



**GAZ ATOMİZASYONU İŞLEMİNİN
İKİ-FAZLI SAYISAL MODELLENMESİ VE
PARÇACIK BOYUTUNUN HESAPLANMASI**

Yunus Emre KAYALI

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran - 2019

GAZ ATOMİZASYONU İŞLEMİNİN
İKİ-FAZLI SAYISAL MODELLENMESİ VE
PARÇACIK BOYUTUNUN HESAPLANMASI

Yunus Emre KAYALI

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Haziran - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Yunus Emre KAYALI'nın DOKTORA tezi olarak hazırladığı Gaz Atomizasyonu İşleminin İki-Fazlı Sayısal Modellenmesi ve Parçacık Boyutunun Hesaplanması başlıklı bu çalışma, jürimizce Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

25/06/2019

Prof. Dr. Önder UYSAL
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Ramazan KÖSE
Anabilim Dalı Başkanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Rahmi ÜNAL
Danışman, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sınav Komitesi Üyeleri

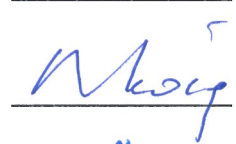
Prof. Dr. Ramazan KÖSE
Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Prof. Dr. Rahmi ÜNAL
Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi

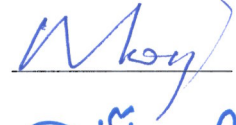
Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN
Makine Mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi

Prof. Dr. Abuzer Kadir ÖZSUNAR
Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi

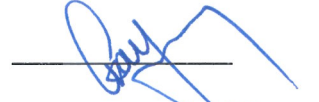
Doç. Dr. Özer AYDIN
Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

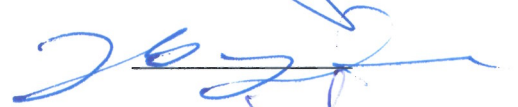
















ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % .14. çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.


Prof. Dr. Rahmi ÜNAL


Yunus Emre KAYALI

GAZ ATOMİZASYONU İŞLEMİNİN İKİ-FAZLI SAYISAL MODELLENMESİ VE PARÇACIK BOYUTUNUN HESAPLANMASI

Yunus Emre KAYALI

Makine Mühendisliği, Doktora Tezi, 2019

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

ÖZET

Gaz atomizasyonu yöntemi ile metal tozu üretiminde gaz basıncı ve sıvı metal viskozitesi gibi değişkenler üretilen tozların boyutu ve boyut dağılımı üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Toz boyutunu belirleyen parçalanma mekanizması hakkında bir çok model ortaya konulmuş olmasına rağmen bu etkilerin araştırılmasında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı ile sayısal çözümleme çalışmalarının büyük bölümünde atomizasyon işlemi tek-fazlı olarak modellenmiştir. Ergiyik metal akışının dâhil edildiği bazı çalışmalarda ise genellikle atomizasyon başlangıççı modellenenmiş, sıvı metal-gaz etkileşimleri, parçalanma mekanizmaları ve toz oluşumları gösterilememiştir.

Bu çalışmada gaz atomizasyonu işleminin iki akışkanlı olarak modellenmesi hedeflenerek parçacık boyutunun sayısal modelleme ile elde edilebileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda gaz atomizasyonu işlemi iki akışkanlı olarak modellenmiş, HAD çözümlemesi elde edilerek fazlar arası etkileşimler gösterilmiş, atomizasyon mekanizmaları açıklanmış ve toz boyutu tez kapsamında geliştirilen yeni bir yaklaşım ile elde edilmiştir. Geliştirilen yaklaşım ile sayısal çözümleme 1,0 MPa, 1,5 MPa, 2,0 MPa, 2,5 MPa, 3,0 MPa ve 3,5 MPa basınç değerlerinde uygulanarak gaz basıncının toz boyutu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Toz boyutu 1,0 MPa basınçta 43,24 μm , 3,5 MPa basınçta 35,69 μm olarak hesaplanmış, artan gaz basıncı ile birlikte ortalama parçacık boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir. Sıvı metal viskozitesinin toz boyutu üzerindeki etkisini incelemek için 2,5 MPa basınç altında farklı viskozite değeri ile sayısal çözüm tekrarlanmıştır. Sıvı metal viskozitesinin 0,00133 kg/m-s iken ortalama toz boyutunun 41,47 μm , aynı şartlar altında sıvı metal viskozite değerinin 0,00623 kg/m-s olduğunda ise ortalama toz boyutunun 45,97 μm olduğu belirlenmiştir. Yüksek viskoziteye sahip ergiyikte parçalanmanın daha zor gerçekleştiği dolayısıyla ince taneli parçacık elde etmenin zorlaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, geliştirilen yaklaşım ile üç-boyutlu olarak modelleme yapılarak sıvı metalde parçacık oluşumları gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gaz atomizasyonu, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Parçacık boyutu.

TWO-PHASE NUMERICAL MODELING OF GAS ATOMIZATION AND CALCULATION OF PARTICLE SIZE

Yunus Emre KAYALI

Mechanical Engineering, Ph.D. Thesis, 2019

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

SUMMARY

Variables such as gas pressure and molten metal viscosity have a decisive effect on the size and size distribution of the powders produced by gas atomization. Although many models have been introduced about the disintegration mechanisms that determine the powder size, the atomization process has been modeled as a single phase flow in most of the numerical analysis with the Computational Fluid Dynamics (CFD) approach in the investigation of those effects. In some studies involving molten metal flow, atomization initiation was generally modeled and liquid metal-gas interactions, disintegration mechanisms and particle formations were not shown.

In this study, it is aimed to model the gas atomization process as a two-fluid flow and to show that particle size can be obtained by numerical modeling. In this context, gas atomization process is modeled, CFD analysis is obtained and interactions between the two phases are shown, atomization mechanisms are explained and powder size is obtained with a new approach developed within the scope of the thesis. With the developed approach, numerical analysis is applied at the pressure values of 1.0 MPa, 1.5 MPa, 2.0 MPa, 2.5 MPa, 3.0 MPa and 3.5 MPa and the effects of gas pressure on the particle size are investigated. The powder size was calculated to be 43.24 μm at 1.0 MPa pressure and 35.69 μm at 3.5 MPa pressure. It was found that the mean particle size decreased with increasing gas pressure. In order to examine the effect of liquid metal viscosity on powder size, numerical solution was repeated with a different viscosity value under 2.5 MPa pressure. The average powder size was found to be 41.47 μm when the viscosity of the liquid metal was 0.00133 kg/m-s, and the average powder size was 45.97 μm when the viscosity value of the liquid metal was 0.00623 kg/m-s under the same conditions. It has been observed that for the high viscosity melt the disintegration process is more difficult, therefore, it is hard to obtain fine-grained particles. In addition to these results, particle formation in two-phase gas atomization is shown by three-dimensional modeling with the developed approach.

Key Words: Gas atomization, Computational fluid dynamics, Particle size.

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim boyunca aldığım derslerimde, laboratuvar çalışmalarında, bilgisayarlı modellemede ve tezimde bana yol gösteren tez danışmanım Prof. Dr. Rahmi ÜNAL hocama teşekkürlerimi sunarım.

Yurt İçi Doktora Burs Programı ile desteklerinden dolayı TUBİTAK'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xx
1. GİRİŞ	1
2. GAZ ATOMİZASYONU	4
2.1. Gaz Atomizasyon Üniteleri	4
2.1.1. Serbest düşmeli	5
2.1.2. Yakından eşlemeli	5
2.2. Atomizasyon Değişkenleri	6
2.3. Gaz Akış Modelleri	12
2.3.1. Şok dalgası oluşumu	14
2.3.2. Negatif basınç gradyanı	15
2.3.3. Geri basınç gradyanı	16
2.4. Geçiş Bölgesinin Gaz Atomizasyonuna Etkisi	19
2.5. Atomizasyon Mekanizmaları	19
2.6. Gaz Atomize Tozların Karakterizasyonu	37
2.6.1. Toz boyutunun tayini	37
2.6.2. Parçacık boyut dağılımı	40
2.6.3. Parçacık şekli	42
2.6.4. Mikroyapı	44
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	48
3.1. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi	48
3.1.1. Kontrol sistemi	49
3.1.2. Gaz sistemi	50
3.1.3. Gaz akış debisinin ölçümü	51
3.1.4. Ergitme sistemi	51
3.1.5. Lüle	52
3.1.6. Sıvı metal akış borusu	53
3.1.7. Atomizasyon kulesi	54

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.1.8. Toz toplama kabı	54
3.2. Deneysel Veriler	54
4. LÜLENİN HAD MODELLEME YAKLAŞIMI	57
4.1. Model Geometrisinin Oluşturulması	57
4.2. Ağ Yapısının Oluşturulması	58
4.3. Sayısal Çözüm Teorisi	58
4.3.1. Kütlelenin korunumu	58
4.3.2. Momentumun korunumu	59
4.3.3. Türbülans	60
4.3.4. Çok-fazlı akış	63
4.3.5. Çok-fazlı modelleme yaklaşımları	64
4.3.6. Euler-Euler yaklaşımı	64
4.3.7. Akışkan hacmi modeli	64
4.4. Sayısal Çözüm	72
4.4.1. Çözücünün seçilmesi	72
4.4.2. Çok fazlı modelin oluşturulması, VOF modeli ve faz sayısının belirlenmesi	73
4.4.3. Viskoz özelliklerin seçilmesi	73
4.4.4. Enerji denklemi	73
4.4.5. Denklemler	73
4.4.6. Malzeme özelliklerinin girilmesi	74
4.4.7. Fazların belirlenmesi	74
4.4.8. Sınır koşullarının girilmesi	75
4.4.9. Çalışma koşulları	75
4.4.10. Çözüm yönteminin seçilmesi	75
4.4.11. Çözdürme işlemleri	77
4.5. Eş Değer Küresel Çap Hesabı	79
4.6. Geometrik Ortalama	79
5. TEORİK VE DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	80
5.1. Lüle Modeli Oluşturma Çalışmaları	80
5.2. Atomizasyonun İki-Fazlı Modellenabilirliğinin Araştırılması	88
5.2.1. Birincil lüle çıkıntı mesafesi çalışmaları	88
5.2.2. İkincil lüle çıkıntı mesafesi çalışmaları	92
5.3. Tek-Fazlı Modelleme Sonuçları	96
5.3.1. Ağ yapısından bağımsızlık	98
5.3.2. Toroidal vorteks oluşumu	101
5.3.3. En yüksek gaz hızları	102

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.3.4. Lüle uç basıncı	103
5.3.5. Gaz ve sıvı metal debileri	107
5.4. Atomizasyon Mekanizmalarının Açıklanması	109
5.5. Toz Boyutlarının Hesaplanması	118
5.5.1. 0,5 MPa basınç altında ilk denemeler	118
5.5.2. 2,5 MPa basınç altında detaylı toz boyutu çalışmaları	122
5.5.3. Hassas boyut hesabı	125
5.5.4. Toz boyutunun alınması	127
5.5.5. Toz boyutu sonuçları	129
5.5.6. Boyut dağılımları	133
5.5.7. Standart sapma hesabı	143
5.5.8. Viskozite değişimi	144
5.6. Gaz Atomizasyonu İşleminin 3D Modellenmesi	145
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	149
6.1. Sonuçlar	149
6.2. Öneriler	150
KAYNAKLAR DİZİNİ	151
EKLER	
EK-1 Gaz Atomizasyon Modeli	
EK-2 Parçacık Oluşumlarının Elde Edilişi	
EK-3 Düşük ve Yüksek Viskozitedeki Atomizasyonun Karşılaştırılması	
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. İki akışkanlı gaz atomizörleri a) iç karıştırmalı, b) dış karıştırmalı	4
2.2. Serbest düşmeli atomizör	5
2.3. Yakından eşlemeli atomizör	6
2.4. Sıvı metal viskozitesi ile d_{50} boyutunun değişimi	7
2.5. Farklı sıvıların atomizasyon aşamaları a) su, b) gliserin	8
2.6. Karakteristik akış rejimleri	9
2.7. Toz çapına göre soğuma hızının değişimi	9
2.8. Atomizasyona ait gerçek görünüm a) su, b) PEO-2, c) PEO-4, d) PEO-5, e) PEO-8	10
2.9. Weber sayısının ikincil parçalanma üzerindeki etkisi a) $We=1503$, b) $We=30$	11
2.10. Lüle geometrileri a) sesaltı lüle geometrisi, b) sesüstü lüle geometrisi	11
2.11. Lüle akış karakteristikleri (lüle boyu/genişliği = 1,8)	12
2.12. PIV tekniği ile hesaplanan gaz akış vektörleri	13
2.13. Daralan-genişleyen (Laval-tipi) atomizasyon lülesi	13
2.14. İki-fazlı akışlardaki lüle çıkışında ani basınç düşüşü	14
2.15. Gaz akış alanı a) dairesel yarık lüle b) "isentropic plug" lüle	15
2.16. Lüle ucu bölgesindeki akış alanına ait gaz dinamiklerinin Schlieren yöntemi ile görüntülenmesi	15
2.17. Tek-fazlı akışta gaz basıncının farklı çıkıntı mesafelerinde sıvı metal besleme borusunun ucundaki basınç oluşumuna etkisi	16
2.18. Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi	17
2.19. Tek-fazlı akışta gaz akış alanı a) hız dağılım grafiği, b) akış dolaşımını gösteren hız vektörleri	18
2.20. Metal akış borusu çıkış ucunda oluşan girdap akımlarının şematik diyagramı	19
2.21. Farklı iki tip lülede atomizasyon	20
2.22. Atomizasyon gazı ile ergiyik metal etkileşimi	20
2.23. Kalay atomizasyonunda akış ayrılmasının oluşumu a) atomizasyondan önce, b) atomizasyon sırasında akış ayrılması (2,2 MPa gaz basıncında), c) atomizasyon sırasında (akış ayrılması olmadan)	21
2.24. Atomizasyonun yan profilden görünümü (spreyi oluşturan jetlerin üstten görünüşü ile birlikte)	21
2.25. Farklı rejimlerin şeklini gösteren basit şematik diyagramlar a) kabarcık parçalanması (kabuk parçalanması), b) çam ağacı parçalanması (hücrel parçalanma), c) lif parçalanması	22
2.26. Sprey morfolojisi	22

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.27. Atomizasyon görüntüleri a) anlık görüntü, b) ortalama görüntü, c) ortalama görüntüde renk ölçeklendirmesi, d) piksel yoğunluğu standart sapma hesabı ile elde edilen görüntü, e) renk ölçeklendirmeli görüntü	23
2.28. Akışkan parçacıklarının konumları	23
2.29. Çubuk ve tanecik takibi	24
2.30. Kol ayrılması, çubuk oluşumu ve uzaması, parçacık oluşumu	24
2.31. Çıkış kanalı açısının akış gelişimine etkisi	25
2.32. Farklı hızlardaki atomizasyon görüntüleri	25
2.33. Sıvı jeti üzerinde iki farklı kararsızlık oluşumu a) sinüsoidal (kırımlı) bozulma, b) varisli bozulma	26
2.34. Sıvı jetinin yüksek hızlı ve eş eksenel gaz jeti ile parçalanması	26
2.35. Farklı Reynolds ve Ohnesorge sayılarının parçalanma üzerindeki etkileri a) $Re = 19,9$; $Oh = 0,831$; b) $Re = 199,4$; $Oh = 0,083$; c) $Re = 1994$; $Oh = 0,00831$; d) $Re = 19940$; $Oh = 0,000831$; e) $Re = 111,7$; f) $Re = 1117,9$; g) $Re = 11179$; h) $Re = 111794$	27
2.36. Dairesel gaz jeti ile sıvı parçalanmasının anlık görüntüleri a), b) ve c) yüzey gerilimi baskın, d) Rayleigh tipi parçalanma, e), f), g) ve h) gaz hızı yüksek	28
2.37. Üç farklı ağ yapısı için sıvı nüfuziyet uzunlukları	29
2.38. Eş eksenli lüle ve spreye ait şematik görünüm	29
2.39. Deneysel ve teorik sonuçlar a) akış hattındaki sıvı fazın hacim oran profili (kesit alanda), b) yüksek hızlı sıvı hidrojen jetinin anlık atomizasyonun görüntüsü	30
2.40. Sıvı damlası etkisiyle merkezi jet oluşumu	30
2.41. Basınçlı atomizörde parçalanma rejiminde yakın alan görünümü	31
2.42. Sayısal çözümleme ve deneysel yolla elde edilen görüntüler	31
2.43. Sıvı akışının shadowgraph görüntüsü ve çubuk parçalanma olayı	32
2.44. Sprey parçalanma simülasyonundan alınan anlık görüntü	32
2.45. Modellenen bölgede meydana gelen parçalanmalar	33
2.46. $We_i=12$ (üstte), $We_i=15$ (ortada), $We_i=100$ (altta) değerlerindeki tanecik parçalanma simülasyonları	33
2.47. Parçalanma bölgesinde akış görüntüleri (solda), ortalama eksenel gaz hızı üzerinde sıvı jetinin etkisi (sağda)	34
2.48. Dönen disk atomizöründe kirşlerin parçalanması ve toz oluşumu	35
2.49. Gaz akışı etkisiyle ayrılan tanecik (ayrılma öncesi ve sonrası)	35
2.50. Deneysel sonuçlarla (solda) sayısal sonuçların (sağda) kıyaslanması	36
2.51. Deneysel olarak elde edilen sprej dış hatlarının sayısal sonuçlarla kıyaslanması	36

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.52. Atomizasyon gaz basıncının ortalama parçacık boyutu üzerine etkisi	37
2.53. Kümülatif boyut yüzdesi ile parçacık boyutunun kıyaslanması	39
2.54. a) Silika parçacıklarının SEM görüntüsü, b) SEM ölçümü için ölçek	40
2.55. Farklı elektrik alan etkisi altında parçacıkların dağılımı	41
2.56. Yüksek basınçlı gaz atomizasyonu ile elde edilmiş kalay tozlarının SEM görüntüsü a) ve b) $P_o = 200$ psi ($P_o / P_a = 14$), c) ve d) $P_o = 700$ psi ($P_o / P_a = 48$)	42
2.57. Parçacık çarpışmaları sonucunda oluşan şekiller a) uydulaşma, b) ikili oluşum	43
2.58. Küresel şekilli kalay tozları a) x100, b) x6000	43
2.59. İkili parçacık çarpışmaları diyagramı a) çarpıp ayrılma, b) birleşme, c) birleşip ayrılma, d) parça koparak ayrılma	43
2.60. İkincil atomizasyon mekanizmasını tamamlayamamış kalay tozları	44
2.61. 1,47 MPa basınç altında elde edilmiş azot atomize tozların genel görüntüleri; a) toz toplama kabı içerisindeki tozlar, b) siklon içerisindeki tozlar	44
2.62. Azot atomize kalay tozunun hücresel yüzeyi (1,47 MPa)	45
2.63. a) Asitle dağlama olmaksızın kalay tozların görünümü, b) asitle dağlama sonrası bir kalay tozunun mikroyapısı	45
2.64. Kalay tozlarında dentritik katılaşma yapısı a) x2300 b) x1200	46
2.65. Gaz atomize kalay tozunda mikroyapı	46
2.66. Alüminyum toz mikroyapısı a) çap 25 μ m'den küçük, b) 106-150 μ m aralığında	46
3.1. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi	49
3.2. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi'nin şematik gösterimi	49
3.3. Kontrol panosu ve atomizasyon takibi	50
3.4. 12 ayrı tüpten oluşan yüksek basınçlı gaz sistemi	50
3.5. Kütleli debi ölçüm cihazı	51
3.6. Ergitme ünitesi a) ergitme odası, b) ergitme fırını	52
3.7. Atomizasyon lülesine ait görüntüler; a) örnek lüle-1, b) örnek lüle-2 (alt görünüm), c) örnek lüle-2 (üst görünüm)	52
3.8. Daralan genişleyen geometrilili lülenin şematik gösterimi ve metal akış borusu uç basıncı ölçüm sistemi	53
3.9. Toz toplama kabı ve siklonun görünümü	54
3.10. Atomizasyon gaz basıncının ortalama parçacık boyutu üzerindeki etkisi	55
3.11. Gaz/metal kütle akış oranının ortalama boyuta etkisi	56
3.12. Özgül gaz tüketiminin (m^3/kg) ortalama boyuta etkisi	56

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Modellenen lüle geometrisi	57
4.2. Gambit programında oluşturulan ağ yapısı	58
4.3. Ara-yüzey hesaplamaları a) gerçek ara-yüzey şekli, b) geometrik yeniden yapılandırma (parçalı doğrusal) yaklaşımı ile gösterilen ara-yüzey şekli, c) "donor-acceptor" yaklaşımı ile gösterilen ara-yüzey şekli	68
4.4. Hesaplamalara katılan denklemler	74
4.5. Çözüm kontrolleri	76
4.6. İterasyon işleminin başlatılması	78
5.1. Tek-fazlı referans modelde ağ yapısı ve sınır şartları	80
5.2. Referans geometrinin Gambit yazılımında gösterimi	81
5.3. Ağ yapısı oluşturulmuş olan lüle geometrisi	81
5.4. Eksene göre simetrik yansımasıyla birlikte tam lüle geometrisi	82
5.5. Sıvı metal ile birlikte atomizasyon gazının iki-fazlı görünümü	82
5.6. Atomizasyon gazının lüleden geçerek atomizasyon kulesine girişi (iki-fazlı)	83
5.7. Tek-fazlı akışta atomizasyon kulesi boyunca gaz akışları a) henüz olgunlaşmamış, b) tamamen olgunlaşmış	83
5.8. Sıvı metal fazın metal akış borusu içinde ilerlemesi	84
5.9. Sıvı fazın a) metal akış borusunu terk edişi, b) kararsız hâle gelişi, c) basit parçalanmalar, d) bütünlüğünü koruması	84
5.10. Basitleştirilmiş lüle geometrisi (ilk lüle)	85
5.11. Basitleştirilmiş lüle geometrisi ile elde edilen hız kontürleri a) başlangıç seviyesi, b) olgunlaşmış gaz akışı	85
5.12. Basitleştirilmiş lüle geometrisi (ikinci lüle) (51577 hücre)	86
5.13. İkinci lülide a) ağ yapısı (51577 hücre), b) hız kontürleri	86
5.14. Basitleştirilmiş ikinci lüle ile elde edilen parçalanma sonuçları a) tabaka oluşumu başlangıcı, b) kırıların oluşumu, c) tabaka, kırı ve damlacık oluşumu, d) damlacık oluşumu	87
5.15. Sıvı metalin gaz akışı olmadan lüle ucundan ayrılışı (düzeltilmiş ikinci lüle)	88
5.16. Lüle çıkıntı mesafeleri a) 2,5 mm, b) 5,0 mm, c) 7,5 mm ve d) 10,0 mm	89
5.17. a) Birinci geometri, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon	90
5.18. a) İkinci geometri, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon	90
5.19. a) Üçüncü geometri, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon	91
5.20. a) Dördüncü geometri, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon	91
5.21. Lüle çıkıntı mesafeleri a) 0,0 mm, b) 2,75 mm, c) 5,5 mm, d) 8,25 mm	92

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.22. a) Birinci lüle, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon	92
5.23. a) İkinci lüle, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon	93
5.24. a) Üçüncü lüle, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon	93
5.25. a) Dördüncü lüle, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jet ile atomizasyon	94
5.26. Tüm lülelerin 0,5 MPa basınçla atomizasyonu a) 0,0 mm, b) 2,75 mm, c) 5,5 mm, d) 8,25 mm	94
5.27. Tüm lülelerin 1,0 MPa basınçla atomizasyonu a) 0,0 mm, b) 2,75 mm, c) 5,5 mm, d) 8,25 mm	95
5.28. Tüm lülelerin 1,5 MPa basınçla atomizasyonu a) 0,0 mm, b) 2,75 mm, c) 5,5 mm, d) 8,25 mm	95
5.29. Analizde kullanılan lüle geometrisi a) lüle çıkıntı mesafesi, b) yüksek basınçlı gaz giriş bölgesi, c) gaz çıkışı boğaz alanı, d) sıvı metal akış borusu	96
5.30. 1,0 MPa basınç altında oluşan gaz hızı kontürleri a) tek-fazlı, b) iki-fazlı	97
5.31. Tek-fazlı akışta a) geri basınç bölgesi, b) toroidal vorteks	97
5.32. Lüle çıkıntı mesafesi	98
5.33. Atomizasyon basıncına göre gaz hızının farklı hücre sayılarında değişimi	100
5.34. Gaz akış miktarları	101
5.35. Gaz akış miktarlarındaki değişimler	101
5.36. Gaz geri dönüşüm bölgesi ve toroidal vorteks a) 0,5 MPa basınç altında, b) 1,0 MPa basınç altında, c) 1,5 MPa basınç altında, d) 2,0 MPa basınç altında, e) 2,5 MPa basınç altında	102
5.37. En büyük gaz akış hızları	103
5.38. Lüle uç basınç değerlerinin alınmasında kullanılan hatların pozisyonu	104
5.39. 0,5 MPa basınç altında a) Hat 1, b) Hat 2, c) Hat 3 boyunca basınç değerleri	104
5.40. 1,0 MPa basınç altında a) Hat 1, b) Hat 2, c) Hat 3 boyunca basınç değerleri	105
5.41. 1,5 MPa basınç altında a) Hat 1, b) Hat 2, c) Hat 3 boyunca basınç değerleri	105
5.42. 2,0 MPa basınç altında a) Hat 1, b) Hat 2, c) Hat 3 boyunca basınç değerleri	106
5.43. 2,5 MPa basınç altında a) Hat 1, b) Hat 2, c) Hat 3 boyunca basınç değerleri	106
5.44. Lüle uç basıncı değişimi verilerinin kıyaslaması	107
5.45. Basınca göre gaz akış debisi değişimi (Deneysel ve HAD verilerinin karşılaştırılması)	108
5.46. Basınca göre sıvı metal akış debisi değişimi (Deneysel ve HAD verilerinin karşılaştırılması)	108
5.47. Gambit programında oluşturulan ağ yapısı	109

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.48. a) Lüle çıkıntı mesafesi, b) lüle boğazı, c) metal akış borusu	110
5.49. a) Önerilen bir model, b) modellemede kullanılan lüle geometrisi	111
5.50. Daralan-genişleyen gaz atomizasyon lülesinde 2,0 MPa basınç altındaki hız kontürleri ...	112
5.51. Sıvı metalin a) düşey yönlü hareketi, b) metal akış borusu ucuna gelişi, c) radyal hareketinin başlangıcı d,e) radyal hareketin gelişimi f) lüle ucuna yaklaşması	114
5.52. a) Sıvı metalin radyal hareketini tamamlaması, b) toz oluşumlarının başlangıcı, c) oluşan ilk tozların gaz geri dönüşüm bölgesine girişi, d) toz oluşumunun sürekli hâle gelmesi	114
5.53. 250 iterasyon aralıklarla elde edilen a) parçacık oluşumları-1, b) parçacık oluşumları-2, c) parçacık oluşumları-3, d) parçacık oluşumları-4	115
5.54. Sıvı metalin a) radyal hareketine başlaması ve toroidal vorteks, b) sıvı metalin lüle ucu dış çap dairesine ulaşması	115
5.55. Gaz geri dönüşüm bölgesinde dolaşan ve taşınım bölgesinde sürüklenen tozlar	116
5.56. Tozların parçalanma/birleşme mekanizması	117
5.57. Lüle dış çap dairesinde başlayıp gelişen birincil ve ikincil parçalanma olayı a) Şekil 5.55'te gösterilen işaretli bölge, b) işaretli görünüm	117
5.58. Toz oluşumunda sıkça karşılaşılan halter mekanizması	118
5.59. Simülasyon-A a) hız kontürleri, b) toz oluşumları, c) büyütülmüş toz oluşumları	119
5.60. Simülasyon-B a) hız kontürleri, b) toz oluşumları, c) büyütülmüş toz oluşumları	120
5.61. Simülasyon-C a) hız kontürleri, b) toz oluşumları, c) büyütülmüş toz oluşumları	120
5.62. a) Sıvı metal filminin ve sıvı şerit oluşumunun başlangıcı, b) toz oluşumunun başlangıcı ve geri basınç bölgesine tekrar giren tozlar	121
5.63. a) Lüle geometrisi boyunca toz oluşumunun görünümü, b) lüle ucunda sirkülasyon hâlindeki tozlar	121
5.64. a) Numune olarak seçilen oluşumunu tamamlamış tozlar, b) numune tozların boyutsal değerleri	122
5.65. 2,5 MPa basınç altında a) hız kontürleri, b) damlacık oluşumu	123
5.66. 2,5 MPa basınç altında toz oluşumları a) yakın bölge, b) uzak bölge	123
5.67. 2,5 MPa basınç altında numune alınan bölge	124
5.68. 2,5 MPa basınç altında toz boyutları	125
5.69. 2,5 MPa basınç altında toz oluşumları a) tüm lüle, b) yakından görünüm	125
5.70. 2,5 MPa basınç altında toz oluşumları	126
5.71. Numune olarak seçilen tozlar	127

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.72. 2,5 MPa basınç altında toz boyutu alınan a) birinci, b) ikinci, c) üçüncü, d) dördüncü, e) beşinci numune	128
5.73. 2,5 MPa basınç altında oluşan tozlar	128
5.74. Gaz basıncına göre toz boyutunun değişimi	130
5.75. G/M kütle akış oranına göre deneysel ve teorik toz boyutunun karşılaştırılması	131
5.76. Gaz basıncı - toz boyutu eğrileri	132
5.77. G/M kütle akış oranı - toz boyutu eğrilerinin logaritmik ekseninde gösterimi	132
5.78. Gaz basıncı - toz boyutu eğrilerinin logaritmik ekseninde gösterimi	133
5.79. 1,0 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı grafiği	135
5.80. 1,0 MPa basınç altındaki toz dağılımına ait histogram	135
5.81. 1,5 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı grafiği	135
5.82. 1,5 MPa basınç altındaki toz dağılımına ait histogram	136
5.83. 2,0 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı grafiği	136
5.84. 2,0 MPa basınç altındaki toz dağılımına ait histogram	136
5.85. 2,5 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı grafiği	137
5.86. 2,5 MPa basınç altındaki toz dağılımına ait histogram	137
5.87. 3,0 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı grafiği	137
5.88. 3,0 MPa basınç altındaki toz dağılımına ait histogram	138
5.89. 3,5 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı grafiği	138
5.90. 3,5 MPa basınç altındaki toz dağılımına ait histogram	138
5.91. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (1,0 MPa)	139
5.92. 1,0 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi	139
5.93. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (1,5 MPa)	139
5.94. 1,5 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi	140
5.95. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (2,0 MPa)	140
5.96. 2,0 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi	140
5.97. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (2,5 MPa)	141
5.98. 2,5 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi	141
5.99. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (3,0 MPa)	141
5.100. 3,0 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi	142
5.101. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (3,5 MPa)	142
5.102. 3,5 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi	142

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.103. Standart sapmanın grafiksel değişimi	143
5.104. Viskozite değerlerinin parçalanmaya etkisi a) 0,00133 kg/m-s, b) 0,00623 kg/m-s	145
5.105. Yüksek viskozitede elde edilen parçacıklar	145
5.106. 3 boyutlu modellemede a) 30 derecelik lüle kısmı, b) hesaplama hücreleri, c) sıvı metal akışı	146
5.107. Üç boyutlu modelleme ile elde edilen a) hız kontürleri, b) hız vektörleri	147
5.108. Üç boyutlu modellemede a) lüle hücre yapısı, b) sıvı faz ve parçalanmalar	147
5.109. Atomizasyon odasının kesit alınmış görüntüsü	148
5.110. 3B modellemede a) ergiyik, b) toroidal vorteks, c) atomizasyon	148

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Azot gazı kullanılarak yapılan kalay atomizasyonunda elde edilen deneysel sonuçlar	55
4.1. Basınç, iterasyon sayısı ve simülasyon süresi	78
5.1. Gaz basıncı ve hücre sayısına göre en büyük gaz hızının değişimi (m/s)	99
5.2. Gaz basıncı ve hücre sayısına göre gaz akış debileri (kg/s)	99
5.3. Gaz basıncı ve hücre sayısına göre gaz akış debilerinin değişimi (kg/s)	99
5.4. Artan atomizasyon basıncına göre gaz debisi	107
5.5. 75 nano-saniye aralıklarla A-B-C simülasyonları	119
5.6. Numune olarak seçilen tozların boyut değerleri	127
5.7. Toz boyutunun gaz basıncına göre değişimi	129
5.8. Toz boyutları, gaz basıncı ve akış oranları (deneysel)	131
5.9. Toz boyutları, gaz basıncı ve akış oranları (teorik)	131
5.10. Standart sapma değerleri	143

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
α_q	Hacim oranı
ϕ	Skaler bir büyüklük
μ	Moleküler viskozite
μm	Mikrometre
λ	İkincil dendrit kol uzunluğu
τ_{ij}	Deviatorik gerilme tensörü
$\bar{\tau}$	Gerilim tensörünü
ξ	Başlangıç ortalama parçacık çapı
ρ	Yerçekimi nedeniyle oluşan moment
2B	İki boyutlu
3B	Üç boyutlu
a	Ampirik bir sayı
b	Ampirik bir sayı
c	Parçacık numarası
d	Parçacık çapı
A	Parçacıkların izdüşüm kesit alanı
C_μ	Model sabiti
d_{10}	Parçacıkların % 50'sinin kendisinden daha ince olduğu çap değeri
$d_{15,9}$	Parçacıkların % 15,9'unun kendisinden daha ince olduğu çap değeri
d_{50}	Parçacıkların % 50'sinin kendisinden daha ince olduğu çap değeri
$d_{84,1}$	Parçacıkların % 84,1'inin kendisinden daha ince olduğu çap değeri
d_{90}	Parçacıkların % 90'ının kendisinden daha ince olduğu çap değeri
D_A	Parçacıkların eşdeğer küresel çapı
\vec{F}	Dışarıdan etki edebilecek momentlerin toplamı (yerçekimi dışında)
I	Birim tensörü
k	Türbülans kinetik enerjisi
K	Lubanska bağıntısındaki deney sabiti
k_{eff}	Efektif termal iletkenlik
\dot{m}_{qp}	Faz q'dan faz p'ye kütle geçiş debisi
\dot{m}_{pq}	Faz p'den faz q'ya kütle geçiş debisi
n	Zaman adımı indeksi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Pr_t	Prandtl sayısı
p	Statik basınç
P_a	Atmosfer basıncı
P_o	Gaz basıncı (stagnation chamber)
Psi	Pounds per square inch
q^{th}	Fazlardan biri
r	Radyal koordinat
S_x	Kaynak terimleri
t	Toplam parçacık sayısı
T	Soğuma hızı
U_f	Volume flux
u_i	Hız değişkeni
\bar{u}_i	Ortalama hız bileşeni
u'_i	Değişken hız bileşeni
V	Hacim
v_x	Eksenel hız değeri
v_r	Radyal hız değeri
v_z	Eksene göre simetrik olan girdap hareketinin hızı
We	Weber sayısı
x	Eksenel koordinat

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
CFD	Computational Fluid Dynamics
CICSAM	Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes
CPU	Central Processing Unit
CSF	Continuum Surface Force
CSS	Continuum Surface Stress
G/M	Gaz/Metal
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HPGA	High Pressure Gas Atomization
HRIC	High Resolution Interface Capturing
LES	Large Eddy Simulation
NIST	National Institute of Standards and Technology
PEO	Polietilen Oksit
PIV	Particle Image Velocimetry
RS	Rapid Solidification
RSM	Reynolds Stres Modeli
SEM	Scanning Electron Microscope
SEM-BSE	Scanning Electron Microscope – Back Scattered Electron
UDF	User-defined Functions
VOF	Volume of Fluid

1. GİRİŞ

Toz metalürjisi temel olarak maddenin toz hâline getirilmesini ve bu tozların şekillendirme işlemi sonrası sinterlenmesi ile parça üretimi yöntemidir. Toz metalürjisi yönteminin ilk aşaması, hammaddesi olan tozun üretimidir. Toz üretimi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden ticari olarak en geniş kullanım alanına sahip olan atomizasyon yöntemidir. Atomizasyon yöntemleri ile üretilmiş tozlar diğer üretim yöntemleri (mekanik yöntemler, elektroliz, kimyasal yöntemler) ile elde edilemeyecek özelliklere ve üstünlüklere sahiptir (Ünal ve Aydın, 2008). Bu üstünlüklerin başında gaz atomizasyon işleminde parçacık boyutunun işlem değişkenleri ile kontrol altında tutulabilmesi gelmektedir. Toz metalürjisi yöntemlerinin gün geçtikçe daha verimli hâle getirildiği imalat alanlarında yüksek kaliteli toz ihtiyacı giderek artmaktadır. Yakın gelecekte birçok üretim faaliyetine öncülük edeceği öngörülen Eklemeli İmalat Yöntemleri'nde gaz atomizasyonu ile üretilmiş metal tozları kullanılmaktadır. Özellikle üç boyutlu yazıcı teknolojisinin beraberinde getirdiği yüksek nitelikteki hammadde ihtiyacı, atomizasyon yöntemleriyle üretilen küresel ve temiz yüzeyli metal tozlarıyla karşılanmaktadır.

Atomizasyon ergiyik hâle getirilebilen tüm metallere uygulanabilir ve ergiyik metalin gaz veya sıvı bir akışkan kullanılarak parçacıklara ayrılması işlemi iki-akışkanlı atomizasyon olarak adlandırılır. İki-akışkanlı atomizasyon en yaygın atomizasyon yöntemidir ve dünyadaki tüm atomizasyon işlemleri içinde en yüksek oranda uygulanan yöntemdir. İki-akışkanlı atomizasyon, sıvı metal demetinin basınçlı akışkanlar vasıtasıyla parçalanması sonucu oluşan damlacıkların katılma davranışı göstererek metal tozu hâline gelmesidir. Basınçlı akışkan olarak gazın kullanıldığı atomizasyon türüne gaz atomizasyonu, suyun kullanıldığı atomizasyon türüne su atomizasyonu denir. Gaz atomizasyon sistemleri genel olarak serbest düşmeli ve yakından eşlemeli olmak üzere ikiye ayrılır. Yakından eşlemeli atomizasyon sistemleri daha iyi kinetik enerji transferi sağladığı için serbest düşmeli yöntemden daha üstündür. Yakından eşlemeli sistemlerde daha ince boyutlarda ve daha dar dağılıma sahip tozlar üretmek mümkündür. Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi fiziksel olarak oldukça karmaşık bir işlemdir. Parçalanma mekanizmasının karmaşıklığından dolayı bu işlemin anlaşılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Toz üretim kabiliyetinin geliştirilmiş lüle tasarımı ile iyileştirilmesi konusunda büyük bir potansiyel vardır ve günümüzde çalışmalar bu yönde devam etmektedir (Ünal ve Aydın, 2008). Ancak atomizasyon lülesi gibi küçük geometrilerin deneysel ölçümlere olanak sağlayamamasından, sağladığı durumlardaysa işlem tekrarının çok yüksek maliyetlerle mümkün olmasından dolayı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları en az deneysel yöntemler kadar

ilgi görmektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları ile yapılan çalışmalar, zaman ve maliyet hususlarında avantaj sağladığı gibi, akış rejimlerinin davranışlarının anlaşılmasında alternatif bir yöntem olarak da kullanılmaktadır (Keskin, 2009). Günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları kullanılarak gaz atomizasyon işleminde kullanılan lülenin 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 (Güleşen, 2013).

Atomizasyon işleminin verimliliğini artırmaya yönelik deneysel çalışmalar sayısal yöntemler ve simülasyonlarla desteklenmektedir. Özellikle atomizasyon sırasındaki yüksek sıcaklık ve sesüstü hıza ulaşan akış hareketlerinin çözümü için birçok araştırmacı HAD yöntemlerini çalışmalarına dâhil etmiştir. Tomar vd. (2010), yaptıkları çalışmalarında sıvı jetinde eş eksenli ve yüksek hızlı gaz jeti ile meydana gelen birincil atomizasyon oluşumunu HAD yönteminin akışkan hacmi yaklaşımıyla çözümlenmeye çalışmışlardır. Zhao vd. (2012), yaptıkları çalışmalarında içinden hava jeti geçen dairesel kesitli sıvı akış lülesinde gaz hızının atomizasyon oluşumuna etkilerini araştırarak artan gaz hızıyla birlikte atomizasyon oluşumunun geliştiğini göstermişlerdir. Zeoli vd. (2011), yaptıkları çalışmalarında farklı lüle düzeneklerinin atomizasyon oluşumuna etkilerini sayısal çözümlenme ile incelemişlerdir. Bu çalışmalarda iki-fazlı ve üç boyutlu modelleme ile sıvı fazın başlangıç hareketini incelemişler, bazı atomizasyon parametrelerinin sıvı faza etkilerini sorgulamışlar ve üç farklı lüle geometrisi üzerinde verimli olan lüle tipini belirlemeye çalışmışlardır. Mlkvik vd. (2015), farklı atomizasyon ünitesi tasarımlarının iki akışkanlı atomizasyondaki parçalanma işlemlerine, atomizasyonun karalılığına ve parçacık boyutuna etkilerini incelemişlerdir. Zhao vd. (2015), dairesel sıvı levha parçalanmasını incelemişler ve parçalanmanın birkaç farklı rejimde olduğunu öne sürmüşlerdir. Dumouchel vd. (2015), yaptıkları çalışmalarında atomize edilen sıvı üzerinde shadowgraph yöntemiyle elde ettikleri görsellerden sıvı parçalanmasını açıklamaya çalışmışlar, sıvı bütününden ayrılan çubukların oluşumunu ve daha sonra takip eden kopmalar sonrasında parçacıkların oluşumunu göstermişlerdir. Zaremba vd. (2017), yaptıkları çalışmalarında sıvı parçalanması sırasında sıvı fazın dalgalanmaları ve kararsızlıkların değerlendirilmesi için, piksel yoğunluklarının standart sapmalarını bilgisayar yardımıyla hesaplamaya çalışmışlardır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak yapılmış birçok akademik çalışma bulunmasına karşın şimdiye kadar yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde atomizasyon işlemi tek-fazlı olarak modellenmiştir. Ergiyik metal akışının da dâhil edildiği bazı çalışmalarda ise

sadece atomizasyon başlangıcı modellenebilmiş, ergiyik metal-gaz etkileşimleri, parçalanma mekanizmaları ve toz oluşumları gösterilememiştir.

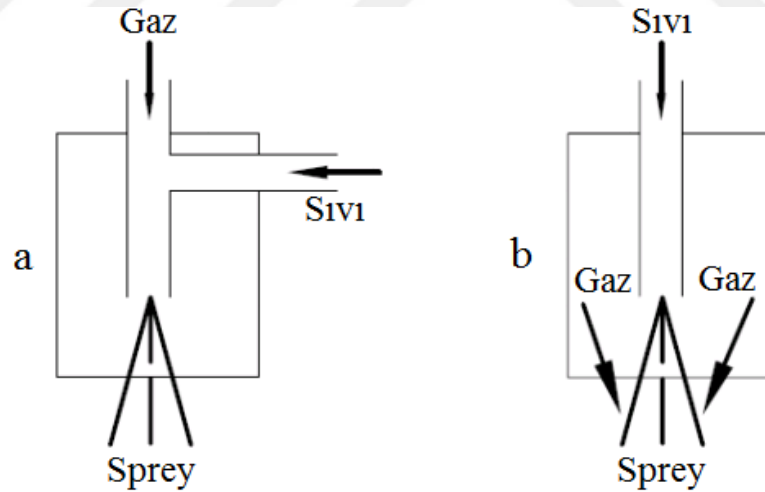
Bu çalışmada gaz atomizasyonu işleminin iki akışkanlı olarak modellenmesi hedeflenerek parçacık boyutunun sayısal modelleme ile elde edilebileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda gaz atomizasyonu işlemi iki akışkanlı olarak modellenmiş, HAD çözümlemesi elde edilerek ergiyik metal-gaz etkileşimleri, parçalanma mekanizmaları ve toz oluşumları tez kapsamında geliştirilen yeni bir yaklaşım ile elde edilmiştir. Geliştirilen yaklaşım ile sayısal çözümleme sonuçları sunulmuş ve deneysel verilerle karşılaştırma yapılarak değerlendirmeler yapılmıştır.



2. GAZ ATOMİZASYONU

2.1. Gaz Atomizasyon Üniteleri

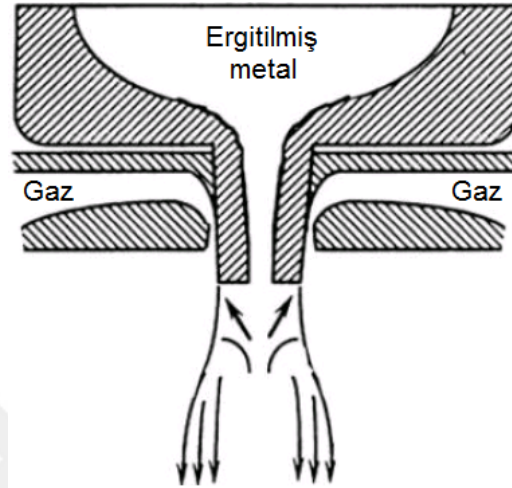
Gaz atomizasyonu işlemi için çeşitli tipte atomizörler geliştirilmiştir. Atomizörün tipi, yüksek kaliteli metal tozları üretmek amacıyla verimli bir parçalanma sağlamada önemli rol oynar. Atomizörler, sıvı faz ile gaz fazın lüle içerisinde karşılaştıkları “iç karıştırmalı” veya lülenin dışında karşılaştıkları “dış karıştırmalı” olarak iki gruba ayrılır (Şekil 2.1.). İç karıştırmalı sistemler; gazın kinetik enerjisinin daha verimli kullanılması (Antipas, 2013), düşük basınçlarda dahi iyi atomizasyon kalitesi sunması ve sıvının reolojik özelliklerine karşı hassasiyetin düşük olması nedenleriyle tercih edilirken (Mikvik vd., 2015), lülenin gaz ve sıvı faz karışımı ile tıkanması ihtimalinden dolayı kullanımları genellikle endişeyle karşılanır (Miyashiro vd., 2001). Ayrıca sıvı fazın birtakım kirleticiler içermesi durumunda iç karıştırmalı atomizörlerin kullanım ömürleri oldukça kısalmaktadır (Hede vd., 2008). Bu nedenlerle sıvı metal atomizasyonu için dış karıştırmalı atomizörler iç karıştırmalı atomizörlere kıyasla daha yaygın olarak tercih edilirler. Bu çalışmada dış karıştırmalı atomizasyon sistemleri üzerinde durulmuştur.



Şekil 2.1. İki akışkanlı gaz atomizörleri a) iç karıştırmalı, b) dış karıştırmalı (Rahman, 2011).

Gaz atomizasyonu yönteminin uygulanması amacıyla geliştirilmiş iki farklı tasarım mevcuttur. Bunlardan birincisi "Serbest Düşmeli" (free-fall) olarak adlandırılan tasarımdır. Diğeri ise "Yakından Eşlemeli" (confined) olarak adlandırılan tasarımdır. Yakından eşlemeli ve serbest düşmeli atomizasyon ünitelerinin her ikisi de dış karıştırmalı atomizörlere örnek olarak gösterilebilir. Bu çalışmanın konusunu yakından eşlemeli tasarım oluşturmaktadır.

Yakından eşlemeli atomizer türü, lüle ucundaki ergiyik donma problemlerine karşı daha hassastır. Bu etki, ergiyiğin, lüle çıkışında hızla genişleyen gaz akışı tarafından yoğun bir şekilde soğutulmasından kaynaklanmaktadır (Fritsching ve Uhlenwinkel, 2012).



Şekil 2.3. Yakından eşlemeli atomizör (Leon, 2016).

2.2. Atomizasyon Değişkenleri

Yakından eşlemeli lülelerde önemli dört boyutsal değişken; çıkıntı mesafesi, metal akış borusunun dış çapı, lüle boğaz alanı ve lülenin daralan-genişleyen bölgelerinin oranıdır (Ünal, 1998). Bunların dışında sıvı metal viskozitesi, lüle uç basıncı, sıvı metal akış oranı, türbülans oluşumu, soğuma hızı, Weber sayısı ve aşırı ısıtma miktarı da atomizasyon işlemindeki önemli etkilere sahiptir.

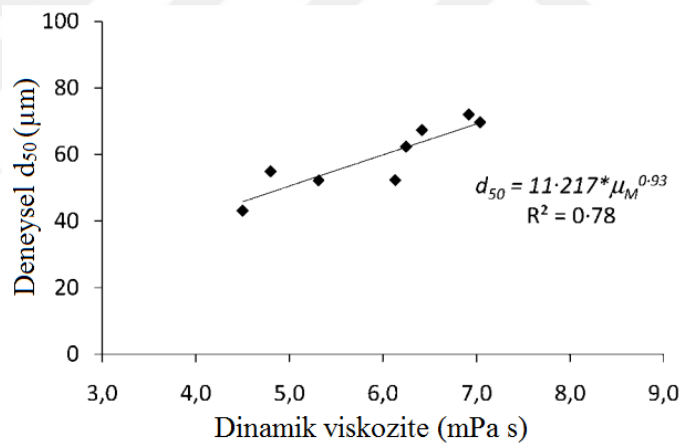
Çıkıntı mesafesi atomizasyon işlemi için en kritik parametrelerden birisidir. Bunun sebebi lüle çıkıntı mesafesinin uç basıncı ve geri basınç oluşumu gibi diğer atomizasyon değişkenleri üzerinde etkili olmasıdır. Çıkıntı mesafesinin parçacık boyutu üzerinde de bir takım etkileri mevcuttur. Lüle çıkıntı mesafesinin artması daha ince parçacıklar elde edilmesinde etkili olmaktadır (Thompson vd., 2016).

