, mercimek gibi elips şekline sonra düzleşir ve sonra deformasyona neden olan çok sayıdaki iç kuvvetlere bağlı olarak kabarmaya dönüşebilir. Kabartı da gerilme olur ve küçük damlacıklara parçalanır.

(2) Damlacık uzun bir silindir şeklinde uzar ve sonra küçük damlacıklara parçalanır.

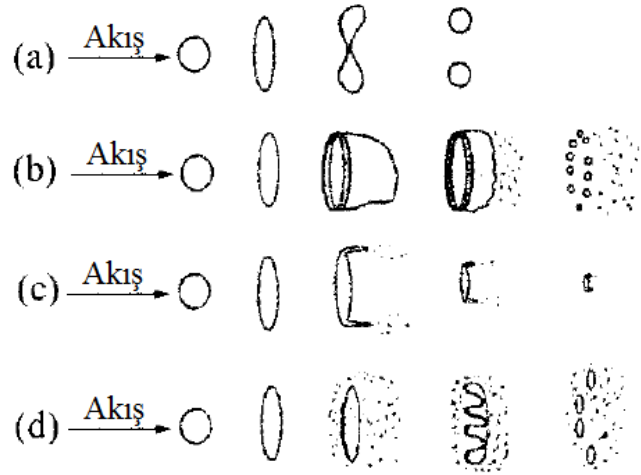
(3) Bölgesel şekil değişikliğinden dolayı damlacık yüzeyinde birkaç ön türbülanslar oluşur. Uygun şartlar altında bunlar bel verir damlacıktan ayrılır ve küçük damlacıklara parçalanır (Hinze, 1955).

Yüzey gerilme kuvvetleri torba oluşmasına yeteri kadar izin verir. Gaz akışı ile içbükey olan torba sıkışır ve aşağı doğru sürüklenir. Torbanın kopması delik oluşması modundan geçerek ince damlacık bulutunu oluşturur. İzafi olarak büyük damlacıklar kenarda parçalanır. Tüm damlacıklar başlangıç damlacık boyutundan çok daha küçük şekilde elde edilir. Bu torba parçalanma olarak tanımlanır (Şekil 2.18) (Kennedy and Roberts, 1990).



Şekil 2.18. Damlacık parçalanma modları; solda: torba parçalanma; sağda: doğrudan parçalanma (Kennedy and Roberts, 1990).

Damlacığın ikincil parçalanma biçimi Denklem 2.8'deki Weber sayısına göre farklılık gösterir. Weber sayısı kritik değere ulaştığında (10,7 Weber sayısı ve üstü) ikiz (twins), torba (bag), film sıyırma (film stripping), felaket (catastrophic) şeklinde parçalanma oluşabilir (Sheikhall et al., 2004; Lee and Reitz, 2000; Joseph, 1999). Şekil 2.19'da ikincil parçalanmanın Weber sayısına göre parçalanma biçimi görülmektedir (Ouyang et al., 2007).



Şekil 2.19. Damlacığın ikincil parçalanma biçimi: (a) İkiz (Twins), $10,7 \leq We \leq 12,0$; (b) Torba (Bag), $12,0 \leq We \leq 100$; (c) Film sıyırma (Film stripping), $100 \leq We \leq 350$; (d) Felaket (Catastrophic), $350 \leq We$ (Ouyang et al., 2007).

Parçalanma biçimindeki farklılık, elde edilen toz çapına bağlı olan soğuma hızına göre toz boyutu ve mikro yapısı değişir (Bergman et al., 2000) ve nihai tozun mikro yapısı damlacığın soğuma hızı ile belirlenir (Lee and Ahn, 1994).

2.3.2 Gaz atomizasyonda damlacık oluşumu

Deneysel ve modelleme çalışmaları göstermiştir ki püskürtme şekillendirme ve toz metalurjisi işlemlerinde sıvı metalin gaz atomizasyonunda iki tür parçalanma meydana gelmektedir; sıvı jet-çubuksu parçalanma ve sıvı film-tabaka parçalanma.

Sıvı jet-çubuksu parçalanma (Şekil 2.20) serbest düşmeli nozul ile gaz atomizasyonunda gerçekleşen bir mekanizmadır. Fotoğraflama teknikleri kullanılarak serbest düşmeli nozul ile sıvı metalin gaz atomizasyonu esnasında damlacık oluşumu üzerine deneysel ve analitik çalışmalar yapılmıştır (Mehrotra, 1981 a, b; Ünal, 1989). Bu çalışmalar sıvı metalin yüksek hızlı gaz atomizasyonunun üç aşamada gerçekleştiğini

ortaya koymuştur: (1) ön parçalanma, (2) ikincil parçalanma (3) küreselleşme ve katılaşmadır. İlk aşamada metal akış borusunda çıkan sıvı metal akışı gaz jetlerinin tesir ettiği bölge içine girer. Gaz jeti geometrik çarpma noktasının üzerinde delikli koninin genişlemesi şeklinde ve enine bir şekilde sıvı metal genişler. Sıvı metal yukarı yönde negatif basınçtan dolayı metal akış eksenini boyunca ters gaz akışı tesiri ile yukarı doğru itilir. Bu olay; metal özgül ağırlığına, metal akış borusu çapına, nozul tasarımındaki özelliklere (özellikle çarpma açısına) ve gaz jet hızı gibi çok sayıda faktöre bağlıdır. Metal akışı enine bir şekilde yayılır ve yüzey gerilme kuvvetleri yüksek gaz hız bölgesi içine çeker ve aerodinamik kuvvetlerin hareketi altında konik şeklinde sıvıyı bir arada daha fazla tutar. Dinamik basıncın başlattığı değişimler ve sıvı yüzey üzerinde bozulmanın büyümesi ile konik dışı doğru incelerken, çubuklar ve/veya diğer düzensiz şekiller kenardan ayrılır, Rayleigh mekanizması ile damlacıklar sonradan parçalanır. Yüksek hızda, sıvı yüzeyinde kabarmalar ve gaz akış dalgaları çevresinde basınç farklarının sebep olduğu aerodinamik kuvvetlerden dolayı parçalanma olabilir (Yule and Dunkley, 1994). Bu ön parçalanma 5×10^{-4} s'den daha kısa bir sürede meydana gelir (See and Johnston, 1978). Her bir damlacığın konik parçalanması sonrası, diğer damlacıkların oluşması için parçalanma bölgesine çekim kuvveti oluşturur. Oluşum döngüsü ve metal koninin parçalanması atomizasyon işlemi boyunca tekrar eder. Sıvı metal akışının genişlemesi ön parçalanmadaki önemli bir aşamasıdır. Çünkü gaz ile teması sonucu sıvı metalin efektif yüzey alanı belirlenir. Damlacığın son şekli, yüzey dağılımındaki dinamik değişkenlere, gaz akışındaki türbülansa ve metal yüzey çevresinde gaz hız değişimine bağlı olarak şekillenir (Lawley, 1992; Klar and Shafer, 1972; Dombrowski and Johns, 1963).

Sıvı metalin/damlacığın katılaşması ön parçalanma ve/veya ikincil parçalanma öncesi, sırasında ve/veya sonrasında meydana gelebilir, malzeme özelliklerine ve işlem parametrelerine bağlıdır. Yarı katı veya katı parçacıkların nihai şekli katılaşmanın tamamlanması için gereken sürenin miktarı ile belirlenir, sıvı metal damlacığın küreselleşmesini sağlayan yüzey gerilme kuvvetleri için belirli bir süre gerekir.

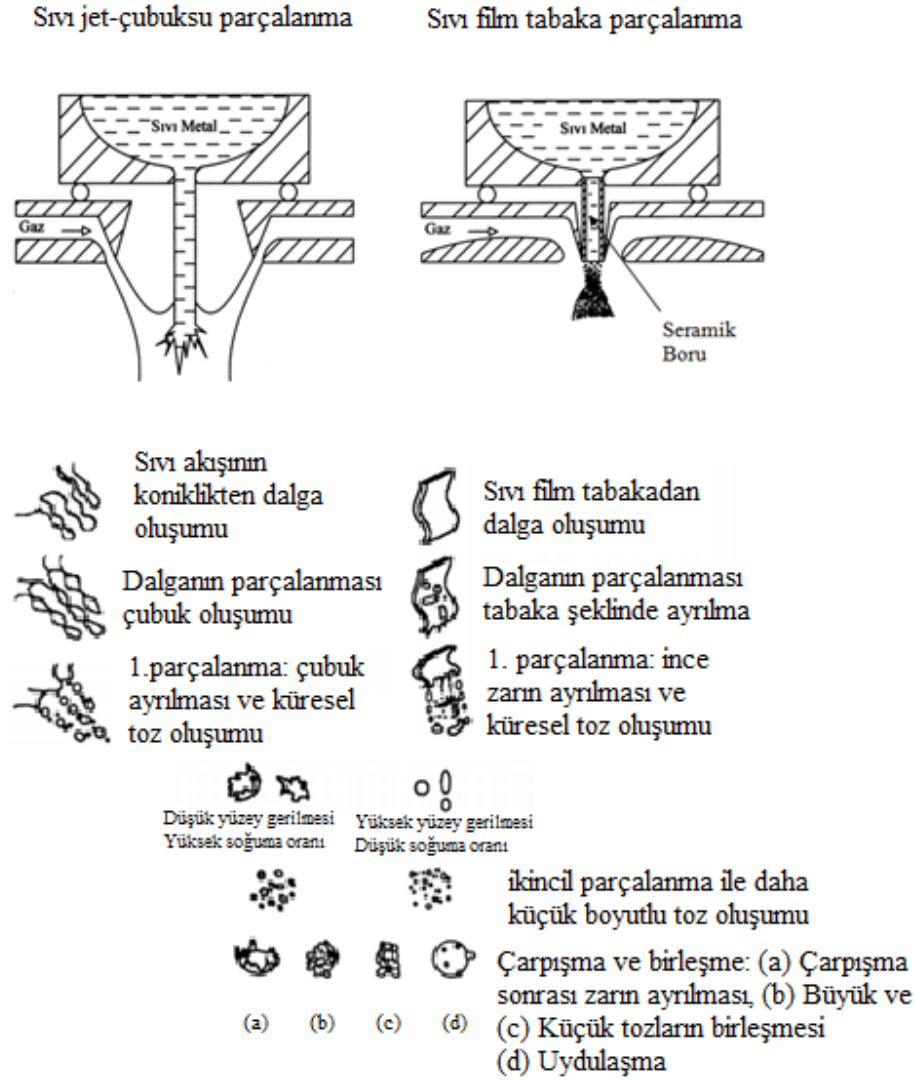
Son zamanlarda, yüksek hızlı videografi teknikleri kullanılarak detaylandırılmış deneysel gözlemler serbest düşmeli nozul kullanarak ergiyiğin gaz atomizasyonunda ön parçalanma durumunu anlamamızı sağlayan bilgiler sunmuştur (Liu, 2000).

Sıvı film tabaka parçalanması (Şekil 2.20) yakından eşlemeli bir atomizerle yüksek basınçlı gaz atomizasyonunda sık sık karşılaşılır (Kuntz and Payne, 1995; Liu, 1997; Miller and Miller, 1992; Hespel et al., 1995). Bu atomizasyon türü üç aşamadan oluşur. Ön parçalanma, ikincil parçalanma ve küreselleşme/katılaşmadır. İlk aşamada sıvı metal akış borusu boyunca aşağı doğru akar. Borunu çıkışında boru taban yüzeyi boyunca radyal olarak dışa doğru akış yönü değişir, bu bölgede döngüsel gaz akışından dolayı ince sıvı film oluşur. Radyal olarak akan sıvı film sonrasında borunun taban yüzeyinin kenarlarında konik sıvı tabakaya dönüşür. Kesme kuvvetleri ve basınç kuvvetlerinden dolayı tabaka yüzeyinde gaz akışı paralel ve dikey olarak tesir eder. Kesme kuvvetleri tabakayı gaz akış bölgesinden aşağı doğru ivmelendirmeye sebep olurken, basınç kuvvetleri tabakayı gaz akışı ile hizalamaya zorlar. Konik şeklindeki sıvı tabaka akış borusunu altında boşluklu konik şekli alır. Metal ergiyiğin yüksek yüzey gerilmesi nozul yakınlarında oluşan konik tabakadan dolayı nozul eksenini boyunca yol almasını sağlar. Gaz akışı ile tabakanın paralel bir şekilde genişlemesi yüksek düzensizliğe neden olur. Tabaka dışa doğru inceler ve damlacıklara parçalanır (Fraser and Eisenklam, 1953; Fraser et al., 1962; Mansour and Chigier, 1990). Gaz akış bölgesinde ön parçalanma ile damlacıklar ivmelenir, yeniden şekillenir ve soğuması ile elde edilir. Damlacıkların ikincil parçalanması deformasyona, soğuma/katılaşma oranına bağlı olarak meydana gelebilir. Benzer şekildeki durum sıvı jet-çubuk parçalanma modunda oluşur, sıvı metalin katılaşması atomizasyon esnasındaki herhangi bir durumda meydana gelebilir. Bu nedenle tamamen katılaşma için zaman gerekmekte ve nihai şeklin küresel bir damlacık olmasını sağlayan yüzey gerilme kuvvetleri için zaman gerekmektedir (Liu, 2000). Atomize edilmiş bir parçacık için katılaşma zamanı Denklem 2.9 ile tahmin edilebilir.

$$t = \frac{D\rho_m}{6\beta} \left[C_p \ln \left(\frac{T_M - T_O}{T_S - T_O} \right) + \frac{\Delta H_S}{T_S - T_O} \right] \quad 2.9$$

Bu eşitlikte T_O gazın ortam sıcaklığı, T_M ergime sıcaklığı, T_S katılaşma sıcaklığı, ΔH_S ergime ısısı, C_p ısı kapasitesi, β konvektif ısı iletim katsayısı, ρ_m ergiyik yoğunluğu ve D parçaçık çapıdır. Konvektif ısı iletim katsayısı (β) gaz ısıl iletkenliği ve

sistemin Reynolds sayısı ile artar. Damlacığın hızının bilinmesi durumunda Denklem 2.9 atomizasyon haznesinin boyutu tahmin edilebilir (German, 2007).



Şekil 2.20. Eriyiğin iki tür atomizasyonunda sıvı film tabaka parçalanması (sağda) ve sıvı jet-çubuksu parçalanmasının (solda) şematik gösterimi (Liu, 2000).

Her iki atomizasyon türünde kararsız çubukların ve/veya tabakaların küresel damlacıklara ayrılması için, atomizasyon gazının kinetik enerjisini damlacıklara maksimum bir şekilde aktarılması gerekir. Alaşımı oluşturan elementler atomize gaz ile reaksiyona girmemelidir. Örneğin oksitlenen bir malzemede katılaşma gecikebilir. Küreselleşme sağlanamamış kaba taneler oluşur. Damlacıkların küresel şekilde olabilmesi ve oksit oluşumlarından kaçınmak için atomizasyon kule atmosferi soy gazla doldurulmalıdır.

Genellikle gaz atomizasyonunda toz boyut dağılımı geniş bir aralıkta meydana gelir. Bu durum jet çarpma bölgesinden aşağı doğru damlacık oluşması için tabakalar ve çubukların rastgele parçalanması ve hızla dağılması ile gaz jeti tarafından tabaka ve/veya çubuk şeklinde sıvı akışın kontrolsüz olarak parçalanmasıyla açıklanır. Dıştan karışmalı atomizer için yüksek hızlı atomizasyon gazının enerjisinden faydalanılmasını maksimize etmek kritik öneme sahiptir. Gaz atomizasyonunda kullanılan yüksek hızlı gaz jetinde türbülans oluşur ve hızı bozularak yayılır (Yule and Dunkley, 1994). Sıvının parçalanması yüksek hız bölgesi içinde tamamlanırsa, atomizasyonda ince toz üretimi optimize edilmiş olur, nispeten dar ve tek modlu toz boyut dağılımı meydana gelebilir. Sıvının parçalanması yüksek hız bölgesinin altında oluşursa daha kaba toz üretilebilir. Atomizasyon yüksek ve düşük hız bölgesinde yayılırsa iki veya daha fazla modlu toz boyut dağılımı meydana gelebilir (Yule and Dunkley, 1994). Bu nedenle HPGA ve USGA gibi tasarıma sahip nozullar ile yüksek gaz hızlarına ulaşılması neticesinde nispeten dar boyut dağılıma sahip ince toz verimi arttırılabilir.

Yüksek hızlı atomizasyon işlemlerinde, atomizasyon gazının sıkıştırılabilirlik etkisinin olduğu fark edilmiştir. Sıkıştırılabilir gazın, sıvı üzerindeki gaz akışı için genişletilmiş Taylor analizi kullanarak (Taylor, 1963) Bradley, ara yüzeyin dağılmasına neden olan hızlı oluşan dalga boyutları için bir ifade geliştirmiştir (Bradley, 1973 a; b). Bradley en çok kullanılan damlacık çapının ortaya çıkarılması için Denklem 2.10'daki ifadeyi türetmiştir.

$$D = \frac{2\pi\varepsilon}{0.53k_{max}} \quad 2.10$$

Burada ε $1/4$ olarak alınan bir parametre, $\frac{2\pi}{k_{max}}$ hızlı oluşan dalga boyu, Bradley'in modelinde, k_{max} boyutsuz parametre χ veya χ_m işlem parametresi ile ilgilidir.

$$k_{max} = \begin{cases} \frac{\chi \rho_g U_s^2}{\sigma} & 0 < Ma < 1 \\ \frac{\rho_g U_s^2}{\sigma \chi_m} & 1 \leq Ma < 10 \end{cases} \quad 2.11$$

Denklem 2.11'deki U_s ses hızı, ve Ma Mach sayısıdır. Ses hızı Denklem 2.12'deki ifadeden hesaplanabilir:

$$U_s = \left(\frac{kP_G}{\rho_G} \right)^{1/2} = (kRT_G)^{1/2} \quad 2.12$$

Burada P_G gaz basıncı ve R gaz sabitidir. k gazın izostatik faktörü, farklı gazlar için çizelgelerden bulunabilir. Damlacık çapı Denklem 2.13'teki gibi formüle edilir;

$$D = \begin{cases} \frac{2.96\sigma}{\chi \rho_g U_s^2} & 0 < Ma < 1 \\ \frac{2.96\sigma \chi_m}{\rho_g U_s^2} & 1 \leq Ma < 10 \end{cases} \quad 2.13$$

Boyutsuz parametre χ veya χ_m Mach sayısının bir fonksiyonu ve farklı sıvıların atomizasyonu için universal bir eğimden belirlenebilir. Mach sayısı Bradley tarafından sesaltı (subsonik), ses hızı (sonik) ve sesüstü (süpersonik) gaz akışları için ifade edilmiştir (Bradley, 1973 a; b). Bu modelin matematiksel işleminde ses hızı ve damlacık çapı için türetilen denklemdir. Gaz/sıvı debi oranı, sıvının viskozitesi ve nozul geometri parametreleri gibi bazı önemli işlem parametreleri ve malzeme özelliklerini içermez. Bu parametreler belirgin bir biçimde ortaya çıkan damlacık boyutuna etkilemektedir. Ayrıca Bradley'in kullandığı Denklem 2.10'daki parametre ε için varsayılan sabit bir değer ($\varepsilon = 1/4$) için hiçbir gerekçe olmadığı görülmüştür. Rao and Mehrota (1981), parametre ε için; atomizasyon açısı ve nozul çapının bir fonksiyonu olduğunu tespit etmiş, ergiyik kurşun, kalay ve kurşun-kalay ötektik alaşımlar için analiz ettiği atomizasyon verileri Denklem 2.14 ve Denklem 2.15 ile göstermiştir (Rao and Mehrota, 1981)

$$\varepsilon = -0.12 + 0.57\vartheta + 0.38d_0 \quad \text{Kalay için} \quad 2.14$$

$$\varepsilon = -0.14 + 0.66\vartheta + 0.48d_0 \quad \text{Kurşun için} \quad 2.15$$

Burada ϑ atomizasyon açısı, sıvı akışı ile nozul eksenindeki açı, d_0 nozul çapıdır (Liu, 2000).

2.4. Enerji Gereksinimleri ve Verimlilik

Toz üretimi ve deformasyon süreçleri, sıvı-gaz ya da sıvı-yüzey etkileşimleri, birincil ve/veya ikincil parçalanmayı, damlacık dinamikleri ve birçok uygulamada, ısı transferi ve faz değişimi gibi karmaşık fiziksel konuları içerir. Bugüne kadar, birkaç

basit işlemler hariç toz oluşumunda kullanılan genel bir teorik işlem yoktur. Bu nedenle, proses tasarımı toz oluşumu ve optimizasyonu analizi için sayısal modelleme ve simülasyon yapan programlar geliştirilmiştir. Bilgisayar modelleme genellikle birtakım nedenlerden dolayı deneysel çalışma yerine tercih edilir. Örneğin, bilgisayar modelleme, deneysel çalışmadan daha hızlı, daha ucuz ve daha az zamanda işlemi yapabilir. Buna ek olarak, çok daha iyi kontrol ve fiziksel olarak erişilemez bazı koşulları ve sistemleri çok daha geniş bir aralıkta, keşfetmek için kullanılabilir.

Akan sıvıdan damlacık oluşması, bir miktar enerjinin sıvı yüzeyinde kararsız alanının oluşması için gereklidir. Daha sonra yüzey dağılarak delinebilir, parçalanarak damlacıkları oluşturur. Enerji ihtiyacı kullanılan tekniğe göre özeldir. Örneğin gaz atomizasyonunda kullanılan gazı sıkıştırmak için ve katı malzemeyi ergitmek (aşırı ısıtmak) için enerji gerekir. Atomizasyon ile toz üretim sürecinde, ergitme ve aşırı ısıtmada kullanılan enerji kayıptır. Çünkü atomizasyon kulesini çevreleyen gaz ile damlacığın çarpışması sırasında ısı transferi oluşur ve bu süreçte oluşan ısı transferi geri kazanımı yapılamaz. Teorik olarak, sıvı veya ergiyikten damlacıkları oluşturmak için gerekli olan enerji E , sıvı yüzey gerilimi ve elde edilen damlacıkların yüzey alanını oluşturmak için gerekli enerji Denklem 2.16'daki gibi kabaca tahmin edilebilir:

$$E = \sigma \sum_{i=1}^{i=N} \pi D_i^2 \quad 2.16$$

Burada i damlacık sayısını, N toplam damlacık sayısını, D_i i 'nci damlacığın çapı, m_L sıvının debisi, sıvının debisini Denklem 2.17'deki gibi hesaplanmaktadır;

$$m_L = \rho_L \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{i=N} \pi D_i^3 \quad 2.17$$

Yukarıda atomizasyon için enerji ihtiyacı tahmininde, sıvının parçalanması sırasında viskoz kuvvetlerin üstesinden gelmek için gerekli enerji ihmal edilerek hesaplanmıştır. Böyle bir varsayım altında, birim sıvı kütlenin püskürtmek için teorik enerji ihtiyacı, Denklem 2.18'deki gibi hesaplanır (Yule and Dunkley, 1994);

$$\frac{E}{m_L} = \frac{6\sigma}{\rho_L D_{32}} \quad 2.18$$

Teorik enerji verimliliği, Denklem 2.19'da η olarak tanımlandı:

$$\eta = \frac{\text{Teorik olarak giren enerji}}{\text{Atomizere gerçek giren enerji}} \quad 2.19$$

Sıvının parçalanması sırasında viskoz kuvvetlerin üstesinden gelmek için gerekli enerji ihmal ederek, Yule and Dunkley, basınç-girdap nozul için teorik enerji verimliliğini hesaplamada Denklem 2.20'yi türetmişlerdir (Yule and Dunkley, 1994).

$$\eta = \frac{600\sigma}{\Delta P D_{32}} \quad 2.20$$

Gerçek giren enerji, nozul boyunca basınç düşüşü ΔP ve birim zamanda oluşturulan N damlacıklarının hacimleri toplamı olarak ifade edilen sıvının hacimsel debisinin bir ürünüdür. Jet spreyleyler için; Su, yağ, lehim ve alüminyum için teorik enerji verimliliği sırasıyla % 0,22, % 0,22, % 0,49 ve % 0,95'dir. ΔP ise sırasıyla 10, 1, 6,7 ve 2,4 MPa ve D_{32} için 20, 59, 60 ve 150 μm (Yule and Dunkley, 1994), verim çok küçüktür. Çünkü sıvıya verilen kinetik enerji sadece çok küçük bir kısmı damlacığı oluşturan yüzey enerjisine dönüştürülür. Kinetik enerjinin büyük bir yüzdesi, sıvı ve damlacıkları hızlandırmakta tüketir.

Atomizasyon, sürekli akan sıvıya hızlı gazın kinetik enerjisini aktarmasıyla oluşan bir süreçtir. Nozula giren sıvıların ilk enerjileri ağırlıklı olarak basınç-hacim ve kinetik enerji arasında bölüşülür. Atomizasyon sırasında enerji; ara yüzey enerjisi, türbülans, ısı ve akustik enerjisi gibi başka enerji formlarına dönüşür. Genellikle, atomizasyon verimliliği, toplam enerji girdisi ile ara yüzey enerji çıkışı oranı olarak tanımlanır.

Basınç-hacim ve atomizasyon sırasında ara yüzey enerji kinetik enerjileri dönüşüm verimliliği termodinamik analiz Li and Tankin(1992) ve Shellens and Brzustowski (1985) tarafından yapılmıştır. Ortam gaz basıncı ve damlacıklarının entropi yoğunluğu analizleri dikkate alınır. Artan basınç ve entropi yoğunluğu, damlacık enerjisinin toplam enerjiye oranının artmasına ve atomizasyon veriminin azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Atomizasyon yöntemiyle üretiminde damlacıkların en küçük boyutlu olmasının bir sınırı var olduğunu düşündüren neden, damlacık boyutu azaldıkça kohezif kuvvetlerin baskın olmasına dayanır (Liu, 2000).

2.5. Toz boyutu ve dağılımı

Toz boyutu, ortalama boyut ve toz boyutu dağılımı ile karakterize edilir (Aller, 1985). Bir tozun boyutunu ifade etmek için çeşitli ortalama çap ölçüleri kullanılır (Ünal, 1990). Bunlardan en yaygın olanı, boyut dağılımı grafiğindeki kümülatif yüzde eğrisinin % 50 değerine karşılık gelen kütle ortanca çapıdır (d_m veya d_{50}). Kütle ortalama çapı olan d_{50} , bundan sonra “ortalama boyut” olarak anılacaktır. Ortalama boyut, bir tozu tanımlamak için her zaman yeterli olmayabilir ve logaritmik normal dağılımın standart sapmasına ihtiyaç duyulur. Standart sapmayı veren ifade şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84,1}}{d_{15,9}} \right)^{1/2} = \left(\frac{d_{84,1}}{d_{50}} \right) = \left(\frac{d_{50}}{d_{15,9}} \right) \quad 2.21$$

Burada; $d_{84,1}$ tozların ağırlıkça % 84,1’inin kendisinden küçük olduğu toz çapı, $d_{15,9}$ ise % 15,9’unun kendisinden küçük olduğu toz çapıdır. Gaz atomize alüminyum tozları için σ_g değeri, toz boyutuna ve atomizasyon şartlarına bağlı olarak 1,8 ile 2,5 arasında değişir (Ünal, 1990; 1996).

Gaz Atomize tozların parçacık boyutu genellikle log-normal dağılıma uymaktadır. Geniş bir aralığa sahip çok boyutlu tozlardır. İstenilen boyutta toz üretebilmek amacıyla damlacık boyutları lazer parçacık boyutu analizi ile takip edilerek kütleli debi oranı kontrol edilebilir (German, 2007).

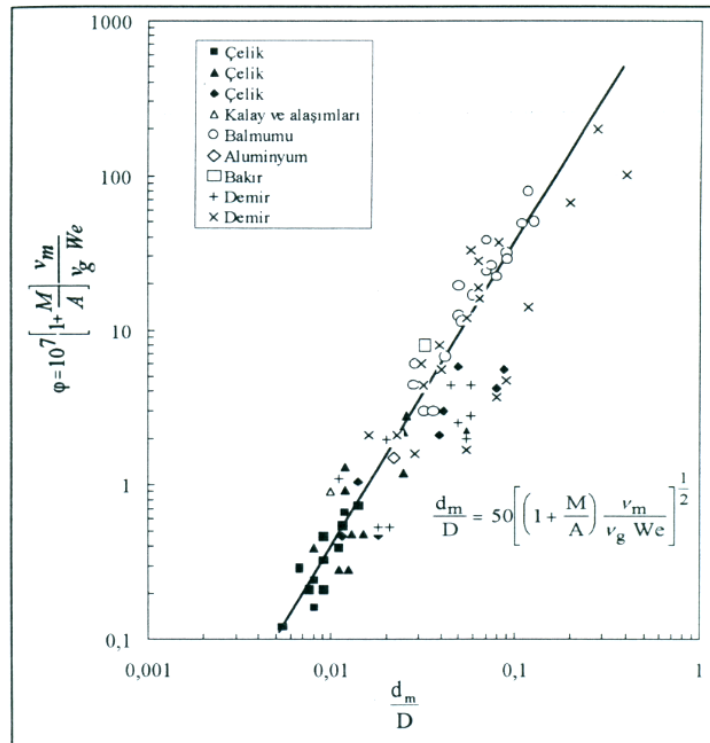
Lubanska (1970), hava atomize demir, çelik ve kalay üzerine yaptığı çalışmalar sonucu, ortalama toz boyutu (d_m) için sistem ve malzeme değişkenlerine bağlı olarak boyutsuz ampirik bir formül geliştirmiştir:

$$\frac{d_m}{D} = K \left[\left(1 + \frac{M}{A} \right) \left(\frac{v_m}{v_g (We)} \right) \right]^{1/2} \quad 2.22$$

Denklem 2.22’de; D , sıvı metal demetinin çapı (μm); v_g , gazın kinematik viskozitesi (m^2/s); v_m , sıvı metalin kinematik viskozitesi (m^2/s); We , gazın Weber sayısı ($We = \rho_m V_g^2 D / \sigma_m$); M/A , metal/gaz debisi oranı ve K , 40 ile 50 arası sabit bir katsayıdır.

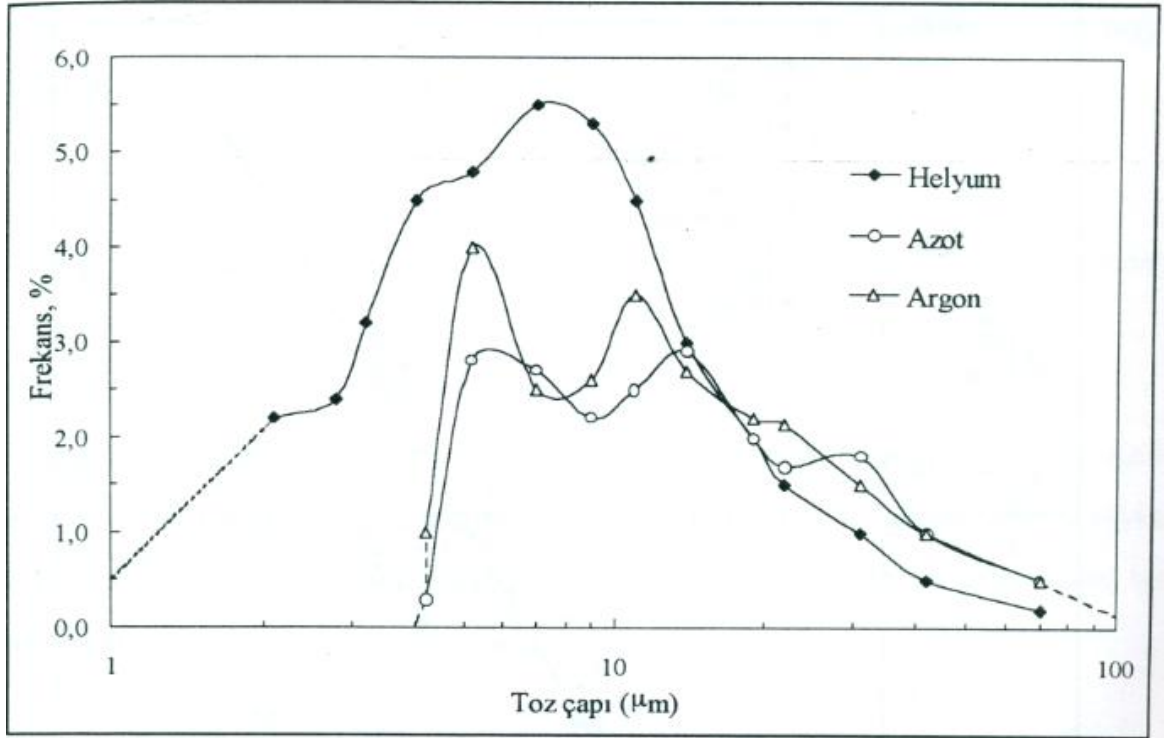
Şekil 2.21’de Lubanska denkleminin, bazı hava atomize tozların deneysel verileriyle karşılaştırılması gösterilmiştir. Fakat Mehrotra (1981 b), bakır, alüminyum

ve balmumu üzerinde yapılmış daha sonraki çalışmalarla bu denklem arasındaki uyuma vurgu yaptıktan sonra kendilerinin farklı açılara sahip nozullarla ve farklı metal debileriyle ürettikleri kalay ve kurşun-kalay tozlarının deneysel verileriyle Lubanska denkleminin uyuşmadığını bildirmiştir. Benzer şekilde Ünal (1989), Lubanska bağıntısından hesapladığı ortalama boyut değerinin, deneysel yolla elde ettiği değerden magnezyum tozu için çok yüksek, çinko için ise çok düşük olduğunu tespit etmiştir.



Şekil 2.21. Hava atomizasyonu için Lubanska bağıntısı (Lawley, 1992).

Ünal (1996; 1990; 1989 (a, b, c); 1988, 1987), magnezyum, alüminyum ve alaşımları üzerinde birçok çalışma yapmış ve üretim parametrelerinin toz özelliklerine etkisini araştırmıştır. Azot, argon ve helyum gazlarıyla yapılan alüminyumun atomizasyon neticesinde elde edilen gaz cinsinin toz boyutuna etkisi Şekil 2.22’de verilmiştir. Benzer şartlarda aynı nozul kullanılarak azot ve argondan daha ince tozların helyum ile üretildiği görülmektedir. Ortalama boyut helyum, azot ve argon için sırasıyla 13,36 μm , 24,53 μm ve 25,32 μm olarak hesaplanmıştır (Ünal, 1989 a). Bu durum, helyumun diğer iki gaza göre daha yüksek olan ısı emme kapasitesinden kaynaklanmaktadır (Ünal, 1986; Uslan, 1999).

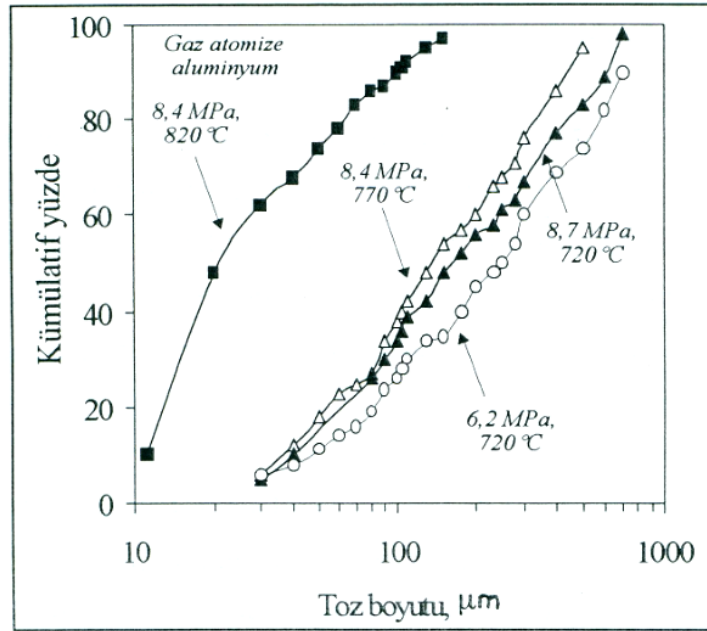


Şekil 2.22. Helyum, argon ve azot kullanılarak üretilen alüminyum tozlarının frekans dağılımı (Ünal, 1989 a).

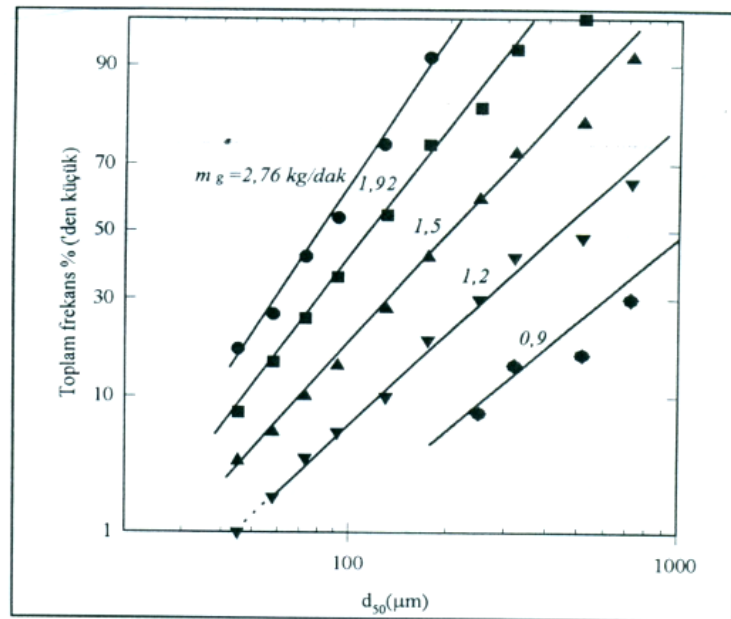
Hızlı katılaşmış tozlar için en iyi soğutma şartlarını helyum sağlamasına karşın, fiyatı diğer asal gazlardan daha yüksektir (Ünal, 1989 b). Azotun ekonomikliği bir üstünlük iken, argonun koruyucu bir gaz olması dışında bir üstünlüğü yoktur (Ünal, 1986). Gaz basıncı, gazın debisini ve hızını etkiler, fakat gazın metali kestiği noktada ve ikincil bölünme esnasında basınç yaklaşık 0,1 MPa olduğundan, tek başına temel bir parametre değildir (Ünal, 1989 b). Şekil 2.23'te atomizasyon basıncının ve ergiyik sıcaklığının değişmesiyle alüminyum tozlarının kümülatif toz boyutu dağılımının değişimini göstermektedir. Basınç artışının daha yüksek enerjiye ve aşırı ısıtılmış ergiyeğin daha düşük viskoziteye sahip olması nedeniyle, bu yöndeki değişimler dağılım eğrisini daha küçük toz boyutuna doğru hareket ettirir (German, 2007).

Azot atomize kalay için, gaz debisinin ortalama toz boyutuna etkisi Şekil 2.24'te verilmiştir. 3 kg/dk olan sıvı metal debisiyle yapılan deneylerde, gaz debisi 0,9-2,76 kg/dk arasında değiştirilmiş ve artan gaz debisinin daha ince tozlar ürettiği tespit edilmiştir (Yule and Dunkley, 1994). Metal debisi de aynı olmak üzere, aynı atomizasyon şartlarında ortalama toz boyutunu, gaz jetleri arasındaki toplam açı olan

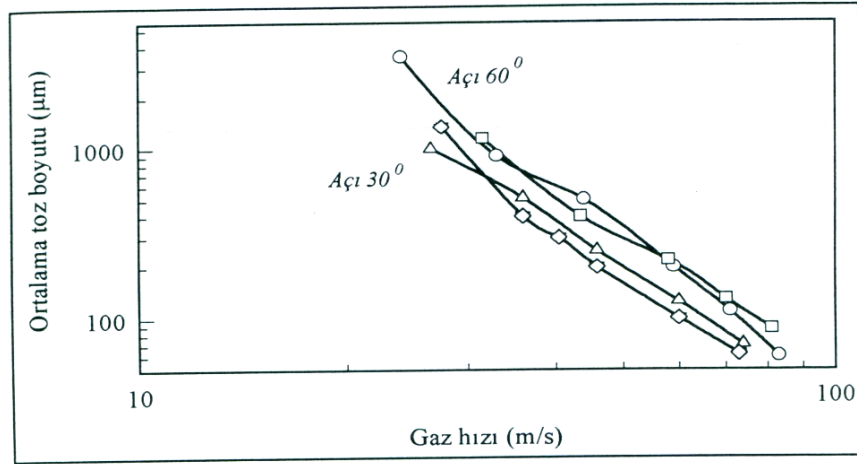
çarpma açısı belirler (Lawley, 1992). Çarpma açısı nozul geometrisine ait bir değerdir. Azot ile atomize edilmiş kalay ve kurşun tozlarında 30° çarpma açısına sahip bir nozul, 60° açığa göre daha küçük ortalama boyutlu toz üretimi gerçekleştirmiştir. Gaz hızındaki artış da toz boyutunu küçültmektedir (Şekil 2.25).



Şekil 2.23. Farklı basınç ve ergiyik sıcaklıklarında alüminyumun ortalama toz boyutunun değişimi (German, 2007).



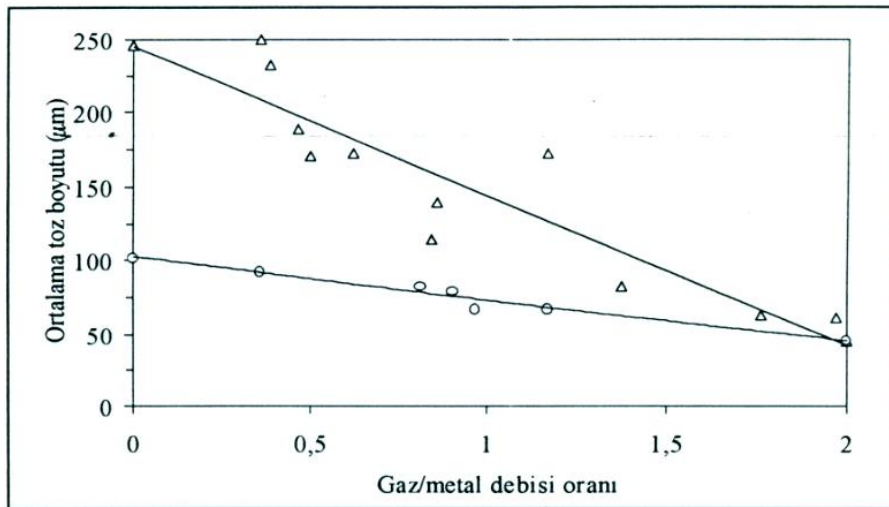
Şekil 2.24. Azot atomize kalay tozlarının ortalama boyutuna gaz debisinin etkisi (metal debisi 3 kg/dk) (Yule and Dunkley, 1994).



Şekil 2.25. Azot gazı hızının ve çarpma açısının ortalama toz boyutuna etkisi (○, ◇ : Pb; □, △ : Sn) (Yule and Dunkley, 1994).

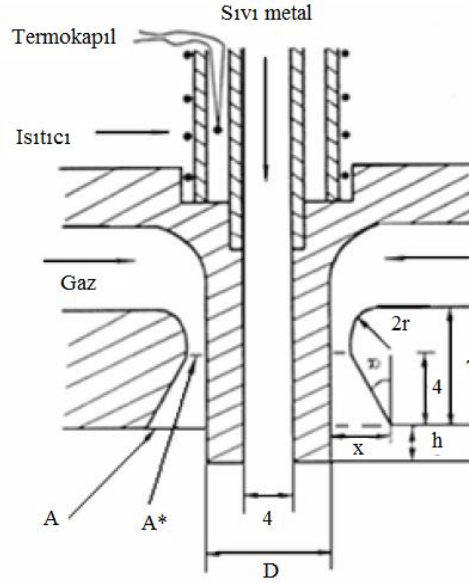
Sıvı metal debisi, doğrudan üretim hızını kontrol ettiği için ekonomik olarak en önemli değişkenlerden biridir (Ünal, 1996). Bu değişken, metal film kalınlığını ve gaz ile sıvı metal arasındaki ısı transferini etkiler. Daha kalın metal filmi, birincil bölünme esnasında damlaların ortalama boyutunu daha büyük yapar (Ünal, 1987).

Başka bir önemli üretim değişkeni de özgül gaz tüketimidir (Lawley, 1992). Özgül gaz tüketimi, gaz/metal kütle oranı veya gazın hacminin metalin kütlesine oranı olarak ifade edilir (Ünal, 1995) Gaz/metal kütle oranındaki artış, ortalama toz boyutunu küçültmektedir (Şekil 2.26) (Uslan, 1999).



Şekil 2.26. Özgül gaz tüketiminin ortalama toz boyutuna etkisi, ○ : Stellite alaşımı, △ : Alüminyum alaşımı (Yule and Dunkley, 1994).

Ünal (1988) tarafından nozul geometrisinin yakından eşlemeli nozullara etkisini araştırmak amacıyla yapılan çalışmada kullanılan sesüstü nozulun şematik resmi Şekil 2.27’de verilmiştir. 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 metal akış borusu dış çapı D ’nin 8 mm ve A/A^* oranının 3’e eşit olduğu daralan/genişleyen nozul tasarımında elde etmiştir. D ’nin daha büyük değerleri ($D=10$ mm ve $D=12$ mm) tozun kabalaşmasına sebep olmuştur. Metal akış borusunun nozula olan mesafesi h ’nin ise, 3 ve 8 mm olan değerleri 5 mm’ye göre daha kaba tozlar üretmiştir (Ünal, 1988).



Şekil 2.27. Ünal yakından eşlemeli daralan/genişleyen nozul tasarımı (Ünal, 1988).

2.6. Nozula Yakın Bölgede Gaz Akışının Modellenmesi

Gaz atomizasyon ve püskürtme şekillendirme işlemlerinde nozula yakın bölgede atomizasyon gazının sıcaklık ve hız dağılımı sayesinde sıvı metal ile gazın çarpışma kinetik enerjisi katılma hızını belirlenmekte ve dolayısıyla taneciğin uçuş yönünü, şeklini ve boyutunu önemli ölçüde etkilemektedir. Öte yandan atomizasyon esnasında sıvı metalin akışı ve oluşan ısı transferi sıvı metalin sıcaklığına, viskozitesine ve yüzey gerilmesine bağlı olarak ortalama toz boyutunu belirler. Bu yüzden nozul çevresinde meydana gelen sıvı metal ve gaz akışı ile birbiri arasındaki ısı transferi atomizasyon veriminde ve gaz tüketiminde kritik öneme sahip olup, toz boyut dağılımını önemli ölçüde etkiler.

Ses hızı ve sesüstü hızdaki akışlarda, atomizasyon gazının debisi sıkıştırılabilir akışkanlar dinamiği esasına göre Denklem 2.23 ile hesaplanır.

$$\dot{m}_G = A_G P_{G0} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \left(\frac{\gamma}{RT_{G0}} \right)^{1/2} \quad 2.23$$

Burada A_G nozulun boğaz alanı, P_{G0} ve T_G gaz basıncı ve sıcaklığı R gaz sabiti ve γ gazın özgül ısı oranıdır.

Atomizasyon gazını basınçlandırmak için gereken güç aşağıdaki ifade kullanılarak tahmin edilebilir.

$$G\ddot{U}\dot{C} = \dot{m}_G R M_G T_{G0} \ln(P_{G0}/P_{kule}) \quad 2.24$$

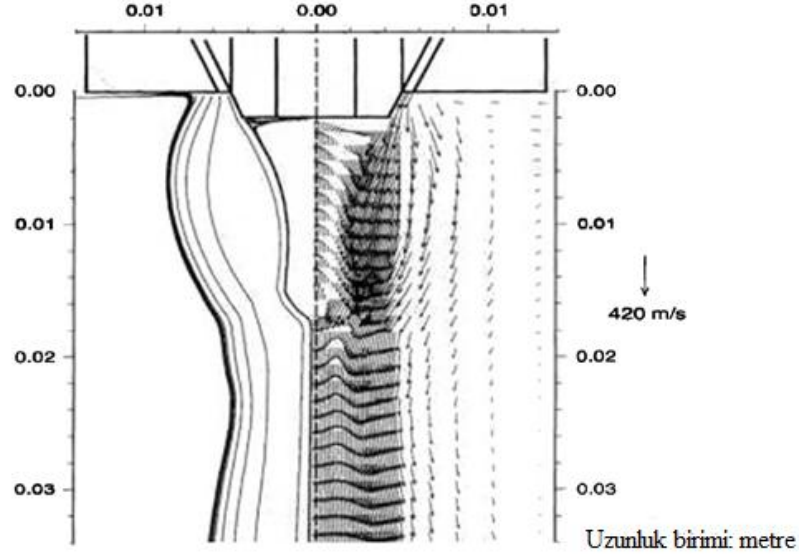
Burada P_{kule} kuledeki basınç, M_G gazın moleküler ağırlığıdır.

Son zamanlarda bazı araştırmacılar yaptığı çalışmalarda toz karakteristiğinde atomizasyon basıncının fiziksel etkisini anlamaya çalışmışlardır. Bu çalışmaların yapılmasında en önemli unsur modelin oluşturulmasıdır. Nozuldaki gaz akışı izentropik genişlemesini esas alarak hesaplanabilir iken, nozula yakın bölgede gaz akışının analizi hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kodlarını kullanarak sayısal simülasyon/modelleme yapılabilir. Nozula yakın bölgede atomizasyon gazın akış bölgesinin modellenmesi nozul parametrelerin optimizasyonu için temel bilgiler vermektedir (Liu, 2000).

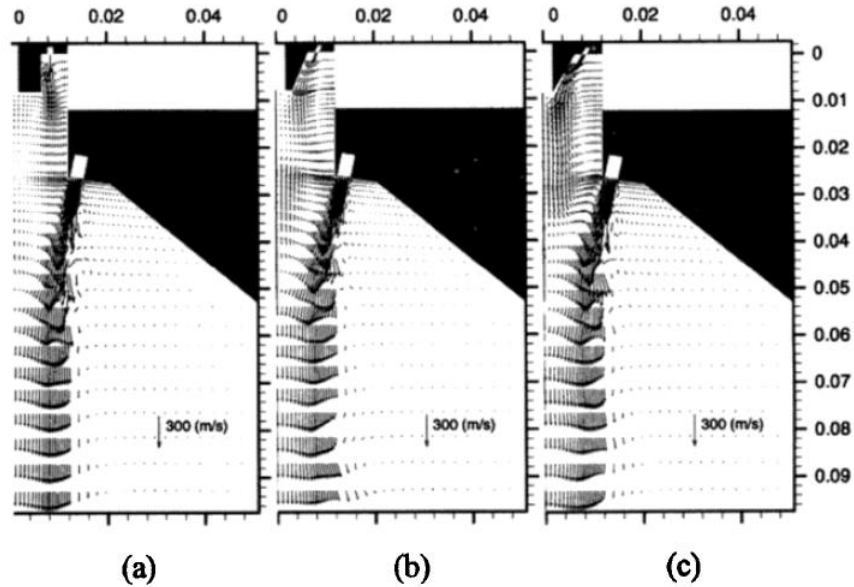
Espina et al. (1989), yakından eşlemeli nozulun ucundaki gaz akışını analizi için Prandtl-Mayer teoresini uygulamıştır. Şok dalgalarının yerinin tesbiti, emme basınç değerinin belirlenmesi ve kompleks akışı anlamada bu analizden faydalanmıştır. Teorik hesaplamalar ölçülen emme davranışlarının açıklanmasında ve farklı nozul geometrileri, farklı gaz ve basınçta değerlendirme yapılabilmesi için potansiyel bir araç sağlamıştır. Espina teorik analiz ile nozulun geometrik tasarımının optimize edilmesinde ve atomizasyon verimliliği ile geometrik tasarım parametreleri arasında ilişkiyi incelemiştir (Espina et al., 1989).

Hem yakından eşlemeli nozul hem de serbest düşmeli nozul için nozula yakın bölgede gaz akışının sayısal modellemesini gerçekleştirmiştir (Liu, 1997 a, b). Bu sayısal modellemede atomize gaz olarak argon gazı kullanmıştır. Şekil 2.28'de yakından eşlemeli nozula ait hız vektörü (sağda) ve gaz akışı (solda) görülmektedir

(Liu, 1997 a). Serbest düşmeli nozula yakın bölgenin modellenmesinde; birinci gaz basıncı 0,14 MPa, ikinci gaz basıncı 0,18 MPa alınmıştır. İkinci gaz nozulun sprej merkezi ile açısı 10° , birinci gaz nozulun sprej merkezi ile açısı ise şekil 2.29’da (a) 0° , (b) 22.5° ve (c) 30° olacak şekilde tasarlanmıştır (Liu, 1997 b).



Şekil 2.28. Yakından eşlemeli nozula ait hız vektörü (sağda) ve gaz akışı (solda) (Liu, 1997 a).



Şekil 2.29. Serbest düşmeli nozula yakın bölgenin modellenmesinde; birinci gaz basıncı 0,14 MPa, ikinci gaz basıncı 0,18 MPa alınmıştır. İkinci gaz nozulun sprej merkezi ile açısı 10° , birinci gaz nozulun sprej merkezi ile açısı ise (a) 0° , (b) 22.5° ve (c) 30° olacak şekilde tasarlanmıştır (Liu, 1997 b).

Akış alanında; sesaltı ve sesüstü akışı, türbülans, şok dalgaları, serbest kayma akışı ve sirkülasyon akışı mevcuttur. Atomizasyon sırasında karmaşık gaz akışının modellenmesinde; tam Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri ile türbülans transport denklemleri birlikte kullanılmıştır. Türbülans etkisini standart Boussinesq yaklaşımı kullanılarak modellemiştir. Türbülans modeli olarak $k - \epsilon$ iki denklem modelini kullanmıştır. Bu modelle hem duvar sınırındaki akışı hem de serbest kayma akışını doğru tahmin edilebildiğini öne sürmüştür (Power et al., 1995).

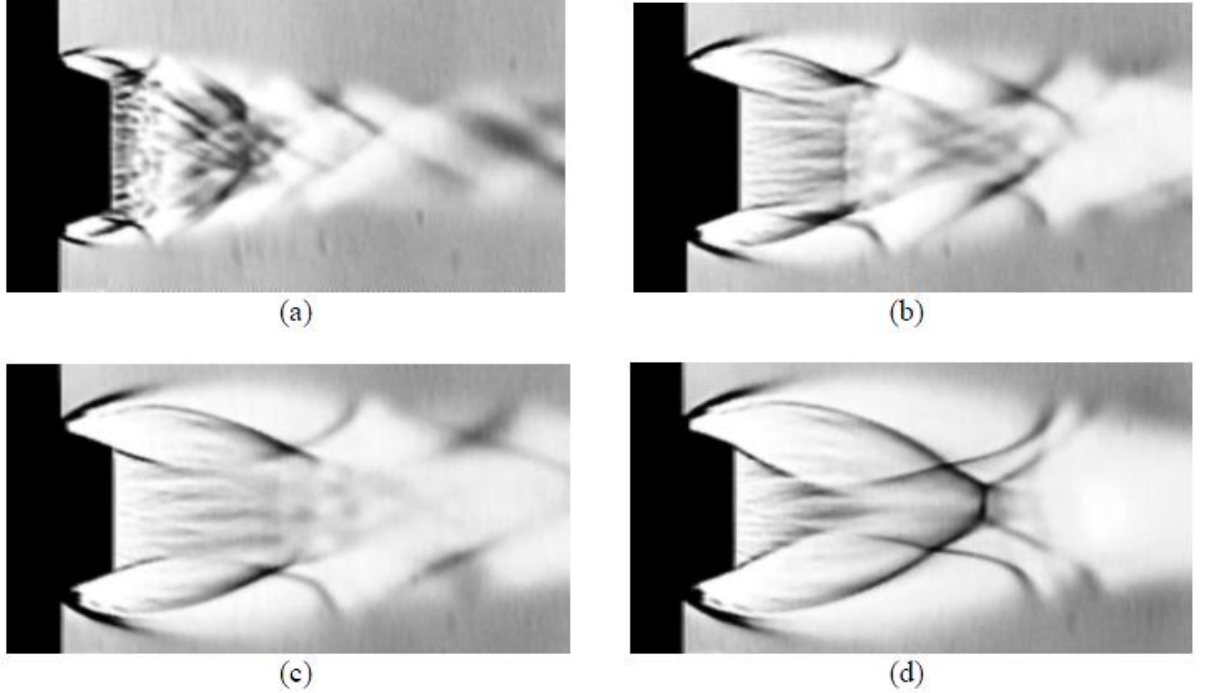
Fritsching et al., (1991), Ticari bir paket program olan PHOENICS kullanarak, serbest düşmeli nozulun sesaltı gaz akışını simüle ederek, gaz geri dönüşünün az olduğu nozul konfigürasyonunu optimize etmiştir (Fritsching et al., 1991).

HPGA (yüksek basınçlı gaz atomizasyon) nozulda atomizasyon gaz basıncı değişimi ile “open wake” ve “closed wake” durumunu araştırmıştır. Geçiş bölgesinin kapandığı basınç değeri oldukça önemli olduğunu belirtmiştir. Bu basınç değerinin üzerinde gerçekleşen atomizasyon işlemlerinde bu değer altında gerçekleşen atomizasyon işlemlerine göre daha küçük toz boyutu ortalaması ve daha dar bir toz dağılımı elde edildiğini tespit etmiştir. Metal akış borusu çıkıntı mesafesinin daha kısa olduğu durumlarda geçiş bölgesinin daha düşük basınçlarda kapandığı gözlenmiştir. Geçiş bölgesinin kapanması olayı ve sıvı metal atomizasyonunda fark edilir damlacık incelmesinin ifade edilebilmesi için gaz dolaşım bölgesinin ve etrafını çevreleyen gaz akışının modellenmesi gerekir. Kontrol hacmi yaklaşımına göre gaz, geçiş bölgesine durgunluk noktasından girer ve metal akış borusunun dairesel çevresinden çıkar. Durgunluk noktasındaki atomizasyon gazının radyal hız bileşeni nozul açısına bağlıdır ve durgunluk basıncını kuvvetli bir şekilde etkiler. Yüksek radyal hız bileşeni daha yüksek durgunluk basıncına sebep olur. Ve bu sayede vürcümlü (Pulsatile) atomizasyon modelini sunmuştur (Ting et al., 2002).

Mi et al. (1996), Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı PHOENICS kullanımı ile HPGA (yüksek basınçlı gaz atomizasyon) gaz akış bölgesinde metal akış borusu mesafesinin ve atomizasyon gaz basıncının etkisini simüle etmişlerdir (Mi et al., 1996).

Mi et al. (1997), HPGA yüksek basınçlı gaz atomizasyonunda çıkıntı mesafesinin ve nozul açısının gaz akış bölgesine ve sıvı metal emme etkisini sayısal olarak modellemiştir (Mi et al.,1997).

Mates and Settles (1995), Sıvı metal atomizasyonunda kullanılan nozullarda gaz dinamiğinin akış görüntüleme (Schlieren) çalışmasını yapmışlardır (Şekil 2.30). Schlieren görüntüleme tekniği, akış bölgesindeki şok dalgaları ve kesme düzlemleri gibi yoğunluk farklarının görüntülenmesinde kullanılan bir tekniktir. Farklı atomizasyon basınçlarında elde edilen görüntülerden de anlaşıldığı üzere basınç arttıkça şok dalgaları daha da kuvvetlenerek Mach disk oluşumuna sebep olmuştur (Mates and Settles, 1995).

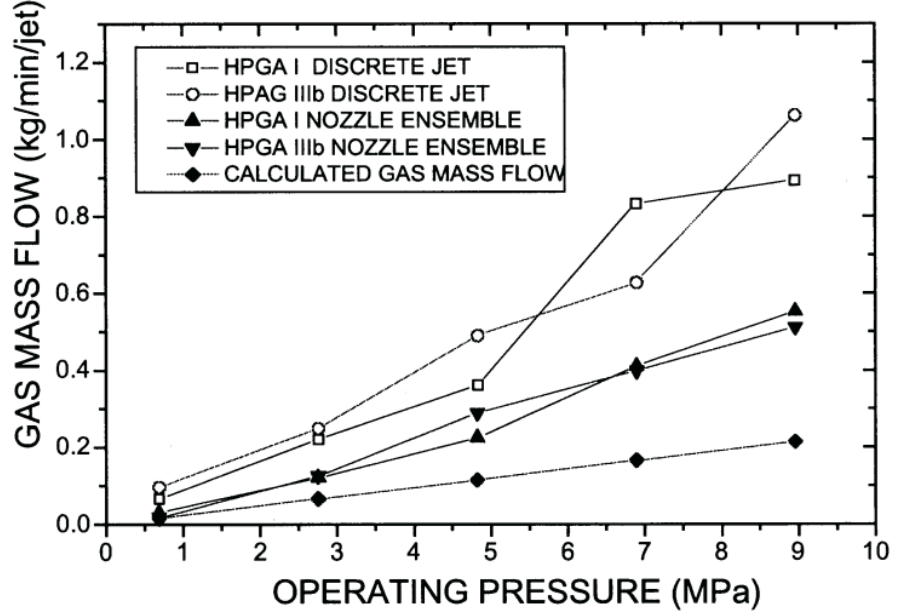


Şekil 2.30. Farklı atomizasyon basınçlarında oluşan akışların schlieren görüntüleri :
a) 24 bar b) 43 bar c) 53.5 bar d) 57 bar (Mates and Settles, 1995).

Tong and Browne (2008), Ön izleme formülasyonu (front-tracking formulation) kullanarak atomizasyon başlangıcında nozul uçunda atomizasyon argon gazı ve Ni–Al intermetalik ergiyik arasında dinamik etkileşimi incelemişlerdir.

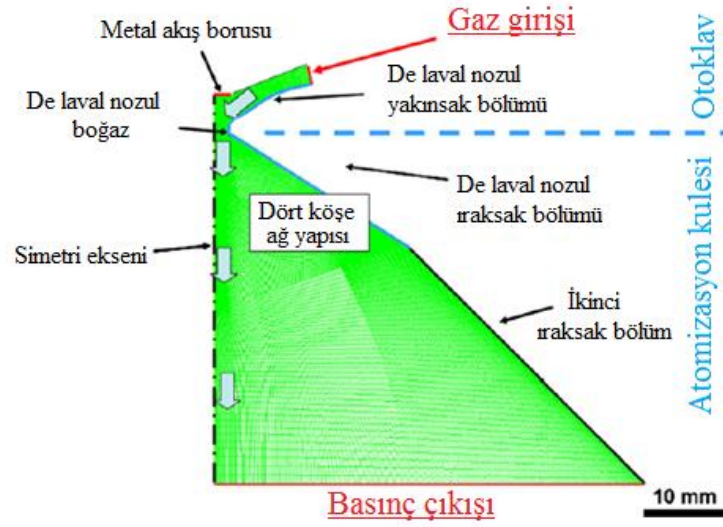
Anderson and Terpstra, (2002) yaptıkları çalışmada teorik debi ile deneysel debi arasında basıncın artmasıyla birlikte giderek artan bir fark tespit etmişler ve teorik debi

değerleri ile deneysel debi değerleri arasında çok büyük fark bulmuşlardır (Şekil 2.31). Anderson and Terpstra bu farkın nedenini açıklayamamışlardır.



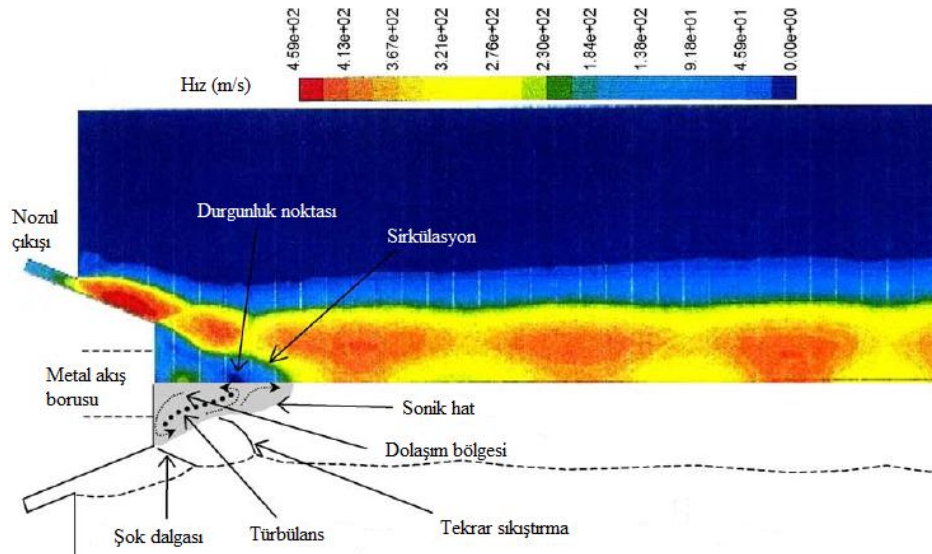
Şekil 2.31. Anderson ve Terpstra'nın elde ettiği debi değerlerinin karşılaştırılması (Anderson and Terpstra, 2002).

Allimant et al., De laval nozul ile sıvı metalin gaz atomizasyon yöntemi ile işlenmesi başlıklı makalesinde De laval nozul için gaz akış bölgesinde basınç ve ergiyik debi etkisini incelemiştir. Sıvı metal atomizasyonunda De laval nozul kullanılarak hem deneysel hemde modelsel yaklaşımlar çalışılmıştır. Bu iki yaklaşım ile atomizasyon basıncının toz boyutuna etkileri karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak gözlemlenen sonuçlar atomizasyonun yalnız gaz akış üzerinde HAD modelleme çalışması ile açıklanabilir olduğunu ortaya koymuştur. Atomizasyon modeli oluşturulmasında HAD yazılımı olan Fluent kullanmışlardır. Atomizasyon nozulunun simetrik şeklinden dolayı 2-B simetri eksenini tercih etmişlerdir. Hesaplama dört köşeli grid (Şekil 2.32), ideal gaz olarak argon, türbülans model olarakta k-ε türbülans modeli kullanmıştır. Hesaplamanın yakınsamasını giren ve çıkan debi arasındaki fark tarafından değerlendirmiştir. Basınç artışının gaz hızında bir artışa yol açtığını ve sıvı metali daha iyi keserek parçalayıp daha ince toz üretimine katkı sağladığını ifade etmişlerdir (Allimant et al., 2009).



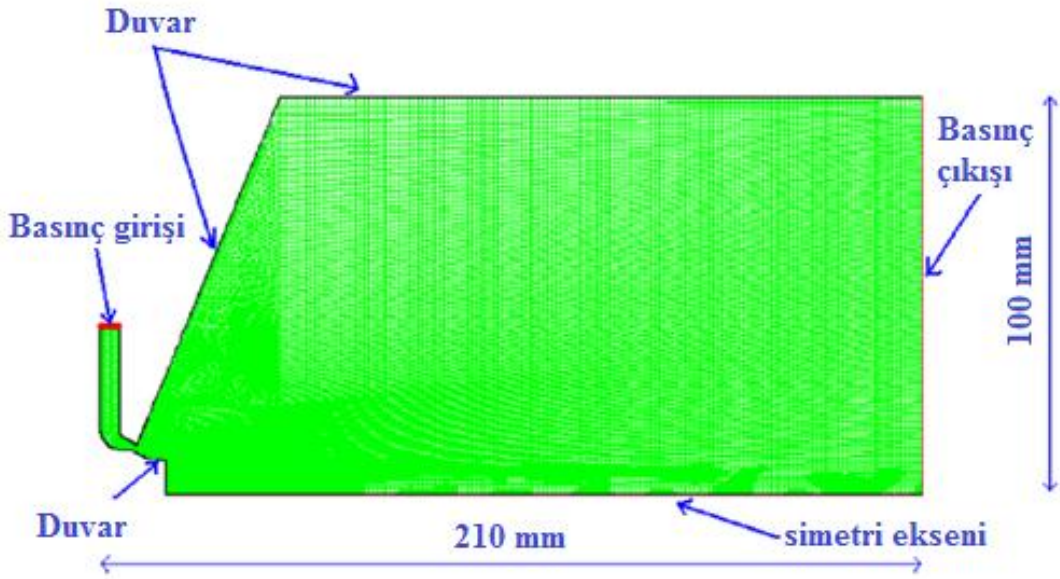
Şekil 2.32. HAD modelleme için De laval nozulunun geometrisi ve sınır şartları (Allimant et al., 2009).

Ting and Anderson (2004), Geçiş bölgesinin kapanması durumunun hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde (HAD) araştırılması başlıklı makalesinde metal akış borusu ucunda oluşan negatif basınç, sıvı metale etki eden dolaşım bölgesindeki gaz akış kuvvetlerinin toplamı olduğunu tespit etmişlerdir. Negatif basınç ölçümleri atomizasyon işleminin verimliliğinin araştırılması açısından oldukça önemlidir. Geçiş bölgesinin kapandığı basınç değerlerinin bulunması için Şekil 2.33'teki gibi HAD modelleme ile hız grafiklerini çıkartmıştır (Ting and Anderson, 2004).



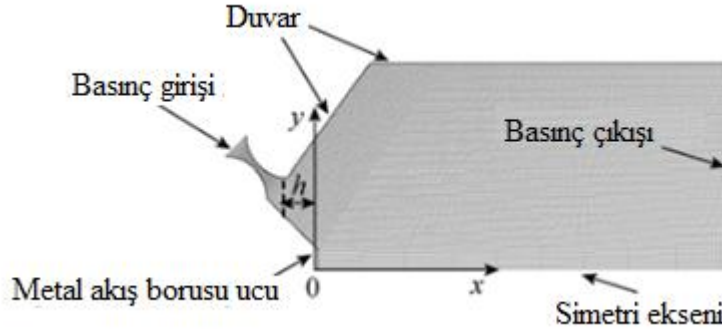
Şekil 2.33. HPGA nozulunun HAD modellenmesi ile hız grafiğinin gösterimi (Ting and Anderson, 2004).

Zeoli and Gu (2008), Gaz atomizasyon için tasarlanan izentropik meme nozulun hesaplamalı yaklaşımı adlı makalesinde gazdan, sıvı metale maksimum kinetik enerji transfer edildiği ve şok dalgalarının azaltıldığı bir izentropik meme nozul (IPN) tasarlamıştır. IPN'nin performansını gaz akış dinamiğini, damlacık parçalanma mekanizmasını ve parçacık boyutunu içeren nümerik bir model kullanılarak araştırmıştır (Şekil 2.34). Bu modeli oluşturulmasında HAD yazılımı olan Fluent kullanmışlardır. Türbülans model olarak Reynolds stres modeli kullanılmıştır. Nedeni olarak da bu modelin akışta hızlı değişimlerin olmasına rağmen akışı yakalamadaki üstünlüğünü belirtmişlerdir. Nümerik sonuçlar sıcak gaz kullanıldığında partiküllerde dairesel yarık nozul (ASN) ile izentropik meme nozul (IPN) kıyaslandığında IPN tasarımının toz veriminde daha iyi olduğunu tespit etmiştir.



Şekil 2.34. Hesaplanan bölgenin ağ yapısı ve sınır şartları (Zeoli and Gu, 2006; Zeoli and Gu, 2008).

XinMing et al. (2009), sesüstü gaz atomizasyonunda farklı atomizasyon basınçlarındaki gazın akış alanına etkisini araştırmasında HAD yazılımı olan Fluent'te standart $k - \epsilon$ modeli kullanmıştır. Şekil 2.35'te yakından eşlemeli Laval nozulun hesaplama yapılan 2B eksenel simetri geometrisi ve sınır şartları verilmiştir.



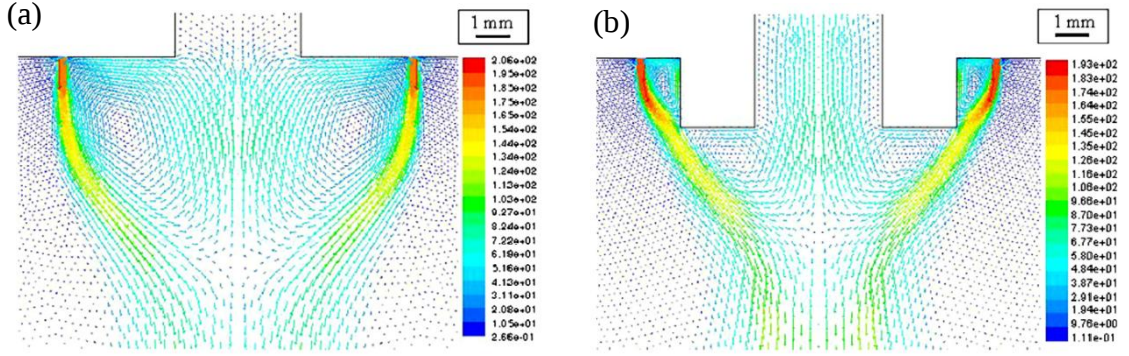
Şekil 2.35. Yakından eşlemeli nozulun ağ yapısı ve sınır şartları (XinMing et al., 2009).

Atomize gaz akışının modeli kurulması için aşağıda verilen kabulleri esas almıştır.

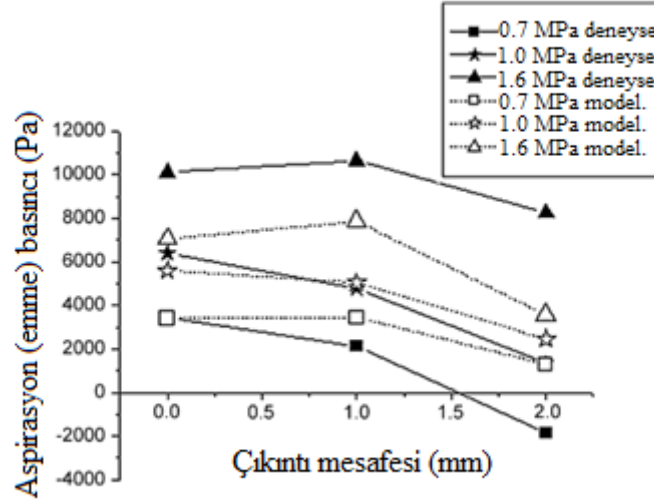
- Gaz akışı sürekliidir.
- Gaz akış bölgesi ve nozulun simetrik olması nedeni ile hesaplama süresini azaltmak için, iki boyutlu (2B) bir simetri eksen modeli benimsenmiştir.
- Gaz akışı sıkıştırılabilir, izentropik ve mükemmel gaz kanununa tabiidir.
- Gaz akışı türbülanslı, akış tabakaları arasında momentum ve enerji transferi vardır.
- Yer çekimi etkisi ihmal edilmiştir.
- Türbülans akış modeli olarak standart $k - \epsilon$ modeli kullanılmıştır.
- Gaz sıcaklığı 300 K, çıkış basıncı atmosfer basıncı (101.325 Pa).
- Gazın viskozitesi Suntherland viskozite kanunu esas alınmıştır (XinMing et al., 2009).

Jeyakumar et al., (2008), Fluent yazılımını kullanarak yakınsak nozulun giren ve çıkan gaz akışının bir modelini sunmuşlardır. Nozul, 2B eksenel simetrik olarak çizilmiştir. Gambit'te ağ yapısı oluşturulmuştur. Fluent 6.0 versiyonunda çözüm yapılmıştır. Türbülans model olarak standart $k - \epsilon$ modeli, SIMPLE algoritmasını kullanmıştır. Akış eksenel simetrik, izentropik şartlarda ve kararlı durum olarak kabul edilmiştir. Şekil 2.36'da farklı geometrilerde 0,7 MPa gaz basıncında nozul dışında oluşan vektörel hız dağılımı görülmektedir. Yapılan bu çalışmada çıkıntı mesafesi 0, 1 ve 2 mm için nozul ucunda oluşan farklı atomizasyon basıncındaki (0,7, 1,0 ve 1,6 MPa) emme basıncı değerleri model sonuçları ile kıyaslanmıştır (Şekil 2.37). Hem

deneysel hem de model sonuçları çıkıntı mesafesinin 0 mm'den 2 mm'ye çıkması durumunda emme basıncının azaldığını göstermiştir. Deneysel olarak ölçümde uç basıncının negatif olduğu şartlar 0,7 MPa atomizasyon basıncında 2,0 mm çıkıntı mesafesinde elde edilmiş fakat modelleme sonucu ise pozitif basınç bulunmuştur.



Şekil 2.36. 0.7 MPa gaz basıncında hız vektör dağılımı (a) Tüp A, (b) Tüp C (Jeyakumar et al., 2008).

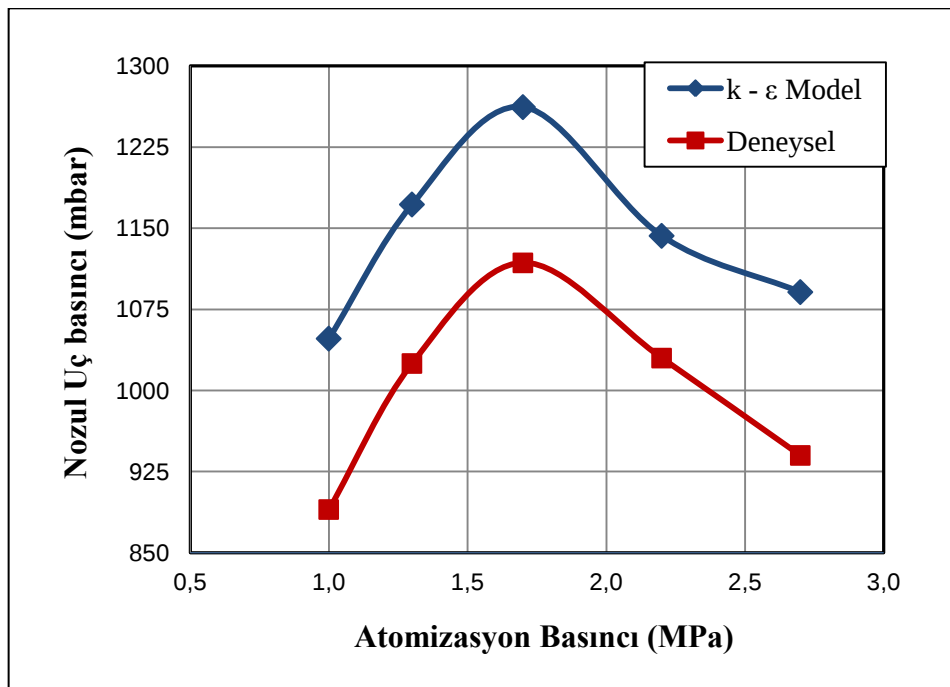


Şekil 2.37. Çıkıntı mesafesine ve atomizasyon gaz basıncına göre deneysel ve modelleme sonucu elde edilen aspirasyon basınç değerlerinin kıyaslanması (Jeyakumar et al., 2008).

Yakınsak nozul ucunun paralel olarak uzatılması (çıkıntı mesafesinin artması) atomizasyon gazının hızı, yoğunluğu ve sıcaklığında çok fazla değişime neden olmadığını ama türbülans kinetik enerjinin azaldığını sayısal olarak göstermiştir. En düşük basınç, 2 mm ile 3 mm olan çıkıntı mesafesindeki nozul ucunda elde edilmiştir.

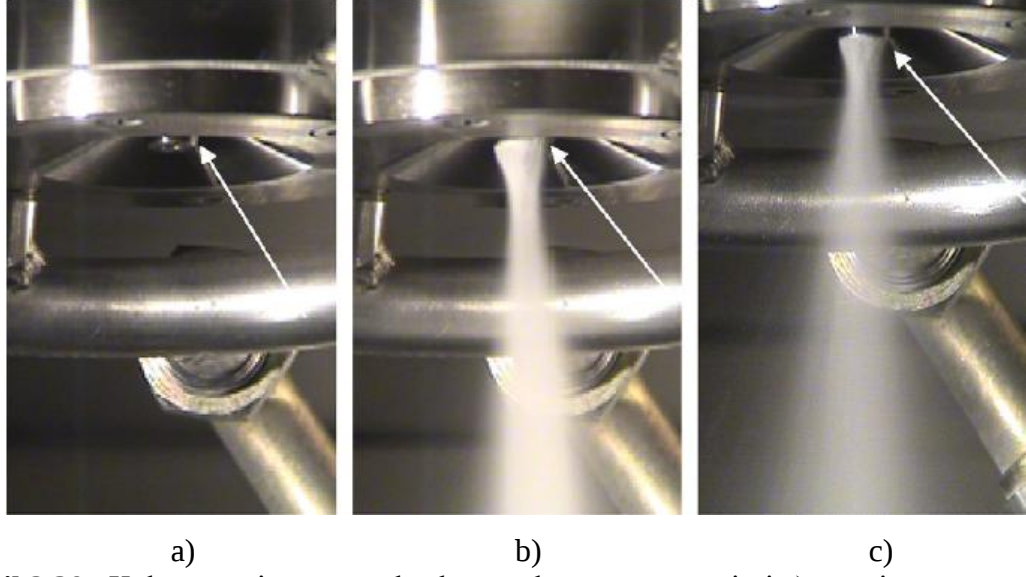
Bu nedenle, 2 mm ve 3 mm arasındaki bir çıkıntı mesafesi düşük emme basıncına neden olmaktadır (Jeyakumar et al., 2008).

Aydın and Ünal (2011), yaptıkları çalışmada HAD analiz ile nozul davranışını modelleyerek deneysel veriler ile karşılaştırmıştır. Nozul uç basınçları arasındaki farkın tüm basınçlarda aynı olduğunu Şekil 2.38’de görüldüğü gibi Realizable $k - \varepsilon$ model sonuçları ile deneysel veriler arasındaki farkın %11-15 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.



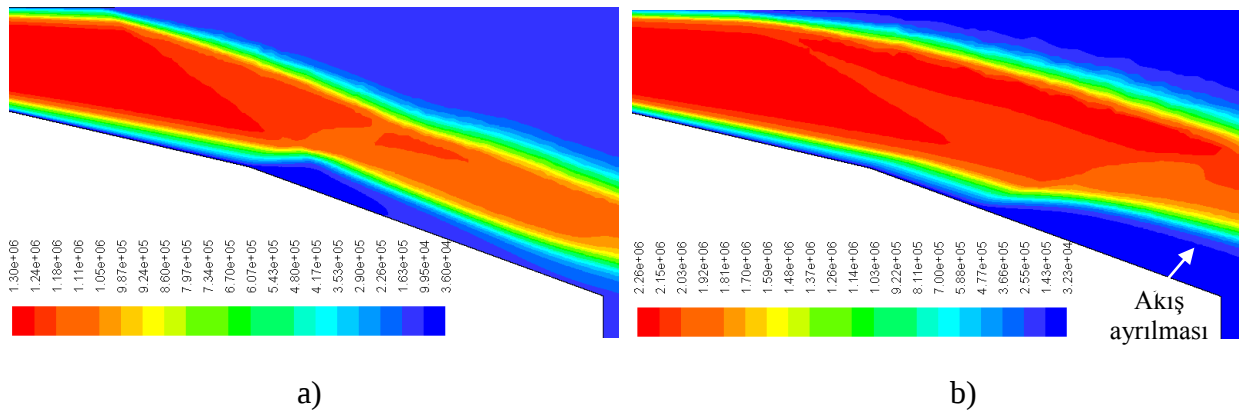
Şekil 2.38. Nozul uç basıncının HAD ve deneysel veriler ile karşılaştırılması (Aydın and Ünal, 2011).

Bu çalışmada kalay tozu üretim deneylerinde görülen akış ayrılması etkisi Şekil 2.39’da görülmektedir. Atomizasyon işlemi başlamadan önce nozul ucu Şekil 2.39 a’da, kalay atomizasyonu (2,2 MPa) sırasındaki akış ayrılması sonucu sıvı metalin nozul ucunun yan yüzeyine çekilmesi ise Şekil 2.39 b’de gösterilmiştir. Kalayın atomizasyonu sırasında sıvı metalin yeterli düzeyde aşırı ısınmaya sahip olması nedeniyle donma gözlemlenmemiştir. Şekil 2.39 c’de ise 1,3 MPa basınç altında akış ayrılmasının gözlemlenmediği atomizasyon işlemi görüntüsü verilmiştir (Aydın and Ünal, 2011).



Şekil 2.39. Kalay atomizasyonunda akış ayrılmasının gösterimi a) atomizasyon öncesi, b) 2,2 MPa gaz basıncında akış ayrılması, c) 1,3 MPa gaz basıncında akış ayrılması yoktur (Aydın and Ünal, 2011).

Realizable $k - \varepsilon$ model için 1,3 MPa basınçta akış ayrılmasının olmadığı Şekil 2.40 a'da ve 2,2 MPa atomizasyon basıncında akış ayrılmasının olduğu ise Şekil 2.40 b'de görülmektedir. Deneysel olarak gözlemlenen sıvı metal yan yüzeye çekilmesinin Realizable $k - \varepsilon$ model ile ortaya konan akış ayrılmasından kaynaklandığını belirtmiştir.



Şekil 2.40. Realizable $k - \varepsilon$ model için akış davranışı: a) 1,3 MPa atomizasyon basıncındaki akış ayrılmasının olmadığı, b) 2,2 MPa atomizasyon basıncındaki akış ayrılması görüntüsü (Aydın and Ünal, 2011).

BÖLÜM 3

3. SAYISAL MODEL ve DENEYSEL YÖNTEM

Akışın olduğu mühendislik sistemlerinin tasarımı ve analizinde iki temel yaklaşım vardır: deney yapma ve hesaplama. Günümüz mühendisleri hem deneysel analizi hem de HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizini uygularlar. Bu ikisi birbirini tamamlar. Ayrıca sayısal ve deneysel olarak bulunan genel büyüklüklerin karşılaştırılması yoluyla HAD çözümlerini doğrulamak için çoğunlukla deneysel veriler kullanılır. HAD, daha sonra, dikkatlice kontrol edilen parametrik incelemeler yoluyla, gerekli deneysel test sayısını düşürerek tasarım sürecini kısaltmak için kullanılır (Çengel ve Cimbala, 2008). Bu bölümde uygulanan sayısal model ve deneysel çalışmaların yöntemi açıklanmıştır.

3.1. Sayısal Model ile Nozul Tasarımı

En basit tanımıyla nozul, simetri eksenı boyunca hareket eden akışkanın hızını artırırken basıncını düşüren geometrik yapıdır. Amaç akışkanın hızını ve basıncını kontrol etmek olduğu zaman nozul ve onun tersi bir geometriye sahip olan yayıcıların çeşitli kombinasyonları kullanılmak zorundadır. Kullanılan akışkanın özelliklerine ve istenen giriş ve çıkış değerlerine göre nozulun tasarımı da çok büyük farklılıklar göstermektedir. Günümüzde önemli imalat yöntemlerinden birisi olan Toz Metalurjisinde (T/M) gaz atomizasyon yöntemi ile metal tozu üretimi nozul tasarımıyla yakından ilgilidir. Zira, yüksek sıcaklıktaki ergimiş metalin yüksek kinetik enerjiye sahip bir akışkan tarafından parçalanmasına ihtiyaç vardır. Yüksek verimli atomizasyon araştırmaları günümüzde devam etmektedir. “Yüksek verimli atomizasyon” ifadesinden anlaşılması gereken; en az gaz debisi ile en çok miktarda sıvı metali, en uygun toz büyüklüğünde parçalama işlemidir. Yüksek verimli nozullar sayesinde en düşük basınçları sağlayan, yani en az enerji sarf eden ancak en iyi toz büyüklüğünü endüstriyel anlamda üretebilmek mümkündür (Ünal, 2005).

Bu çalışmada, gaz atomizasyon yöntemi ile metal tozu üretiminde kullanmak amacıyla, atomizasyon gazını durgun halden yüksek hızlara ulaştırması hedeflenen yüksek verimli bir nozul tasarlanmıştır. Nozulun yüksek verimli olması için gerekli

bütün kriterler incelenmiştir. Teorik çalışmanın sonucunda nozul boyutlandırılmış ve imal edilmiştir. Daha sonra nozul performansının değerlendirilmesi amacıyla kütleli debi değerleri belirlenmiştir. Teorik olarak hesaplanan kütleli debi ve metal akış borusu uç basınç verileri ile deneysel olarak ölçülen debi ve metal akış borusu uç basınç verileri karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

3.1.1. Tasarım kriterleri

Verimli ve amaca uygun bir mekanik tasarım, uygulamayı ilgilendiren bütün değişkenlerin ve denklemlerin ayrıntılı bir şekilde tahlil edilmesini gerektirir. Zira çalışan bütün makine ve mekanizma sistemlerinde fizik kuralları, işlemin seyrini ve sonuçlarını tayin eder. Bu tasarımda en etkileyici eşitlikler akışkanlar mekaniği, termodinamik ve gaz dinamiği denklemleridir.

Akışkanlar mekaniği, genel hatlarıyla çok geniş ve karmaşık bir konu olmakla birlikte, bu çalışmada ele alınacak olan kısmı sıkıştırılabilir akışkanlar ve özellikle hava üzerine çalışmaları kapsamaktadır. Genel olarak akışkanların hareketi incelenirken akışkanın özellikleri açısından:

- 1) Süreklilik denklemi,
- 2) Momentum denklemi,
- 3) Enerji denklemi,
- 4) Hal denklemi incelenir.

Bunların yanı sıra akışın özellikleri açısından: i) Akışın tek, iki veya üç boyutlu olması, ii) Akışın sürekli (kararlı) veya geçici (kararsız) olması, iii) Rotasyon (dönme) olup olmaması kategorilerinden hangisinin ele alınan duruma uygun olduğu incelenmelidir.

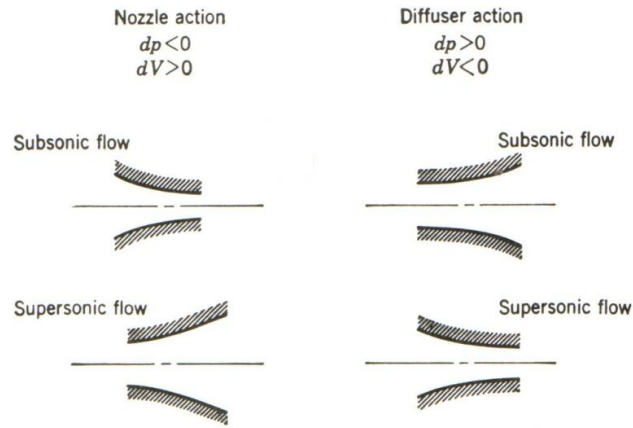
Bunlara ilaveten akışkan hareketlerinin tahlil edilmesinde en önemli gösterge olan Mach sayısı (Ma) ile ilgili sınıflandırmalar da göz önünde bulundurulmalıdır:

- $Ma < 0,3$: Sıkıştırılmaz Akış, yoğunluğun etkisi ihmal edilebilir seviyede
- $0,3 < Ma < 0,8$: Sesaltı Hızla Akış, yoğunluk etkisi önemli ancak şok dalgaları oluşmaz.

- $0,8 < Ma < 1,2$: Geçiş Bölgesi, akışı, sesaltı ve sesüstü bölgelerine ayıran şok dalgalarının ilk defa görülmeye başladığı bölge. Bu kısımda akışın karışık karakteri nedeniyle güvenli, kararlı ve kuvvetli sonuçlar elde edilemez.
- $1,2 < Ma < 3,0$: Sesüstü Hızla Akış, şok dalgalarının hala görülür ancak sesaltı akış bölgeleri yoktur.
- $3,0 < Ma$: Hipersonik Akış, şok dalgaları ve diğer akış değişikliklerinin özellikle önemli olduğu bölge.

buradaki sayısal değerler kabaca bir fikir vermek üzere verilmiş olup kesin değerleri ifade etmezler. Bununla birlikte genel olarak $Ma = 1$ noktası önemlidir. Zira $Ma < 1$ ise akış sesaltı, $Ma > 1$ ise akış sesüstü olarak nitelendirilir. Aynı şartlar ($Ma < 1$, $Ma = 1$, $Ma > 1$) nozulun zıddı özelliklere sahip olan yayıcı için incelenirse önemli sonuçlar elde edilmeye devam edilir. Bu sonuçlar Şekil 3.1 'de özetlenmiştir.

Buradan görülen ise hem sesaltı hem sesüstü hız içeren akışlarda Mach sayısının en önemli parametre olduğudur. Mach sayısının “1” olduğu kesit boğaz olarak adlandırılan en dar kısımdır. Bir nozul ve yayıcının birleştirilmesiyle elde edilen yakınsak-ıraksak geometriler De Laval nozulu olarak adlandırılır. Laval nozulunda boğaz en önemli ve en kritik kesit olduğundan bu bölgedeki özellikler kritik ya da sonik özellikler olarak adlandırılır ve üzerlerinde bir yıldız işareti ile gösterilirler (P^* , T^* gibi). Dolayısıyla nozul tasarımında en önemli parametrelerden birisi Mach sayısıdır ve buna bağlı olarak $Ma=1$ olan boğazın ölçülendirilmesi tasarımın en temel amaçlarından birisidir.



Şekil 3.1. Nozul ve yayıcıların sesaltı ve sesüstü hızlarda basınç hız ilişkileri.

Bir ideal gazın izentropik akışında yerel Mach sayısına ve durgunluk koşullarına bağlı olarak oldukça kullanışlı ifadeler elde edilebilir. Sabit özgül ısı varsayımı ile ideal gazlar için termodinamiğin birinci yasası:

$$C_p T_0 = C_p + \frac{V^2}{2} \quad 3.1$$

Denklem 3.1 yazılabilir. Buradan bir ideal gaz için durgunluk sıcaklığının adyabatik akışta sabit olduğu görülür. Gerekli sadeleştirme ve ideal gaz denklemlerinde yerine koymalar yapılırsa :

$$\frac{T}{T_0} = \frac{1}{1 + [(k-1)/2]Ma^2} \quad 3.2$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{1}{\{1 + [(k-1)/2]Ma^2\}^{k/(k-1)}} \quad 3.3$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{1}{\{1 + [(k-1)/2]Ma^2\}^{1/(k-1)}} \quad 3.4$$

Denklem 3.2, 3.3 ve 3.4 elde edilir. Bu denklemler gerektiğinde izentropik olmayan akışkanlarda yerel Mach sayısı elde edilip kullanılarak gerçek durgunluk değerlerini sağladığı için önemlidir. Daha sonra nozul tasarımında en önemli noktalardan birisi olan kesit alanı oranları için kullanışlı formüller elde edilebilir. A* boğaz alanını temsil etmek üzere süreklilik denklemi $\rho V = G = \frac{P}{RT} V$ yazılıp Mach sayısı ve ideal gaz denklemleri uygulanırsa :

$$G^* = \sqrt{\frac{k}{R}} \frac{p_0}{\sqrt{T_0}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/2[(k-1)]} \quad 3.5$$

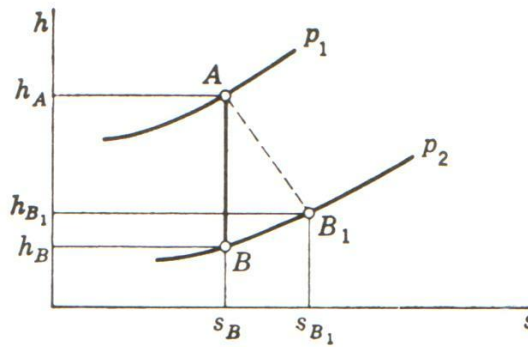
$$\frac{G^*}{G} = \frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma} \left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \right) \right]^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}} \quad 3.6$$

Denklem 3.5 ve 3.6 elde edilir. Bu denklemlerden ve boğaz ve Mach sayısı hakkındaki Şekil 3.1'den çıkarılan sonuç, verilen durgunluk şartları, son basınç ve debi için analitik denklemlere dayanarak sonsuz sayıda akış geometrisi elde edilebilir, farklı tasarımlar yapılabilir, ancak bunların hepsinin boğaz kesit alanı ve çıkış kesit alanı eşit olmak zorundadır. Zira verilen bir debi için durgunluk şartları ve akışkan özellikleri boğaz alanını belirler. Denklem 3.3'e göre ise belirlenmiş bir çıkış basıncı çıkış Mach sayısını tayin eder.

Tasarım esnasında çıkış basıncının yaklaşık olarak atmosfer basıncına eşit alınması makul olacaktır. Gerçek nozul şartları izentropik olmadığından verimliliği de %100 olmayacaktır. Dolayısıyla izentropik yaklaşımla elde edilen değerler bir miktar düzeltmeyi de beraberinde getirecektir. Termodinamiğin birinci yasası ele alınırsa ve ısı transferi olmadığı varsayılırsa:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} \quad 3.7$$

Denklem 3.7 yazılabilir. Nozulun temel fonksiyonunun etkin ve verimli bir şekilde entalpiyi kinetik enerjiye dönüştürmek olduğu düşünülürse burada hız artacağından entalpi azalacaktır.



Şekil 3.2. İzentropik ve gerçek işlemler arasındaki fark.

Açıkça görüldüğü gibi, sürtünme nozulun verimini düşürecektir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi P_1 ’den P_2 ’ye genişleyen bir akışkan, izentropik varsayım ile AB yolunu, gerçekte ise entropinin arttığı AB_1 yolunu izler. Bu durumda h_A-h_B kadar entalpi kaybeden akışkan bunun ancak h_A-h_{B1} kadarını kinetik enerjiye dönüştürebilecektir. Dolayısıyla nozul verimliliği:

$$\eta = \frac{\left(\frac{V_2^2}{2} \right)_{gerçek}}{\left(\frac{V_2^2}{2} \right)_{izentropik}} = \frac{\left(\frac{V_2^2}{2} \right)_{gerçek}}{\left[\frac{V_1^2}{2} + (h_1 - h_2) \right]_{izentropik}} \quad 3.8$$

Denklem 3.8 olacaktır. Nozul için geliş hızının ihmal edilebileceği düşünülürse:

$$\eta = \frac{\left(\frac{V_2^2}{2} \right)_{gerçek}}{(h_1 - h_2)_{izentropik}} \quad 3.9$$

Denklem 3.9 olur. İdeal gazlar için bu eşitlikteki $\Delta h=h_1-h_2$ yerine $C_p\Delta T$ yazılarak daha görünür sonuçlar elde edilebilir.

Bu çalışmada sıkıştırılabilir akışkanlar, özellikle hava, ele alınacağından Mach sayısı 0,3’ün üzerinde olacaktır. Dolayısıyla yoğunluk etkileri ihmal edilemez bir seviyede karşımıza çıkacaktır. Yoğunluk etkilerinin belirli bir önem arz etmesi ise hal denkleminden görüleceği gibi, sıcaklık ve basınç değişimlerinin de büyük ve önemli miktarlarda gerçekleşmesini beraberinde getirecektir. Önemli miktardaki sıcaklık değişimleri ise enerji denklemlerinin de ihmal edilemez olduğunu gösterir. Dolayısıyla, sıkıştırılmaz akışkanlar incelenirken sadece süreklilik ve momentum denklemlerini ele almak yeterliyken bu çalışmadaki gibi sıkıştırılabilir bir akışkan olan hava incelendiğinde, dört denklemin (süreklilik, momentum, enerji, hal) çözülerek dört bilinmeyen (basınç, yoğunluk, sıcaklık, hız, p , ρ , T , V) bulunması gerekir. Sıkıştırılabilen akış, oldukça karmaşıktır ve sonuca ulaşabilmek için bazı

sadeleştirmelerin yapılması gerekir. Tersinir ve adyabatik, diğer bir deyişle izentropik akış varsayılarak önemli kolaylıklar sağlanmış olur.

3.1.2. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)

Türbülanslı akışın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları, ortalama olarak akış alanının daimi olduğu durumlarda bile laminar akış simülasyonlarından çok daha zordur. Bunun nedeni, türbülanslı akış alanının daha ince özelliklerinin sürekli olarak daimi olmaması ve üç-boyutlu olmasıdır. Bir türbülanslı akışta tüm yönlerde türbülans girdapları adı verilen gelişigüzel, girdaplı ve çevrintili yapılar ortaya çıkar. Bazı HAD hesaplamaları, türbülanslı akışın tüm ölçeklerini daimi olmayan hareketini çözmek için bir girişimin yapıldığı doğrudan sayısal simülasyon (direct numerical simulation DNS) adı verilen bir teknik kullanılır. Bununla birlikte en büyük ve en küçük girdaplar arasında birkaç merteye büyüklük ve zaman ölçeği farkı olabilir. Buna ek olarak, Reynolds sayısı ile birlikte bu farklar büyür (Tennekes and Lumley, 1972) ve hatta Reynolds sayısı büyüdükçe türbülanslı akışların DNS hesaplamaları daha da güçleşir. DNS çözümlerinde aşırı derecede ince, tamamen üç-boyutlu ağlar, büyük bilgisayarlar ve çok uzun CPU zamanları gerekir. Günümüz bilgisayarları ile tam ölçekli bir uçak üzerindeki akış gibi mühendislik uygulamalarındaki yüksek Reynolds sayılı türbülanslı akışlar için DNS sonuçları henüz mümkün değildir. Bu nedenle, yüksek Reynolds sayılı türbülanslı akış alanlarının simülasyonunu yapmak için bazı basitleştirici kabuller yapmak gerekir. DNS'nin bir altındaki seviye büyük girdap simülasyonudur (large eddy simulation LES). Bu yöntem ile büyük ölçekli daimi olmayan özellikleri çözülür. Bu arada küçük ölçekli ve yitirgen eğilimli türbülans girdapları ise modellenir. Temel kabul küçük türbülanslı girdapların izotropik olduğudur. Yani türbülanslı akış alanına bakılmaksızın, küçük girdapların koordinat sisteminin yerleştirilme biçiminden bağımsız olduğu ve her zaman istatistiksel olarak olarak benzer ve tahmin edilebilir şekilde davrandığı kabul edilir. Akış alanındaki en küçük girdapları çözme ihtiyacını ortadan kaldırdığı için LES, DNS'nin kullandığı kaynakları çok daha azını kullanır. Buna rağmen, bugünün teknolojisi ile uygulamadaki mühendislik analizi ve tasarımı için olan bilgisayar gereksinimlerinin karşılanması, yine de oldukça zordur.

Bundan daha düşük zorluk seviyesi, bazı türbülans modelleri ile tüm daimi olmayan türbülans girdaplarının modellemektir. Hiçbir türbülans girdabının, hatta en büyüklerinin bile daimi olmayan özelliklerini çözmek için bir girişimde bulunulmaz. Bunun yerine türbülans girdaplarının yol açtığı artan karışım ve difüzyonu dikkate almak için matematiksel modeller kullanılır.