Atomizasyona maruz kalan sıvılarda yüksek viskozite değerleri, sıvı yüzeyinin kararsız hâle geçişini ve dolayısıyla parçalanma olaylarını zorlaştırmaktadır (Jiang, 2014). Bu nedenle yüksek viskozite değerine sahip sıvıların atomizasyon öncesinde ön ısıtma işlemine tabi tutulmaları gerekir (Hrubecky, 1953). Bununla birlikte; Ray 1971 yılında sıvı jetlerinin atomizasyonları üzerine yaptığı çalışmasında sıvı jeti viskozitesinin ikincil parçalanmalar üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı sonucuna varmıştır (Ray, 1971). Trinh 2004 yılında sıvı

jetlerinin atomizasyonunda türbülansın etkileri konusunda yaptığı araştırmasında, türbülansın ikincil parçalanmalar üzerindeki etkilerinin, yüzey gerilimi ve viskozite etkilerinden daha büyük olduğunu ifade etmiştir (Trinh, 2004).

Ergitilmiş cam gibi malzemeler nispeten yüksek viskozite ve düşük yüzey gerilimine sahiptirler. Bu tip malzemelerin kullanıldığı gaz atomizasyonu ile toz üretimi sırasında parçalanma sonucu oluşan çubukların hızlı soğuması nedeniyle toz hâlindeki parçacıklar yerine uzun lifler şeklinde ürün elde edilebilmektedir. Bu nedenle bu tip malzemelerin gaz atomizasyonu ile toz üretimi oldukça zor bir işlemdir (Czisch ve Fritsching, 2008).

Persson vd. (2012), su atomize metal toz boyutları üzerine yaptıkları çalışmalarında ergitilmiş metalin viskozitesindeki değişime göre ortalama parçacık boyutunun değişimini göstermişlerdir. Ortalama parçacık boyutunun değişen viskoziteye göre değişimi Şekil 2.4'te görülmektedir.



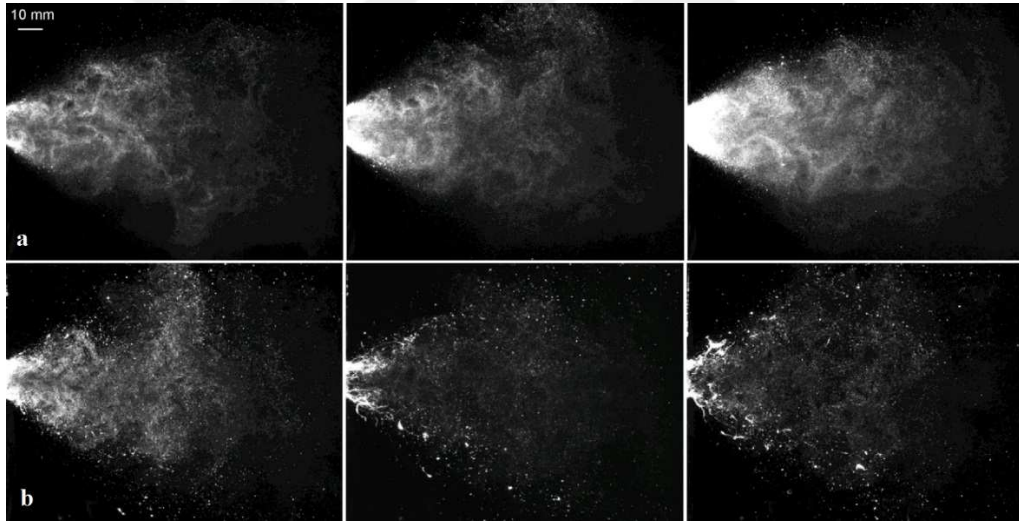
Şekil 2.4. Sıvı metal viskozitesi ile d_{50} boyutunun değişimi (Persson vd., 2012).

Gaz atomizasyonu işleminde ergitilmiş metal akışı iki farklı yolla sağlanmaktadır. Bunlardan birincisi atomizasyon odasının pozitif basınçlandırılması yöntemidir. Bu yöntemin en belirgin avantajı, basıncın istenilen oranda yükseltilerek sıvı metal akışının garantiye alınabilmesine imkân tanınmasıdır. Yöntemin diğer bir avantajı ise metal akış oranının istenilen değerde tutulabilmesidir.

Atomizasyon işleminde sıvı metal akışının kesintiye uğramadan sürekliliğini sağlamak amacıyla başvurulan diğer bir yol ise, atomizasyon lülesi ucunda negatif basınç oluşumunu sağlamaktan geçer. Bu hedef doğrultusunda özel olarak tasarlanan lüle ucunda oluşturulan vakum aracılığıyla, pota içinde bekleyen ergitilmiş metal, akış borusunun içine ve oradan da lüle çıkışına

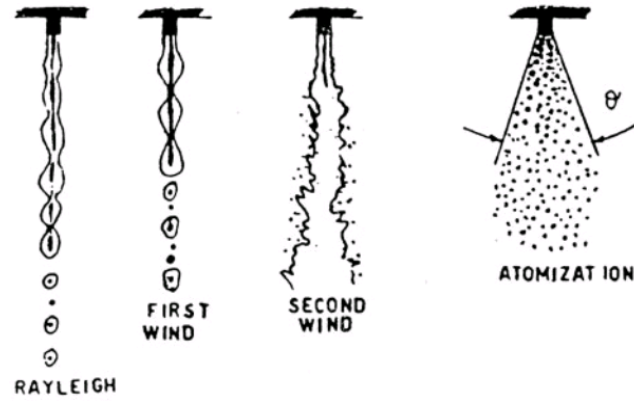
doğru çekilir. Lüle ucundaki negatif basınç değerleri, gaz akışının tek başına gerçekleştiği (tek fazlı) durumlarda net olarak ölçülebilmektedir. Sıvı metal akışı başladığı andan itibaren lüle ucundaki basınç değerleri artık sadece gaz akışları tarafından değil, aynı zamanda akış olayına müdahil olan sıvı metal tarafından da tayin edilmeye başlayacaktır.

Garcia vd. (2017), yaptıkları çalışmalarında iki akışkanlı girdaplı atomizörde parçalanma olaylarını incelemişlerdir. Gliserinin parçalanmasını incelemek için yaptıkları atomizasyon deneylerinin karşılaştırılması amacıyla, atomizasyon işlemini su kullanarak tekrarlamışlardır. Atomizasyon sırasında içi boş konik bir yapının oluştuğunu (Şekil 2.5.) ve büyük çaptaki parçacıkların konik yapının dış bölgesinde yoğunlaştığını gözlemlemişlerdir. Kiriş şeklindeki sıvı parçacıklarının lüle çıkışından itibaren oluştuğunu ancak bunların atomizasyonun ilerleyen aşamalarında daha küçük parçacıklara dönüştüklerini ifade etmişlerdir. Ortalama parçacık boyutunun sıvı akış oranıyla birlikte arttığını göstermişlerdir.



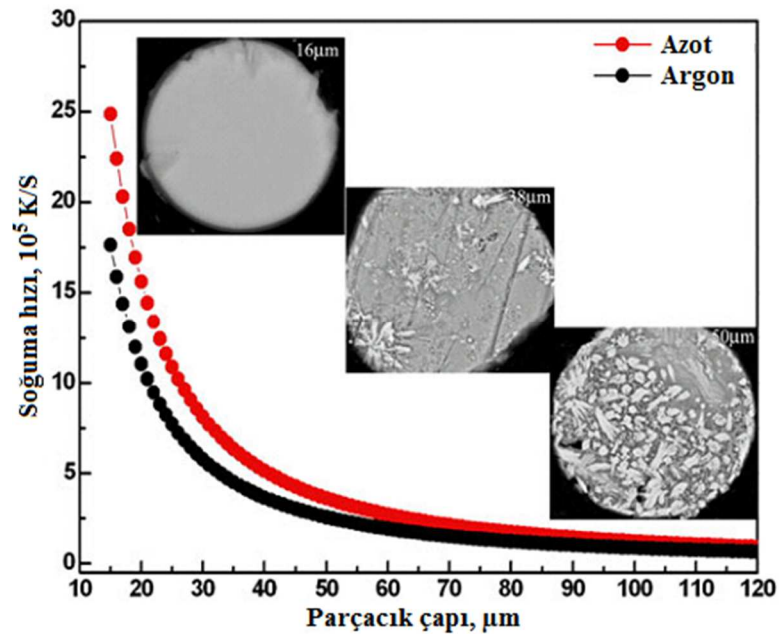
Şekil 2.5. Farklı sıvıların atomizasyon aşamaları a) su, b) gliserin (Garcia vd., 2017).

Antipas (2013), gaz atomizasyonu ve sprej oluşumu konusunda yaptığı çalışmasında sıvı sütunlarının parçalanmasını incelemiştir. Lüle çıkışında püskürtmenin gerçekleşmesinden sonra belirginleşen iki farklı akış bölgesi tanımlamıştır. Bunlardan birincisi lüle ucundan itibaren belirli bir mesafeye kadar varlık gösteren ve sıvı sütununun yoğun bir şekilde var olduğu bölge olarak tanımlanmıştır. İkinci bölgede ise sıvı jeti konik bir şekil almakta ve parçalanmalar açıkça görülebilmektedir. Akış hızı düşük olduğunda sıvı sütunu Rayleigh etkilerinin altında parçacıklara ayrılır. Akış hızının transonik olduğu, türbülanslı akışa geçildiği ve atomizasyonun gerçekleştiği rejimler Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



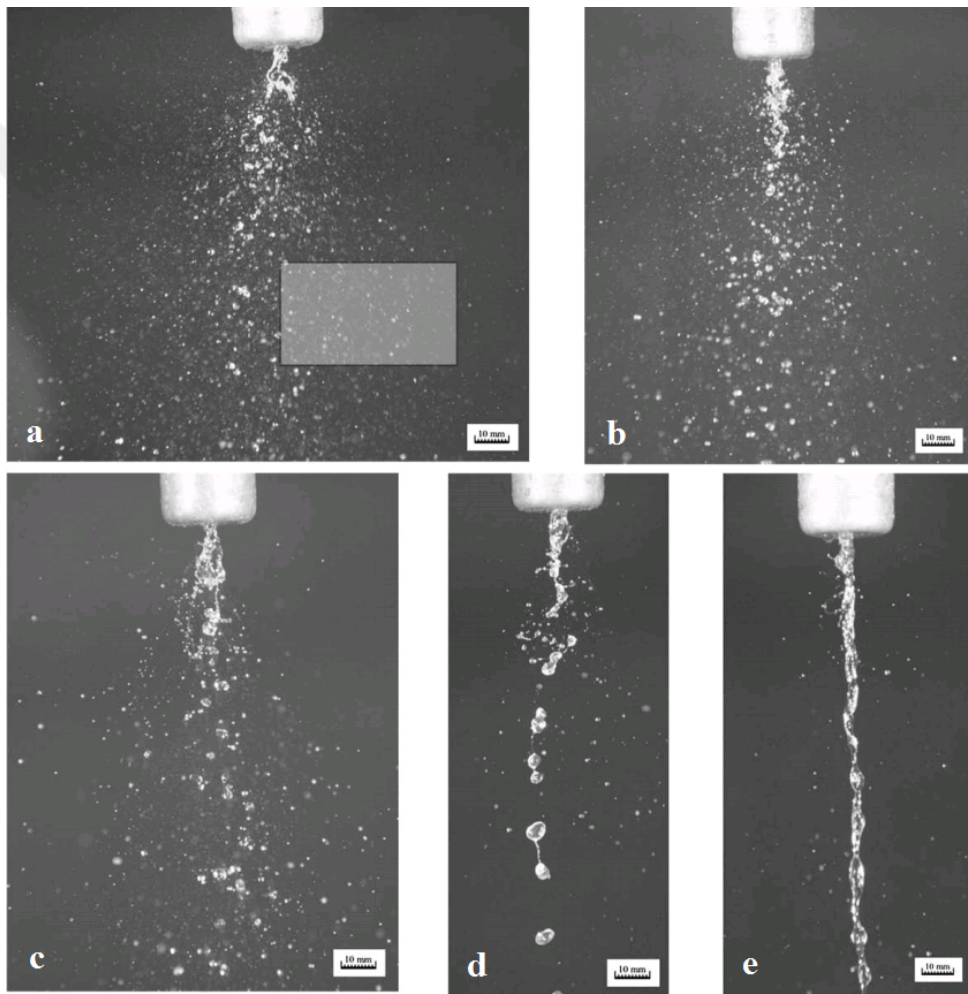
Şekil 2.6. Karakteristik akış rejimleri (Antipas, 2013).

Yan vd. (2011), $Al_{86}Ni_6Y_{4.5}Co_2La_{1.5}$ malzeme üzerinde yaptıkları gaz atomizasyon çalışmalarında azot gazının argona nazaran daha hızlı soğutma sağladığını göstermişlerdir (Şekil 2.7.). Şekil içerisine ilave edilen küçük SEM-BSE (Scanning Electron Microscope – Back Scattered Electron) resimleri toz çapı ile birlikte mikroyapısal gelişimi göstermektedir. Resimlerdeki tozların çapları sırasıyla 16 μm , 38 μm ve 50 μm 'dir. Düzenli ve sade görünümü, 16 μm boyutlu parçacığın tamamen amorf yapıda olduğuna işaret etmektedir. 38 μm boyutlu parçada önemli düzeyde kristalleşme görülürken, 50 μm ebatlı parçada büyük kristallerin mikroyapıya hâkim olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.7. Toz çapına göre soğuma hızının değişimi (Yan vd., 2011).

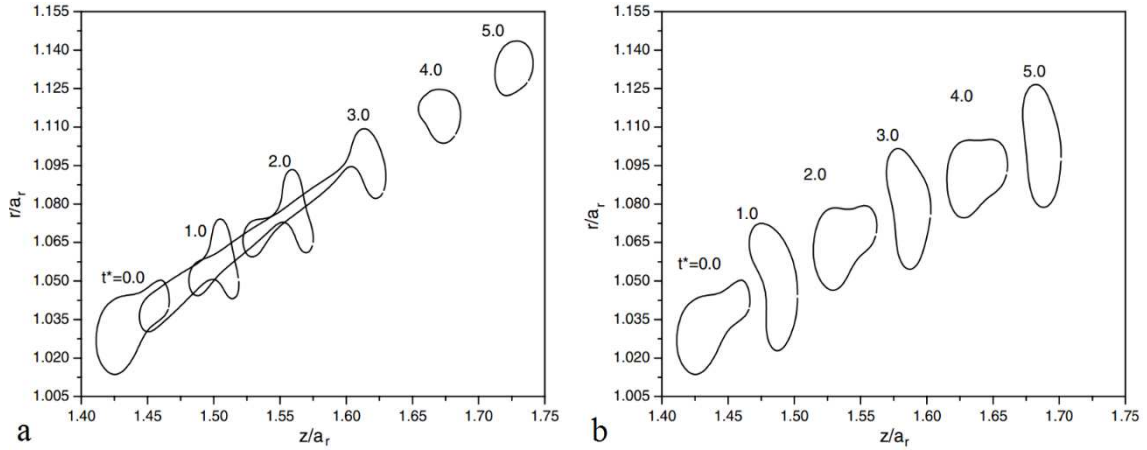
Press vd. (2010), yaptıkları çalışmalarında su ve polietilen oksidin (PEO) sulu çözeltilerini efervesan gaz atomizasyonu işlemine tabi tutarak deneysel sonuçlarını incelemiştir. Yapılan gözlemler, atomizasyon aşamalarının atomize edilen sıvının fiziksel özelliklerinden büyük oranda etkilendiğini göstermiştir. Farklı molekül ağırlığına (PEO-2 için 2×10^6 kg/kmol, PEO-4 için 4×10^6 kg/kmol, PEO-5 için 5×10^6 kg/kmol, PEO-8 için 8×10^6 kg/kmol) sahip sıvıların atomizasyon sırasında akış davranışlarını değiştirerek atomizasyonun gidişatını tamamen farklı bir modele taşıdığını gözlemlemiştir (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Atomizasyona ait gerçek görüntüler a) su, b) PEO-2, c) PEO-4, d) PEO-5, e) PEO-8 (Press vd., 2010).

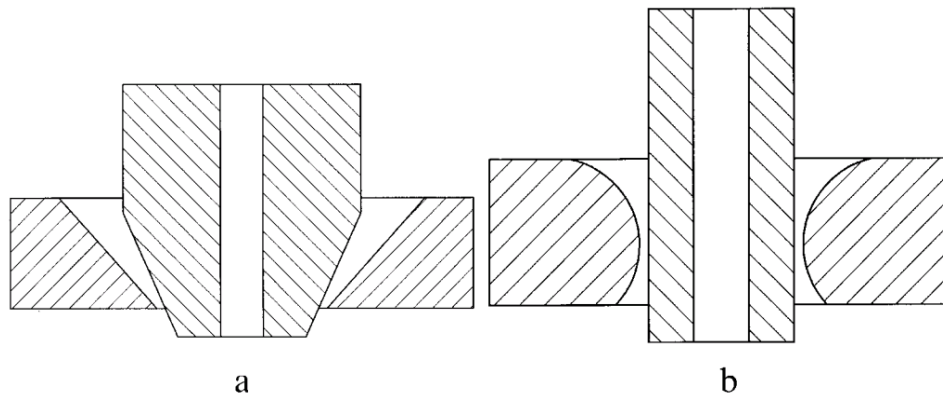
Park vd. (2005), yüksek hızlı sıvı jetinin atomizasyonu üzerinde yaptıkları çalışmalarında parçacık boyut dağılımı ve sprej oluşumu hakkında araştırma yapmışlardır. Çalışmalarında, Weber sayısının sıvı jeti parçalanması üzerinde önemli etkilere sahip olduğu ve Weber sayısının belli bir değerin altında olduğu durumlarda ikincil parçalanmaların gerçekleşmediği sonucuna

ulaşmışlardır. Bu nedenle parçalanmanın olup olmayacağını gösteren kritik bir Weber sayısı tanımlamışlardır. Bu değerin altında yüzey gerilimi atalet kuvvetlerinden daha baskın olmakta ve parçalanma gerçekleşmemektedir (Şekil 2.9.) (Park vd., 2005).



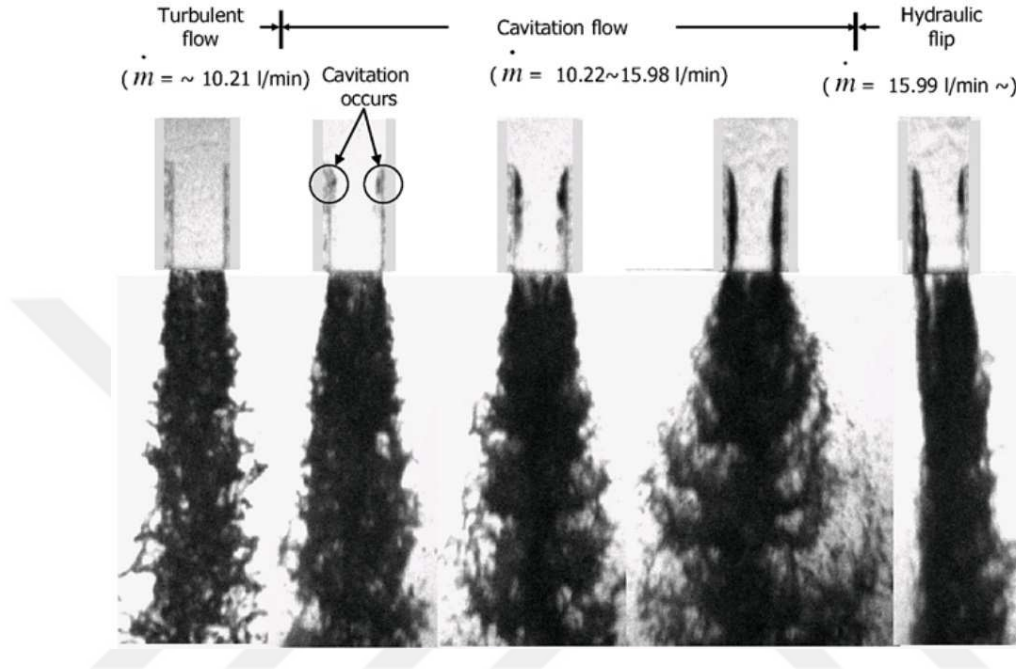
Şekil 2.9. Weber sayısının ikincil parçalanma üzerindeki etkisi a) $We=1503$, b) $We=30$ (Park vd., 2005).

Sıvı metalin aşırı ısıtılması birincil ve ikincil parçalanmalar üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Aşırı ısıtmanın birincil parçalanmalar üzerindeki etkisi lüle ucunda film oluşumunu etkilemesinden kaynaklanmakta iken ikincil parçalanmalar üzerindeki etkisi ise atomizasyon mekanizmalarına tesir etmesinden kaynaklanmaktadır (Ouyang vd., 2006). Ayrıca aşırı ısıtılmış ergiyik metal ile dış ortam arasında bulunan ara-yüzey daha da kararsız hâle gelmektedir. Bu kararsızlık hidrodinamik ve termal süreçler ile sıvı jeti geometrisi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Yao, 2013). Atomizasyonda ihtiyaç duyulan sesüstü gaz jeti üzerinde büyük bir etkisi olan parametre ise lülenin daralan-genişleyen karakterde olmasıdır (Şekil 2.10.).



Şekil 2.10. Lüle geometrileri a) sesaltı lüle geometrisi, b) sesüstü lüle geometrisi (Aksoy ve Ünal, 2006).

Suh ve Lee (2008), yaptıkları çalışmalarında lüle içindeki kavitasyonun atomizasyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini, ortalama parçacık boyutunu ve parçacık hızlarını incelemiştir (Şekil 2.11.).

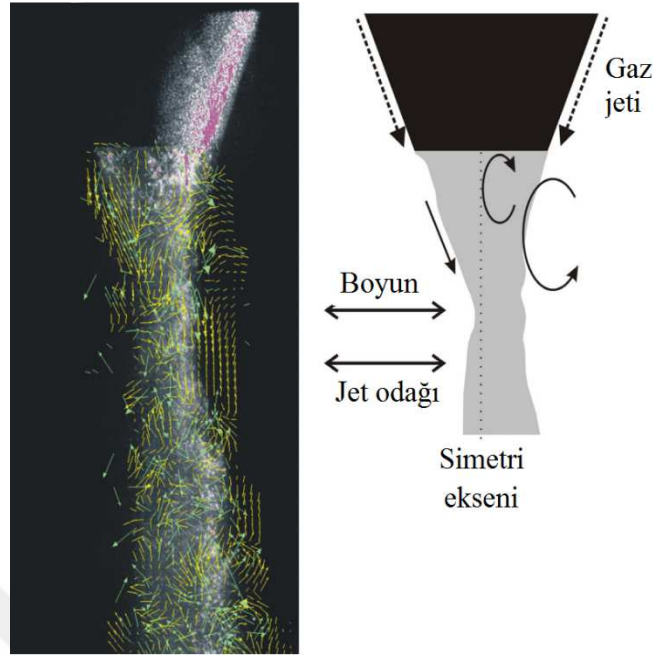


Şekil 2.11. Lüle akış karakteristikleri (lüle boyu/genişliği = 1,8) (Suh ve Lee, 2008).

2.3. Gaz Akış Modelleri

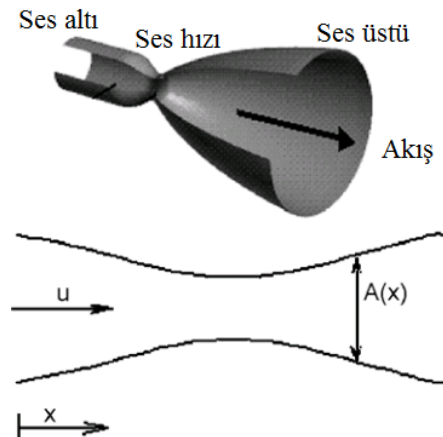
Gaz atomizasyonu işlemi sırasında gerçekleşen gaz akış olayları, günümüzde olduğu gibi geçmişte de etraflıca araştırılmış konular arasındadır. Yapılan araştırmalar neticesinde, konu, belli temeller üzerine oturtulmuştur. Gaz akış modellerinin net bir şekilde izah edilme gereksinimi, konu üzerinde çalışan araştırmacıları, akış olayını basite indirgeme yoluna sevk etmiştir. Doğal olarak üç boyutlu bir ortamda cereyan eden gaz akışları, genellikle iki boyutlu ve eksene göre simetrik sistemlerde açıklanmaya çalışılmıştır. 1996 yılında HPGA adı verilen yüksek basınçlı gaz atomizasyonu konusunda deneysel ve teorik çalışmalar yapmış olan Mi, 3 boyutlu modelin, iki boyutlu ve eksene göre simetrik model ile uygunluğunu göstermiştir (Mi, 1996).

Mullis vd. (2011), yakından eşlemeli lüle düzeneği ile yaptıkları çalışmalarında gerçek atomizasyon görüntüleri üzerinde PIV (Particle Image Velocimetry) yöntemi ile gaz akış vektörlerini hesaplamışlardır. Gaz jeti odak noktası değişimlerini ve boyun oluşumunu göstermişlerdir (Şekil 2.12.).



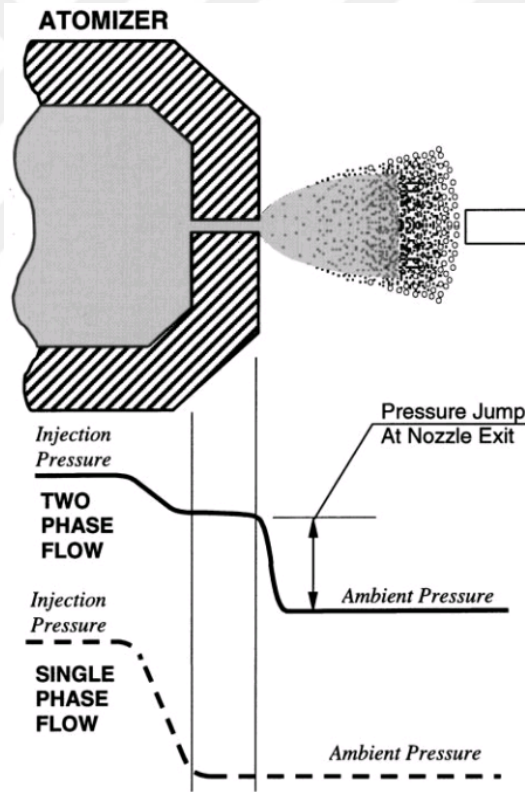
Şekil 2.12. PIV tekniği ile hesaplanan gaz akış vektörleri (Mullis vd., 2011).

Bir kanal içindeki akışkanın hızı kanal kesit alanı daraldıkça artar. Ancak bu artış akışkan hızının ses altı hızda olduğu durumlarda geçerlidir. Akış sesüstü hâle geldiğinde, kesit alanı ile hız ilişkisi tersine çevrilir. Sesüstü hıza ulaşan akışkan hızının daha fazla artırılması için artık kanal kesit alanının daraltılması yerine genişletilmesi gerekecektir. Atomizasyon işleminde gerekli olan sesüstü bir akışı daha da hızlandırmak için yakınsak-ıraksak bir lüleye ihtiyaç duyulacaktır. Bu şekilde daralan-genişleyen lüleler Laval tipi lüle (Şekil 2.13.) olarak adlandırılırlar (Hede vd., 2008).



Şekil 2.13. Daralan-genişleyen (Laval-tipi) atomizasyon lülesi (Hede vd., 2008).

Sovani vd. (2001), efervesan atomizasyon üniteleri üzerine yaptıkları çalışmalarında efervesan atomizörler kullanıldığında geleneksel atomizörlere göre düşük basınçlarda daha ince toz elde edilebildiğini tespit etmişlerdir. Geleneksel atomizörlerde ihtiyaç duyulan yüksek gaz/metal debi oranının efervesan atomizörde daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Efervesan atomizörlerin 1980'li yıllarda ilk kez denendiğini, performansı ortaya koyan bir modelin hâlihazırda mevcut olmadığını ve daha fazla çalışma yapılarak gelişim sağlanması gerektiğini ifade etmişlerdir. Tek-fazlı ve iki-fazlı atomizasyon karşılaştırıldığında iki-fazlı atomizasyonda lüle çıkışından hemen sonra daha büyük oranda basınç düşüşü olduğu gösterilmiştir (Şekil 2.14.). Lüle çıkışındaki ani basınç düşüşü ile atomizasyon kalitesi büyük ölçüde arttığından, düşük akış hızlarında ve düşük enjeksiyon basınçlarında bile iki-fazlı akışlarla daha iyi bir atomizasyon elde etmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir.

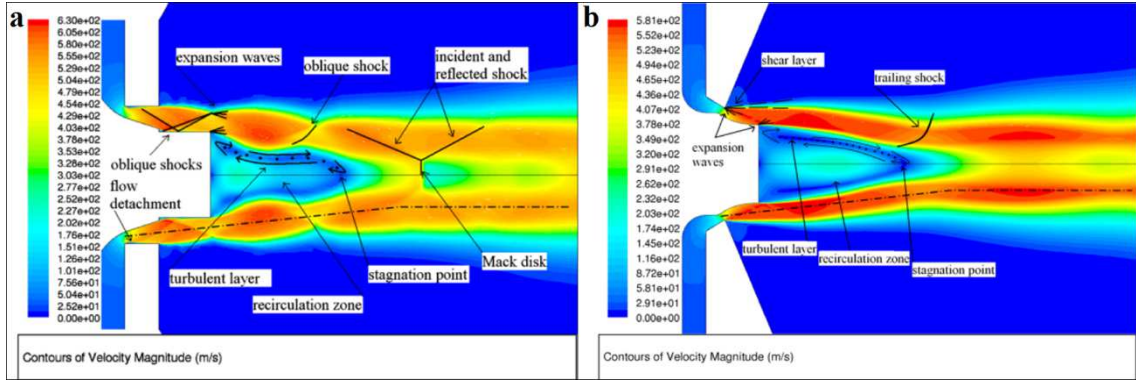


Şekil 2.14. İki-fazlı akışlardaki lüle çıkışında ani basınç düşüşü (Sovani vd., 2001).

2.3.1. Şok dalgası oluşumu

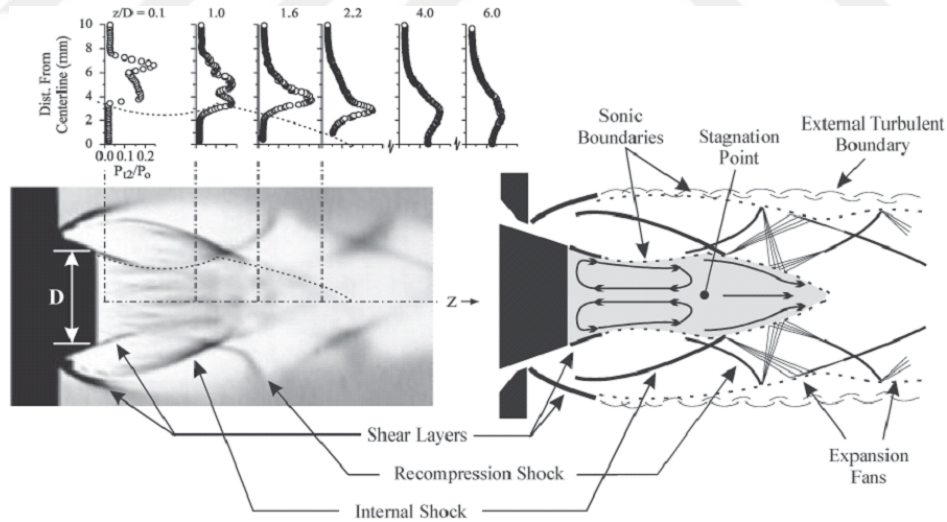
Zeoli ve Gu (2008), gaz atomizasyonu için geliştirdikleri farklı lüle tasarımları ile atomizasyon sırasındaki şok dalgası oluşumunu azaltarak atomizasyon gazlarının enerji kaybını

en alt seviyede tutup ergiyik metale kinetik enerji transferini en üst düzeye yükseltmeye yönelik bir çalışma yapmışlardır (Şekil 2.15.).



Şekil 2.15. Gaz akış alanı a) dairesel yarıklı lüle b) “isentropic plug” lüle (Zeoli ve Gu, 2008).

Mates ve Settles (2005), yakından eşlemeli düzenek kullanarak sıvı metal atomizasyonu sırasında meydana gelen gaz dinamikleri üzerine bir çalışma yapmışlar, gaz dinamiklerini Schlieren görüntüleme yöntemi ile göstermişlerdir (Şekil 2.16.).



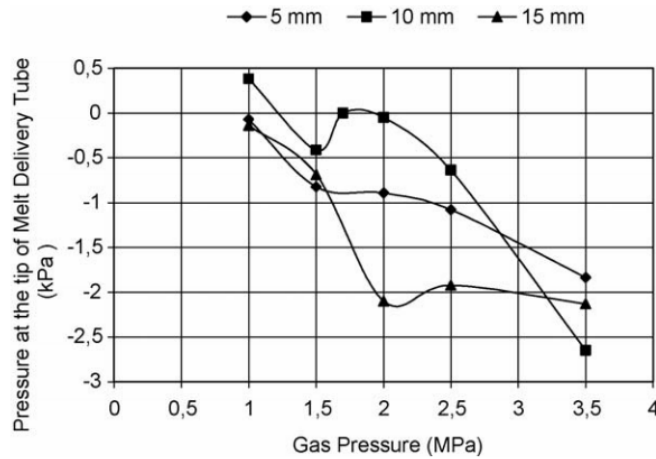
Şekil 2.16. Lüle ucu bölgesindeki akış alanına ait gaz dinamiklerinin Schlieren yöntemi ile görüntülenmesi (Mates ve Settles, 2005).

2.3.2. Negatif basınç gradyanı

Gaz atomizasyonunun kesintiye uğramadan sürekli bir biçimde gerçekleşebilme kabiliyeti, sıvı metal çıkış borusu ucunda sürekli bir negatif basınç bölgesinin mevcudiyeti ile sağlanabilir (Xu, 2000). Yakından eşlemeli lüle sistemlerinde atomizasyon gazının lüle

çıkışındaki etkisiyle negatif ya da pozitif basınç oluşabilir (Wagner vd., 2010). Bununla birlikte, sıvı metal akış miktarına katkı sağlayacak şekilde emme oluşumu yakından eşlemeli lüle geometrilerinde oluşturulabilir (Srivastava ve Ojha, 2006). Lüle ucu basıncı, lüle çıkış açısı (apeks açısı) artırıldığında ve dar boğaz boşluğu azaltıldığında artmaktadır (Sofuoğlu vd., 2013). Bununla beraber lüle açısının artması negatif basınç bölgesini küçültücü bir etkiye sahiptir (Motamam vd., 2013). Lüle dış duvar yüzeyinde meydana gelen akış ayrılmaları, lüle ucunda negatif basınç gradyanları oluşmasının başlıca nedenidir. Bu negatif basınç gradyanı, ergimiş metali lüle ekseninden dışa doğru çeker. Ergimiş metal burada hızla genişleyen ve sıcaklığı azalmış olan atomizasyon gazlarına maruz kalarak katılaşmaya başlayabilir. Lüle ucunda katılaşmalar lüle geometrisinin değişmesine neden olur ve bu nedenle istenmezler (Motamam vd., 2012).

Negatif basınç gradyanının gaz akış hızını azaltıcı bir etkisi mevcuttur (Zhao vd., 2009). Akış ayrılması noktası lüle ucuna yaklaştıkça, akış ayrılması noktasında daha büyük gaz hızları ve daha düşük negatif basınç elde edilir (Schwenck, 2016). Bu durumda ergitilmiş metal daha güçlü bir şekilde dışarıya çekilir. Ünal, kalay tozu üretimi için gaz atomizasyonu işleminde sıvı metal akış borusu çıkıntı mesafesinin lüle uç basıncına ve gaz/metal akış oranına etkisi üzerine bir çalışma yapmıştır. Ünal'ın tespit ettiği farklı çıkıntı mesafeleri için basınç değişimi grafiği Şekil 2.17'de verilmiştir (Ünal, 2006).



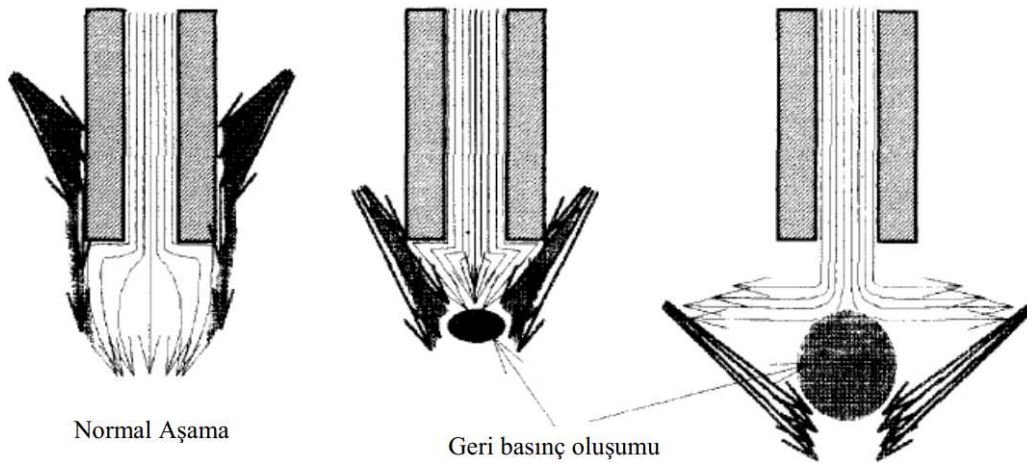
Şekil 2.17. Tek-fazlı akışta gaz basıncının farklı çıkıntı mesafelerinde sıvı metal besleme borusunun ucundaki basınç oluşumuna etkisi (Ünal, 2006).

2.3.3. Geri basınç gradyanı

Durgunluk bölgesi basıncının artması, özellikle ikincil parçalanma üzerindeki etkiler nedeniyle ortalama parçacık boyutunun azalmasına sebep olmaktadır (Mates ve Settles, 2005).

Geri basınç oluşumu ise toz parçacıklarının yolunu etkileyen önemli bir faktördür. Atomizasyon sırasında üretilen parçacıklar, yüksek geri basınç nedeniyle lüle ucuna yakın bir bölgeye hapsolabilirler (Bhatt, 2010). 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 (Ünal ve Aydın, 2008).

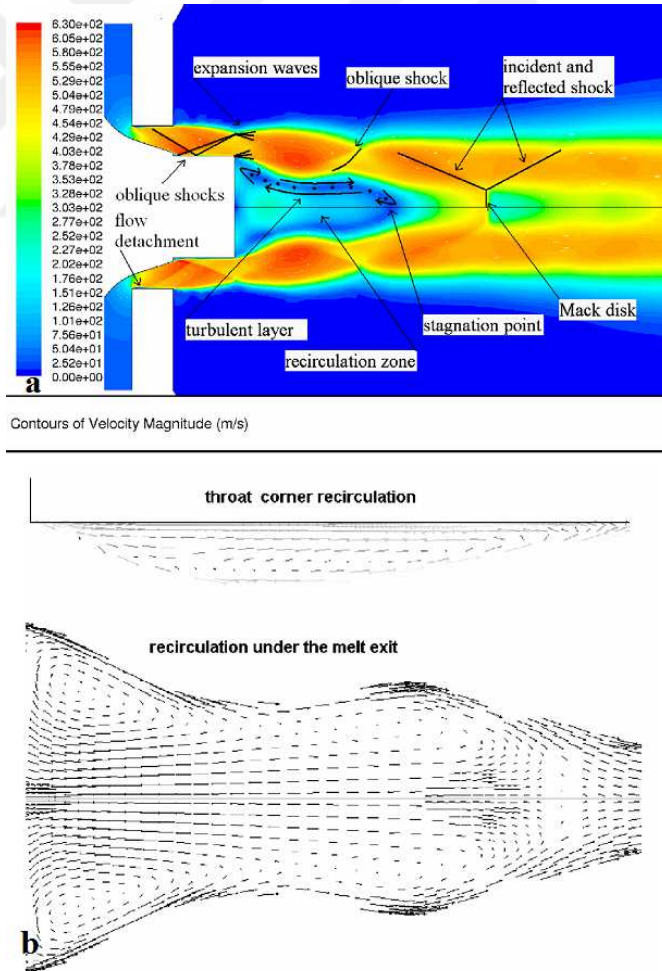
Chen vd. (1998), yaptıkları araştırmalarda metal akış borusu çıkıntı mesafesinin değişmesi ile birlikte atomizasyon işleminde 3 farklı aşamanın gerçekleşebileceğini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.18.). Metal akış borusunun lüle gaz çıkışının alt bölgelerine yerleştirilmesi sonucu gaz öncelikle metal akış borusu 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, lüle 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 (Güleşen, 2013).



Şekil 2.18. Geri basınç oluşumunun şematik gösterimi (Chen vd., 1998).

Zeoli ve Gu yaptıkları çalışmalarında gaz atomizasyonu işleminde parçacık oluşumunu sayısal olarak modellemişler, atomizasyon gazının genişleme mekanizmalarını ve gaz geri

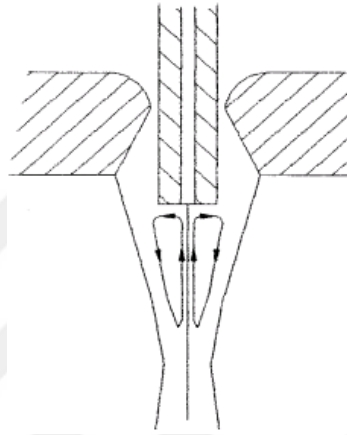
dönüşüm bölgesinde oluşan akış olaylarını göstermişlerdir. Şekil 2.19a’da lüle ucunda oluşan akış alanı genel olarak gösterilmiştir. Lüle boğazından itibaren şok dalgaları, gaz genişleme bölgeleri, gaz geri dönüşüm bölgesi ve Mach diski oluşumları gösterilmiştir. Yüksek basınç altındaki atomizasyon gazlarının akışı sırasında boğaz sonrasında oluşan akış ayrılmalarının boğazdaki keskin dönemeçten kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Boğaz bölgesinde şok dalgası oluşumunu tespit etmişler ve bu şok dalgasının metal besleme borusundan yansıdığını göstermişlerdir. Atomizasyon odası boyunca peş peşe tekrar eden şok dalgalarını göstermişlerdir. Oluşan şok dalgalarının, yüksek basınçlı gazların basınç değerlerini atomizasyon odası basınç değerine kadar kademeli olarak düşürmede önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.19b’de gaz geri dönüşüm bölgesindeki akış hareketleri vektörel şekilde görülmektedir. Gaz geri dönüşüm bölgesi merkezindeki akış hareketinin lüleye doğru olduğunu ve lüle ucunda radyal olarak dışarıya yönlendiğini göstermişlerdir (Zeoli ve Gu, 2006).



Şekil 2.19. Tek-fazlı akışta gaz akış alanı a) hız dağılım grafiği, b) akış dolaşımını gösteren hız vektörleri (Zeoli ve Gu, 2006).

2.4. Geçiş Bölgesinin Gaz Atomizasyonuna Etkisi

Laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş birdenbire gerçekleşmez. Geçiş bölgesi olarak adlandırılan bir akış rejimi oluşur. Geçiş bölgesindeki sıvı sütunu parçalanma boyu, gaz jetinin hızı arttıkça azalır (Annapragada, 2004). Metal akış borusu ucunda oluşan girdap akımları sıvı metali yüksek kinetik enerjiye sahip gaz bölgesine doğru taşıyarak atomizasyonun verimli bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olur (Xu vd., 2002).



Şekil 2.20. Metal akış borusu çıkış ucunda oluşan girdap akımlarının şematik diyagramı (Yu vd., 2004).

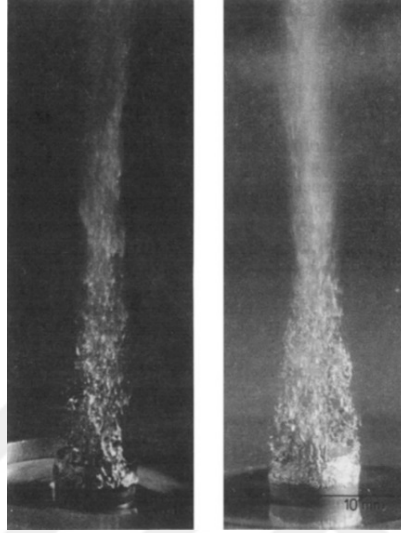
2.5. Atomizasyon Mekanizmaları

Atomize edilmek istenen saf metal ve alaşımların kinetik enerji transferi ile parçacıklara ayrılabilmesi için öncelikle ergiyik hâle getirilmeleri gerekir. Ergiyik hâldeki akışkan metale yüksek hızlı gaz jetleri ile aktarılan enerji sayesinde gerçekleşen çeşitli parçalanma mekanizmaları sonucu istenilen boyutta parçacıklar elde edilir. Oluşan parçacıklar parçalanma devam ederken veya parçalanma sonrasında serbest düşüş sırasında katılaşırlar. Serbest düşme esnasında katılaştıran parçacıklar ikincil parçalanmalara maruz kalarak daha küçük boyutlu olabilmektedirler (Pawlowski, 2008: 6).

Bhatt, yaptığı çalışmada sıvı jeti atomizasyonunda parçalanma olaylarını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada atomizasyon sırasındaki farklı Weber sayısı değerlerine bağlı olarak farklı parçalanma mekanizmalarının etkili olduğunu ifade etmiştir (Bhatt, 2010).

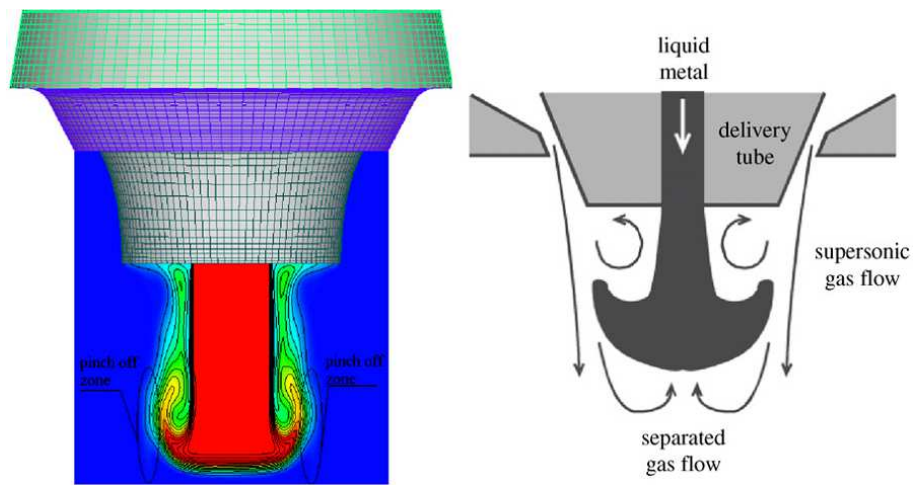
Ünal, yaptığı çalışmada gaz atomizasyonu ile alüminyum tozu üretiminde parçalanma olaylarını farklı lüle tasarımları üzerinde incelemiştir (Şekil 2.21.). Kaba ve ince taneli parçacıkların farklı parçalanma mekanizmaları ile meydana geldiklerini ifade etmiştir. İnce

taneciklerin oluşumunda etkili olan ikincil parçalanmaların sıyrılma parçalanması ve titreşim nedeniyle oluşabildiklerini söylemiştir (Ünal, 1989).



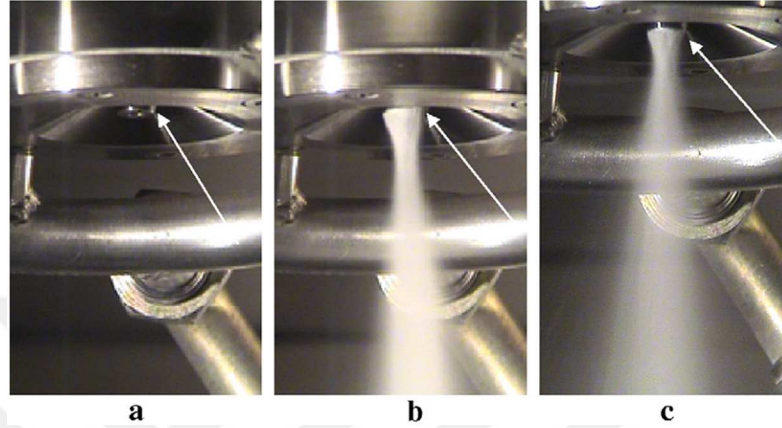
Şekil 2.21. Farklı iki tip lülede atomizasyon (Ünal, 1989).