Cebirsel, tek-denklemlilik, iki-denklemlilik ve Reynolds gerilme modelleri dahil olmak üzere günümüzde kullanılan bir çok türbülans modeli vardır. Türbülans modellerinin en çok kullanılan üçü $k - \epsilon$ modeli, $k - \omega$ modeli ve Reynolds stres modelidir. İki-denklemlilik türbülans modelleri olarak anılan bu modelleri, kütle ve doğrusal momentum (ve ayrıca çözülmesi gerekiyorsa enerji) denklemleri ile aynı anda çözülmesi gereken iki tane daha transport denklemi getirir. Bir türbülans modeli kullanıldığında, çözülmesi gereken ilave bu iki transport denklemi ile birlikte, giriş ve çıkıştaki türbülans özellikleri için ilave iki tane daha sınır şartı belirtilmelidir (çıkışta belirtilen özelliklerin çıkışta ters akış oluşmadığı sürece kullanılmayacağına dikkat ediniz). Örneğin $k - \epsilon$ modelinde hem k (türbülans kinetik enerjisi) hem de ϵ (türbülans yitim hızı) belirtilebilir. Ancak bu değişkenlerin uygun değerleri her zaman bilinmez.

Türbülans modellerinin, denklemleri çözülebilmesi için birer tamamlayıcı denklem oldukları ve bunların büyük ölçüde deneysel sabitlere dayalı yaklaşımlar olduğunu vurgulamak gerekir. Bu modeller, düz plaka sınır tabakaları, kayma tabakaları ve izotropik olarak bozulan türbülans aşağı akımı perdesi benzeri basit akış alanlarından elde edilen deneysel verilerin yardımı ile kalibre edilir. Ne yazık ki hiçbir türbülans modeli genel değildir. Diğer bir ifade ile kalibrasyon için kullanılan bu akışlara benzer akışlarda iyi sonuç verseler de, özellikle akış ayrılmasının ve tutunmasının ve/veya büyük ölçekli daimi olmama durumunun söz konusu olduğu genel türbülanslı akış alanlarına uygulandığında fiziksel olarak doğru çözüm vermeleri garanti değildir.

Türbülanslı akışa ait HAD çözümleri, yalnızca hesaplamalarda kullanılan türbülans modelinin uygunluğu ve geçerliliği kadar iyidir. Hesaplama ağının ne kadar ince olduğuna bakılmaksızın bu ifadenin doğru olacağının da altını çizelim. Laminer akışlarda HAD'yi uygularken ağı inceltmek suretiyle simülasyonun fiziksel doğruluğunu çoğunlukla iyileştirebiliriz. Türbülans modellerini kullanan türbülanslı akış HAD analizleri için durum böyle değildir. İnceltilmiş bir ağ daha iyi sayısal

doğruluk sağlarken, çözümün fiziksel doğruluğu her zaman türbülans modelinin fiziksel doğruluğu ile sınırlı kalır (Çengel ve Cimbala, 2008).

3.1.2.1. Türbülans modelleri

Türbülansı tam olarak tanımlamak oldukça güçtür ancak pek çok mühendislik problemi türbülanslı akış koşullarını içerir. Türbülanslı akışta tüm hız komponentleri zamana bağlı değişkenlik gösterir. Akış çalkantılı ve kararsız bir karakter sahiptir. Akıştaki bu kaotik, lineer değişim göstermeyen yapı sayısal modelleme açısından pek çok güçlüğü içinde barındırır. Bugün için türbülanslı akış problemlerinin birçoğunu direkt olarak çözmek mümkün değildir. Direkt çözümünün yokluğunda türbülanslı akışı karakterize edebilmek için türbülans modelleri geliştirilmiştir.

Realizable k-ε modeli: Fluent standart k-ε, RNG k-ε ve k-ε Realizable olmak üzere üç farklı k-ε versiyonu sunar. Bunlar içinde k-ε Realizable modeli Fluent yazılımına özgü bir türbülans modelidir. k-ε türbülans modeli endüstride ve akademik çalışmalarda oldukça yaygın olarak kullanılan bir türbülans modelidir. Çok iyi incelenmiş ve pek çok problemde kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Realizable k-ε modeli en son geliştirilmiş k-ε versiyonudur ve Shih (Fluent User Guide 2005) tarafından önerilmiştir. Standart k-ε modelinden ayrılan temel iki özelliğinde ilki türbülans viskozitesinin hesaplanması için yeni bir formülasyon içermesi. Aslında Realizable k-ε modeli türbülans viskozitesinin hesaplanması için aynı formülasyonu kullanır ancak Denklem 3.10'da tanımlanan C_μ değerini sabit değil değişken olarak alır. Bunun nedeni bazı durumlarda gerçektışı (unrealizable) bir şekilde k-ε formülasyonundaki Reynolds stres terimlerinin negatif olmasıdır. Bu durum C_μ , akışkanın lokal şekil değiştirme ve rotasyonun bir fonksiyonu olacak şekilde modellenerek aşılır böylece gerçektışı reynolds stres terimlerinin oluşması önlenir. Realizable k-ε modelinin ikinci özelliği ε 'nın taşınımı için standart ve RNG k-ε modellerinden tamamıyla farklı bir formülasyon içermesidir. Bu ikinci özellik bazı problemlerde (jet akışı gibi) üstünlük sağlasa da genel anlamda daha az denenmiş bir türbülans modelidir.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 3.10$$

Denklem 3.10'daki μ_t terimi (türbülans viskozitesi) k ve ε 'dan türetilir. C_μ kapsamlı deneysel çalışmalar sonucu bulunmuş sabit sayı, ρ yoğunluktur.

Reynolds stres model (RSM): Fluent'in sağladığı en ayrıntılı türbülans modelidir. Taşınım denklemleri salınımsal özellikli momentum denklemlerinin çarpımının ortalamasından türetilir. İzotropik eddy viskosite varsayımı kullanılmaz, RSM yitim hızı için bir denklem ile birlikte, Reynolds gerilmeleri için taşıma denklemleri çözerek Reynolds-ortalama Navier-Stokes denklemleri kapatır. Bu beş ek transport denklemi iki boyutlu (2B) akışlar için gerekli olan ve yedi ek transport denklemi üç boyutlu (3B) için çözülmesi gerektiği anlamına gelir. Bir denklemlilik ve iki denklemlilik modellere göre RSM'nin karmaşık akışları daha doğru bir şekilde modelleme potansiyeline sahiptir. RSM her zaman ek hesaplama süresi gerektirecektir, akışın tüm durumlarında adı geçen basit modellerden açıkça üstün sonuçlar olmayabilir (Fluent User's Guide, 2003).

3.1.2.2. Sayısal çözüm teorisi

Fluent programı seçilen denklemlerin çözümünde sonlu hacim yaklaşımını kullanır. HAD gibi böyle nümerik modelleme teknikleri akış ve ısı transferi problemlerini simüle etmek için güçlü bir araçtır. Kütlenin korunumu veya süreklilik denklemi, momentumun korunumu veya Navier–Stokes transport denklemi ve enerjinin korunumu denklemi nümerik olarak çözülebilir. Kütlenin korunumu ya da süreklilik denklemi aşağıda gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad 3.11$$

Denklem 3.11'de ρ gaz yoğunluğu, v gaz hızını ifade eder. S_m kaynak terimi ise ayrılmış ikinci fazdan (sıvı damlacıklarının buharlaşması nedeniyle gibi) sürekli faza ilave edilen kütle ve herhangi bir kullanıcı tarafından tanımlanmış kaynaktır. Denklem 3.11'de kütle korunum denkleminin genel formudur ve sıkıştırılabilir akışlarda olduğu kadar sıkıştırılamaz akışlarda da geçerlidir. İki boyutlu eksenel simetrik geometriler için süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad 3.12$$

Denklem 3.12’de x eksenel koordinat, r radyal koordinat, v_x eksenel hız, and v_r radyal hızdır.

Bir atalet (ivmelenme olmaksızın) referans çerçevesinde momentumun korunumu;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \vec{F} \quad 3.13$$

Denklem 3.13’te p statik basınç, $\bar{\bar{\tau}}$ gerilim tensörü (aşağıda tanımlandı), ve $\rho \vec{g}$ ve $\vec{F}$ sırasıyla yerçekimi kuvveti ve dış kuvvettir (ayrık faz ile etkileşimden yükselme gibi). $\vec{F}$ daima poroz ortam ve kullanıcı tanımlı kaynaklar gibi başka model bağımlı kaynak terimler içerir. Gerilim tensörü Denklem 3.14’teki gibi ifade edilir.

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad 3.14$$

Burada μ moleküler viskozite, I birim tensör, ve sağ taraftaki ikinci terim hacim genişleme etkisidir.

İki boyutlu eksenel simetrik geometriler için eksenel ve radyal momentum korunum denklemleri Denklem 3.15 ve 3.16’da verilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad 3.15$$

ve

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad 3.16$$

Burada;

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad 3.17$$

ve v_z girdap (swirl) hızıdır.

Sıkıştırılabilirlik etkileri ile yüksek hızlardaki gaz akışlarında ve/veya büyük basınç değişimlerinde karşılaşılır. Akış hızı gazın ses hızına yaklaştığı ya da aştığı zaman veya sistemde basınç değişimi ($\Delta p=p$) büyük olduğu zaman basınçla gaz yoğunluğunun değişimi akış hızı basıncı ve sıcaklığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Realizable k - ε modele göre türbülans kinetik enerjisi k ve türbülans yitim hızı ε ifadeleri sırasıyla Denklem 3.18 ve 3.19 aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad 3.18$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad 3.19$$

Burada G_k ortalama hız gradyanları nedeniyle türbülans kinetik enerji k dan türetilir, G_b buoyance sayesinde türbülans kinetik enerji k dan elde edilir, Y_M sıkıştırılabilir türbülans akışta titreşim genişlemesinden elde edilir, μ_t türbülans viskozite, S_k ve S_ε kaynak terimler. C_2 ve $C_{1\varepsilon}$ sabitler. σ_k ve σ_ε türbülans Prandtl sayısı k ve ε için. Ampirik sabitler $C_{1\varepsilon}=1,44$, $C_2=1,9$, $\sigma_k=1,0$ ve $\sigma_\varepsilon=1,2$ 'dir.

Reynolds stres model (RSM) göre türbülans kinetik enerjisi k ve türbülans yitim hızı ε ifadeleri sırasıyla Denklem 3.20 ve 3.21 aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon (1 + 2M_t^2) + S_k \quad 3.20$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} [P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}] \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad 3.21$$

Sıkıştırılabilir akışlar için, ideal gaz kanunu Denklem 3.22'deki gibi ifade edilir;

$$\rho = \frac{P_{op} + p}{\frac{R}{M_w} T} \quad 3.22$$

Burada p_{op} işletme basıncı (operating conditions panelinde tanımlanır), p işletme basıncına göre bağıl lokal statik basınç, R üniversal gaz sabiti, ve M_w moleküler ağırlıktır. Sıcaklık T enerjinin korunum denkleminde hesaplanabilecektir.

Enerjinin korunum denklemin aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (H \vec{v}) = \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}} \vec{v}) - \nabla \cdot \vec{q} \quad 3.23$$

Denklem 3.23'te E toplam enerji, H entalpi ve $\vec{q}$ ısı akısı vektörü.

Sıkıştırılabilir akışlar tipik olarak akışın toplam basınç p_0 , toplam sıcaklık T_0 tarafınca karakterize edilir. İdeal gaz için bu büyüklükler Denklem 3.24, 3.25 ve 3.26'da verildiği gibi statik basınç ve sıcaklıkla ilişkilendirilebilir:

$$\frac{p_0}{p} = \exp \left(\frac{\int_T^{T_0} \frac{C_p}{T} dT}{R} \right) \quad 3.24$$

C_p için;

$$\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \right)^{k/(k-1)} \quad 3.25$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \quad 3.26$$

Hız (Mach sayısı) izentropik şartlar altında değişirken akış içindeki statik basınç ve sıcaklığın değişimini bu bağıntılar tanımlar.

Sıkıştırılabilir akışlar Mach sayısının değeri Denklem 3.27'de karakterize edilebilir :

$$Ma = v/c \quad 3.27$$

Burada, c gaz içindeki ses hızı Denklem 3.28'teki gibi hesaplanır:

$$c = \sqrt{kRT} \quad 3.28$$

ve k özgül ısıların oranıdır (C_p/C_v).

Sutherland viskozite kanunu iki ya da üç katsayılı kullanımıyla belirtilir.

İki katsayılı Sutherland kanunu;

$$\mu = \frac{C_1 T^{3/2}}{T + C_2} \quad 3.29$$

Denklem 3.29’da μ viskozite (kg/m-s), T statik sıcaklık (K), ve C_1 ve C_2 katsayılarıdır. Sıcaklık ve basıncın orta değerlerinde hava için $C_1 = 1,458 \times 10^{-6}$ kg/msK^{1/2}, and $C_2 = 110,4$ K’dir.

Üç katsayılı Sutherland kanunu;

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad 3.30$$

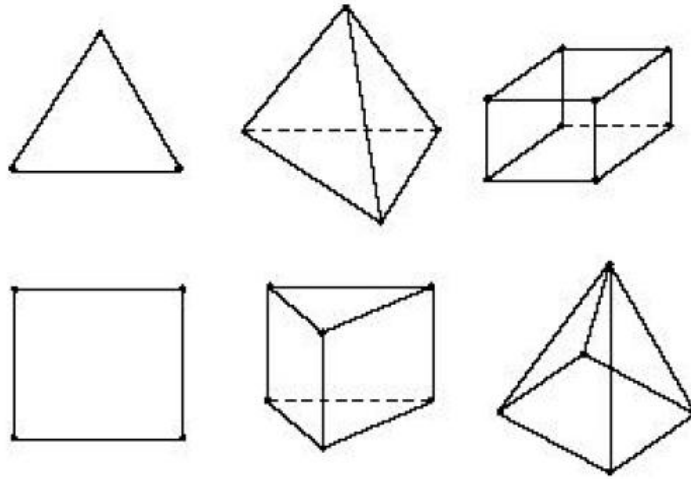
Denklem 3.30’da μ viskozite (kg/ms), T statik sıcaklık (K), μ_0 bir referans değer (kg/ms), T_0 bir referans sıcaklık (K), ve S ise gazın karakteristiği olan Sutherland sabiti olarak isimlendirilen bir efektif sıcaklık (K). Sıcaklık ve basıncın orta değerlerinde hava için, $\mu_0 = 1,7894 \times 10^{-5}$ kg/ms, $T_0 = 273,11$ K, and $S = 106,67$ K (Fluent User’s Guide, 2003).

3.1.2.3. Sonlu hacim yöntemi

Navier stokes denklemlerini sayısal olarak çözmek için sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve sınır eleman yöntemi gibi pek çok yöntem geliştirilmiştir. Sonlu hacim metodu akış hacmi ayrıklaştırılırken yapısal elemanlara (structured mesh) ihtiyaç duymaması diğer metotlara karşı bir üstünlük ve esneklik sağlar ve aynı zamanda yapısal elemanlarda çözüm için kullanılabilir. Her ne kadar bu özellik sonlu elemanlar yönteminde de mevcut olsa da sonlu hacim metodu kötü ayrıklaştırılmış ve üniform olmayan sayısal çözüm ağı geometrilerinde bile diğer metotlara nazaran daha iyi sonuç vermektedir. Bu aşamada Fluent yazılımının temel denklemlerin çözümünde kullandığı nümerik şemalar ve çözüm alanının ayrıklaştırılması üzerinde durulacaktır.

3.1.2.4. Çözüm alanının ayrıklaştırılması

Çözüm alanının ayrıklaştırılmasının anlamı akış hacminin tanımlanan sınır şartları içerisinde akışı tanımlayan denklemlerinin çözüleceği parçalara bölünmesidir. İki veya üç boyutlu çözüm alanları için sayısal ağ üretiminde genel olarak kullanılan elemanlar aşağıda örneklenmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Sayısal ağ üretiminde kullanılan eleman tipleri (Marshall and Bekker, 2003).

Sayısal çözüm ağının kalitesi çözümlerin kalitesine de etki eder. Pek çok uygulamada elde edilen sonuçlardaki sapmanın sebebi oluşturulan sayısal çözüm ağının yetersizliğidir. Fluent yazılımı birçok HAD kodu gibi kendi sayısal ağ üretme aracı olan Gambit yazılımını kullanır. Genel olarak sayısal ağın sıklığının çözümün hassasiyetini arttırdığı söylenebilir ancak buna paralel olarak çözüm süresi de uzayacaktır.

3.1.2.5. Akış denklemlerinin çözümünde kullanılan temel yaklaşımlar

Fluent temel denklemlerin çözümünde bütünleşik (coupled) ve ayrık (segregated) çözüm algoritması olmak üzere iki ayrı çözüm algoritması ile çalışmamıza izin verir. Her iki yaklaşımda sonlu hacim metodunu kullanarak çözüme ulaşılır ancak bu iki metod arasında bazı yöntem farklılıkları vardır (Fluent User's Guide, 2005).

Ayrık çözüm algoritması: Bu yaklaşım ile korunum denklemleri sıra ile çözülür. Korunum denklemleri lineer olmadığı için iterasyonlar yakınsama kriteri sağlanıncaya kadar devam ettirilir. İterasyon adımları şöyle sıralanabilir (Şekil 3.4).

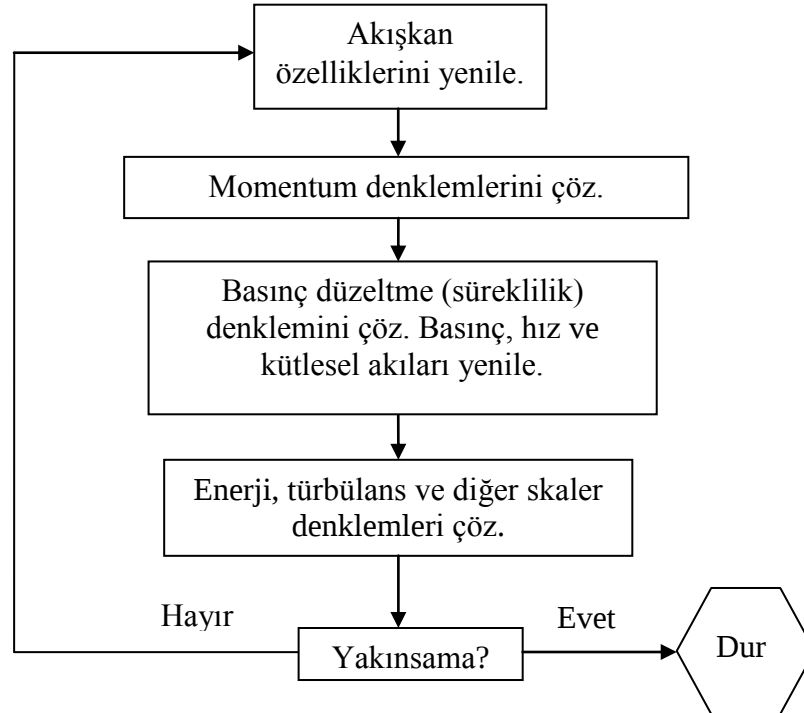
a) İlk adımda akışkan özellikleri bir önceki iterasyonun sonuçlarına göre yenilenir. Eğer iterasyona daha yeni başlanılmışsa yenileme başlangıç değerlerine göre yapılır.

b) Bir önceki iterasyona göre hesaplanmış hız alanını yenilemek için momentum denklemleri basınç ve kütle akıları için mevcut değerler kullanılarak çözülür.

c) İkinci adımda elde edilen hız değerleri lokal olarak süreklilik denklemi ile uyuşmayabilir, basıncın düzeltilmesi için süreklilik ve lineerleştirilmiş momentum denklemlerinden poisson tipi bir denklem türetilir. Bu basınç düzeltme denklemi basınç, hız alanı ve kütle akılarda gerekli düzeltmelerin yapıp süreklilik denkleminin sağlanması için çözülür.

d) Türbülans, enerji ve radyasyon gibi skaler büyüklükler için uygun denklemler diğer değişkenlerin önceden yenilenmiş değerleri kullanılarak çözülür.

e) Yakınsama kontrolü yapılır eğer yakınsama sağlanmışsa iterasyon sonlandırılır.



Şekil 3.4. Ayrık çözüm algoritması (Fluent User's Guide, 2005).

Bütünleşik çözüm algoritması: Bu yaklaşım ile süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aynı anda, türbülans ve radyasyon gibi skaler büyüklükler ise korunum denklemlerinden sonra çözülür. Yine ayrık çözüm algoritmasında olduğu gibi iterasyonlar aşağıdaki sırayla yakınsama sağlanıncaya kadar sürdürülür (Şekil 3.5).

a) İlk adımda akışkan özellikleri bir önceki iterasyonun sonuçlarına göre yenilenir. Eğer iterasyona daha yeni başlanılmışsa yenileme başlangıç değerlerine göre yapılır.

b) Süreklilik, momentum, enerji ve konsantrasyon denklemleri aynı anda çözülür.

c) Türbülans, enerji ve radyasyon gibi skaler büyüklükler için uygun denklemler diğer değişkenlerin önceden yenilenmiş değerleri kullanılarak çözülür.

d) Yakınsama kontrolü yapılır eğer yakınsama sağlanmışsa iterasyon sonlandırılır.



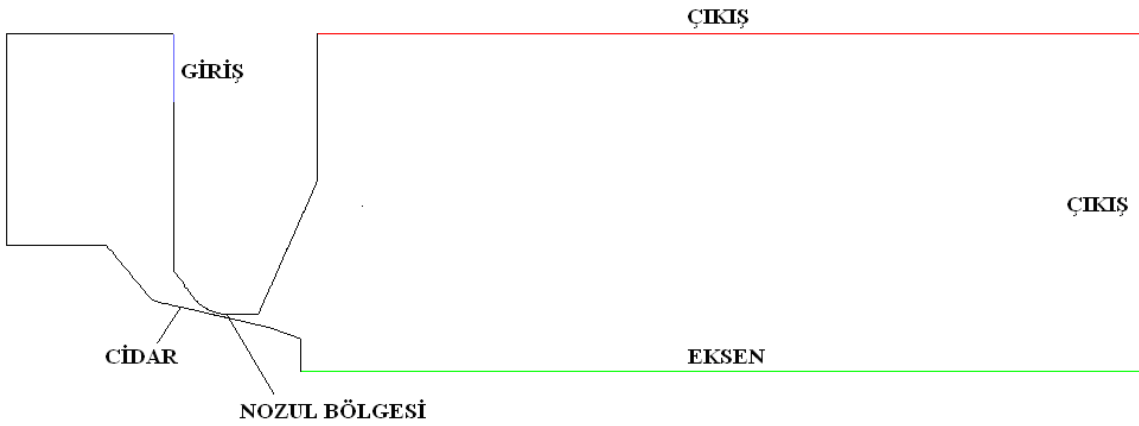
Şekil 3.5. Bütünleşik çözüm algoritması (Fluent User's Guide, 2005).

3.1.3. Nozul HAD modelleme yaklaşımı

Nozulun modellenmesi hesaplanmalı akışkanlar dinamiği (HAD) alanında bir paket program olan Fluent 6.3.26 ile yapılmıştır . Nozul iki boyutlu ve aksel simetrik olmak üzere Gambit 2.4.6 programında çizilmiştir.

3.1.3.1. Model geometrisinin oluşturulması

Model geometrisinin oluşturulmasında daha önce toz üretiminde kullanılan nozul ölçüleri esas alınmıştır. İki boyutlu eksenel simetrik geometri çözüm hassasiyeti açısından bakıldığında iki boyutlu ve üç boyutlu geometrilere göre daha avantajlıdır. Çünkü diğer geometrilere göre grid sayısının azlığı zaman tasarrufu sağlayacaktır. Ayrıca diğer geometrilere göre alan başına düşen daha fazla grid sayısına ulaşılmasına olanak sağlamaktadır. Böylece çözümün grid sayısından bağımsız olduğu optimum grid sayısının tespit edilmesi bu geometrik yapı ile daha uygun tespit edilmiş olacaktır. Şekil 3.6’da iki boyutlu eksenel simetrik geometri ve sınır bölgeleri gösterilmiştir.

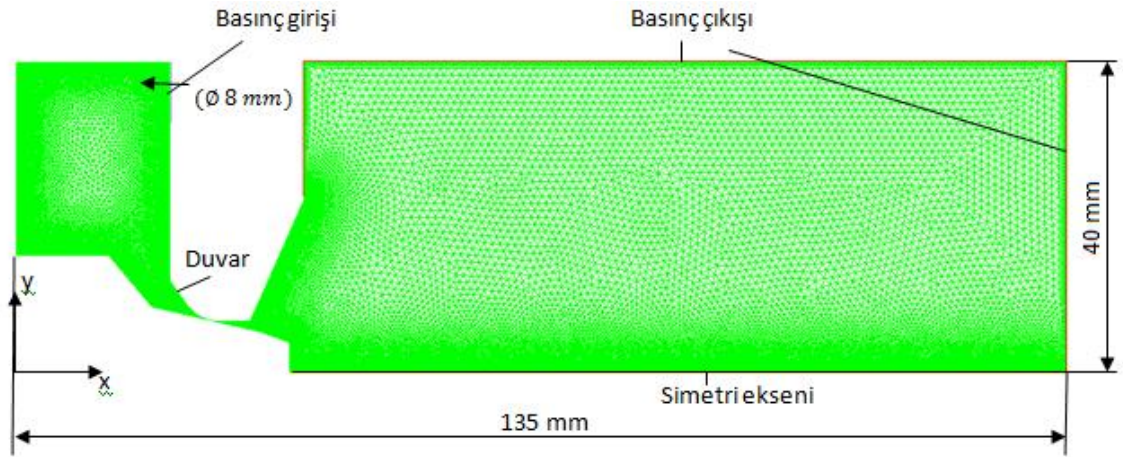


Şekil 3.6. HAD model geometrisi ve sınır bölgeleri.

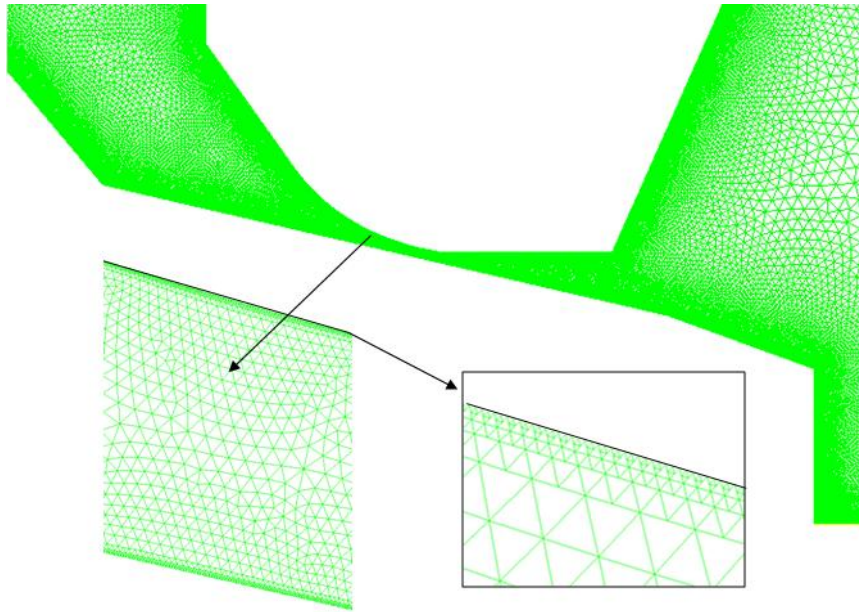
3.1.3.2. Model geometrisinde ağ yapısının oluşturulması

Atomizasyon nozul sisteminin simetrik şekle sahip olduğu için hesaplama iki boyutlu eksenel simetrik olarak çözülmüştür. Model geometrisinin oluşturulmasında daha önce toz üretiminde kullanılan nozulun ölçüleri esas alınmıştır. Nozul iki boyutlu ve eksenel simetri olmak üzere Gambit 2.4.6 programında çizilmiş ve ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 3.7). Model geometrisinde sayısal çözüme olanak veren ağ yapısının oluşturulması aşamasında farklı hücre sayıları oluşturulmuştur. Burada amaç optimum hücre sayısını tespit etmektir. Yani sayısal çözümün belli bir hücre sayısından sonra değişmeyeceği ispatlanmalıdır. Bu amaçla farklı ağ yapıları oluşturulmuştur. Farklı ağ yapıları ile yapılan çözümlerde nozul uç basıncının deneysel değerlere olan yakınlığına bakılmıştır. Geometride ağ yapısı oluşturulurken dikkat edilecek diğer bir hususta geometrinin en dar bölgesi olan nozul bölgesinin ağ yapısını oluşturmaktır. Bu alanda yapılacak yetersiz hücre sayısı çözümün hassasiyetini çok etkileyecektir. Şekil

3.8’te nozulun yakınsak-ıraksak bölgesinin grid yapısı ve hesaplanan alan gösterilmiştir. Ayrıca yine çözümün hassasiyetini etkileyecek diğer bir noktada cidardaki ağ yapısıdır. Bu nedenle cidarlara yakın bölgeler daha sık ağ yapısı oluşturulur. Sık ağ yapısının iyi olacak diğer bir bölge ise akışın olduğu bölgedir.



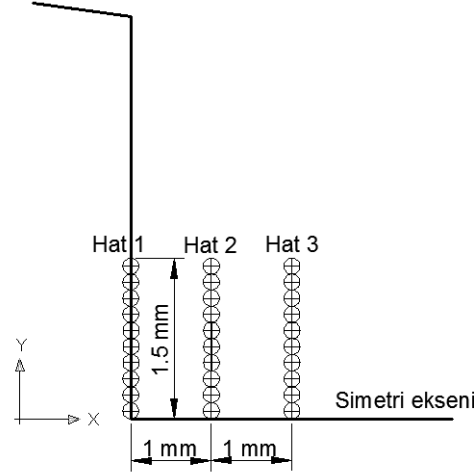
Şekil 3.7. Ağ yapısı ve sınır şartları.



Şekil 3.8. Kritik bölgelerdeki ve cidarlardaki ağ yapıları.

Nozulun uç basıncını ölçmek için Şekil 3.9’da gösterildiği gibi nozulun ucundan itibaren 1 mm ara ile 1,5 mm uzunluğunda üç hat kullanılmıştır. Her bir hat üzerine on adet ölçüm noktası konulmuştur. Ölçüm noktalarından elde edilen tüm basınç

verilerinin ortalaması nozul uç basıncı olarak kabul edilmiştir. Metal akış borusunun iç çapı 3 mm olduğundan, simülasyon basınç değerlerini elde etmek için hat uzunlukları y-ekseni yönünde 1,5 mm alınmıştır. Bu çalışmada incelenen tüm durumlar için üçgen ağ yapısı tercih edilmiştir.



Şekil 3.9. HAD modellemede nozul uç basınç değerlerini alınmasında kullanılan hatların pozisyonu.

Nozulun en dar bölgesi boğaz bölgesidir. Akışı daha iyi analiz edebilmek için öncelikle nozul bölgesinin daha sonra atomizasyon gazının girdiği bölge ve kule bölgesinin ağ yapısı oluşturulmuştur. Bunun nedeni dar olan bölgeden, genişleyen bölgeye doğru ağ yapısında düzgün bağlantı kurulması amaçlanmaktadır. Düzgün düğümlenmiş ağ, çözüm sürecini ve dolayısıyla yakınsamayı kısaltacaktır. Simülasyon çalışmalarında öncelikle kaba ağ yapısı oluşturulur ve çözüm yapılır. Kaba ağ yapısının yaklaşık 3 katı olacak şekilde rafine edilerek (adapt yapılarak) ağ yapısında çözüm gerçekleştirilir. Simülasyonun ağdan bağımsızlığını kanıtlamak için ağ yapısı tekrar adapt edilir ve hücre sayısı üç katı olacak şekilde çözüm yapılır. Deneysel verilere en çok yaklaşan ağ yapısında simülasyon gerçekleştirilir.

3.1.3.3. Sayısal çözüm

Akışkan olarak azot gazı, yoğunluk için ideal gaz kanunu ile sıkıştırılabilir gaz kabul edilmiş ve NIST verilerine göre gaz sabitleri Çizelge 3.1’de verilmiştir (NIST). NIST verilerine göre azot gazının sıkıştırılabilirlik faktörü 11 atmosfer basıncında ve 300

K sıcaklıkta 0,998'dir. Bu durumda ideal gaz kanununu bu simülasyonda kullanmak makuldür.

Çizelge 3.1. Sayısal çözümleme için azot gazının özellikleri (NIST)

Fiziksel Özellikler	Değer
Yoğunluk (kg/m^3)	1,138
C ($\text{J}/(\text{kg.K})$)	1040,67
Termal iletkenlik ($\text{W}/(\text{m.K})$)	0,0242
Referans viskozite ($\text{kg}/(\text{m.s})$)	$1,663 \times 10^{-5}$
Referans sıcaklık (K)	273,11
Efektif sıcaklık (K)	106,67
Moleküler ağırlığı ($\text{kg}/(\text{kg.mol})$)	28,0134
Standart hal entropisi ($\text{J}/(\text{kg.mol.K})$)	191494,8

Giriş bölgesi “pressure inlet” sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Buradan azot gazı girmektedir. Deneysel verilerle kıyaslanmak üzere deneylerdeki farklı giriş basınç değerleri için (1,0 - 1,3 - 1,7 - 2,2 ve 2,7 MPa) model çalışmalarının da aynı basınç değerleri ile yapılması gerekecektir. Bu yüzden Fluent programında giriş şartı olarak bu basınç değerleri tanımlanmıştır. Önce 1,0 MPa basınç değerinde çalışılmıştır. Gaz girişi için “Pressure inlet” sınır şartı seçilerek “gauge total pressure” 10 bar (10^6 Pa), “turbulent viscosity ratio” ve “intensity” 10 olarak tanımlanmıştır. Çıkış için “pressure outlet” sınır şartı seçilmiştir. Değer olarak bu bölgeler atmosfere açıldığı için atmosfer basıncı (101325 Pa) girilmiştir. Çıkış için diğer değerler programdaki sabit değerler kullanılmıştır. Orta eksen çizgisi “eksen” olarak tanımlanmıştır. Bu üç sınır bölgesi dışındaki tüm bölgeler cidar olarak tanımlanmıştır. Bu bölgeler için Fluent programında sıcaklık şartı olarak 300 K alınmıştır.

Seçilen tüm modellerde yapılan çalışmaya yakın uluslararası makalelerdeki seçilen modeller göz önünde bulundurulmuştur. Bu aşamada programın kullanım kitaplarından problemimizle ilgili örnekler ve seçilen modeller incelenmiştir. Bu incelemelerin ışığında problemimize uygun modellerin seçilmesine özen gösterilerek

aşağıda belirtilen modeller seçilmiştir. Oluşturulan geometri için programda 2B eksenel simetrik çözüm (2D axisymmetric) seçilmiştir. Programın çözücü tipi seçiminde seçilenler ise basınca dayalı (pressure based), tam yaklaşım (implicit) ve kararlı (steady) çözümdür. Çözüm algoritması olarak da SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Akışkan olarak azot gazı seçilmiş ve ideal gaz olarak tanımlanmıştır. Viskozite panelinde ise “sutherland law” tanımlanmıştır. Ayrıca akış modelleri içinde programın içindeki mevcut türbülans modellerinden “Realizable k- ϵ ” ve “ Reynolds Stres Model” modelleri seçilerek ayrı ayrı çözüm gerçekleştirilmiş ve deneysel veriler ile kıyaslanmıştır.

Çözüme başlama aşamasında programın kullanıcı kitabından oldukça yararlanılmıştır (Fluent user guide, 2003). Yüksek basınçlı çalışmalarda çözüme başlamada önerilen yolların kullanılması önem arz etmektedir. Aksi takdirde çözüme ulaşılamamaktadır. Bunun için özellikle 200 iterasyonda kararlı bir yakınsama sağlanması için enerji denklemleri seçilmemiştir. Başlangıç değeri için hız değeri, programın hesapladığı değerden daha düşük girilmiştir. Ayrıca rahatlatma faktörleri de (under-relaxation factor) basınç için 0,3, momentum için 0,3, yoğunluk için 0,3, enerji için 0,9 seçilmiştir ve diğerleri ön tanımlı değerler olarak aynı kalmıştır. Yakınsamada kararlı bir görüntü sağlandıktan sonra (100-200 iterasyon sonra) enerji denklemi açılmıştır ve basınç için rahatlatma faktörü 0,7 olarak değiştirilmiştir. Realizable k- ϵ model için çözümde; öncelikle birinci dereceden akış yönü (first order upwind) seçilmiştir ve sonra ikinci dereceden akış yönü (second order upwind)” denklemleri seçilerek eski çözüm üzerinden tekrar çalışma (iterasyon) yaptırılarak son çözüm sağlanmıştır. İkinci dereceden hassasiyetle çözüm arandığında bu yaklaşım tercih edilir. Bu yaklaşım birinci dereceden akış yönü metodunun geliştirilmiş halidir. RSM model için yakınsamada kararlı bir görüntü sağlandıktan sonra (200 iterasyon sonra) enerji denklemi açılmıştır. Çözüm için birinci dereceden akış yönü (first order upwind) seçilmiştir. RSM ayrıklaştırma çözümünde ikinci dereceden akış yönü (second order upwind) altında simülasyonun yakınsaması oldukça zordur (Gimbun et al., 2005). RSM modelin çözümünde birinci dereceden akış yönü kullanılmıştır. Yakınsama kriteri olarak ise her iki model içinde, enerji denkleminin 10^{-6} hata oranı esas alınmıştır. Ayrıca giriş ve çıkış arasındaki kütledebiler arasındaki farkın da 10^{-6} oranında bir farka ulaşması yakınsama kriteri olarak göz önüne alınmıştır.

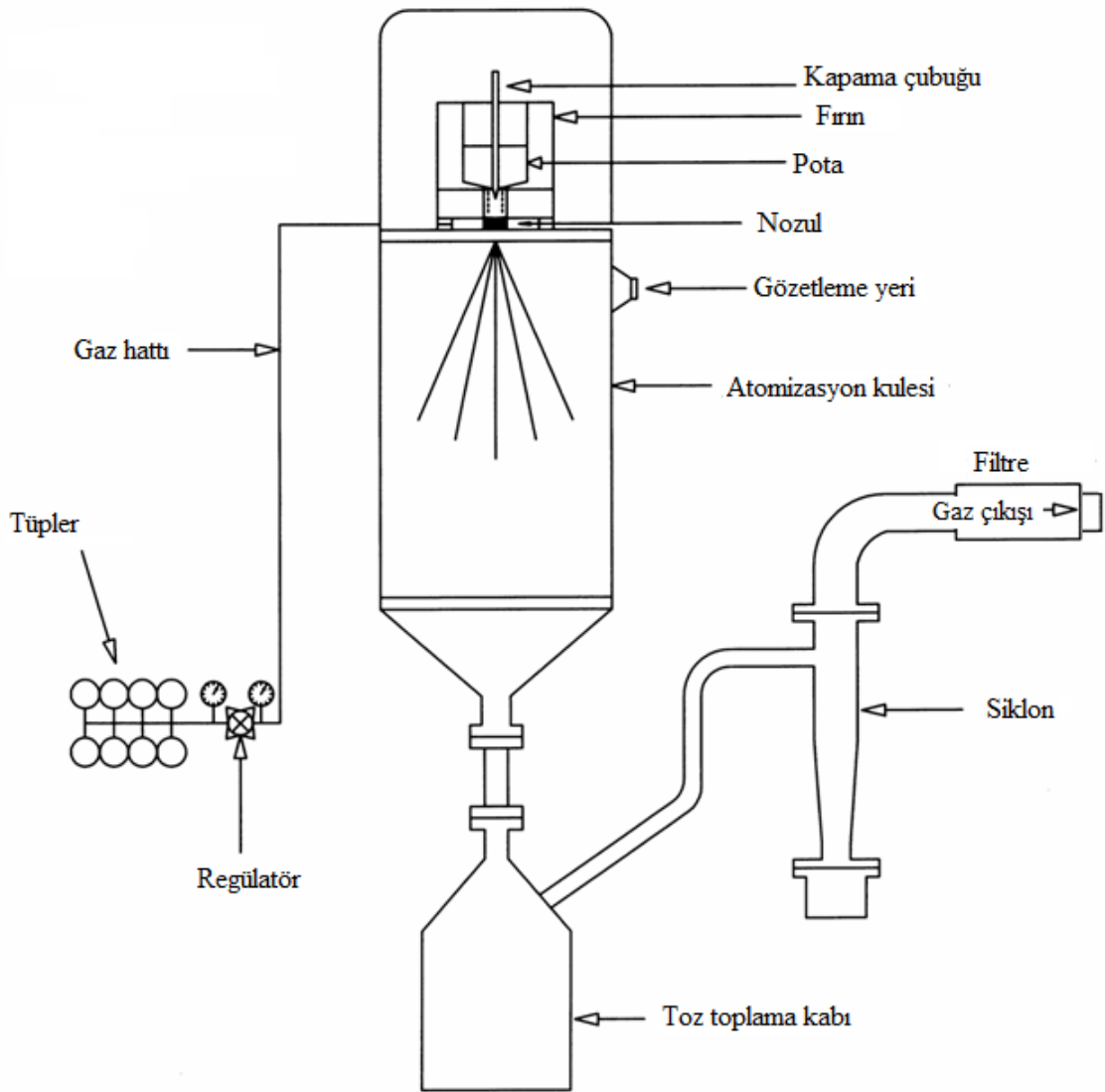
3.2. Deneysel Yöntem

Deneylerde kullanılan gaz atomizasyon ünitesinin genel görünümü Şekil 3.10'da ve şematik görünümü Şekil 3.11'de verilmiştir. Dumlupınar Gaz Atomizasyon ünitesi altı ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler:

1. Kontrol Sistemi
2. Gaz Sistemi.
3. Ergitme.
4. Nozul.
5. Atomizasyon Kulesi.
6. Toz Tutma Bölümü.



Şekil 3.10. Dumlupınar Gaz Atomizasyonu Ünitesinin genel görünümü.



Şekil 3.11. Dumlupınar Gaz atomizasyon ünitesinin şematik resmi.

3.2.1. Kontrol sistemi

Kontrol panosu üzerine yerleştirilen göstergeler ve anahtarlar sayesinde atomizasyon işlem değişkenlerinin gözlenmesi ve kontrolü yapılmaktadır. Kontrol panosu ve deney öncesinde kule içerisinden alınan görüntü Şekil 3.12’de verilmiştir. Kule gözetleme penceresine yerleştirilmiş bir video kameradan alınan görüntü televizyondan takip edilerek atomizasyon işlemi gözlemlenmektedir.



Şekil 3.12. Kontrol panosu ve deney öncesi hazırlıktan bir görüntü.

3.2.2. Gaz sistemi

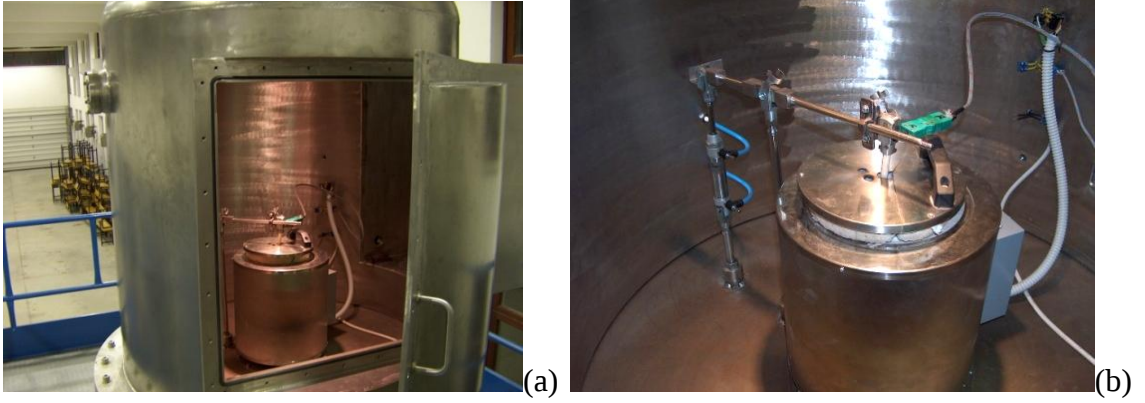
Atomizasyon gazı olarak azot gazı kullanılmıştır. Yapılan deneylerde azot gaz kaynağı olarak 200 bar işletme basıncına sahip paralel olarak bağlı 12 adet basınçlı çelik tüp paleti (Şekil 3.13) kullanılmıştır. Atomizasyon basıncının ayarlanması, tüplerin çıkışına yerleştirilen bir regülatör ile yapılmıştır. Regülatör çıkışına bir küresel vana, vanadan sonra atomizasyon basıncını ölçmek amacıyla bir basınç algılayıcısı (pressure transmitter) yerleştirilmiştir. Nozula girişte en son noktada okunan dijital basınç değeri atomizasyon gaz basıncı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.13. Gaz kaynağı olarak kullanılan 12'li azot paleti.

3.2.3. Ergitme

Ergitme işlemi atomizasyon ünitesi üzerinde bulunan ergitme odası içerisine yerleştirilen rezistanslı bir fırın ile gerçekleştirilmiştir. Ergitme odası kapatılarak içeriye basınç uygulanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Fırın içerisine silisyum karbürden imal edilmiş bir pota yerleştirilmiştir. Fırının üst kapağı sıvı metalin sıcaklığını ölçmek için kullanılacak ısıl çiftin geçebileceği şekilde delinmiştir. Böylelikle sıvı metal içerisine daldırılan ısıl çift yardımıyla sıvı metal sıcaklığı hassas bir şekilde ölçülmüştür (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Ergitme odası (a) ve ergitme fırının (b) görünüşü.

Metal akış kontrolü pota içerisine yerleştirilen açma-kapama çubuğu ile gerçekleştirilmiştir. Pota içindeki deliği kapatacak çapta bir seramik boru, pnömatrik olarak kontrol edilen bir mekanizma yardımıyla hareket ettirilerek sıvı metal akışı sağlanmıştır. Deneysel çalışmanın çoğunda sahip olduğu düşük ergime sıcaklığı ve düşük yüzey gerilmesinden dolayı kalay atomize edilmiştir. Ayrıca gümüş amalgam, Etial 141, AA 7075 ve AA 2014 alüminyum alaşımları gibi farklı malzemelerinde atomizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.4. Nozul

Daralan genişleyen geometrili yakından eşlemeli sisteme uygun olarak tasarlanmış ve imal edilmiş nozulun fotoğrafı Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15. Tasarlanarak imal edilmiş nozul resmi a) alttan ve b) üstten görünüşü.

3.2.5. Atomizasyon kulesi

Atomizasyon işleminin gerçekleştiği bölümdür. Kule paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Kule üzerinde atomizasyon işlemini görüntüleyebilmek için üç adet gözetleme penceresi mevcuttur.

3.2.6. Sistem temizliği ve toz tutma

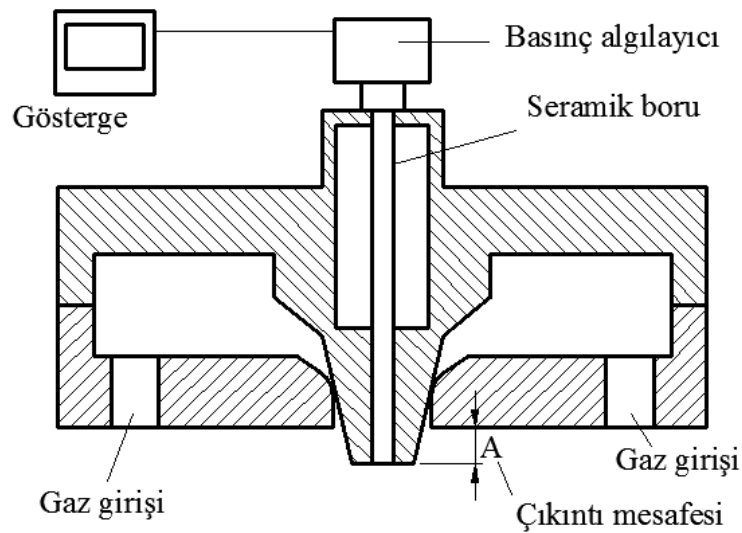
Toz toplama kabı (Şekil 3.16) ünitenin düşey olarak en alt kısmına yerleştirilmiştir. Toz toplama kabının iç kısmına tozların soğumasını hızlandırması amacıyla bakır plaka yerleştirilmiştir. Kule içerisindeki gazı dışarıya tahliye ederken içerisindeki tozları tutmak amacıyla siklon yerleştirilmiştir. Her deney sonrasında toz toplama kapları ve ünitenin alt kısmı sökülerek tozlar alınmış ve kulenin iç yüzeyleri temizlenerek yeni bir deney için tekrar kapatılmıştır.



Şekil 3.16. Toz toplama kabı ve siklonun görünümü.

3.2.7. Sıvı metal akış borusu uç basınç ölçümü

Atomizasyon işleminin kararlı bir şekilde gerçekleşebilmesi için nozul içerisine yerleştirilen sıvı metal akış borusu uç noktasında meydana gelen basınç önemlidir. Metal ile atomizasyon sırasında bu basıncın ölçümü mümkün olmadığından, sadece atomizasyon gazı verilerek uç basınç ölçümleri yapılır. Bu amaçla kurulmuş düzenek Şekil 3.17’de gösterilmiştir.

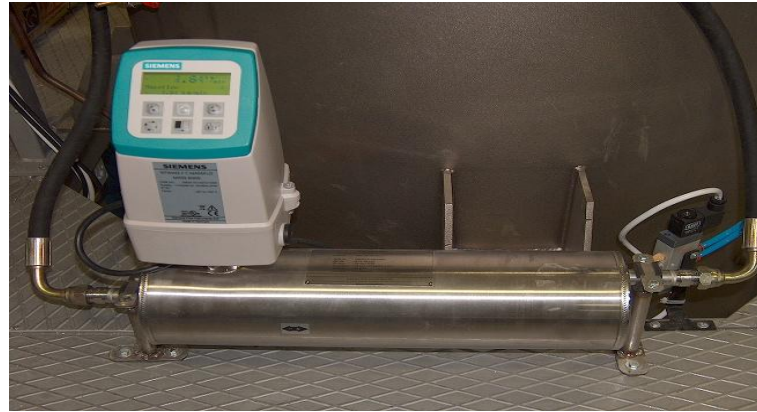


Şekil 3.17. Daralan genişleyen geometrilili nozulun şematik gösterimi ve metal akış borusu uç basıncının ölçüm sistemi.

Burada metal akış borusunun üst tarafına yerleştirilen bir basınç algılayıcısından (pressure transmitter) alınan sinyaller sinyal alıcı tarafından mbar değerine çevrilerek okunmaktadır. Farklı atomizasyon basınçlarında ölçülen değerler kaydedilerek uç basınç grafikleri çizilmiştir.

3.2.8. Gaz akış debisinin ölçümü

Gaz atomizasyonu işleminde ekonomiklik önemli bir parametredir. Bu parametre üretilen toz için harcanan gazın debisini ifade eder. Kütlesel debi ölçümleri SIEMENS marka Sitrans F C Massflo Mass 2100 tipi ölçüm cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Kütlesel debi ölçüm cihazının fotoğrafı.

3.2.9. Metal akış debisinin ölçümü

Sıvı metal debisini doğrudan belirlemek gaz debisini belirlemek kadar kolay değildir. Laboratuarlarda olduğu gibi endüstride de sıvı metal debisi, genel olarak potaya konulan metalin kütlesinin test süresine bölünmesiyle hesaplanmaktadır. G/M debi oranı yukarıdaki açıklanan değerlerin oranlanması ile bulunmuştur. Toz boyutu ve dağılımı gibi toz özellikleri, esas olarak gaz/metal debisi oranı tarafından kontrol edilir (Le et al., 1999). Yapılan atomizasyon deneylerinde işlem kamera ile görüntülenerek kaydedilmiştir. Metal akış debisi süre ile ilgili olduğu için sıvı metal akışının başlangıcı ile sonu arasındaki süre ve pota içersine yerleştirilen metal miktarı göz önüne alınarak metal akış debisi hesaplanmıştır.

3.2.10. Toz boyut analizi

Atomize edilmiş tozların boyut ölçümleri, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Prof.Dr. Süleyman SARITAŞ Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan, Malvern Mastersizer E lazer parçacık boyutu ölçüm cihazında yapılmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Malvern Mastersizer E partikül boyutu ölçme cihazı.

Toz boyutu ve dağılımının belirlenmesinde kullandığımız Malvern Mastersizer E lazerle boyut ölçme cihazı, hem zaman açısından, hem de $45\ \mu\text{m}$ 'den küçük boyutlarda elek analizine güvenilmemesi sebebiyle ölçümlerde büyük bir kolaylık getirmiştir. Genellikle 300 mm odaklama uzunluğuna sahip lensle ölçümler yapılmıştır. (Uslan, 1999).

Atomizasyon işlemi yapılmış saf kalay, gümüş amalgam, Etial 141, AA 7075 ve AA 2014 alüminyum alaşım tozları $150\ \mu\text{m}$ 'lik (100 meş) eleklerle elendikten sonra elek altı tozların boyut ölçümü yapılmıştır. Ölçümler esnasında taşıyıcı ortam olarak saf su kullanılmıştır.

3.2.11. Tozların şekil ve yüzey morfolojilerinin tespiti

Tozların şekil ve yüzey morfolojileri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektronik Mikroskobu Görüntü Analiz Birimi'nde bulunan JEOL JSM 5600 LV tipi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. ESOGÜ SEM cihazı

BÖLÜM 4

4. BULGULAR ve DEĞERLENDİRME

4.1 HAD Sonuçları İle Deneysel Verilerin Karşılaştırılması

4.1.1. Reynolds stres modelinin referans geometriye uygulanması

Mühendislik probleminin HAD yardımıyla çözülmesinde seçilen modellerin uygunluğunun tespiti için HAD sonuçlarının deneysel verilerle kıyaslanması gerekir. Bu çalışmada simülasyonun doğruluğunu kontrol etmek için Ünal'ın deneysel verilerinden yararlanılmıştır (Aksoy and Ünal, 2006), (Ünal, 2006, 2007) ve (Aydın and Ünal, 2011).

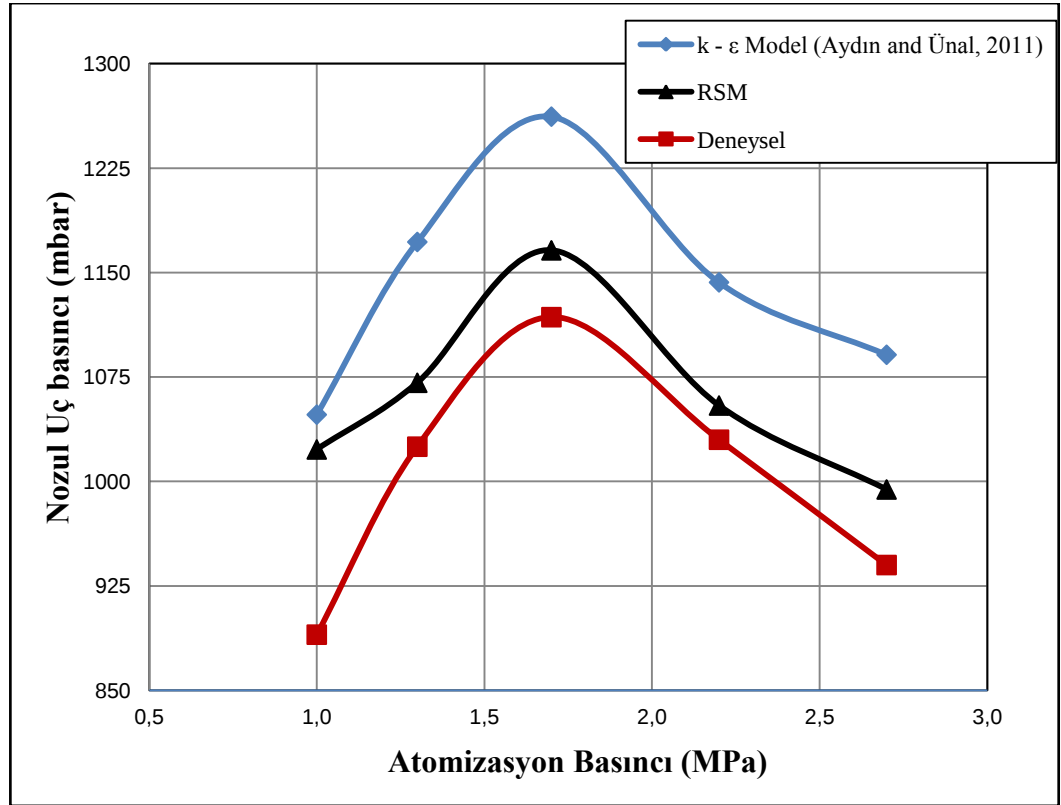
Aydın and Ünal (2011) yaptıkları çalışmada HAD analizi ile nozuldaki gaz akış davranışını Realizable $k - \epsilon$ modeli kullanarak deneysel veriler ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın başında HAD analiz için referans alınan çalışmadaki nozul geometrisi ve ağ yapısı esas alınarak RSM uygulaması yapılmıştır. Başlangıç çalışması olarak 334917 hücre sayısı oluşturularak çözüm yapılmıştır. RSM analiz ile çözüm sonrasında elde edilen veriler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı atomizasyon basınçlarında deneysel nozul uç basınç ve Reynolds Stres Model sonuçları.

Türbülans Model	Reynolds Stres Model (334917 hücre sayısı)				Deneysel (Ünal, 2006)
Çalışma Basıncı (MPa)	Gaz Hızı (m/s)	Mach Sayısı	Gaz debisi (kg/dk)	Uç Basıncı (mbar)	Uç Basıncı (mbar)
1,0	613	2,77	1,72	1023	890
1,3	622	2,88	2,24	1071	1025
1,7	626	2,94	2,95	1166	1118
2,2	636	3,10	3,84	1055	1030
2,7	647	3,25	4,73	994	940

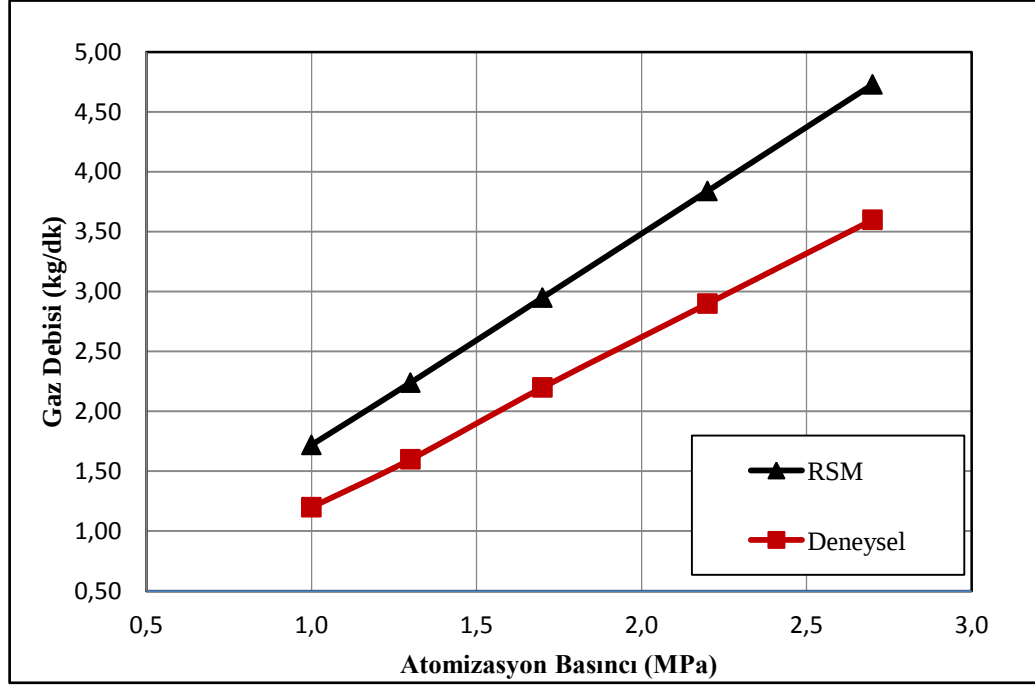
Aydın and Ünal (2011), yaptıkları çalışmada Realizable $k - \epsilon$ model sonuçları ile deneysel veriler arasındaki farkın %11-15 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Reynolds stres model (RSM) ile deneysel veriler kıyaslandığında % 3-11 arasında değişirken, %11 farkı sadece 1,0 MPa basınç altında elde edilmiştir. 1,3, 1,7, 2,2 ve 2,7 MPa basınçlarda deneysel verilere yakınlığı %3-5 arasındadır (Şekil 4.1). Espina and Piomelli (1998), yaptıkları çalışmadaki sayısal çözümler ile deneysel veriler arasında genellikle %10-20 arasında yakınlık elde edilmiştir. Bu nedenle RSM model ile deneysel verilerin kıyaslanması Espina and Piomelli tarafından yapılan ve Realizable $k - \epsilon$ model ile yapılan çalışmalardan daha iyi örtüşmektedir. Bu sonuç nozul uç basıncının belirlenmesinde Reynolds stres modelin kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.1. Nozul uç basıncının HAD ve deneysel veriler ile karşılaştırılması.

Şekil 4.2’de gaz kütleli debisinin HAD ve deneysel veriler ile kıyaslanması verilmiştir. Deneysel veriler ile HAD sonuçları arasındaki fark hemen hemen sabit olup %30 civarındadır. Bu fark, nozulun yüzey özelliklerinden ve gerçek boğaz kesit alanı ile nozulun tasarımındaki boğaz kesit alanı arasındaki farktan kaynaklanmış olabilir.



Şekil 4.2. Gaz kütleli debisinin HAD ve deneysel veriler ile karşılaştırılması.

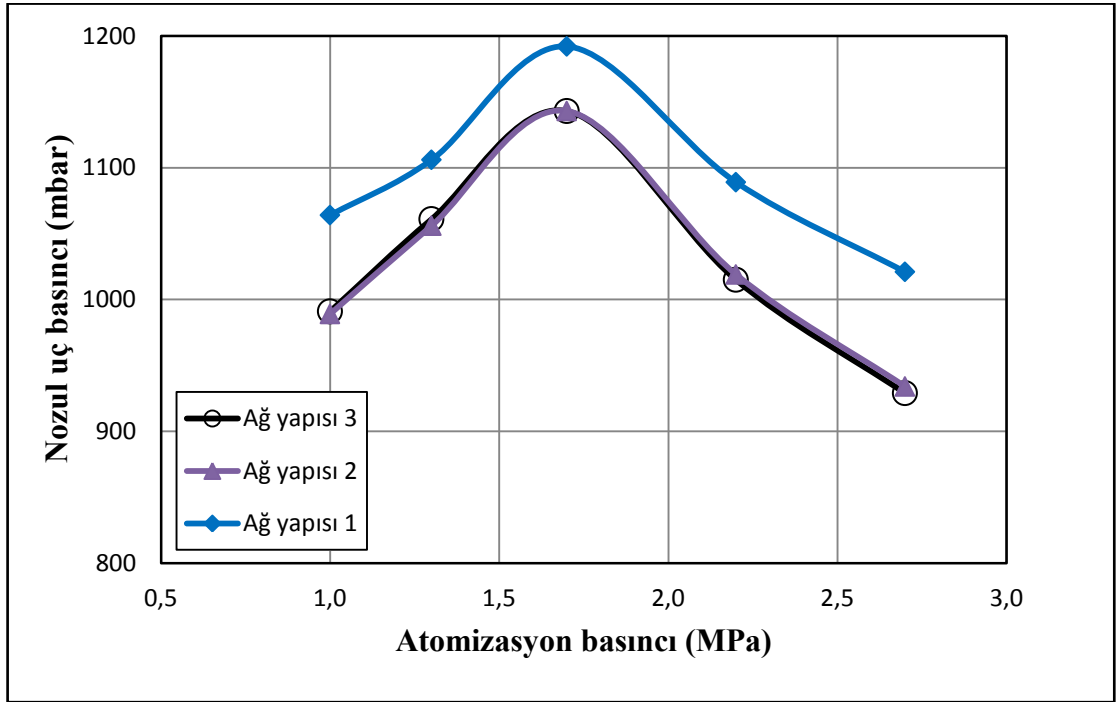
Yine bu konuda Anderson and Terpstra, (2002) yaptıkları çalışmada teorik debi ile deneysel debi arasında basıncın artmasıyla birlikte giderek artan bir fark tespit etmişler ve teorik debi değerleri ile deneysel debi değerleri arasında çok büyük fark bulmuşlardır. Anderson and Terpstra bu farkın nedenini açıklayamamışlardır. Bu çalışmada elde edilen değerler arasında hemen hemen sabit bir farkın olması yapılan hesaplamaların deneysel veriler ile örtüştüğünü göstermektedir. Ayrıca HAD çalışmasında gaz sıcaklığı sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmada akış esnasındaki gaz sıcaklığı zamanla azalmaktadır. Bu durum nozula geçen gazın gerçek kütleli debisini de etkileyebilir.

4.1.2. RSM ile çözümde ağ yapısının iyileştirilmesi

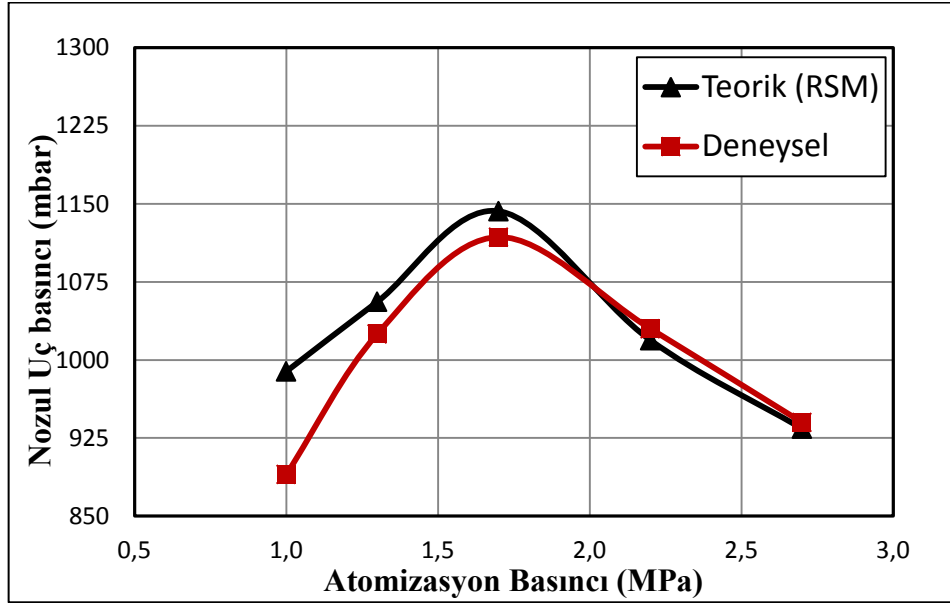
Çalışma başında uygulanan yukarıda sonuçları verilen RSM modelinin nozul tasarımında kullanılabileceğinin ortaya konmasından sonra ağ yapısının iyileştirilmesi üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde ağ yapısının hücre sayısı olabildiğince azaltılması başarılmıştır.

HAD çalışmalarında ağdan bağımsızlığın kanıtlanması gerekmektedir. Bu amaçla metal akış borusu uç kısmında oluşan basınç değerleri referans alınarak ağdan

bağımsızlık incelenmiştir. Bölüm 3'te verildiği üzere üçgen ağ kullanılarak simülasyon başlangıcında 17412 (ağ yapısı 1) hücre sayısından oluşan kaba ağ yapısında çözüm yapılmış, daha sonra rafine ederek 52007 (ağ yapısı 2) ve 156021 (ağ yapısı 3) olan ağ yapılarında akış simüle edilmiştir. Farklı hücre sayısının metal akış borusu ucunda oluşan basınca etkisi Şekil 4.3'te verilmiştir. Buradan da anlaşıldığı üzere ağ yapısı 2 daha ince ağ yapısına sahip olan ağ yapısı 3 ile aynı sonuçları vermiştir. Bu karşılaştırma ile elde edilen modelin çözümünün ağdan bağımsızlığını kanıtlamıştır. Bu sonuca göre ağ yapısı 2 ile çalışmalara devam edilmiştir. Ağ niteliğinin arttırılması (ağ yapısı 2) ile elde edilen RSM sonuçlarıyla deneysel sonuçların kıyaslanması Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4'teki farklı atomizasyon basıncına göre nozul uç basıncının RSM verileri ile Ünal'ın (2006, 2007) deneysel verileri kıyaslandığında % 1-11 arasında değişirken, %11 farkı sadece 1,0 MPa basınç altında elde edilmiştir. 1,3, 1,7, 2,2 ve 2,7 MPa basınçlarda deneysel verilere yakınlığı %1-4 arasında olduğu görülmüştür.

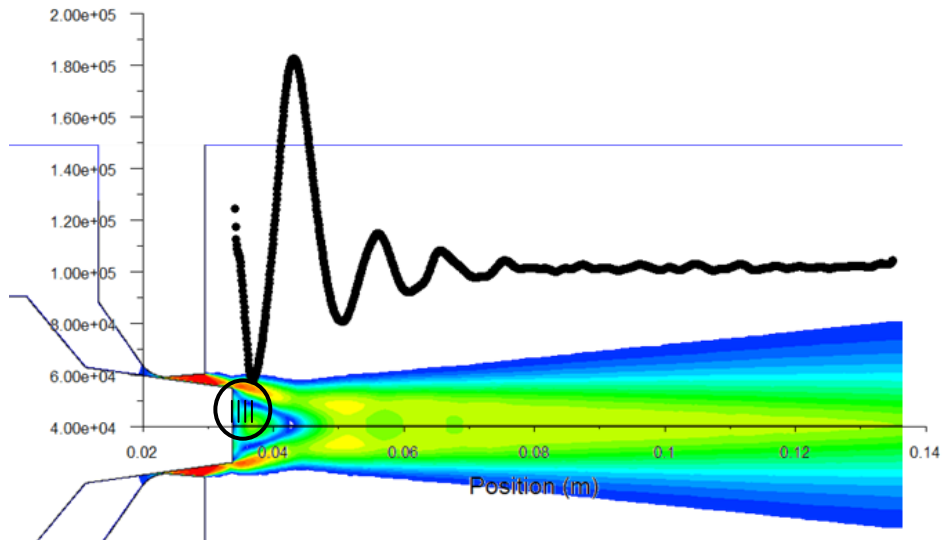


Şekil 4.3. Farklı ağ yapısına sahip HAD modellerdeki veriler ile deneysel verilerin kıyaslanması.



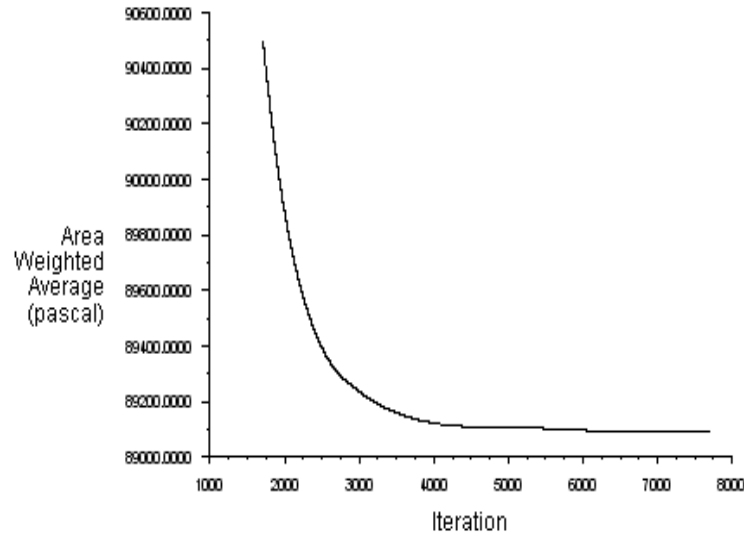
Şekil 4.4. Ağırlık kalitesini artırmak amacıyla yapılan HAD sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

HAD modellemede nozulun ekseninde statik basınç değişimini gösteren eğri çizilmiştir. Simülasyonda elde edilen basınç değerlerinin doğruluğunu artırmak için basınç hatları, Şekil 4.5'te görüldüğü gibi minimum basınç değerine kadar birbirinden 1 mm aralıkla yerleştirilmiştir. Önceki çalışmalarda uç olarak sınırlandırılan hat adeti, bazı atomizasyon gaz basınç değerlerinde minimum basınç değerinin hizasına kadar artırılarak hat adeti 4 veya 5 olarak uygulanmıştır.

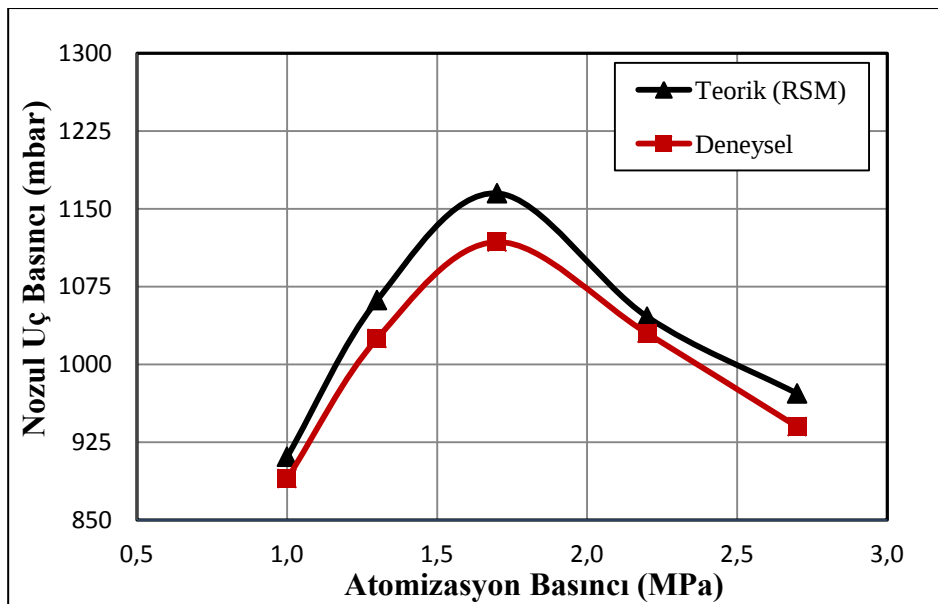


Şekil 4.5. HAD modellemede nozulun ekseninde statik basınç değişimi.

Ayrıca modellemede yakınsama için nozulun uç basınç değerlerini ölçen hatların ortalaması alınmış değeri Şekil 4.6'daki gibi sabit oluncaya kadar çalışma devam ettirilmiş ve gaz akışının rejime girdiği kabul edilmiştir. Önceki yapılan çalışmalara göre bu yeni özgün yaklaşım geliştirilmiştir. Deneysel verilerin karşılaştırılmasında kullanılacak olan uç basınç verilerinin simülasyon sırasında değişiminin takip edilmesinin yakınsama kararının verilmesi için oldukça pratik bir veri olduğu görülmüştür.



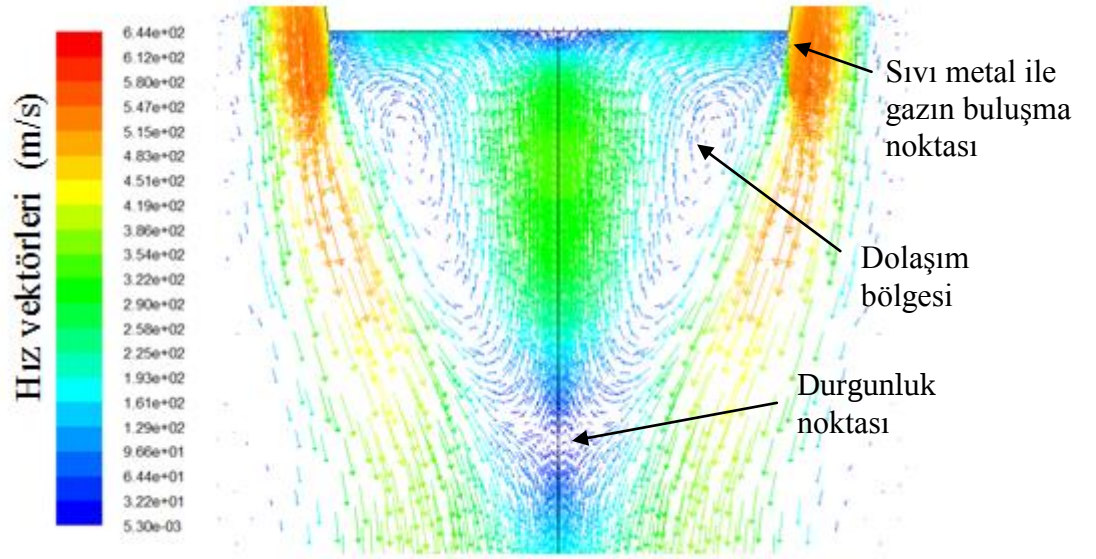
Şekil 4.6. Modellemedeki nozulun uç basınç ölçen hatların ortalama değerinin her bir iterasyon başına gösterimi.



Şekil 4.7. HAD sonuçları ile deneysel sonuçların kıyaslanması.

Tüm noktaların basınç değerlerinin ortalaması alınarak belirlenen metal akış borusu uç basınç değeri, deneylerde elde edilen uç basınç değerleri ile kıyaslanmıştır. Reynolds stres model verileri ile deneysel veriler kıyaslandığında % 1,5-4,2 arasında nozul uç basınç farkı tespit edilmiştir (Şekil 4.7). Bu özgün yaklaşım ile deneysel verilere daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Atomizasyon sırasında nozul altında gaz dolaşım bölgesindeki gazın merkezden dışa doğru hareketi sayesinde meydana gelen negatif basınç sonucu sıvı metal, akış borusu tabanında yanıl yönde dışa doğru çekilir (Şekil 4.8). Gaz dolaşım bölgesinde sıvı metalin akış yönünde basınç genellikle eksen çizgisinde daha yüksektir. Bu nedenle sıvı metal merkezden dışa doğru itilir ve nozul ucunun köşesinde yüksek enerjili gaz ile buluşur. Bu çarpışma sonucunda atomizasyon işlemi gerçekleşir.

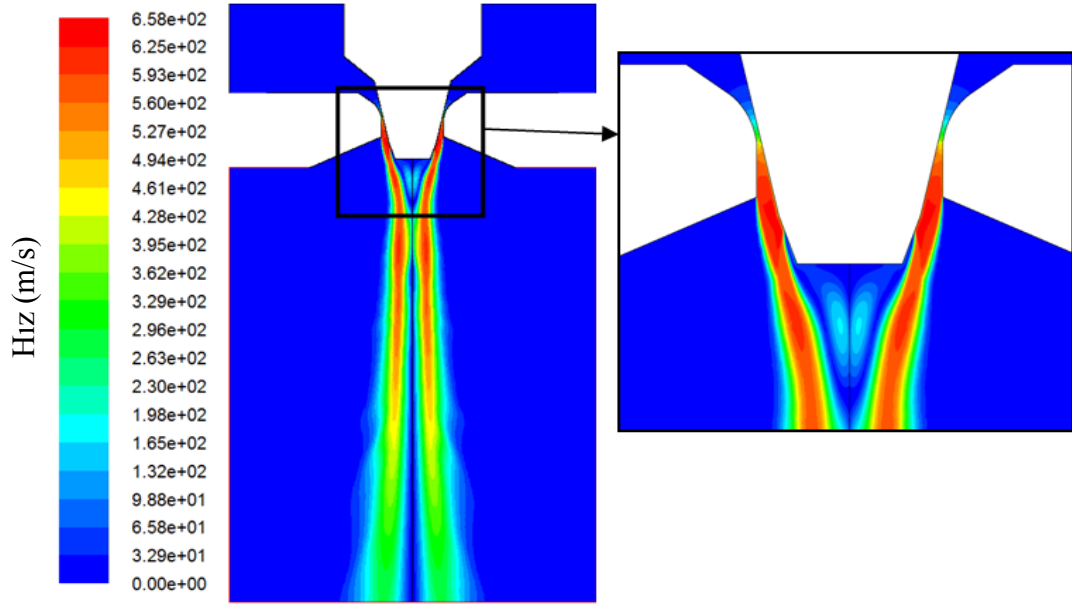


Şekil 4.8. Nozulun ucunda gaz dolaşım bölgesinde hız vektörleri.

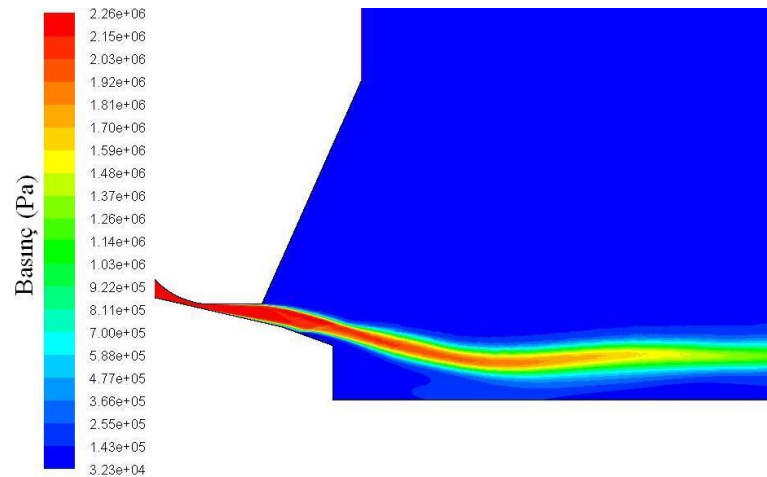
4.2. Akış Ayrılması

HAD analiz neticesinde, nozul bölgesinin akış alanı, hız ve basınç bölgeleri 2,2 MPa atomizasyon basıncı için sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu akışların önemli bir özelliği sıvı metal çıkış borusu dış yüzeyi üzerinde oluşabilen akış ayrılmasıdır. Atomizasyon basıncının ve sıvı metal akış borusu çıkıntı mesafesinin bir fonksiyonu olarak akış ayrılması meydana gelebilmektedir. Akış ayrılması sonucu sıvı metal nozul akış borusu dış yüzeyine çekilerek gaz ile buluşmaktadır. Bu bölgeye çekilen sıvı metal buradan geçmekte olan soğuk gaza maruz kalır. Gaz ve metal

arasındaki aşırı sıcaklık farkı katılaşmaya neden olabilir ve metal birikimi sıvı metal akış borusunun dış yüzeyinin şeklinin değişmesine yol açabilir. Tipik olarak bu olayların tekrarlanması sıvı metalin nozul ucunda donmasına neden olur. Bu nedenle gaz akışı ayrılması gaz atomizasyon işlemlerinde zararlıdır ve önüne geçilmesi gerekir.

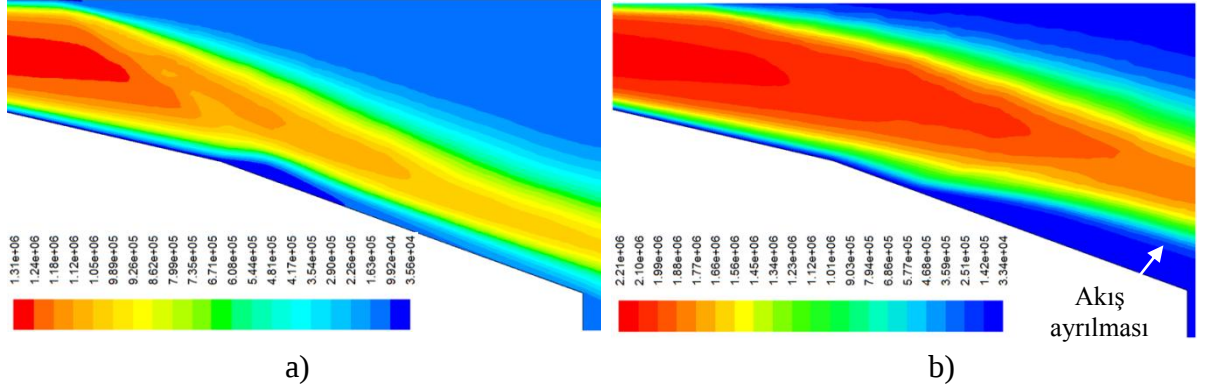


Şekil 4.9. 2,2 MPa atomizasyon basıncında elde edilen hız bölgeleri ve akış ayrılmasının görülmesi.



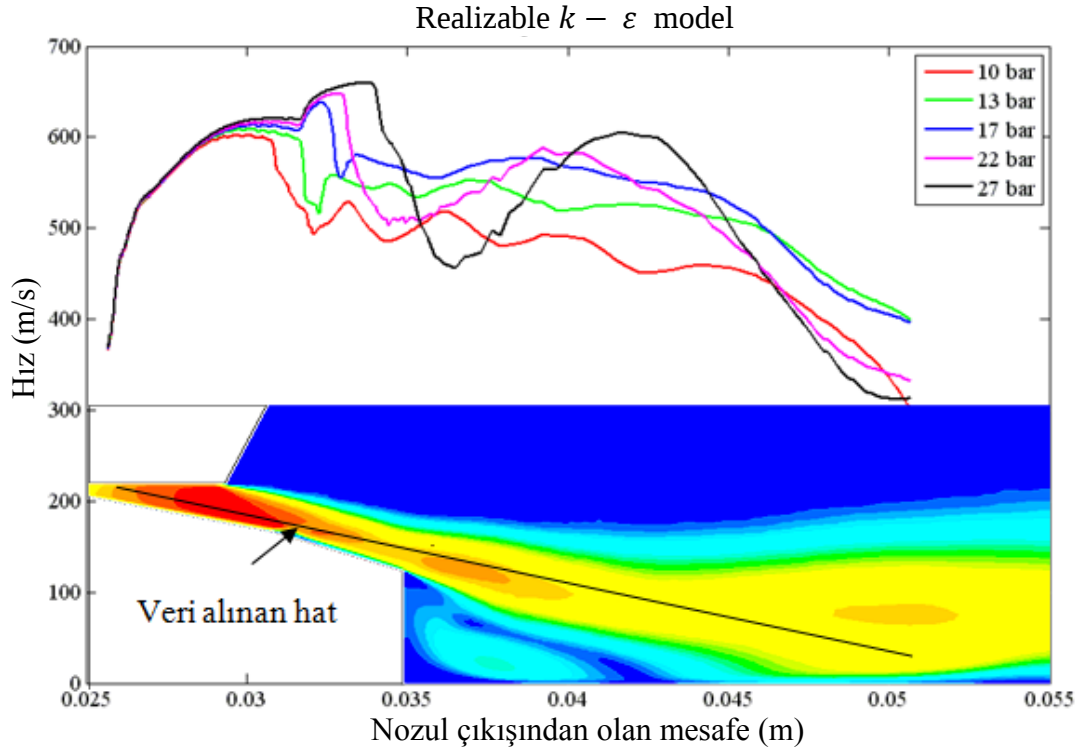
Şekil 4.10. 2,2 MPa atomizasyon basıncında elde edilen basınç konturları ve akış ayrılmasının görülmesi.

Akış ayrılması olan ve olmayan akışların yakın görüntüsü Şekil 4.11’de verilmiştir. Akış ayrılması şekilleri Aydın and Ünal’ın (2011) Realizable $k - \varepsilon$ modelinde elde edilen ile çok benzerlik göstermektedir. Bunun sonucunda Realizable $k - \varepsilon$ ve RSM ile akış ayrılmasının benzer bir şekilde tespit edilebildiği görülmüştür.

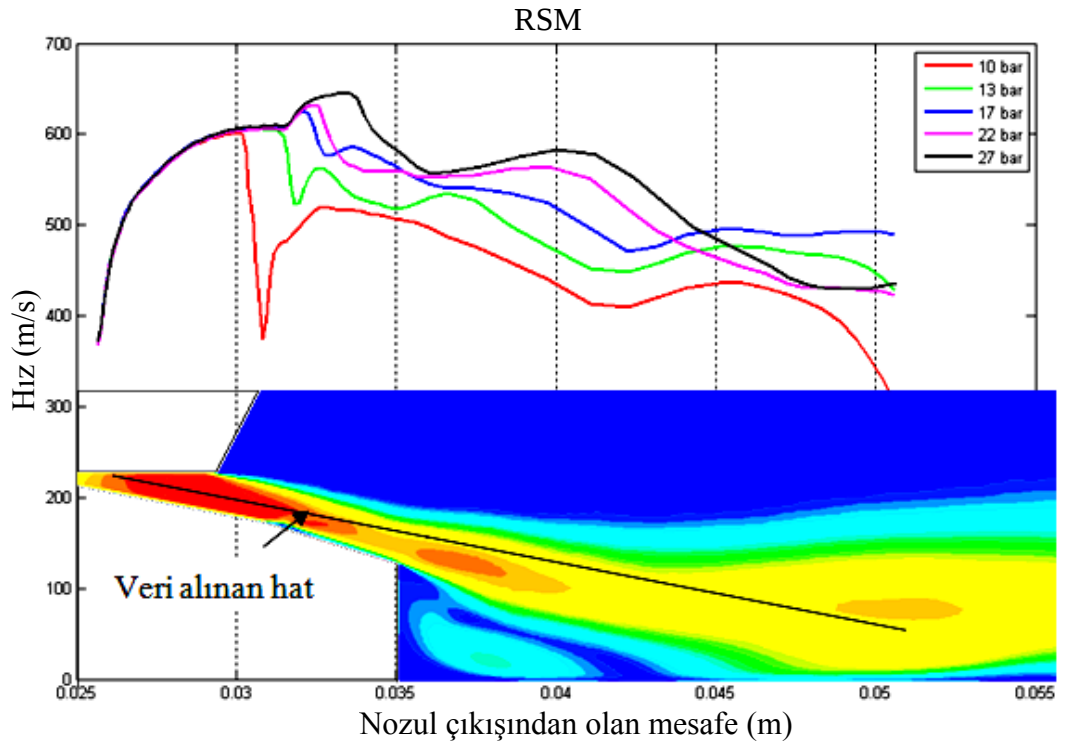


Şekil 4.11. RSM model için akış davranışı: a) 1,3 MPa atomizasyon basıncındaki akış ayrılması yoktur, b) 2,2 MPa atomizasyon basıncındaki akış ayrılması vardır.

Nozul bölgesinde Realizable $k - \varepsilon$ model ve RSM çözümde elde edilen gaz hızları Şekil 4.12 ve 4.13’te verilmiştir. Gaz hız değerleri nozulun en dar kısmı olan boğazdan başlayan, çarpışma noktasına kadar uzanan bir hat üzerinden alınan değerlerdir. Nozulun çıkış noktasındaki gaz hızı maksimum değerine (662 m/s) 2,7 MPa gaz giriş basıncında, minimum değerine (629m/s) ise 1,0 MPa gaz giriş basıncında erişmektedir. Bu sonuçlar nozul çıkış noktasındaki gaz hızının basınç artışı ile önemli ölçüde artmadığını göstermektedir. Basınç artışı ile birlikte nozul çıkışından uzaklaştıkça gaz hızının daha yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yüksek basınçta yüksek gaz hızı sıvı metal ile buluşma noktasına kadar ulaşabilmektedir. Bu nedenle verimli bir gaz atomizasyon işlemi için nozul geometrisinin daha önemli olduğu görülmektedir. Bir nozulda aynı kütleli gaz debisinde daha yüksek gaz hızı elde edilebilirse nozulun verimi daha yüksek olacaktır. Bundan dolayı bir gaz atomizasyon nozulunun verimi ekseriyetle nozulun geometrisine bağlı olduğu söylenebilir.



Şekil 4.12. Realizable $k - \varepsilon$ modelin farklı basınçtaki hız değerleri.



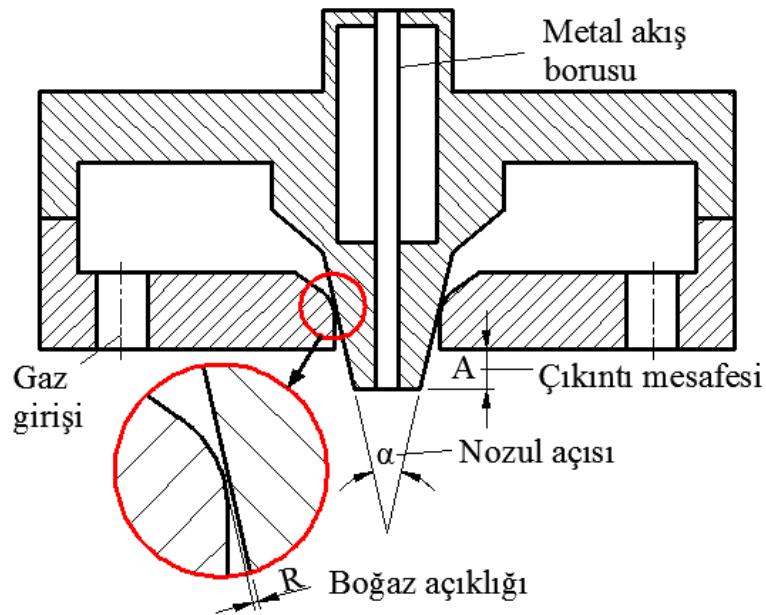
Şekil 4.13. Reynolds stres modelin farklı basınçtaki hız değerleri

4.3. HAD Model ile Nozul Geliştirme Çalışmaları

HAD analiz sonucu Reynolds stres modelinin deneysel veriler ile uyum içerisinde olduğunun tespit edilmesinden sonra mevcut nozul tasarımının iyileştirilmesi amacıyla farklı geometrideki nozul davranışı incelenmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda önemli tasarım kriteri olarak nozul uç basıncı, gaz hızı, gaz debisi ve Mach sayısı esas alınmıştır.

4.3.1. Nozul Açısının Etkisi

Model geometrilerinin oluşturulmasından önce DPU Makine Mühendisliği Laboratuvarındaki gaz atomizasyon ünitesinde kullanılan nozulun geometrisi referans alınmıştır. Bu nozul Şekil 4.14'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Nozulun şematik gösterimi

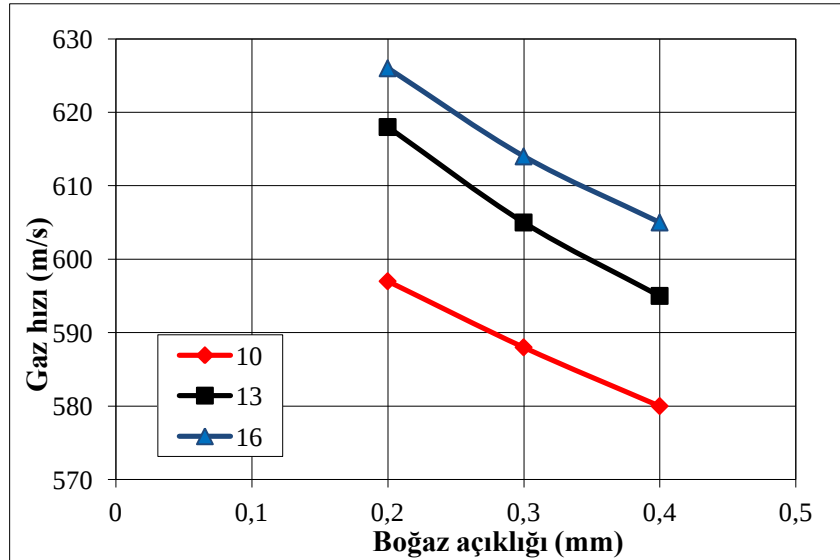
Burada α nozul açısı, A çıkıntı mesafesi ve R boğaz açıklığı olarak tanımlanmıştır. Nozul yüksek basınçlı tüpe bağlı orta bir giriş ile tek bir manifoldu vardır. Atomizasyon gazı olarak azot kullanılmıştır. Referans nozul 0,2 mm boğaz açıklığı, 5 mm çıkıntı mesafesine ve 16° lik nozul açısına sahiptir.

Burada sabit gaz basıncında, nozulun açısı ve boğaz açıklığını değiştirilerek gaz hızı, Mach sayısı, gaz debisi ve uç basınç değişimi tespit edilmiş olup Çizelge 4.2'de verilmiştir.

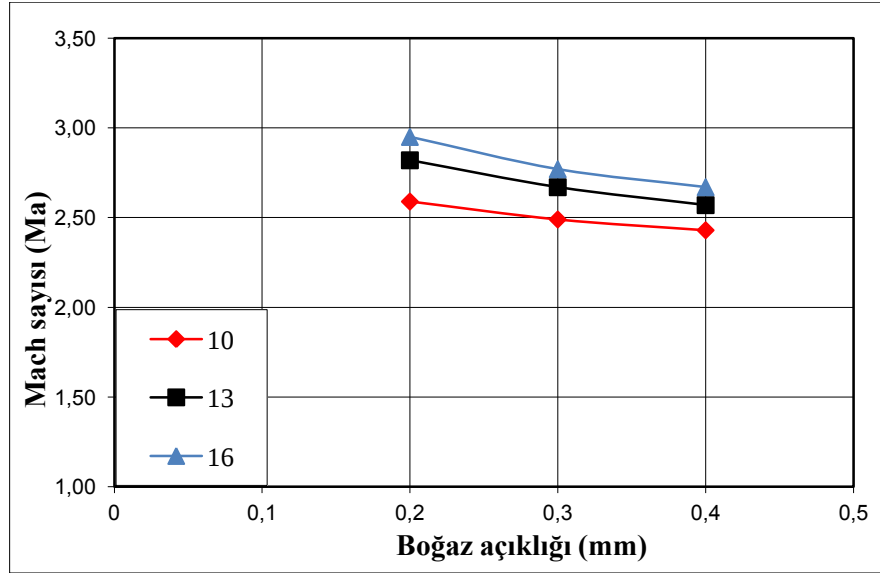
Çizelge 4.2. Farklı nozul açıları ve boğaz açıklığında gaz hızı ve uç basınç değerleri

Nozul Kodu	Nozul açısı (α) ($^{\circ}$)	Boğaz açıklığı (R) (mm)	Çalışma Basıncı (MPa)	Gaz Hızı (m/s)	Mach Sayısı	Gaz debisi (kg/dk)	Uç Basıncı (bar)
1002	10	0,2	1,3	597	2,59	2,18	0,836
1003	10	0,3	1,3	588	2,49	2,90	0,801
1004	10	0,4	1,3	580	2,43	3,65	0,837
1302	13	0,2	1,3	618	2,82	2,30	0,770
1303	13	0,3	1,3	605	2,67	2,99	0,825
1304	13	0,4	1,3	595	2,57	3,72	0,885
1602	16	0,2	1,3	626	2,95	2,48	0,758
1603	16	0,3	1,3	614	2,77	3,23	0,938
1604	16	0,4	1,3	605	2,67	3,93	1,121

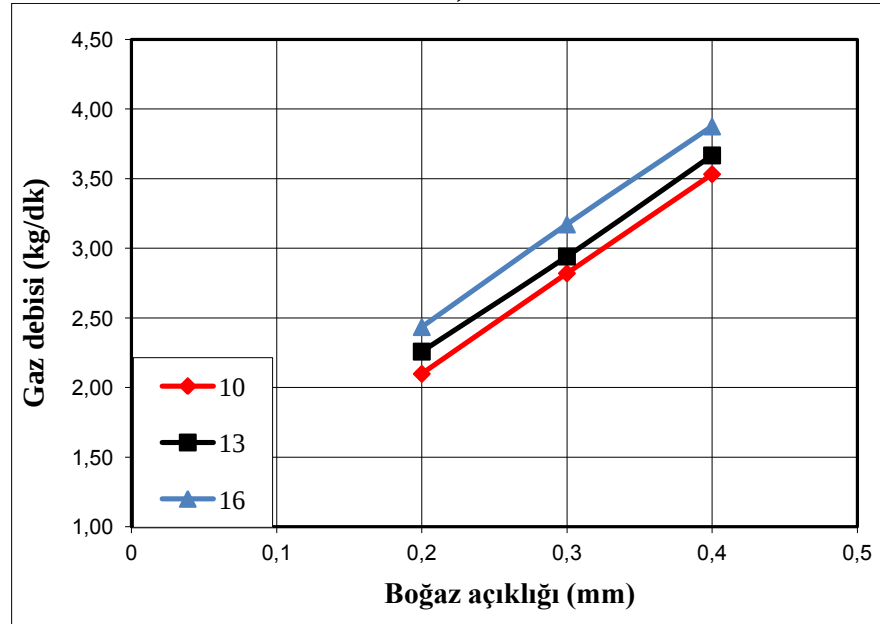
Şekil 4.15'te nozul boğaz açıklığına ve farklı nozul açılarına göre gaz hızının değişimi 1,3 MPa basınçta grafik halinde verilmiştir. En yüksek gaz hızı 16° açılı ve 0,2 mm boğaz açıklığında elde edilmiştir. Bu şartlarda nozul ucunda az da olsa negatif basınç oluşumu gözlenmiştir. Fakat 16° açılı nozulda meydana gelen uç basınç değeri 0,4 mm boğaz açıklığında pozitif çıkmıştır. Bu nedenle bu nozulun 0,4 mm boğaz açıklığında kullanımı mümkün olamayacaktır.

**Şekil 4.15.** Nozul boğaz açıklığına göre gaz hızının 1,3 MPa basınçta farklı nozul açılarına göre değişimi

Şekil 4.16’da 1,3 MPa gaz basıncında farklı nozul boğaz açıklığı ve farklı nozul açısına göre Mach sayısındaki değişim verilmiştir. Şekil 4.17’de 1,3 MPa gaz basıncında farklı nozul açısı ve boğaz açıklığındaki gaz debisi değişimi sunulmuştur.



Şekil 4.16. Boğaz açıklık değerine göre Mach sayısındaki değişim (nozul açıları 10, 13, 16).