Zeoli vd., yaptıkları çalışmalarda farklı lüle düzeneklerinin atomizasyon oluşumuna etkilerini sayısal çözümleme ile incelemişlerdir. Çalışmalarında akışkan hacmi yaklaşımını kullanmışlar, iki-fazlı ve üç boyutlu modelleme ile sıvı fazın başlangıç hareketlerini incelemişler, bazı atomizasyon parametrelerinin sıvı faza etkilerini sorgulamışlardır. Üç farklı lüle geometrisi üzerinde verimli olan lüle tipini belirlemeye çalışmışlardır (Şekil 2.22.) (Zeoli vd., 2011).



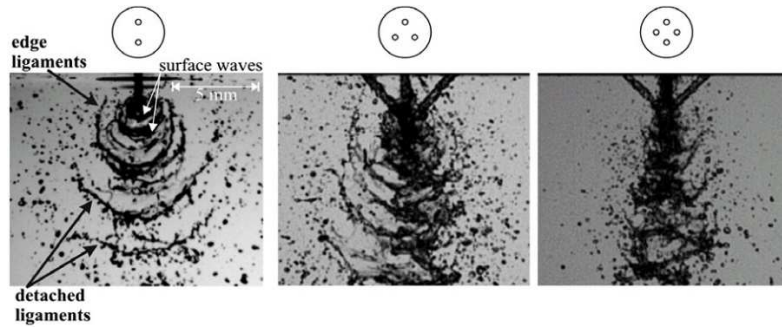
Şekil 2.22. Atomizasyon gazı ile ergiyik metal etkileşimi (Zeoli vd., 2011).

Aydın ve Ünal, yaptıkları çalışmalarında gaz atomizasyonu işleminde gaz akışlarını sayısal çözümleme ve deneysel yöntemlerle araştırmışlar, akış ayrılması oluşumunun sıvı faz ve atomizasyon üzerinde etkilerini göstermişlerdir (Şekil 2.23.) (Aydın ve Ünal, 2011).



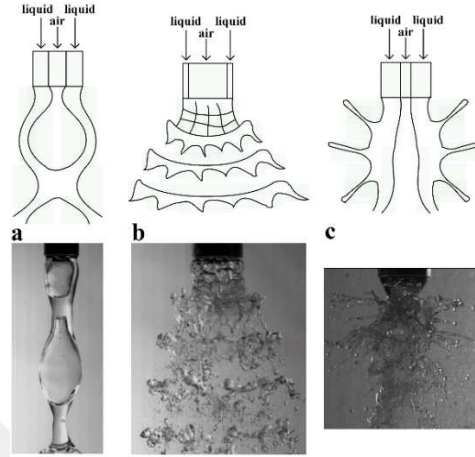
Şekil 2.23. Kalay atomizasyonunda akış ayrılmasının oluşumu a) atomizasyondan önce, b) atomizasyon sırasında akış ayrılması (2,2 MPa gaz basıncında), c) atomizasyon sırasında (akış ayrılması olmadan) (Aydın ve Ünal, 2011).

Panao ve Radu (2013), ileri istatistiksel araçları kullanarak yaptıkları çalışmalarında parçacık boyut dağılımlarını inceleyerek atomizasyon işlemini fiziksel olarak yorumlamaya çalışmışlardır. İstatistiksel analizlerin atomizasyon işleminin karakterizasyonu için önemli olduğunu vurgulamışlar, tanecik oluşumunu sağlayan mekanizmaların birden fazla olması durumunda boyut dağılım eğrisinde de birden fazla tepe noktası olacağını söylemişlerdir. Bununla birlikte birden fazla mod oluşumunun ölçüm hatalarından kaynaklanmış olabileceğini de düşünmüş olmalarına rağmen bunun üzerinde durmamışlardır. Bunun yerine birden fazla mod oluşumunun parçalanmanın doğasından kaynaklanabileceğini değerlendirerek çalışmalarını sürdürmüşlerdir (Şekil 2.24.) (Panao ve Radu, 2013).



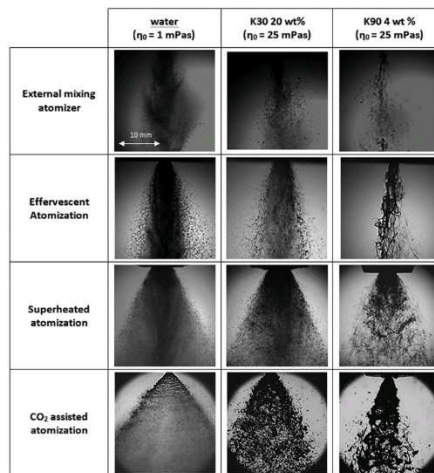
Şekil 2.24. Atomizasyonun yan profilden görünümü (spreyi oluşturan jetlerin üstten görünüşü ile birlikte) (Panao ve Radu, 2013).

Zhao vd., yaptıkları çalışmalarında dairesel sıvı levha parçalanmasını incelemişler ve parçalanmanın üç farklı rejimde olduğunu öne sürmüşlerdir. Şekil 2.25'te bu üç rejim görülmektedir (Zhao vd., 2015).



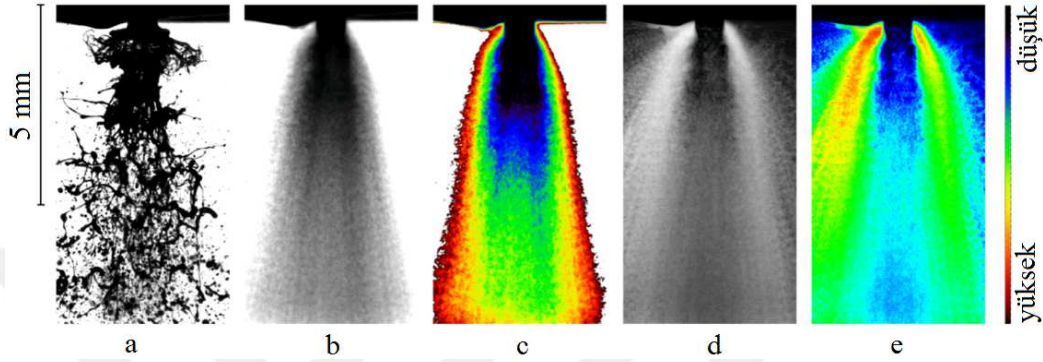
Şekil 2.25. Farklı rejimlerin şekli gösteren basit şematik diyagramlar a) kabarcık parçalanması (kabuk parçalanması), b) çam ağacı parçalanması (hüresel parçalanma), c) lif parçalanması (Zhao vd., 2015).

Günther vd., yaptıkları çalışmalarında gaz destekli atomizasyon sistemlerinde sıvı parçalanması olayını dört farklı atomizör kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarında 3 farklı sıvının sprey morfolojisini incelemişlerdir. Kullanılan atomizörden bağımsız olarak en iyi parçalanmanın üç farklı sıvı arasında en düşük viskoziteye sahip olan su ile elde edildiğini görmüşlerdir. Karbondioksit gazının dondurucu etkisi nedeniyle karbondioksit kullandıkları deneylerde önemli derecede iri taneler elde etmişlerdir (Şekil 2.26.) (Günther vd., 2016).



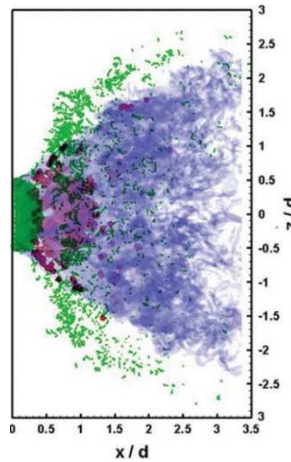
Şekil 2.26. Sprey morfolojisi (Günther vd., 2016).

Zaremba vd., yaptıkları çalışmalarında sıvı parçalanması sırasında sıvı fazın dalgalanmaları ve kararsızlıkların değerlendirilmesi için, piksel yoğunluklarının standart sapmalarını bilgisayar yardımıyla hesaplayarak atomizasyona dair çeşitli görüntüler elde edebilmişlerdir (Şekil 2.27.) (Zaremba vd., 2017).



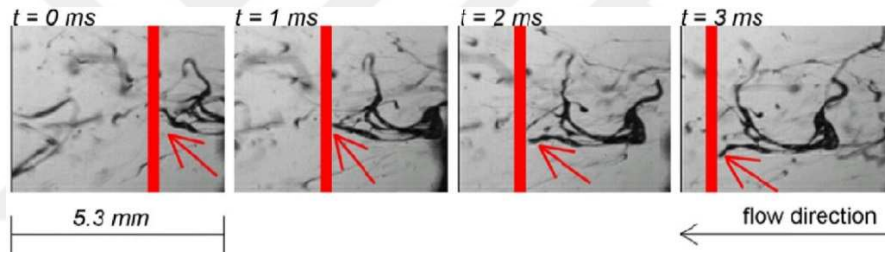
Şekil 2.27. Atomizasyon görüntüleri a) anlık görüntü, b) ortalama görüntü, c) ortalama görüntüde renk ölçeklendirmesi, d) piksel yoğunluğu standart sapma hesabı ile elde edilen görüntü, e) renk ölçeklendirmeli görüntü (Zaremba vd., 2017).

Gui vd., girdaplı jet akımında sıvı parçacıkların taşınım simülasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Değişen girdap şiddetine göre parçacık hızlarının sayısal değerlerini ortaya koyabilmek için bir olasılık fonksiyonundan yararlanmışlardır. Çalışmalarında 1 mm çaplı akışkan demetini farklı bölgelere ayırmışlar ve her bir bölgede oluşan tanecikleri farklı renklerle göstererek parçacık takibini gerçekleştirmişlerdir. Parçacıkların hareket güzargâhının Reynolds sayısından ziyade girdap şiddetine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir (Şekil 2.28.) (Gui vd., 2014).



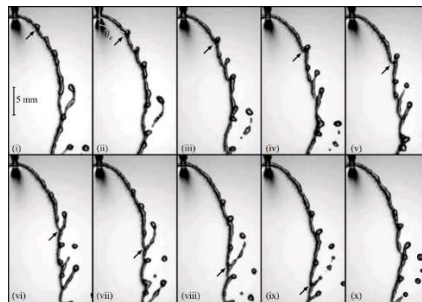
Şekil 2.28. Akışkan parçacıklarının konumları (Gui vd., 2014).

Gavory vd., sprey oluşumu üzerine yayınladıkları çalışmalarında basınç artışının ergimiş sıvının parçalanmasına yardımcı olacak şekilde enerji artışına sebep olduğunu kanıtlayan birçok çalışma yapıldığından bahsetmişlerdir (Gavory vd., 2014). Ünal, atomizasyon gaz basıncı artışının, gaz debisi artışının ve gaz/metal kütleli debi oranı artışının ortalama toz boyutunu küçülttüğünü tespit etmiştir. Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi üzerine yaptığı çalışmasında en küçük ortalama toz boyutu olarak $40 \mu\text{m}$ boyutlu toz elde etmiş, üretilen tozların log-normal dağılım gösterdiği ve iki modlu olduğunu görmüştür. Ortalama toz boyutu küçüldükçe log-normal dağılıma daha fazla yaklaşma olduğunu tespit etmiştir (Ünal, 1995). Milkvik vd. (2015), farklı atomizasyon ünitesi tasarımlarının iki akışkanlı atomizasyondaki parçalanma işlemlerine, püskürtme kararlılığına ve parçacık boyutuna etkilerini incelemiştir. Şekil 2.29’da gösterilen boyutları ve gaz akış hızı bilinen bir bölgeden geçmekte olan parçacıkların hareketini takip ederek parçacık hızlarını belirlemiştir.



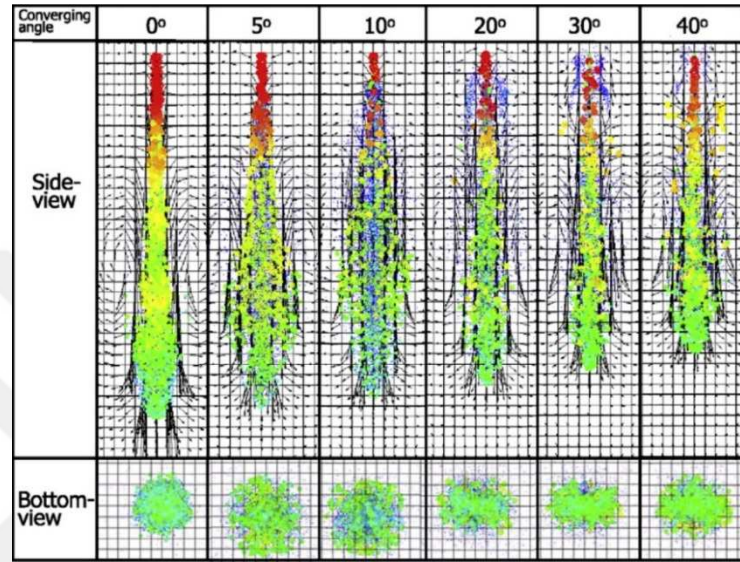
Şekil 2.29. Çubuk ve tanecik takibi (Milkvik vd., 2015).

Bremond ve Villermaux (2006), 1,05 mm çapındaki iki eş silindirik sıvı jetinin birbirleriyle çarpışarak havada parçalanmasını inceleyen bir araştırma yapmışlardır. Sıvı jetlerinin çarpışmasından sonra meydana gelen kollardaki kararsızlık oluşumlarını, çubuk oluşumlarını ve uzamaları incelemiştir. Şekil 2.30’da verilen sıvı jetleri 3,5 m/s hıza sahipken 72 derece açı ile havada çarpışmaktadırlar.



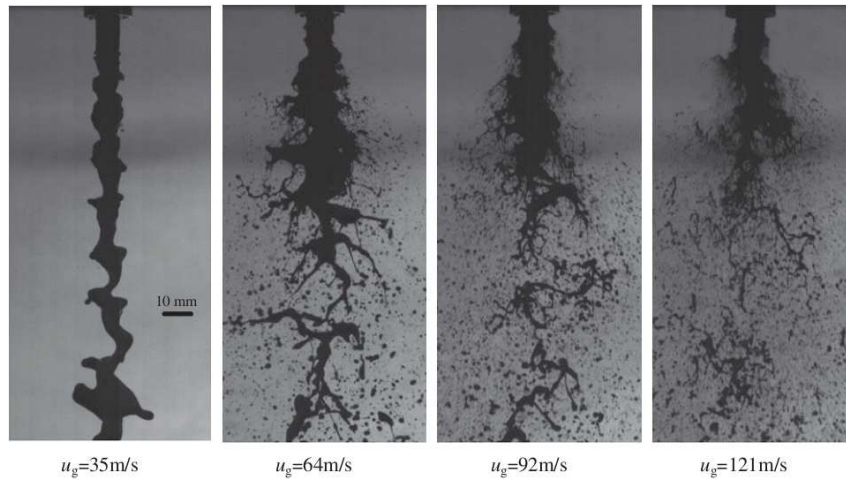
Şekil 2.30. Kol ayrılması, çubuk oluşumu ve uzaması, parçacık oluşumu (Bremond ve Villermaux, 2006).

Park ve Reitz, farklı açılarda çıkış kanalları bulunan lüle düzenekleriyle yaptıkları çalışmalarında delikler arası açı farkının akış oluşumuna etkisini araştırmışlardır. Şekil 2.31’de görüldüğü gibi artan açı değeri ile püskürtme boyunun azaldığını ve akış kesitinin elips şekline dönüştüğünü göstermişlerdir (Park ve Reitz, 2009).



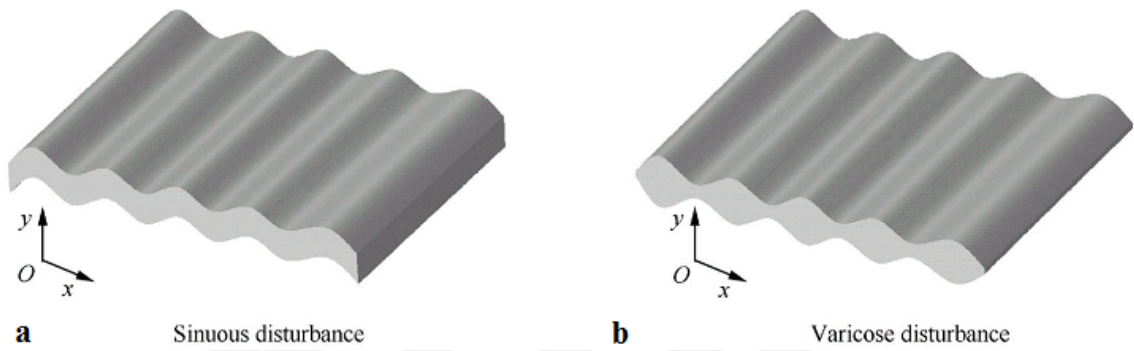
Şekil 2.31. Çıkış kanalı açısının akış gelişimine etkisi (Park ve Reitz, 2009).

Zhao vd., yaptıkları çalışmalarında içinden hava jeti geçen dairesel kesitli sıvı akış lülesindeki gaz hızının atomizasyon oluşumuna etkilerini araştırmışlardır. Artan gaz hızıyla birlikte atomizasyon oluşumunun geliştiğini göstermişlerdir (Şekil 2.32.) (H. Zhao vd., 2012).



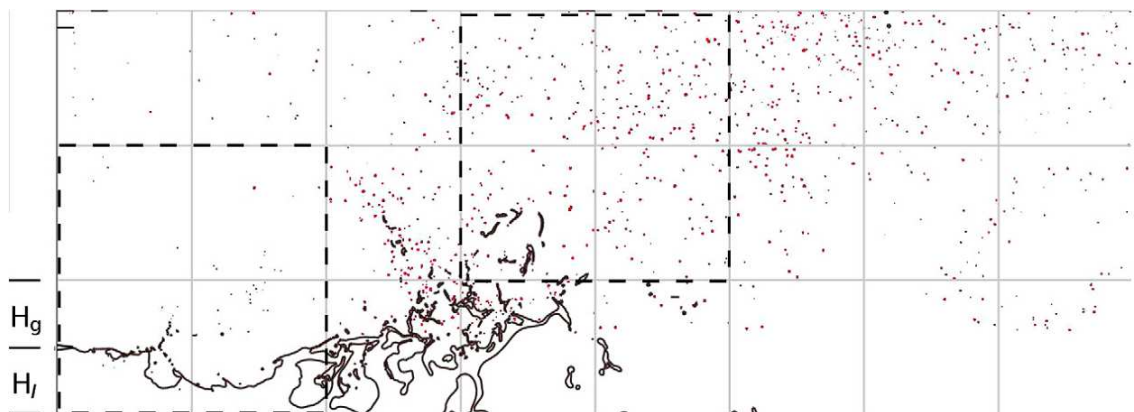
Şekil 2.32. Farklı hızlardaki atomizasyon görüntüleri (H. Zhao vd., 2012).

Lujia vd. (2015), yaptıkları çalışmalarında bir elektrik alanı içinde sıvı jetinin atomizasyon mekanizmalarını incelemişler, atomizasyon öncesi sıvı tabakalarında iki farklı kararsızlık oluşumunu önermişlerdir (Şekil 2.33.). Buna göre sıvı tabakasının iki tarafındaki gaz etkileşimlerinin uyum içerisinde olduğu durumlarda sinüsoidal (kıvrımlı) bir bozulma oluştuğunu, sıvı tabakasının iki tarafındaki gaz etkileşimlerinin birbirlerine tam olarak zıt yönlü bir şekilde etki ettiklerinde ise varisli bozulma oluştuğunu ifade etmişlerdir.



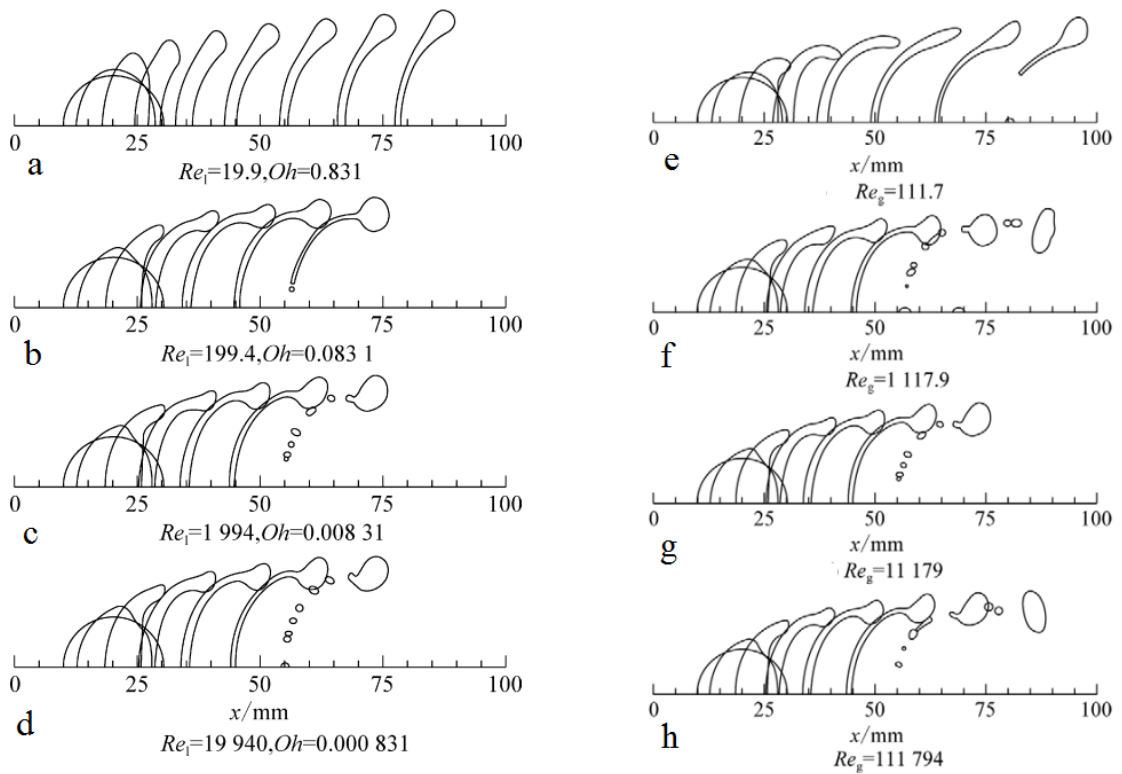
Şekil 2.33. Sıvı jeti üzerinde iki farklı kararsızlık oluşumu a) sinüsoidal (kıvrımlı) bozulma, b) varisli bozulma (Lujia vd., 2015).

Tomar vd. (2010), yaptıkları çalışmalarında sıvı jetinde eş eksensli ve yüksek hızlı gaz jeti ile meydana gelen birincil atomizasyon oluşumunu HAD yönteminin akışkan hacmi yaklaşımıyla çözümlenmeye çalışmışlar ve parçacık boyutları için bir olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanmışlardır. Şekil 2.34'de kesikli çizgilerle gösterilen iki kare, olasılık yoğunluk fonksiyonunun uygulandığı bölgeleri göstermektedir. İki olasılık yoğunluk fonksiyonundan, küçük ebatlı parçacıkların büyük sıvı tabakaları ile çarpışıp birleşerek, boyut dağılımının büyük parçacıklar lehine değiştiğini ortaya koymuşlardır.



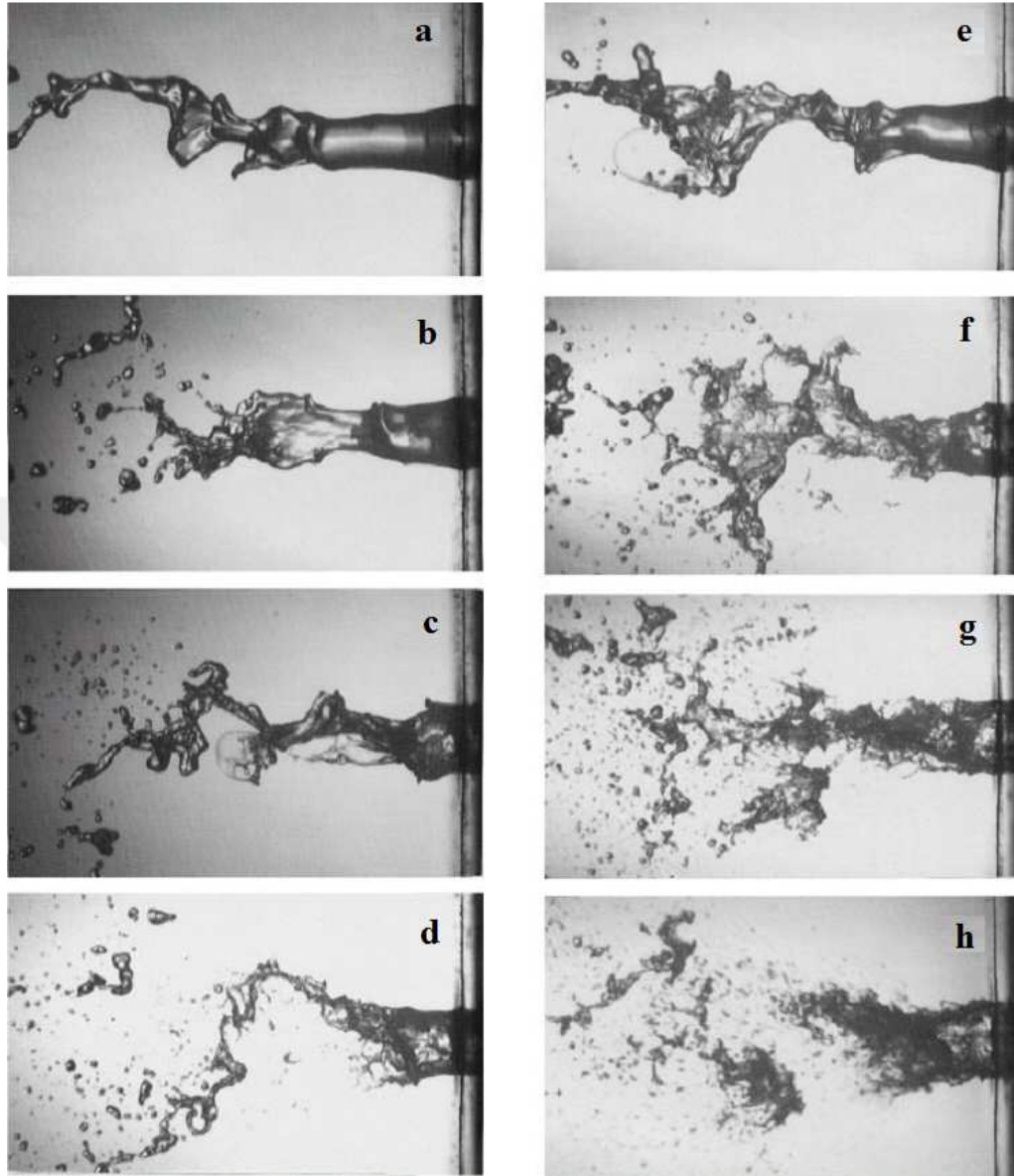
Şekil 2.34. Sıvı jetinin yüksek hızlı ve eş eksensel gaz jeti ile parçalanması (Tomar vd., 2010).

Jing ve Xu (2010), sıvı parçacıkların ikincil parçalanmalarını nümerik çözümleme yöntemleriyle araştırmışlardır. Sıvı ve ortam gazına ait Reynolds ve Ohnesorge sayıları değişiminin ikincil parçalanma üzerindeki etkilerini göstermeye çalışmışlardır. Bunun için aynı hesaplama zamanı içerisinde gerçekleştirdikleri modellemelerde Şekil 2.35'te görüldüğü gibi her defasında Reynolds sayısını 10 katına çıkartırken, viskoziteyi 10'da 1 oranında azaltarak parçalanma olayını gözlemlemiştirler. Reynolds sayısının büyük değerlerde olmasının parçalanma üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olmadığını ifade etmişlerdir.



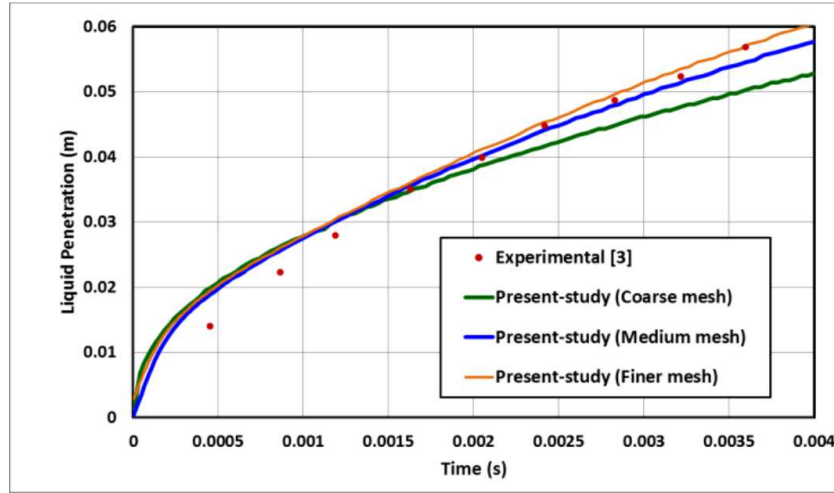
Şekil 2.35. Farklı Reynolds ve Ohnesorge sayılarının parçalanma üzerindeki etkileri a) $Re = 19,9$; $Oh = 0,831$; b) $Re = 199,4$; $Oh = 0,0831$; c) $Re = 1994$; $Oh = 0,00831$; d) $Re = 19940$; $Oh = 0,000831$; e) $Re = 111,7$; f) $Re = 1117,9$; g) $Re = 11179$; h) $Re = 111794$ (Jing ve Xu, 2010).

Lasheras vd., yaptığı çalışmasında dairesel kesitli sıvı jetinin yüksek hızlı dairesel gaz jetiyle atomizasyonunu gerçekleştirerek, atomizasyon sırasındaki parçalanma olaylarını araştırmışlardır. Gaz jetinin artan hızıyla birlikte Mach sayısı, Reynolds sayısı ve Weber sayısı değerlerini ve atomizasyon oluşumlarını incelemiştirler. Şekil 2.36a, b, ve c'de yüzey geriliminin parçalanma üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu, Şekil 2.36d'de çubuk şeklinde oluşumların baş gösterdiğini ve bunların Rayleigh tipi parçalanma mekanizmalarına maruz kaldığını, gaz hızının yüksek değerlerde olduğu Şekil 2.36e, f, g ve h'de benzer parçalanma oluşumlarının gözlemlendiğini ifade etmişlerdir (Lasheras vd., 1997).



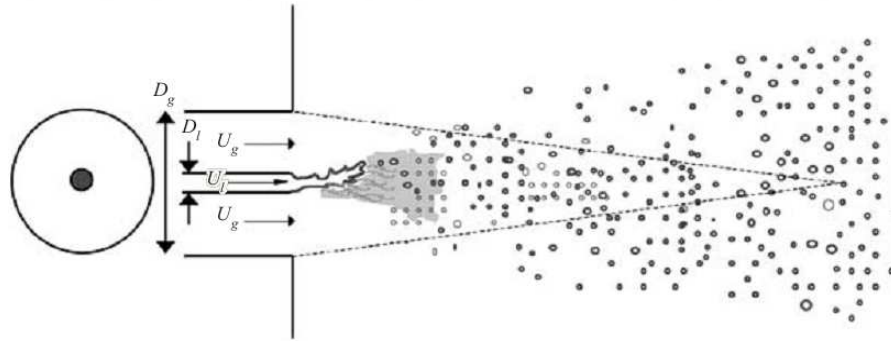
Şekil 2.36. Dairesel gaz jeti ile sıvı parçalanmasının anlık görüntüleri a), b) ve c) yüzey gerilimi baskın, d) Rayleigh tipi parçalanma, e), f), g) ve h) gaz hızı yüksek (Lasheras vd., 1997).

Kumar vd. (2013), birincil atomizasyon oluşumu üzerine yaptıkları çalışmalarında püskürtülen sıvı jetini sayısal çözümleme ile modellemişlerdir. HAD çözümünü üç farklı ağ yapısı ile tekrarlamışlar, artan ağ miktarının sıvının nüfuz edebilmesi üzerine etkilerini incelemişler ve sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları nüfuziyet mesafesini, püskürtülen sıvı kütlelerinin yüzde 97'sini içine alan mesafe olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar Şekil 2.37'deki grafikte görülebilmektedir. Buna göre orta boyda ve ince hücreli ağ yapılarında elde ettikleri nüfuziyet sonuçlarının birbirine yakın olduğunu göstererek ağ yapısından bağımsız bir model oluşturduklarını ifade etmişlerdir.



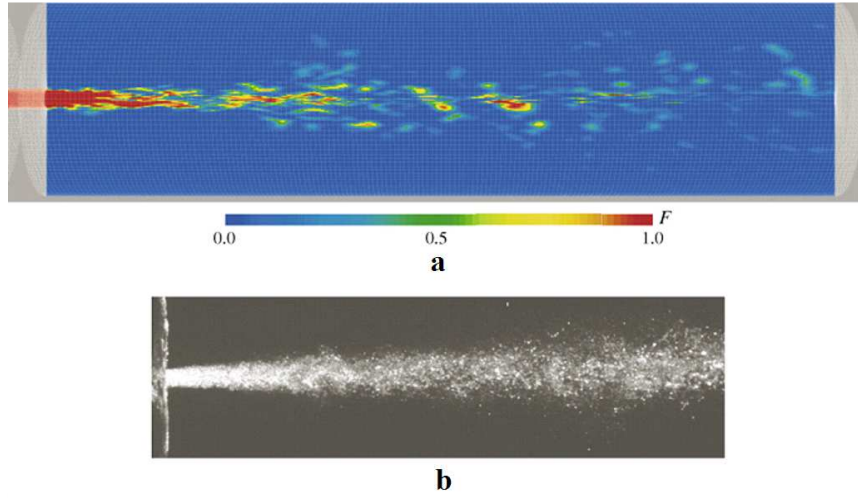
Şekil 2.37. Üç farklı ağ yapısı için sıvı nüfuziyet uzunlukları (Kumar vd., 2013).

Varga vd. (2003), küçük çaplı sıvı akışının eş eksenli ve yüksek hızlı gaz jetiyle parçalanma oluşumunu araştırmışlardır. Çalışmanın sonucu olarak parçalanma oluşumunda Rayleigh-Taylor mekanizmalarının etkili olduğunu göstermiş ve sıvı akışında kararsızlık oluşumlarının lüle ucu çıkışından hemen sonra başladığını belirtmişlerdir (Şekil 2.38.).



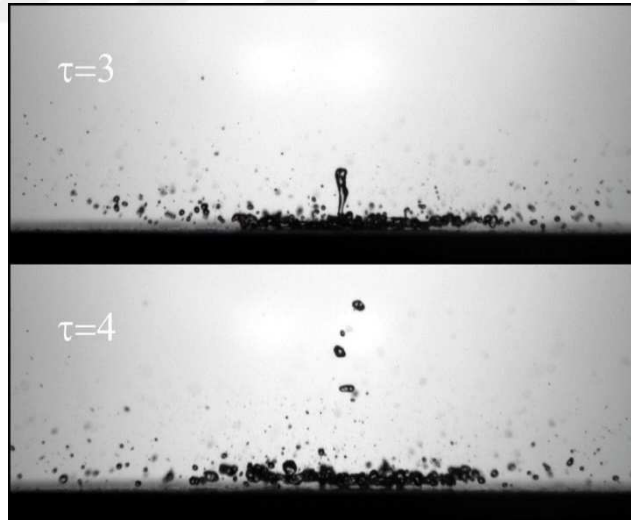
Şekil 2.38. Eş eksenli lüle ve spreye ait şematik görünüm (Varga vd., 2003).

Ishimoto vd. (2008), yaptıkları çalışmalarında sıvı hidrojen jetinin aynı şartlar altındaki atomizasyon olayına ait sayısal verileri ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda Şekil 2.39a'da verilen HAD sonuçlarının Şekil 2.39b'deki deneysel sonuçlarla örtüştüğünü ifade etmişler ve çalışmada kullandıkları HAD modelinin geçerliliğini vurgulamışlardır (Şekil 2.39.).



Şekil 2.39. Deneysel ve teorik sonuçlar a) akış hattındaki sıvı fazın hacim oran profili (kesit alanda), b) yüksek hızlı sıvı hidrojen jetinin anlık atomizasyonun görüntüsü (Ishimoto vd., 2008).

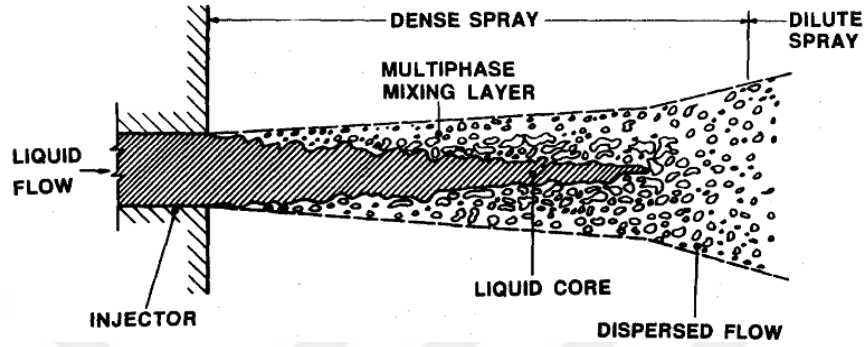
Cossali vd. (2002), yaptıkları çalışmalarında farklı sıcaklıklarda ısıtılmış yüzeyler üzerine düşen sıvı damlalarında ikincil parçalanma olaylarını gözlemlemişler, çarpışma sonrasında damlacık içinde oluşan merkezi jetin zamana bağlı olarak değişimini göstermişlerdir (Şekil 2.40.).



Şekil 2.40. Sıvı damlası etkisiyle merkezi jet oluşumu (Cossali vd., 2002).

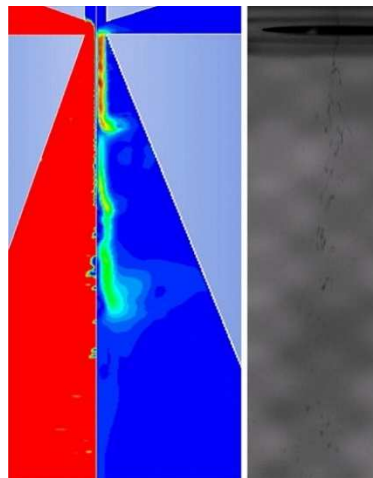
Faeth vd. (1995), basınç altında püskürtülen sıvı akışının parçalanması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında tamamen gelişmiş türbülanslı akışın olduğu enjektör çıkışındaki lüleden yüksek hızla durgun hava içine püskürtülen sıvı akışının parçalanmasını ve parçacık boyut dağılımını araştırmışlardır. Akış alanını bölgelere ayırarak Şekil 2.41'de görüldüğü gibi püskürtülen akışkanın yoğun olarak bulunduğu bölgedeki akışkan jetinin

merkezinde tamamen sıvı fazın bulunduğu bir bölgenin var olduğunu, bunun hemen dışında ise fazlar arası karışım bölgesinin bulunduğu ve akışın ilerleyen bölgesinde sıvı faz oranının % 0,1'in altına düştüğü seyreltik bir bölgenin var olduğunu ifade etmişlerdir.



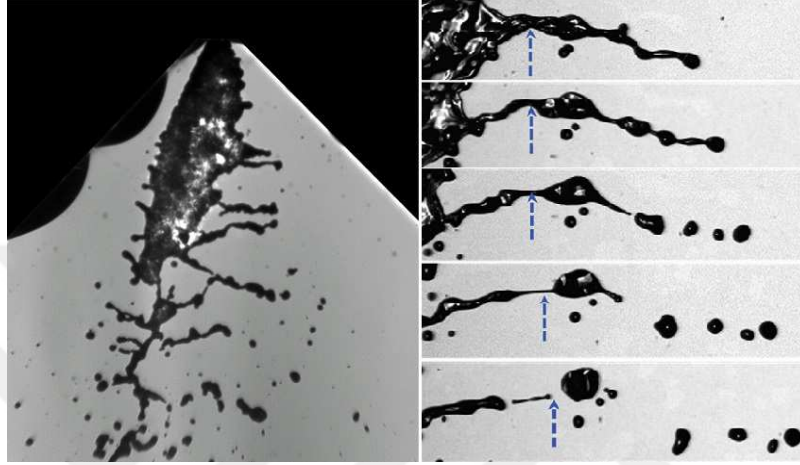
Şekil 2.41. Basınçlı atomizörde parçalanma rejiminde yakın alan görünümü (Faeth vd., 1995).

Rivero vd. (2013), fan jet lülelerini kullanarak Newton olmayan akışkanlarda mikro parçacık üretimi yaptıkları çalışmalarında, sayısal modelleme yoluyla elde ettikleri verileri deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Modelleme ve deneysel yollarla elde edilen üç farklı görseli karşılaştırma amacıyla Şekil 2.42'deki gibi yan yana getirerek incelemişlerdir. Şekil 2.42'de en solda mavi renkle gösterilen sıvı faz ile birlikte kırmızı renkli gaz faz görülürken, ortadaki görselde akış alanında bulunan her iki akışkanın hız kontürleri gösterilmiştir. Deneysel yollarla elde edilen sonuçlar ise Şekil 2.42'de sağ tarafta verilmiştir. Çalışmadan elde ettikleri teorik ve deneysel parçacık boyutu sonuçlarını karşılaştırarak sonuçların bir miktar hata payı içerdiğini ancak birbiriyle uyum içinde olduğunu ifade etmişlerdir.



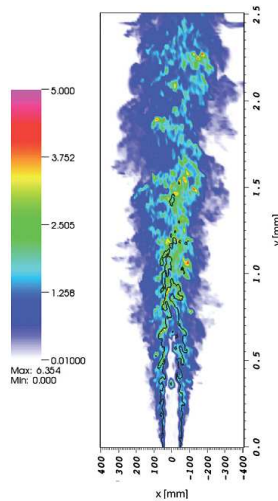
Şekil 2.42. Sayısal çözümleme ve deneysel yolla elde edilen görüntüler (Rivero vd., 2013).

Dumouchel vd. (2015), yaptıkları çalışmalarında atomize edilen sıvı akışkanın üzerinden shadowgraph yöntemiyle elde ettikleri görselleri kullanarak sıvı parçalanmasını açıklamaya çalışmışlar, sıvı bütününden ayrılan çubukların oluşumunu ve takip eden kopmalar sonrasında parçacıkların oluşumunu göstermişlerdir (Şekil 2.43.).



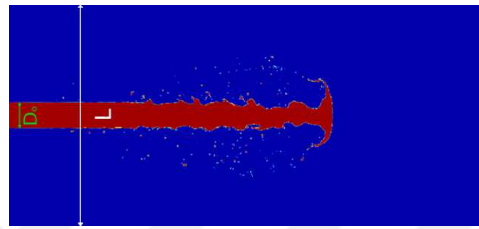
Şekil 2.43. Sıvı akışının shadowgraph görüntüsü ve çubuk parçalanma olayı (Dumouchel vd., 2015).

Martinez (2014), sprej akışının atomizasyonu üzerine yaptığı çalışmasında sayısal çözümleme yöntemi olarak LES adı verilen Large Eddy Simulation tekniğini kullanmış, bu kapsamda yapılan çalışmanın bir ilk olduğunu belirtmiştir. Çalışmada elde ettiği sonuçlardan (Şekil 2.44.) sıvı jeti çıkış çapının 5-10 katı mesafe sonrasında sprejin parçalanmaya başladığını ve sıvı yüzey alanında ani bir artışın görüldüğünü ifade etmiştir.



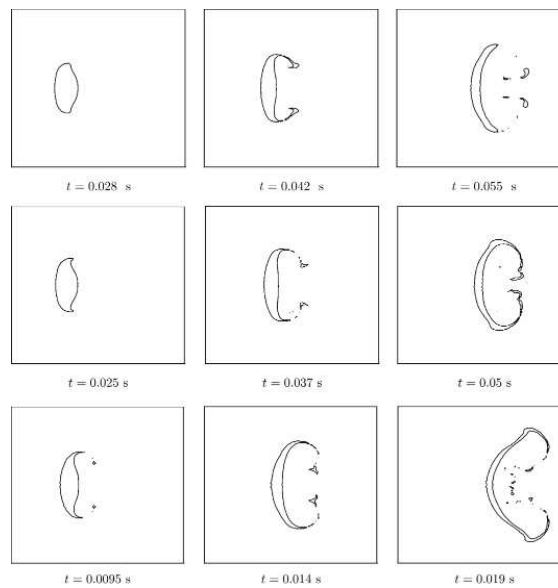
Şekil 2.44. Sprej parçalanma simülasyonundan alınan anlık görüntü (Martinez, 2014).

Salvador vd. (2015), yaptıkları çalışmalarında düşük enjeksiyon basınçlarında çalışan dizel yakıt lülesinde meydana gelen birincil parçalanma olayını sayısal simülasyon ile modellemeye çalışmışlardır. Şekil 2.45'te oluşturdukları model alanı görülmektedir. Şekilde yakıt enjeksiyonunun yapıldığı lüle çapı " D_0 " ile, modellenen alan genişliği " L " ile gösterilmiştir. Sayısal çözümleme sırasında gereksinim duyulacak olan işlemci hacmini azaltmak için L/D_0 oranını mümkün mertebe küçük tutmaya çalıştıklarını ancak yakıt parçacıklarının model alanı kenarlarına yaklaştığı durumlarda yakınsama problemleri yaşadıklarını ifade etmişlerdir.



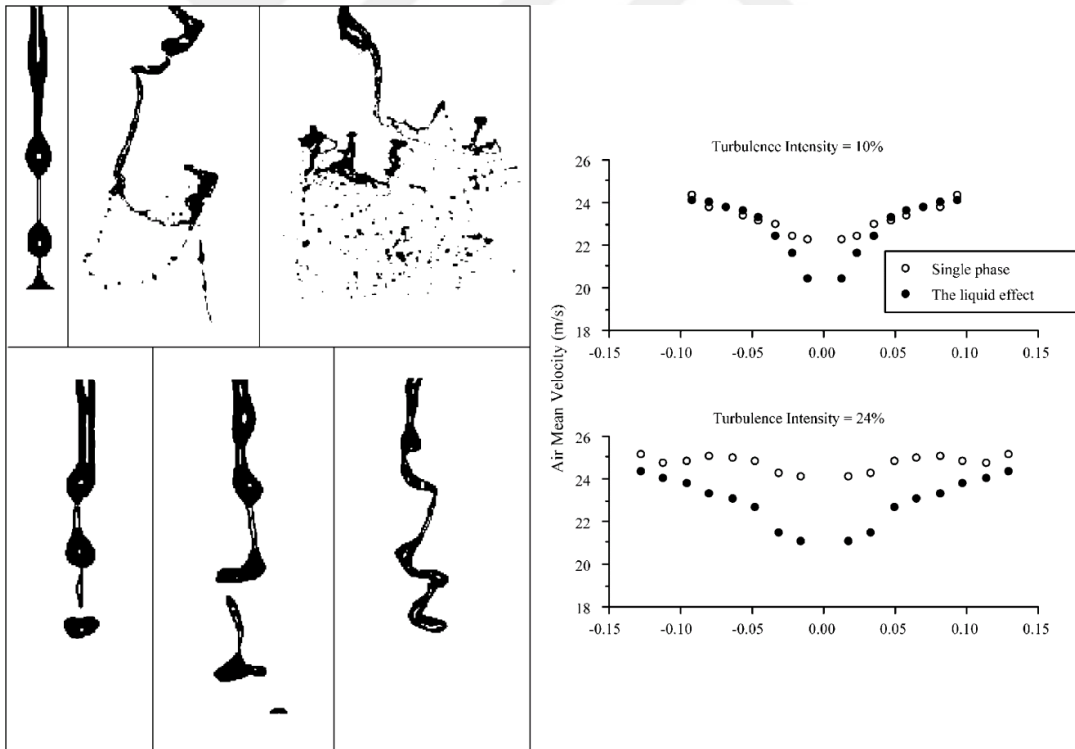
Şekil 2.45. Modellenen bölgede meydana gelen parçalanmalar (Salvador vd., 2015).

Bierbrauer ve Phillips (2008), parçacık deformasyonu ve parçalanması üzerine yaptıkları çalışmalarında Navier-Stokes denklemlerini çözmek için Godunov izdüşüm yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemin sıvı damlacıklarda parçalanma olaylarının modellenmesinde daha önce kullanılmamış olduğunu ifade etmişlerdir. Şekil 2.46'da görüldüğü gibi Weber sayısı arttıkça parçalanmanın daha kısa sürede gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.