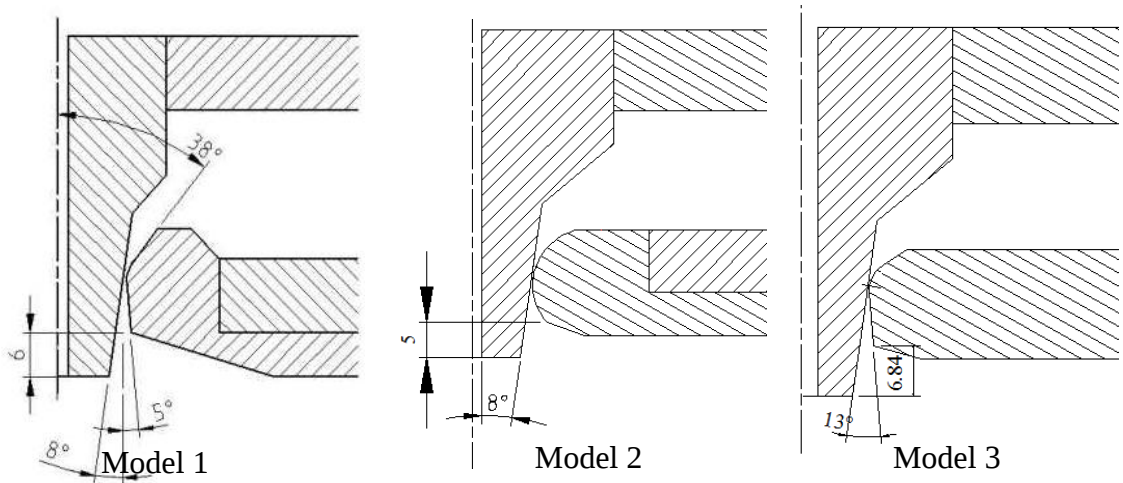
Şekil 4.17. Boğaz açıklık değerine göre gaz debisindeki değişim (nozul açıları 10, 13, 16)

Şekil 4.16’da 1,3 MPa gaz basıncında 0,2 mm nozul boğaz açıklığında 10, 13, 16 derece açılı nozullarda Mach sayısı sırasıyla 2,59, 2,82 ve 2,95 olarak tespit edilmiştir. 16 derece açılı nozulda en yüksek değer elde edilmiştir. Şekil 4.17’de aynı

şartlarda gaz debisindeki değişim verilmiştir. Nozul boğaz açıklığında artış olduğu zaman hızdaki değişim çok fazla olmamıştır. 16 derece açılı nozulda 0,2, 0,3 ve 0,4 mm boğaz açıklığında sırasıyla gaz hızları 626, 614 ve 605 m/s iken gaz debileri 2,48, 3,23 ve 3,93 kg/dk olarak hesaplanmıştır. Bu karşılaştırma göstermektedir ki boğaz açıklığının artışı ile gaz hızında çok önemli bir azalma olmaz iken gaz debisinin daha fazla arttığını göstermektedir. Örneğin 16 derece açılı nozulda 0,2 mm boğaz açıklık değeri 0,4 mm'ye çıkarılırsa gaz hızı yaklaşık %3 azalırken gaz debisi %59 oranında artmıştır. Bu karşılaştırma ile açıkça görülmektedir ki nozul geometrisine göre boğaz açıklık değeri oldukça kritik bir öneme sahiptir.

4.3.2. Nozul boğaz geometri değişiminin etkisi

Referans nozul geometrisine göre Model 1'de nozul açısı (α) 16° olarak sabit tutulmuş, boğaz açıklığı (R) 0,3 mm'ye çıkarılmış ve çıkıntı mesafesi (A) 6 mm olarak geometrisi değiştirilmiştir. Model 2'de boğaz kısmında gazın kat edeceği mesafe arttırılmış, boğaz açıklığı 0,2 mm, nozul açısı 16° ve çıkıntı mesafesi referans nozuldaki gibi 5 mm alınmıştır. Model 3'te daralan-genişleyen kısımların açıları mevcut nozulla aynıdır. Fakat nozulun genişleyen kısmında gazın kat edeceği mesafe arttırılmış boğaz açıklığı 0,2 mm ve çıkıntı mesafesi 6,84 mm'ye çıkarılmıştır (Şekil 4.18). Tasarlanan modeller Reynolds stres modele (RSM) göre çözümlenmiştir. Çözüm sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

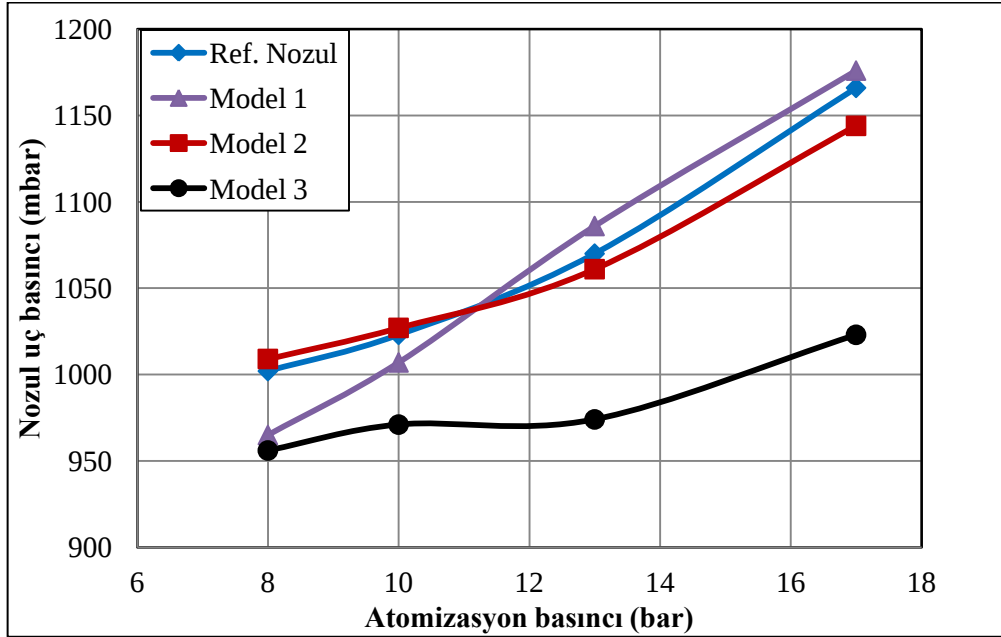


Şekil 4.18. Farklı boğaz geometrisine sahip nozullar

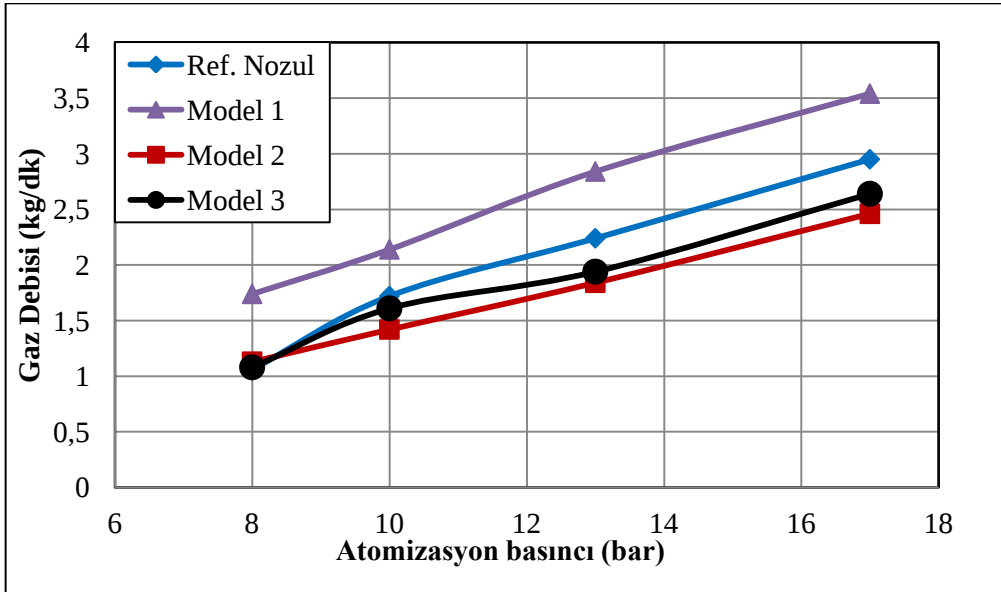
Çizelge 4.3. Nozulların HAD çözüm değerleri

Nozul	Nozul Açısı	Boğaz açıklığı (mm)	Boğaz Alanı (mm ²)	Çıkıntı Mesafesi (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Gaz Hızı (m/s)	Mach Sayısı	Gaz Debisi (kg/dk)	Uç Basıncı (mbar)
Nozul (Ref.)	16	0,2	8,5	5	8	597	2,61	1,06	1002
					10	613	2,77	1,72	1023
					13	622	2,88	2,24	1071
					17	626	2,94	2,95	1166
Model 1	16	0,3	12,7	6	8	580	2,51	1,74	965
					10	592	2,58	2,14	1007
					13	608	2,69	2,84	1086
					17	624	2,81	3,54	1176
Model 2	16	0,2	11	5	8	590	2,57	1,13	1009
					10	605	2,72	1,42	1027
					13	629	2,96	1,84	1061
					17	647	3,21	2,46	1144
Model 3	16	0,2	11	6,84	8	594	2,84	1,08	956
					10	623	2,88	1,61	971
					13	636	3,05	1,94	974
					17	646	3,23	2,64	1023

Atomizasyon basıncına göre metal akış borusu uç basınç değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.19'da verilmiştir. Model 3 adlı nozulun diğerlerine göre belirgin bir şekilde daha yüksek negatif basınç oluşturduğu görülmektedir. Bu basınç sıvı metalin nozula çekilmesini sağlayarak atomizasyon işleminin yerçekimi etkisiyle yapılabileceğini göstermektedir. Eğer uç basınç pozitif olursa sıvı metalin yerçekimi etkisiyle akışı mümkün olmadığından ergitme odasının kapalı olarak yapılması ve üst basınç uygulanması gerekecektir. Gaz basıncına göre gaz debisinin değişimi Şekil 4.20'de verilmiştir. Bu değerlerin incelenmesi sonucu Model 2 ve Model 3 adlı tasarımların debi açısından da en uygun tasarımlar olduğu görülmektedir.

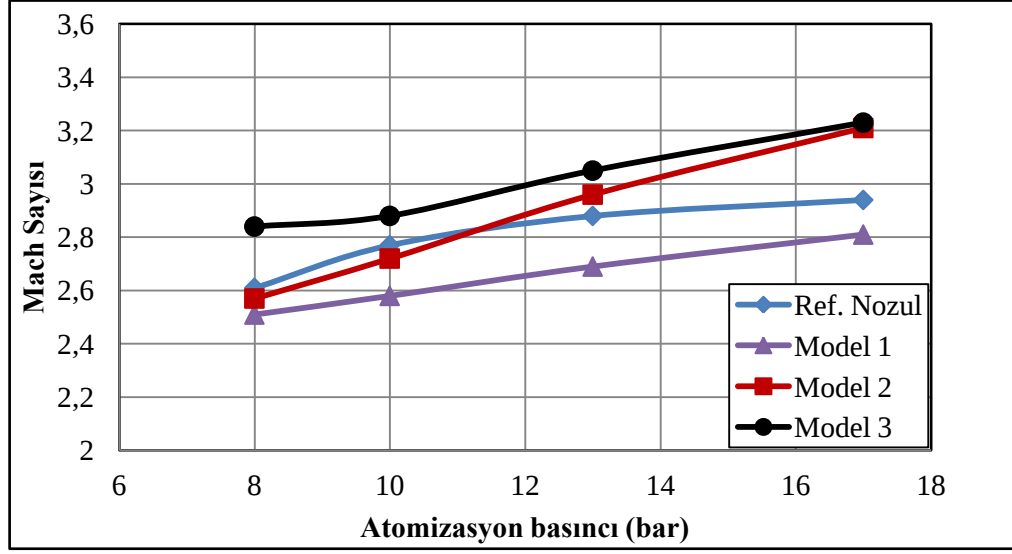


Şekil 4.19. Atomizasyon basıncına göre nozulların uç basınç değişimi



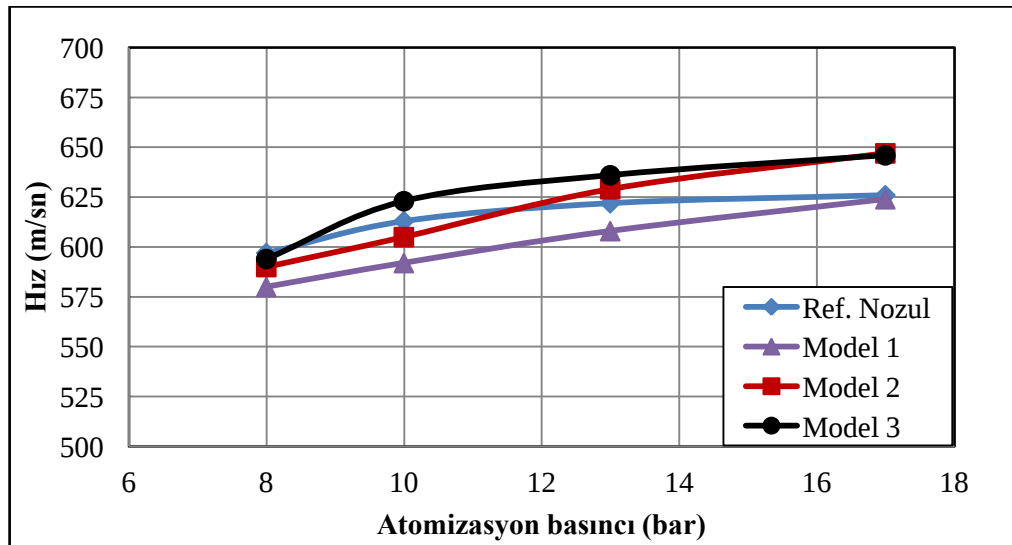
Şekil 4.20. Atomizasyon basıncına göre nozulların gaz debisi değişimi

Gaz basıncına göre Mach sayısının değişimi Şekil 4.21’de verilmiştir. Mach sayısının en yüksek olduğu tasarım Model 3 adlı tasarımdır. Bu tasarımda Mach sayısının düşük basınçlarda dahi daha yüksek olduğu görülmektedir. Mach sayısının yüksek olması bu tasarımda gazın daha iyi hızlandığını ve dolayısıyla daha yüksek bir kinetik enerjiye sahip olduğu anlamına gelmektedir. Bu da daha yüksek verimli bir atomizasyon işleminin gerçekleşmesini sağlayacaktır. Sonuçta düşük basınçlarda daha küçük toz üretmek mümkün olabilecektir.

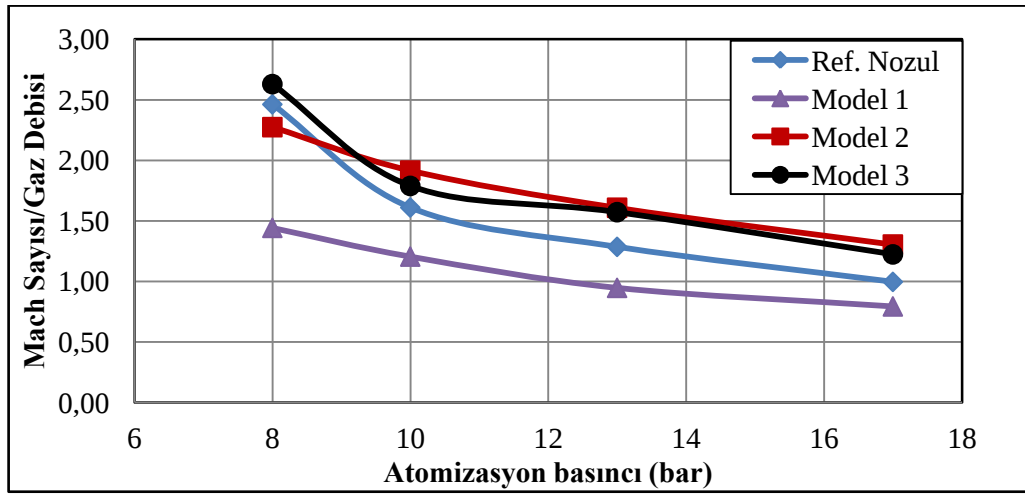


Şekil 4.21. Atomizasyon basıncına göre nozulların Mach sayısı değişimi.

Gaz basıncına göre gaz hızının değişimi Şekil 4.22’de verilmiştir. Burada da Model 3 adlı tasarım bazı basınçlarda en yüksek gaz hızına sahip olmakla birlikte diğer tasarımlar ile arasındaki fark çok belirgin değildir. Ancak basınca göre gaz hızındaki değişim daha azdır. Model 3 adlı tasarımda 13 bar basınçta dahi 636 m/s gibi yüksek hıza ulaşması tasarımın diğerlerine göre üstünlüğünü göstermektedir. Atomizasyon basıncına göre Mach sayısı/gaz debisi oranının değişimi Şekil 4.23’te verilmiştir. Model 2 ve Model 3 diğer tasarımlara göre daha üstün gözükmemektedir. Düşük gaz debisinde yüksek hızın elde edilmesi nozulun verimini arttıracaktır.



Şekil 4.22. Atomizasyon basıncına göre nozulların hız değişimi



Şekil 4.23. Atomizasyon basıncına göre nozulların “Mach sayısı/gaz debisi” oranının değişimi

Daha az gaz debisi ile yüksek hızın elde edilmesi tüketimin az olmasına karşın kinetik enerjinin yüksek olması anlamına gelmektedir. Bu da daha küçük tozun üretilmesine imkan verir. Bütün karşılaştırmalar dikkate alındığında en iyi tasarımın Model 3 adlı tasarım olduğu görülmektedir. Mevcut nozul 10 bar basınçta 613 m/s hız, 2,77 Mach sayısı, 1,72 kg/dk debi ve 1023 mbar uç basınç değerlerine sahiptir. Model 3 adlı tasarım 10 bar basınçta 623 m/s hız, 2,88 Mach sayısı, 1,61 kg/dk debi ve 971 mbar uç basınç değerine sahiptir.

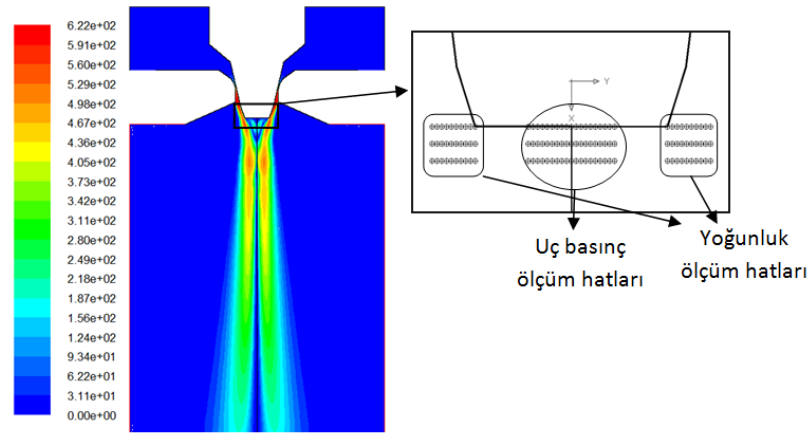
4.3.3. Nozul boğaz açıklığı ve çıkıntı mesafesinin etkisi

Oluşturulan geometrilerde nozul açısı sabit tutulmuş, boğaz açıklığı, çıkıntı mesafesi ve boğaz alanı değerleri değiştirilerek farklı nozul geometrileri oluşturulmuştur (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Tasarlanan nozul geometri değerleri

Nozul NO	Boğaz Açıklığı (mm)	Boğaz Alanı (mm ²)	Çıkıntı Mesafesi (mm)	Nozul Açısı (°)
1	0,25	10,5	5	16
2	0,2	8,4	5	
3	0,17	7,7	6,5	
4	0,2	8,3	6,5	
5	0,18	7,5	6,5	
6	0,25	12,86	5	
7	0,18	7	6,5	
Nozul (Ref.)	0,2	8,5	5	

Farklı geometrilere sahip nozulların kıyaslamasını yapabilmek için gaz hızı, Mach sayısı, uç basıncı ve yoğunluk değerleri göz önüne alınmıştır. HAD model üzerinden nozul uç basıncı ve yoğunluk değerlerinin alınmasında kullanılan hatların pozisyonları Şekil 4.24'te verilmiştir. Farklı geometrilere sahip nozullar 1,3 MPa sabit atomizasyon basıncında HAD çözümleri yapılmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.5'te verilmiştir

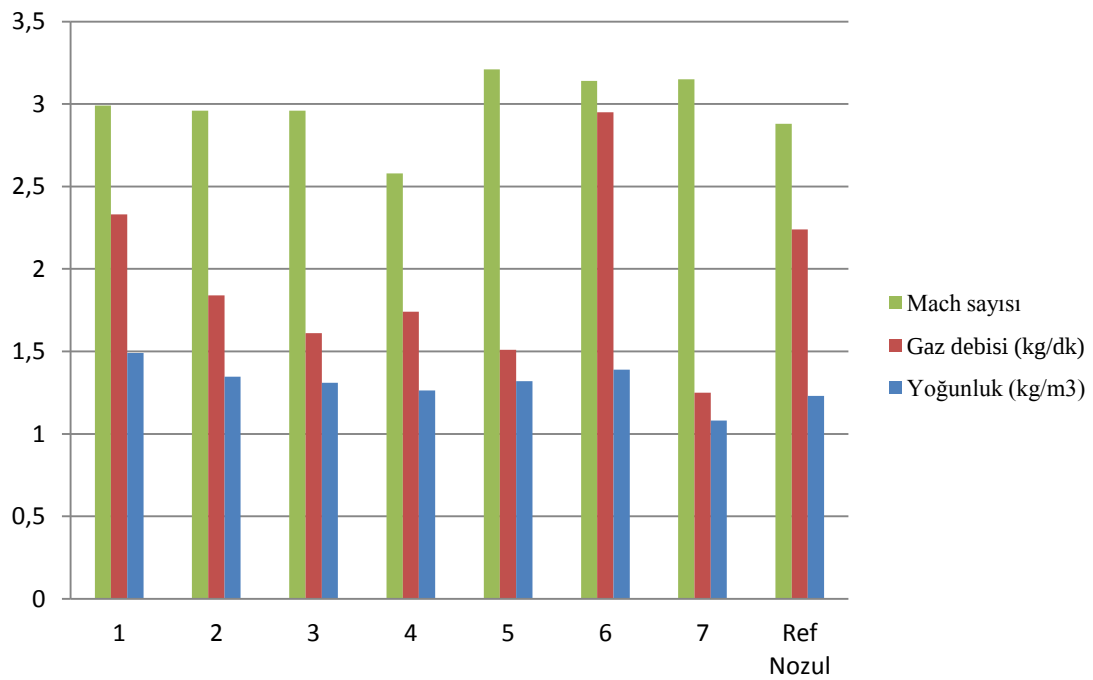


Şekil 4.24. HAD modellemede nozul uç basıncı ve yoğunluk değerlerinin alınmasında kullanılan hatların pozisyonu

Çizelge 4.5. 1,3 MPa atomizasyon basıncında nozulların HAD çözüm değerleri

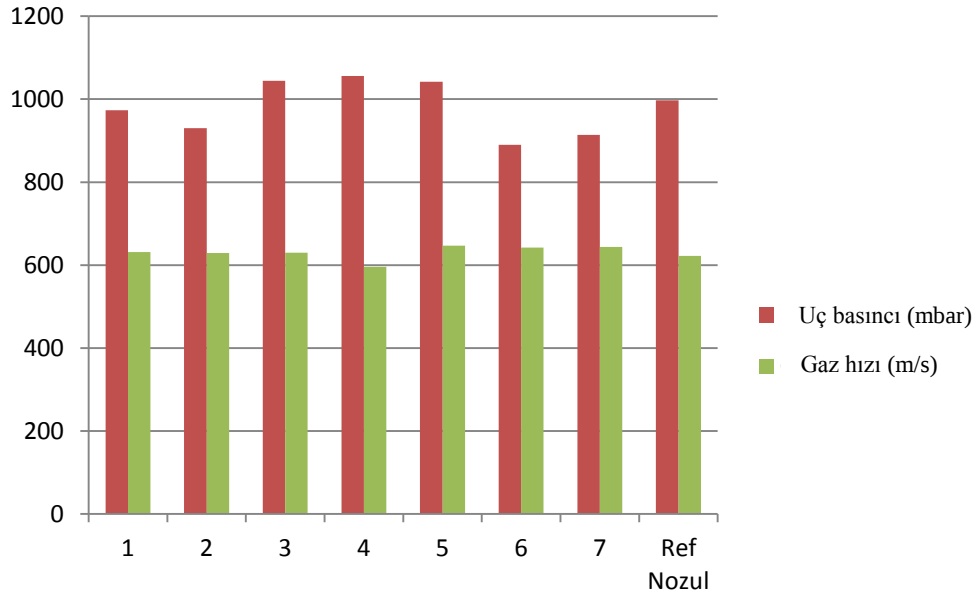
Nozul No	Boğaz Alanı (mm ²)	Boğaz Açıklığı (mm)	Çıkıntı Mesafesi (mm)	Gaz Hızı (m/s)	Mach Sayısı	Gaz debisi (kg/dk)	Uç Basıncı (mbar)	Yoğunluk (kg/m ³)
1	10,5	0,25	5	631	2,99	2,33	973	1,49
2	8,4	0,2	5	629	2,96	1,84	930	1,35
3	7,7	0,17	6,5	630	2,96	1,61	1044	1,31
4	8,3	0,2	6,5	596	2,58	1,74	1056	1,26
5	7,5	0,18	6,5	647	3,21	1,51	1042	1,32
6	12,86	0,25	5	642	3,14	2,95	890	1,39
7	7	0,18	6,5	644	3,15	1,25	914	1,29
Nozul (Ref.)	8,5	0,2	5	622	2,88	2,24 (Ref.)	1071	1,23 (Ref.)

Referans nozul ile 1, 2 ve 3 nolu nozulların Mach sayıları birbirine yakın çıkarken; 5, 6 ve 7 nolu nozulların Mach sayıları yüksek, 4 nolu nozulun Mach sayısı ise düşük çıkmıştır (Şekil 4.25). Gaz debisi değerleri referans nozula göre 1 nolu nozulda %4 ve 6 nolu nozulda %34 fazla iken; 2, 3, 4, 5 ve 7 nolu nozullar sırasıyla %18, %28, %22, %37 ve %44 daha düşük gaz debisine sahiptir. Benzer şekilde 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 nolu nozullardaki gaz yoğunluğu sırasıyla %21, %9, %6, %2, %7, %13 ve %5 oranında referans nozuldaki yoğunluktan yüksektir.



Şekil 4.25. Farklı geometrili nozulların 1,3 MPa atomizasyon basıncında yoğunluk, gaz debisi ve Mach sayısına göre kıyaslanması.

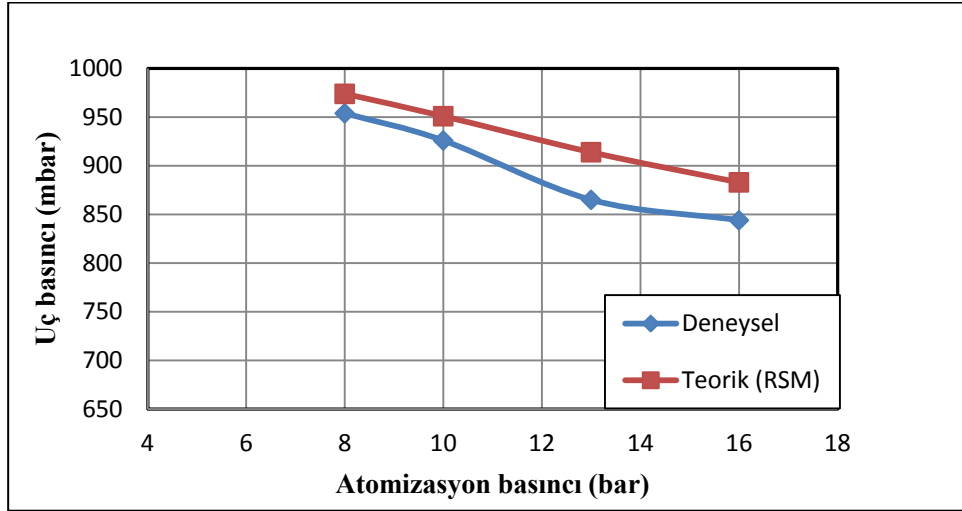
Nozullarda metal akış borusunun uç noktasında meydana gelen basınç oldukça önemlidir. Çünkü metal akış borusu uç basıncı, atmosfer basıncına göre negatif olursa sıvı metal aşağıya doğru çekilecektir. Bu şartlarda yapılan üretim daha dengeli ve kararlıdır. Şekil 4.26'daki uç basınç değerlerine göre 1, 2, 6, 7 nolu nozullar ve referans nozulda negatif basınç oluşurken 3, 4 ve 5 nolu nozullarda pozitif basınç oluşmaktadır. Aynı atomizasyon basınç değerinde maksimum gaz hızında büyük farklılıklar yoktur.



Şekil 4.26. Farklı geometrili nozulların 1,3 MPa atomizasyon basıncında uç basınç ve gaz hızlarının kıyaslanması

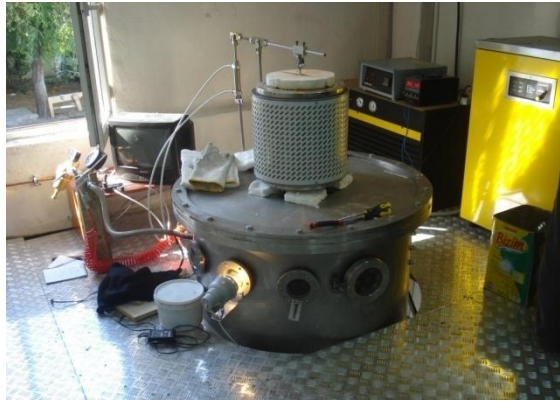
4.4. Nozul Geliştirilme Çalışması (İNCİ Dental-SANTEZ)

Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesinde daha önce kullanılmış olan referans nozulda 1,3, 1,7 ve 2,2 MPa atomizasyon basınçlarında uç basınç pozitif çıkmaktadır. Bu basınç değerlerinde deney yapılabilmesi için ergitme odasına üst basınç uygulanması gerekmektedir. HAD modelleme sonucunda geliştirilen yeni tasarımlar arasından 7 nolu nozulun imalatı SANTEZ projesi kapsamında yapılmıştır. Burada amaç tasarımı yapılan nozulun uç basıncının negatif olmasıdır. Negatif uç basıncın olduğu nozul ile vakum oluşturmada sıvı metalin kendiliğinden akması hedeflenmektedir. Bu nedenle 7 nolu nozul tasarımı seçilmiştir. İmalatı yapılan nozul 0,18 mm boğaz açıklığı (R), 6,5 mm çıkıntı mesafesine (A) ve 16° lik nozul açısına (α) sahiptir. Tasarım esnasında 13 bar atomizasyon basıncında değerler alınmıştır. İmalatı yapılan nozulda farklı atomizasyon basınç değerlerinde nozul uç basınç değerleri ölçülmüştür. Daha sonra aynı HAD simülasyon şartları altında RSM kullanılarak uç basınç değerleri alınmıştır. Nozulun teorik hesaplanan metal akış borusu uç basınç değerleri farklı basınçlar için deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. 8, 10, 13 ve 16 bar basınç altında deneysel veriler ile RSM kıyaslandığında % 2-6 arasında uç basıncın değiştiği görülmüştür (Şekil 4.27).



Şekil 4.27. İnci Dental nozul uç basınçların kıyaslanması

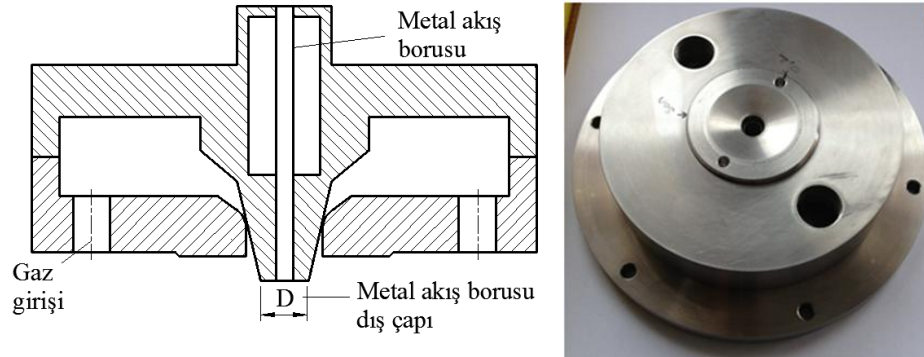
Karşılaştırma sonrasında teorik değerler ile deneysel değerlerin çok iyi bir uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuca göre Reynolds stres modeli farklı geometrideki nozulda da yakın deneysel uç basınç değerlerin çıkması, kullanılan HAD simülasyonun uygunluğunu kanıtlamıştır. Metal akış borusu ucunda oluşan 90-130 mbar seviyesinde negatif basınç sayesinde sıvı metalin kendiliğinden aşağıya doğru akması mümkün olmaktadır. Böylece İnci Dental firması için tasarlanan gaz atomizasyon ünitesinde kapalı ergitme odasına gerek kalmadan üretim yapılabilir (Şekil 4.28).



Şekil 4.28. İnci Dental Gaz Atomizasyon Ünitesi kule üst kısmı.

4.5. Nozul Geliştirilme Çalışması-(DPÜ BAP projesi)

DPÜ BAP projesi desteği ile tasarımı yapılan 6 nolu nozulun imalatı yapılmıştır (Şekil 4.29). Nozulun metal akış borusu taban dış çapı (D) 14 mm, nozul açısı ise 16°'dir.

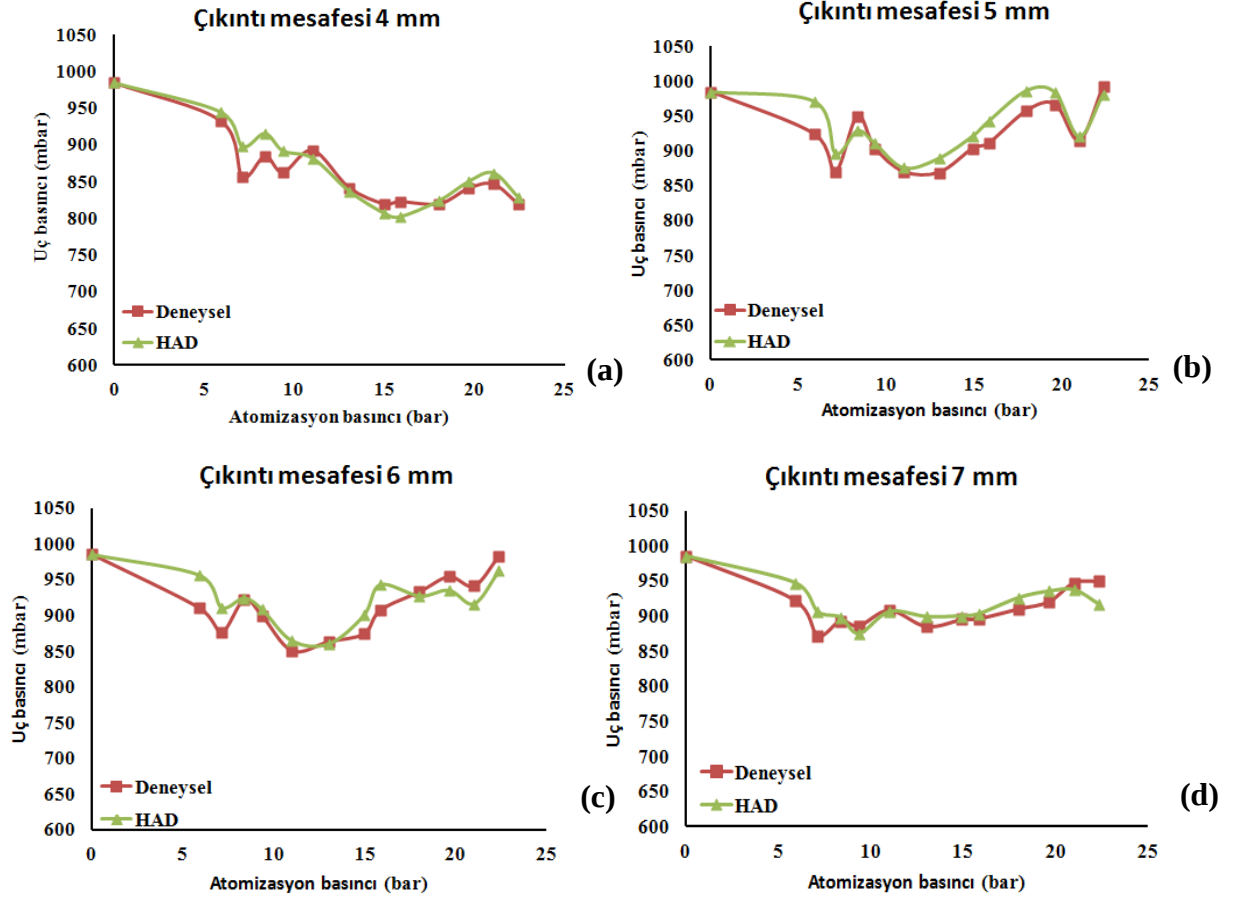


Şekil 4.29. DPÜ BAP projesi kapsamında tasarlanan nozulun şematik görünümü.

Yapılan deneysel çalışmada çıkıntı mesafesi değişiminin uç basınca etkisi incelenmiştir. Ölçümler DPÜ gaz atomizasyon ünitesinde yapılmıştır. 5,9 ile 22,39 bar arasında değişen (Çizelge 4.6) 12 farklı atomizasyon basıncı kullanılmıştır. Uç basınç ölçümü için her bir atomizasyon basınç değerinde çıkıntı mesafeleri değiştirilerek ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerde elde edilen değerler ile simülasyon sonucunda elde edilen değerler kıyaslanmıştır. Şekil 4.30’da görüldüğü üzere simülasyon ve deneysel sonuç değerlerinin çok yakın olduğu tespit edilmiştir. 4 farklı çıkıntı mesafesinde deneysel ve teorik yüzde sapma değerleri incelendiğinde sapmaların -%3,48 ile +%5,09 arasında olduğu görülmüştür (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.6. 12 farklı atomizasyon basıncı için HAD model verileri

Atomizasyon Basıncı (bar)	Gaz Hızı (m/s)	Mach Sayısı	Gaz Debisi (kg/dk)
5,9	626	2,92	0,88
7,1	634	3,03	1,06
8,35	639	3,09	1,25
9,35	640	3,11	1,40
11	641	3,12	1,64
13,02	642	3,14	1,95
14,95	643	3,16	2,24
15,85	644	3,17	2,37
18,02	645	3,18	2,70
19,64	646	3,19	2,94
21,02	647	3,21	3,15
22,39	648	3,21	3,36

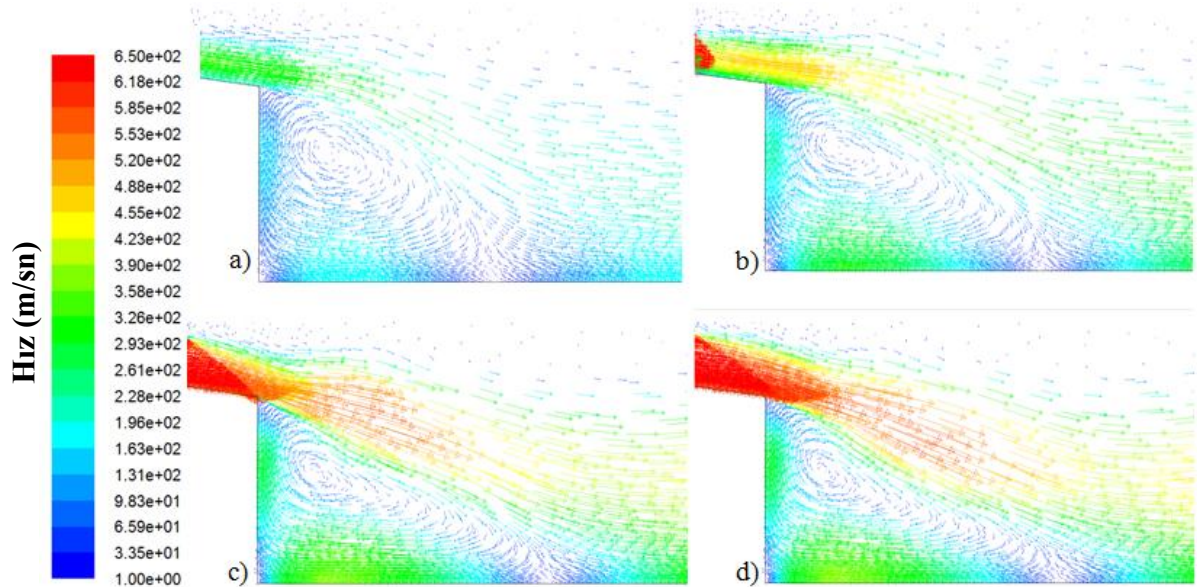


Şekil 4.30. Deneysel ve HAD verilerine göre atomizasyon basıncına göre uç basınç değerlerinin kıyaslanması. Çıkıntı mesafesi 4 mm (a), 5 mm (b), 6 mm (c), 7 mm (d)

Çizelge 4.7. Çıkıntı mesafesine göre HAD ve deneysel veriler ile % sapma değerleri

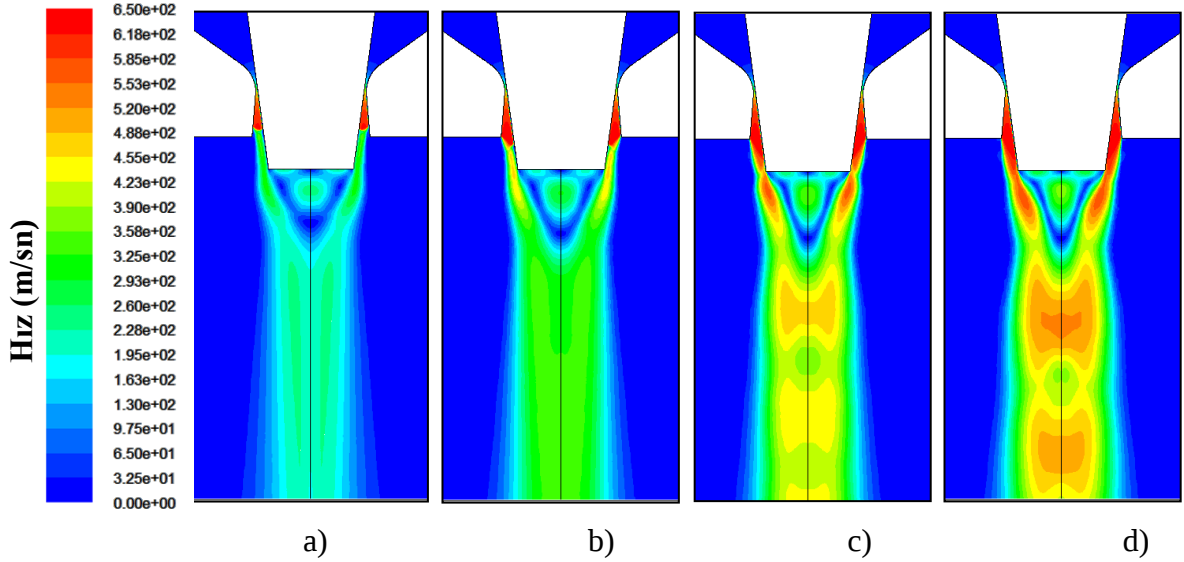
BOĞAZ AÇIKLIĞI = 0,25 mm atm=985 mbar												
Atomizasyon Basıncı (bar)	Çıkıntı mesafesi											
	4 mm			5 mm			6 mm			7 mm		
	DENEYSEL (mbar)	HAD (mbar)	% Sapma	DENEYSEL (mbar)	HAD (mbar)	% Sapma	DENEYSEL (mbar)	HAD (mbar)	% Sapma	DENEYSEL (mbar)	HAD (mbar)	% Sapma
0	985	985		985	985		985	985		985	985	
5,9	933	945	1,29	924	971	5,09	910	956	5,05	922	947	2,71
7,1	857	898	4,78	870	897	3,10	876	911	4,00	872	906	3,90
8,35	885	916	3,50	950	932	-1,89	922	924	0,22	893	898	0,56
9,35	863	892	3,36	904	911	0,77	899	908	1,00	886	875	-1,24
11	893	882	-1,23	870	876	0,69	850	864	1,65	908	906	-0,22
13,02	842	837	-0,59	869	890	2,42	863	860	-0,35	885	899	1,58
14,95	820	807	-1,59	904	922	1,99	874	900	2,97	895	900	0,56
15,85	823	806	-2,07	911	943	3,51	907	943	3,97	896	903	0,78
18,02	820	824	0,49	958	987	3,03	933	927	-0,64	910	926	1,76
19,64	841	850	1,07	967	984	1,76	954	935	-1,99	920	935	1,63
21,02	847	862	1,77	915	921	0,66	941	923	-1,91	947	937	-1,06
22,39	820	829	1,10	993	982	-1,11	983	963	-2,03	949	931	-1,90

Gaz dolaşım bölgesinde gazın merkezden dışa doğru hareketi sayesinde meydana gelen negatif basınç sonucu sıvı metal akış borusu tabanında yanal yönde dışa doğru çekilir. Bu nedenle sıvı metal merkezden dışa doğru itilir ve nozul ucunun köşesinde yüksek enerjili gaz ile buluşur. Nozul ucunda gaz dolaşım bölgesinde hız değerlerinin vektörel olarak gösterimi Şekil 4.31’de verilmiştir. Burada gaz basıncının artışı ile nozul ucundaki hız değerinin de arttığı görülmektedir. Çizelge 4.6 incelenirse 5,9 bar atomizasyon basıncında elde edilen maksimum hız 626 m/s iken, 22,39 bar basınçta maksimum hız 648 m/s’dir. Maksimum hız değeri arasında çok büyük fark olmamasına karşın Şekil 4.31’de görüldüğü üzere nozul ucunda sıvı metal ile buluştuğu noktadaki hız değerlerinde büyük farklar oluşmaktadır. Bu sayede atomizasyon basıncının artışı ile ortalama toz boyutu küçülmektedir. Çünkü nozulun hemen çıkış noktasındaki gaz hızları basınca göre önemli miktarda değişme göstermemektedir. Ancak, sıvı metal ile buluşma noktası olan metal akış borusu tabanındaki köşe noktaya doğru basıncın artışı ile yüksek hızlı gazın bu noktaya daha yüksek hızla ulaştığını göstermektedir. Bu veriler ışığında gazın nozul çıkışından sonra en kısa mesafede sıvı metal ile buluşmasını sağlayan geometrilerin daha verimli olacağı söylenebilir.



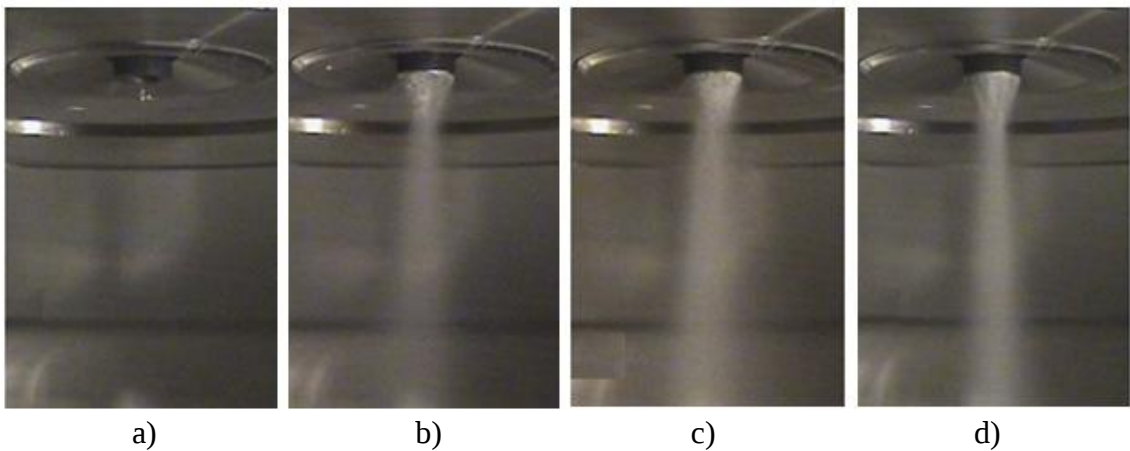
Şekil 4.31. Farklı atomizasyon basıncında nozul ucunda gaz dolaşım bölgesinde hız vektörleri; atomizasyon basıncı; a) 5,9 bar, b) 11 bar, c) 18,02 bar, d) 22,39 bar

Şekil 4.32’de farklı atomizasyon basınçlarında elde edilen hız konturlerinden anlaşıldığı üzere basınç arttıkça şok dalgaları daha da kuvvetlenerek Mach disk oluşumuna sebep olmaktadır.



Şekil 4.32. Farklı atomizasyon basıncında nozul ucunda gaz dolaşım bölgesinde hız konturleri. atomizasyon basıncı; a) 5,9 bar, b) 11 bar, c) 18,02 bar, d) 22,39 bar

Kalay atomizasyonu deney görüntüleri Şekil 4.33’te gösterilmektedir. Farklı atomizasyon basınç değerlerindeki görüntülerde Şekil 4.32’deki modelleme sonucu elde edilen görüntülere benzer şekilde olduğu ve akış ayrılmasının oluşmadığı deneysel olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.33. Kalay atomizasyonu deney görüntüleri; a) atomizasyon öncesi, gaz basıncı; b) 9 bar, c) 12 bar, d) 18,5 bar

4. 6. Toz Üretim Deneyleri

4.6.1. Toz üretim deneyleri (İnci Dental)

SANTEZ projesi kapsamında tasarımı ve imalatı yapılan sistem yakından eşlemeli sistem olup, bu sistemlerde en önemli sorunlardan birisi sıvı metalin 3-4 mm iç çapa sahip saf alümina seramik boru içerisinden aşağıya doğru akıtılırken sıvı metalin donmasıdır. Donmanın önlenmesi için sıvı metale 200 °C civarında aşırı ısıtma uygulanmıştır. Gaz atomizasyon fırınında ergitilen gümüş alaşımları 950 °C'a kadar ısıtılmıştır. Sıvı metal hazır olduktan sonra önce sıvı metal akışı başlatılmış, sonrasında da gaz vanası açılarak atomizasyon işlemi başlatılmıştır. Yaklaşık 9 kg sıvı metal 110 ile 140 saniye arasında tamamen atomize edilerek toz haline getirilmiştir. Atomizasyon işlemi tamamlandıktan sonra gaz kapatılmış, tozların dibe çökmesi beklendikten sonra toz toplama kabından ve siklondan tozlar alınmıştır. Tozların hemen hepsi toz toplama kabında, çok az miktarı ise siklondan alınmıştır. Ergitilen malzeme ile alınan toz miktarı arasında 50-100 gram arasında fark olduğu görülmüştür. Bu miktarın bir kısmının pota içerisindeki metalin yüzeyinde oluşan oksitlenmeden, bir kısmının ünite duvarlarına yapışan ve siklondan filtreye kaçan çok küçük tozlardan meydana geldiği düşünülmektedir. Bu kayıp miktarı çok az olup, makul düzeydedir. İlk deney başarı ile gerçekleştikten sonra tozların iri olduğu görülmüştür. Bunun üzerine metal akış borusu ucunda bulunan grafit parçanın çapı küçültülerek toz üretim deneyleri yapılmıştır. En uygun çap olarak 3,2 mm olduğu belirlendikten sonra gaz basıncının toz boyutuna etkisinin belirlenmesi amacıyla 12 bar basınçtan 22 bar basınca kadar toz üretim deneyleri yapılmıştır. Üretilen tozların boyut ölçümleri lazer parçacık boyutu ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Tozların boyut ölçümü verileri aşağıda Çizelge 4.8'de verilmiştir. Basıncın artışı ile toz boyutunun küçüldüğü, 12 bar basınçta 47,8 µm toz boyutu elde edilirken, 22 bar basınçta 30,57 µm ortalama boyuta sahip tozların üretildiği görülmüştür. Tozların görünür yoğunluk, vurgu yoğunluğu ve akış hızları Çizelge 4.9'da, boyut dağılımı ise Şekil 4.34'te verilmiştir. Tozların görünür yoğunluk değerlerinin 4,88 g/cm³ ile 5,20 g/cm³ arasında değiştiği, vurgu yoğunluğu değerlerinin ise 4,01 ile 4,22 g/cm³ arasında olduğu görülmüştür. Toz akış hızları hall hunisi ile ölçülmüş ve 12, 13, 14 bar basınçta üretilen tozlar 2,5 mm çaplı huniden akmasına rağmen daha yüksek basınçta üretilen tozlar akmamıştır. Akmayan tozların ölçümü ise

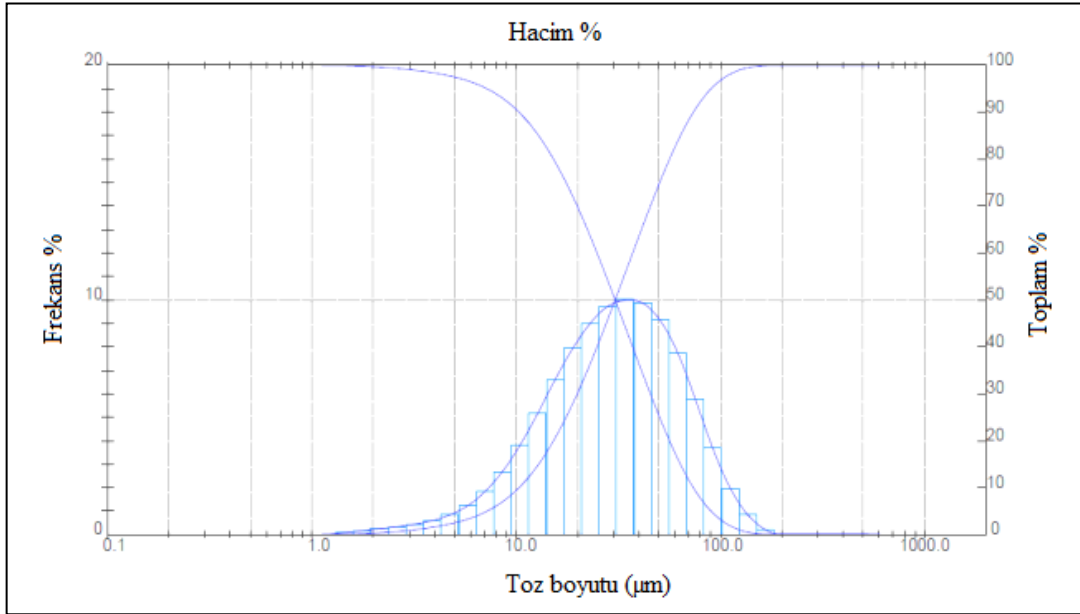
5,00 mm çaplı Carney hunisi ile yapılmıştır. Hall hunisi ile ölçümde 30 saniye civarında olan akış süreleri, Carney hunisi ile yapılan ölçümlerde 3,8 ile 6 saniye arasında değişmektedir. Toz boyutu dağılımının log-normal dağılım eğrisine sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.8. Farklı basınçlarda gaz atomizasyonu ile üretilmiş toz boyutu özellikleri

Gaz Basıncı (bar)	d ₅₀ (µm)	d ₁₀ (µm)	d ₉₀ (µm)
12	47,8	15,73	101,72
13	46,77	15,33	110,23
14	39,84	13,6	93,82
15	39,63	12,93	91,25
17	38,84	11,97	91,53
18	33,17	11,34	80,47
20	32,98	11,26	81
22	30,57	10,34	73,83

Çizelge 4.9. Farklı basınçlarda üretilen tozların özellikleri

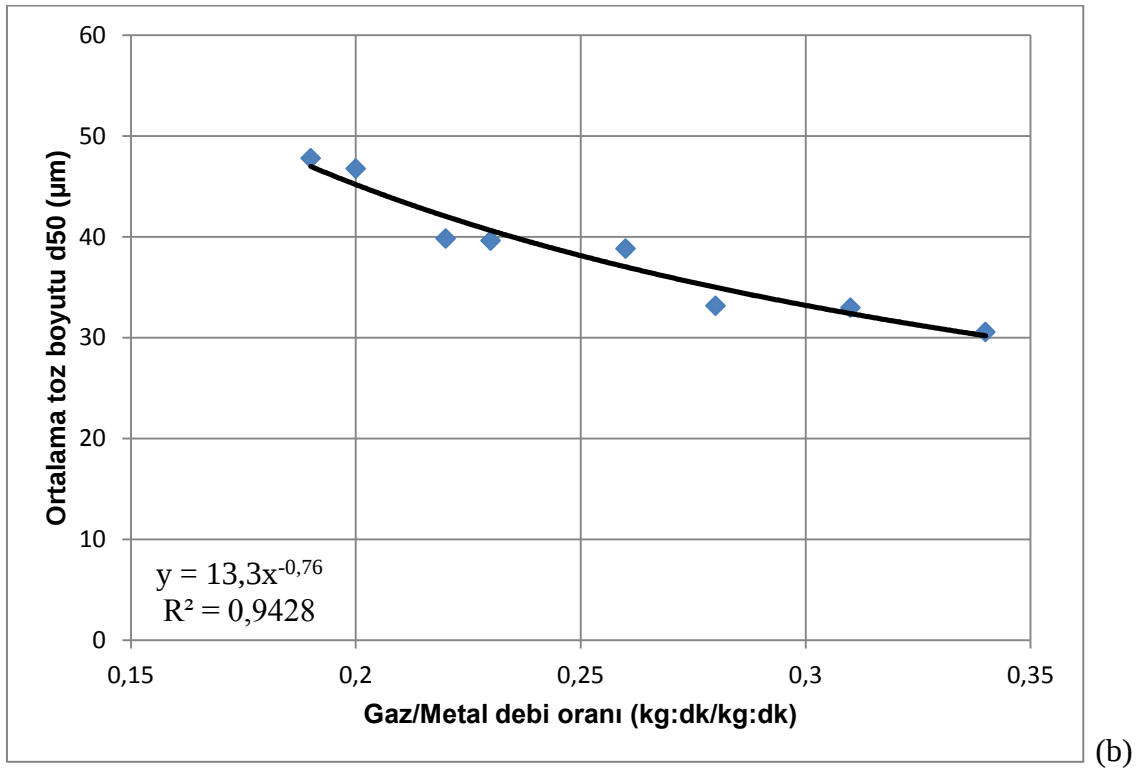
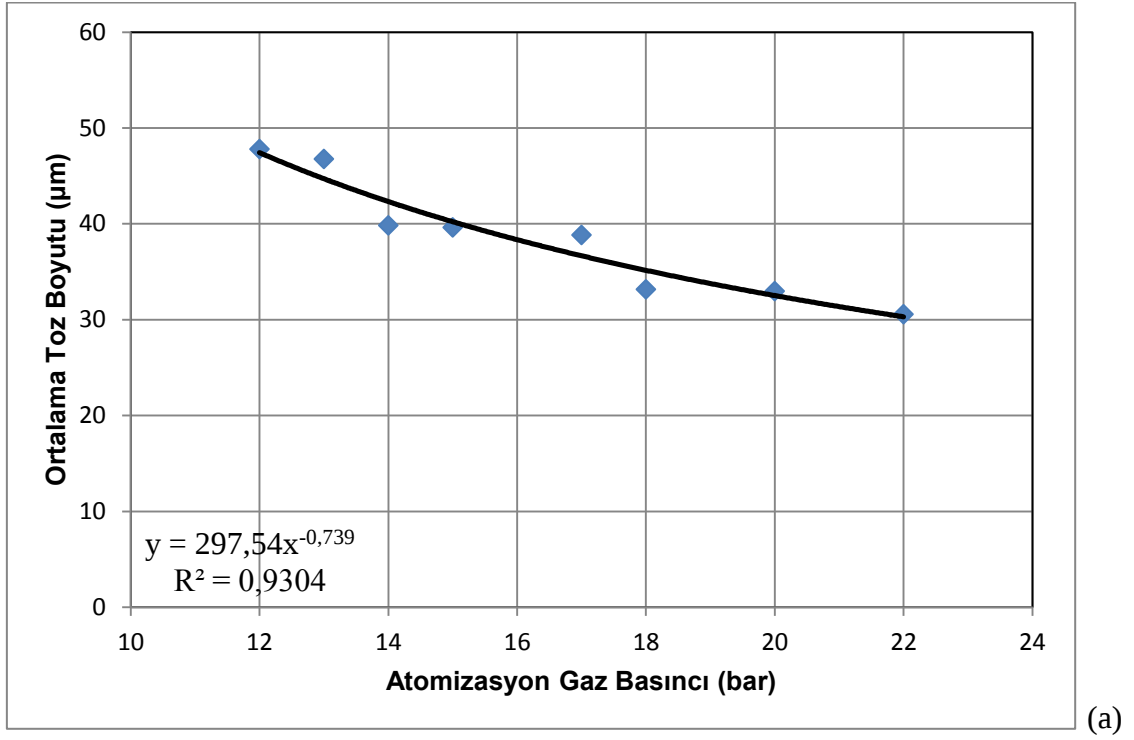
Gaz Basıncı (bar)	D ₅₀ (mikron)	Görünür Yoğunluk (g/cm ³)	Vurgu Yoğunluğu (g/cm ³)	Akış hızı (s/50g)	Hausner oranı
12	47,80	4,92	4,12	30,40	1,19
13	46,77	4,88	4,15	28,40	1,18
14	39,84	5,00	4,19	30,70	1,19
15	39,63	5,04	4,06	4,30	1,24
17	38,84	5,20	4,22	3,80	1,23
18	33,17	5,20	4,20	4,00	1,24
20	32,98	5,16	4,01	6,00	1,29
22	30,57	5,00	4,11	3,50	1,22



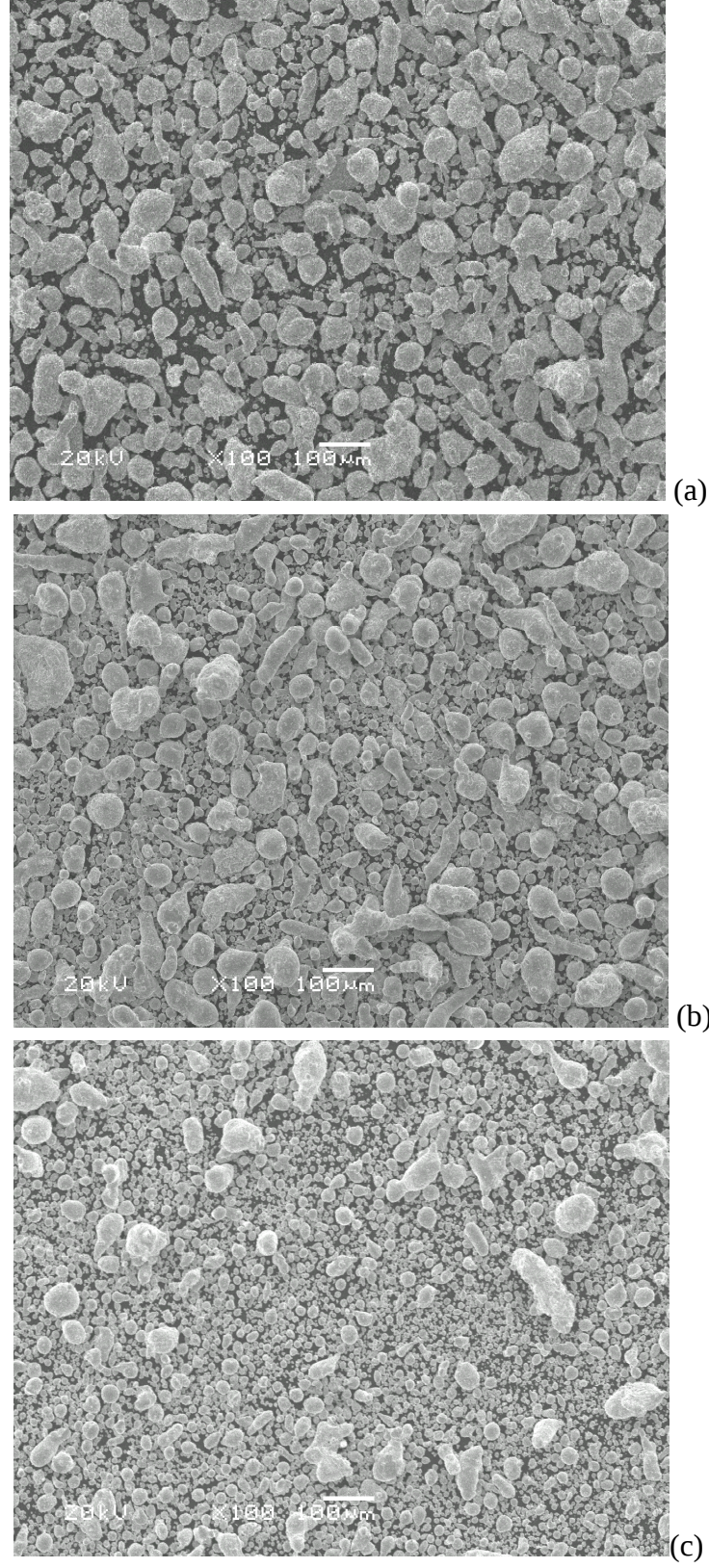
Şekil 4.34. 22 bar gaz basıncı ile üretilmiş tozların boyut dağılım grafiği.

Gaz basıncına ve gaz/metal debisi oranına göre toz boyutu değişim grafiği Şekil 4.35'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere basınç artışı ile toz boyutunun değişim oranı yüksek değildir. Gaz basıncı yaklaşık 2 kat artmasına rağmen toz boyutu 1/3 oranında küçülmüştür. Bu durum gaz atomizasyonu nozulunun yüksek verimde kullanıldığını göstermektedir. Ayrıca gaz/metal debi oranlarının düşük olduğu, en yüksek gaz basıncında bile bu oran 0,34 olması nozul veriminin yüksek olduğunu göstermektedir.

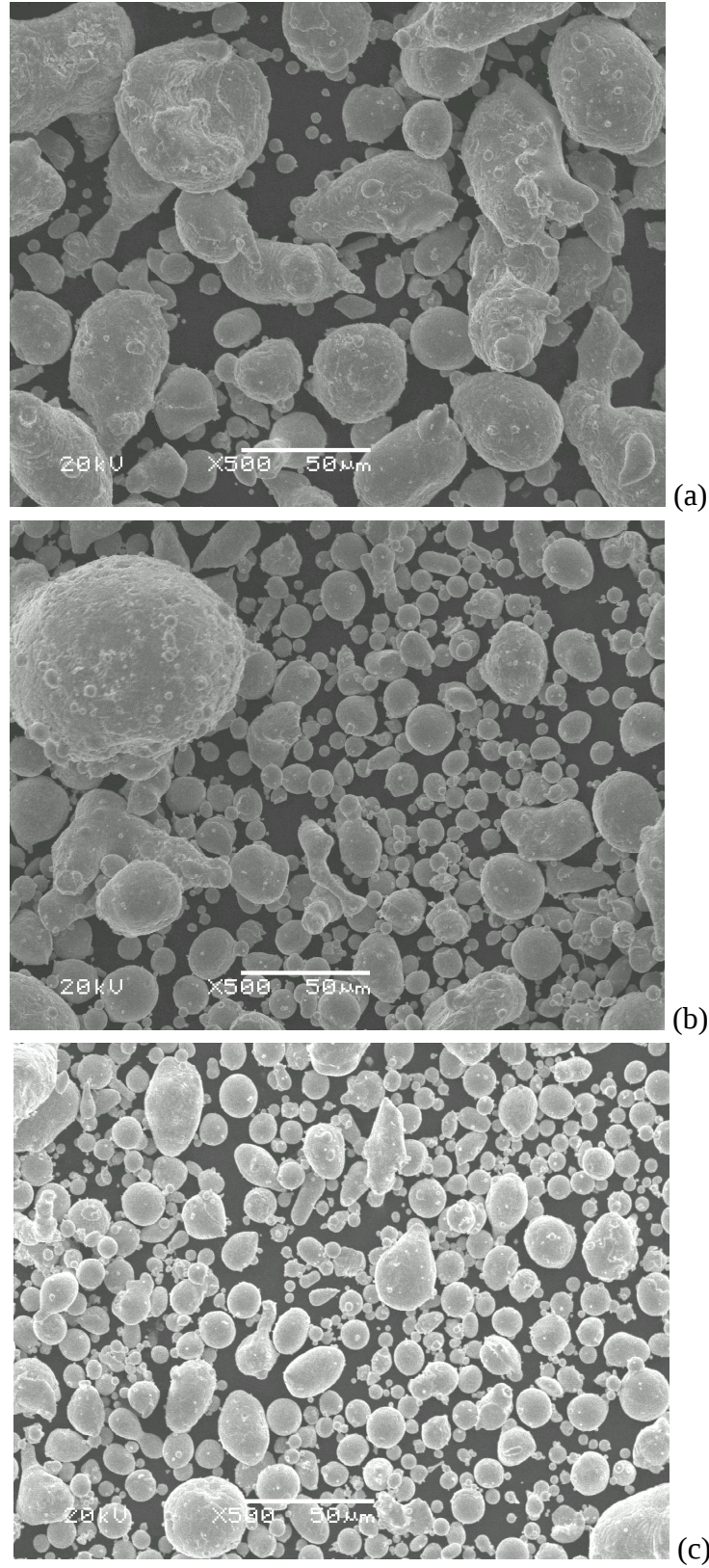
Tozların morfolojisinin belirlenmesi için SEM resimleri çekilmiştir (Şekil 4.36-4.38). SEM resimleri incelendiğinde düşük basınçta üretilen tozlardan iri olanların yuvarlak şekilli, küçüklerinin ise küresel şekilli oldukları görülmüştür. Ayrıca küçük toz miktarının ($<10 \mu\text{m}$) oldukça az olduğu görülmektedir. Yüksek basınçta üretilen tozların ise daha küçük ve hemen hemen tamamının küresel şekilli olduğu, çok az sayıda $100 \mu\text{m}$ civarında iri parçacıkların yuvarlak şekle sahip olduğu görülmüştür. Tozların yüzey yapısı incelendiğinde dendritik ve hücreli mikro yapıya sahip oldukları görülmektedir.



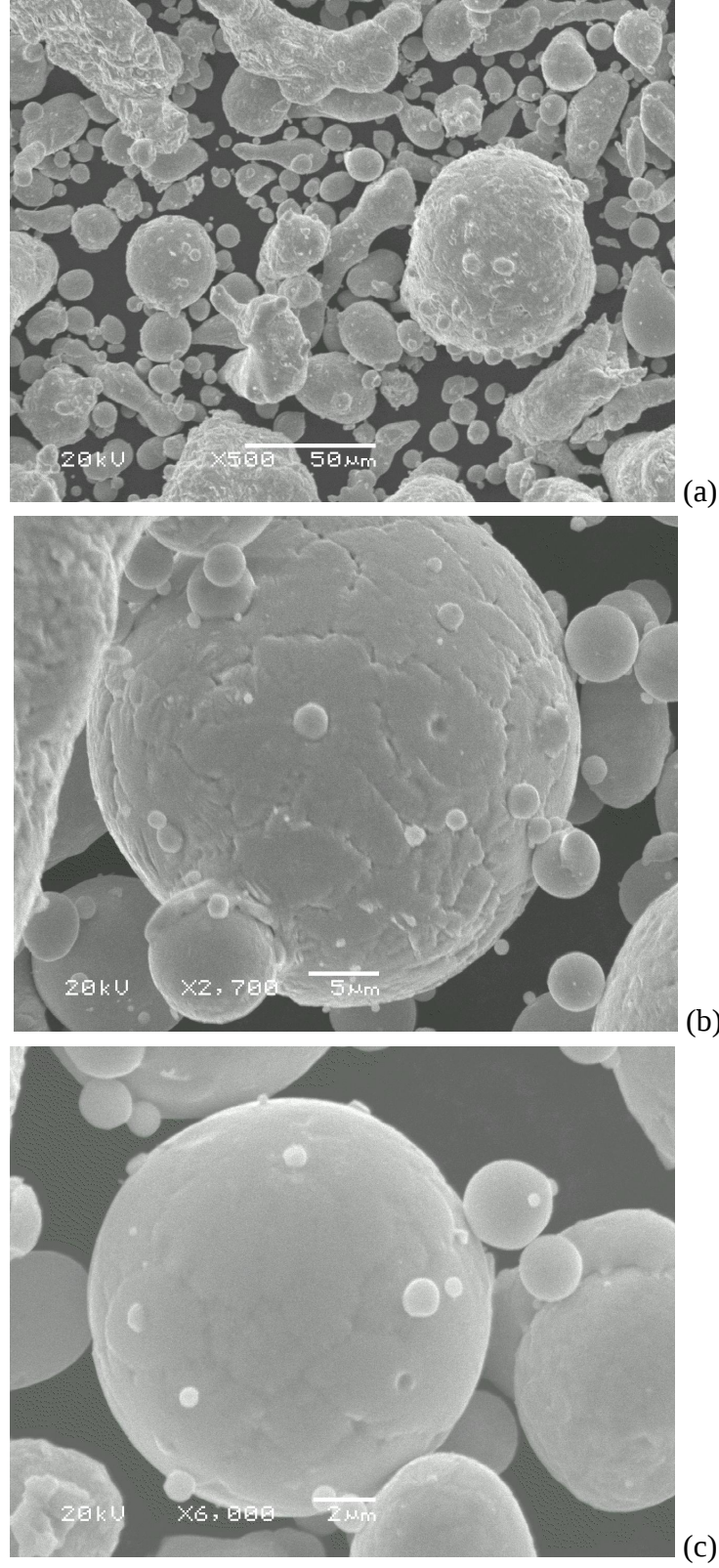
Şekil 4.35. Atomizasyon gaz basıncının (a) ve gaz/metal kütleli debi oranının (b) toz boyutuna etkisi.



Şekil 4.36. Farklı basınçlarda üretilmiş gaz atomize toz resimleri (x100): (a) 12 bar, (b) 14 bar, (c) 20 bar.



Şekil 4.37. Farklı basınçlarda üretilmiş gaz atomize toz resimleri (x500): (a) 12 bar, (b) 15 bar, (c) 20 bar.



Şekil 4.38. Farklı basınçlarda üretilmiş gaz atomize toz yüzey yapıları: (a) 12 bar, (b) 15 bar, (c) 20 bar.

4.6.2. Toz üretim deneyleri (DPÜ BAP Projesi)

Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesinde yapılan çalışmalarda yakından eşlemeli De Laval tipi nozul sistemi kullanılarak azot gazı ile kalay tozu üretimi gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyde yaklaşık 1 kg malzeme ergitilerek toz haline getirilmiştir. Üretilen tozlar 150 μm 'lik elek ile elendikten sonra plastik kaplarda muhafaza edilmiştir.

Çalışmalarda farklı basınçlar, farklı çıkıntı uzunlukları, farklı metal akış çapları ve farklı boğaz alanı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Atomizasyon sırasında sıvı kalay, ergime sıcaklığının üzerinde (400 °C) ısıtılmıştır. Yakından eşlemeli Laval tipi nozul ile yapılan her bir deneydeki atomizasyon değişkenlerine ait bilgiler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

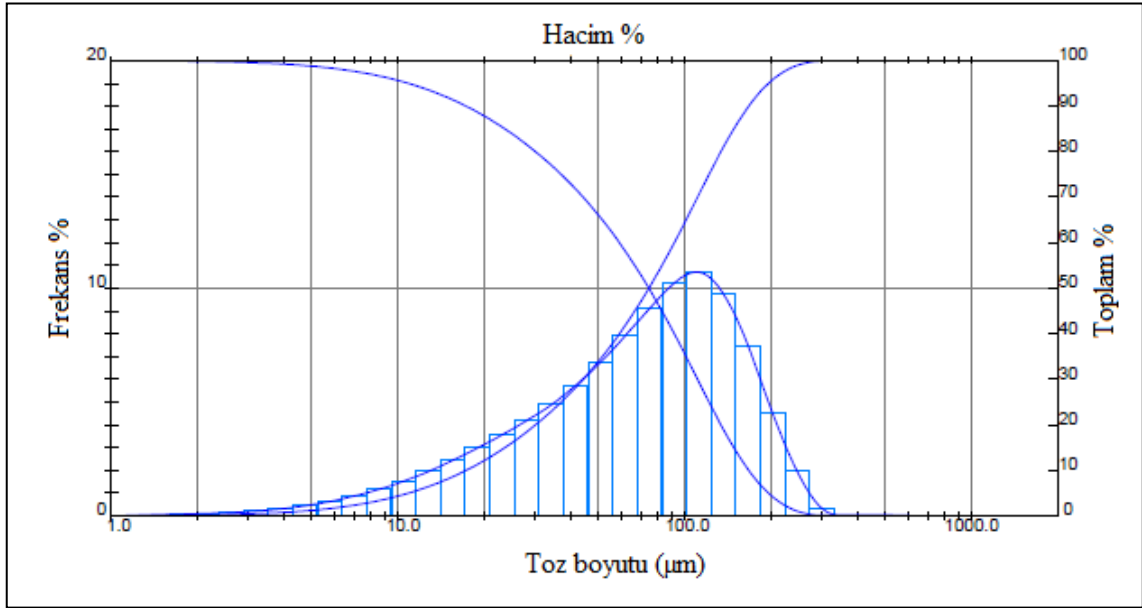
Çizelge 4.10. Yakından eşlemeli nozul için atomizasyon değişkenleri

Deney No	Atomizasyon Gaz Basıncı (bar)	Metal Akış Çapı (mm)	Çıkıntı Mesafesi (mm)	Boğaz Alanı (mm^2)
1	8	4	4	12,86
2	11	4	4	12,86
3	15	4	4	12,86
4	11	4	6	15,48
5	11,2	4	6	20,76
6	20	4	4	12,86
7	11	4	7	10,25
8	15	4	7	10,25
9	15	4	6,5	10,25
10	18,5	3,5	6,5	11,29
11	18,5	4	6,5	11,29
12	18,5	4,5	6,5	11,29
13	12	3,5	6,5	11,29
14	9	3,5	6,5	11,29
15	17	5	6,5	11,29

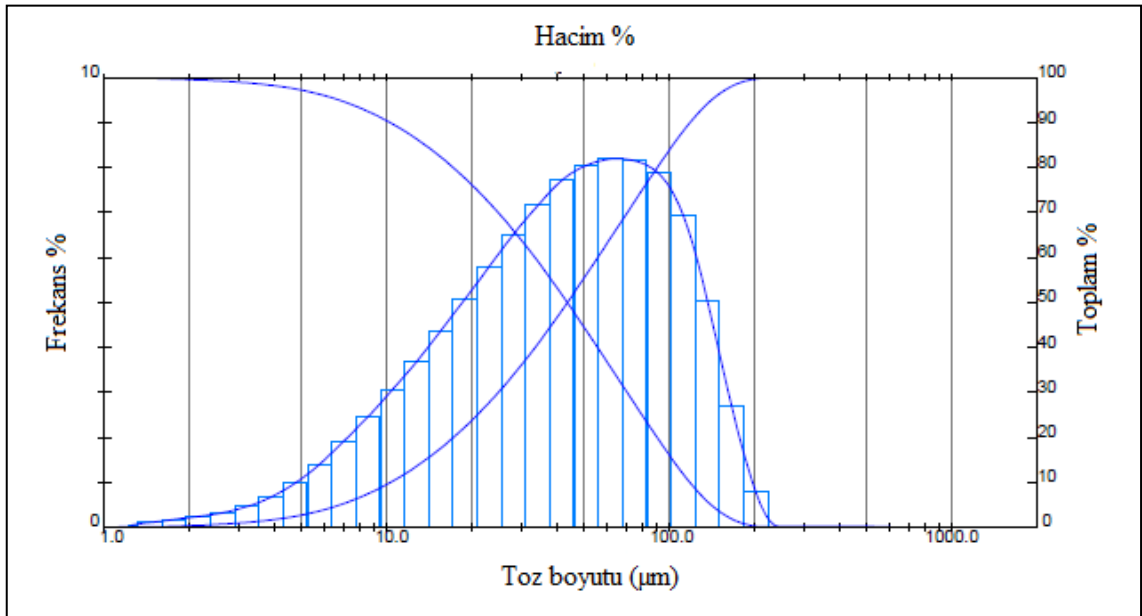
Farklı atomizasyon değişkenleriyle üretilen tozların, boyut analizleri sonucunda elde edilen toz boyutları ile ilgili değerler Çizelge 4.11’de görülmektedir. Ayrıca üretilen tozlara ait toz boyut dağılımı ve toplam % eğrilerine ait örnekler Şekil 4.39-4.40’da verilmiştir.

Çizelge 4.11. Yapılan deneylerde elde edilen toz boyutlarıyla ilgili değerler

Deney no	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)	d_{10} (μm)
1	75,28	156,31	17,41
2	39,3	113,28	8,28
3	32,07	91,44	6,68
4	43,46	117,64	8,28
5	43,5	127,11	9,51
6	32,91	103,54	6,08
7	69,61	153,79	11,72
8	46,16	123,4	8,02
9	42,73	113,43	8,8
10	28,02	87,4	6,5
11	31,84	89,62	6,74
12	34,48	93,34	7,32
13	40,05	103,82	9,68
14	58,58	130,06	15,23
15	47,55	123,19	9,73



Şekil 4.39. 8 bar basınçla üretilen azot atomize kalay tozu için toz dağılım eğrisi (Deney 1)



Şekil 4.40. 12 bar basınçla üretilen azot atomize kalay tozu için toz dağılım eğrisi (Deney 13)

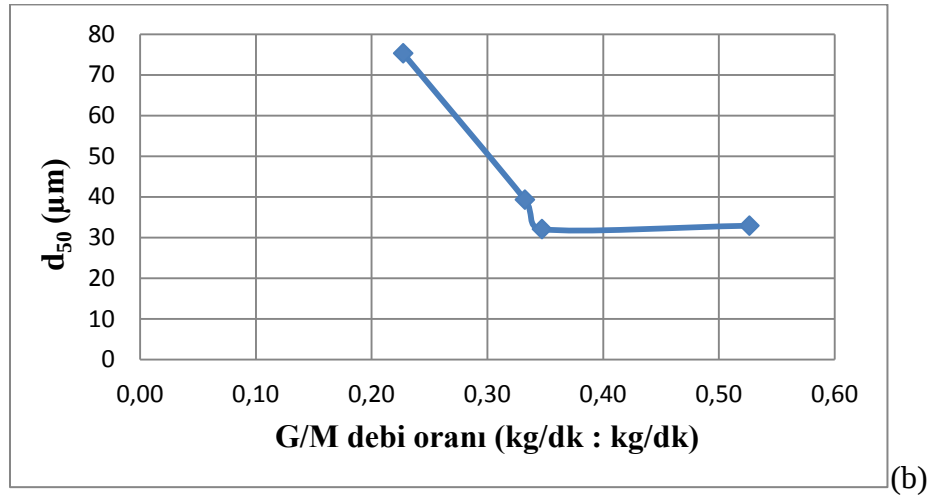
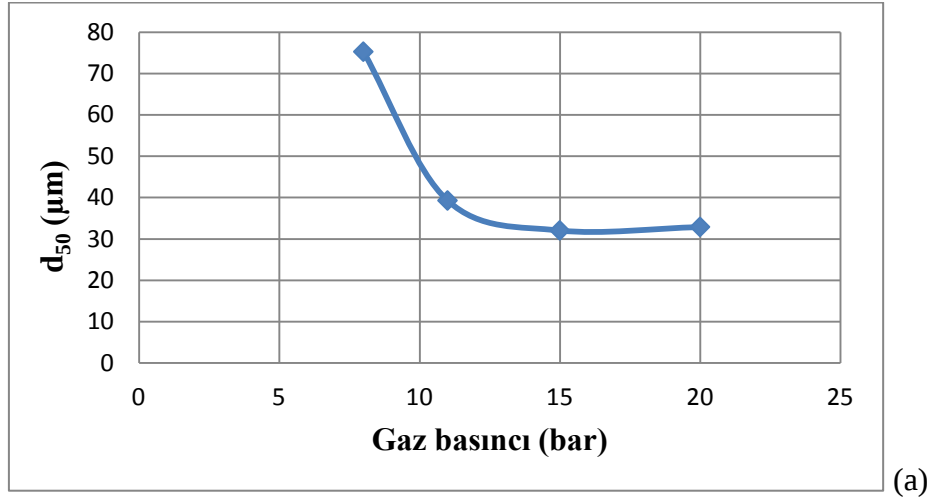
4.6.2.1. Gaz basınç değişiminin toz boyutuna etkisi

Gaz basınç değişiminin toz boyutuna etkisini incelemek için atomizasyon gaz basıncı 8, 11, 15 ve 20 bar olan dört deney gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.12'deki sonuçlar elde edilmiştir.

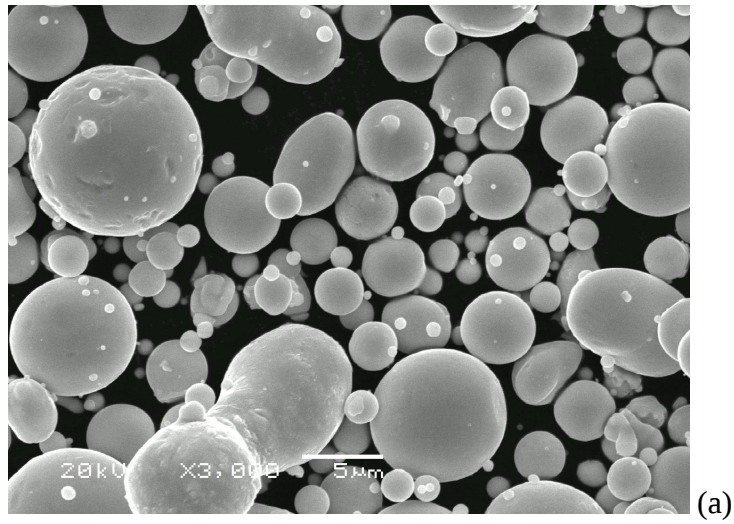
Çizelge 4.12. Gaz basınç değişiminin toz boyutuna etkisi

Deney No	Gaz basıncı (bar)	Miktar (g)	Gaz Debisi (kg/dk)	Metal Debisi (kg/dk)	G/M debi oranı	d ₅₀ (µm)
1	8	1032	1,28	5,63	0,23	75,28
2	11	1042	1,89	5,68	0,33	39,3
3	15	1029	2,68	7,72	0,35	32,07
6	20	1020	3,58	6,80	0,53	32,91

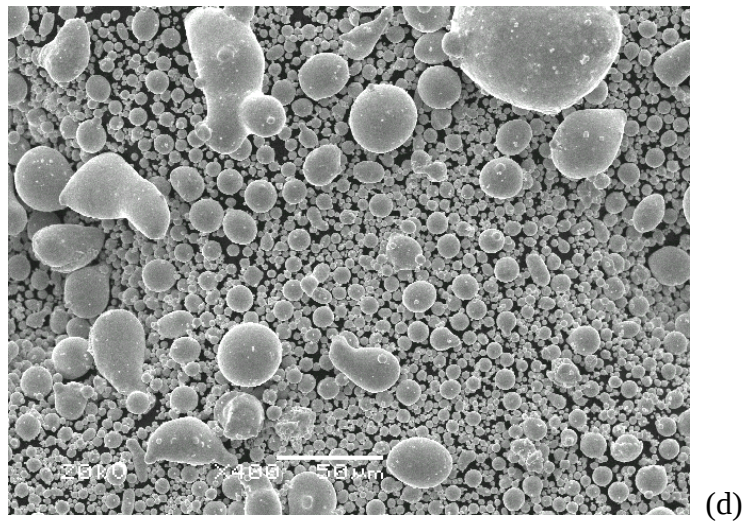
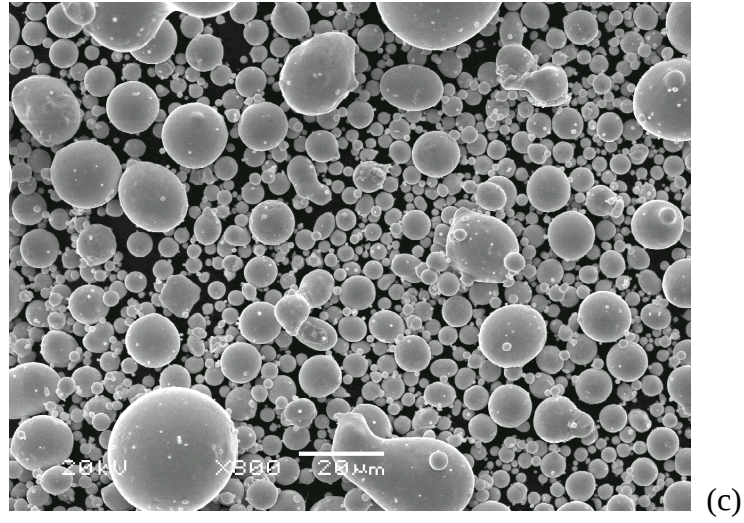
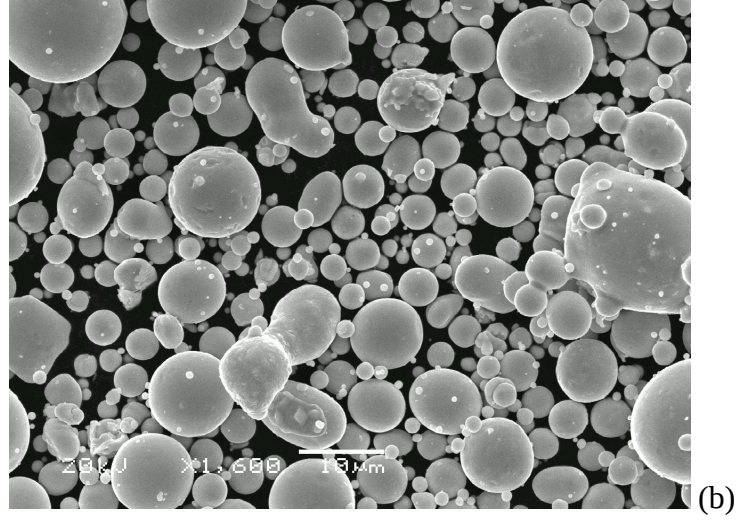
Gaz basıncının artması ile toz boyutu küçülmektedir. Şekil 4.41 (a)'da görüldüğü üzere atomizasyon basıncı 15 bar'dan 20 bar'a çıkılması durumunda toz boyutunda çok büyük değişim olmamıştır. Bu nedenle bu şartlardaki nozul için atomizasyon basıncını daha fazla arttırmamıza gerek olmadığına karar verilmiştir. Şekil 4.41 (b) de G/M debi oranına göre toz boyut değişimi görülmektedir. Yaklaşık 0,35 G/M debi oranı değerinde nozulun en küçük boyutlu toz üretebildiği görülmektedir. Bu veriler ışığında nozul geometrileri için belirli bir basınçtan sonra toz boyutunun küçülmemesi nozul geometrisinin verimine bağlı olduğu değerlendirilmiştir. 2 nolu deneye ait azot atomize kalay tozunun farklı büyütmelerdeki taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.42 (a, b, c ve d) verilmiştir. Tozların küresel şekilli ve uydulaşmanın çok az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.41. Toz boyut değişimi (a) Gaz basıncına göre, (b) G/M debi oranına göre.



Şekil 4.42. Deney 2 azot atomize kalay tozu SEM görüntüsü a) (x3000), b) (x1600) c)(x800), d) (x400)



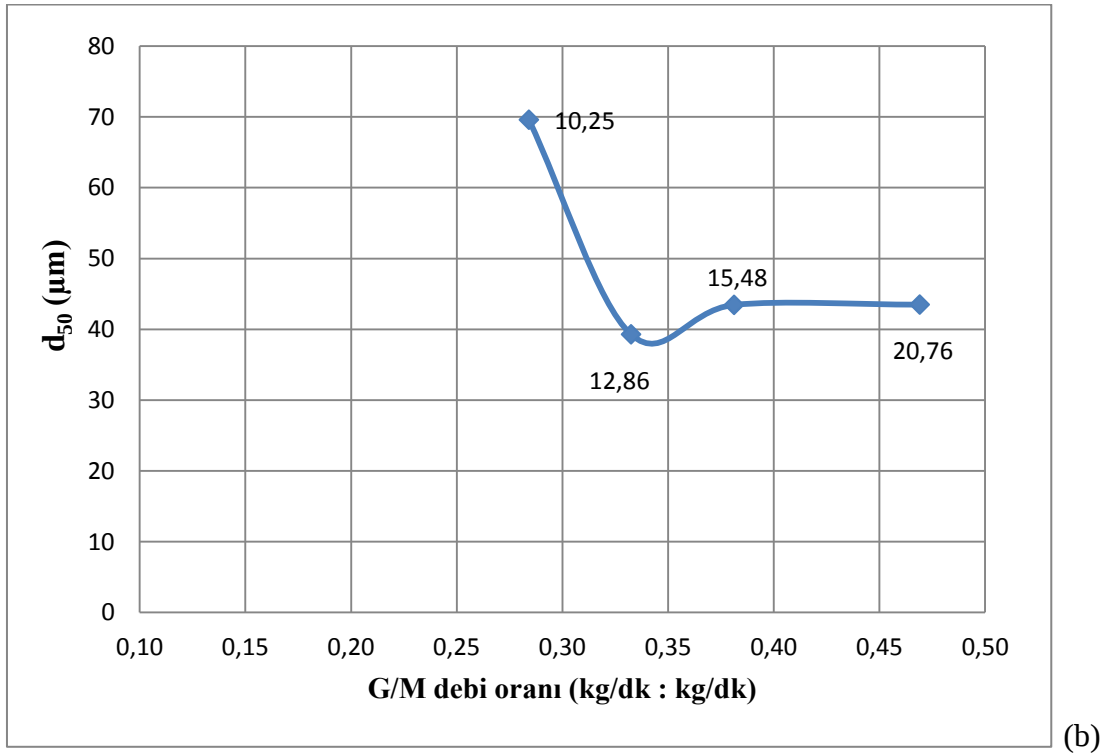
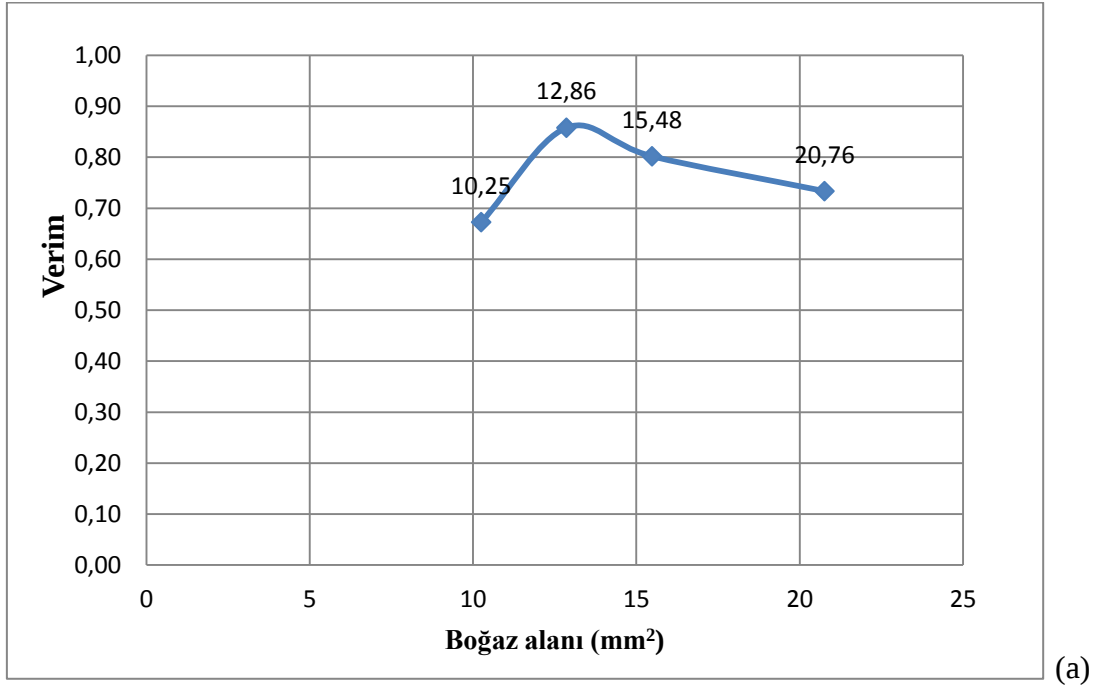
Şekil 4.42. Devamı. b) (x1600) c)(x800), d) (x400)

4.6.2.2. Boğaz alanı değişimine göre toz boyutu değişimi

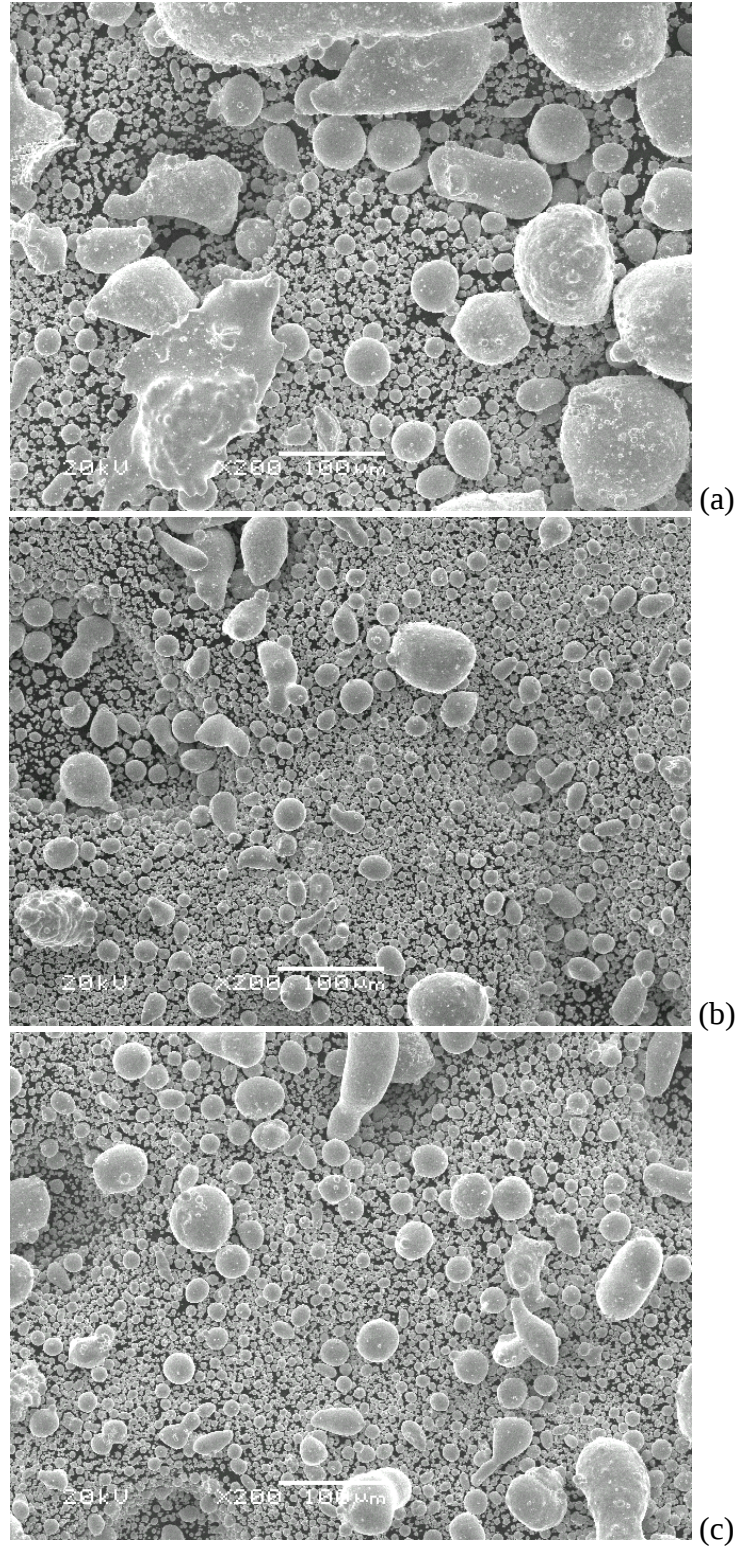
BAP projesi kapsamında imal edilen nozulun boğaz açıklığı 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm ve 0,4 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu açıklık değerlerine göre boğaz alanları da sırasıyla 10,25 mm², 12,86 mm², 15,48 mm² ve 20,76 mm²'dir. Yapılan deneysel çalışmada atomizasyon basıncı 11 bar ve metal akış çapı 4 mm sabit değerlerdir. Sonuçlar Çizelge 4.13'te verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen toz miktarı, 150 µm'lik (100 meş) elekten elendikten sonra elde edilen elek altı kalay tozunun tartılması ile elde edilen miktardır. Elde edilen toz miktarının, deney öncesi kalay miktarına bölünmesi ile deneysel çalışmanın atomizasyon verimi hesaplanmıştır. Şekil 4.43'te dört farklı boğaz alanına göre yapılan atomizasyon neticesinde verimdeki değişimi göstermektedir. Bu sonuca göre 12.86 mm² boğaz alanına sahip (deney 2) nozulun verimi diğerlerine göre yüksektir. Ayrıca toz boyut dağılımına göre de en düşük toz boyut dağılımı 2 nolu deneyde tespit edilmiştir. Şekil 4.44'te deney 7, deney 2 ve deney 4 arasındaki toz boyut farkı görülmektedir. Deney 7'de ergitilen kalay miktarının % 67'si 150 µm altı toz elde edilirken, deney 2'de bu oran %86 ve deney 4'te %80'dir. Bu sonuçlar ışığında boğaz alanının bu şartlardaki nozul için 12.86 mm² (deney 2) uygun olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.13. Boğaz alanı değişimine göre toz boyutuna etkisi

Deney No	Boğaz Alanı (mm ²)	Malzeme Miktarı (g) [A]	Gaz Debisi (kg/dk)	Metal Debisi (kg/dk)	G/M debisi oranı	d ₅₀ (µm)	(< 150 µm) Toz Miktarı (g) [B]	Verim [B/A]
7	10,25	987	1,53	5,38	0,28	69,61	664	0,67
2	12,86	1042	1,89	5,68	0,33	39,3	894	0,86
4	15,48	1015	2,58	6,77	0,38	43,46	814	0,80
5	20,76	1036	3,24	6,91	0,47	43,5	760	0,73



Şekil 4.43. (a) Boğaz alanı değişimine göre verim, (b) G/M debi oranına göre toz boyut değişimi