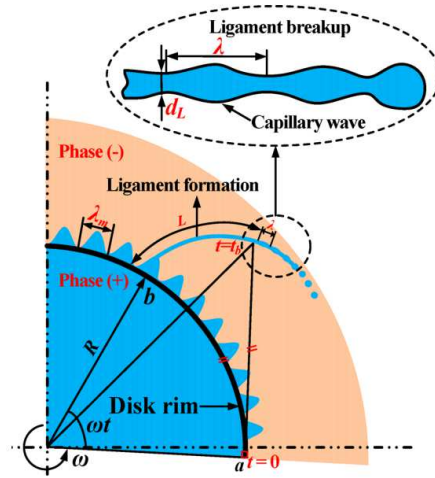
Şekil 2.46. $We_i=12$ (üstte), $We_i=15$ (ortada), $We_i=100$ (altta) değerlerindeki tanecik parçalanma simülasyonları (Bierbrauer ve Phillips, 2008).

Shavit (2001), iki akışkanlı atomizasyon işleminde parçalanma bölgesinde sıvı ve hava etkileşimi incelemiştir. Bir türbülans üretici vasıtasıyla, ortalama akış hızını artırmadan türbülans şiddetinin artırılabilirliğini ifade etmiştir. Tek-fazlı ve iki-fazlı akışta gerçekleşen akış olaylarını inceleyerek birbirleriyle kıyaslamıştır. Akışı yönlendiren ana bileşenin sıvı jeti olduğunu ve havayı düşük frekansta hareket etmeye zorladığını söylemiş, lüle çıkışında sıvının kararsızlaşmasında hava akımının etkisini ve meydana gelen ilk kararsızlığın akış boyunca etkisini incelemiştir. Şekil 2.47’de solda verilen akış görüntülerinin tümünde sıvı çıkış hızı sabittir. Sol üstteki üç resimde gaz akış hızı artırılarak parçalanma olayındaki değişimler gözlemlenmiş, sol alttaki üç resimde ise gaz hızı sabit tutulurken türbülans şiddeti yükseltilerek kararsızlık oluşumu incelenmiştir. Çalışmada lazer doppler hızölçer kullanarak hava akış hızı ölçümlerini gerçekleştirmiştir. Şekil 2.47’de sağda verilen radyal mesafeye göre ortalama hız değişimi grafiğinde görüldüğü gibi türbülans yoğunluğu arttıkça sıvı fazın varlığının gaz hızı üzerindeki etkisinin büyüdüğünü tespit etmiştir.



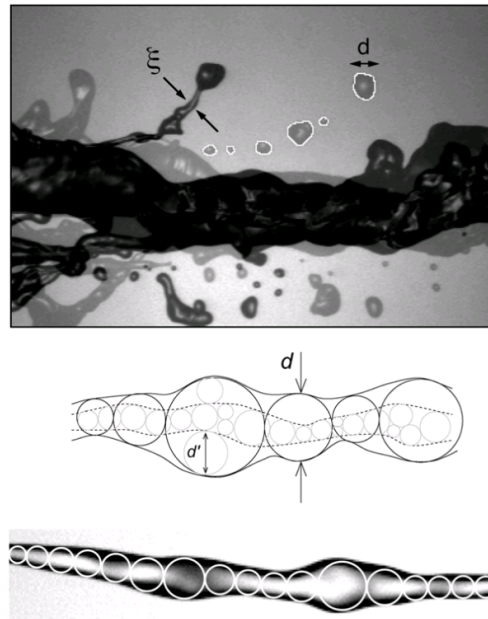
Şekil 2.47. Parçalanma bölgesinde akış görüntüleri (solda), ortalama aksel gaz hızı üzerinde sıvı jetinin etkisi (sağda) (Shavit, 2001).

Wang vd. (2016), yaptıkları çalışmalarında yüksek hızla dönen bir disk üzerine akıtılan gliserol ve su karışımı ile kiriş ve parçacık oluşumunu araştırmışlardır. Parçacık boyunun kiriş çapı ve kılcık dalga boyu ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermişlerdir (Şekil 2.48.).



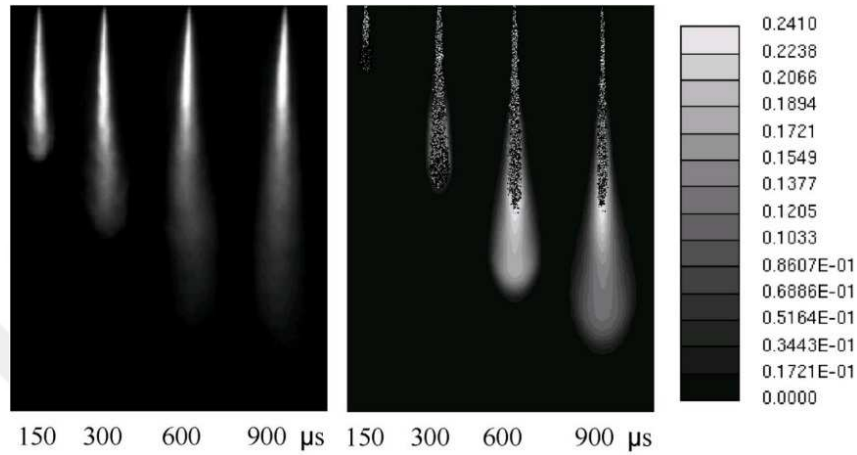
Şekil 2.48. Döner disk atomizöründe kirişlerin parçalanması ve toz oluşumu (Wang vd., 2016).

Eggers ve Villermaux, yaptıkları çalışmalarında akışkan jetlerinin parçalanma mekanizmalarını araştırmışlardır. Şekil 2.49’da sıvı jetinden koparılmış çubuktan parçacık oluşumu gösterilmiştir. Şekilde koyu renk ve gri renk olmak üzere iki farklı ton kullanılarak parçalanma öncesi ve sonrasına ait görünüm aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Başlangıç ortalama damlacık çapı “ ξ ”, nihai parçacık çapı “ d ” ile temsil edilmektedir. Şekilde ayrıca sıvı jetinden ayrılan çubukta yerel kalınlığına göre oluşacak parçacık boyutları kabataslak olarak gösterilmiştir (Eggers ve Villermaux, 2008).



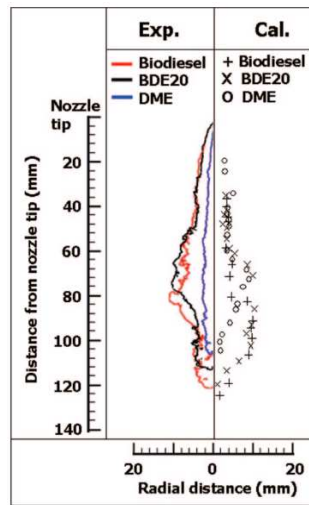
Şekil 2.49. Gaz akışı etkisiyle ayrılan tanecik (ayrılma öncesi ve sonrası) (Eggers ve Villermaux, 2008).

Desantes vd. (2009), yaptıkları çalışmalarında dizel yakıt lülelerinden püskürtülen yakıtın HAD yöntemi ve deneysel yollarla elde edilen görünümünü karşılaştırmışlardır. Şekil 2.50'de verilen farklı püskürtme anlarında elde ettikleri sonuçlardan deneysel ile teorik püskürtme desenlerinin birbirleri ile uyum içinde olduğunu ifade etmişlerdir (Desantes vd., 2009).



Şekil 2.50. Deneysel sonuçlarla (solda) sayısal sonuçların (sağda) kıyaslanması (Desantes vd., 2009).

Kim vd. (2008), yaptıkları çalışmalarında çeşitli yanıcı akışkanların atomizasyon karakteristikleri üzerinde deneysel ve teorik araştırmalarda bulunmuşlardır. Çalışmalarında elde ettikleri sayısal sonuçlar ile deneysel verilerin uyumlu olduğunu göstermişlerdir (Şekil 2.51.) (Kim vd., 2008).



Şekil 2.51. Deneysel olarak elde edilen spray dış hatlarının sayısal sonuçlarla kıyaslanması (Kim vd., 2008).

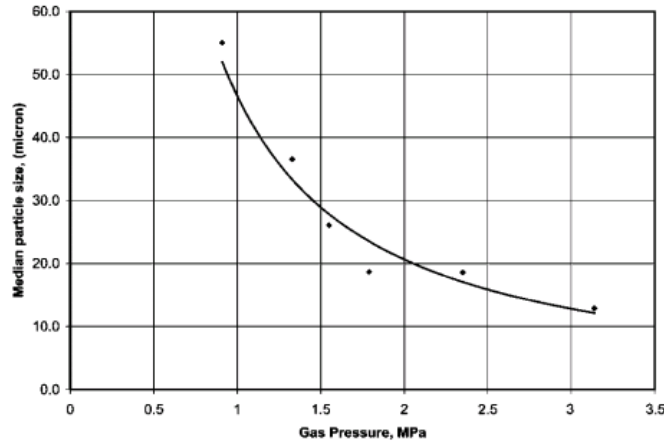
2.6. Gaz Atomize Tozların Karakterizasyonu

2.6.1. Toz boyutunun tayini

Toz işleme teknolojileri genellikle dumanı oluşturan parçacıklardan daha büyük (0,01-1 μm), fakat kumdan daha küçük (0,1-3 mm) parçacıklarla ilgilenir. Kullanılan tozların çoğu insan saçı ölçüsündedir (25-200 μm) (German, 2007).

Çok küçük boyutlara sahip metal tozları üretimi için uzun yıllardan beri ticari amaçlarla bazı çalışmalar gerçekleştirilmektedir. 3 μm boyutlarına kadar ince taneli metal tozu üretimleri atomizasyon işlemi kullanılarak ekonomik olarak yapılabilmektedir. Bununla birlikte, atomizasyon işlemleri ile 1 μm boyutlarına kadar toz üretilmesi de mümkündür. Ancak ultra ince olarak tanımlanan bu mertebelerde toz üretimi için atomizasyon işleminden ziyade çökeltme ve karbonil bozunma işlemleri daha ekonomik olmaktadır (ASM Handbook Committee, 1998).

Ünal, yaptığı çalışmasında atomizasyon gaz basıncının ortalama parçacık boyutu üzerindeki etkisini Şekil 2.52'deki grafik ile göstermiştir. Buna göre; atomizasyon gaz basıncı 0,9 MPa ile 3,1 MPa aralığında değiştirildiğinde ortalama parçacık boyutunun 55,4 mikrometreden 12,9 mikrometreye kadar düştüğü görülmüştür (Ünal, 2007a).



Şekil 2.52. Atomizasyon gaz basıncının ortalama parçacık boyutu üzerine etkisi (Ünal, 2007a).

Parçacık boyut ölçümü için geliştirilmiş çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlar; mikroskop ile boyut tayini, elek analizi, sedimentasyon, ışık saçılımı ve kırınımı, elektriksel alan algılaması, ışık engelleme ve X-ışını teknikleri olarak sıralanabilir.

Her bir toz boyutu ölçüm yöntemi tozların farklı bir özelliğini ölçer ve ölçülen özelliğe göre toz boyutunun büyüklüğü farklı olur. Bu nedenle aynı toz numunesinin farklı yöntemlerle

tain edilen boyut değerleri birbirinden farklı olacaktır. Hangi yöntemin mutlak boyut değerine daha yakın sonuç verdiğini söylemek, sayıları küçük bir toz numunesinde bile milyonları bulan toz parçacıklarından beklenen özelliklerin kullanım alanına göre değişecek olması nedeniyle oldukça zordur. Bununla birlikte parçacıkları küre olarak kabul etmek yaygın bir uygulamadır. Böylece parçacık boyutunu belirlemek için sadece çap değeri yeterli olacaktır. Toz parçacıklarının küresel olduğu kabulüyle elde edilen çap değerleri eş değer küresel çap olarak adlandırılır. Eş değer küresel çaplar; yüzey alanı, hacim, izdüşüm alanı veya çökme hızı ölçümlerinden biri ile belirlenir (German, 2007). Bunun için öncelikle parçacıkların izdüşüm alanları ölçülür. Elde edilen alan verileri parçacıkların küresel olduğu varsayılarak eş değer küresel çap (D_A) değerlerine dönüştürülür.

$$A = \text{İzdüşüm alanı} = \frac{\pi D_A^2}{4} \quad (2.1.)$$

$$D_A = \sqrt{\left(\frac{4A}{\pi}\right)} \quad (2.2.)$$

Elek analizi olarak bilinen yöntem, göreceli olarak büyük boyutlu olan parçacıkların boyut dağılımının ölçümünde kullanılan eski bir tekniktir. Eşit aralıklı tellerden oluşan bir kare ızgara bir elek oluşturur. Elek boyutu birim uzunluktaki tellerin sayısından belirlenir. Açıklık boyutu, elek boyutu ile ters orantılı olarak değişir. Büyük elek değerleri (325 gibi), küçük açıklık değerlerini (45 μm); küçük elek değerleriyse (50 gibi), büyük açıklık değerlerini (300 μm) belirtir (German, 2007).

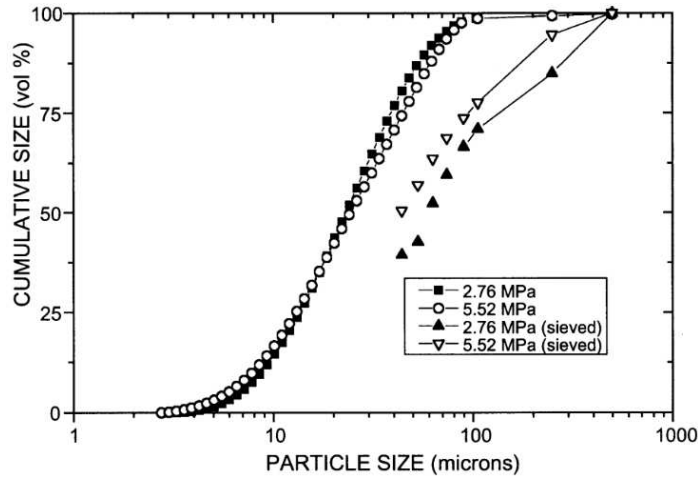
Elek boyutunun belirlenmesinde en yaygın kabul, bir inçteki tel sayısına dayanır. Örneğin 200 elek, doğrusal bir inçteki 200 teli ifade eder. Bu elek değeri, tel merkezleri arasında 127 μm aralığı verir. Fakat teller 52 μm çapında olduğundan geriye kalan açıklığın boyutu 75 μm 'dir. Elek analizinde kullanılan elek boyutları çok küçük açıklık değerlerine gidemez. Elek analizi genellikle 38 μm 'den daha büyük parçacıklara uygulanır. Bununla birlikte, 5 μm 'ye kadar elektro-şekillendirilmiş elek boyutları elde edilmesi mümkündür. Ancak parçacık topaklanması ve parçacığın eleğe yapışması nedeniyle daha küçük boyutlu elektro-şekillendirilmiş eleklerin genellikle pratik olarak kullanımı yoktur.

Elek analizi, eleklerin azalan elek açıklıklarında yukarıdan aşağıya doğru istiflenmesiyle başlar. En küçük açıklık boyutlu elek en alttadır. Toz numunesi en üstteki eleğe konur ve elek takımı sarsılarak eleme işlemine başlanır. Eleme işlemi tamamlandığında her bir elek üzerinde kalan toz miktarı tartılır ve toz numunesinin toplam ağırlığına göre yüzdeler her bir aralık için

hesaplanır. Bir elekten geçen toz “-“ işareti ile, eleğin üzerinde kalan ise “+” işareti ile belirtilir. Örneğin, -100/+200 olarak ifade edilen tozlar, elek boyutu 100 olan bir elekten geçmiş ancak elek boyutu 200 olan bir elekten geçememişlerdir. Dolayısıyla toz parçacıkları 150 ile 75 µm boyut aralığındadırlar. Elek analizi yönteminin kullanıldığı boyut ölçümlerinde elek boyutu 325 olan elekten geçen 45 µm’den küçük tozlar genellikle elek altı toz olarak adlandırılırlar (German, 2007).

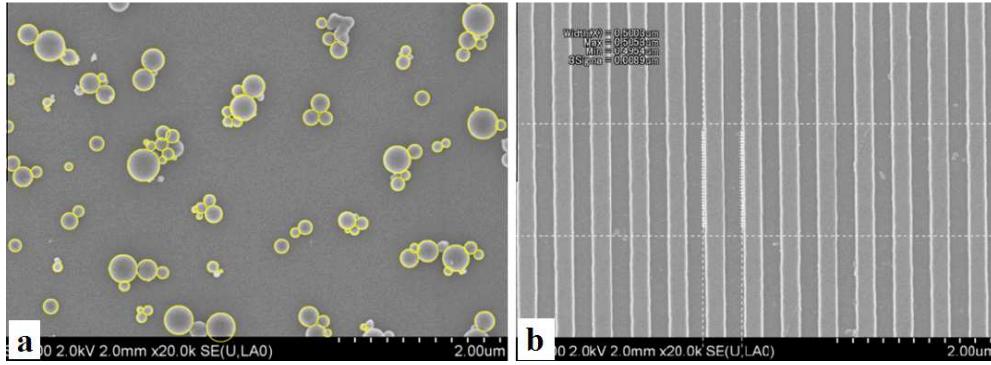
Elek analizi yaygın olarak kullanılmasına rağmen, önemli bir hata eğilimine sahiptir. Eleklerin örgü toleransı olarak, ortalama açıklık boyutunda % 3 - % 8 arası bir değişime izin verilir. Ayrıca bir açıklık, belirtilen elek boyutundan % 25 - % 50 daha büyük olabilir. Bu tür hatalar, eleğin üstünde kalması gereken parçacıkların elekten geçmesine ve küçük parçacık olarak sayılmalarına yol açar. Bu sebeplerden ve eleme işlemi sırasındaki gerçekleşebilecek hatalardan dolayı elek analizi boyut sonuçlarında % 1’den daha iyi doğruluk beklemek anlamsızdır ve % 8 hata oranı yaygındır (German, 2007).

Anderson ve Terpstra (2002), gaz atomizasyonu üzerine yaptıkları çalışmalarında iki farklı basınç değeri için otomatik boyut ölçümü ve elek analizi ile ayrı ayrı tespit ettikleri toz boyutlarını karşılaştırmışlar ve elek analizinin daha büyük ortalama toz boyutu sonucu verdiğini göstermişlerdir. Sonuçlar Şekil 2.53’te görülmektedir.



Şekil 2.53. Kümülatif boyut yüzdesi ile parçacık boyutunun kıyaslanması (Anderson ve Terpstra, 2002).

Yoshida vd. (2011), yaptıkları çalışmalarında atomizasyon ile üretilen silika parçacıklarının boyut tayini için SEM ile çekilen görüntüler üzerinde noktasal boyut şablonu kullanarak parçacık boyut tayini yapmışlardır (Şekil 2.54.).



Şekil 2.54. a) Silika parçacıklarının SEM görüntüsü, b) SEM ölçümü için ölçek (Yoshida vd., 2011).

Parçacık boyut analizi, parçacığın bazı nitelikleriyle orantılı olarak tepki veren testlere bağlıdır. Küresel olmayan parçacıklara ait sonuçların farklı ölçümlerle karşılaştırılmasındaki zorluklar nedeniyle, toz şekli hemen hemen her zaman küresel kabul edilir. Her bir teknik tarafından test edilen hacim, kütle, en büyük uzunluk veya izdüşüm alanı ve küresel parçacık şekli kabulü gibi fiziksel niteliklerin farklılaşması sebebiyle, çeşitli boyut analiz teknikleri küresel olmayan tozlarda çok farklı sonuçlar verir. 0,1-2400 μm boyut aralıklarında cihaz kalibrasyonu için standart küresel tozlar bulunmasına rağmen, bu yine de parçacık şekil etkisini düzeltmez (German, 2007).

Boyut dağılımı, her bir boyut aralığına karşılık gelen parçacıkların sayısal çokluğu esas alınarak ölçülebilir. Başka bir seçenek olarak elek analizi, ağırlık dağılımını veya her bir boyut aralığındaki toz kütlelerini verir. Bunlar çok farklı dağılımlardır (German, 2007).

Bütün toz boyutu ölçüm teknikleri bazı yaygın hata kaynaklarından etkilenirler. Bu hataların birçoğu parçacık boyut dağılımını büyük parçacık boyutlarına doğru kaydırma eğilimindedir (German, 2007).

2.6.2. Parçacık boyut dağılımı

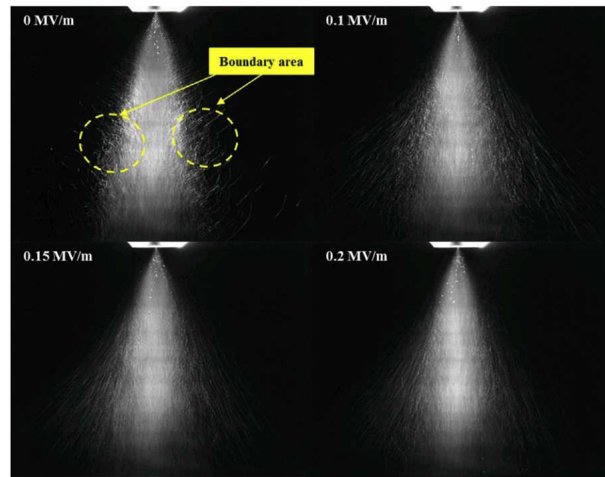
Parçacık boyut verileri toplandıktan sonra dağılım analiz edilir. Bazen parçacık boyut dağılımı, her bir boyut artışındaki parçacıkların sayısı veya miktarını gösteren bir histogram veya frekans çizimi olarak verilir. Böyle çizimlerde; mod tepe parçacık boyutu, ortalama ise merkezi boyuttur (German, 2007).

Parçacık boyutu logaritmik ölçekte gösterildiğinde, kademe genişlikleri aynı boyutta görünür. Genellikle tozlar logaritmik boyut ölçeğinde gösterildiğinde çan şeklinde bir eğri oluşturur. Böyle dağılımlar logaritmik normal dağılım olarak adlandırılır (German, 2007).

Birikimli parçacık boyut dağılımı, aralıklı yüzdeleri toplayarak ve düşük kademeli parçacık boyutuna karşı birikimli yüzdeyi çizerek oluşturulur. Düşük kademeli parçacık boyutunun kullanılmasının sebebi elek analizinden elde edilen bilgilerin, toz ağırlığı açısından özgül elek boyutlarından daha büyük olmasıdır. Bu nedenle; birikimli yüzde eğrisi oluşturulurken çizilen eğri, her bir aralık için ortadaki bir boyuttan değil de, düşük boyuttan geçirilir. Düzgün bir birikimli parçacık dağılımında, ortalama boyut genellikle % 50 değerine karşılık gelir (German, 2007).

Atomizör tipi ve geometrisi parçacık boyut dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Kleinhans vd., 2016). Morakotjinda vd. yaptıkları çalışmalarında elde ettikleri toz parçacık boyut dağılımı verileri ile Lubanska bağıntısından elde edilen ortalama parçacık boyut verilerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonuçlarına göre; Lubanska bağıntısındaki K sabiti değişken olduğunda ortalama parçacık boyutunun deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir (Morakotjinda vd., 2010). Zhou, doğrusal açıklıklı atomizörde yaptıkları çalışmasında gaz açıklığının daha büyük olduğu doğrusal açıklıklı atomizörde artan basınçla birlikte toz boyutunun daha fazla küçüldüğünü görmüştür. Bu durumun, gaz açıklığı daha büyük olduğunda artan basınçla birlikte kütleli gaz akış miktarının daha fazla büyümesinden ve gaz/sıvı metal akış oranının daha hızlı artmasından kaynaklandığını vurgulamıştır (Zhou, 1999).

Seong vd., yaptıkları çalışmalarında aerodinamik ve elektrostatik etkilerin birlikte kullanıldığı atomizasyon sistemi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında aerodinamik ve elektrostatik etkiler kullanılarak daha düzgün bir parçacık boyut dağılımı elde edilebileceğini göstermişlerdir. Elektrik alanı etkisi altında parçacıkların hız kazanarak kinetik enerjilerinin yükseltildiğini belirtmişlerdir (Şekil 2.55.) (Seong vd., 2017).

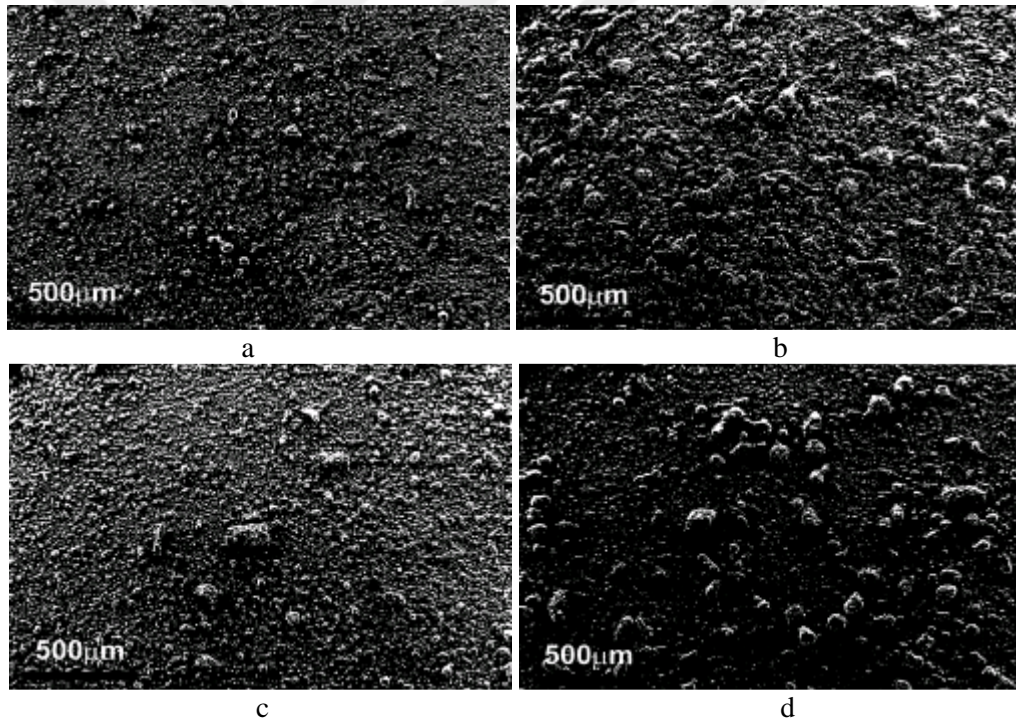


Şekil 2.55. Farklı elektrik alan etkisi altında parçacıkların dağılımı (Seong vd., 2017).

2.6.3. Parçacık şekli

Tozların fiziksel karakterizasyonundaki önemli bir bileşen parçacık şeklidir. Parçacık şekli ile atomizasyon koşulları arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Örnek olarak $10^4 - 10^6$ K/s aralığındaki hızlı soğuma koşullarında parçacık şeklinin fazlasıyla düzensiz olduğu görülmüştür (Zeoli, 2011).

10 μm 'den küçük toz şekilleri genellikle küresel iken, daha büyük parçacıklar küresel olabildikleri gibi aynı zamanda ince uzun, yumrulu ve kiriş benzeri şekillerde olabilmektedirler. Yüksek oranda büyütülmüş SEM (Scanning Electron Microscope) fotoğraflarında (Şekil 2.56.) 200 ila 700 psi gaz basıncı aralığında değişen gaz atomizasyonu ile elde edilen parçacık şekillerinin genel dağılımı görülebilmektedir (Mates, 1999).



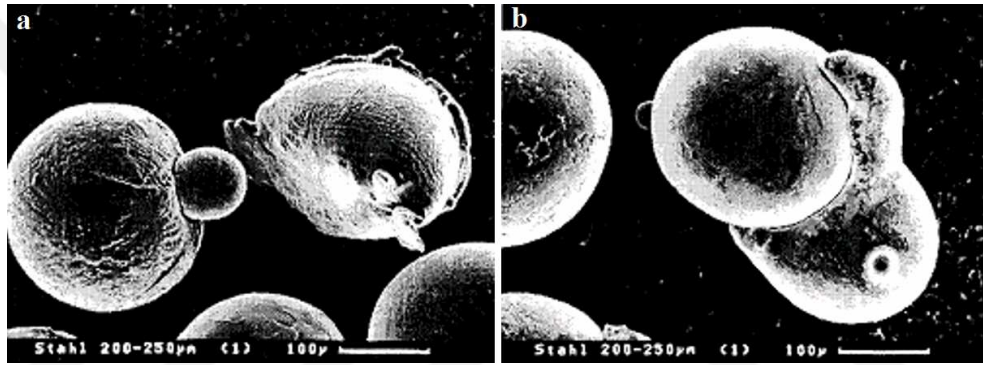
Şekil 2.56. Yüksek basınçlı gaz atomizasyonu ile elde edilmiş kalay tozlarının SEM görüntüsü a) ve b) $P_o = 200$ psi ($P_o / P_a = 14$), c) ve d) $P_o = 700$ psi ($P_o / P_a = 48$) (Mates, 1999).

Özbilen, yaptığı çalışmasında gaz atomizasyonu işlemi sırasında parçacıklar arasında uydulaşmaların oluşabilmesi için atomizasyon sırasında büyük çaplı parçacıklarla birlikte küçük çaplı parçacıkların da oluşması ve bu parçacıkların birbirleriyle etkileşime girmeleri gerektiğini vurgulamıştır. Küçük çaplı parçacıklar daha erken katılırlar ve henüz katılmamış olan veya dış yüzeyinde katılma başlamış olan büyük çaplı parçacıklar ile havada çarpıştıklarında

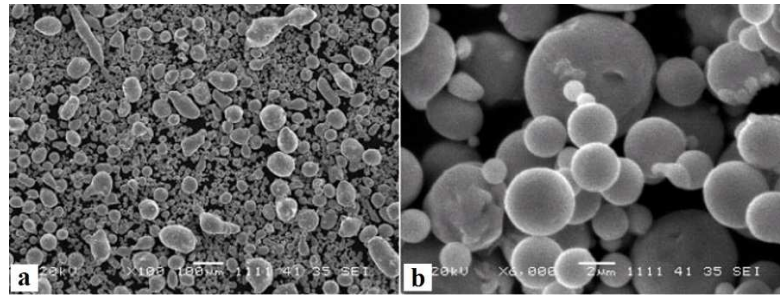
birleşme ve/veya uydulaşma eğilimi gösterirler (Özbilen, 1999). Uydulaşmaların çok fazla gerçekleşmesi gaz atomizasyonu sırasında türbülanslı akışların varlığına işaret eder.

Atomizasyon işlemiyle üretilen toz parçacıkları genellikle gözeneksiz, düzgün yüzeyli ve küresel şekillidirler. Gaz atomize tozlar küresel şekilli olduklarından iyi paketlenme özelliği gösterirler.

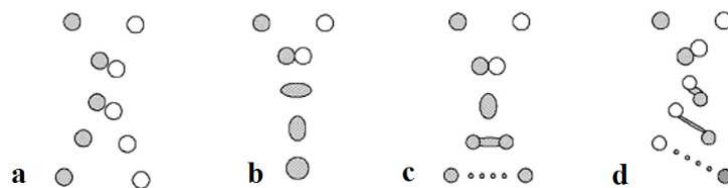
Çeşitli araştırmacıların gaz atomizasyonu işlemi ile üretilen toz parçacıklarının şekilleri üzerine elde ettikleri oluşumlar Şekil 2.57, Şekil 2.58, Şekil 2.59, Şekil 2.60 ve Şekil 2.61'de verilmiştir (Gao ve Fritsching, 2010), (Aksoy ve Ünal, 2006), (Aydın ve Ünal, 2007).



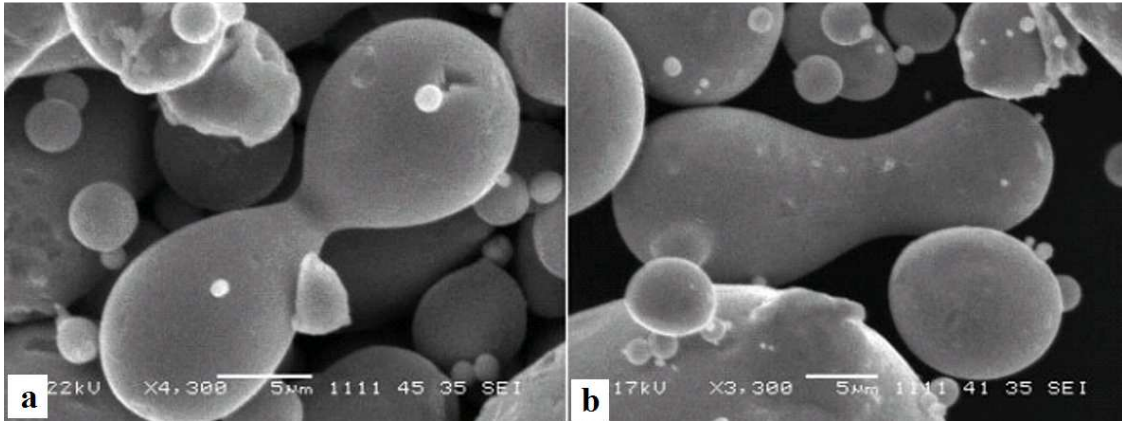
Şekil 2.57. Parçacık çarpışmaları sonucunda oluşan şekiller a) uydulaşma, b) ikili oluşum (Gao ve Fritsching, 2010).



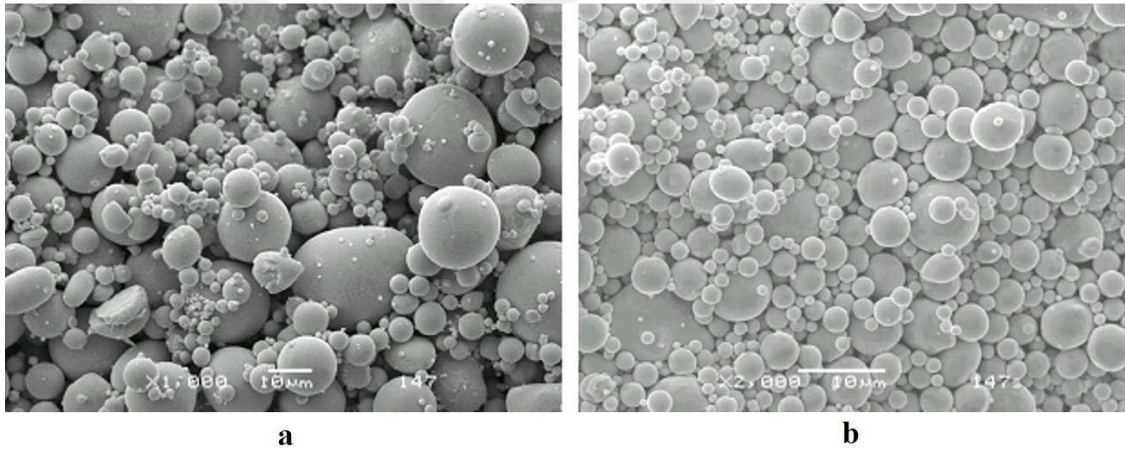
Şekil 2.58. Küresel şekilli kalay tozları a) x100, b) x6000 (Aksoy ve Ünal, 2006).



Şekil 2.59. İkili parçacık çarpışmaları diyagramı a) çarpıp ayrılma, b) birleşme, c) birleşip ayrılma, d) parça koparak ayrılma (Gao ve Fritsching, 2010).



Şekil 2.60. İkincil atomizasyon mekanizmasını tamamlayamamış kalay tozları (Aksoy ve Ünal, 2006).



Şekil 2.61. 1,47 MPa basınç altında elde edilmiş azot atomize tozların genel görüntüleri; a) toz toplama kabı içerisindeki tozlar, b) siklon içerisindeki tozlar (Aydın ve Ünal, 2007).

2.6.4. Mikroyapı

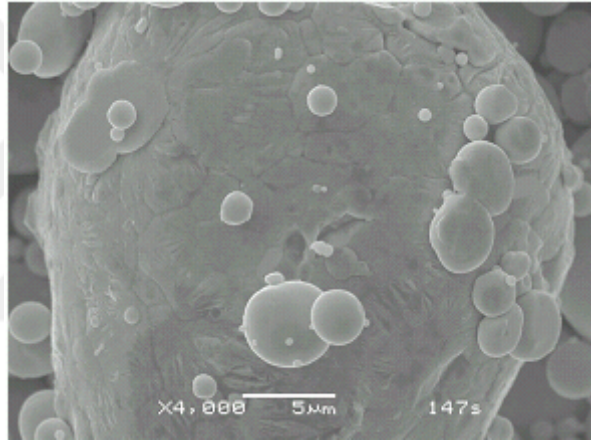
Mühendislikte genel kaide olarak ince taneli ve düzenli mikroyapıya sahip malzemeler tercih sebebidirler (Ünal, 2007b). Gaz atomizasyonu ile özel olarak ayarlanmış mikroyapı karakteristikleri elde edilebilmektedir (Steinmetz, 2011). Atomize edilmiş her parçacığın kimyasal bileşimi birbirine benzerdir. Kim ve Chae, gaz atomize magnezyum alaşımı tozlarının mikroyapılarına yönelik yaptıkları bazı çalışmalarda toz tanelerindeki kristal boyutunun 2 ile 5 μm arasında olduğunu ve tozların 48 nm kalınlığında magnezyum oksit tabakası ile kaplı bulunduğunu tespit etmişlerdir (Kim ve Chae, 2008).

Sprey ile atomizasyon işleminde parçacıklar iletim yoluyla soğurlar. Ancak toz boyutu 500 μm 'den daha küçük olduğunda hızlı katılaşma baskın olur. Hızlı katılaşmanın gerçekleştiği tozlarda mikro yapı ince tanelidir. Tozların mikro yapısına en fazla etki eden soğuma şartlarıdır.

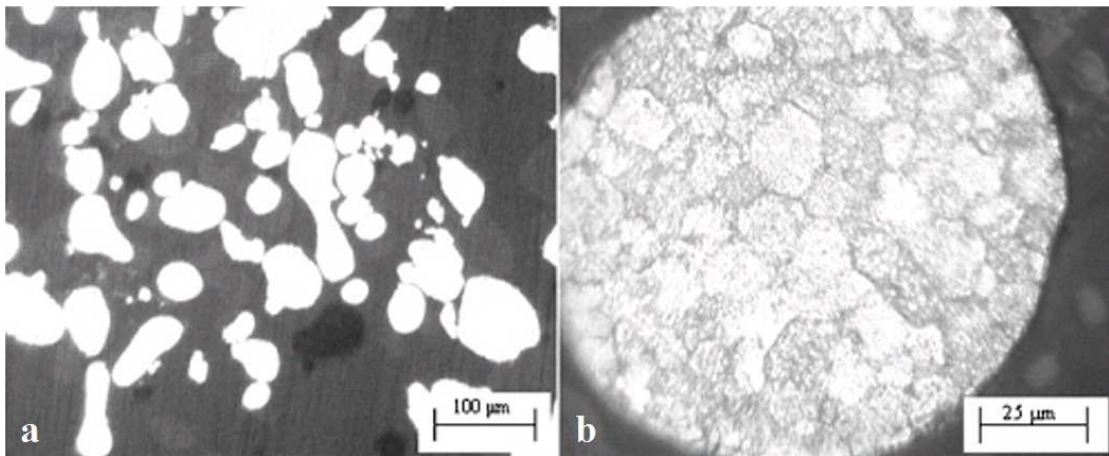
Ergitilmiş metal veya alaşımları gaz atomizasyonu işleminde Hızlı Katılaşmaya (RS – Rapid Solidification) maruz kalırlar (Antipas, 2011).

Katılaşmış tanecik mikroyapılarının doğru bir şekilde öngörülebilmesi için sıvı taneciklerinin dinamik davranışlarının bilinmesi gerekmektedir (Antipas, 2012). Sıvı damlacıklar uçuşları sırasında genişmekte olan atomizasyon gazları tarafından zorlanmış iletim şeklindeki ısı akışıyla da hızlı bir şekilde soğutulurlar (Shukla vd., 2001).

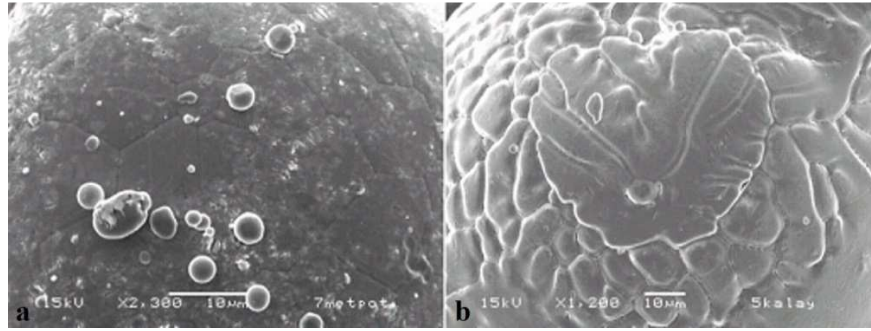
Aksoy ve Ünal (2006) ile Aydın ve Ünal'ın (2007) yaptıkları çalışmalarda gaz atomizasyonu ile elde edilmiş bazı metal tozlarına ait mikroyapılar Şekil 2.62, Şekil 2.63 ve Şekil 2.64'te verilmiştir.



Şekil 2.62. Azot atomize kalay tozunun hücresel yüzeyi (1,47 MPa) (Aydın ve Ünal, 2007).

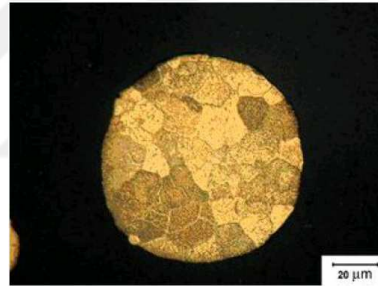


Şekil 2.63. a) Asitle dağlama olmaksızın kalay tozların görünümü, b) asitle dağlama sonrası bir kalay tozunun mikroyapısı (Aksoy ve Ünal, 2006).



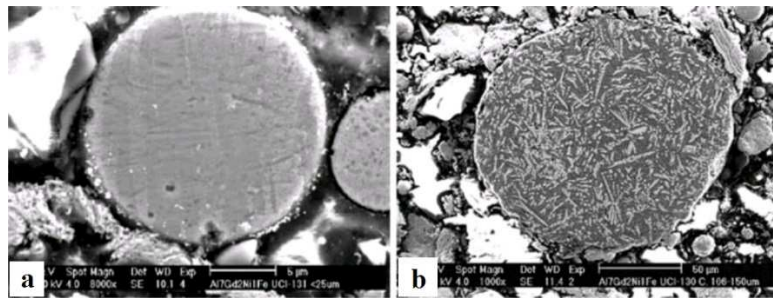
Şekil 2.64. Kalay tozlarında dentritik katılaşma a) x2300 b) x1200 (Aksoy ve Ünal, 2006).

Nispeten büyük çaplı gaz atomize tozlarda çok sayıda tane oluşumu meydana gelmektedir. Şekil 2.65'te gaz atomize kalay tozunda 20 μm ebatlarına kadar kristalleşmeler görülebilmektedir. Bu oluşumlar incelendiğinde toz tanesinin birçok bölgesinde katılaşma başlangıçlarının söz konusu olduğu anlaşılmaktadır (Morakotjinda, 2010).



Şekil 2.65. Gaz atomize kalay tozunda mikroyapı (Morakotjinda, 2010).

Gaz atomizasyonu ile elde edilen 25 μm'den küçük çaplı alüminyum alaşımlı toz tanesinde dağlama sonrasında elde edilen ve Şekil 2.66a'da verilen sade mikroyapı, katılaşma sırasında kristalleşme oluşmadığına işaret etmektedir (Zheng vd., 2009).



Şekil 2.66. Alüminyum toz mikroyapısı a) çap 25 μm'den küçük, b) 106-150 μm aralığında (Zheng vd., 2009).

Birçok çalışma sonuçları ortaya koymuştur ki, çoğu metalik malzeme mikroyapısı toz boyutuna doğrudan bağlıdır. Toz mikroyapısı; katılmış tanelerdeki dendrit kol uzunluğu, kristal ebadı veya ötektik hücrel mesafeler ile karakterize edilebilir (Jiang vd., 1988). Manesh vd. (2003), yaptıkları çalışmalarında soğuma hızının ikincil dendrit boyu üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir. İkincil dendrit boyunun Eşitlik 2.3. ile hesaplanabileceğini belirtmişlerdir.

$$\lambda = a T^b \quad (2.3.)$$

Burada; λ ikincil dendrit kolu uzunluğu (μm), T soğuma hızı ($^{\circ}\text{C/s}$), a ve b ampirik katsayılarıdır.



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

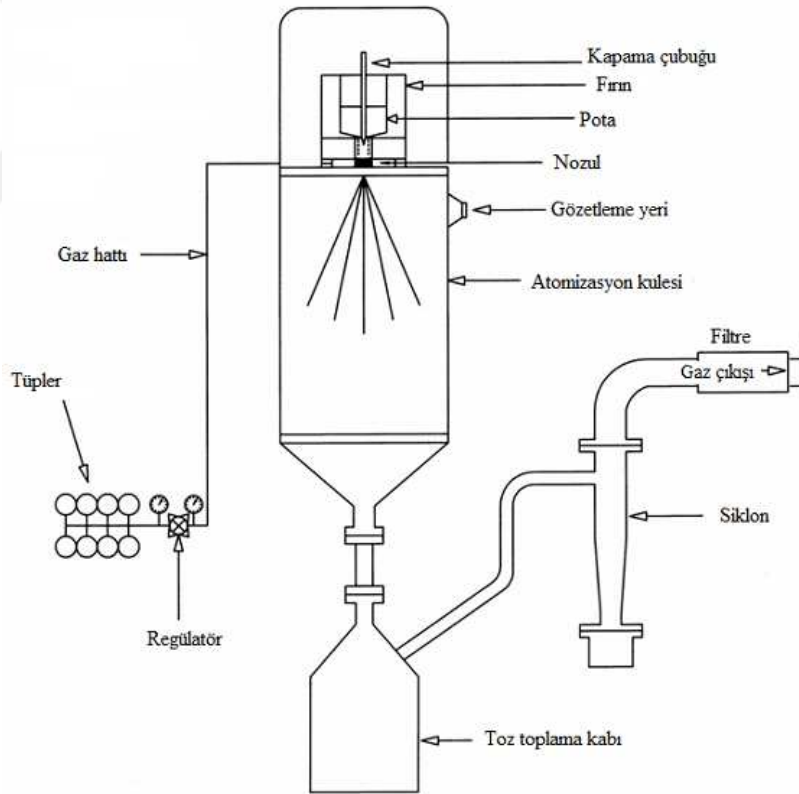
3.1. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi

Gaz atomizasyonu işlemi metal tozu üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte laboratuvar ortamında gaz atomizasyonu işlemini geliştirici çalışmalar yapılmaktadır. Deneysel amaçlarla kurulmuş olan atomizasyon ünitelerine ait üretim kapasitesi düşük düzeyde olmakla birlikte elde edilen ürün ve diğer çıktılar atomizasyonun anlaşılması ve geliştirilmesine yönelik tatmin edici sonuçlar vermektedir. Bu amaçla Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneyselerde kullanılan gaz atomizasyon ünitesinin genel görünümü Şekil 3.1'de ve şematik görünümü Şekil 3.2'de verilmiştir. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi fonksiyonel anlamda sekiz adet bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler; atomizasyon işleminin kumanda edildiği kontrol sistemi, yüksek basınçlı atomize edici gazı sağlayan gaz sistemi, gaz akış debisinin kütleli olarak ölçülmesini sağlayan gaz akış debisi ölçüm sistemi, toz hâline getirilecek metalin sıvı hâle getirildiği ergitme sistemi, yüksek hızlı atomize edici gaz jetini oluşturan sesüstü atomizasyon lülesi, ergitilmiş metalin lüle ucuna taşınmasına aracılık eden sıvı metal akış borusu, atomizasyon ve katılaşmanın içerisinde gerçekleştiği atomizasyon kulesi ve katılaşan toz tanelerini bünyesinde toplayan parçacık toplama bölümü olarak sıralanabilir.

1. Kontrol Sistemi,
2. Gaz Sistemi,
3. Gaz Akış Debisi Ölçüm Sistemi,
4. Ergitme Sistemi,
5. Lüle,
6. Sıvı Metal Akış Borusu,
7. Atomizasyon Kulesi,
8. Parçacık Toplama Bölümü.



Şekil 3.1. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi (Aydın ve Ünal, 2007).



Şekil 3.2. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi'nin şematik gösterimi (Güleşen, 2013).

3.1.1. Kontrol sistemi

Kontrol panosu üzerine yerleştirilen göstergeler ve anahtarlar sayesinde atomizasyon işlem değişkenlerinin gözlenmesi ve kontrolü yapılmaktadır. Kontrol panosu ve deney öncesinde

kule içerisinde alınan görüntü Şekil 3.3'te verilmiştir. Kule gözetleme penceresine yerleştirilmiş bir video kameradan alınan görüntü bir ekran üzerinden takip edilerek atomizasyon işlemi gözlemlenmektedir (Ünal ve Aydın, 2008).



Şekil 3.3. Kontrol panosu ve atomizasyon takibi (Ünal ve Aydın, 2008).