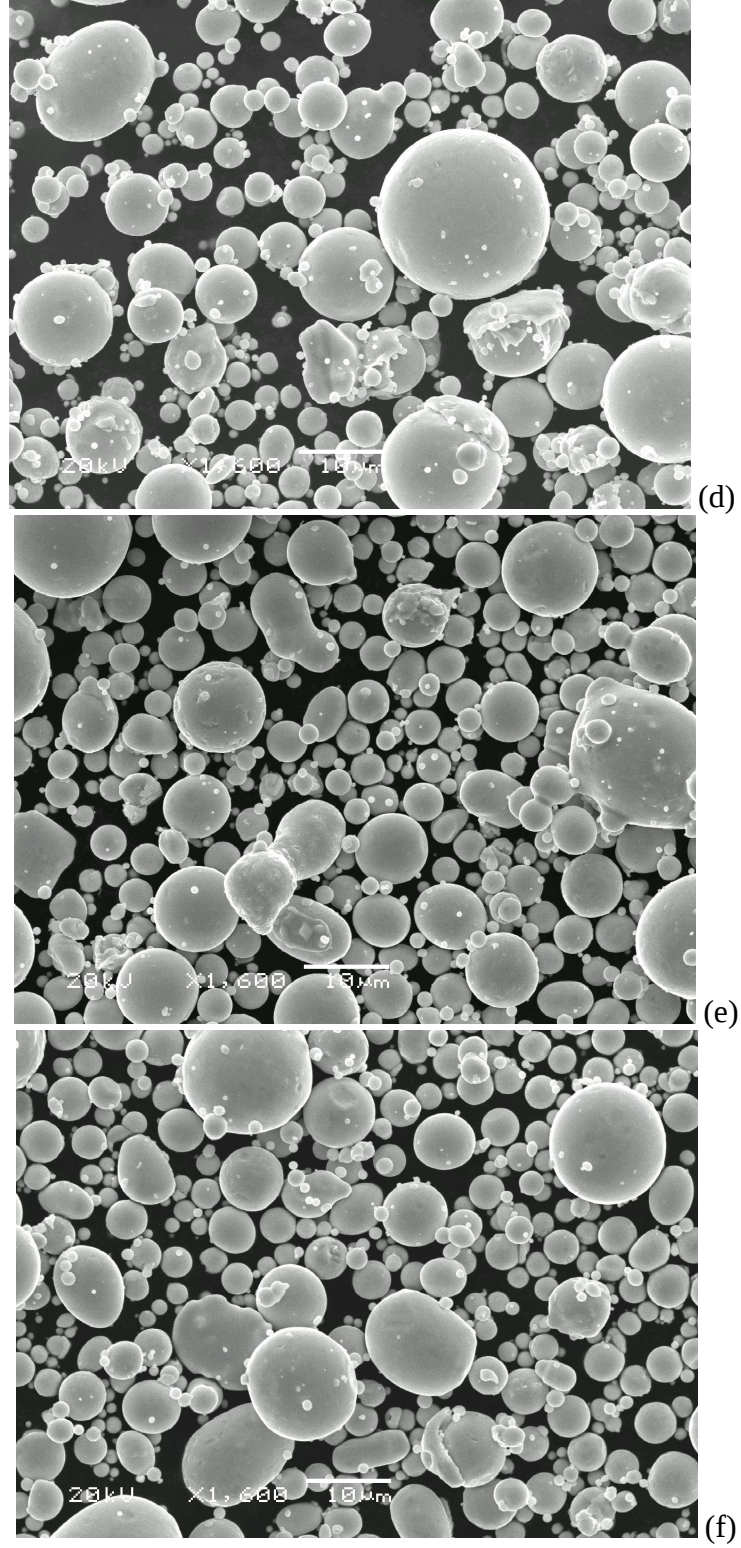


Şekil 4.44. Azot atomize kalay tozu SEM görüntüsü

Deney 7: a) (x100) d) (x1600)

Deney 2: b) (x100) e) (x1600)

Deney 4: c) (x100) f) (x1600)



Şekil 4.44. Devamı

Deney 7: d) (x1600)

Deney 2: e) (x1600)

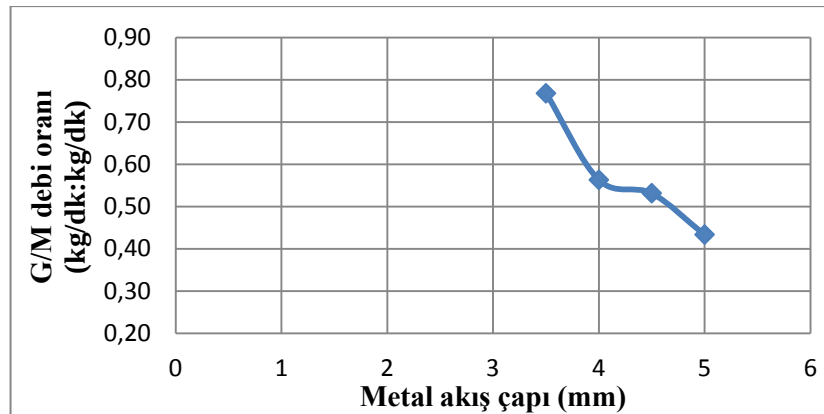
Deney 4: f) (x1600)

4.6.2.3. Metal akış çapı değişimine göre toz boyut değişimi

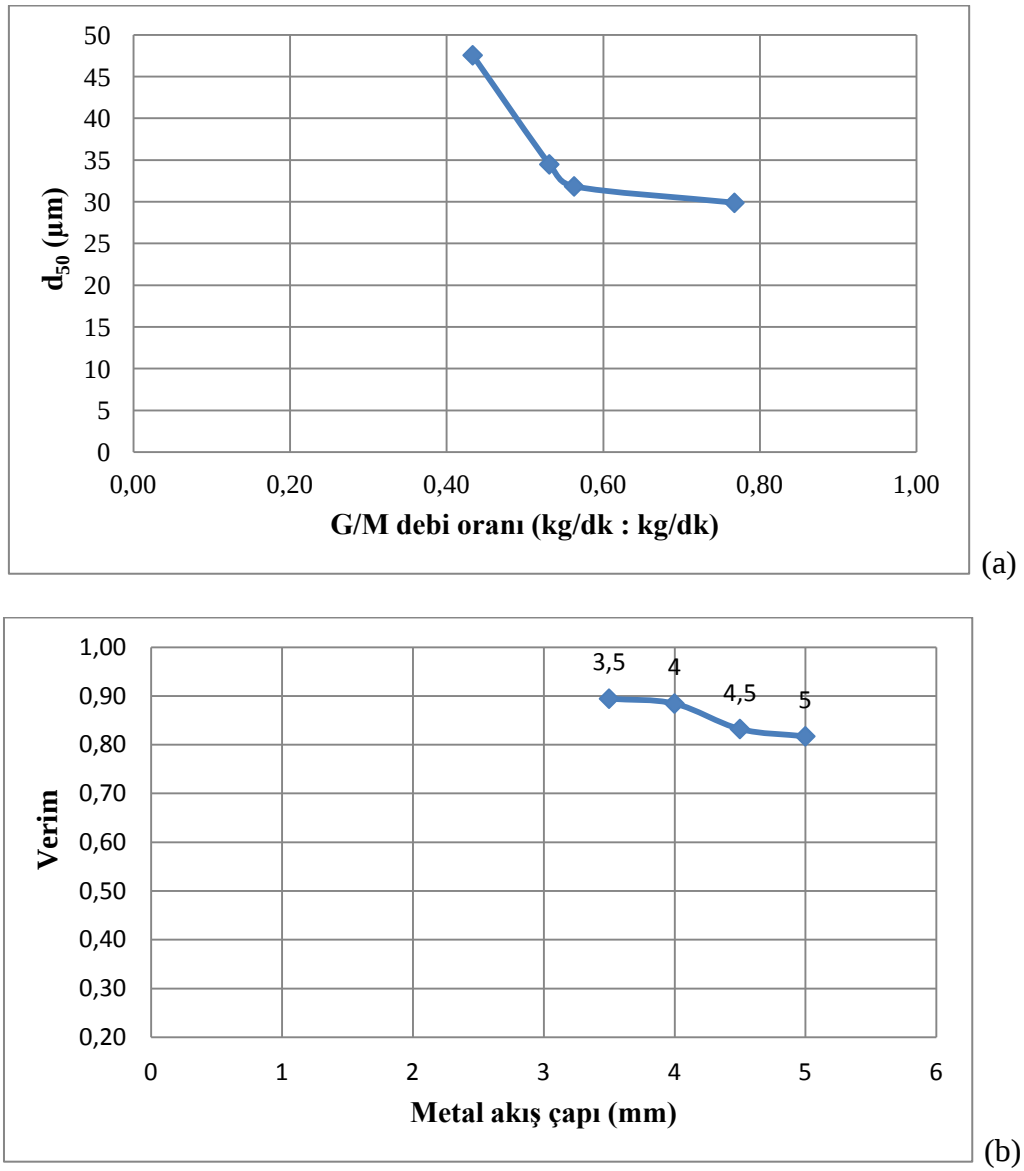
Sıvı metal akış çapının toz boyut değişimine etkisini belirlemek için 3,5 mm, 4 mm, 4,5 mm ve 5 mm olan dört farklı metal akış çapında deneyler yapılmıştır (Çizelge 4.14). Yapılan deneysel çalışmada boğaz açıklığı 0,22 mm ($11,29 \text{ mm}^2$ boğaz alanı) ve çıkıntı mesafesi 6,5 mm sabit değerlerdir. Metal akış çapı 5 mm için atomizasyon basıncı 17 bar iken, diğer çaplar için atomizasyon basıncı 18,5 bar olarak ayarlanmıştır. Metal akış çapının artışı ile G/M debi oranı azalmaktadır (Şekil 4.45). Metal akış çapının ve G/M debisi oranına göre toz boyut değişimi Şekil 4.46'da verilmiştir. Bu şartlar altında 4 mm metal akış çapının olması atomizasyon verimi, ortalama toz boyutu ve G/M debisi oran değerlerine göre uygun olduğu tespit edilmiştir. Sıvı metal akış borusu çapındaki değişim sıvı metal filmi kalınlığını, dolayısıyla da gaz ile sıvı metal arasındaki ısı transferini etkiler. Daha büyük çaptaki sıvı metal demeti, birincil bölünme esnasında oluşan damlacıkların ortalama boyutunu daha büyük yapar ve böylece daha iri tozlar elde edilir (Uslan, 1999).

Çizelge 4.14. Metal akış çapı değişimine göre toz boyutuna etkisi

Deney No	Metal akış çapı (mm)	Malzeme Miktar (g) [A]	Gaz Debisi (kg/dk)	Metal Debisi (kg/dk)	G/M debisi oranı	d_{50} (μm)	(< 150 μm) Toz Miktarı (g) [B]	Verim [B/A]
10	3,5	1011	2,91	3,79	0,77	29,87	904	0,89
11	4	1027	2,89	5,14	0,56	31,84	908	0,88
12	4,5	994	2,88	5,42	0,53	34,48	827	0,83
15	5	1027	2,67	6,16	0,43	47,55	839	0,82

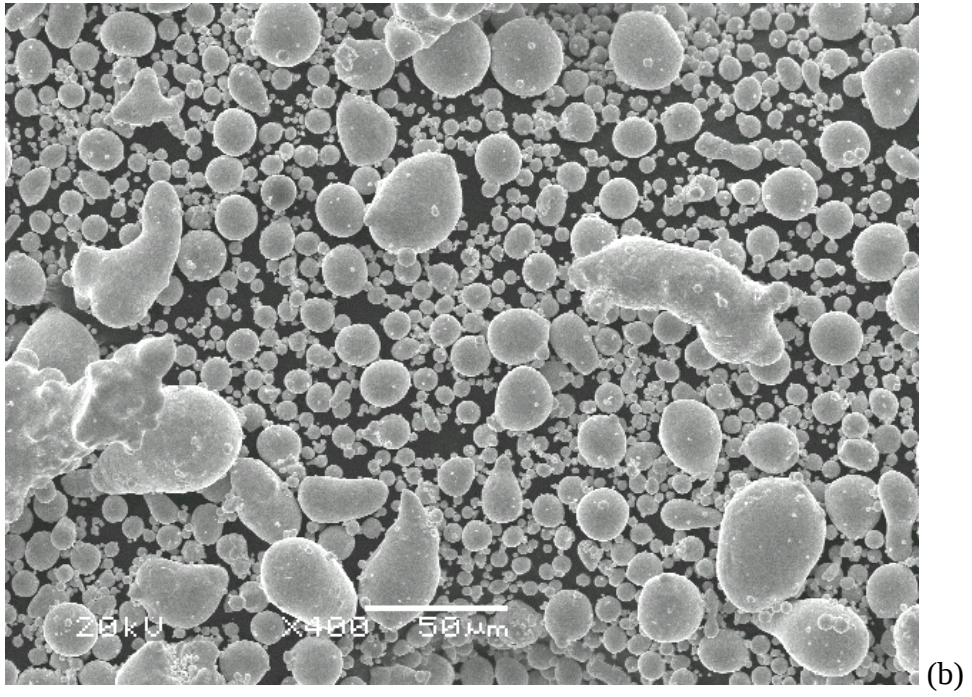
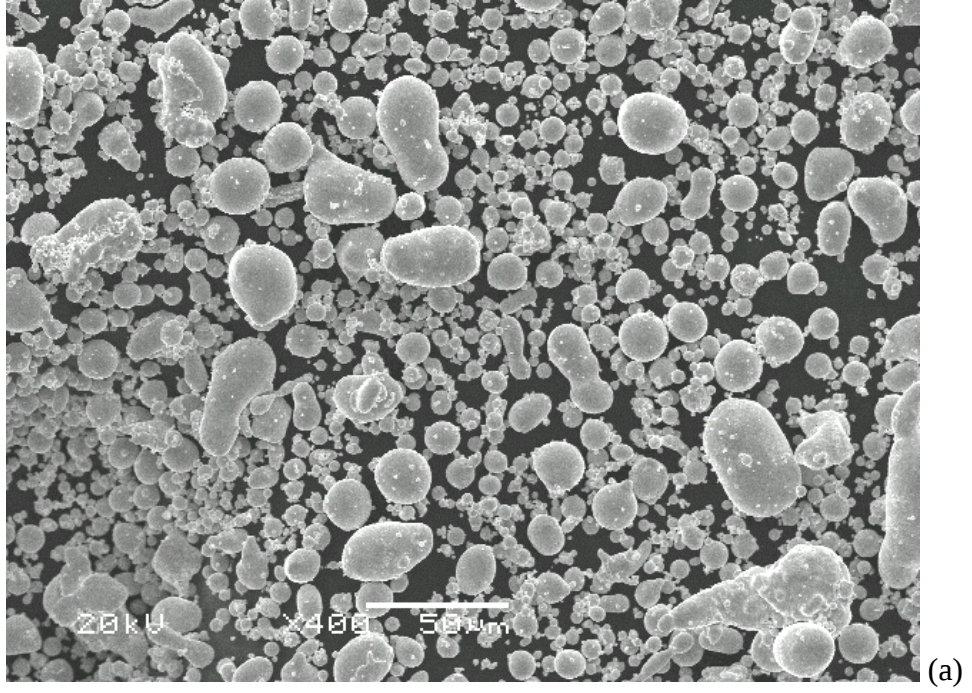


Şekil 4.45. Metal akış çapına göre G/M debi oranı değişimi.



Şekil 4.46. (a) G/M debi oranına göre toz boyut değişimi, (b) Metal akış çapına göre verim.

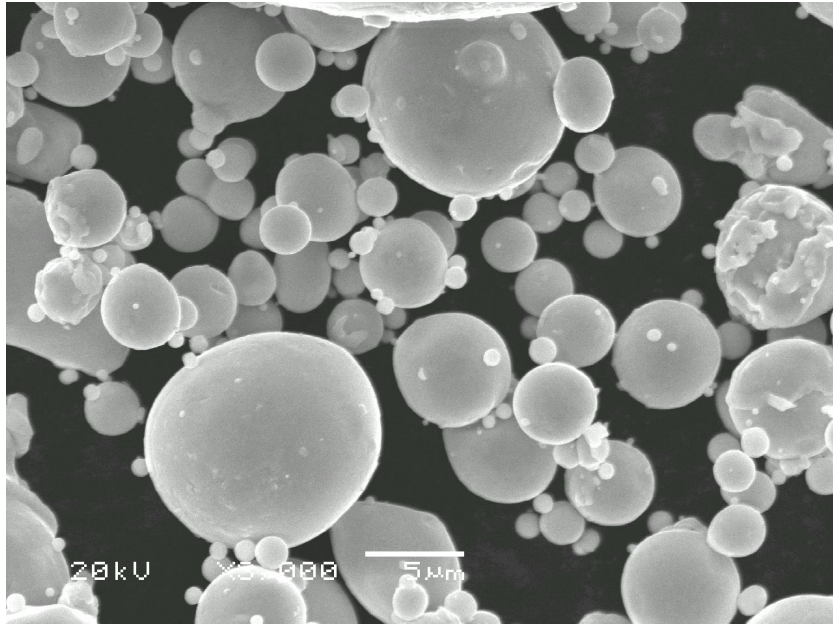
Yapılan deneyler (deney no: 10, 11, 12 ve 15) neticesinde elde edilen ortalama toz boyutu değerleri sırasıyla 29,87 μm , 31,84 μm , 34,48 μm ve 47,55 μm 'dir. Deney 10, 11 ve 12'den elde edilen tozların ortalama toz boyut değerleri birbirine yakındır. Toz boyut farkını gözlemlemek için Şekil 4.47'de deney 10 ve deney 15 için farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri verilmiştir.



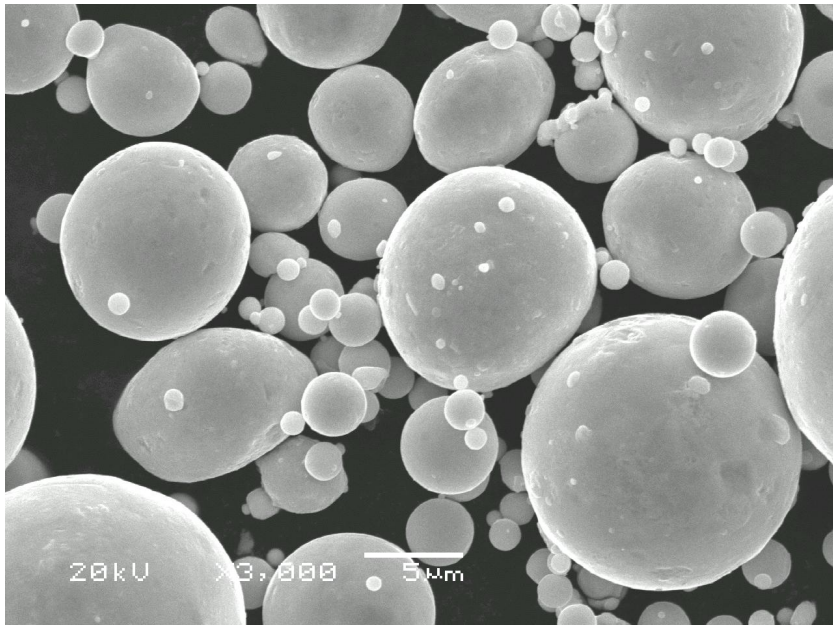
Şekil 4.47. Azot atomize kalay tozu SEM görüntüsü.

Deney 10: a) (x400), c) (x3000)

Deney 15: b)(x400), d) (x3000)



(c)



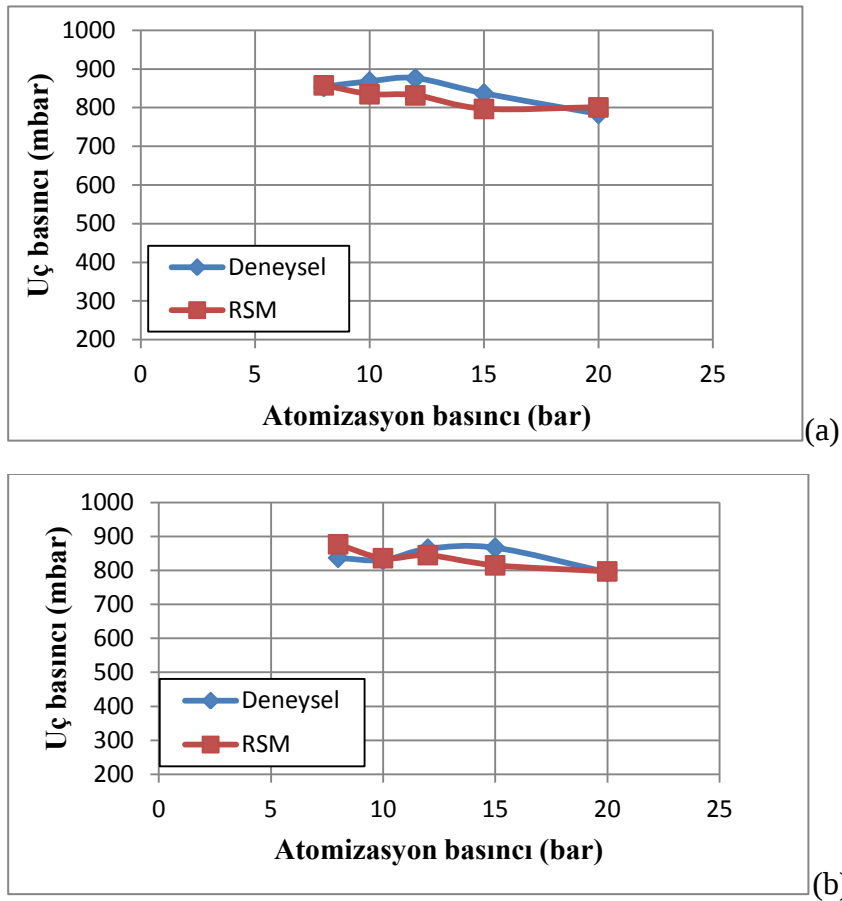
(d)

Şekil 4.47. Devamı. Deney 10: c) (x3000), Deney 15: d) (x3000)

4.6.2.4. Nozul boğaz çapı değişimine göre toz boyut değişimi

Toz üretim deneylerinde kullanılan nozulun metal akış borusu tabanı dış çapı $D=14$ mm, A/A^* oranı 5,95 olarak imal edilmiştir (Şekil 4.29). Boğaz çapının etkisini araştırmak amacıyla boğaz çapı küçültülerek metal akış borusu tabanı dış çapını $D=10$ mm ve $D=8$ mm olacak şekilde iki nozul daha imal edilmiştir. Bu nozulların A/A^* oranı sırasıyla 5,88 ve 5,84 olarak tasarlanmışlardır.

İmal edilen iki yeni nozul için farklı atomizasyon basınç değerlerinde metal akış borusu uç basınç değerleri alınmıştır. Daha sonra aynı HAD simülasyon şartları altında RSM kullanılarak uç basınç değerleri hesaplanmıştır. Nozulun teorik hesaplanan metal akış borusu uç basınç değerleri farklı basınçlar için deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. 8, 10, 12, 15 ve 20 bar basınç altında deneysel veriler ile RSM verileri kıyaslandığında değerlerin, D= 8 mm'lik nozul için yaklaşık % 1-5 arası ve D= 10 mm'lik nozul için yaklaşık % 1-6 arasında sapma görülmüştür (Şekil 4.48). HAD model verileri ile deneysel verilerin kıyaslaması neticesinin benzer yakınlık göstermesi oluşturulan modelin doğruluğunu ispatlamaktadır.



Şekil 4.48. RSM ile deneysel uç basınç verilerinin kıyaslanması a) D= 8 mm nozul b) D=10 mm nozul

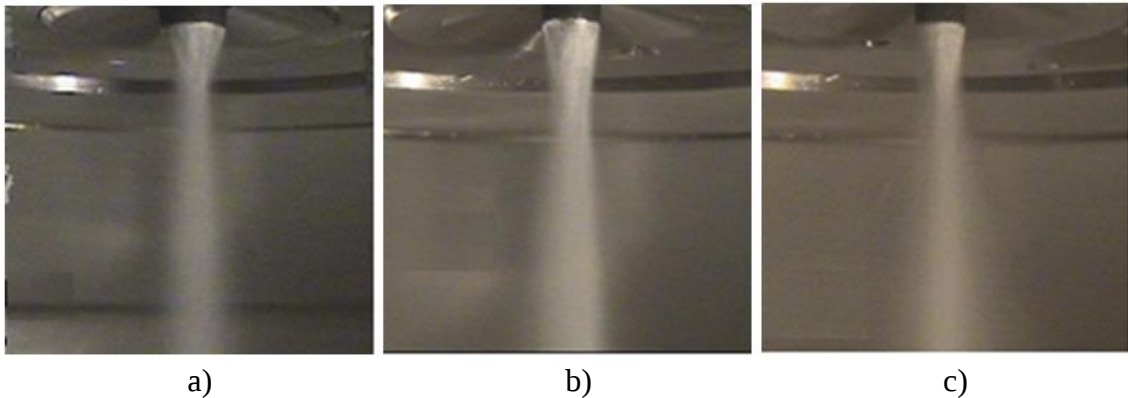
Yapılan bu çalışmada üç farklı nozul ile beş farklı gaz basıncında (8, 10, 12, 15 ve 20 bar) atomize kalay tozu üretim deneyleri yapılmıştır (Çizelge 4.15). Metal akış çapı 3 mm ve çıkıntı mesafesi 5 mm olarak sabit tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucu

elde edilen azot atomize kalay tozu boyutları ile ilgili değerler Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.15. Azot atomize kalay tozu üretimi için atomizasyon değişkenleri ve sonuçları (Metal akış çapı= 3 mm, Çıkıntı mesafesi= 5 mm)

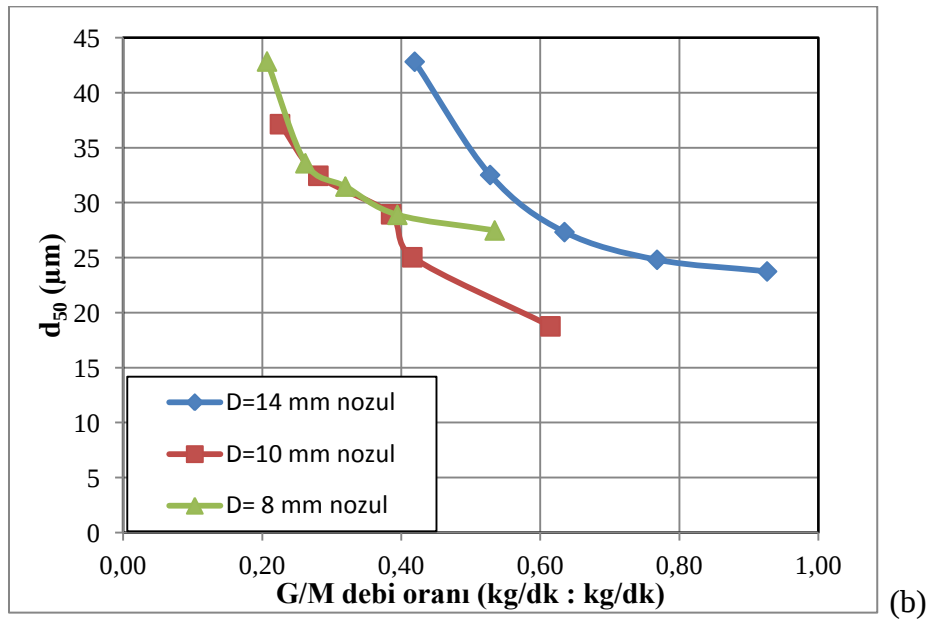
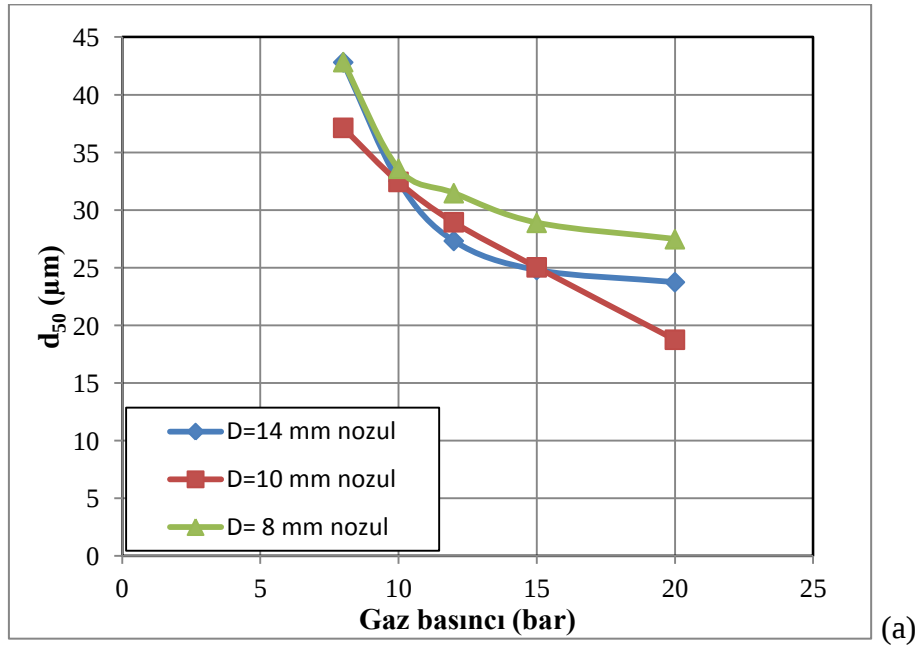
D (mm)	Deney No	Gaz basıncı (bar)	Boğaz Alanı (mm ²)	Miktar (g)	Gaz Debisi (kg/dk)	Metal Debisi (kg/dk)	G/M debi oranı	d ₅₀ (μm)	d ₁₀ (μm)	d ₉₀ (μm)
14	30	20	11,29	966	3,58	3,86	0,93	23,75	6,18	59,34
	16	15		1024	2,36	3,07	0,77	24,81	7,07	58,97
	17	12		1034	1,97	3,10	0,64	27,33	8,49	59,19
	18	10		991	1,57	2,97	0,53	32,52	9,93	70,31
	19	8		1001	1,26	3,00	0,42	42,82	14,86	82,48
10	27	20	9,72	955	2,71	4,41	0,61	18,76	5,19	50,35
	26	15		1057	2,03	4,88	0,42	25,04	6,25	60,98
	20	12		910	1,62	4,20	0,39	28,95	7,35	69,45
	21	10		1041	1,35	4,80	0,28	32,45	8,68	75,43
	22	8		1036	1,08	4,78	0,23	37,14	10,09	79,3
8	28	20	8,14	995	2,28	4,26	0,53	28,9	7,05	68,91
	29	15		1005	1,7	4,31	0,39	27,48	7,47	63,86
	23	12		992	1,36	4,25	0,32	31,47	8,69	71,72
	24	10		1005	1,13	4,31	0,26	33,59	9,95	70,29
	25	8		1025	0,91	4,39	0,21	42,84	14,44	86,3

Kalay tozu üretimi sırasında farklı metal akış borusu taban çapına sahip nozulların 15 bar atomizasyon basıncındaki görüntüleri Şekil 4.49'da verilmiştir. Bu görüntüler atomizasyonun başlangıcından itibaren ilk saniyelerinde elde edilmiştir. Deneysel görüntüler incelendiğinde çap değişiminin akış davranışını önemli oranda etkilemediği görülmüştür.

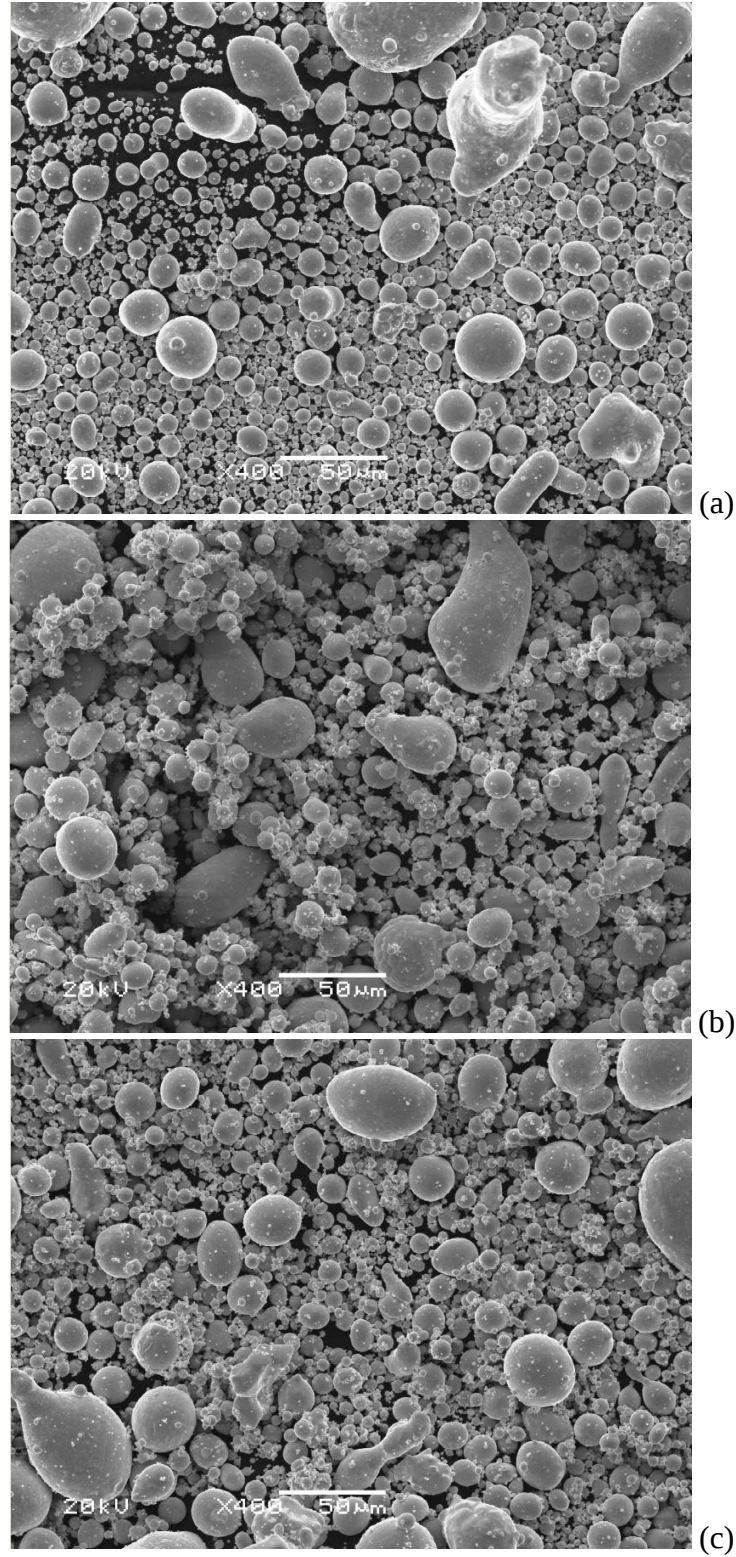


Şekil 4.49. Farklı metal akış borusu taban çapına sahip nozulların 15 bar atomizasyon basıncındaki kalay tozu üretim görüntüleri; a) D=14 mm, b) D=10 mm, c) D=8 mm

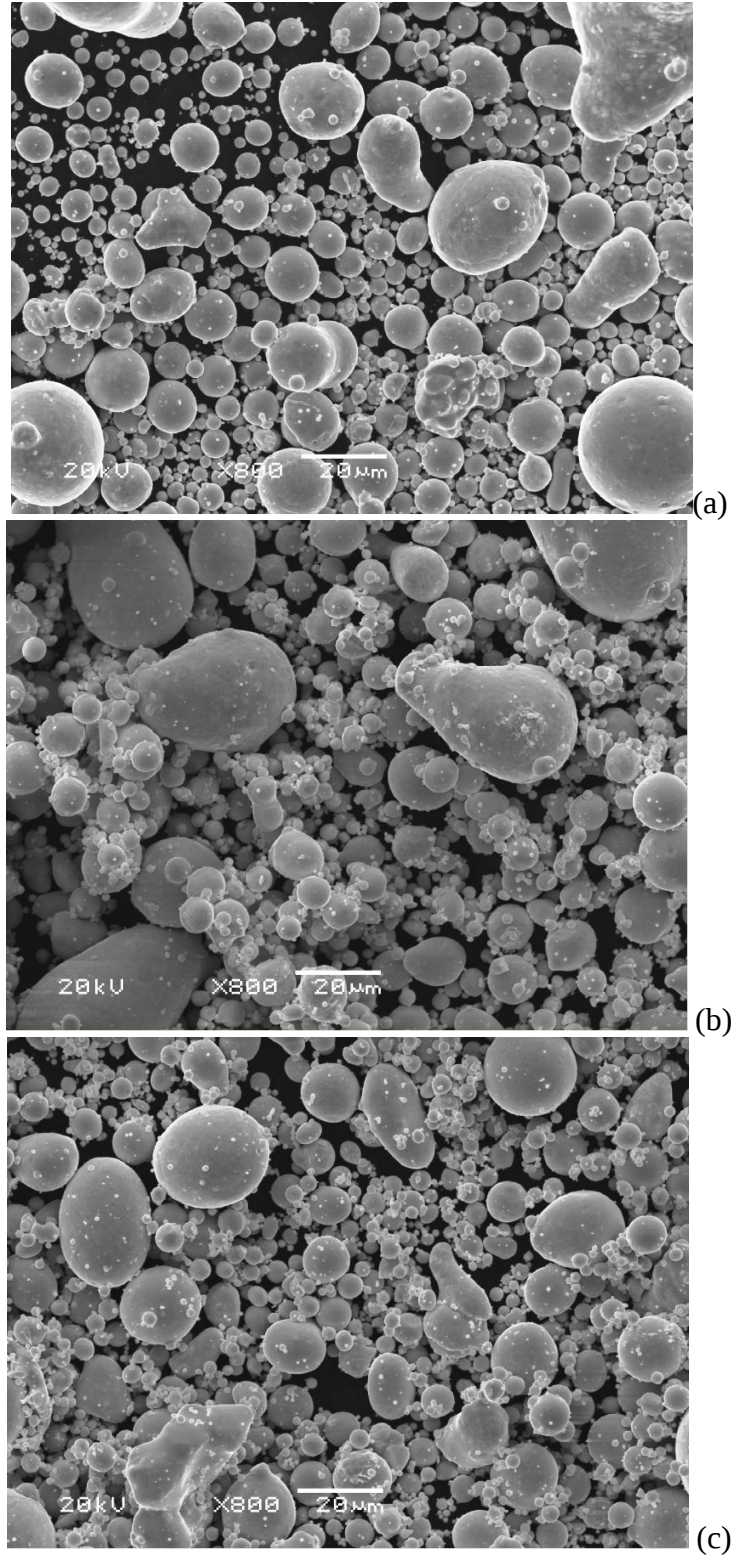
Gaz basıncına ve gaz/metal debisi oranına göre toz boyutu değişim grafiği Şekil 4.50'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere basınç artışı ile toz boyutunun değişim oranı yüksek değildir. Metal akış borusu taban dış çapı (D) 10 mm olan nozulun diğer nozullara göre daha yüksek verimli olduğu anlaşılmaktadır. Tozların morfolojisinin belirlenmesi için SEM resimleri Şekil 4.51-4.52'de verilmiştir.



Şekil 4.50. Atomizasyon gaz basıncının (a) ve gaz/metal kütleli debi oranının (b) toz boyutuna etkisi.



Şekil 4.51. 20 bar atomizasyon basıncında farklı geometrili nozullarda üretilmiş azot atomize kalay tozu görüntüleri (x400) a) D=14 mm, b) D=10 mm, c) D=8 mm



Şekil 4.52. 20 bar atomizasyon basıncında farklı geometrili nozullarda üretilmiş azot atomize kalay tozu görüntüleri (x800) a) D=14 mm, b) D=10 mm, c) D=8 mm

4.7. Farklı Metaller ile Yapılan Deneyler

4.7.1 AlSi 12Fe (Etial 141) tozu üretimi

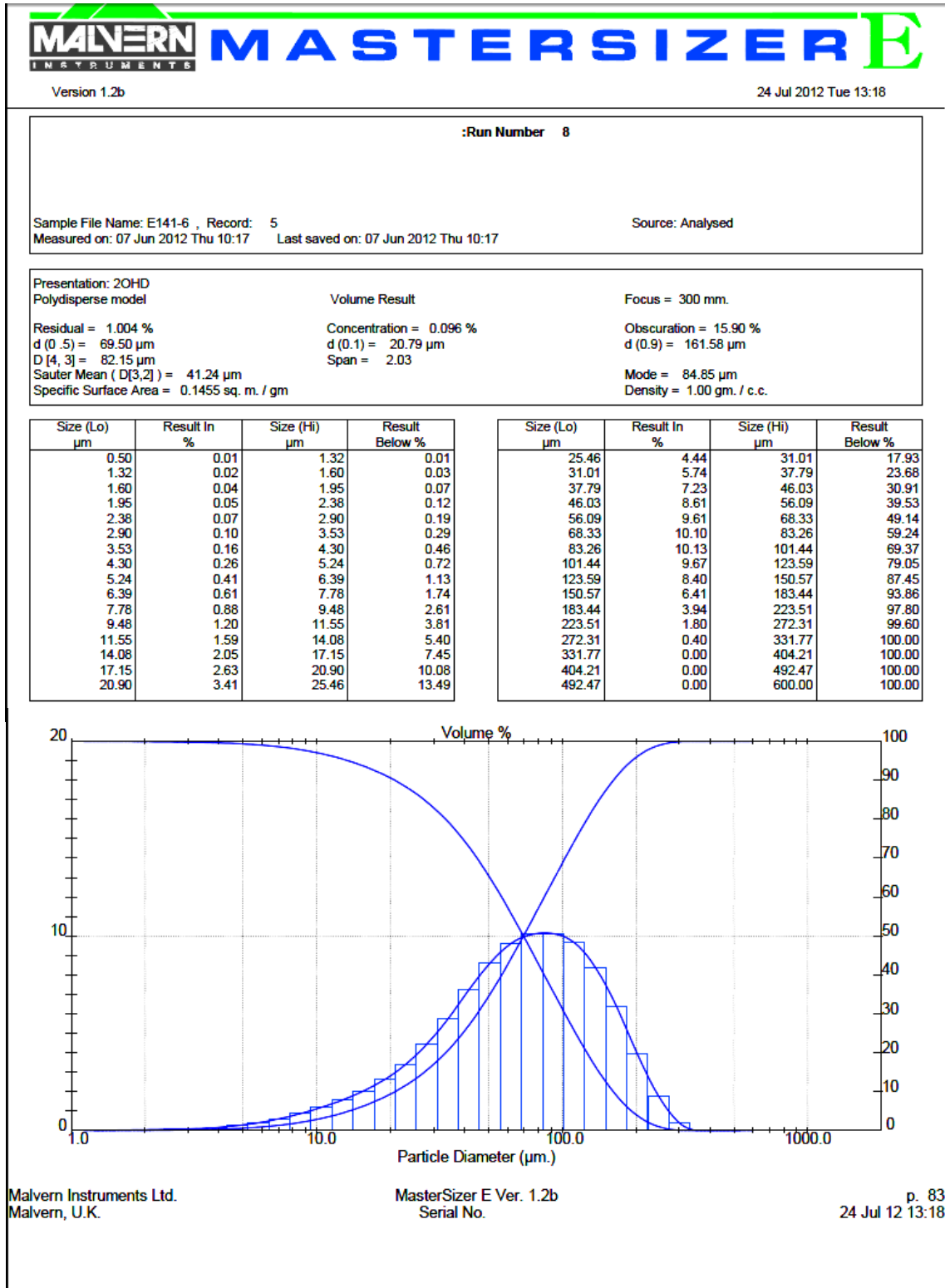
Azot atomize AlSi 12Fe (Etial 141) alüminyum alaşım tozu üretimi için farklı çıkıntı uzunlukları ve farklı metal akış çaplarında deneyler yapılmıştır. Atomizasyon gazı olarak azot kullanılmış ve sıvı metal 750 °C'ye aşırı ısıtılmıştır. Metal akış borusu dış çapı D=14 mm olan yakından eşlemeli nozul ile her bir deneydeki atomizasyon değişkenlerine ait bilgiler ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Etial 141 tozu üretimi için atomizasyon değişkenleri ve sonuçlar

Deney No	Gaz basıncı (bar)	Metal Akış Çapı (mm)	Çıkıntı Mesafesi (mm)	Boğaz Alanı (mm ²)	Miktar (g)	Gaz Debisi (kg/dk)	Metal Debisi (kg/dk)	G/M debi oranı	d ₅₀ (µm)
1	15,5	4,5	4	11,29	2400	2,46	3,35	0,73	102,96
2	15,5	3,5	6,5		2500	2,44	2,50	0,98	101,61
3	15,5	4	6,5		2344	2,45	1,88	1,30	85,46
4	15,5	4,5	6		2300	2,44	3,07	0,80	88,2
5	19,2	4	6,5		2222	3,02	2,96	1,02	90,06
6	19,2	3,5	6,5		2172	3,02	2,17	1,39	69,5

4.7.1.1. Toz boyutu ve dağılımı

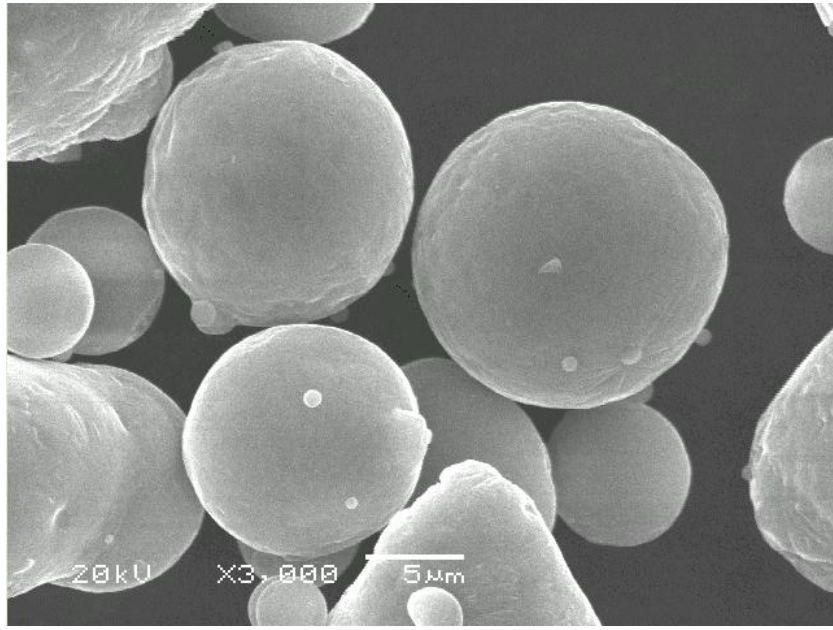
Atomize edilen AlSi 12Fe (Etial 141) tozu 250 µm'lik elekten elendikten sonra elde edilen elek altı tozların boyut analizi yapılmıştır. Malvern Mastersizer E lazerli boyut analizi cihazında elde edilen analiz raporlarına ait örnek, deney 6 için Şekil 4.53'te gösterilmiştir. Analiz raporunda, d₅₀ şeklinde ifade edilen ortalama toz boyutu d(0,5), tozların %10'unun kendisinden küçük olduğu toz boyutu d(0,1), tozların %90'ının kendisinden küçük olduğu toz boyutu d(0,9), Sauter ortalama çapı D[3,2] ve hacim ortalama çapı D[4,3] olarak görülmektedir. Üretilen azot atomize Etial 141 tozları için tek modlu log-normal toz dağılım eğrisine sahiptir.



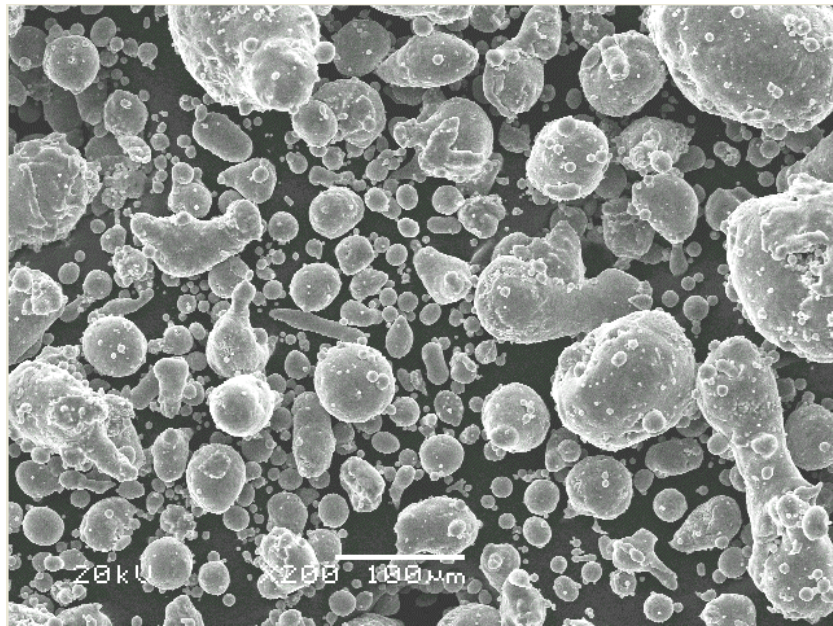
Şekil 4.53. Malvern Mastersizer E toz boyutu analiz raporu (Deney 6)

4.7.1.2. SEM çalışmaları

Üretimi gerçekleştirilen azot atomize AlSi 12Fe tozlarının SEM sonucu elde edilen genel görüntüler incelendiğinde, küçük boyutlu tozların ($50\ \mu\text{m}$ ve altı) küresel ve küresele yakın şekilli olduğu, büyük boyutlu tozların ise ($50\ \mu\text{m}$ üstü) yuvarlak şekilli olduğu görülmektedir (Şekil 4.54)



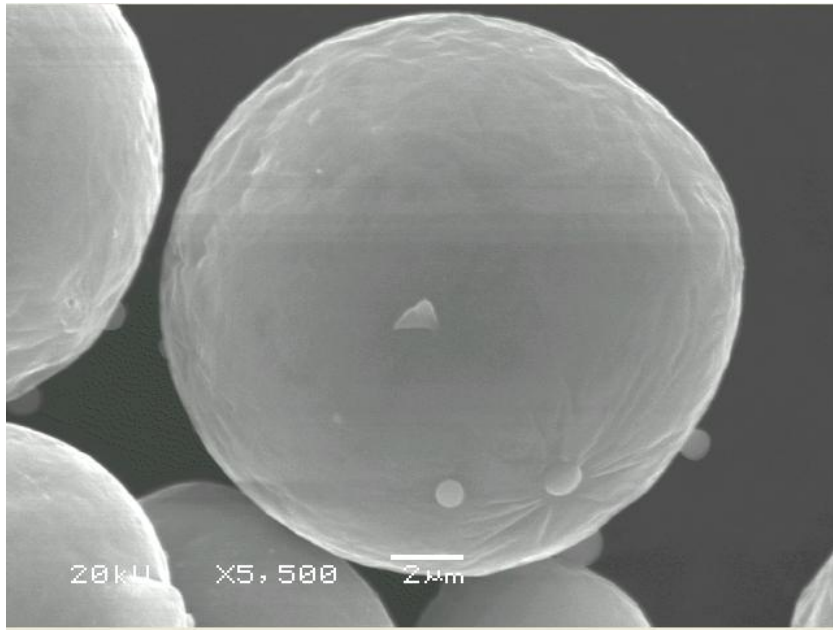
(a)



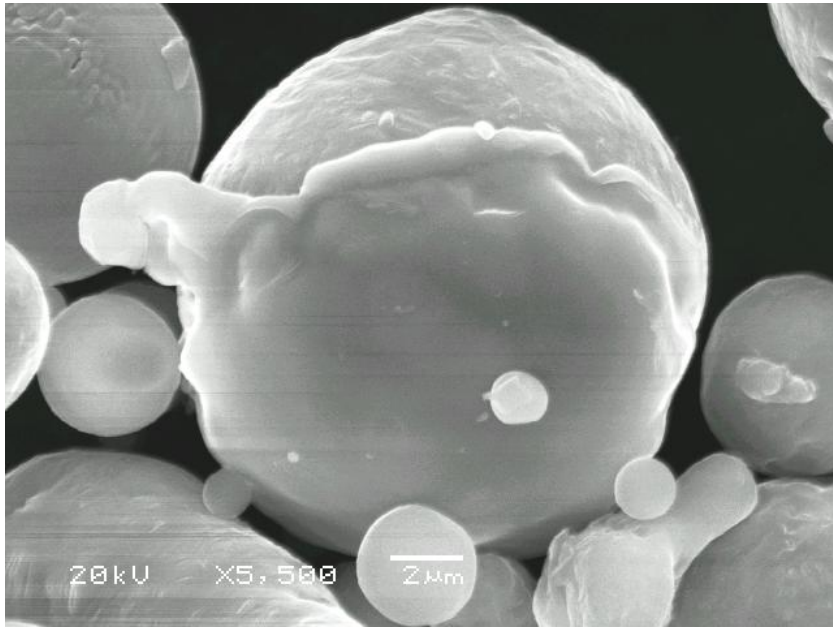
(b)

Şekil 4.54. Etial 141'e ait SEM görüntüleri a) (x3000), b) (x200)

Yapılan atomizasyon çalışmalarında, küçük boyutlu tozların daha iri tozlar üzerinde uydulaştığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.55 a). Uydulaşma küçük boyutlu tozların, henüz tamamen katılaşmasını tamamlayamamış daha büyük tozlara çarpması sonucu meydana gelir. Uydulaşma esnasında temas eden iki tozun sıcaklıklarının birbirinden farklı olması durumunda yüksek sıcaklığa sahip tozun, düşük sıcaklıktaki toz üzerine sıvandığı görülmektedir (Şekil 4.55 b).