3.1.2. Gaz sistemi

Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde atomizasyon gazı olarak azot gazı kullanılmaktadır. Azot gazının elde edilmesini sağlamak üzere birbirlerine paralel şekilde bağlanmış 12 adet yüksek basınçlı çelik tüp düzeni bulunmaktadır (Şekil 3.4.). Azot gazı düzeni 20 MPa işletme basıncına sahiptir. Düzenin çıkışında bulunan regülatör ve vanalar yardımıyla gaz basıncı istenen değerlere ayarlanabilmektedir (Ünal ve Aydın, 2008).



Şekil 3.4. 12 ayrı tüpten oluşan yüksek basınçlı gaz sistemi (Ünal ve Aydın, 2008).

3.1.3. Gaz akış debisinin ölçümü

Gaz atomizasyonu işleminde metal akış debisi ile gaz akış debilerinin kütleli olarak oranlanması ile metal/gaz akış oranı hesaplanır. Hesaplanan bu değer atomizasyonun verimliliği hakkında önemli bir parametredir. Bu nedenle kütleli gaz akış debisinin hassasiyetle tayini gereklidir. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kütleli debi ölçümleri SIEMENS marka Sitrans F C Massflo Mass 2100 tipi ölçüm cihaz ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.5.). Bu cihaz Coriolis prensibine dayanarak kütleli debi ölçümü yapmaktadır. Ölçüm hata payı % ± 0.1 mertebesindedir (Siemens, 2011: 14, 38).

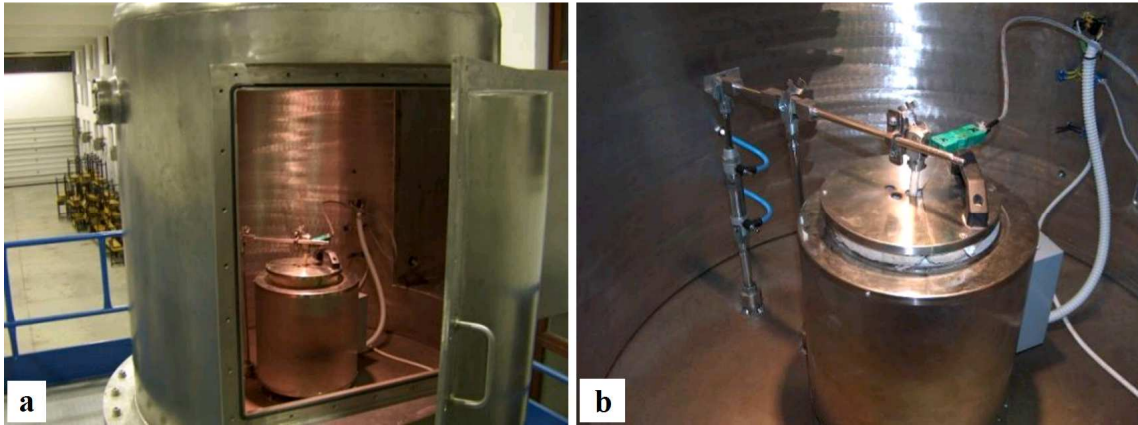


Şekil 3.5. Kütleli debi ölçüm cihazı (Ünal ve Aydın, 2008).

3.1.4. Ergitme sistemi

Ergitme işlemi atomizasyon ünitesi üzerinde bulunan ergitme odası içerisine yerleştirilen rezistanslı bir fırın ile gerçekleştirilmektedir. Ergitme odası kapatılarak içeriye basınç uygulanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Fırın içerisinde silisyum karbürden imal edilmiş ergitme potası bulunmaktadır. Fırının üst kapağı sıvı metalin sıcaklığını ölçmek için kullanılan ısı çiftinin geçebileceği şekilde delinmiştir. Böylelikle sıvı metal içerisine daldırılan ısı çifti yardımıyla sıvı metal sıcaklığı hassas bir şekilde ölçülebilmektedir. Sıvı metal sıcaklığı özellikle aşırı ısıtma uygulanan atomizasyon deneylerinde önemli bir parametre hâline gelmektedir.

Metal akış kontrolü pota içerisine yerleştirilen açma-kapama çubuğu ile gerçekleştirilmektedir. Pota içindeki deliği kapatacak çapta bir seramik boru, pnömomatik olarak kontrol edilen bir mekanizma yardımıyla hareket ettirilerek atomizasyon başlatılmak istenildiğinde veya diğer başka ölçüm amaçlarıyla sıvı metal akışı sağlanmaktadır (Şekil 3.6.) (Ünal ve Aydın, 2008).

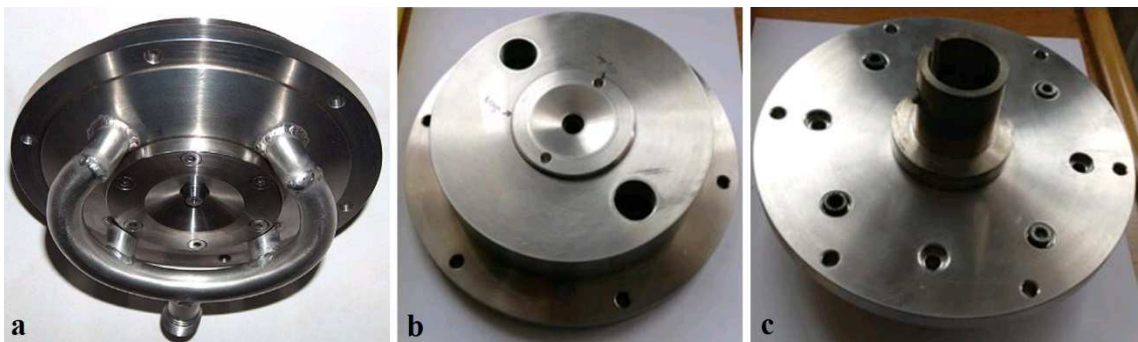


Şekil 3.6. Ergitme ünitesi a) ergitme odası, b) ergitme fırını (Ünal ve Aydın, 2008).

Deneysel çalışmalarda sahip olduğu düşük ergime sıcaklığı ve düşük yüzey geriliminden dolayı kalay atomize edilmiştir. Tekrarlanan her bir atomizasyon deneyi için 1 kg kadar kalay ergitilmiştir. Ergitme işlemi 400-420 °C dereceleri arasında gerçekleştirilmiştir. Kalayın ergime sıcaklığının yaklaşık 232 °C olduğu göz önünde bulundurulduğunda yaklaşık 200 °C aşırı ısıtma sağlandığı ifade edilebilir (Ünal, 2007a).

3.1.5. Lüle

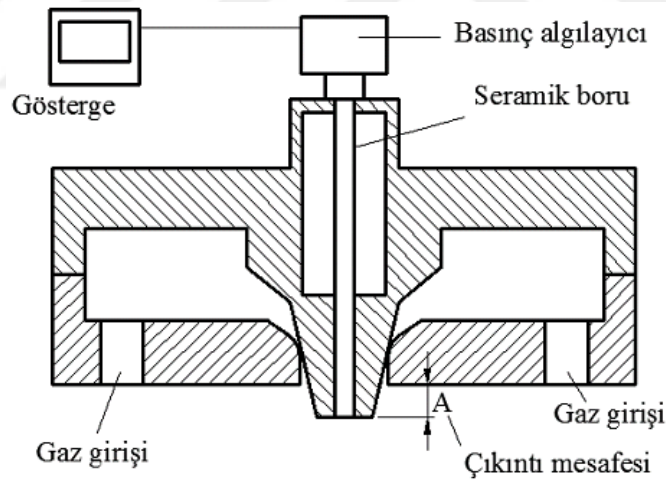
Yüksek basınçlı azot gazı sağlayan gaz sisteminden gelen gaz basıncının düşürülerek hızının artmasını sağlayan ve özel bir geometrik yapıya sahip olan bölüm lüle olarak adlandırılır. Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde kullanılan çeşitli lüle fotoğrafları Şekil 3.7'de verilmiştir. Atomizasyon lüleleri, atomizasyon sırasında sesüstü hızlara ulaşabilmeyi sağlamak için önce daralan ardından genişleyen bir geometride imal edilirler. Lülenin atomizasyon için en önemli parametreleri; boğaz açıklığı, çıkıntı mesafesi ve lüle çıkış (apeks) açısıdır.



Şekil 3.7. Atomizasyon lülesine ait görünüşler; a) örnek lüle-1, b) örnek lüle-2 (alt görünüm), c) örnek lüle-2 (üst görünüm) (Ünal ve Aydın, 2008; Güleşen, 2013).

3.1.6. Sıvı metal akış borusu

Ergitme potasında sıvı hâle getirilen metalin atomizasyon bölümüne iletimi sıvı metal akış borusu aracılığıyla sağlanmaktadır. Sıvı metal akış borusu içi boş silindirik şekilde seramik malzemeden üretilmiştir ve lüle merkezinde bulunmaktadır. Atomizasyon işleminin kararlı bir şekilde gerçekleşebilmesi için lüle içerisine yerleştirilen sıvı metal akış borusu uç noktasında meydana gelen basınç önemli bir etkidir (Ünal ve Aydın, 2008). Bununla birlikte ergitme potasındaki ergitilmiş metalin kalan miktarı da statik basınç oluşturarak akışın sürekliliği üzerinde etkili olmaktadır (Allimant vd., 2009). Deneysel çalışmalarda ergitilmiş sıvı metal akışı başladıktan sonra metal borusu ucundaki basıncın ölçülmesi mümkün olmamaktadır. Ancak, sadece gaz akışının sağlandığı durumlarda metal akış borusu ucundaki basınç deneysel olarak ölçülebilmektedir. Metal ile atomizasyon sırasında bu basıncın ölçümü mümkün olmadığından, sadece atomizasyon gazı verilerek uç basınç ölçümleri yapılır. Şekil 3.8’de kesit görünümü verilen lüle üzerinde basınç algılayıcısı, gaz giriş bölgeleri, lüle çıkıntı mesafesi ve seramik malzemeden imal edilmiş sıvı metal akış borusu görülebilmektedir (Güleşen, 2013).



Şekil 3.8. Daralan-genişleyen geometrili lülenin şematik gösterimi ve metal akış borusu uç basıncı ölçüm sistemi (Güleşen, 2013).

Burada metal akış borusunun üst tarafına yerleştirilen bir basınç algılayıcısından alınan sinyaller, sinyal alıcı tarafından değerlendirilerek mbar değerine çevrilir. Mbar cinsinden basınç değerleri gösterge ekranından okunabilmektedir. Farklı atomizasyon basınçlarında ölçülen değerler kaydedilerek uç basınç grafikleri çizdirilmektedir. Çizdirilen uç basınç grafikleri kullanılarak atomizasyonun hangi basınçlar altında kesintiye uğramadan gerçekleştirilebileceği bulunabilmektedir (Ünal ve Aydın, 2008).

3.1.7. Atomizasyon kulesi

Atomizasyonun gerçekleştiği ve oluşan parçacıkların katılarak toplandığı kapalı bölüm atomizasyon kulesi olarak adlandırılır. Atomizasyon kulesi en son katılan taneciklerin dahi kule cidarına temas etmeden önce yani havada iken katılmasını sağlayabilmek amacıyla yeterli genişlik ve yükseklikte üretilmiştir. Atomizasyon kulesi paslanmaz çelikten imal edilmiş olup üzerinde üç adet gözetleme penceresi bulunmaktadır. Pencerelemin amacı görüntü almak amacıyla kamera yerleştirilebilmesine ve gerekli durumlarda gözlem yapılabilmesine olanak sağlamaktır.

3.1.8. Toz toplama kabı

Toz toplama kabı (Şekil 3.9.) 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 konumlandırılmıştır. Her deney sonrasında toz toplama kapları ve ünitenin alt kısmı sökülerek tozlar alınmakta ve kulenin iç yüzeyleri temizlenip yeni bir deney için tekrar kapatılarak hazır hâle getirilmektedir (Ünal ve Aydın, 2008).

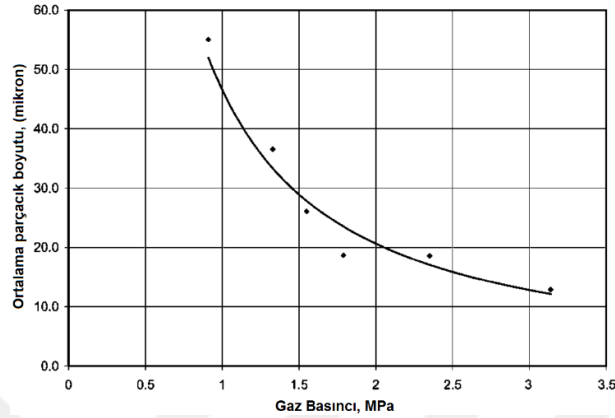


Şekil 3.9. Toz toplama kabı ve siklonun görünümü (Ünal ve Aydın, 2008).

3.2. Deneysel Veriler

Kullanılan lüle tasarımı için ortalama parçacık boyutu " d_{50} ", atomizasyon gazının basıncı ile ayarlanır. Atomizasyon basıncı arttıkça ortalama toz boyutu küçülür. Tez çalışması kapsamında yapılan sayısal modellemelerin deneysel verilerle karşılaştırılabilmesi için laboratuvar ortamında yakından eşlemeli lüle kullanılarak yapılan gaz atomizasyonu sonuçları kullanılmıştır. Deneysel yollarla elde edilen sonuçlara göre atomizasyon gaz basıncının ortalama parçacık boyutu üzerindeki etkisi Şekil 3.10'daki grafik ile gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde

atomizasyon gaz basıncı 0,9 MPa ile 3,1 MPa aralığında değiştirildiğinde ortalama parçacık boyutunun 55,4 μm 'den 12,9 μm 'ye kadar düştüğü görülmektedir (Ünal, 2007a).



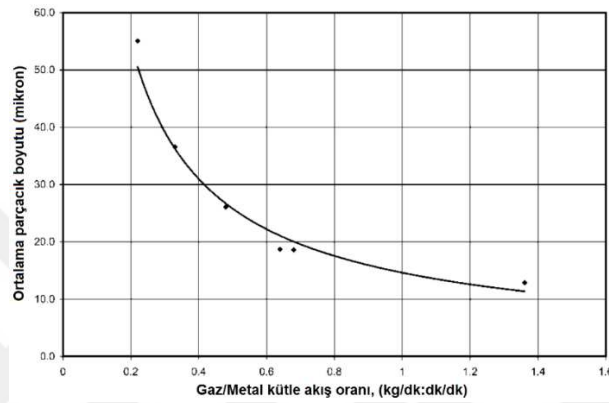
Şekil 3.10. Atomizasyon gaz basıncının ortalama parçacık boyutu üzerindeki etkisi (Ünal, 2007a).

Atomizasyon gazı olarak azot gazının kullanıldığı deneylerde kalay metali ergitilerek toz hâline getirilmiştir. Kalay metalinin kullanılmasının nedeni düşük yüzey gerilimi nedeniyle kolaylıkla atomize edilebilir bir malzeme olmasıdır. Kullanılan lülede metal akış borusu 5 mm çığıntıya sahiptir. Lüle dar boğaz alanı 8,5 mm² iken, lüle uç açısı 26 derecedir. Deneysel çalışmalar için yaklaşık 1 kg ağırlığındaki saf kalay ergitilerek 0,91 MPa ile 3,14 MPa basınç aralığındaki 6 farklı basınç değerinde ortalama parçacık boyutu değerleri elde edilmiştir. Bunun için ergitme potasına yerleştirilen saf kalay, 400-420 °C sıcaklık aralığında aşırı ısıtma yapılarak ergitilmiş ve atomizasyona hazır hâle getirilmiştir. Ergitilmiş sıvı metal akışı başlatılmadan önce gaz akışı başlatılmış, daha sonra sıvı metal akışına izin verilmiştir. Atomizasyon gaz akış miktarının ergitilmiş kalay miktarına oranı 0,9 MPa basınç için yaklaşık 0,22 olarak ölçülmüş, 3,1 MPa gaz basıncı altında yapılan atomizasyonda yaklaşık 1,36 değerine çıkmıştır (Çizelge 3.1.) (Ünal, 2007a).

Çizelge 3.1. Azot gazı kullanılarak yapılan kalay atomizasyonunda elde edilen deneysel sonuçlar (Ünal, 2007a).

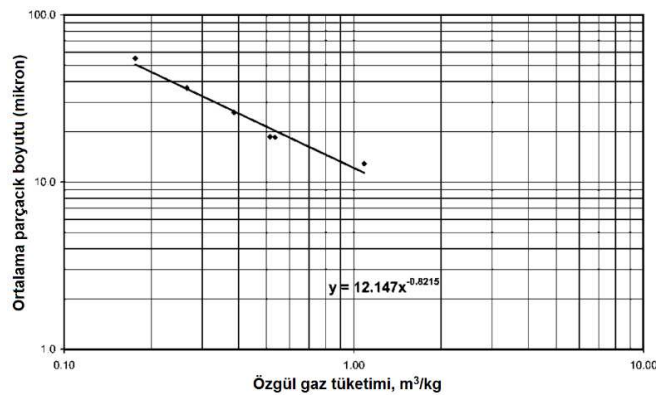
Gaz Basıncı (MPa)	D ₅₀ (μm)	Sıvı Metal Akış Miktarı (kg dk ⁻¹)	Gaz/Metal Kütle Akış Oranı
0,91	55,0	4,90	0,2150
1,33	36,6	4,55	0,3296
1,55	26,1	3,79	0,4749
1,79	18,7	3,45	0,6376
2,35	18,6	4,39	0,6833
3,14	12,9	3,10	1,3548

Gaz/metal akış miktarları oranının ortalama parçacık boyutuna etkisi Şekil 3.11’de verilen grafikte görülmektedir. Buna göre artan gaz/metal akış oranıyla birlikte ortalama parçacık boyutu giderek azalmaktadır. Ortalama parçacık boyutundaki bu düşüş; gaz/metal akış oranının nispeten düşük değerleri için daha ani olurken, gaz/metal akış oranının nispeten yüksek olduğu değerlerde ise giderek zayıflamaktadır. Gaz/metal akış oranı birimsiz bir sayı olup 0,91 MPa basınç altında yaklaşık olarak 0,215 mertebelerindedir.



Şekil 3.11. Gaz/metal kütle akış oranının ortalama boyuta etkisi (Ünal, 2007a).

Özgül gaz tüketiminin (m^3/kg) ortalama parçacık boyutuna etkisi Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Buna göre artan atomizasyon gazı tüketiminin ortalama parçacık boyutunu düşürdüğü rahatlıkla ifade edilebilir.



Şekil 3.12. Özgül gaz tüketiminin (m^3/kg) ortalama boyuta etkisi (Ünal, 2007a).

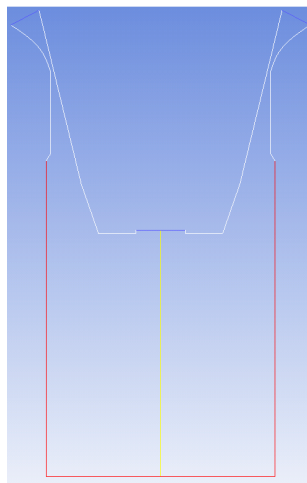
4. LÜLENİN HAD MODELLEME YAKLAŞIMI

Gaz atomizasyonuna yönelik tek-fazlı ve iki-fazlı akış simülasyonları ANSYS Fluent yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Yazılımın gerektirdiği işlem hacmini azaltmak için atomizasyon lülesi aksel simetrik olarak modellenmiştir. Lüle geometrisinin oluşturulması ve ağ oluşturma işlemi Gambit yazılımında yapılmıştır. İki boyuttaki akış modeli için genel olarak 30 µm kenar uzunluğuna sahip üçgen tipi hücreler kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Lüle boğazı gibi bazı kritik bölgelerde daha ince taneli ağ uygulanmıştır. Ağ oluşturma işleminin ardından elde edilen dosyalar çözücü yazılıma aktarılmıştır.

Atomizasyon modeli sayısal olarak çözdürülürken; sonuçların doğruluğunu sağlamak ve çözümün yakınsamasında karşılaşılan sorunlardan kaçınmak için çok küçük zaman aşamaları kullanılmıştır (Aydın ve Ünal, 2011). Küçük zaman aşamalarının kullanılması simülasyonlardaki hesaplama süresi önemli ölçüde artırmıştır.

4.1. Model Geometrisinin Oluşturulması

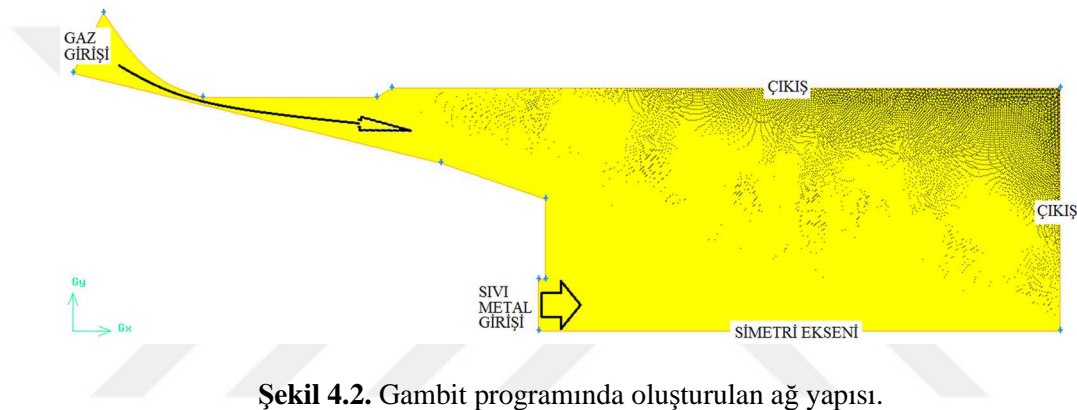
HAD çözümleme öncesinde tanımlanan lüle geometrisi Gambit yazılımında oluşturulmuştur. Simülasyonlar sırasında yapılan işlem sayısını en aza indirmek için, atomizasyon kulesi tamamıyla ele alınmamış olup, daha küçük bir bölgeye indirgenerek basitleştirilmiştir (Şekil 4.1.). Lüle geometrisinin simetrikliğinden yararlanılarak atomizasyon haznesinin aksel olarak yarısı modellenmiştir. Modellenen atomizasyon lülesi sesüstü karakterde olduğu için daralan-genişleyen bir yapıdadır. Lüleye ait boğaz bölgesi 0,2 mm genişliğindedir.



Şekil 4.1. Modellenen lüle geometrisi.

4.2. Ağ Yapısının Oluşturulması

Ağ yapısının oluşturulması için Gambit yazılımı kullanılmıştır. Gambit yazılımında uygun bir ağ yapısının oluşturulması sayısal çözümün önemli bir parçasıdır. Çünkü ağ yapısının kalitesi çözücü yazılımın doğruluğu üzerinde etkilidir. Uygun bir ağ yapısı, belirli alanlarda daha ince bir ağa sahip olmayı gerektirir. Böylece akış daha ayrıntılı bir şekilde algılanabilir (Kottala, 2011). Bu nedenle atomizasyon gazının geçtiği boğaz bölgesinde daha ince ağ yapısı oluşturulmuştur. Sonuç olarak lüle geometrisi aksel simetrik olarak iki boyutta modellenirken toplamda 346000 adet hesaplama hücresi üretilmiştir (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Gambit programında oluşturulan ağ yapısı.

4.3. Sayısal Çözüm Teorisi

ANSYS Fluent yazılımında kütle korunumu ve momentum korunumu denklemleri tüm akış problemleri için çözülürken, enerjinin korunumu denklemi sadece ısı transferinin olduğu akışlarda ve sıkıştırılabilir akışlarda çözülür. Akışın türbülanslı olması durumunda kütle korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu denklemlerine ilave olarak taşınım denklemleri de çözülür (ANSYS Inc., 2013b).

4.3.1. Kütle korunumu

Kütle korunumu denklemi süreklilik denklemi olarak da bilinir. Eşitlik 4.1'de verilen denklem süreklilik denkleminin genel formudur. Verilen denklem hem sıkıştırılabilir akışlar hem de sıkıştırılmayan akışlar için geçerlidir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (4.1.)$$

Eşitlik 4.1'deki S_m birimi $\text{kg/m}^3\text{-s}$ olan kütle kaynak terimi olarak kullanılmaktadır. Akış problemindeki süreklilik gösteren faza, akış dışından dâhil edilen herhangi bir ilave fazi denklemde tanımlamak için kullanılır.

İki boyutlu ve herhangi bir eksene göre simetrik geometriler için süreklilik denklemi Eşitlik 4.2'de verilen şekilde yeniden yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (4.2.)$$

Burada; x aksenal koordinatı, r radyal koordinatı, v_x aksenal hız değerini, v_r ise radyal hız değerini göstermektedir (ANSYS Inc., 2013a).

4.3.2. Momentumun korunumu

İvmesi sıfıra eşit olan bir referans sisteminde momentumun korunumu denklemi Eşitlik 4.3'te verilen şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\overline{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.3.)$$

Burada; p statik basıncı, $\overline{\overline{\tau}}$ gerilim tensörünü, ρ yer çekimi nedeniyle oluşan momenti, \vec{F} ise dışarıdan etki edebilecek diğer momentlerin toplamını ifade etmektedir.

Eşitlik 4.3'teki gerilim tensörü ($\overline{\overline{\tau}}$) Eşitlik 4.4 ile hesaplanır.

$$\overline{\overline{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4.4.)$$

Burada; μ moleküler viskoziteyi, I birim tensörünü, eşitliğin sağ tarafındaki ikinci terim ise genişleme etkisini göstermektedir.

İki boyutlu eksene göre simetrik akışlar için aksenal momentum korunumu denklemi Eşitlik 4.5'teki gibi, radyal momentum korunumu denklemi ise Eşitlik 4.6'daki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (4.5.)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) \\
& = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} \\
& \quad + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r
\end{aligned} \tag{4.6.}$$

Burada, v_z eksene göre simetrik olan girdap hareketinin hızıdır. $\nabla \cdot \vec{v}$ teriminin hesaplanması Eşitlik 4.7 ile verilmiştir (ANSYS Inc., 2013a).

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \tag{4.7.}$$

4.3.3. Türbülans

Türbülanslı akışların doğrudan sayısal simülasyonlarının yapılarak çözümlenmeleri teorik olarak mümkün olsa da pratikte türbülanslı akışların çözülebilmeleri için doğruluğu kanıtlanmış bazı modellere ihtiyaç duyulur.

Birçok mühendislik probleminde türbülanslı akışlar ile karşılaşılır. Her bir problem, türbülansın oluşumu ve gelişimi yönünden kendine özgü bir karaktere sahiptir. Bu nedenle çözülmek istenen probleme en uygun türbülans modelinin seçilmesini bir zorunluluk hâlini almaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde problemlerin çözümü için çeşitli türbülans modelleri geliştirilmiştir. Sayısal olarak çözülmek istenen probleme uygun türbülans modelinin belirlenebilmesi için modelin kabiliyet ve sınırlamalarının net bir şekilde bilinmesi şarttır (ANSYS Inc., 2013a). Bugüne kadar yapılan bazı akademik çalışmalarda gaz atomizasyonu işleminin sayısal çözümünde türbülans modeli olarak “Realizable k- ϵ ” ve Reynolds Stres Modelleri (RSM) kullanılmıştır. Her iki modelin türbülanslı akışlar için makul sonuçlar verdiği ayrı ayrı tespit edilmiştir. Ancak RSM model kullanıldığında gaz atomizasyonu işlemindeki lüle uç basıncı değerlerinin, k- ϵ modeline nazaran daha yüksek hassasiyetle hesaplandığı görülmüştür (Güleşen, 2013; W. Zhao, 2012).

Reynolds yaklaşımına göre; Navier-Stokes denklemlerindeki anlık çözüm değişkenleri, ortalama bileşen ve değişken bileşen olmak üzere iki bileşene ayrılır. Hız değişkeni için bileşenler Eşitlik 4.8’deki gibidir.

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \tag{4.8.}$$

Eşitlik 4.8’de hesaba dâhil edilen \bar{u}_i terimi ortalama bileşeni; u_i' ise değişken bileşeni temsil etmektedir ($i = 1, 2, 3$).

Benzer şekilde; basınç ve diğer skaler büyüklükler için Eşitlik 4.9 yazılabilir.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (4.9.)$$

Burada ϕ ; basınç, enerji veya fazların konsantrasyonu gibi skaler büyüklükleri temsil etmektedir.

Eşitlik 4.8 ve 4.9'da verilen hesaplama formatının diğer akış değişkenleri için süreklilik ve momentum denklemlerinde yerine yazılması ve bir zaman ortalamasının alınmasıyla topluluk-ortalama momentum denklemleri elde edilir. Bu momentum denklemleri kartezyen tensör biçiminde Eşitlik 4.10. ve Eşitlik 4.11'deki gibi yazılabilirler.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (4.10.)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (4.11.)$$

Eşitlik 4.10. ve Eşitlik 4.11. genel olarak Reynolds-ortalama Navier Stokes denklemleri olarak adlandırılırlar. Anlık Navier-Stokes denklemleri ile aynı forma sahip olmakla birlikte hız ve diğer değişkenler topluluk-ortalama (veya zamana göre ortalama) değerlerini temsil etmektedir. Türbülans etkilerini temsil eden ilave terimler de denkleminde görülebilmektedir.

Eşitlik 4.11'de hesaplamaya dâhil edilen $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ Reynolds gerilim terimidir. Eşitliği sayısal olarak çözebilmek için Reynolds gerilim terimleri modellenmelidir.

Türbülans kinetik enerjisi (k) için çözdürülen aşağıdaki taşınım denklemi sayesinde Reynolds gerilimleri için sınır koşulları elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon (1 + 2M_t^2) + S_k \quad (4.12.)$$

Burada, $\sigma_k = 0,82$, S_k ise kaynak terimidir. Bu denklemin çözümü ile elde edilen türbülans kinetik enerji değerleri sadece sınır koşulları için kullanılır. Diğer durumlarda türbülans kinetik enerjisi, Reynolds gerilim tensörünü kullanarak Eşitlik 4.13. ile hesaplanır.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j} \quad (4.13.)$$

Skaler büyüklükteki türbülans yitim hızı Eşitlik 4.14. ile verilen taşınım denklemi ile hesaplanır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} [P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}] \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4.14.)$$

Burada, $\sigma_\varepsilon = 1,0$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 3} = 1,92$ eşitlikleri mevcuttur. $C_{\varepsilon 3}$ katsayısı yer çekimi vektörüne göre yerel akış doğrultusunun fonksiyonu olarak hesaplanır. S_ε ise kaynak terimidir.

Türbülans viskozitesi Eşitlik 4.15. ile hesaplanır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.15.)$$

Burada C_μ model sabiti olarak kullanılmaktadır. Hesaplamalarda C_μ değeri 0,09 olarak alınmaktadır (ANSYS Inc., 2013a).

Isı ve kütle taşınımı modeli

RSM yaklaşımı kullanıldığında türbülanslı ısı transferi, türbülanslı momentum transferi kavramına benzer şekilde modellenir. Modellenen enerji denklemi Eşitlik 4.16'da verilen şekilde hesaplanır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] + S_h \quad (4.16.)$$

Burada E toplam enerjii, Pr_t Prandtl sayısını göstermektedir. Çözüm yapılırken Prandtl (Pr_t) sayısının değeri program tarafından 0,85 olarak alınmakta olup gerektiği takdirde bu değer değiştirilebilmektedir.

Eşitlik 4.16'da $(\tau_{ij})_{eff}$ “deviatoric” gerilme tensörünü göstermektedir. “Deviatoric” gerilme tensörü; gerilme tensöründen hidrostatik gerilme tensörünü çıkarılarak bulunur ve Eşitlik 4.17. ile hesaplanır. $(\tau_{ij})_{eff}$ değeri yoğunluk tabanlı çözücüde varsayılan olarak hesaplamaya dâhil edilirken, basınç tabanlı çözücüde opsiyoneldir ve sadece viskozite menüsünden seçildiği takdirde hesaplamaya katılmaktadır (ANSYS Inc., 2013a).

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4.17.)$$

Reynolds gerilimleri taşınım denklemi

Reynolds gerilimlerinin $(-\rho\overline{u'_i u'_j})$ taşınım denklemi Eşitlik 4.18'de verilen şekilde hesaplanmaktadır (ANSYS Inc., 2013a).

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) \\
& = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + p'(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j) \right] \\
& + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) \\
& + \rho' \left(\frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k} - 2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{ikm}) \\
& + S_{user}
\end{aligned} \tag{4.18.}$$

4.3.4. Çok-fazlı akış

Doğada ve mühendislik uygulamalarında birbirinden farklı çok-fazlı akış çeşitleriyle karşılaşılır. Her maddenin gaz, sıvı ve katı hâlini tanımlamada kullanılan fiziksel faz kavramının yanı sıra, çok-fazlı akış sistemlerindeki faz kavramı daha geniş bir anlama sahiptir. Çok-fazlı akıştaki herhangi bir faz; akışa karşı belirli bir atalet gösteren, akışla ve içine daldığı potansiyel alanla belirli bir etkileşimi olan belirli bir çeşit madde olarak tanımlanabilir. Örneğin, aynı maddeden yapılmış farklı boyutlardaki katı parçacıklara değişik fazlarmış gibi davranılabilir, çünkü aynı boyuttaki her grup parçacığın akış alanına karşı benzer bir dinamik tepkisi vardır.

Çok-fazlı akış rejimleri

Çok fazlı akış rejimleri 4 kategoride toplanabilir.

- Gaz-sıvı veya sıvı-sıvı,
- Gaz-katı,
- Sıvı-katı,
- Üç fazlı akışlar (Üç fazlı akışlar diğer akış rejimlerinin çeşitli kombinasyonlarından oluşur) (ANSYS Inc., 2013a).

Gaz-sıvı veya sıvı-sıvı akışlar

ANSYS Fluent yazılımında gaz-sıvı veya sıvı-sıvı hâldeki çok-fazlı akışlar: kabarcıklı akış, parçacıklı akış, slug akış ve katmanlı/serbest-yüzeyle akış birkaç farklı akış rejimi şeklinde ele alınır.

- Kabarcıklı akış: Sürekli bir sıvının içinde gaz veya sıvı kabarcıklarının akışıdır.
- Parçacık akışı: Sürekli bir gazın içinde sıvı parçacıklarının akışıdır.
- Slug akış: Sürekli bir sıvının içinde büyük kabarcıklı akıştır.
- Katmanlı/serbest-yüzeyle akış: Birbirlerinden, net bir şekilde tanımlanmış bir ara-yüzey ile ayrılmış olup birbiri içinde karışmayan sıvıların akışıdır (ANSYS Inc., 2013a).

4.3.5. Çok-fazlı modelleme yaklaşımları

ANSYS Fluent yazılımında çok-fazlı akışların sayısal çözümlenmeleri için iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlar;

- Euler-Lagrange Yaklaşımı,
- Euler-Euler Yaklaşımı.

4.3.6. Euler-Euler yaklaşımı

Bu yaklaşımda, farklı fazlara matematiksel olarak birbirlerine nüfuz eden bir bütün şeklinde davranılır. Bir fazın kapladığı bir hacmin başka bir faz tarafından işgal edilemeyeceğinden hareketle bir fazın hacim oranı tanımlanabilir. Tanımlanan hacim oranlarının uzay zamanın sürekli bir fonksiyonu olduğu varsayılabilir ve toplamları birine eşittir. Her faz için korunum denklemleri çıkarılarak, tüm fazlar için benzer yapısı olan bir takım denklemler elde edilir. Ampirik bilgilerden elde edilen kurucu ilişkilerden yararlanılarak veya tanecikli akışlarda kinetik teori uygulanarak bu denklemler oluşturulur. ANSYS Fluent yazılımında 3 farklı Euler-Euler çok-fazlı akış çözümleme modeli mevcuttur. Bunlar;

- The Volume of Fluid (VOF) Model (Akışkan Hacmi Modeli),
- The Mixture Model,
- The Eulerian Model,

olarak sıralanabilir (ANSYS Inc., 2013a).

4.3.7. Akışkan hacmi modeli

İki-fazlı akışlarda fazlar arası yüzey izleme yöntemleri arasında, birincil atomizasyonu simüle etmek için akışkan hacmi (VOF) modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, Navier-Stokes denklemleri hem sıvı hem de gaz fazları için çözdürülür (Jadidi vd., 2015). Akışkan hacmi modeli, sabit bir Eulerian ağ yapısına uygulanan yüzey takibi tekniğidir. Birbirleri arasındaki ara-yüzeyin konumunun bulunmaya çalışıldığı, birbirleri içinde karışmayan, iki veya daha fazla sıvı faz için tasarlanmıştır. VOF modeli ile, birbirlerine karışmayan iki veya daha fazla

sıvı modellenerek sıvıya ait momentum denklemleri çözülür ve her bir sıvının hacim oranlarının takibi yapılabilir.

VOF modelinin tipik uygulamaları olarak;

- sıvı jetlerinin parçalanması,
- sıvı içerisinde iri kabarcıkların hareketi,
- baraj yıkımının ardından oluşacak büyük su kütlelerinin hareketi,
- herhangi bir gaz ve sıvı ara-yüzeyinin geçici veya sürekli olarak takibi verilebilir

(ANSYS Inc., 2013a).

VOF modelinin limitleri

ANSYS Fluent yazılımındaki VOF modeline yönelik bazı kısıtlamalar söz konusudur. ANSYS Fluent yazılımının VOF modeli ile;

- Basınç tabanlı çözdürücü kullanılabilir, yoğunluk-tabanlı çözdürücü kullanılamaz,
- Her bir kontrol hacmi ya bir adet sıvı fazla ya da sıvı fazların kombinasyonu ile dolu olmalıdır. Modellenen alan için herhangi bölgenin boş olmasına (yani orada hiçbir akışkan fazın olmamasına) VOF modelinde izin verilmez,
- Sadece fazlardan bir tanesi sıkıştırılabilir ideal gaz olarak tanımlanabilir. Ancak, UDF (User-defined Function) kullanıldığında sıkıştırılabilir sıvılar üzerinde herhangi bir limit yoktur,
- Sürekli akıp giden periyodik akışlar (belirli bir kütle akış miktarı veya belirli bir basınç düşüşü) VOF modeli kullanıldığında modellenemezler,
- VOF açık planı ile birlikte ikinci mertebeden örtük zaman adımlama formülasyonu kullanılamaz (ANSYS Inc., 2013a).

Sürekli ve geçici VOF hesaplamaları

ANSYS Fluent yazılımındaki VOF formülasyonu genellikle zamana bağlı çözümler için kullanılır. Ancak, sadece kararlı hâl çözümü elde etmek de mümkündür. Kararlı hâl VOF hesaplamaları, eğer oluşturulan model başlangıç koşullarından bağımsız ise veya içeri akışlar için belirgin hudutlar mevcutsa makul olur. Örneğin, dönen bir kap içindeki sıvının serbest yüzeyi sıvının başlangıç seviyesine bağımlı olduğundan böyle bir problem çözülürken zamana bağlı formülasyon kullanılır. Öte yandan, üst bölgesinde ayrı bir hava girişi ve bir miktar hava olan bir kanaldaki su akış problemi kararlı hâl formülasyonu ile çözülebilir.

VOF formülasyonu iki veya daha fazla sıvının (veya fazın) birbirine nüfuz etmediği kabulüne dayanır. Modele eklenen her bir faz için ilave bir değişken üretilir. Bu değişken,

hesaplama hücresindeki o fazın hacim oranıdır. Her bir kontrol hacmi içinde, tüm fazların hacim oranlarının toplamı 1'e eşittir. Bölgeler, tüm değişkenler ve özellikler için tüm fazlar tarafından ortaklaşa kullanılır ve her bir lokasyondaki her bir fazın hacim oranı bilindiğinden hacimsel ortalama değerlerini temsil ederler. Bu nedenle, hacim oran değerlerine bağlı olarak her bir hücredeki değişkenler ve özellikler herhangi bir fazı doğrudan temsil edebileceği gibi fazların karışımını da temsil edebilir. Başka bir deyişle; eğer bir hücredeki herhangi bir q^{th} akışkanının hacim oranı (α_q) ifade edilirse üç farklı koşul olasıdır. Bunlar;

- $\alpha_q = 0$: Hücrede q^{th} akışkanı yoktur,
- $\alpha_q = 1$: Hücre tamamen q^{th} akışkanı ile doludur,
- $0 < \alpha_q < 1$: Hücrede q^{th} akışkanı ile diğer akışkanlardan biri veya daha fazlası ile ara yüzey içerir.

Hacim oranının (α_q) lokal değerine bağlı olarak, uygun özellikler ve değişkenler model içindeki her bir kontrol hacmine tahsis edilir (ANSYS Inc., 2013a).

Hacim oran denklemi

Fazlar arasındaki ara-yüzeyin veya ara-yüzeylerin takibi, bir veya daha fazla fazın hacim oranı için süreklilik denkleminin çözümü ile elde edilir. q^{th} fazı için, bu denklem Eşitlik 4.19'da verilen hâli alır.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (4.19.)$$

Burada; \dot{m}_{qp} faz q'dan faz p'ye kütle transferi, \dot{m}_{pq} ise faz p'den faz q'ya kütle transferidir.

Eşitliğin sağ tarafında yer alan ve S_{α_q} ile ifade edilen kaynak teriminin varsayılan değeri sıfırdır. Ancak her bir faz için sabit bir değer veya user-defined mass source değeri tanımlanabilir.

ANSYS Fluent yazılımında geometrik yeniden yapılandırma yaklaşımında birincil faz için hacim oran denklemi çözülmez. Bunun yerine birincil fazın hacim oranı Eşitlik 4.20'de verilen sınırlama ile hesaplanır.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4.20.)$$

Hacim oran denklemi örtük veya açık zaman ayrıklaştırılması ile çözülebilir (ANSYS Inc., 2013a).

Örtük plan

Zaman ayrıklaştırılması için örtük plan kullanıldığında, ANSYS Fluent'deki standart sonlu-fark interpolasyon planları kullanılarak tüm hücreler için (ara-yüzeylerdeki akışları da içerecek şekilde) yüzey akışları elde edilir. ANSYS Fluent'in standart sonlu-fark interpolasyon planları şunlardır: QUICK, İkinci Derece "Upwind" ve Birinci Derece "Upwind", ve Modified HRIC.

Eşitlik 4.21'de mevcut zaman adımı için hacim oran değerlerine ihtiyaç duyulduğundan (açık plan denkleminde ise bir önceki zaman adımına ihtiyaç duyulur), her bir zaman adımında ikincil faz hacim oranlarının her biri için standart bir skaler taşınım denklemi tekrarlanarak çözülür.

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V \quad (4.21.)$$

Örtük plan, zamana bağlı ve kararlı hâl hesaplamalarının her ikisi için de kullanılabilir.

Açık plan

Açık plan yaklaşımında, ANSYS Fluent yazılımının standart sonlu-fark interpolasyon planları bir önceki zaman adımında hesaplanan hacim oranı değerlerine uygulanır (Eşitlik 4.22.).

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V \quad (4.22.)$$

Burada; V hücrenin hacmi, $n + 1$ yeni (mevcut) zaman adımı için indeksi, n bir önceki zaman adımı için indeksi, U_f yüzeye doğru, normal hıza dayanan hacim akışını, $\alpha_{q,f} = q^{th}$ hacim oranının yüzey değerini ifade eder. $\alpha_{q,f}$ ifadesinin değeri; birinci veya ikinci derece "upwind", QUICK, modifiye edilmiş HRIC, "compressive", veya CICSAM planlarıyla hesaplanır.

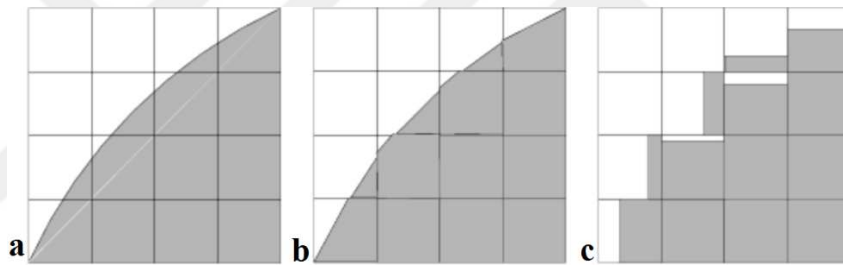
Bu formülasyon, örtük planın aksine, taşınım denkleminin her bir zaman adımı sırasında iterative bir çözümünü gerektirmez. Ayrıca; açık plan kullanıldığında, zamana bağlı çözücü kullanılmalıdır.

Zaman ayrıklaştırılması için açık plan kullanıldığında yüzey akışları interpolasyonu yapılabilir. Bu ise ya ara-yüzey yeniden yapılandırma kullanılarak ya da bir sonlu hacim ayrıklaştırma planı kullanarak mümkün olabilir (ANSYS Inc., 2013a).

Ara-yüzey yakınında interpolasyon

ANSYS Fluent yazılımının kontrol-hacmi formülasyonu, kontrol hacmi yüzeyleri içinden geçen iletim ve difüzyon akışlarının hesaplanmasını ve kaynak terimleri ile kontrol hacminin kendi içinde dengelenmesini gerektirir.

ANSYS Fluent yazılımında geometrik yeniden yapılandırma ve "donor-accepted scheme" kullanırken, iki fazın ara-yüzeylerine yakın yerlerdeki hücrelere özel bir interpolasyon işlemi uygulanır. Şekil 4.3'te gerçek bir ara-yüzey şekli ve hesaplamalar esnasında iki farklı yöntemin öngördüğü ara-yüzeyler gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Ara-yüzey hesaplamaları a) gerçek ara-yüzey şekli, b) geometrik yeniden yapılandırma (parçalı doğrusal) yaklaşımı ile gösterilen ara-yüzey şekli, c) "donor-acceptor" yaklaşımı ile gösterilen ara-yüzey şekli (ANSYS Inc., 2013a).

Açık plan ve örtük plan, ara-yüzey içeren bu hücrelerde özel bir hesaplama yapmak yerine, bir faz ya da diğeriyle tamamen doldurulmuş hücrelerle aynı işlemi yapar. Ara-yüzey bulunduran hücrelere özel bir işlem yapılmaması nedeniyle ara-yüzeyler net bir şekilde görüntülenememektedir (ANSYS Inc., 2013a).

ANSYS Fluent yazılımında aşağıdaki yöntemler kullanıldığında ara-yüzeylerin bulunduğu hücrelere özel işlem yapılmamakta dolayısıyla gaz atomizasyonu modellenirken üretilen parçacıklar (metal toz taneleri) hiçbir zaman görünür hâlde olamamaktadır.

- Standard upwind (First-Order Upwind Scheme)
- Second-order (Second-Order Upwind Scheme)
- QUICK (QUICK Scheme)
- Modified HRIC (Modified HRIC Scheme)
- Compressive (The Compressive and Zonal Discretization Schemes)

- CICSAM Scheme (The Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes)

Geometrik yeniden yapılandırma yaklaşımı

İki-fazlı akışlarda fazlar arası ara-yüzeylerin takip edilmesinde kullanılan geometrik yeniden yapılandırma tekniği ilk defa 1970'lerin sonlarında geliştirilmiştir (Deshpande, 2014). ANSYS Fluent yazılımının geometrik yeniden yapılandırma yaklaşımında, ara-yüzey takibi hacim oranının 0 veya 1'den farklı olduğu hücreler için yapılır (Raynal ve Harter, 2001). Herhangi bir hücre tamamen fazlardan biriyle dolu olduğunda yüzey akışlarını elde etmek için kullanılan standart interpolasyon planı kullanılır. Ancak hücre iki fazın ara-yüzeyine yakın olduğunda ise geometrik yeniden yapılandırma yaklaşımı kullanılır.

Geometrik yeniden yapılandırma yaklaşımı, sıvılar arasındaki ara-yüzeyi gösterirken parçalı doğrusal bir yaklaşım kullanır. Bu yaklaşım ANSYS Fluent yazılımındaki en hassas yaklaşımdır ve genel olarak yapılandırılmamış ağ yapılarına uygulanabilir. Geometrik yeniden yapılandırma yaklaşımı, Youngs'un 1982 yılında yaptığı çalışmada yapılandırılmamış ağ yapıları için genelleştirilmiştir. Buna göre; iki sıvı arasındaki ara-yüzeyin her hücre içinde doğrusal bir eğime sahip olduğu varsayılarak ve bu doğrusal şekil kullanılarak, sıvının hücreler boyunca akışı hesaplanır.

Geometrik yeniden yapılandırma yaklaşımı kullanılırken ilk adım doğrusal ara-yüzeyin, içi kısmen dolu olan hücrelerin merkezlerine göre konumunun hesaplanmasıdır. Bu hesaplama hacim oranı ve türevi bilgilerine dayanılarak yapılır. İkinci adım, hesaplanan doğrusal ara-yüzeyi ve hücre yüzeyindeki normal ve teğet hız dağılımı verilerini kullanarak her yüzey boyunca sıvı akışını hesaplamaktır. Üçüncü adım, bir önceki adımda hesaplanan akışların dengelerini kullanarak her hücredeki hacim oranını hesaplamaktır.