(a)



(b)

Şekil 4.55. Etial 141'e ait SEM görüntüleri a) Uydulaşma, b) Sıvanma

4.7.2. AA 2014 alüminyum alaşım tozu üretimi

Azot atomize AA 2014 alüminyum alaşım tozu üretimi için üç deney gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.17). 1. deneyde 1740 g AA 2014 alaşımı potaya konulduktan sonra sıcaklığı 840 °C oluncaya kadar ısıtılmıştır. Atomizasyon basıncı 15 bar, metal akış çapı 5 mm'dir. Deney, çıkıntı mesafesi olmaksızın yapılmıştır. Boğaz açıklığı 0,22 mm (boğaz alanı=11,29 mm²) olan nozul kullanılmıştır. Deneylerde elde edilen toz miktarları Çizelge 4.18'de verilmiştir. Kayıp miktar ünite çeperlerinde, gözetleme noktalarında vb. yerlerde kalan tozlardır. Ortalama toz boyutu (d_{50}) 53,87 µm olarak tespit edilmiştir. Deney 1 sonunda kullanılan nozulun metal akış borusu ucunda ergiyik alüminyum alaşımı ile teması sonucu kayıplar meydana gelmiştir. Nozul ile alaşımın temasını önlemek için 2. deneyde 7 mm'lik çıkıntı mesafesi kullanılmıştır. 2. deneyde boğaz açıklığı 0,28 mm (boğaz alanı=14,43 mm²), atomizasyon basıncı 14,5 bar, metal akış çapı ise 5,5 mm olarak ayarlanmıştır. 1960 gram AA 2014 alüminyum alaşımı potaya konulduktan sonra sıcaklığı 840 °C oluncaya kadar aşırı ısıtılmıştır. Bu deney sonunda pul miktarının 760 g ölçülmüştür. Pul miktarının bu kadar çok olmasının nedeni, metal akış çapının artması ile G/M debisi oranının azalması ve çıkıntı mesafesinin artması sonucunda gaz ile sıvı metalin temas edeceği mesafenin artması olabilir. Bir sonraki deney için boğaz açıklığı 0,22 mm, atomizasyon gaz basıncı ise 16 bar olarak ayarlanmıştır. Bu deney için metal akış çapı 4,5 mm'ye düşürülmüş, çıkıntı mesafesi 6 mm olan çıkıntı aparatı kullanılmıştır. 2000 gram AA 2014 alüminyum alaşımı diğer iki deneyde olduğu gibi 840 °C'ye kadar ısıtılmıştır. 3. deney sonunda pul miktarının 264 gram olduğunu, ilk deneydeki 120 gramlık pul miktarının üzerinde olduğu, fakat 150 µm elek altı toz miktarının, deney öncesi ağırlığına bölündüğünde 1. deney ve 3. deney birbirine yakın, yaklaşık % 65 olarak hesaplanmıştır. 2. Deney için bu değer % 44'tür. Yapılan üç deneyin ortalama toz boyut (d_{50}) değerleri sırasıyla 53,87 µm, 75,44 µm ve 52,45 µm'dir.

Çizelge 4.17. AA 2014 alaşım tozu üretimi için atomizasyon değişkenleri ve sonuçlar

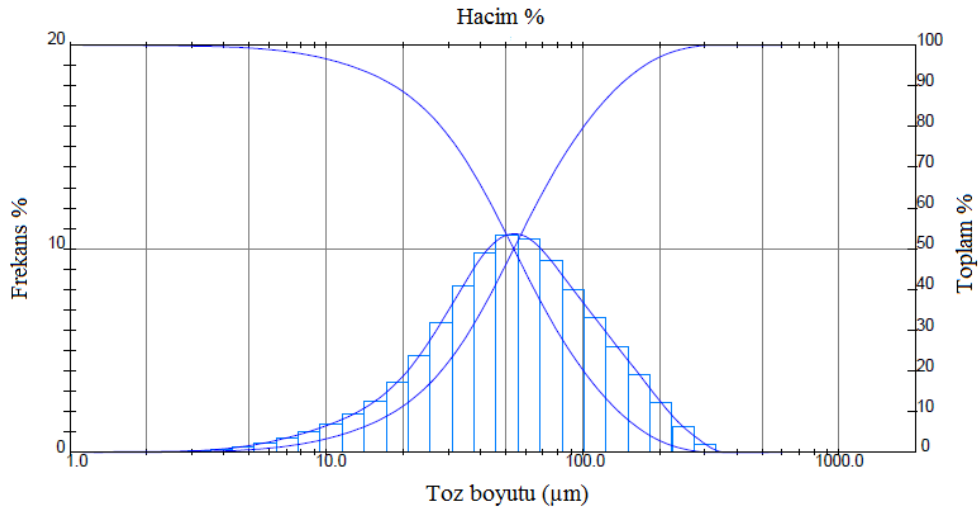
Deney No	Gaz basıncı (bar)	Metal Akış Çapı (mm)	Çıkıntı Mesafesi (mm)	Boğaz Alanı (mm ²)	Malzeme Miktar (g)	G/M debi oranı	d ₅₀ (μm)
1	15	5	0	11,29	1740	0,79	53,87
2	14,5	5,5	7	14,43	1960	0,92	75,44
3	16	4,5	6	11,29	2000	1,05	52,45

Çizelge 4.18. Azot atomize AA 2014 alaşım tozu miktarları

Deney No	Malzeme Miktar (g) [A]	150 μm elek altı (g) [B]	150 - 250 μm elek altı (g) [C]	Siklon (g) [D]	Pul (g) [E]	Toplam (g) [F]=[B+C+D+E]	Kayıp (g) [G]=[A-F]
1	1740	1140	330	90	120	1680	60
2	1960	840	250	64	760	1914	56
3	2000	1294	256	103	264	1917	83

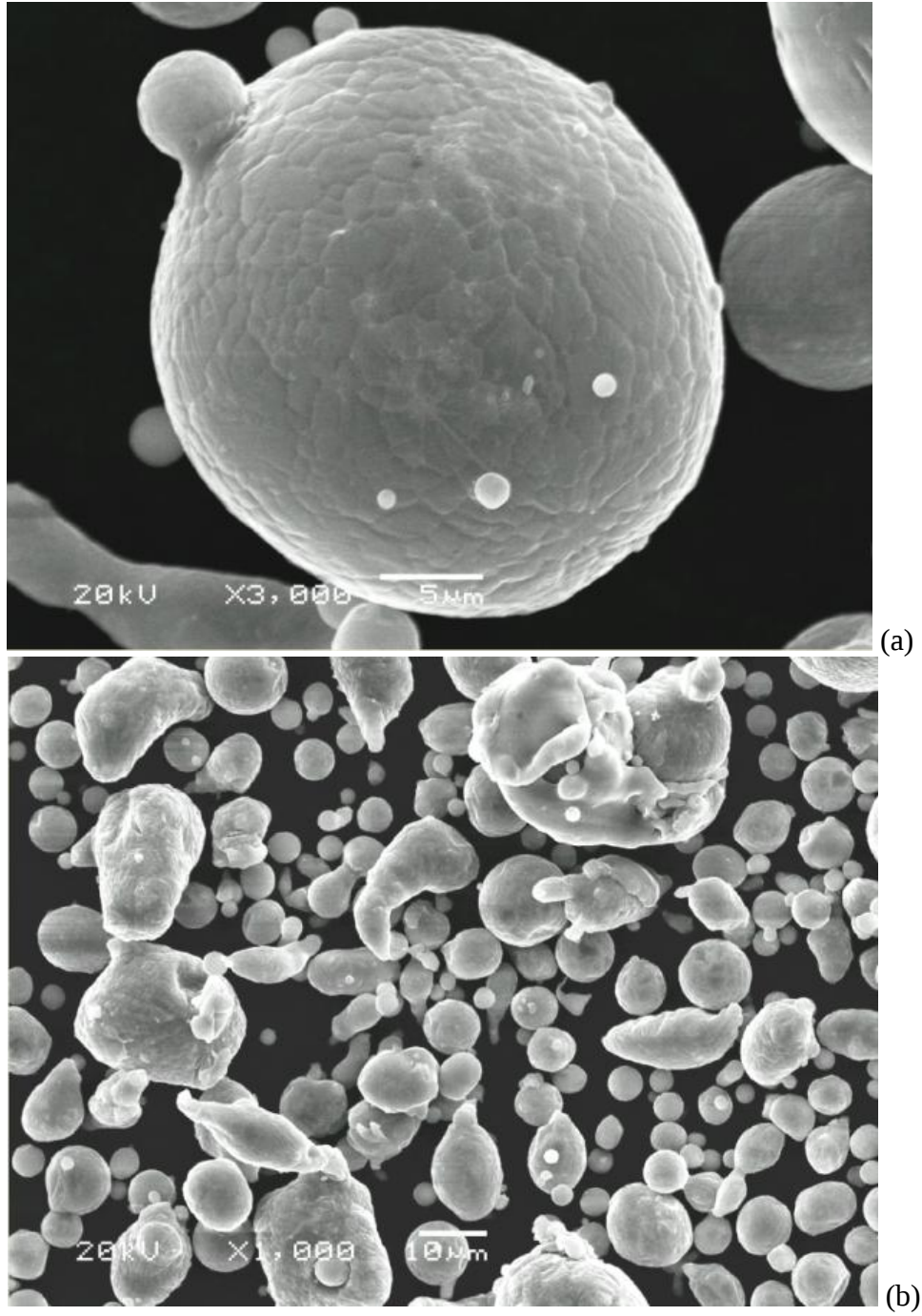
4.7.2.1. Toz boyutu ve dağılımı

Azot atomize AA 2014 alaşım tozu 150 μm'lik (100 meş) eleklerle elendikten sonra elde edilen elek altı tozların boyut analizi yapılmıştır. Ortalama toz boyutu (d₅₀) deneyler için sırasıyla 53,87 μm, 75,44 μm ve 52,45 μm bulunmuştur. Üretilen tozlara ait toz boyutu dağılımı ve toplam % eğrisine ait örnek Şekil 4.56'da verilmiştir.

**Şekil 4.56.** Azot atomize AA 2014 tozu için tek modlu toz dağılım eğrisi (Deney 1).

4.7.2.2. SEM çalışmaları

Üretimi yapılan azot atomize AA 2014 tozlarının SEM çalışmaları sonucu elde edilen genel görüntüleri Şekil 4.57’de verilmiştir. Tozlarda çok az uydulaşma olduğu, tozların küresel şekilli ve hücresel yüzey yapısına sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 4.57. Azot atomize AA 2014 alaşım tozlarının genel görüntüsü (Deney 3)
a) (x 3000) b) (x 1000)

4.7.3. AA 7075 alüminyum alaşım tozu üretimi

AA 7075 alaşım tozu üretimi için üç deney gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.19). Bu deneylerde sabit alınan parametreler; metal akış çapı 3 mm, boğaz açıklığı 0,25 mm (boğaz alanı=12,86 mm²), çıkıntı mesafesi 5 mm ve atomizasyon basıncı 20 bar alınmıştır. Üç deneyde ergitilen malzeme ile alınan toz miktarı arasında 60-77 gram arası fark olduğu görülmüştür (Çizelge 4.20). Bu miktarın bir kısmının pota içerisindeki metalin yüzeyinde oluşan oksitlenmeden, bir kısmının ünite duvarlarına yapışan ve siklondan filtreye kaçan çok küçük tozlardan meydana geldiği düşünülmektedir. Bu kayıp miktarı çok az olup, makul düzeydedir. Yapılan üç deney sonucunda elde edilen atomizasyon verimi yaklaşık % 92'dir.

Çizelge 4.19. AA 7075 alaşım tozu üretimi için atomizasyon değişkenleri

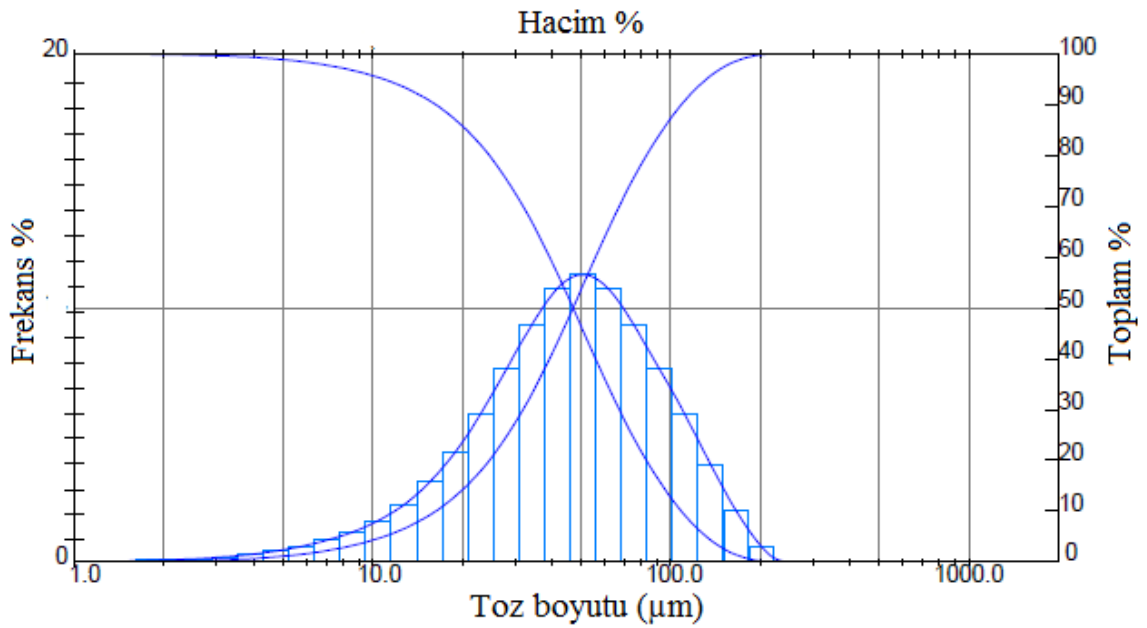
Deney No	Ergitilen Miktar (g)	Gaz basıncı (bar)	Metal Akış Çapı (mm)	Çıkıntı Mesafesi (mm)	Boğaz Alanı (mm ²)	Sıcaklık (°C)
1	2063	20	3	5	12,86	720
2	2115					
3	2413					

Çizelge 4.20. AA 7075 alaşım tozu üretimi için atomizasyon sonuçları

Deney No	G/M debisi oranı	Ergitilen Miktar (g) [A]	150 µm elek altı (g) [B]	Siklon (g) [C]	Toplam (g) [B+C]	Pul (g) [D]	Kayıp (g) [A-[B+C+D]]	Verim [B+C]/[A]
1	1,68	2063	1564	339	1903	100	60	0,92
2	1,81	2115	1610	340	1950	101	64	0,92
3	1,78	2413	1825	403	2228	108	77	0,92

4.7.3.1. Toz boyutu ve dağılımı

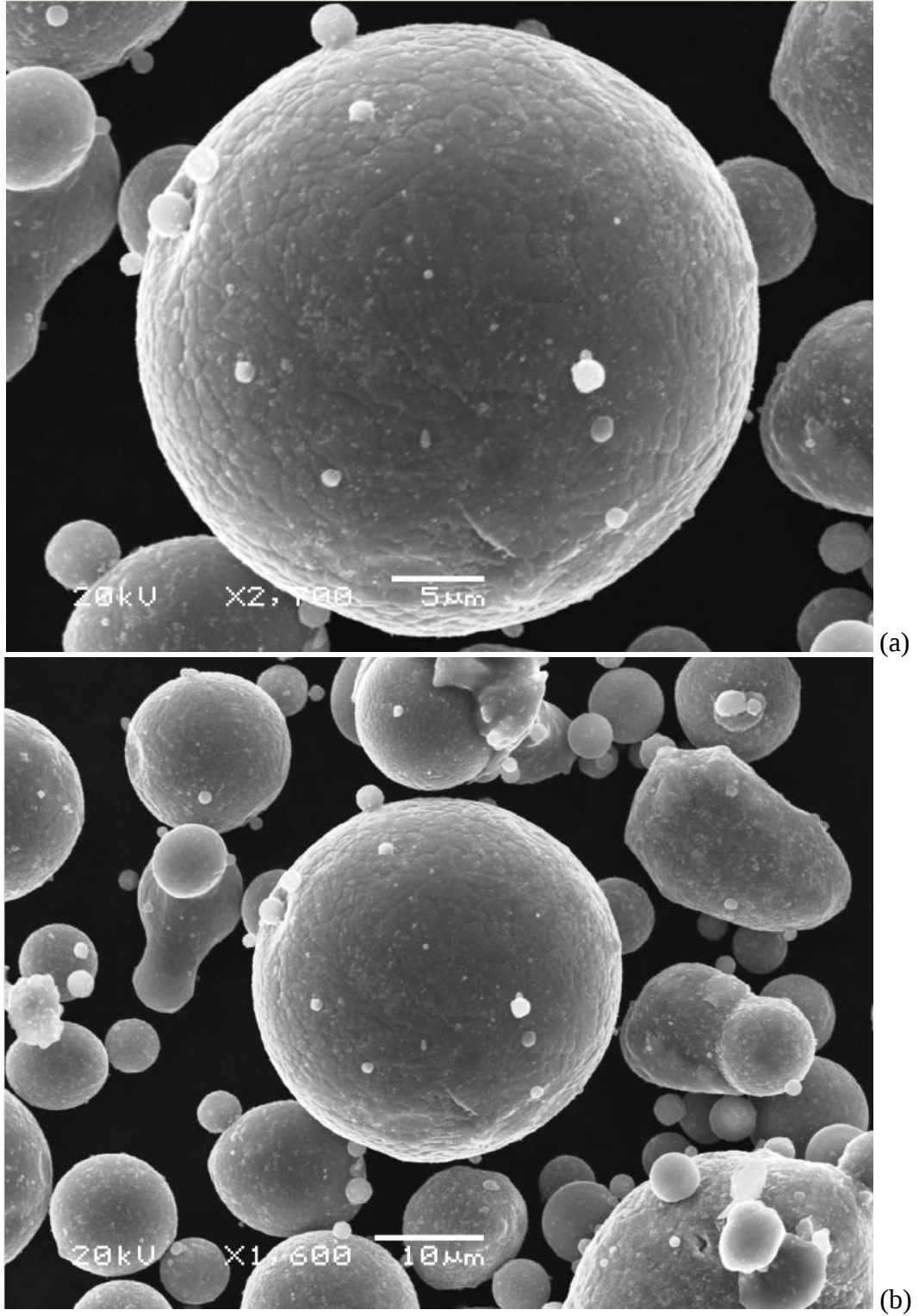
Azot atomize AA 7075 alüminyum alaşım tozu 150 μm 'lik (100 meş) eleklerle elendikten sonra elde edilen elek altı tozlar boyut analizi yapılmıştır. Ortalama toz boyutu (d_{50}) deneyler için sırasıyla 47,03 μm , 46,99 μm ve 44,77 μm bulunmuştur. Üretilen tozlara ait toz boyutu dağılımı ve toplam % eğrisine ait örnek Şekil 4.58'de verilmiştir.



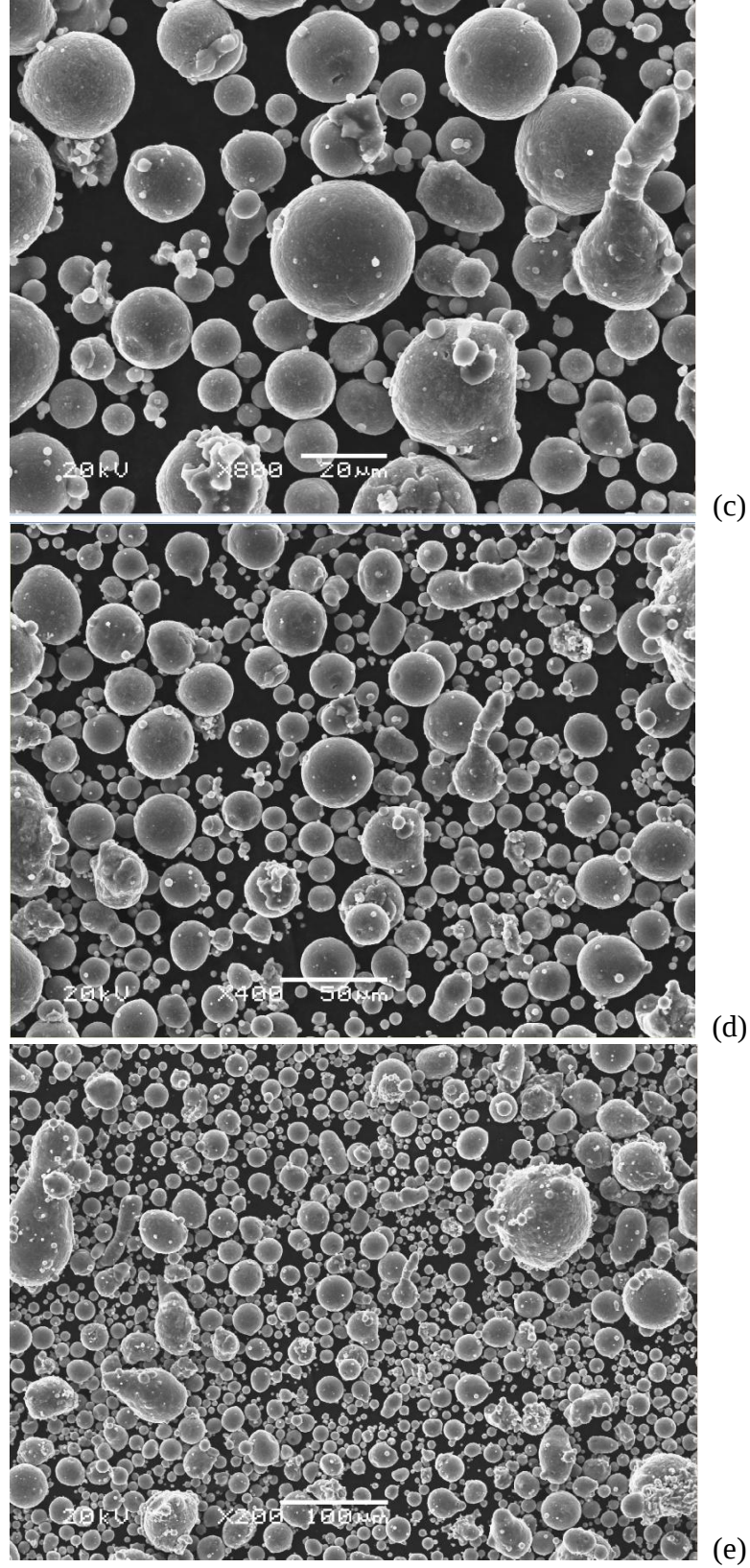
Şekil 4.58. Azot atomize AA 7075 alüminyum alaşım tozu için tek modlu toz dağılım eğrisi (Deney 1)

4.7.3.2. SEM çalışmaları

Üretimi yapılan azot atomize AA 7075 alüminyum alaşım tozlarının SEM çalışmaları sonucu elde edilen genel görüntüleri Şekil 4.59'da verilmiştir. Tozların küresel şekilli, hücrel dendritik yapıya sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 4.59. Azot atomize AA 7075 alüminyum alaşımasının genel görüntüsü
a) (x2700), b) (x1600), c) (x800), d) (x400), e) (x200)



Şekil 4.59. devamı
c) (x800), d) (x400), e) (x200)

BÖLÜM 5

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Gaz atomizasyon yöntemi metal tozu üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Günümüzde bu yöntem ile metal tozu üretim veriminin artırılması amacıyla araştırmalar devam etmektedir. Atomizasyon yönteminin başarısını etkileyen en önemli değişken nozul geometrisidir. Nozul geometrisi; boğaz açıklığı, boğaz alanı, çıkıntı mesafesi ve nozul açısı gibi değişkenlere sahiptir. Bu çalışmada nozulun gaz akış davranışı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi kullanılarak modellenmiştir. Modellemede metal akış borusu ucunda meydana gelen basınç, gaz debisi, gaz hızı verileri irdelenerek en verimli nozul tasarımı tespit edilmeye çalışılmıştır. Tespit edilen en iyi tasarıma göre nozul imal edildikten sonra nozul metal akış borusu uç basınç değerleri deneysel olarak ölçülmüştür. Daha sonra toz üretim deneyleri Dumlupınar Üniversitesi Gaz Atomizasyon Ünitesinde yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Tez çalışmasında çok sayıda tasarım için deneysel metal akış borusu uç basınç değerleri ile HAD sonuçları karşılaştırıldığında genellikle teorik sonuçların % 1 ile % 6 arasında daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bazı yüksek basınç değerlerinde ise teorik sonuçların % 2 daha küçük olduğu görülmüştür. HAD ile Reynolds Stres Modeli (RSM) kullanıldığında metal akış borusu uç basıncının oldukça başarılı bir şekilde hesaplandığı görülmüştür. Metal akış borusu ucunda oluşan 90-130 mbar seviyesinde negatif basıncın HAD ile çok iyi bir şekilde tespit edildiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar HAD ile nozul tasarımının geliştirilebileceğini ortaya koymuştur.
2. Atomizasyon gaz basıncı artışı ile nozulun hemen çıkışındaki gaz hızının çok fazla değişmediği tespit edilmiştir. Ancak nozul çıkışından uzaklaştıkça artan basınçla daha yüksek gaz hızı elde edilebildiği görülmüştür. Bu sonuca göre

nozul tasarımının mümkün olduğu kadar kısa mesafede gaz ile sıvı metalin temasına imkan vermesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

3. HAD analiz ile RSM çözümünde başlangıçta 334917 hücre sayısında simüle edilmiş yakınsama ağ yapısının yoğunluğundan dolayı uzun sürmektedir. Ağın niteliğini arttırmak suretiyle 520017 hücre sayısında çözüm gerçekleştirilerek daha kısa sürede hesaplama tamamlanmıştır. HAD analizde nitelikli ağ yapısı oluşturulması ile istenilen sonuca daha az hücre sayısında ve daha kısa sürede ulaşılabileceği ortaya konmuştur.
4. Aydın and Ünal (2011) yaptıkları çalışmadaki Deneysel ve Realizable $k - \varepsilon$ model ile elde edilen akış ayrılması görüntülerine çok benzer akış ayrılması görüntüleri RSM ile elde edilmiştir.
5. Azot atomize tozlar, logaritmik normal dağılıma çok yakın bir boyut dağılımı göstermiştir. Azot atomize tozların tamamına yakını, 1,8 ile 2,5 arasında değişen standart sapma değerine sahiptir.
6. Metal akış borusu çapının küçülmesi ile ortalama toz boyutu küçülmektedir. Fakat gaz/metal debisi oranını artırmakta dolayısıyla gaz tüketimini ve gaz sarfiyatını artırmaktadır. Boğaz alanı $11,29 \text{ mm}^2$, çıkıntı mesafesi 6,5 mm, atomizasyon basıncı 18,5 bar için elde edilen en uygun metal akış borusu çapı 4 mm olarak belirlenmiştir.
7. Gaz çıkış kesit alanının artışı, gaz debisini artırdığından daha ince tozların üretilmesine imkân vermiştir. Ancak 11 bar gaz basıncı ve 4 mm metal akış çapı ile yapılan deneysel çalışmada boğaz kesit alanının artması ortalama toz boyutunu azaltmamıştır. Bu şartlardaki gaz atomizasyonunda en uygun boğaz alanı $12,86 \text{ mm}^2$ olarak tespit edilmiştir.

8. Gaz/Metal debisi oranı artırıldığında toz boyutu azalmaktadır. Bu azalma belirli bir değerdan sonra çok az olmaktadır. Bu sonuca göre belirli bir basınçtan sonra toz boyutunda azalma olmadığı görölmüştür.
9. Azot atmizasyonunda kalay ile yapılan deneylerde, aynı şartlarda metal akış borusu taban dış çapı (D) 14 mm, 10 mm ve 8 mm nozullardaki deneyler sonucunda 10 mm çapa sahip nozul verimi diğerlerine göre daha yüksek bulunmuştur.
10. Tozların çarpışma sonucu, küçük tozların büyük tozlar üzerinde uydulaştıkları gözlenmiştir, ayrıca tozların sıvı metal damlacığı ile çarpışmasıyla oluşmuş sıvanma örnekleri tespit edilmiştir.

5.2. Öneriler

1. Belirli bir nozul tasarımı için ortalama toz boyutunu belirlemek için farklı metaller kullanılarak yapılacak deneyler ile ampirik bir bağıntı belirlenebilir.
2. HAD analiz ile iki fazlı akışı modelleme yapılarak ortalama toz boyutunu belirleyebilecek bir yaklaşım geliştirilebilir.
3. Sıvı metalin en kısa mesafede gaz ile temasını sağlayacak geometri tasarlanabilir.

6. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aksoy, A., Ünal R., 2006, Effects of gas pressure and protrusion length of melt delivery tube on powder size and powder morphology of nitrogen gas atomized tin powders, *Powder Metall*, 49(4): 349—354.
- Allimant, A., Planche, M P, Dembinski L, et al., 2009, Progress in gas atomization of liquid metals by means of a de Laval nozzle, *Powder Technol*, 190(1-2): 79—83.
- Anderson, I. E., and Figliola, R. S., 1988, Observations of Gas Atomization Process Dynamics, in: *Modern Developments in Powder Metallurgy* (Gummesson, P. U., and Gustafson, D. A., eds.), MPIF, Princeton, NJ, USA, Vol. 20, pp. 205—223.
- Anderson, I. E., Terpstra R. L., 2002, Progress toward gas atomization processing with increased uniformity and control, *Mater Sci Eng A*, 326(1): 101—109.
- ASM Metals Handbook, 1998. *Powder Metallurgy and Applications*, Vol. 7, ASM International, USA, 1145 s.
- Aydın, Ö., Ünal R., 2011, Experimental and numerical modeling of the gas atomization nozzle for gas flow behavior, *Computers and Fluids*, 42, 37-43.
- Beddow, J. K., 1978, *The Production of Metal Powders by Atomization*, Heyden Press, Philadelphia, PA, USA.
- Bergmann, D., Fritsching, U., Bauckhage, K., 2000, A mathematical model for cooling and rapid solidification of molten metal droplets [J]. *International Journal of Thermal Science*, 39: 53-62.
- Biancaniello, F. S., Conway, J. J., Espina, P. I., Mattingly, G. E., and Ridder, S. D., 1990, Particle Size Measurement of Inert-Gas-Atomized Powder, *Mater. Sci. Eng. A*, 124:9—14.
- Bradley, D., 1973 a, On the Atomization of Liquids by High-Velocity Gases, *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 6:1724—1736.
- Bradley, D., 1973 b, On the Atomization of a Liquid by High-Velocity Gases: II, *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 6:2267—2272.
- CHEN, Y.M., Su, Y.H, Lin , R.W. and Tsao, C.Y.A., 1998, Modelling of atomization rate during gas atomization, *Acta Meter*, Vol 46, 1011-1023.
- CUI, C., Cao, F. And Li, Q., 2002, Formation mechanism of the pressure zone at the tip of the melt delivery tube during sprau forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, 1377, 5-9.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., 2008, Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Birinci baskıdan çeviri.
- DOMBROWSKI, N., and Johns, W.R., 1963, The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets, Chemical Engineering Science, 18, 203 – 214.
- Espina PI, Piomelli U., 1998, Numerical simulation of the gas flow in gas-metal atomizers. Proceedings of FEDSM'98, 1998 ASME Fluids Engineering, Division Summer Meeting, June 21-25, Washington, DC, USA.
- Faragó, Z., and Chigier, N., 1992, Morphological Classification of Disintegration of Round Liquid Jets in a Coaxial Air Stream, Atomization and Sprays, 2(2):137–153.
- Fluent 6.1. User's Guide, 2003, Fluent Inc.
- Fluent 6.2. User's Guide, 2005, Fluent Inc.
- Fluent Inc., 2002, GAMBIT User's Guide, Fluent Inc., Lebanon.
- Fraser, R. P., and Eisenklam, P., 1953, Research into the Performance of Atomizers for Liquids, Imp. Coll. Chem. Eng. Soc. J., 7:52–68.
- Fraser, R. P., Eisenklam, P., Dombrowski, N., and Hasson, D., 1962, Drop Formation from Rapidly Moving Liquid Sheets, AIChE J., 8(5):672–680.
- Fritsching, U., Liu, H., and Bauckhage, K., 1991, Numerical Modeling in the Metal Spray Compacting Process, in: Proc. of the Fifth Int. Conf. On Liquid Atomization and Spray Systems (Semerjian, H.G., ed.), ILASSAmericas and NIST, Gaithersburg, MD, USA, pp. 491–498.
- German, R.M., 2007, Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme işlemleri, (Çev. Ed. S. Sarıtaş, M. Türker, N. Durlu), Türk Toz Metalurjisi Derneği, Ankara.
- Gimbun, J., et al., 2007, The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop; a CFD study, Chemical Engineering and Processing, 44, 7 – 12.
- Grant, N. J., 1978, A Review of Various Atomization Processes, in: Rapid Solidification Processing: Principles and Technologies (Mehrabian, R., Kear, B. H., and Cohen, M., eds.), Claitor's Publishing Division, Baton Rouge, LA, USA, pp. 230–245.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gummeson, P.U., 1972, Modern Atomizing Techniques, Powder Metall., 15(29):67–94.
- Hespel, J. M., Brunet, Y., and Dymont, A., 1995, Liquid Sheet and Film Atomization: A Comparative Experimental Study, Exp. in Fluids, 19(6):388–396
- Hinze, J. O., 1955, Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes, AIChE J., 1(3):289–295.
- Hoekstra, A.J., Derksen, J.J., Van Den Akker H.E.A., 1999, An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones, Chemical Engineering Science, 54, 2055-2065.
- Howells, R. I. L., Dunstan, G. R., and Moore, C., 1988, Production of Gas Atomized Metal Powders and Their Major Industrial Uses, Powder Metall., 31(4):259–266.
- Jeyakumar, M., Gupta, G.S., Kumar, S., 2008, Modeling of gas flow inside and outside the nozzle used in spray deposition, Journal of Materials Processing Technology 203, 471-479.
- Joseph, D., 1999, Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high-speed air stream, [J]. International Journal of Multiphase Flow, 25: 1263-1303.
- Kennedy, J. B., and Roberts, J., 1990, Rain Ingestion in a Gas Turbine Engine, in: Proc. of the Fourth Ann. Conf. ILASS (Simmons, H., Kennedy, J. B., Reitz, R. D., and Zimmer, D., eds.), ILASS-Americas, Hartford, CT, USA, pp. 154–162.
- Klar, E., and Fesko, J. W., 1984, Gas and Water Atomization, in: Metals Handbook, Ninth Edition, Vol. 7, Powder Metallurgy (Klar, E., ed.), Am. Soc. for Metals, Metals Park, OH, USA, pp. 25–39.
- Klar, E., and Shafer, W. M., 1972, High-Pressure Gas Atomization of Metals, in: Powder Metallurgy for High Performance Applications (Burke, J. J., and Weiss, V., eds.), Syracuse University Press, Syracuse, NY, USA, pp. 57–68.
- Kuntz, D. W., and Payne, J. L., 1995, Simulation of Powder Metal Fabrication with High Pressure Gas Atomization, in: Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, APMI International, Princeton, NJ, USA, Part I, pp. 63–77

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lawley, A., 1992, Atomization - The Production of Metal Powders, MPIF, Princeton, NJ, USA.
- Le, et al., 1999, Measurement and Analysis of Melt Flowrate in Gas Atomization, The Int. J. Of Powder Metallurgy, 35 (1), 51-59.
- Le, T., and Henein, H., 1996, Effect of nozzle geometry and position on gas atomization, The international journal of powder metallurgy, Volume 32, No 4, 353-363.
- Lee, C. H., Reitz, R. D., 2000, An experimental study of the effect of gas density on the distortion and breakup mechanism of drops in high speed gas stream, [J]. International Journal of Multiphase Flow, 26: 229.
- Lee, E. S., Ahn, S., 1994, Solidification progress and heat transfer analysis of gas-atomized alloy droplets during spray forming, [J]. Acta Metal Mater, 9: 3231-3243.
- Li, X., and Tankin, R. S., 1992, On the Prediction of Droplet Size and Velocity Distributions in Sprays through Maximum Entropy Principle, Part. Part. Syst. Charact., 9(3):195–201.
- Liu, H., Rangel, R. H., and Lavernia, E. J., 1994, Modeling of Reactive Atomization and Deposition Processing of Ni Al, Acta Metall. Mater., 342 (10) : 3277–3289.
- Liu, H., Zeng, X., and Lavernia, E. J., 1993, Processing Maps for Reactive Atomization and Deposition Processing, Scripta Metall. Mater., 29(10):1341–1344.
- Liu, H., 1997, Numerical Modeling of Gas Atomization in Spray Forming Process, J. Mater. Synth. Proc., 5(1):11–17
- Liu, H., 1999, Spray Forming, in: Modeling and Simulation for Casting and Solidification: Theory and Applications (Yu, K.O., ed.), Marcel Dekker, Inc., New York, NY, USA.
- Liu, H., 2000, Science and engineering of droplets Fundamentals and applications, Noyes publications, New Jersey, USA.
- Lubanska, H., 1970, Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals, J. Met., 22(2): 45–49.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mansour, A., and Chigier, N., 1990, Disintegration of Liquid Sheets, *Phys. Fluids*, 2(5):706–719.
- Mates, S. P., and Settles, G. S., 1995, A Flow Visualization Study of the Gas Dynamics of Liquid Metal Atomization Nozzles, in: *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials* (Phillips, M., and Porter, J., eds.), APMI International, Princeton, NJ, USA, Part I, pp. 15–29.
- Mehrotra, S. P., 1981 a, Mathematical Modeling of Gas Atomization Process for Metal Powder Production, Part 1, *Powder Metall. Int.*, 13(2):80–84.
- Mehrotra, S. P., 1981 b, Mathematical Modeling of Gas Atomization Process for Metal Powder Production, Part 2, *Powder Metall. Int.*, 13(3):132–135.
- Mi, J., Figliola, R. S., Anderson, I. E., 1996, A numerical simulation of gas flow field effects on high pressure gas atomization due to operating pressure variation, *Mater Sci Eng A*, 208(1): 20–29.
- Mi, J., Figliola, R. S., Anderson, I. E., 1997, A numerical investigation of gas flow effects on high-pressure gas atomization due to melt tip geometry variation, *Metall Mater Trans B*, 28(5): 935–941.
- Miesse, C. C., 1955, Correlation of Experimental Data on the Disintegration of Liquid Jets, *Ind. Eng. Chem.*, 47(9):1690–1701.
- Miller, S. A., and Miller, R. S., 1992, Real Time Visualization of Close-Coupled Gas Atomization, in: *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, APMI International, Princeton, NJ, USA, Vol. 1, pp. 113–125
- NIST, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) version 7.0, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO 80305-3328, USA.
- Ouyang, H., Chen, X., Huang, B., 2007, Influence of Melt Superheat on Breakup Process of Close-coupled Gas Atomization, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, 17, 967-973.
- Power, G. D., Cooper, G. K., and Sirbaugh, J. R., 1995, NPARC 2.2 – Features and Capabilities, *AIAA 95-2609*:1–12.
- Rao, K. P., and Mehrotra, S. P., 1981, Effect of Process Variables on Atomization of Metals and Alloys, in: *Modern Developments in Powder Metallurgy, Principles and Processes* (Hausner, H. H., Antes, H. W., and Smith, G. D., eds.), MPIF and APMI International, Princeton, NJ, USA, Vol. 12, pp. 113–130

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Reinshagen, J. H., and Neupaver, A. J., 1989, Principles of Atomization, in: Physical Chemistry of Powder Metals Production and Processing (Small, W. M., ed.), TMS, Warrendale, PA, USA, pp. 3–18.
- Reitz, R. D., 1978, Atomization and Other Breakup Regimes of a Liquid Jet, Ph.D. Thesis, Princeton University, Princeton, NJ, USA, September.
- Reitz, R. D., 1987, Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays, *Atomization and Spray Technol.*, 3:309–337.
- Ridder, S. D., Osella, S. A., Espina, P. I., and Biancaniello, F. S., 1992, Intelligent Control of Particle Size Distribution during Gas Atomization, *Int. J. Powder Metall.*, 28(2):133–147.
- Schulz, G., 1996, Laminar Sonic and Supersonic Gas Flow Atomization – The NANOVAL Process, in: *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* (Cadle, T. M., and Narasimhan, K. S., eds.), MPIF and APMI International, Princeton, NJ, USA, Vol. 1, Part 1, pp. 43–54.
- See, J. B., and Johnston, G. H., 1978, Interactions between Nitrogen Jets and Liquid Lead and Tin Streams, *Powder Technol.*, 21:119–133.
- Sheikhaliev, S. M., and Dunkley, J. J., 1996, A Novel Internal Mixing Gas Atomiser for Fine Powder Production, in: *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* (Cadle, T. M., and Narasimhan, K. S., eds.), MPIF and APMI International, Princeton, NJ, USA, Vol. 1, Part 1, pp. 161–170.
- Sheikhall, M., Beryukhov, A. V., Dunkley, J. J., 2004, Metal droplet's deformation and break-up by a gas stream, [C]// Shrewsbury. Powder Manufacturing and Processing. Vienna: European Powder Metallurgy Association,: 1-6.
- Shellens, R. W., and Brzustowski, T. A., 1985, A Prediction of the Drop Size Distribution in a Spray from First Principles, *Atomization and Spray Technol.*, 1:89–102.
- Singh, D. D., Dangwal, S., 2006, Effects of process parameters on surface morphology of metal powders produced by free fall gas atomization, *J Mater Sci*, 41(12): 3853—3860.
- Srivastava, V. C., Ojha, S. N., 2006, Effect of aspiration and gas-melt configuration in close coupled nozzle on powder productivity, *Powder Metall*, 49(3): 213—218.
- STRAUSS, J.T.,1999, Hotter gas atomization increases atomization efficiency, *Metal Powder Report*, Volume 54, Issue 11, 24-28.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tanasawa, Y., and Toyoda, S., 1955, On the Atomization of Liquid Jet Issuing from a Cylindrical Nozzle, The Technology Reports of the Tohoku University, Jpn., No. 19-2, pp. 135–156.
- Taylor, G. I., 1963, The Shape and Acceleration of a Drop in a High Speed AirStream, in: The Scientific Papers of G. I. Taylor (Batchelor, G. K., ed.), Vol. III, University Press, Cambridge, England, UK, pp. 457–464.
- Tennekes, H., Lumley, J.L., 1972, A first course in turbulence, Cambridge, MA: The MIT Press.
- Ting, J., Anderson I.E., 2004, A computational fluid dynamics (CFD) investigation of the wake closure phenomenon, Materials Science and Engineering A, 379: 264–276.
- Ting, J., Peretti, M. W., Eisen, W. B., 2002 The effect of wake-closure phenomenon on gas atomization performance, Mater Sci Eng A, 326(1): 110—121.
- Ting, J., Terpstra, R., Anderson, I. E., Figliola, R. S., and Mi, J., 1996, A Novel High Pressure Gas Atomizing Nozzle for Liquid Metal Atomization, in: Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials (Cadde, T. M., and Narasimhan, K.S., eds.), MPIF and APMI International, Princeton, NJ, USA, Vol. 1, Part 1, pp. 97–108.
- Tinoco, J., Widell, B., Fredriksson, H., Fuchs, L., 2004 Modeling the in-flight events during metal spray forming, Materials Science and Engineering A ,365: 302–310.
- Tong, M., Browne, D. J., 2008, Direct numerical simulation of melt–gas hydrodynamic interactions during the early stage of atomization of liquid intermetallic, Journal of Materials Processing Technology , 202: 419–427.
- Tuzlu, H., ve Ünal, R., 2005 Süpersonik Nozul Tasarımının Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Proc., 4th Int. Powder Metallurgy Congress, Turkish Powder Met. Assoc., Sakarya-Turkey,. 969-987.
- Uslan, İ., 1999, Gaz atomize alüminyum tozların özelliklerine üretim değişkenlerinin etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Ünal, A., 1987, Effect of Processing Variables on Particle Size in Gas Atomization of Rapidly Solidified Aluminum Powders, Mater. Sci. Technol., 3(12):1029–1039.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ünal, A., 1988, Influence of Nozzle Geometry in Gas Atomization of Rapidly Solidified Aluminium Alloys, *Materials Science and Technology*, 4, 909-915.
- Ünal, A., 1989 a, Influence of Gas Flow on Performance of ‘Confined’ Atomization Nozzles, *Metall. Trans.*, 20B(12):833–843.
- Ünal, A., 1989 b, Liquid Break-up in Gas Atomization of Fine Aluminum Powders, *Metall. Trans.*, 20B(2):61–69.
- Ünal, A., 1989 c, Flow Separation and Liquid Rundown in a Gas Atomization Process, *Metall. Trans.*, 20B(10):613–622.
- Ünal, A., 1992, Rapid Solidification of Magnesium by Gas Atomization, *Mater. Manufacturing Processes*, 73:441–461.
- Ünal, R., 1995, Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretim parametrelerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Ünal, R., 2006, The influence of the pressure formation at the tip of the melt delivery tube on tin powder size and gas/melt ratio in gas atomization method, *Journal of Materials Processing Technology*, 180: 291-295.
- Ünal, R., 2007 a, Improvements to close coupled gas atomization nozzle for fine powder production *Powder Metallurgy*, 50(1): 66-71.
- Ünal, R., 2007 b, Investigation of the Metal Powder Production Efficiency of a New Convergent-Divergent Nozzle in Close-Coupled Gas Atomisation”, *Powder Metallurgy*, Vol.50, No.4,p.302-306.
- Ünal, R., 2008, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Yöntemi ile Gaz Atomizasyon Nozulu Modellenmesi, TÜBİTAK projesi, MAG 107M189.
- White, F.M., 1988 *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Book Co. 2nd Ed.
- XinMing, Z., et al., 2009 Effect of atomization gas pressure variation on gas flow field in supersonic gas atomization, *Sci. China Ser E-Tech Sci*, 52 (10):3046 – 3053.
- Yule, A. J., and Dunkley, J. J., 1994, *Atomization of Melts for Powder Production and Spray Deposition*, Clarendon Press, Oxford, UK.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zeng, X., Liu, H., Chu, M., and Lavernia, E. J., 1992, An Experimental Investigation of Reactive Atomization and Deposition Processing of Ni3Al/Y2O3 Using N2-O2 Atomization, Metall. Trans., 23A(12):3394–3399.
- Zeoli, N., Gu, S., 2006, Numerical modelling of droplet break-up for gas atomization”, Computational Materials Science, 38, 282-292.
- Zeoli, N., Gu, S., 2008 Computational simulation of metal droplet break-up, cooling and solidification during gas atomisation, Comp Mater Sci, 43(2): 268—278.
- Zeoli, N., Gu, S., Kamnis, S., 2008, Numerical modelling of metal droplet cooling and solidification, International Journal of Heat and Mass Transfer 51, 4121-4131.

ÖZGEÇMİŞ

1. **Adı Soyadı:** Mustafa GÜLEŞEN
2. **Doğum Yeri ve Tarihi:** Kütahya, 09.08.1980
3. **Medeni Hali:** Evli
4. **Yabancı Dili:** İngilizce



5. Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Makine Mühendisliği	Dumlupınar Üniversitesi	1998-2002
Y. Lisans	Mekanik	Dumlupınar Üniversitesi	2002-2005
Doktora	Konst.ve imalat	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	2007-

6. Akademik Ünvanlar

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yılı
Araştırma Görevlisi	Dumlupınar Üniversitesi	2002-

7. Yüksek Lisans Tezi

- 1) Fiber Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Bulunması, Dumlupınar Üniversitesi, 2005.

8. Yayınlar

- 1) Küçükrendeci İ., İpek R., Güleşen M., 2006, 4137 Al/SiC metal matris kompozit ile AISI 304 Paslanmaz çeliğin Sürtünme Kaynağı ile birleştirilmesi, 11. International Materials Symposium 19-21 April, Denizli-Türkiye.
- 2) Yetgin S. H., Aydın M., Küçükrendeci İ., Güleşen M., 2005, Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Al-NbC Kompozitlerde Karıştırıcı Tipinin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklere Etkisi, 4. International Advanced Technologies Symposium, September 28–30, Konya/Turkey

- 3) Güleşen M., Ünal R., Kuşhan M. C., 2011, Farklı Geometrilere Sahip Gaz Atomizasyonu Nozul Performanslarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) İle Karşılaştırılması, 6th International Powder Metallurgy Conference, 278-287.
- 4) Güleşen M., Ünal R., Aydın Ö., 2011, Gaz Atomizasyonu Nozulunun Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) İle Nümerik Modellenmesi, 6th International Powder Metallurgy Conference, 808 – 815.
- 5) Güleşen M., Ünal R., Kuşhan M. C., 2012, Gaz Atomizasyonu İle Metal Tozu Üretimi İçin Nozul Tasarımının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi İle Geliştirilmesi, 14th International Materials Symposium.
- 6) Güleşen M., Ünal R., Estimation of Optimum Protrusion Length by CFD Modeling for the Gas Atomization Nozzle, Advanced Science Letters, (in press).
- 7) İpek R., Güleşen M., Aksoy A., Al 4147/SiC ve Al 4147/WC metal matris kompozitin (MMK) mikro yapı ve kuru adhesiv aşınma davranışlarının deneysel araştırılması, I. Ulusal Metalurji ve Malzeme Günleri 27-28 Mayıs, OGÜ, Eskişehir.

8. Projeler

- 1) Bor katkılı metal matriks kompozitin mekanik özelliklerinin teorik ve deneysel araştırılması ve geliştirilmesi, Dumlupınar Üniversitesi, BAP, Araştırmacı, 2003.
- 2) Gaz Atomizasyonu Yöntemi ile Dental Amalgam Tozu Üretilmesi, SAN-TEZ, 00760.STZ.2010.2, Doktora Tez Öğrencisi, 2012.
- 3) Gaz Atomizasyonu Yönteminde Yüksek Verimli Nozulun Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Modellenmesi, Tasarımı ve İmalatı, Dumlupınar Üniversitesi, BAP, Araştırmacı, 2013