Geometrik yeniden yapılandırma yaklaşımı kullanıldığında, zamana bağlı çözüm uygulanmak zorundadır. Ayrıca kullanılan ağ yapısı uygun ise yani modellenen alanların birleşme yerindeki hücrelerin nokta yerleri birbirleriyle aynı yerlerdeyse, model alanı içinde çift yüzlü (kalınlığı sıfır olan) duvar olmadığından emin olunmalıdır. Eğer varsa, modellemeye geçilmeden önce bunların birbirlerinden ayrılması gerekmektedir (ANSYS Inc., 2013a).

Malzeme özellikleri

Taşınım denklemlerinde var olan özellikler, her bir kontrol hacmi içinde yer alan herhangi bir bileşene ait fazların varlığı ile tayin edilir. Örnek olarak, iki-fazlı bir sistemde fazlar

1 ve 2 sembolleri ile temsil ediliyorsa ve eğer ikinci fazın hacim oranı takip ediliyorsa, her bir hücrenin yoğunluğu Eşitlik 4.23. ile hesaplanır.

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (4.23.)$$

Genel olarak n-fazlı bir sistem için hacim oranı ortalama yoğunluğu Eşitlik 4.24. ile hesaplanır.

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (4.24.)$$

Diğer malzeme özellikleri de (örneğin viskozite) bu şekilde hesaplanır (ANSYS Inc., 2013a).

Momentum denklemi

Hesaplama bölgesi boyunca tek bir momentum denklemi çözdürülür ve sonuç olarak bulunan hız vektör alanı fazlar arasında ortaklaşa kullanılır. Eşitlik 4.25'te verilen momentum denklemi; ρ ve μ özellikleri üzerinden, tüm fazların hacim oranlarına bağlıdır.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.25.)$$

Ortak-alanlar yaklaşımının bir kısıtlaması; fazlar arasında büyük hız farklılıklarının olduğu durumlarda, ara-yüzeye yakın yerlerde hesaplanan hızların doğruluğunun olumsuz yönde etkilenmesidir. Benzer şekilde viskozite oranının 1×10^3 'ten büyük olduğu bazı durumlarda yakınsamada güçlüklerle karşılaşılabilir. Fazlar arasında yüksek viskozite oranlarının bulunduğu bazı akışlar için CICSAM planının daha uygun olduğu ifade edilmektedir (ANSYS Inc., 2013a).

Enerji denklemi

Fazlar arasında ortaklaşa kullanılan bir diğer denklem enerji denklemidir. Enerji denklemi Eşitlik 4.26 ile hesaplanır.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (4.26.)$$

VOF modeli; enerjii (E) ve sıcaklığı (T), kütle-ortalananmış olarak ele alır (Eşitlik 4.27).

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (4.27.)$$

E_q değeri, her bir faz için fazın özgül ısısına ve paylaşılan sıcaklığa bağlıdır.

ρ ve k_{eff} (efektif termal iletkenlik) fazlar tarafından paylaşılır. Kaynak terimine (S_h), diğer hacimsel ısı kaynaklarının olduğu gibi radyasyonun da etkisi vardır.

Hız değerinde de olduğu gibi, fazlar arasında büyük sıcaklık farklarının olduğu ara yüzeylerde sıcaklığın doğruluğunda sınırlamalar vardır. Benzer problemler fazlara ait herhangi bir özelliğin birbirinden birkaç basamak farklı olduğunda da oluşur. Örneğin, çözdürülmek istenen bir model sıvı metalle birlikte hava da içeriyorsa iki fazın iletkenlikleri 4 basamak kadar farklı olabilir. Özelliklerdeki böyle büyük farklar denklemlerde anizotropik katsayılara yol açar ve bu durum da yakınsama ve hassasiyet sınırlamalarına yol açabilir (ANSYS Inc., 2013a).

İlave skaler denklemler

Sayısal çözümleme elde edilirken problem tanımına bağlı olarak bazı skaler denklemler çözüme ilave edilebilir. Örneğin türbülans durumunda bir dizi taşınım denklemi çözdürülür ve türbülans değişkenleri (örneğin: k , ε veya Reynolds gerilimleri) çözüm alanı boyunca fazlar tarafından paylaşılır (ANSYS Inc., 2013a).

Zamana bağlılık

Zamana bağlı VOF hesaplamaları için, hacim oran denklemi zamanda ilerleyen bir açık plan kullanılarak çözdürülür. Hacim oran denkleminin entegrasyonu için ANSYS Fluent yazılımı zaman adımını otomatik olarak düzeltir, ancak “courant” sayısı modifiye edilerek bu zaman adımı değiştirilebilir. Hacim oranı her bir zaman adımında veya her bir zaman adımının içindeki her bir iterasyonda güncellenmek üzere ayarlanabilir. Sayısal modelleme yapılırken bahsedilen özellikler ile ilgili ANSYS Fluent yazılımı kullanıcı el kitabındaki akışkan hacmi modeli için zamana bağlı parametrelerin ayarlanması bölümündeki açıklamalardan oldukça yararlanılmıştır (ANSYS Inc., 2013c).

Yüzey gerilimi

VOF modeli, fazlar arası ara-yüzeyler boyunca yüzey gerilimi etkilerini de içerebilir. Model, fazlar ve duvarlar arasındaki temas açıları ve gözenekli olma özelliği gibi ilave özellikler ile güçlendirilebilir. Yüzey gerilimi katsayısı sabit bir değer olarak, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak veya UDF kullanarak herhangi bir değişkenin fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Çözücü, yüzey gerilim katsayısının değişken olduğu durumlarda Marangoni iletimi adı verilen ilave teğetsel gerilim terimlerini içerebilir. Değişken yüzey gerilimi katsayısı etkileri sadece sıfır veya sıfıra yakın yer çekimi koşullarında önemlidir (ANSYS Inc., 2013a).

Yüzey gerilimi akışkan içindeki moleküller arasındaki çekici kuvvetlerin sonucu olarak ortaya çıkar. Bu olaya örnek olarak suyun içindeki bir hava kabarcığı düşünülebilir. Kabarcık içindeki bir molekül üzerinde komşu moleküllerden kaynaklanan net kuvvet sıfırdır. Buna karşın yüzeyde, net kuvvet radyal olarak içeri doğrudur ve tüm küresel yüzey boyunca kuvvetin radyal bileşenlerinin toplam etkisi yüzeyi küçültecek şekildedir, böylece yüzeyin iç bükey tarafında basınç artar. Yüzey gerilimi denge durumunu korumak için gerekli olan ve sadece yüzeye etki eden bir kuvvettir. Radyal olarak içeri doğru olan moleküller arası çekim kuvvetini, yüzey boyunca radyal olarak dışarı olan basınç gradyanı kuvveti ile dengeleyecek şekilde etki eder. İki sıvının ayrılmış olduğu fakat bir tanesinin küresel kabarcıklar hâlinde olmadığı bölgelerde yüzey gerilimi, ara-yüzeyin alanını küçülterek serbest enerjiyi düşürecek şekilde etki eder.

ANSYS Fluent yazılımında iki yüzey gerilimi modeli mevcuttur. Bunlar; sürekli yüzey kuvveti (CSF) ve sürekli yüzey gerilimi (CSS) modelidir (ANSYS Inc., 2013a).

4.4. Sayısal Çözüm

ANSYS Fluent yazılımında iki-fazlı akışın modellenmesi ilerleyen başlıklarda verilen şekilde yapılmıştır.

4.4.1. Çözücünün seçilmesi

ANSYS Fluent yazılımında çözücü tipi olarak iki farklı seçenek bulunmaktadır. Bunlar; basınç tabanlı çözücü ve yoğunluk tabanlı çözücüdür. Basınç tabanlı yaklaşım düşük hızlı sıkıştırılmaz akışlar için, yoğunluk tabanlı yaklaşım ise yüksek hızlı sıkıştırılabilir akışlar için geliştirilmiştir. Bununla birlikte, son zamanlarda her iki yöntem de orijinal amaçlarının ötesinde çok çeşitli akış koşullarının çözümü için genişletilerek yeniden düzenlenmiştir. Ayrıca, çok-fazlı akışların çözümünde basınç tabanlı çözücü kullanılması bir zorunluluktur (ANSYS Inc., 2013b). Bu nedenle gaz atomizasyonu modellenirken basınç tabanlı çözücü kullanılmıştır. Bu çözücü tipi, Navier-Stokes denklemlerinin çözümünü basınç tabanlı çözüm algoritması ile çözmeye çalışmaktadır. Basınca dayalı çözücü kullanıldığında, enerji denkleminin varsayılan biçimi, viskozite nedeniyle açığa çıkan termal enerjiyi içermez (çünkü viskoz ısıtma genellikle ihmal edilebilir düzeydedir).

Gaz atomizasyonu modellenirken zaman bağlı çözüm sunan “transient” çözücü tipi seçilmiştir. Hız formülasyonu olarak mutlak hız formülasyonu kullanılmıştır. İki boyutta oluşturulan lüle modelinin simetrisinden yararlanarak eksene göre simetrik çözüm sağlanmıştır. Çözücünün aksenal simetrik özelliği aktif hâlde iken, denklemlerin kartezyen formu yerine aksenal simetrik formları çözdürülmektedir.

ANSYS Fluent yazılımında yer çekimi ivmesinin varsayılan değeri sifira eşit olduğundan model oluşturulurken yer çekimi ivmesi şiddetinin ve yönünün belirtilmesi gerekmektedir. Hesaplamalar öncesinde yer çekimi aktif hâle getirilmiş ve yer çekimi ivmesi x ekseni (simetri ekseni) doğrultusunda $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak girilmiştir.

4.4.2. Çok fazlı modelin oluşturulması, VOF modeli ve faz sayısının belirlenmesi

Gaz atomizasyonu sırasında gerçekleşen iki-fazlı akışları modelleyebilmek için ANSYS Fluent yazılımının VOF modeli seçilmiştir. ANSYS Fluent yazılımındaki VOF modeli, yoğunluğa dayalı çözücü ile uyumlu değildir. Bu çalışmada basınca dayalı çözücü kullanıldığından VOF modeli kullanılabilmiştir. Çok fazlı hesaplama yönelik faz sayısı gaz atomizasyonuna uygun olacak şekilde girilmiştir. Akışkan hacmi yöntemi ile çalışıldığında her bir faza ait bazı hacimsel parametrelerin ve hesaplama alanına giriş koşullarının yazılıma girilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Atomizasyon sonunda damlacıkların görünür hâle getirilebilmesi için modelde açık plan kullanılmıştır.

4.4.3. Viskoz özelliklerin seçilmesi

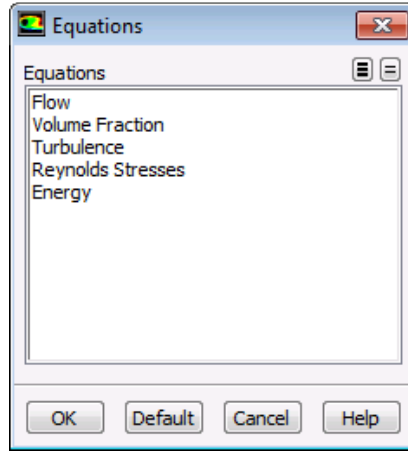
Atomizasyon işleminde gerçekleşen yüksek türbülanslı akışların doğru çözümünü elde edebilmek için türbülanslı akış modelleri ile çalışmak gerekmektedir. Bu nedenle viskoz model olarak Reynolds Stres Modeli seçilmiştir.

4.4.4. Enerji denklemi

Basınç tabanlı çözücü kullanıldığında enerji denklemi başlangıçta hesaplamalara dâhil edilmemelidir. Bunun için enerji denklemi başlangıçta seçilmemiştir. İlk birkaç yüz iterasyon sonrasında belirli bir miktar yakınsama sağlandıktan sonra enerji denklemi aktif hâle getirilerek hesaplamalara devam edilmiştir.

4.4.5. Denklemler

Yazılımın hesaplamalara dâhil etmesi istenilen denklemler seçilmelidir. Buna göre; akış, hacim oranı, türbülans, reynolds gerilimleri ve enerji denklemleri çözüme dâhil edilmiştir (Şekil 4.4.). Enerji denklemleri daha önce bahsedildiği gibi sayısal çözümleme başlangıcında aktif edilmemiş daha sonra hesaplama dâhil edilmiştir. Benzer şekilde sayısal çözümleme başlangıcında tek-fazlı akış modellendiği için hacim oranı denklemi başlangıçta modele dâhil edilmemiştir. İki-fazlı akışa geçildikten sonra aktif edilerek hacim oranları hesaplatılmıştır. Atomizasyon esnasında gerçekleşen türbülanslı akışlar nedeniyle türbülans denklemleri aktif tutulmuştur.



Şekil 4.4. Hesaplamalara katılan denklemler.

4.4.6. Malzeme özelliklerinin girilmesi

Atomizasyon gazı olarak azot kullanılmıştır. Basınç tabanlı çözücü kullanılarak gaz atomizasyonu modellenirken sıkıştırılabilir karakterdeki atomizasyon gazının yoğunluk hesabı için ideal gaz denklemleri seçilmiştir. Diğer özellikler için yazılımın malzeme veri tabanında yer alan azot gazının varsayılan özellikleri kullanılmıştır.

Atomize edilen ergitilmiş metal olarak kalay kullanılmıştır. Ergitilmiş kalay özellikleri yazılımın veri tabanında bulunmadığı için gerekli özellikler yazılıma girilmiştir.

4.4.7. Fazların belirlenmesi

Çok-fazlı akış çözümlerinde fazların yazılıma tanıtılması önemli bir adımdır. Hangi fazın birincil faz olarak yazılıma tanıtılacağı modelin oluşturulması ve çözdürülmesi süreçlerinde doğrudan veya dolaylı olarak etkili olmaktadır. İki-fazlı akışlarda fazlardan birisinin sıkıştırılabilir olduğu durumlarda birincil fazın sıkıştırılabilir faz olarak yazılıma tanıtılması gerekmektedir. Gaz atomizasyonu için oluşturulan modelde birincil faz olarak atomizasyon gazı, ikincil faz olarak ise atomize edilen ergitilmiş kalay seçilmiştir.

Çok-fazlı akışlarda fazların birincil ve ikincil faz olarak yazılıma tanıtılmasının ardından fazların atomizasyona nasıl dâhil edildiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla atomizasyon gazının hesaplama bölgesine giriş yaptığı bölgede sıvı metal fazın hacimsel olarak bulunmadığı, benzer şekilde ergiyik kalayın hesaplama bölgesine giriş yaptığı yüzeyde atomizasyon gazının hacimsel olarak bulunmadığı yazılıma girilmiştir. Bunun için ilgili faza ait giriş yüzeyinde hacim oranı “1” olarak, diğer fazın hacim oranı ise “0” olarak girilmiştir.

4.4.8. Sınır koşullarının girilmesi

Gaz girişi

Atomizasyon işlemi 6 farklı basınç değerinde ayrı ayrı modellenmiştir. 1,0 MPa ile 3,5 MPa aralığında 0,5 MPa artışlarla çalışılan tüm basınç değerleri, gaz giriş değeri olarak sırasıyla yazılıma girilerek çözüm tekrarlanmıştır. Girilen basınç değerleri mutlak basınç değerini yansıtmaktadır.

Sıvı metal sıcaklığı

Ergitilmiş sıvı metalin giriş sıcaklığı 650 K olarak yazılıma girilmiştir. Yaklaşık olarak 505 K olan kalayın ergime noktasından daha yüksek bir sıcaklık değeri seçilerek bir miktar aşırı ısıtma sağlanmıştır. Sıvı metale ait diğer özellikler seçilen sıcaklık değerine paralel olarak yazılıma girilmiştir.

Sıvı metal debisi

Sıvı metal debisi olarak 0,065 kg/s'lik sabit bir değer seçilmiştir. Bu değer, Dumlupınar Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde gerçekleştirilen deneyler sırasında elde edilen ortalama sıvı metal debisini yansıtmaktadır. Ancak laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel atomizasyon işlemleri süresince sıvı metal debisi sabit kalmamaktadır. Farklı gaz basınçlarında sıvı metal debisinde değişiklikler olmaktadır. Buna karşın tez çalışması kapsamındaki modelleme işlemleri sabit debide yapılarak, toz boyutu değişimi üzerinde sadece gaz basıncının etkisinin görülebilmesi amaçlanmıştır.

4.4.9. Çalışma koşulları

Atomizasyon işleminin atmosfer basıncında gerçekleştirildiği bir model tasarlanmıştır. Bu nedenle atmosfer basıncı olarak 101325 Pascal basınç değeri yazılıma girilmiştir. Yer çekimi ivmesi x eksenini doğrultusunda 9,81 m/s² olarak girilmiştir. Çalışma ortamının sıcaklığı için 288,16 K olan varsayılan değer kullanılmıştır.

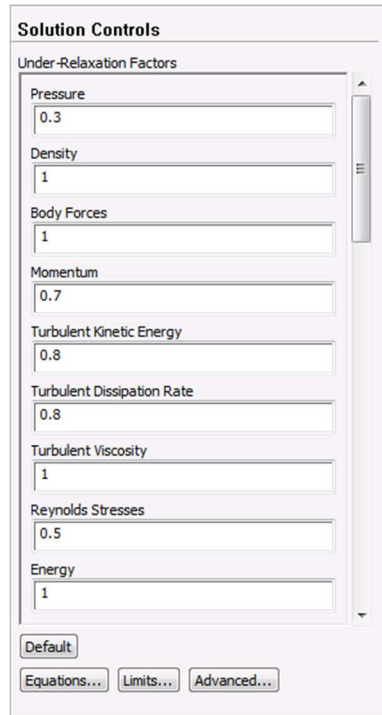
4.4.10. Çözüm yönteminin seçilmesi

Basınca dayalı ayrılmış algoritma momentum denklemini ve basınç düzeltme denklemlerini ayrı ayrı çözer. Basınç tabanlı çözücü ile sıkıştırılabilir akış kullanıldığında yoğunluk için enterpolasyon planını seçmek gerekmektedir. Hesaplamalarda yoğunluk için birinci dereceden enterpolasyon planı seçilmiştir.

Basınç tabanlı çözücü ile VOF modeli kullanıldığında hacim kesri enterpolasyon planı olarak yakınsamayı sağlayabilmek için hızlı plan seçilmiştir. Bunun sebebi, türbülanslı bir ortamda gerçekleşen atomizasyonun simüle edilebilmesinin günümüzdeki en güçlü bilgisayarları bile yoracak muazzam bir işlemci kapasitesi gerektirmesidir (Hermann, 2014). Bununla birlikte hızlı plan ile gerçekleştirilen çözümlerlerde damlacıklar görünür hâlde elde edilemezler. Bu nedenle her bir basınç değeri için çözümler sonunda hacim kesri enterpolasyonu olarak geometrik yeniden yapılandırma seçilerek ergiyik hâldeki metal damlacıklar görünür hâlde getirilmiştir.

Basınca dayalı çözücü, her bir hesaplama adımında hesaplanan her değişkenin güncellemesini kontrol etmek için denklemlerin gevşeme faktörlerini kullanır. Bu nedenle, basınca dayalı çözücü kullanarak çözülen tüm denklemlerin kendisiyle ilişkili bir gevşeme faktörü bulunmaktadır.

ANSYS Fluent yazılımında tüm değişkenler için varsayılan gevşeme parametreleri, mümkün olan büyük değere ayarlanmıştır (Şekil 4.5.). Gevşeme parametrelerinin en uygun değerde tutulabilmeleri amacıyla iterasyonlar süresince artık değer eğrilerinin davranışı takip edilmiştir. Çözüm sırasında artık değer eğrilerinde bir yükseliş tespit edildiğinde gevşeme parametreleri düşürülmüştür.



Şekil 4.5. Çözüm kontrolleri.

4.4.11. Çözdürme işlemleri

VOF modeli ile iki-fazlı gaz atomizasyonu çözümlenmesi için gaz ve sıvı faz yazılıma tanıtılmıştır. Kullanılan yazılımda fazlar için tayin edilen malzemelerden sadece bir tanesi sıkıştırılabilir akışkan olarak modellenebilir. Bu bağlamda sıkıştırılabilir yapılmak istenen malzemenin özelliklerinin girildiği ekranda yoğunluk için “sıkıştırılabilir ideal gaz yasası” seçilmiştir. İki-fazlı akışlarda sıkıştırılamaz akışkanın birincil faz olarak tayin edilmesi çözümün kararlılığını artırmaktadır.

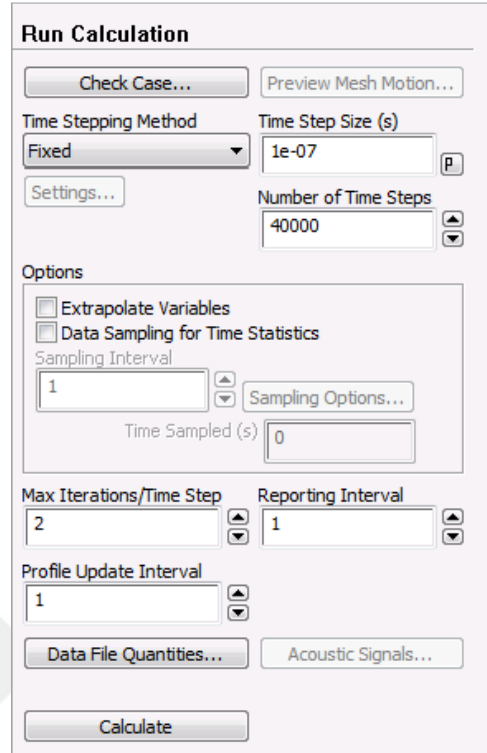
Çok-fazlı modellemelerde çözücü tipi olarak "Pressure-Based" olarak adlandırılan basınç tabanlı çözücü seçilmek zorundadır. Zaman seçeneği tercihe bağlı olup “transient” olarak seçilmiştir. Hız formülasyonu listesinde varsayılan seçenek olan “absolute“ seçeneği değiştirilmemiştir.

Atomizasyon işleminde gerçekleşen yüksek türbülanslı akışların doğru çözümünü elde edebilmek için türbülanslı akış modelleri ile çalışmak gerekmektedir. Bu nedenle viskoz model olarak Reynolds Stres Modeli seçilmiştir.

Çözüm yöntemi olarak basınç-hız eşlemesi için “SIMPLE” düzeni seçilmiş ve diğer özellikler varsayılan seçeneklerde bırakılmıştır. Çözüme ulaşırken uzaysal ayrıklaştırma için izlenen yöntemler çözümün yakınsamasının kolaylaşması adına; yoğunluk, momentum, türbülans kinetik enerjisi, türbülans dağılma oranı, Reynolds gerilimleri ve enerji için birinci dereceden (First Order Upwind) seçilmiştir.

Geometri eksene göre simetrik olarak modellenmiştir. Yer çekimi aktif hâle getirilerek ivme değeri $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak girilmiştir. Enerji denklemi aktif hâle getirilmiştir. Çözümde yakınsama kriteri olarak denklem değerlerinin her bir iterasyon arasında 0,001 değerinin altında kalmasına dikkat edilmiştir. Göreli olarak küçük zaman adımı değerlerinde çalışıldığı için süreklilik denkleminin yakınsama takibi yapılmamıştır.

Yüksek hızlı atomizasyon gazlarının varlığında, toz boyutlarının ölçüleceği hassas görünüşleri yakalayabilmek için küçük zaman adımı değerlerinde çalışmak gerekmektedir. Bu nedenle başlangıçta zaman adımı olarak $1,0 \text{ e-}7$ saniye seçilmiş (Şekil 4.6.), hacim oranının geometrik yeniden yapılandırma ile hesaplandığı durumlarda ise yüksek değerlere ulaşan “Courant” sayısının işlem süresine olan etkilerini en aşağıya indirmek için zaman adım değeri $1,0 \text{ e-}6$ saniye seçilmiştir. Tüm işlemler esnasında zaman adımı yöntemi için “sabit” seçeneği seçili olarak bırakılmıştır. Tüm basınçlar için her bir zaman adımı başına en fazla 2 iterasyon seçilmiş, yakınsamanın zorlaştığı bazı anlarda bu değer 3 veya 4 olarak değiştirilmiştir.



Şekil 4.6. İterasyon işleminin başlatılması.

Çözdürme işlemleri Çizelge 4.1’de verilen iterasyon sayılarında tamamlanmıştır. Simülasyon süresi boyunca hesaplanan veriler periyodik olarak kayıt altına alınmıştır. Sıvı metal hareketlerinin yeterli düzeyde görülebilmesi amacıyla 250 iterasyonluk bir zaman aralığı veri kaydı için uygun bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Basınç, iterasyon sayısı ve simülasyon süresi.

Basınç (MPa)	İterasyon Sayısı	Simülasyon Süresi (ms)
1,0	48250	4,825
1,5	41750	4,175
2,0	40000	4,000
2,5	36000	3,600
2,5 MPa (Viskozite)	40250	4,025
3,0	39000	3,900
3,5	59000	5,900

1 iterasyon süre olarak 0,0001 milisaniyeye tekabül etmektedir. Modellemede damlacık takibinin yapıldığı 250 iterasyonluk veri kayıt periyodu 0,025 milisaniyeye karşılık gelmektedir. Atomizasyon modeli sıvı parçacıkları üretebileceği yeterli olgunluğa geldiğinde çözdürme işlemi sonlandırılmıştır. Toz oluşumlarının görüntülenebilmesi için programın kontür tabanlı gösterim

özelliği seçilmiştir. Fazların hacimsel oran kontürleri için “Global Range” ve “Auto Range” özellikleri seçili iken, en küçük hacim oranının “0”, en büyük hacim oranının “1” olduğu, 100 kademeli gösterimler üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

4.5. Eş Değer Küresel Çap Hesabı

Her bir basınç değeri için parçacık oluşumlarına ait görseller elde edilmiştir. Görseller ölçekli bir şekilde Photoshop yazılımına aktarılmıştır. Photoshop yazılımında parçacıkların piksel kare cinsinden kesit alanları tespit edilmiştir. Piksel kare biriminde elde edilen kesit alanı değerlerinin birimleri dönüştürülerek metrik sistemdeki karşılıkları hesaplanmıştır.

Toz boyutları hesaplanırken yaygın bir yöntem olarak kullanılan ve tozların izdüşüm alanından yola çıkılarak dairesel bir şekilde oldukları varsayılan Eş Değer Küresel Toz Çapı formülü kullanılmıştır (Eşitlik 4.28.).

$$\text{Eş Değer Küresel Toz Çapı} = D_A = \sqrt{\left(\frac{4a}{\pi}\right)} \quad (4.28.)$$

Burada, a parçacık izdüşüm alanına, D_A ise küresel parçacık çapına karşılık gelmektedir.

4.6. Geometrik Ortalama

Ortalama parçacık boyutu; parçacıkların sayısını, çapını, yüzeyini veya hacmini tanımlamak için farklı şekillerde hesaplanabilir. Aritmetik ortalama çap veya uzunluk ortalama çapı, atomizasyon içindeki tüm taneciklerin doğrusal ortalama çap değeridir (Sescu, 2011). Aritmetik ortalama çap değeri genellikle D_{10} ile sembolize edilir (Li, 1989). Aritmetik ortalama değeri küresel ve simetrik şekilli parçalar için uygun olmasına rağmen, yığını oluşturan taneciklerin farklı ebatlardaki açıklıklardan geçirilerek elemeye tabi tutulduğu uygulamalarda geometrik ortalama değeri gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Geometrik ortalamanın hesaplanması Eşitlik 4.29’da verilen formül ile yapılmıştır. Burada, t toplam parçacık sayısını, c parçacık numarasını, d ise parçacık çapını ifade etmektedir.

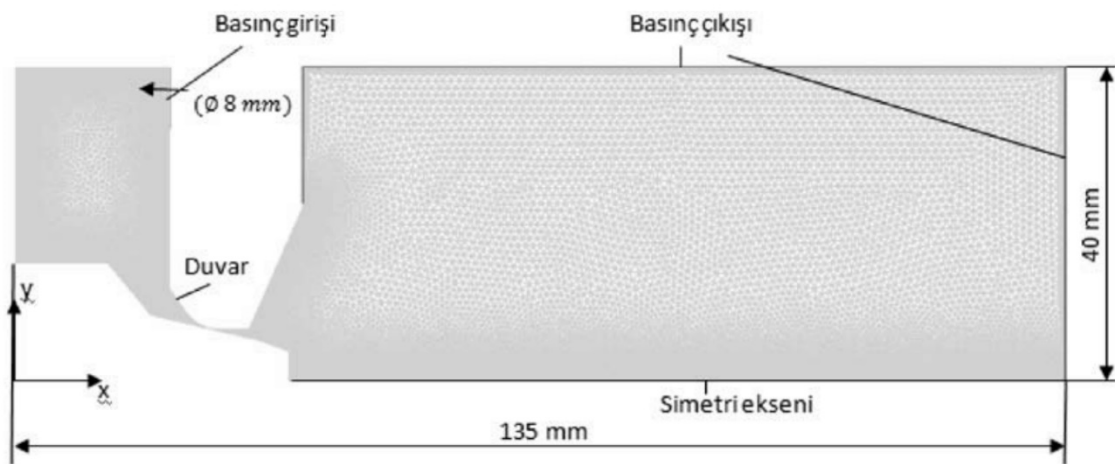
$$\text{Geometrik ortalama} = \left(\prod_{c=1}^t d_c\right)^{\frac{1}{t}} \quad (4.29.)$$

5. TEORİK VE DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

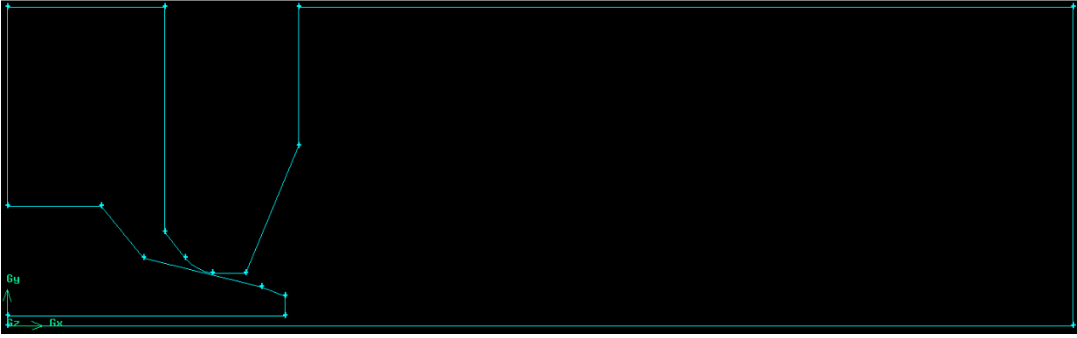
5.1 Lüle Modeli Oluşturma Çalışmaları

Gaz atomizasyonu işleminin deneysel olarak araştırıldığı çalışmalardan elde edilen verilerle birlikte Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle elde edilen veriler geçmişte olduğu gibi günümüzde de araştırmacılara yol göstermektedir. Deneysel ve teorik çalışmaların ortak amacı, atomizasyon veriminin artırılması ve atomize toz kalitesinin arzu edilen düzeye çıkarılmasıdır. Atomizasyon işleminde elde edilen parçacıkların kalitesine etki eden etmenler iki ana başlık altında toplanabilir. Birinci ana başlık verimi yüksek lüle tasarımı, ikinci ana başlık ise atomizasyona özgü işlem parametreleridir. Atomizasyona etki eden etmenler deneysel olarak test edilebildikleri gibi HAD yöntemleri kullanılarak bilgisayar destekli programlar vasıtasıyla da incelenebilmektedirler.

Bu çalışmada modellenen atomizasyon lüle geometrisi ve ağ yapısı Gambit yazılımı ile, modelin sayısal çözümü ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminin uygulanabildiği ANSYS Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Gaz atomizasyonu işlemi üzerine yapılmış ve literatüre geçmiş olan birçok sayısal çözümleme mevcuttur. Bu çalışmaların birçoğu atomizasyon işleminin tek-fazlı akış şeklinde modellenmesini konu almaktadır. Güleşen vd. (2011), yaptıkları çalışmalarında Şekil 5.1'de gösterilen atomizasyon hücrelerini tek-fazlı akış için başarıyla modellemişlerdir (Güleşen vd., 2011). Yaptıkları çalışmada kullandıkları model, bu tez çalışmasındaki iki-fazlı model çalışmaları için başlangıç noktası olarak seçilmiştir. Bu doğrultuda Gambit yazılımı ile oluşturulan başlangıç lüle geometrisi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

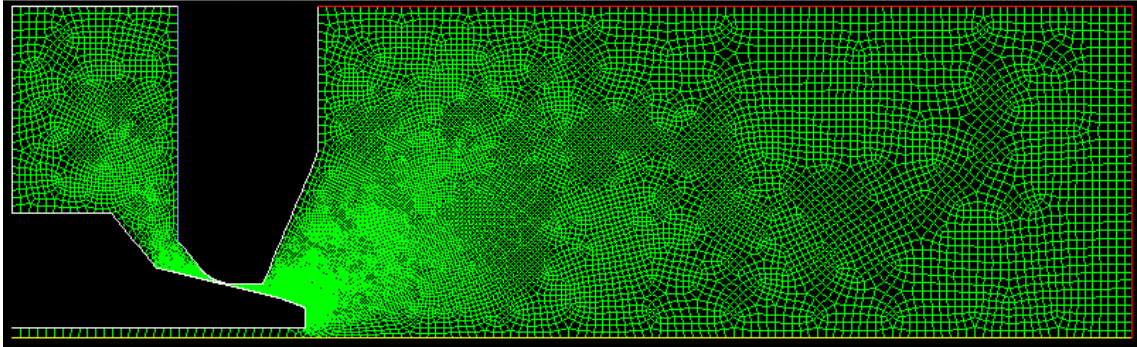


Şekil 5.1. Tek-fazlı referans modelde ağ yapısı ve sınır şartları (Güleşen vd., 2011).



Şekil 5.2. Referans geometrinin Gambit yazılımında gösterimi.

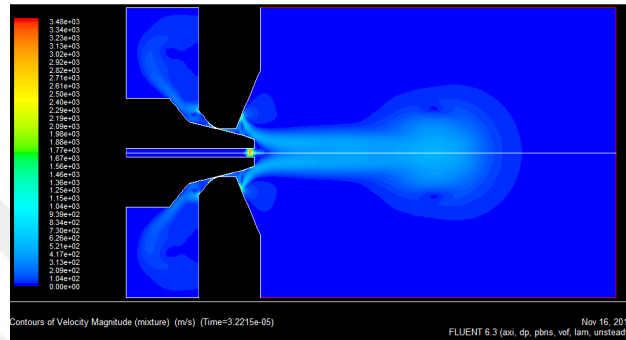
Oluşturulan lüle geometrisi üzerinde sayısal akış analizlerinin yapılabilmesi için analizin yapılacağı yazılım tarafından tanınan uygun bir ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. Çalışmanın başlangıcında kullanılan ve Gambit yazılımı ile oluşturulmuş olan ağ yapısı Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Ağ yapısı oluşturulmuş olan lüle geometrisi.

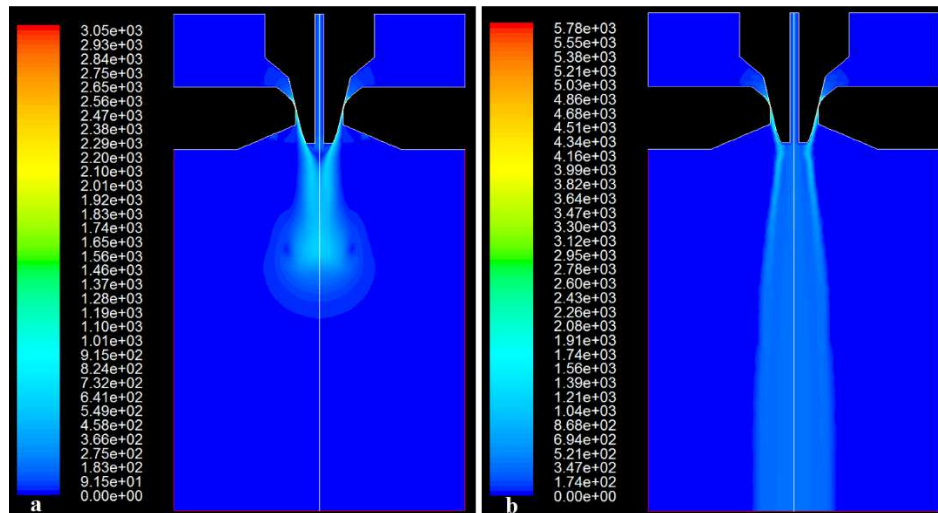
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinde akışın simetrik özelliklerinden mümkün mertebe yararlanılarak hesaplama yükünün azaltılması hedeflenmektedir. Bu amaçla lüle yapısının simetrikliğinden yararlanılarak bir simetri ekseni tanımlanmıştır. Lüle geometrisi simetri ekseni göz önünde tutularak oluşturulmuştur. Lülenin boğaz bölgesinde ve yüksek hızlı atomizasyon gazları ile sıvı metalin ilk kez karşılaştıkları lüle uç bölgesinde daha ince ağ yapısı kullanılmıştır. Daha ince ağ yapısı kullanılması hesaplamalarda hassasiyeti artırmaktadır. Atomizasyonun gerçekleştiği lülenin genel ağ yapısı, eksene göre simetrik yansımasıyla birlikte Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

Ergitilmiş metal fazı ile atomizasyon gazının birlikte akışa verildiği simülasyona ait Şekil 5.6'da verilen bir diğer görüntüde, sıvı fazın metal akış borusu çıkışına yaklaşmış olmasına rağmen gaz akışının henüz olgunlaşmamış olduğu görülmektedir. Atomizasyon gazının lüle boğazından geçerek atomizasyon kulesine girdiği ancak atomizasyon kulesindeki hareketini tamamlamadığı açıkça görülebilmektedir. Şekil 5.6'da kırmızı renk yüksek hızlı akışı, koyu mavi renk ise düşük hızlı akışı temsil etmektedir.



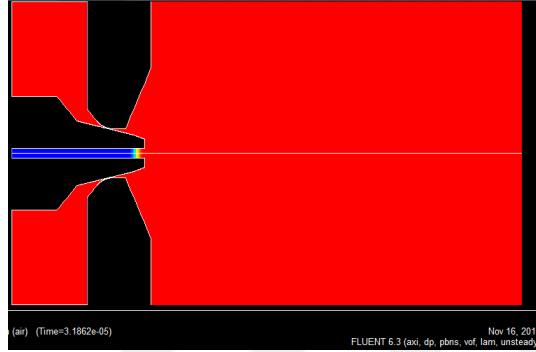
Şekil 5.6. Atomizasyon gazının lüleden geçerek atomizasyon kulesine girişi (iki-fazlı).

Atomize edilecek sıvı metal fazın sayısal çözümleme başlangıcında modele ilave edilmesi şart değildir. Bu yaklaşım modellemenin daha verimli çalışmasına imkân sağlamaktadır. Bu nedenle modelleme çalışmalarına başlangıçta sıvı akışı olmadan devam edilmiştir. Şekil 5.7'de atomizasyon gazının lüle bölgesine girişi ve akışını tamamlamış hâli gösterilmiştir. Görselden anlaşılabilirdiği gibi modelde sadece gaz fazı mevcuttur.



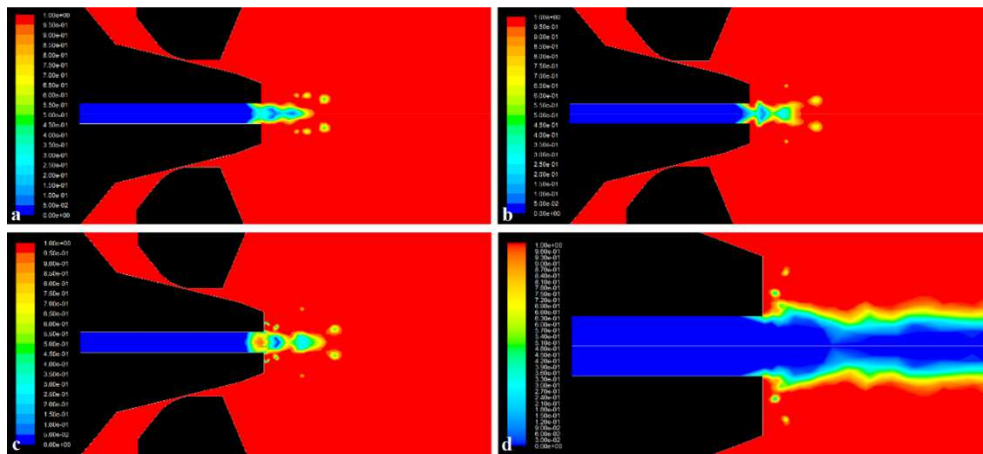
Şekil 5.7. Tek-fazlı akışta atomizasyon kulesi boyunca gaz akışları a) henüz olgunlaşmamış, b) tamamen olgunlaşmış.

Atomizasyon gazı akışının atomizasyon kulesi boyunca tamamen olgunlaşmasının ardından sıvı metal fazı modele eklenmiştir. Şekil 5.8'de sıvı metal fazın metal akış borusu içindeki tek yönlü hareketi görülebilmektedir.



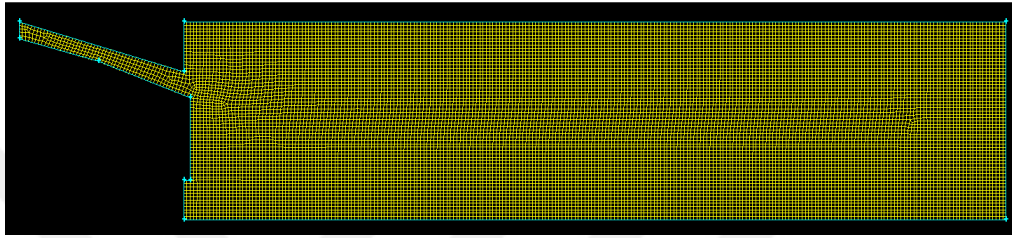
Şekil 5.8. Sıvı metal fazın metal akış borusu içinde ilerlemesi.

Ergiyik hâldeki sıvı faz, metal akış borusu ucuna ulaştığı andan itibaren atomizasyon gazının etkisine maruz kalmaktadır. Bu noktadan itibaren atomizasyon gazı tesiriyle sıvı metalin parçalanmasıyla atomizasyonun başlaması gerekmektedir. Çalışma başlangıcında oluşturulan lüle geometrisi ve ağ yapısı ile yapılan sayısal çözümlerle metal akış borusu ucunu terk eden sıvı metal fazında lüle çıkışında bazı parçalanma oluşumları elde edilebilmiştir (Şekil 5.9a, b, c). Ancak sıvı metaldeki kararsızlık ve parçalanma seviyesi istenilen düzeyde değildir (Şekil 5.9d). Bununla birlikte bu aşamada elde edilen parçalanmalar, atomizasyonun modellenebilirliği yönünde olumlu sonuçlar alınacağına işaret olmuştur. Bu noktadan itibaren modelin geliştirilmesine odaklanılmıştır.



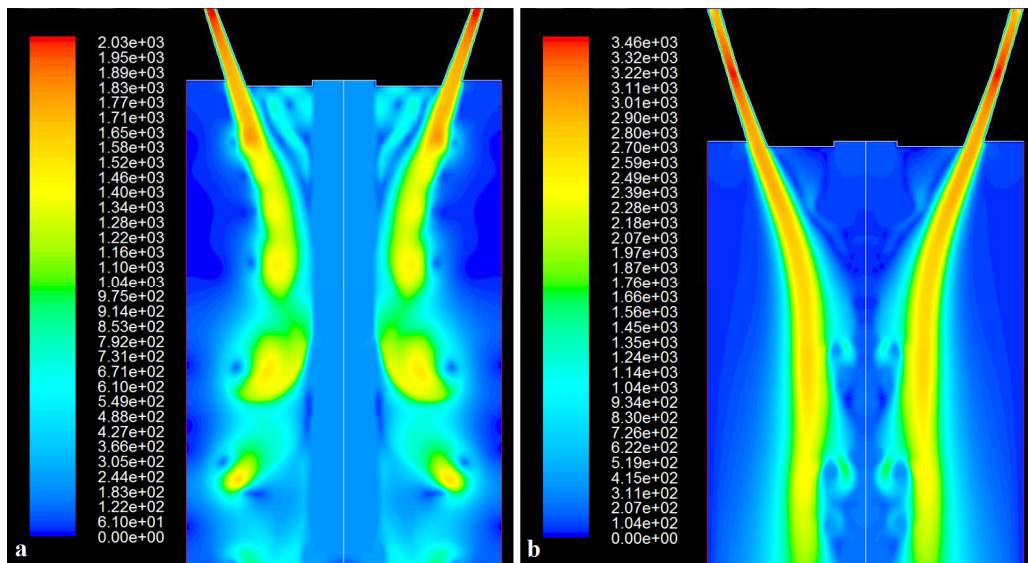
Şekil 5.9. Sıvı fazın a) metal akış borusunu terk edişi, b) kararsız hâle gelişi, c) basit parçalanmalar, d) bütünlüğünü koruması.

Atomizasyona yönelik elde edilen ilk sonuçlar, lülenin daha küçük bir geometri üzerinde simüle edilmesi gerekliliğini de ortaya koymuştur. Atomizasyonun elde edilebileceği ve mümkün olan en küçük lüle bölgesinde modellenmenin yapılması gerektiği değerlendirilmiştir. Bu nedenle lüle geometrisi basitleştirilmiştir. Öncelikli olarak metal akış borusu kısaltılmış ve yüksek basınçlı gaz bölümü modelden çıkartılmıştır. Basitleştirilen geometrinin test edilebilmesi için hücre sayısı azaltılmıştır. Ağ yapısı olarak düzenli hücre tipi seçilmiştir (Şekil 5.10.).



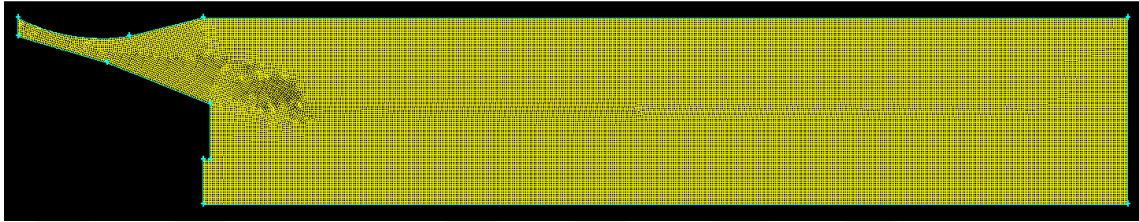
Şekil 5.10. Basitleştirilmiş lüle geometrisi (ilk lüle).

Metal akış borusu kısaltılırken sıvı metalin düşey doğrultuda kısa bir mesafede hareket edebilmesine özen gösterilmiştir. Buradaki amaç metal akış borusu ucuna gelen sıvı metalin karşılaşacağı toroidal vorteks tarafından radyal harekete başlatıldığının doğrulanmasıdır. Basitleştirilen lüle geometrisinde elde edilen hız kontürleri Şekil 5.11’de verilmiştir. Hücre sayısının azaltılmış olması işlem süresini kısaltarak modelin doğruluğuna yönelik testlerin kısa süre içerisinde birçok kez tekrar edilebilmesine olanak sağlamıştır.



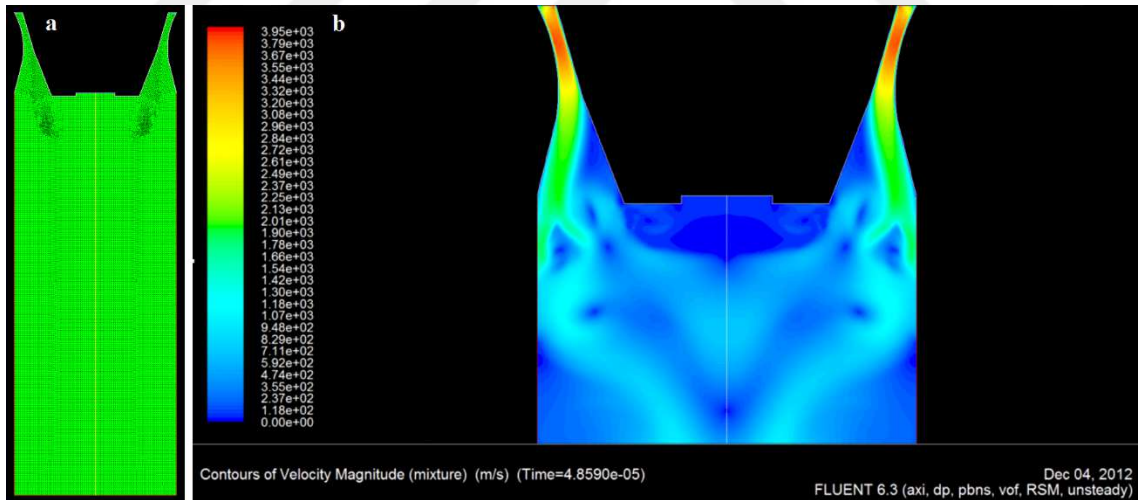
Şekil 5.11. Basitleştirilmiş lüle geometrisi ile elde edilen hız kontürleri a) başlangıç seviyesi, b) olgunlaşmış gaz akışı.

Şekil 5.11’de görülmekte olan basitleştirilmiş lüle geometrisinde kullanılan gaz akış boğazı boyunca çap değişmemektedir. Sesüstü hızlara ulaşılabilmesi ve atomizasyonun oluşabilmesi için daralan-genişleyen tipte bir gaz akış boğazına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle lüle geometrisi ve ağ yapısı güncellenmiştir. Güncellenen geometride 51577 adet bağımsız hesaplama hücresi bulunmaktadır (Şekil 5.12.).



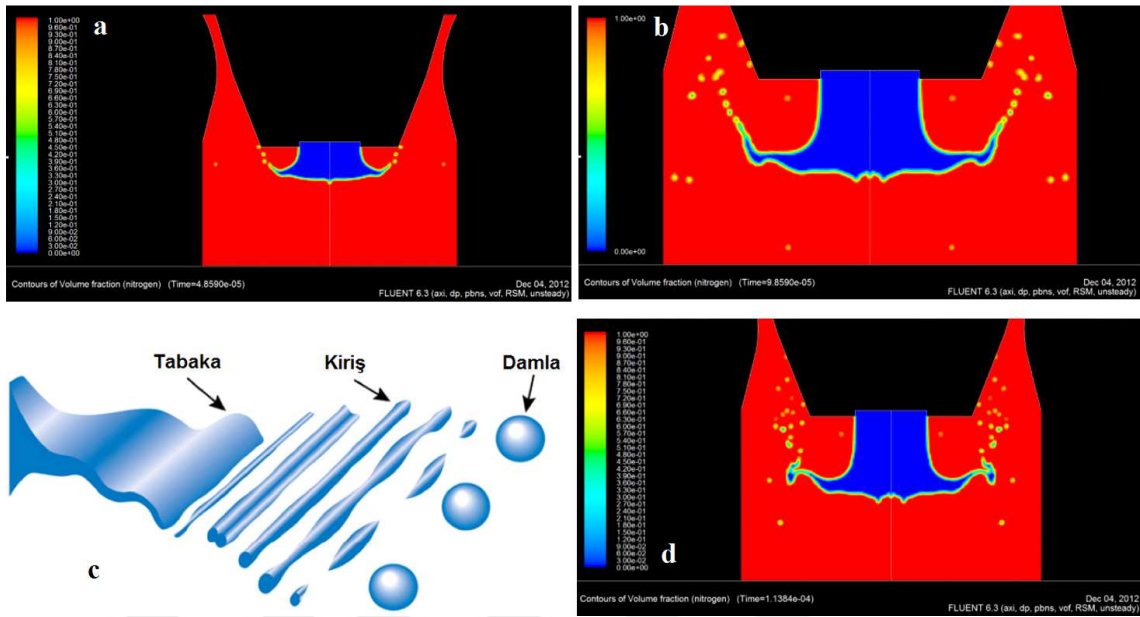
Şekil 5.12. Basitleştirilmiş lüle geometrisi (ikinci lüle) (51577 hücre).

Yeni geometri simetri eksenine göre modellendiğinde Şekil 5.13a’daki görünüm elde edilmektedir. Bu geometri kullanılarak elde edilen hız kontürleri ise Şekil 5.13b’de gösterilmiştir.



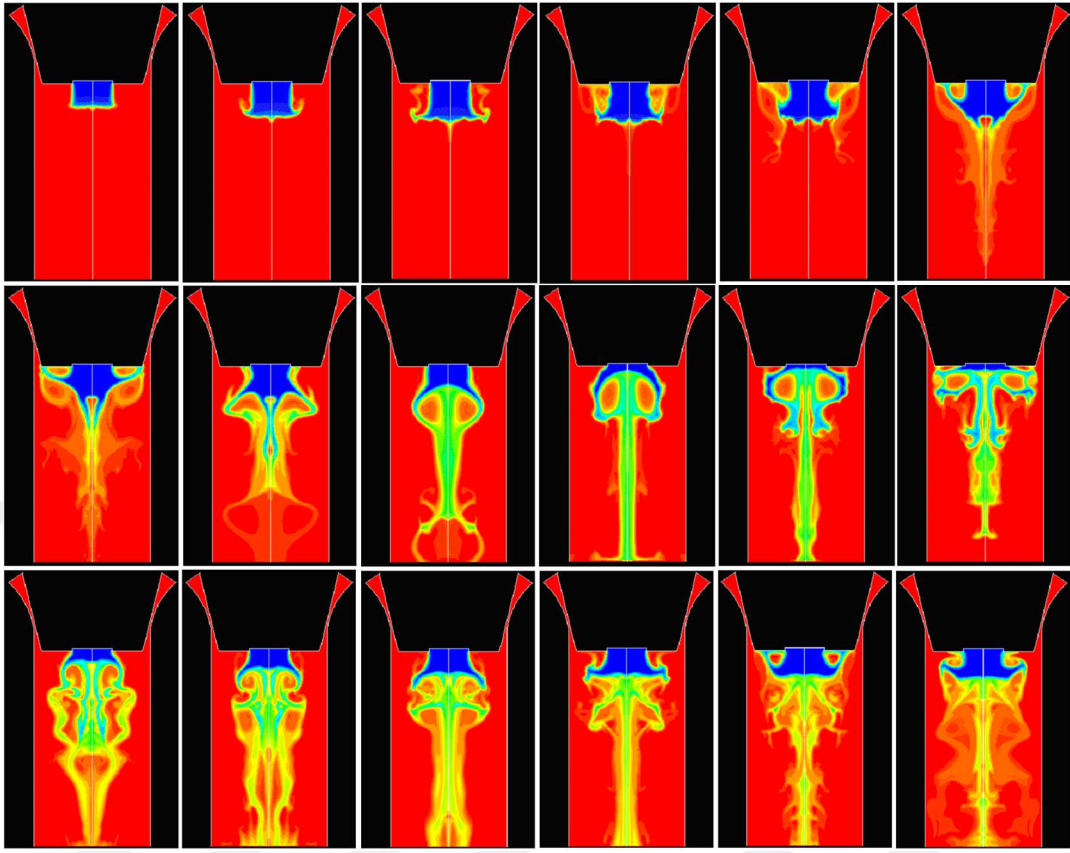
Şekil 5.13. İkinci lülede a) ağ yapısı (51577 hücre), b) hız kontürleri.

İkinci lüle ile elde edilen iki-fazlı modelleme görüntüleri Şekil 5.14a, b, d’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde çalışılan geometri ve modelle elde edilen tabaka, giriş ve damlacık oluşumu olaylarının literatüre geçmiş olan (Şekil 5.14c) (Hede vd., 2008) ve atomizasyon başlangıcında oluşan parçalanma olaylarına benzerliği görülebilmektedir.



Şekil 5.14. Basitleştirilmiş ikinci lüle ile elde edilen parçalanma sonuçları a) tabaka oluşumu başlangıcı, b) kırışlerin oluşumu, c) tabaka, kırış ve damlacık oluşumu (Hede vd., 2008), d) damlacık oluşumu.

İkinci lüle geometrisi üzerinde bazı düzeltmeler yapılmıştır. Öncelikle lülenin boğaz bölgesi geliştirilmiştir. Ardından ANSYS Fluent yazılımının iki-fazlı akışları çözümlemede kullandığı ve Bölüm 4'te açıklanan “Geometric Reconstruction” hesaplama şekline “Quick” hesaplama şekline geçilmiştir. “Quick” modeli “Geometric Reconstruction” modeline kıyasla çok daha az işlem hacmi gerektirmektedir. Bununla birlikte “Quick” hesaplama şekli ile çalışıldığında sıvı fazın parçalanması simüle edilememektedir. “Geometric Reconstruction” yerine “Quick” modelde çalışılmasının amacı fazla CPU işlem hacmi gerektirmeden iki-fazlı akışın belirli olgunluğa gelmesini sağlamaktır. Şekil 5.15'te metal akış borusundan çıkan ve lüle bölgesi boyunca hareket eden iki-fazlı akış rejiminin “Quick” hesaplama yöntemiyle elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. ANSYS Fluent yazılımdaki iki-fazlı modellemede, modelin ağ yapısı içerisindeki her hücre için ilgilenilen faza yönelik 0 ve 1 arasında değişen faz oranı belirlenmektedir. Herhangi bir hücrenin faz oranının sıfır oluşu, bahsedilen hücrede söz konusu faza ait akışkanın hiç bulunmadığını, faz oranının 1 oluşu ise hücrenin tamamen söz konusu faz ile dolu olduğunu ifade eder. 0 ve 1 arasındaki değerlere sahip hücrelerde fazlar karışım hâlinindedir ve çevre hücrelerin faz oranlarına göre hücre içi dağılım hesaplanır.



Şekil 5.15. Sıvı metalin gaz akışı olmadan lüle ucundan ayrılışı (düzeltilmiş ikinci lüle).

Yukarıdaki faz kontürlerinde görüldüğü üzere, basitleştirilen lüle geometrisinde yüksek basınçlı gaz akışı sıvı metal demetine etki edebilmektedir. Böylelikle tasarlanan modelin atomizasyon işleminde kullanılabileceği değerlendirilerek çıkıntı mesafesi çalışmalarına geçilmiştir.

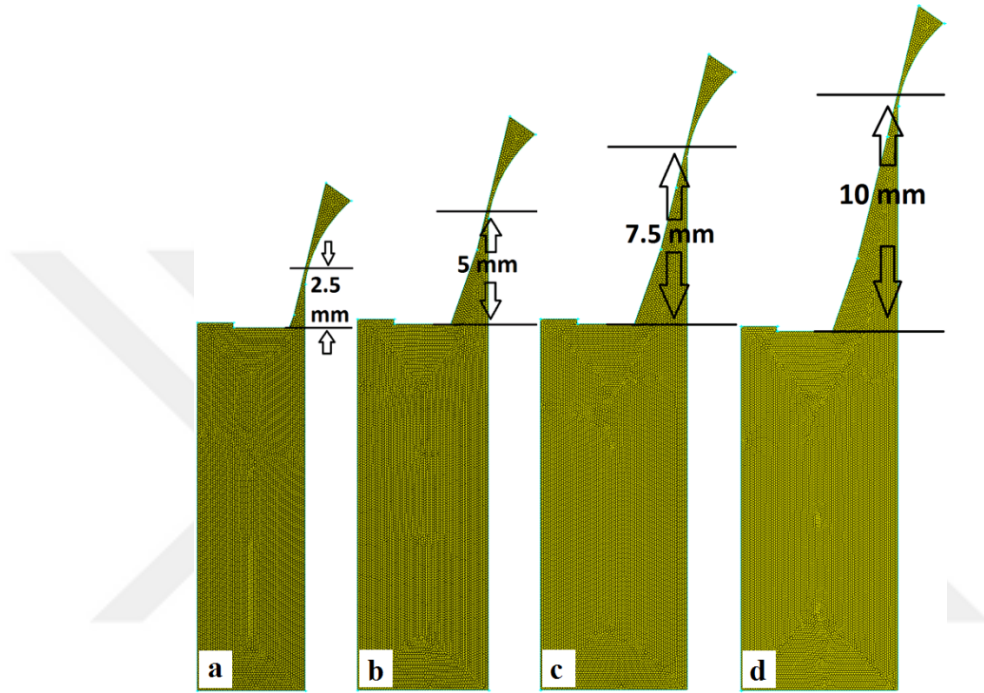
5.2 Atomizasyonun İki-Fazlı Modellenilebilirliğinin Araştırılması

Gaz atomizasyonu işleminde kullanılan lüle çıkıntı mesafesi elde edilen toz boyutuna etki eden önemli bir parametredir. Çıkıntı mesafesi arttıkça ortalama toz boyutunun nasıl değiştiği birçok çalışmanın konusu olmuştur. Tez çalışması kapsamında farklı çıkıntı mesafelerinde yapılan sayısal çözümler ile oluşturulan modelin test edilmesi amaçlanmıştır.

5.2.1. Birincil lüle çıkıntı mesafesi çalışmaları

Tez çalışmasının bu bölümünde 4 farklı çıkıntı mesafesine sahip lüle geometrisi üzerinde modellemeler yapılmıştır. Birincil lüle çıkıntı mesafesi çalışmaları, düzeltilmiş ikinci lüle ile gerçekleştirilmiş olup lüle geometrisindeki tek referans noktası lülenin boğaz bölgesidir. Bu

nedenle çıkıntı mesafesi ölçümü boğaz bölgesinden itibaren yapılmıştır. Modellerin lüle uç çıkıntılarının 2,5 mm; 5,0 mm; 7,5 mm ve 10,0 mm olduğu Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Buradaki amaç, lüle ucu çıkıntısının atomizasyon işlemine etkisini model üzerinde iki-fazlı olarak araştırmaktır.

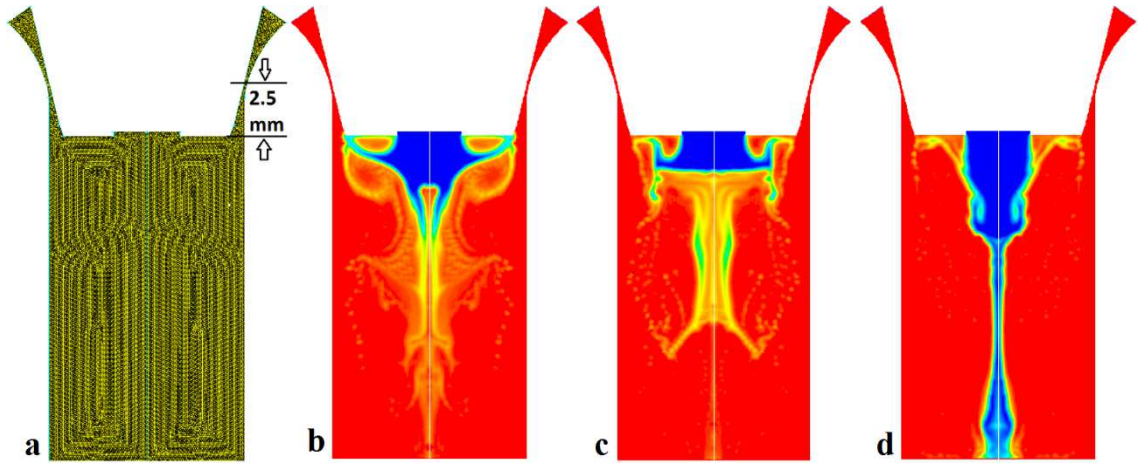


Şekil 5.16. Lüle çıkıntı mesafeleri a) 2,5 mm, b) 5,0 mm, c) 7,5 mm ve d) 10,0 mm.

Gambit yazılımında 4 farklı lüle geometrisi ve ağ yapıları oluşturulmuştur. ANSYS Fluent yazılımında iki-fazlı model olarak Akışkan Hacmi (Volume of Fluid - VOF) yöntemi, viskoz model olarak RSM (Reynolds Stress Model), ve çözümleme yöntemi olarak “Quick” hesaplama şekli seçilerek sayısal modelleme gerçekleştirilmiştir.

Birinci geometri (Lüle çıkıntısı 2,5 mm)

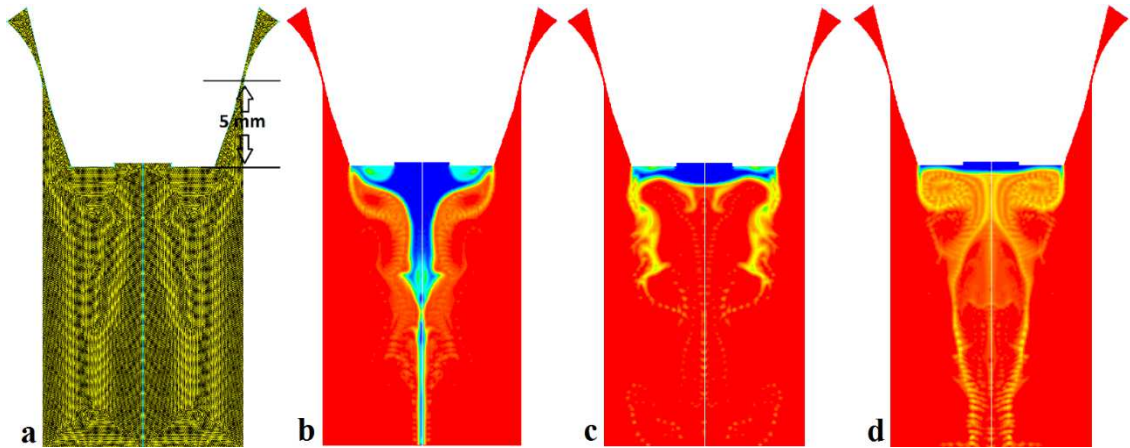
2,5 mm çıkıntı mesafesine sahip lüle geometrisi Gambit yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 5.17a). Oluşturulan lüle ANSYS Fluent programına aktarılmış ve sırasıyla 0,5 MPa; 1,0 MPa ve 1,5 MPa basınç değerlerindeki gaz kullanılarak atomizasyon işlemi modellenmiştir. Sayısal model ile elde edilen iki-fazlı akış görünümleri Şekil 5.17b, c, d’de verilmiştir.



Şekil 5.17. a) Birinci geometri, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon.

İkinci geometri (Lüle çıkıntısı 5,0 mm)

5,0 mm çıkıntı mesafesine sahip lüle geometrisi Gambit yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 5.18a). Oluşturulan lüle ANSYS Fluent programına aktarılmış ve sırasıyla 0,5 MPa; 1,0 MPa ve 1,5 MPa basınç değerlerindeki gaz kullanılarak atomizasyon işlemi modellenmiştir. Sayısal model ile elde edilen iki-fazlı akış görünümleri Şekil 5.18b, c, d’de verilmiştir.

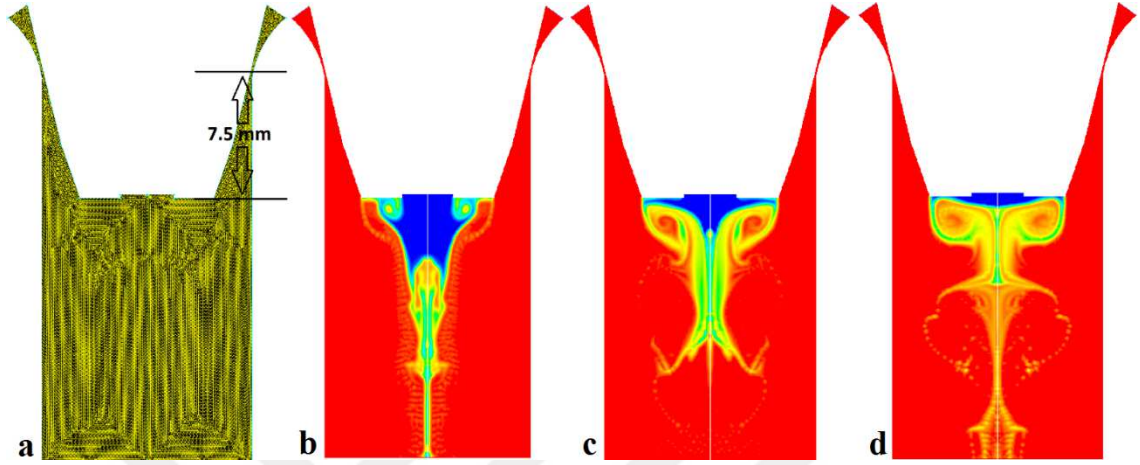


Şekil 5.18. a) İkinci geometri, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon.

Üçüncü geometri (Lüle çıkıntısı 7,5 mm)

7,5 mm çıkıntı mesafesine sahip lüle geometrisi Gambit yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 5.19a). Oluşturulan lüle ANSYS Fluent programına aktarılmış ve sırasıyla 0,5 MPa; 1,0

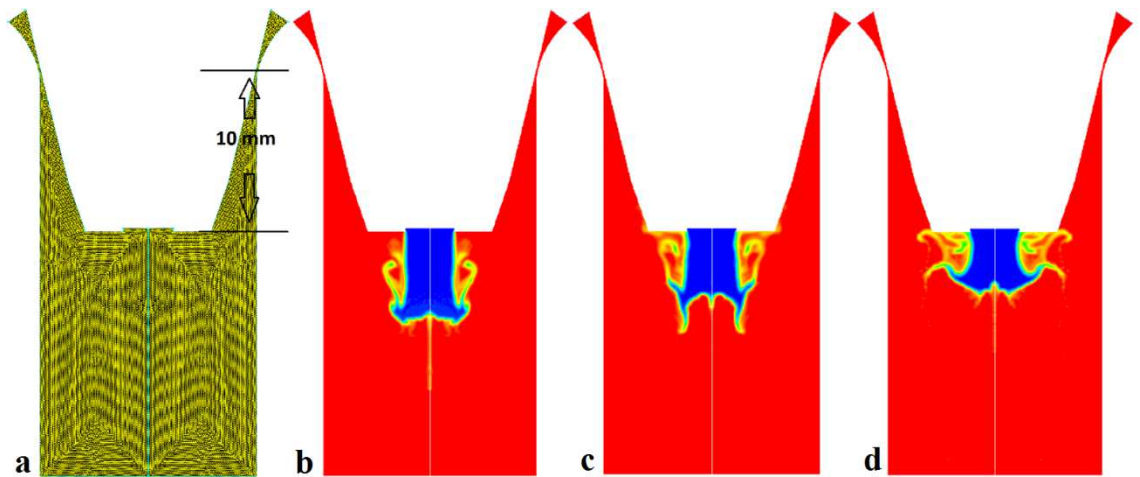
MPa ve 1,5 MPa basınç değerlerindeki gaz kullanılarak atomizasyon işlemi modellenmiştir. Sayısal model ile elde edilen iki-fazlı akış görünümleri Şekil 5.19b, c, d'de verilmiştir.



Şekil 5.19. a) Üçüncü geometri, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon.

Dördüncü geometri (Lüle çıkıntısı 10,0 mm)

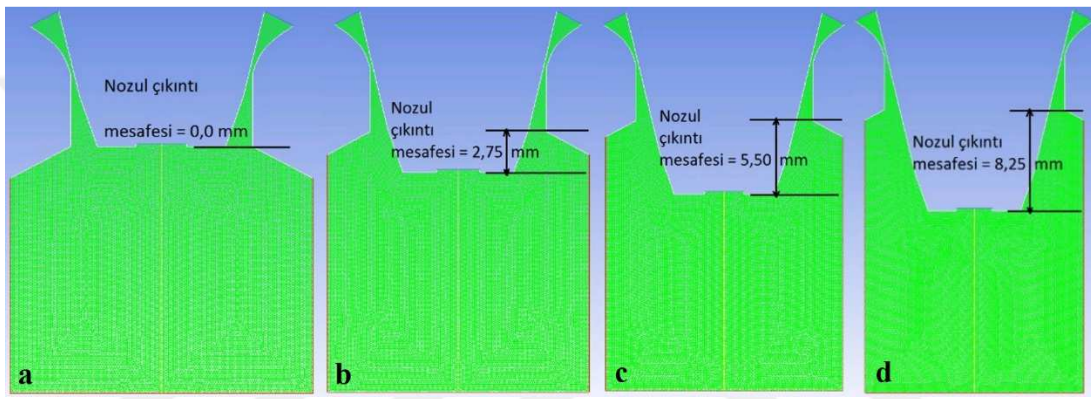
10,0 mm çıkıntı mesafesine sahip lüle geometrisi Gambit yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 5.20a). Oluşturulan lüle ANSYS Fluent programına aktarılmış ve sırasıyla 0,5 MPa; 1,0 MPa ve 1,5 MPa basınç değerlerindeki gaz kullanılarak atomizasyon işlemi modellenmiştir. Sayısal model ile elde edilen iki-fazlı akış görünümleri Şekil 5.20b, c, d'de verilmiştir.



Şekil 5.20. a) Dördüncü geometri, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon.

5.2.2. İkincil lüle çıkıntı mesafesi çalışmaları

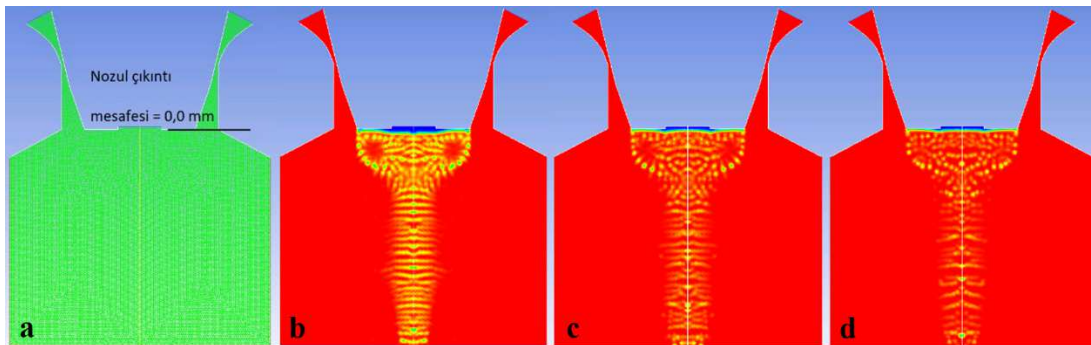
Tez çalışmasının bu bölümünde yine 4 farklı çıkıntı mesafesine sahip lüle geometrisi üzerinde modellemeler yapılmıştır. İkincil lüle çıkıntı mesafesi çalışmalarında oluşturulan lüle geometrisi, düzeltilmiş ikinci lülenin yanlara doğru genişletilmiş hâli olup yan yüzey köşe noktası referans noktası olarak alınmıştır. Bu nedenle çıkıntı mesafesi ölçümü lüle ucundan yan yüzey köşe noktası arasındaki mesafe ölçülerek yapılmıştır. Modellerin lüle uç çıkıntılarının 0,0 mm; 2,75 mm; 5,5 mm ve 8,25 mm olduğu Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. Lüle çıkıntı mesafeleri a) 0,0 mm, b) 2,75 mm, c) 5,5 mm, d) 8,25 mm.

Birinci geometri (Lüle çıkıntısı 0,0 mm)

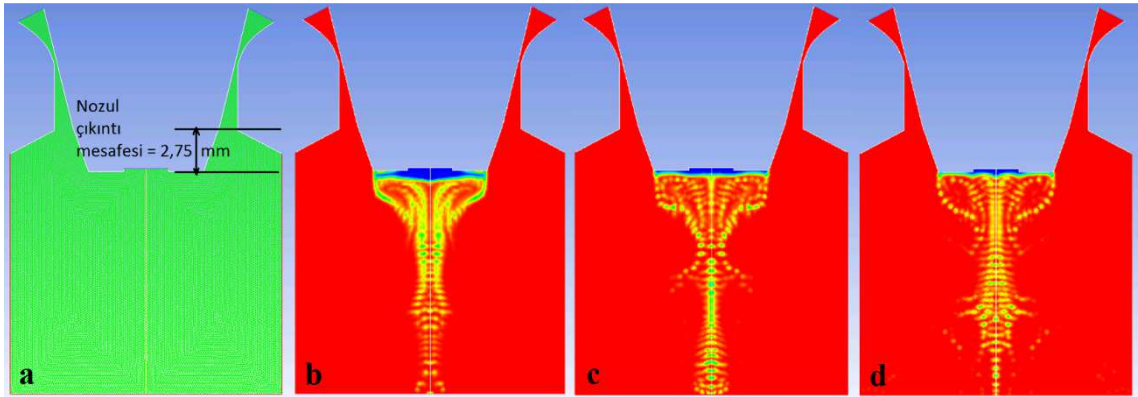
Lüle çıkıntı mesafesi sıfır kabul edilen birinci lüle geometrisi Gambit yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 5.22a). Oluşturulan lüle ANSYS Fluent programına aktarılmış ve sırasıyla 0,5 MPa; 1,0 MPa ve 1,5 MPa basınç değerlerindeki gaz kullanılarak atomizasyon sırasında oluşan iki-fazlı akışlar modellenmiştir. Sayısal model ile elde edilen iki-fazlı akış görüntüleri Şekil 5.22b, c, d’de verilmiştir.



Şekil 5.22. a) Birinci lüle, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon.

İkinci geometri (Lüle çıkıntısı 2,75 mm)

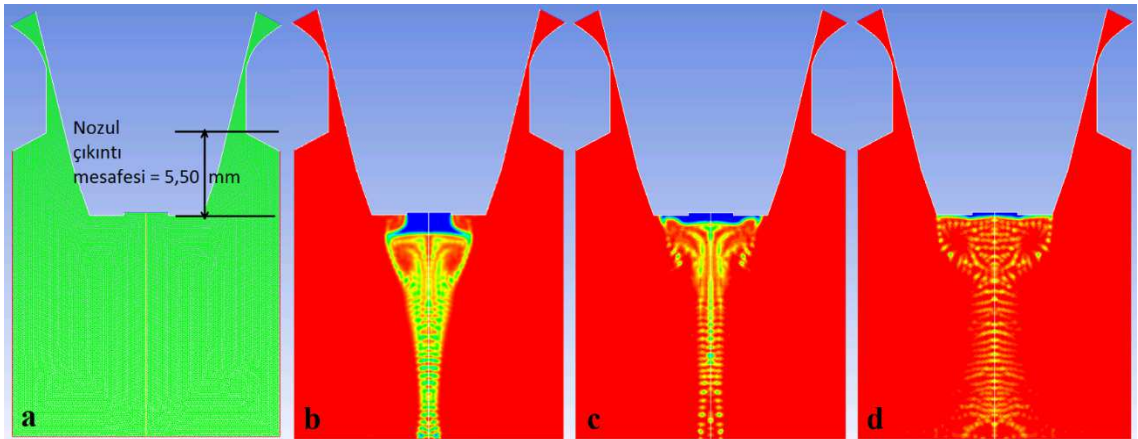
Lüle çıkıntı mesafesi 2,75 mm olan ikinci lüle geometrisi Gambit yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 5.23a). Oluşturulan lüle ANSYS Fluent programına aktarılmış ve sırasıyla 0,5 MPa; 1,0 MPa ve 1,5 MPa basınç değerlerindeki gaz kullanılarak atomizasyon sırasında oluşan iki-fazlı akışlar modellenmiştir. Sayısal model ile elde edilen iki-fazlı akış görünümleri Şekil 5.23b, c, d' de verilmiştir.



Şekil 5.23. a) İkinci lüle, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon.

Üçüncü geometri (Lüle çıkıntısı 5,50 mm)

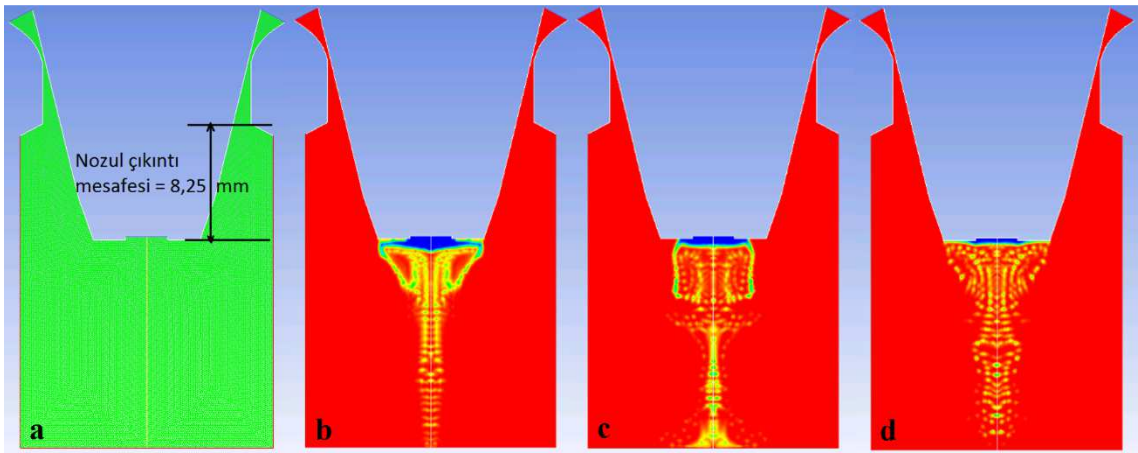
Lüle çıkıntı mesafesi 5,50 mm olan üçüncü lüle geometrisi Gambit yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 5.24a). Oluşturulan lüle ANSYS Fluent programına aktarılmış ve sırasıyla 0,5 MPa; 1,0 MPa ve 1,5 MPa basınç değerlerindeki gaz kullanılarak atomizasyon sırasında oluşan iki-fazlı akışlar modellenmiştir. Sayısal model ile elde edilen iki-fazlı akış görünümleri Şekil 5.24b, c, d' de verilmiştir.



Şekil 5.24. a) Üçüncü lüle, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon.

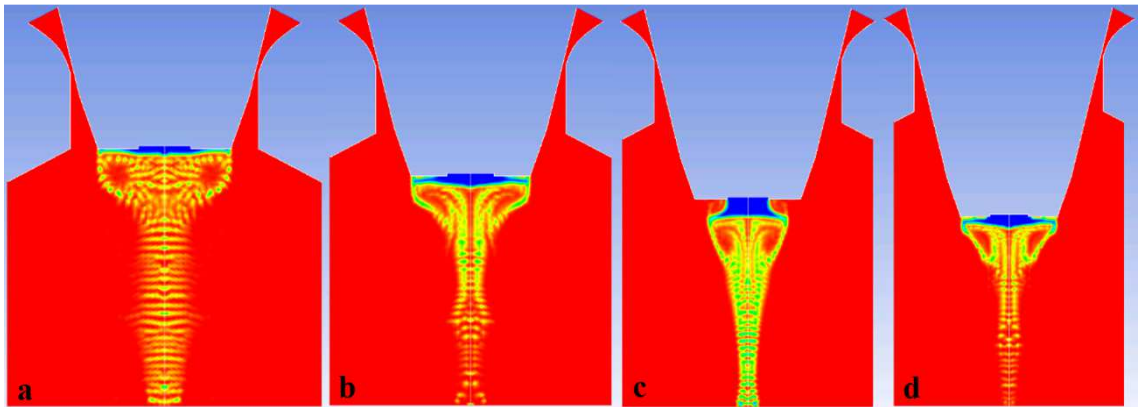
Dördüncü geometri (Lüle çıkıntısı 8,25 mm)

Lüle çıkıntı mesafesi 8,25 mm olan dördüncü lüle geometrisi Gambit yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 5.25a). Oluşturulan lüle ANSYS Fluent programına aktarılmış ve sırasıyla 0,5 MPa; 1,0 MPa ve 1,5 MPa basınç değerlerindeki gaz kullanılarak atomizasyon sırasında oluşan iki-fazlı akışlar modellenmiştir. Sayısal model ile elde edilen iki-fazlı akış görünümleri Şekil 5.25b, c, d’de verilmiştir.

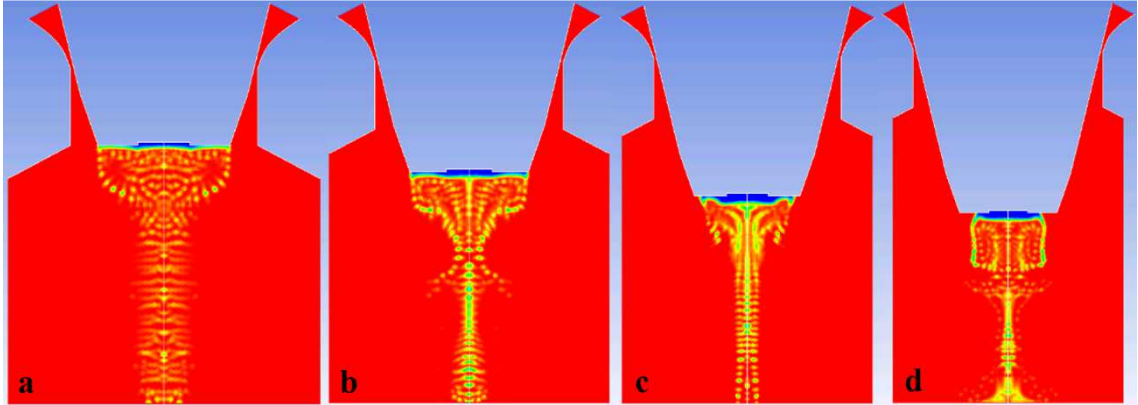


Şekil 5.25. a) Dördüncü lüle, b) 0,5 MPa, c) 1,0 MPa, d) 1,5 MPa gaz jeti ile atomizasyon.

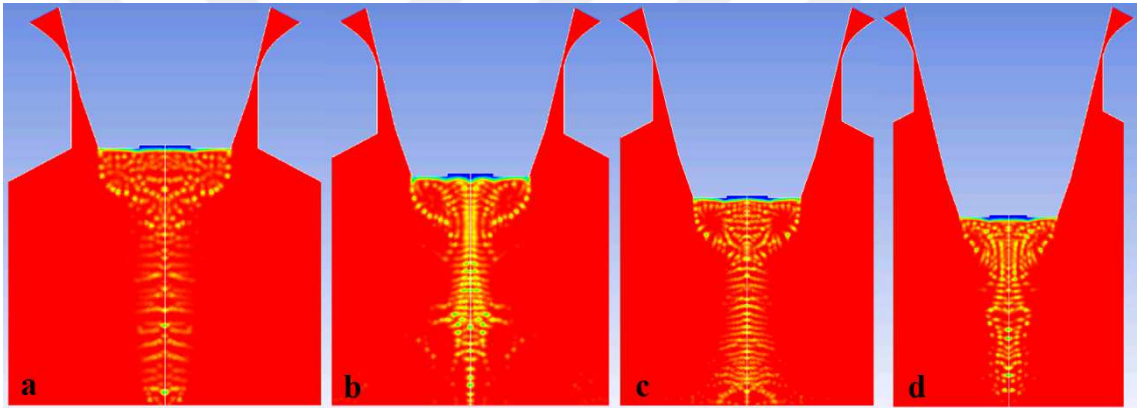
Farklı çıkıntı mesafelerinde elde edilen görseller basınç değerlerine göre sınıflandırılarak 0,5 MPa basınç altındaki görseller Şekil 5.26’da, 1,0 MPa basınç altındaki görseller Şekil 5.27’de, 1,5 MPa basınç altındaki görseller Şekil 5.28’de verilmiştir. Görseller incelendiğinde artan çıkıntı mesafesi ile 0,5 MPa basınçta parçalanmanın azaldığı, 1,5 MPa basınçta ise arttığı görülmektedir.



Şekil 5.26. Tüm lülelerin 0,5 MPa basınçla atomizasyonu a) 0,0 mm, b) 2,75 mm, c) 5,5 mm, d) 8,25 mm.



Şekil 5.27. Tüm lülelerin 1,0 MPa basınçla atomizasyonu a) 0,0 mm, b) 2,75 mm, c) 5,5 mm, d) 8,25 mm.



Şekil 5.28. Tüm lülelerin 1,5 MPa basınçla atomizasyonu a) 0,0 mm, b) 2,75 mm, c) 5,5 mm, d) 8,25 mm.

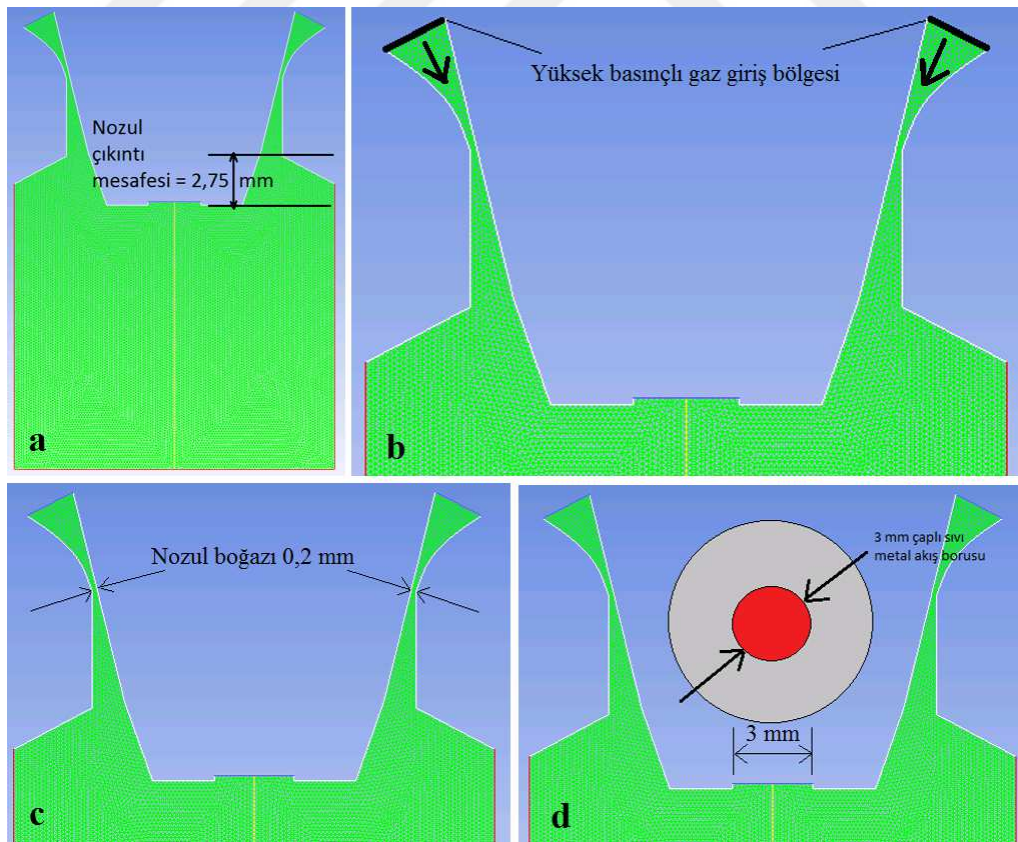
Şekil 5.26a, Şekil 5.27a ve Şekil 5.28a incelendiğinde, 0,5 MPa; 1,0 MPa ve 1,5 MPa basınç değerlerinde her üç farklı çıkıntı mesafeli lülede atomizasyonun başarılı bir şekilde elde edilebildiği görülmektedir. Şekil 5.26c incelendiğinde 5,5 mm çıkıntı mesafeli lülede 0,5 MPa basınç altında sıvı filminin oluşmadığı görülmektedir. Benzer bir başka durum Şekil 5.27d'de 8,25 mm çıkıntı mesafesine sahip lülede görülmektedir. Burada sıvı filminin oluştuğu ancak lüle dış çap noktasına ulaşamadığı görülmektedir. 0,5 MPa basınç altındaki atomizasyonda 2,75 mm ve 8,25 mm çıkıntı mesafeli lülelerde sıvı filmi oluşmakla beraber lüle yüzeyi ile arasında bir miktar boşluk oluştuğu Şekil 5.26b ve Şekil 5.26d'de görülmektedir. Bu durumda 0,5 MPa basınç altında oluşan toroidal vorteks bölgesindeki gaz akışlarının sıvı filmi oluşturmada yetersiz kaldığı söylenebilir. 1,5 MPa basınç altında gerçekleştirilen atomizasyonun en iyi parçalamayı sağlaması nedeniyle, tüm çıkıntı mesafeleri için en küçük parçacıkların 2,5 MPa altında elde edileceği yorumu yapılabilir. Bununla beraber deneysel çalışmalarda farklı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu nedenle bu şekilde elde edilen sayısal çözümlemenin parçacık boyutu hakkında yorum yapabilmek için yeterli olmadığını değerlendirilmiştir.

5.3. Tek-Fazlı Modelleme Sonuçları

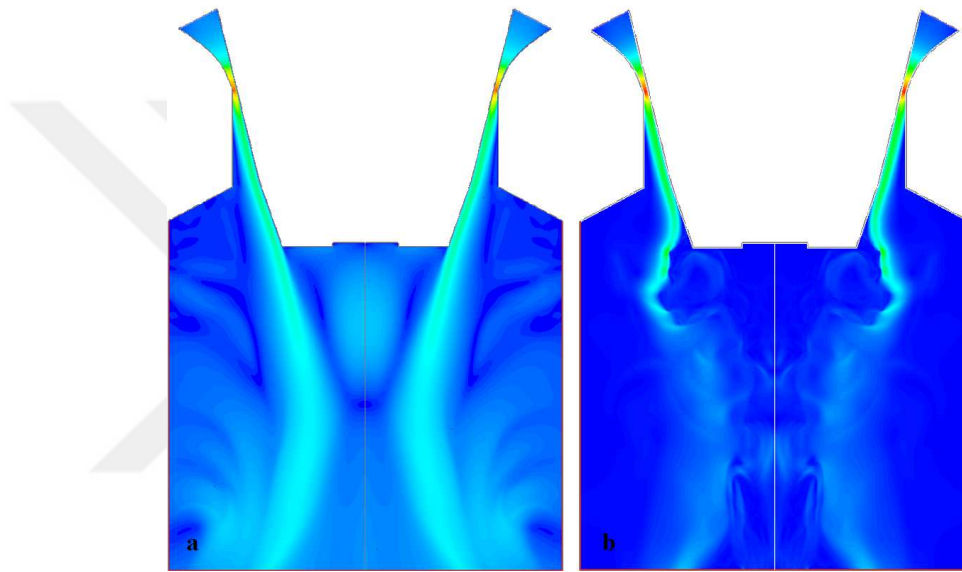
Tez çalışmasının önceki bölümlerinde farklı lüle geometrileri, çıkıntı mesafeleri ve çözümleme yöntemleri ile çalışılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde gaz geri dönüşüm ve toroidal vorteks bölgelerinin gösterilmesi amaçlanmış öncelikli olarak 2,75 çıkıntı mesafesine sahip lüle geometrisi ile sayısal modellemeler gerçekleştirilecektir. Daha sonra toz boyutu hesabında referans alınan deneysel verilerle uyum sağlamak amacıyla 5,0 mm çıkıntı mesafesine sahip lüle geometrisine geçilecektir.

Tek-fazlı modelleme çalışmalarında öncelikli olarak kullanılan lüle geometrisi Şekil 5.29'da verilmiştir. Lülünün çıkıntı mesafesinin 2,75 mm olduğu Şekil 5.29a'da, yüksek basınçlı atomizasyon gaz giriş bölgesi Şekil 5.29b'de, 0,2 mm genişliğindeki lülünün boğaz bölgesi Şekil 5.29c'de, çapı 3 mm olan sıvı metal akış borusu Şekil 5.29d'de gösterilmiştir.



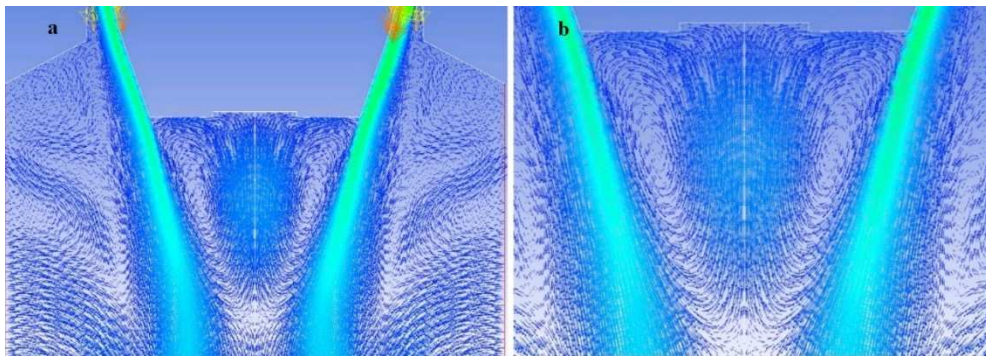
Şekil 5.29. Analizde kullanılan lüle geometrisi a) lüle çıkıntı mesafesi, b) yüksek basınçlı gaz giriş bölgesi, c) gaz çıkışı boğaz alanı, d) sıvı metal akış borusu.

2,75 mm lüle çıkıntı mesafesine sahip lüle ile modelleme işlemi yapılırken 1,0 MPa basınç altında gaz jeti kullanılmış olup, oluşan hız kontürleri tek-fazlı olarak Şekil 5.30a'da gösterilmiştir. Tek-fazlı akış sırasında düzgün bir karakterde olduğu gözlenen gaz akışı, sıvı metal varlığında bazı etkileşimlere maruz kalacaktır. Modele sıvı metal olarak kalay eklenip Şekil 5.30b'de görüldüğü gibi iki-fazlı akış gerçekleştirildiğinde sıvı fazın etkisiyle gaz akışında bozulmalar meydana gelmektedir. İki-fazlı akışta sıvı metal nedeniyle değişmiş olan hız kontürleri Şekil 5.30b'de görülmektedir.



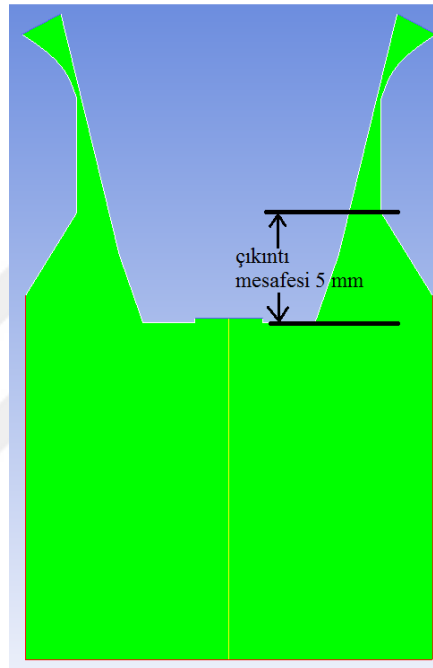
Şekil 5.30. 1,0 MPa basınç altında oluşan gaz hızı kontürleri a) tek-fazlı, b) iki-fazlı.

Atomizasyon işleminde lüle ucunda gerçekleşmesi gereken sıvı metal filminin oluşumunu sağlayan geri basınç bölgesinin ve toroidal vorteksin modelleme sonuçlarından elde edilen görünüşleri sırasıyla Şekil 5.31a'da ve Şekil 5.31b'de verilmiştir.



Şekil 5.31. Tek-fazlı akışta a) geri basınç bölgesi, b) toroidal vorteks.

Tez çalışmasının bundan sonraki bölümlerinde toz boyutu hesabında referans alınan deneysel verilerle uyum sağlamak amacıyla modellenen lüle çıkıntı mesafesi 2,75 mm'den 5,0 mm'ye çıkarılmıştır (Şekil 5.32.). Gambit yazılımında oluşturulan yeni lüle geometrisi 398000 adet hesaplama hücresine sahiptir. Geometrinin simetri eksenine göre modellendiği dikkate alındığında atomizasyon odasındaki toplam hesaplama hücresi sayısının 796000 adet olduğu düşünülebilir.



Şekil 5.32. Lüle çıkıntı mesafesi.

0,5 MPa basınç ile yapılan toz oluşumu simülasyonunun ardından, 1,0 MPa; 1,5 MPa; 2,0 MPa ve 2,5 MPa basınçlara çıkılarak sıvı fazlı atomizasyon öncesi tüm basınçlarda tek-fazlı hazırlıklar tamamlanmıştır. Tüm basınçlar için gaz-geri-dönüş bölgelerinde oluşan toroidal vorteks yapıları görüntülenmiş ve en büyük gaz hızı değerleri hesaplanmıştır.

5.3.1. Ağ yapısından bağımsızlık

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinin kullanıldığı mühendislik çalışmalarında oluşturulan sayısal modellerin ağ yapısından bağımsız sonuçlar verdiğinin gösterilmesi gerekmektedir. Bu amaçla modelin hücre sayısı artırılarak sonuçların belli bir değerden sonra değişmediği en küçük hücre sayısı tayin edilir. Belirlenen hücre sayısı bilgisayar işlemcisinin hesaplama süresinin kısa tutulması açısından önemlidir.

Tez çalışmasında elde edilen sayısal çözümleme sonuçlarının ağ yapısından bağımsızlığının gösterilebilmesi amacıyla en büyük gaz akış hızı ve gaz akış miktarları (debileri) hesaplatılmıştır.

30000, 67000, 131000, 217000, 346000 ve 462000 adet hesaplama hücresi içeren ağ yapıları Gambit yazılımı ile oluşturulmuştur. Tüm ağ yapıları için 1,0 MPa; 1,5 MPa; 2,0 MPa; 2,5 MPa; 3,0 MPa ve 3,5 MPa gaz basınçlarında sayısal çözümleme gerçekleştirilerek her bir basınç değerinde atomizasyon gazının akış miktarı ve en yüksek hız değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen en büyük akış hız değerleri Çizelge 5.1’de, gaz akış debileri Çizelge 5.2’de, debi değişim değerleri ise Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.1. Gaz basıncı ve hücre sayısına göre en büyük gaz hızının değişimi (m/s).

Gaz Basıncı (MPa)	Hücre Sayıları					
	30 000	67 000	131 000	217 000	346 000	462 000
1,0	642,53	647,02	642,98	640,60	636,59	635,51
1,5	646,34	651,40	655,26	654,13	652,30	651,13
2,5	649,40	654,13	658,30	659,84	660,66	660,21
2,5	652,04	656,52	660,27	661,62	664,33	662,37
3,0	657,64	662,01	666,04	670,22	667,48	668,76
3,5	665,28	668,79	671,92	673,94	668,21	667,32

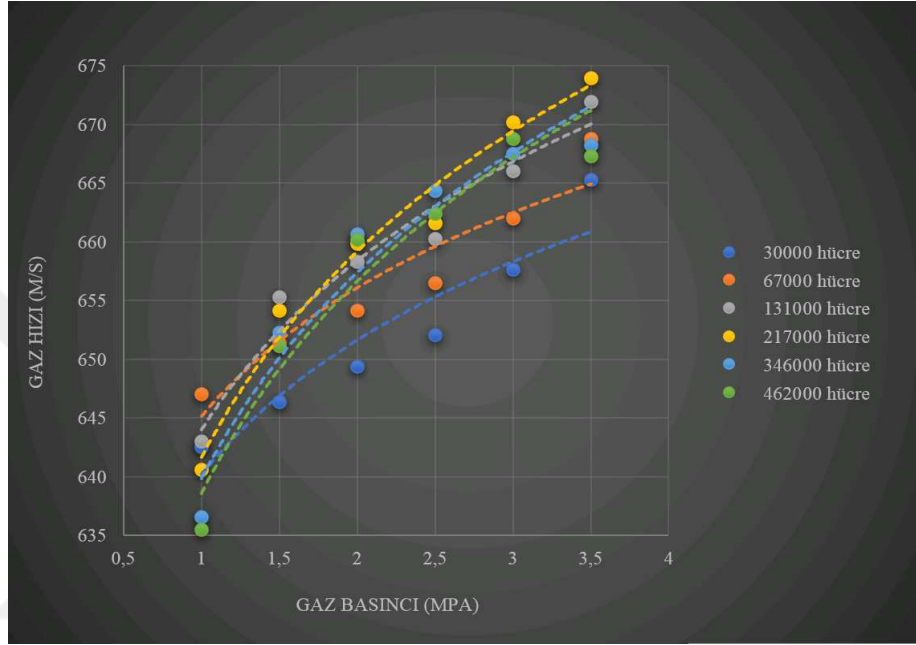
Çizelge 5.2. Gaz basıncı ve hücre sayısına göre gaz akış debileri (kg/s).

Gaz Basıncı (MPa)	Hücre Sayıları					
	30 000	67 000	131 000	217 000	346 000	462 000
1,0	0,0224	0,0220	0,0217	0,0215	0,0214	0,0214
1,5	0,0326	0,0320	0,0317	0,0314	0,0312	0,0311
2,5	0,0428	0,0421	0,0416	0,0412	0,0410	0,0409
2,5	0,0530	0,0521	0,0515	0,0511	0,0508	0,0507
3,0	0,0632	0,0622	0,0615	0,0609	0,0606	0,0605
3,5	0,0735	0,0722	0,0714	0,0708	0,0704	0,0702

Çizelge 5.3. Gaz basıncı ve hücre sayısına göre gaz akış debilerinin değişimi (kg/s).

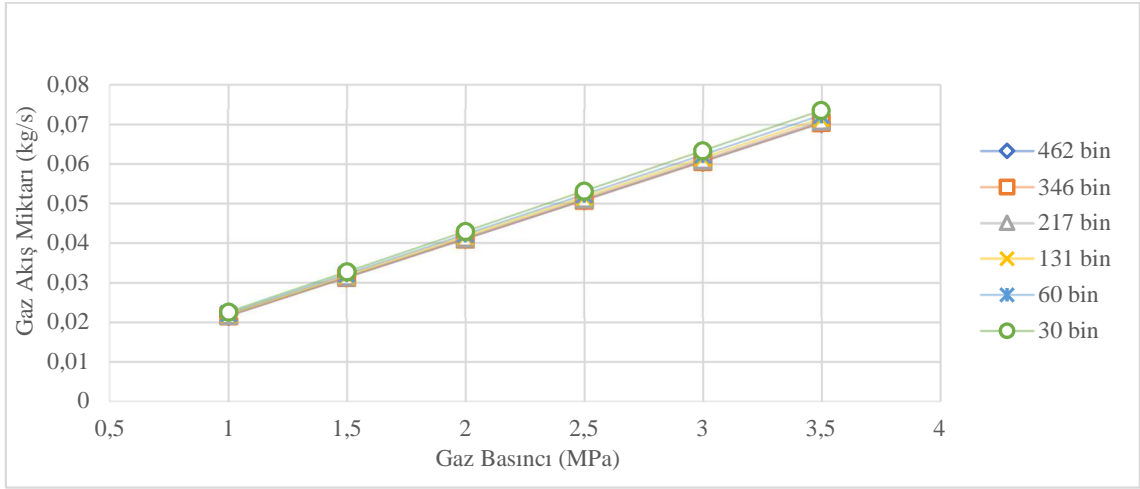
Gaz Basıncı (MPa)	Hücre Sayıları					
	30 000	67 000	131 000	217 000	346 000	462 000
1,0	0,0024	0,0020	0,0017	0,0015	0,0014	0,0014
1,5	0,0026	0,0020	0,0017	0,0014	0,0012	0,0011
2,5	0,0028	0,0021	0,0016	0,0012	0,0010	0,0009
2,5	0,0030	0,0021	0,0015	0,0011	0,0008	0,0007
3,0	0,0032	0,0022	0,0015	0,0009	0,0006	0,0005
3,5	0,0035	0,0022	0,0014	0,0008	0,0004	0,0002

Çizelge 5.1’de rakamsal değerleri verilen en büyük gaz akış hızlarının değişimi Şekil 5.33’te eğrisel olarak gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde 346000 hücre sayısında artan basınçla birlikte meydana gelen en yüksek gaz akış hızındaki değişimin, 462000 hücre sayısındaki sonuçlar ile birbirine yakın olduğu görülmektedir.

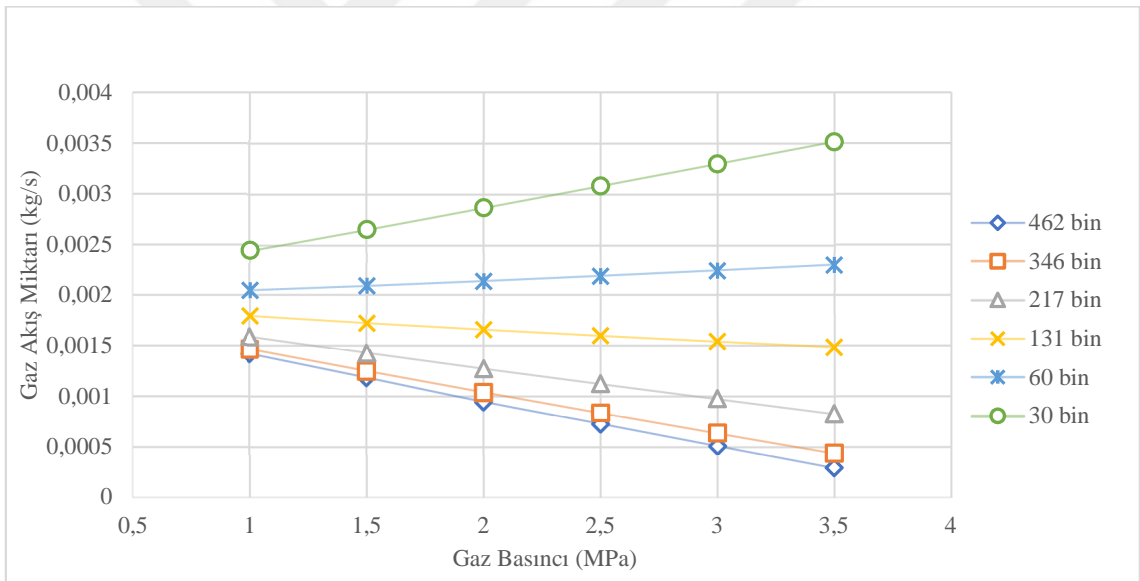


Şekil 5.33. Atomizasyon basıncına göre gaz hızının farklı hücre sayılarında değişimi.

Değişen hücre sayısı ve artan gaz basıncıyla birlikte elde edilen gaz debisindeki değişimler Şekil 5.34’te gösterilmiştir. Şekil 5.34’te görülen gaz debisi değişim miktarlarının küçük mertebelerde olması sebebiyle, Çizelge 5.3’te verilen debi artış miktarları kullanılarak Şekil 5.35 oluşturulmuştur. Şekil 5.35 incelendiğinde 346000 ve 462000 hücreli modeller ile elde edilen değişim eğrileri birbirleriyle oldukça yakın değerlere sahiptir. Buradan hareketle 346000 hücre sayısının sayısal çözümleme için yeterli olduğu kabul edilmiştir.



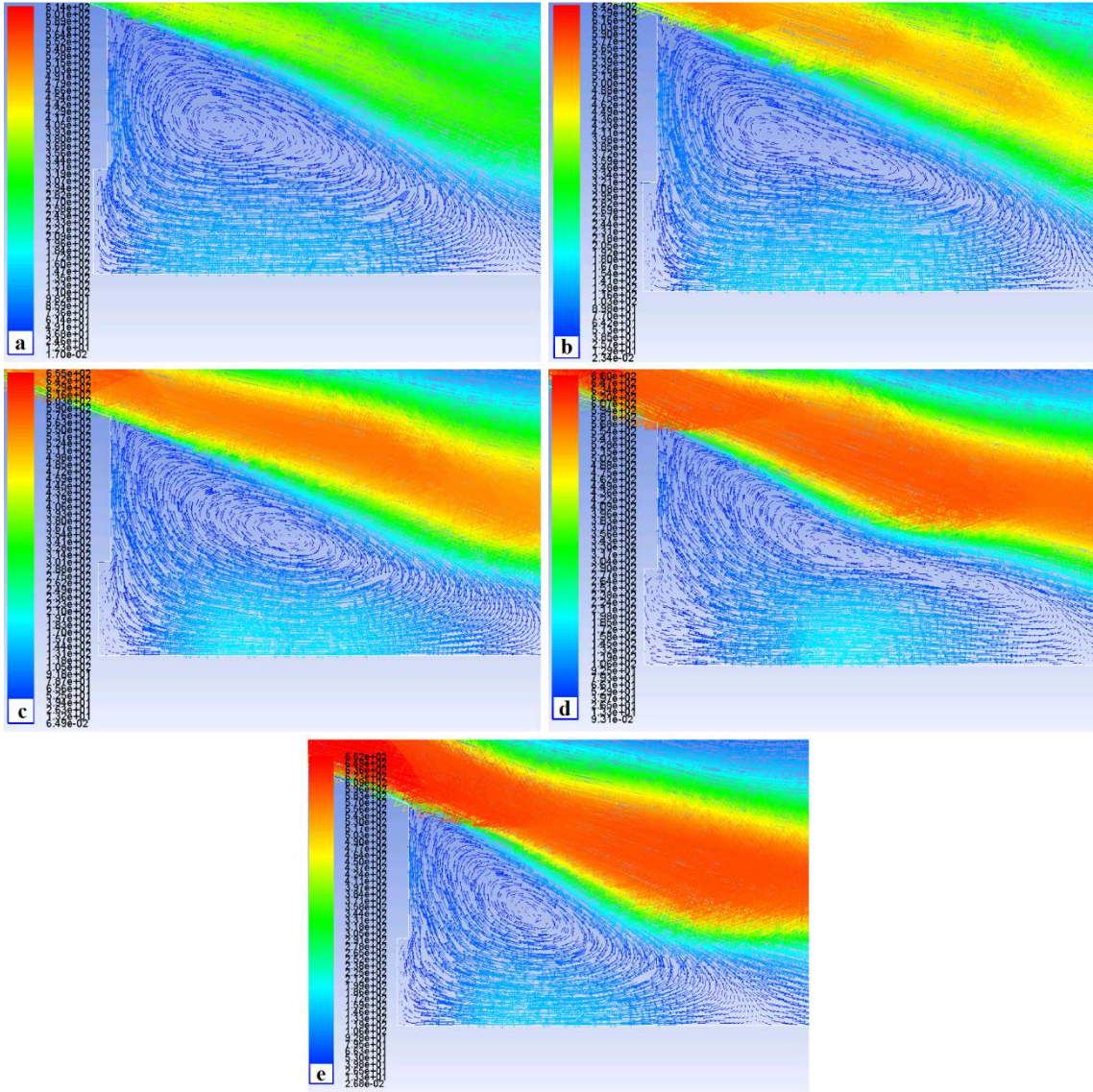
Şekil 5.34. Gaz akış miktarları.



Şekil 5.35. Gaz akış miktarlarındaki değişimler.

5.3.2. Toroidal vorteks oluşumu

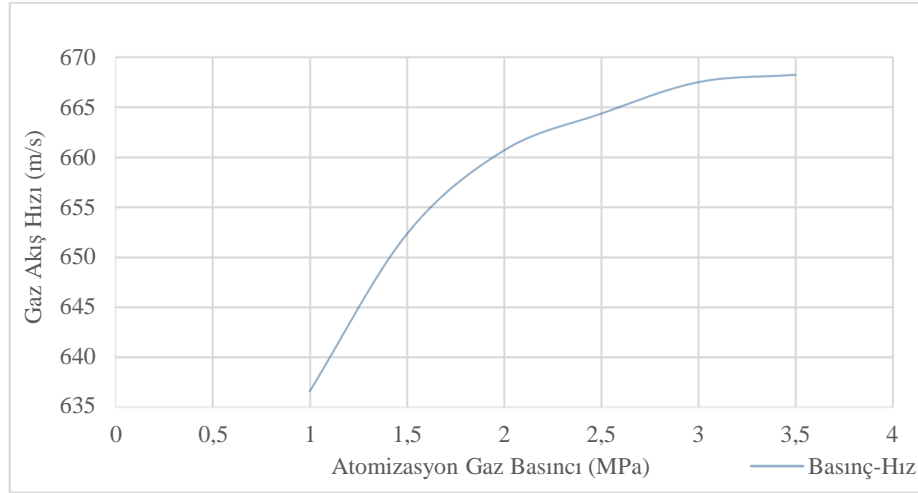
0,5 MPa; 1,0 MPa; 1,5 MPa; 2,0 MPa; 2,5 MPa basınç değerleri için elde edilen vektörel hız diyagramları kullanılarak gaz geri dönüşüm bölgesinde oluşan toroidal vorteks bölgeleri gösterilmiştir (Şekil 5.36.). Basınç artışı ile vorteks bölgesinin küçüldüğü gözlemlenmiştir. Gaz basıncındaki artışla birlikte gaz hızının artması nedeniyle toroidal vorteks bölgesi de şekilsel olarak değişimler göstermektedir.



Şekil 5.36. Gaz geri dönüşüm bölgesi ve toroidal vorteks a) 0,5 MPa basınç altında, b) 1,0 MPa basınç altında, c) 1,5 MPa basınç altında, d) 2,0 MPa basınç altında, e) 2,5 MPa basınç altında.

5.3.3. En yüksek gaz hızları

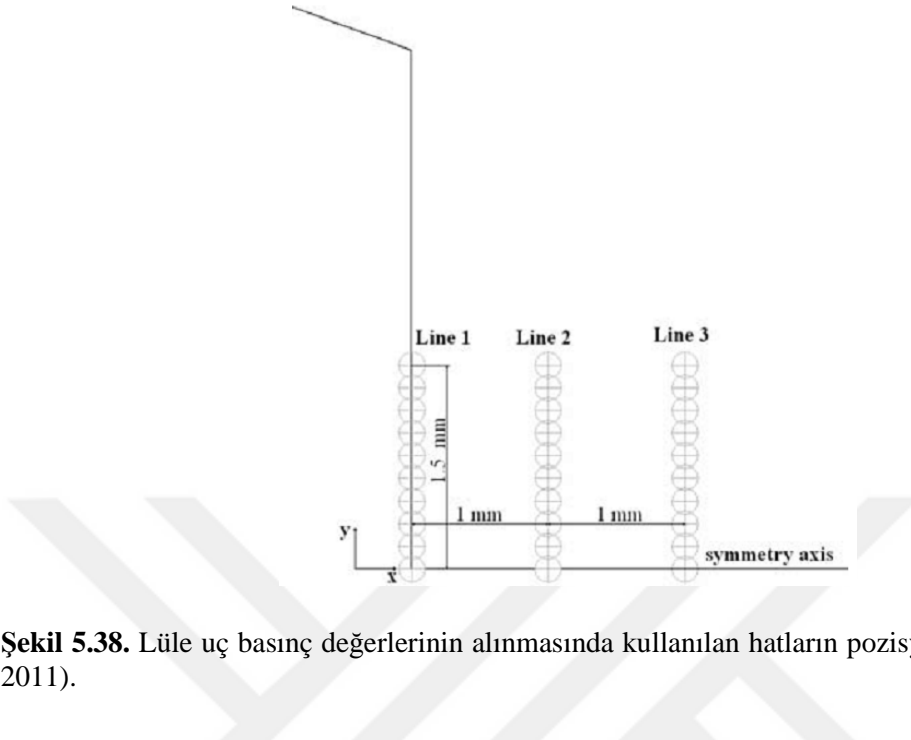
Atomizasyon gaz basıncının, gaz akış hızına etkilerini gösterebilmek için, 0,5 MPa; 1,0 MPa; 1,5 MPa; 2,0 MPa; 2,5 MPa basınç değerlerinde lüle çıkışında ölçülen en yüksek gaz hızları eğrisel olarak Şekil 5.37’de verilmiştir. Şekilde artan gaz basıncı ile atomizasyon gazının ulaşabildiği en yüksek hız değerlerinin sabit bir değere yakınsadığı görülmektedir. Diğer bir deyişle belli bir basınç değerinden sonra gaz basıncının yükseltilmesi, en yüksek gaz hızı değerinde kayda değer bir artış oluşturmamaktadır.



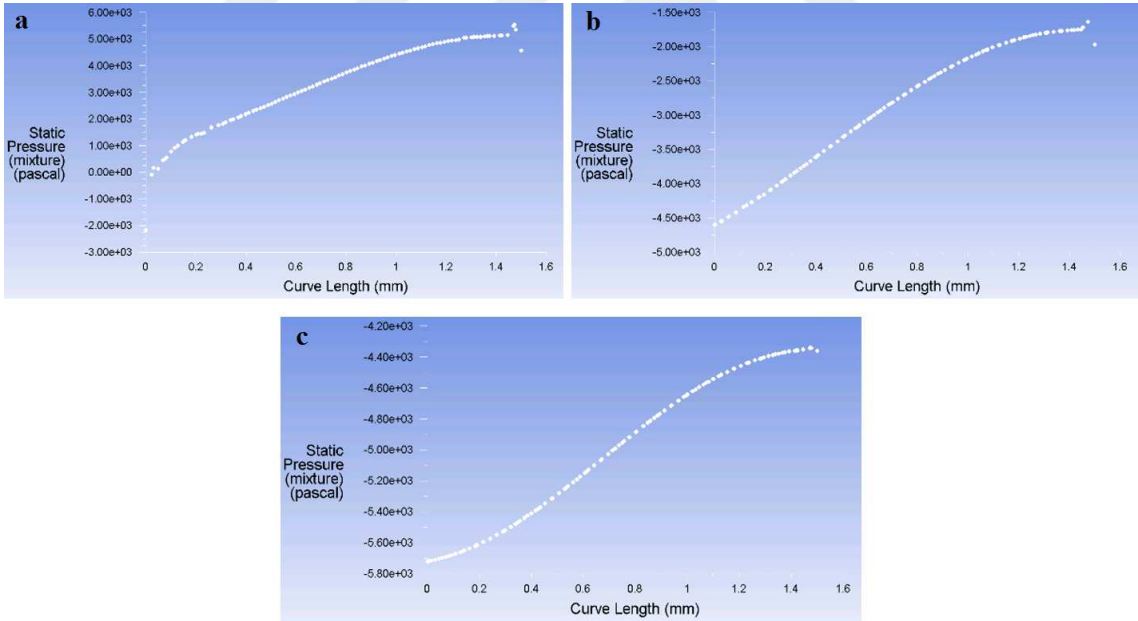
Şekil 5.37. En büyük gaz akış hızları.

5.3.4. Lüle uç basıncı

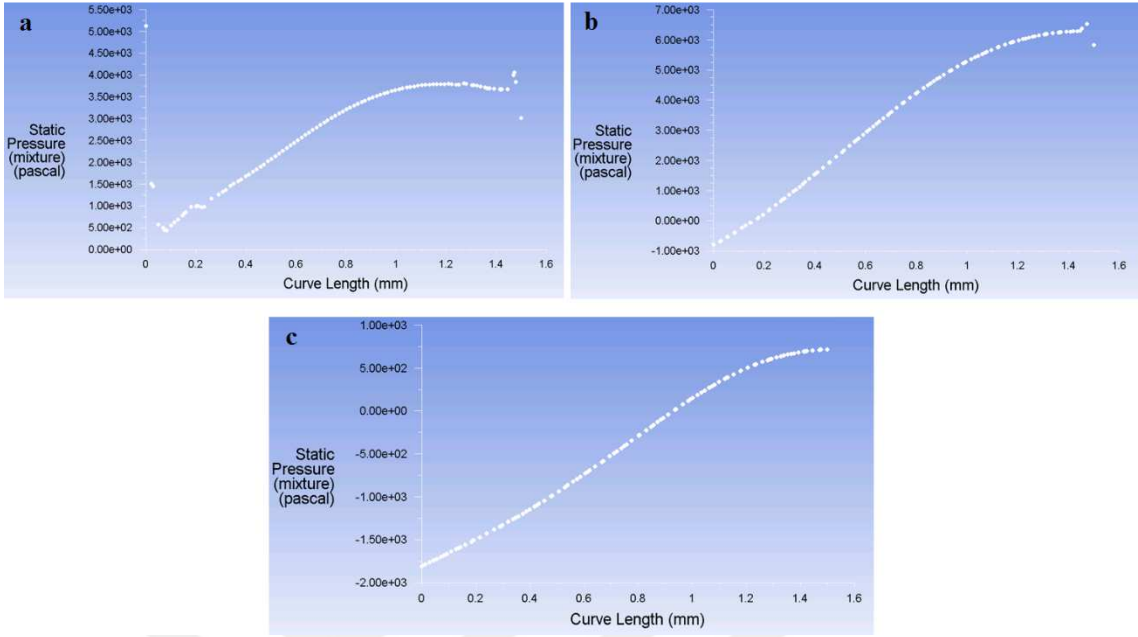
Lülenin uç basıncını ölçmek için Şekil 5.38’de gösterildiği gibi lüle ucundan itibaren birer mm ara ile oluşturulan üç adet hat boyunca basınç değerleri alınmıştır. Sayısal çözümleme ile elde edilen basınç değerlerinin doğruluğunu artırmak için üç basınç hattı birbirinden 1 mm aralıklarla konumlandırılmıştır. Metal akış borusunun iç çapı 3 mm olduğu için hat uzunlukları y-ekseni (yarıçap) yönünde 1,5 mm alınmıştır. Her bir hat için onar adet olan ölçüm noktaları 1,5 mm uzunluğundaki hatlara eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Hatlar üzerindeki ölçüm noktalarından elde edilen basınç verileri ile basınç eğrileri çizdirilmiştir (Şekil 5.39., Şekil 5.40., Şekil 5.41., Şekil 5.42. ve Şekil 5.43.). Beş farklı basınç değeri (0,5 MPa; 1,0 MPa; 1,5 MPa; 2,0 MPa; 2,5 MPa) için her üç hattaki ölçüm noktalarından elde edilen basınç değerlerinin ortalamaları alınarak bulunan değer lüle uç basıncı olarak kabul edilmiştir. Sayısal çözümleme ile belirlenen uç basınç değerleri ile deneysel uç basınç (Aydın ve Ünal, 2011) değerleri Şekil 5.44’te birlikte verilmiştir. Deneysel ve sayısal çözümleme ile elde edilen uç basınç değerleri incelendiğinde uç basıncının genellikle atmosfer basıncı mertebelerinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte deneysel uç basıncının 1,7 MPa basınçta en yüksek değerine ulaştığı, teorik uç basınç değerinin ise 2 MPa basınçta en yüksek değere ulaşmaktadır. Deneysel ve teorik uç basınç değerlerinin en yüksek değerlerine ulaştıktan sonra azalma eğiliminde oldukları görülmektedir. Lüle ucunda negatif basınç oluşturarak ergiyik akışının sürekliliğini sağlayan uç basınç değerlerinin, deneysel sonuçlara göre 1 MPa ve 2,7 MPa basınçlarda, teorik sonuçlara göre 0,5 MPa basınçta olduğu görülmüştür.



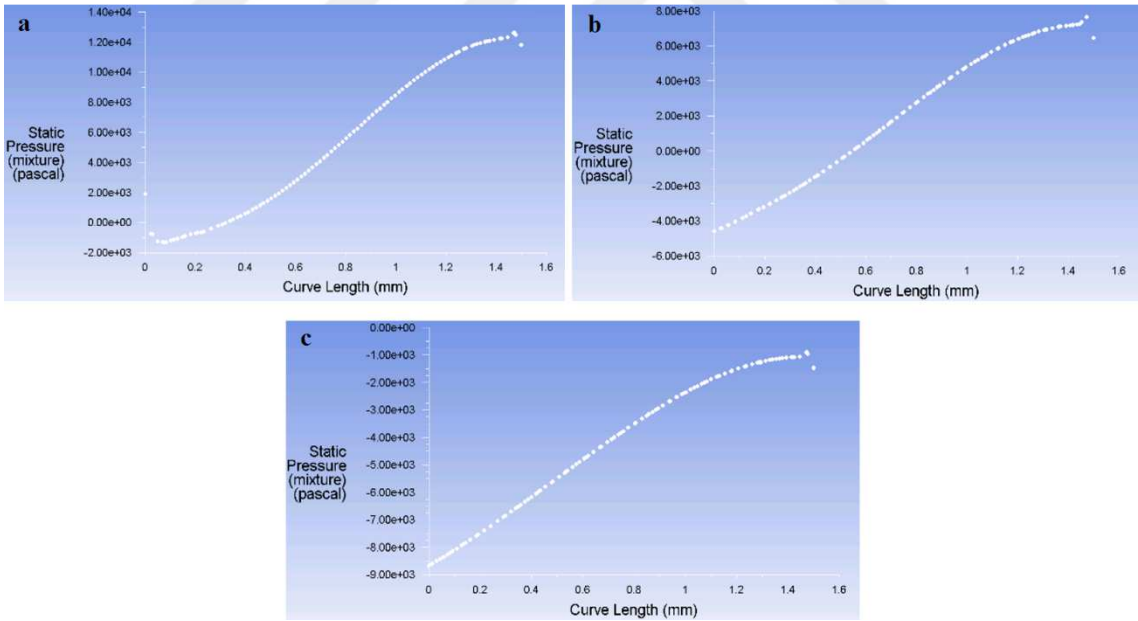
Şekil 5.38. Lüle uç basınç değerlerinin alınmasında kullanılan hatların pozisyonu (Güleşen vd., 2011).



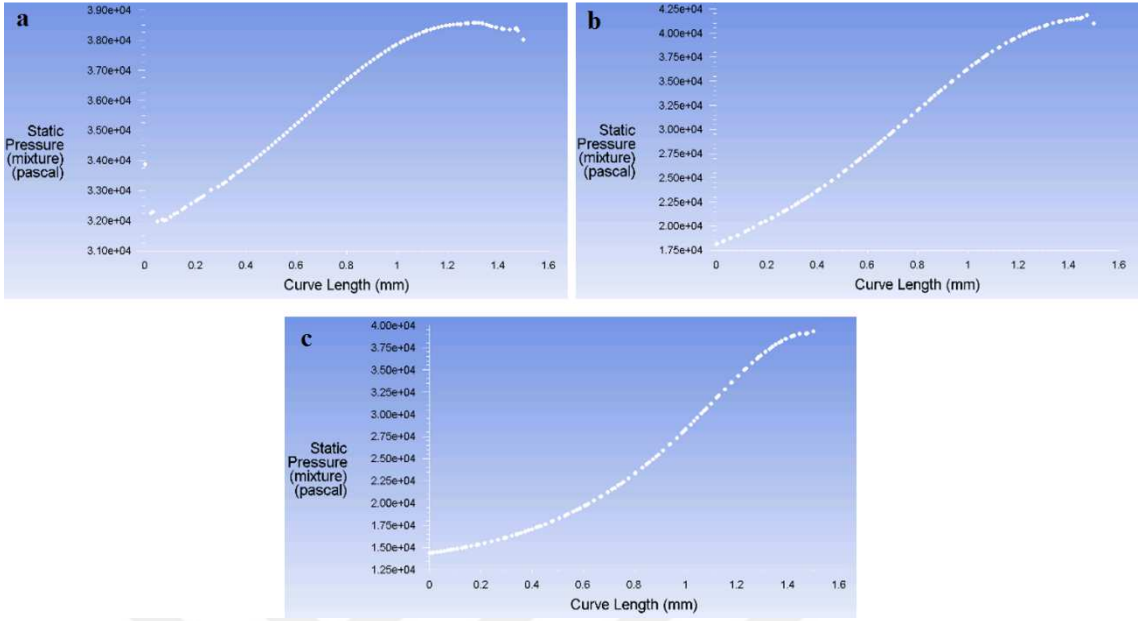
Şekil 5.39. 0,5 MPa basınç altında a) Hat 1, b) Hat 2, c) Hat 3 boyunca basınç değerleri.



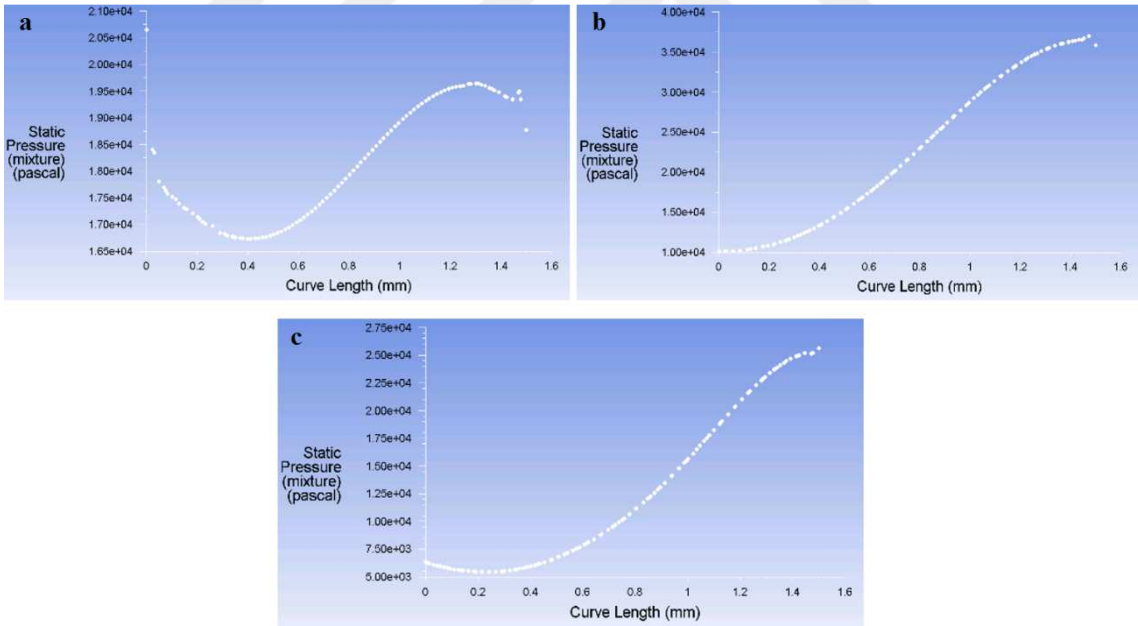
Şekil 5.40. 1,0 MPa basınç altında a) Hat 1, b) Hat 2, c) Hat 3 boyunca basınç değerleri.



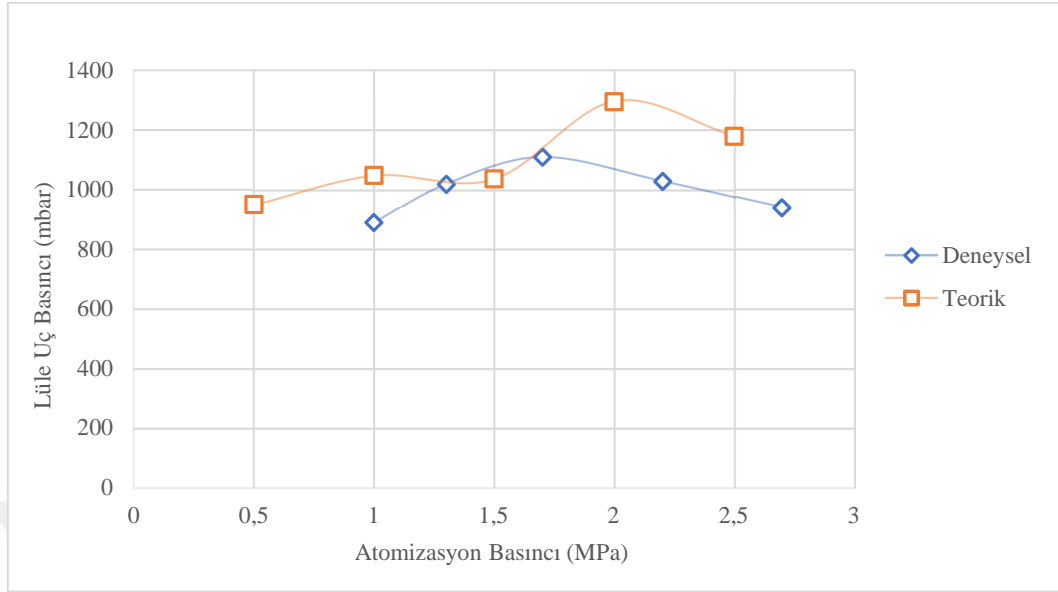
Şekil 5.41. 1,5 MPa basınç altında a) Hat 1, b) Hat 2, c) Hat 3 boyunca basınç değerleri.



Şekil 5.42. 2,0 MPa basınç altında a) Hat 1, b) Hat 2, c) Hat 3 boyunca basınç değerleri.



Şekil 5.43. 2,5 MPa basınç altında a) Hat 1, b) Hat 2, c) Hat 3 boyunca basınç değerleri.



Şekil 5.44. Lüle uç basıncı değişimi verilerinin kıyaslaması.

5.3.5. Gaz ve sıvı metal debileri

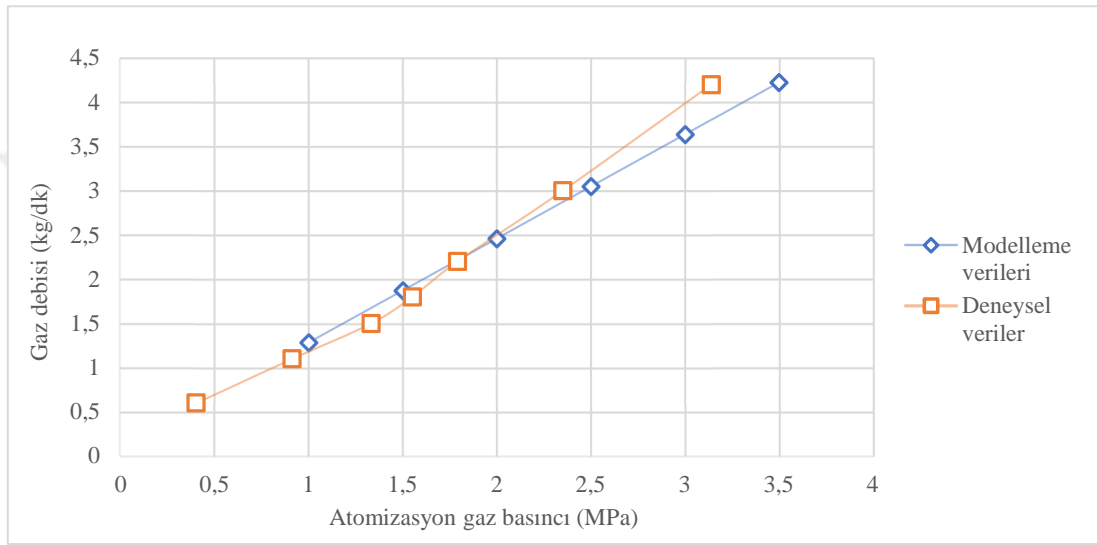
Tez çalışmasında artan gaz basıncı ile birlikte parçacık boyutundaki değişimin sayısal çözümleme ile elde edilebilirliği araştırıldığı için farklı basınç değerlerinde tekrarlanan modellemelerde sıvı metal (kalay) akış debisi 3,9 kg/dakika olmak üzere sabit tutulmuştur. Buna karşın atomizasyon gaz basıncındaki artışla birlikte lüleden geçen gaz miktarı artmaktadır. Sayısal çözümler sırasında elde edilen gaz debi değerleri Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Artan atomizasyon basıncına göre gaz debisi.

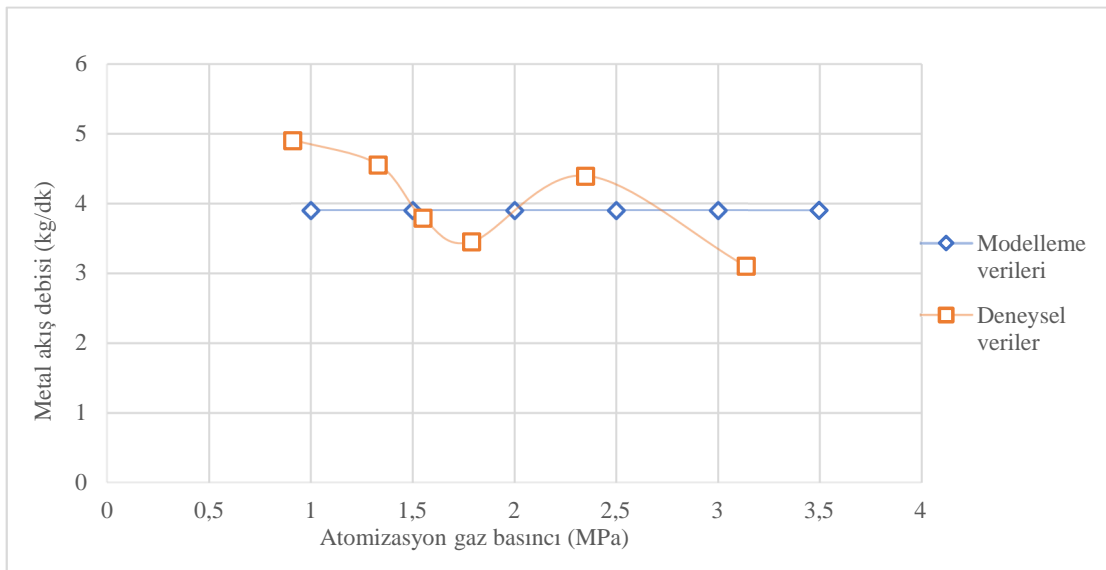
Gaz Basıncı (MPa)	Debi (kg/s)
1,0	0,0214637
1,5	0,0312487
2,0	0,0410392
2,5	0,0508346
3,0	0,0606334
3,5	0,0704346

Lüleden geçen azot kütleinin artmasıyla birlikte akış hızının da artması, ergitilmiş sıvı metale momentum aktarımının da artmasının sağlanması açısından önemlidir. Momentum aktarımının artması sayesinde sıvı metal daha küçük parçalara ayrılır ve böylece daha küçük toz boyutlarının elde edilmesi sağlanır.

Sayısal çözümlleme ile elde edilen atomizasyon gaz basıncı artışı ile gaz tüketim değerlerinin değişimi Şekil 5.45'te, metal akış debisi değişimi ise Şekil 5.46'da verilmiştir. Grafiklerdeki deneysel veriler Ünal'ın 2007 yılında yaptığı çalışmadan alınmıştır (Ünal, 2007a). Şekil 5.45'te verilen modelleme verileri ile deneysel verilerin birbirleriyle uyum içerisinde oldukları görülmektedir. Şekil 5.46'daki deneysel sonuçlar ile modelleme sonuçlarının bire bir örtüşmemesinin sebebi modellemede metal akış debisinin sabit tutulmasıdır.



Şekil 5.45. Basınca göre gaz akış debisi değişimi (Deneysel ve HAD verilerinin karşılaştırılması).

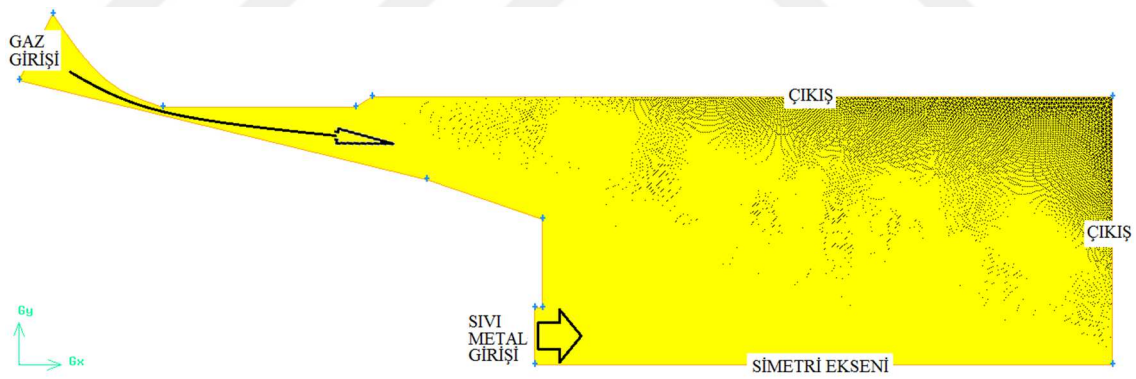


Şekil 5.46. Basınca göre sıvı metal akış debisi değişimi (Deneysel ve HAD verilerinin karşılaştırılması).

5.4. Atomizasyon Mekanizmalarının Açıklanması

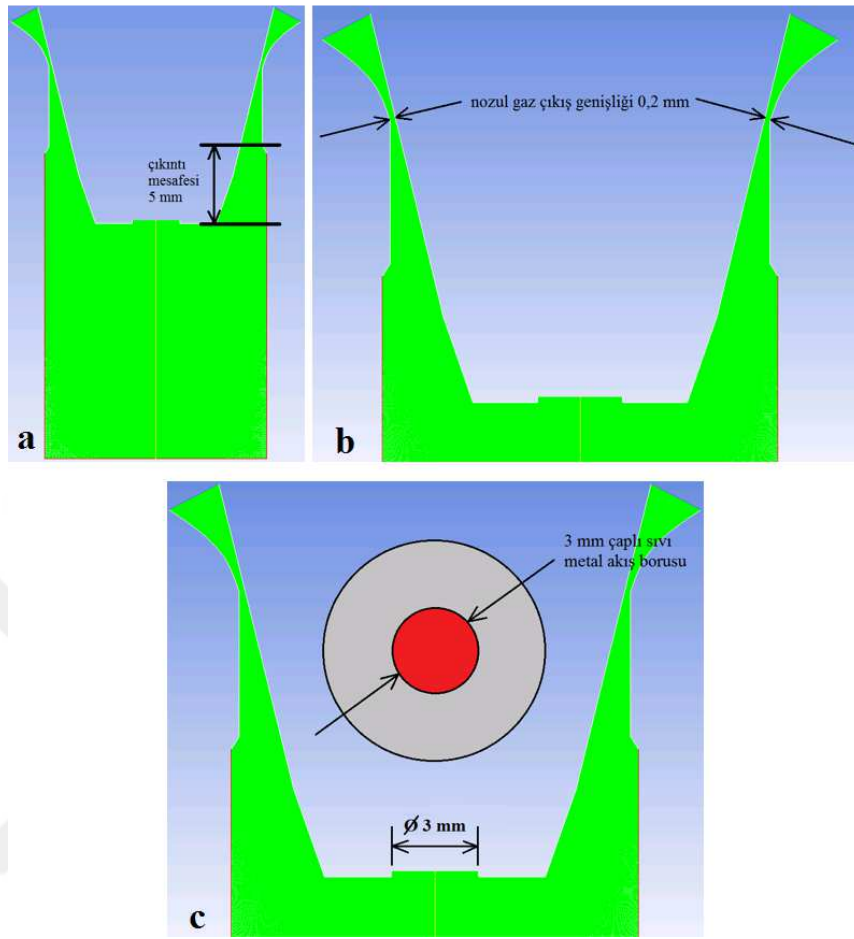
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmaları, bazı karmaşık cihazlarda deneysel olarak ölçülmesi zor olan basınçlar ve hızlar gibi akış detayları hakkında birçok bilgi sağlar (Chekifi, 2018). Çok-fazlı akışları incelemek için gaz ile sıvı ara-yüzünün keskin bir şekilde çözülebildiği simülasyonlar kullanmak, bu tür akışların fiziğini ayrıntılı olarak analiz etmek için nispeten yeni bir alternatif hâline gelmiştir (Deshpande vd., 2012). Tez çalışmasının bu bölümünde gaz atomizasyonu işlemi iki-fazlı modellenerek atomizasyonda gerçekleşen akışlar ve parçacık oluşum mekanizmaları açıklanmıştır.

Lüleye gaz girişini sağlayan bölge Şekil 5.47’de görüldüğü gibi, simetri eksenine merkezinde kalan halka şeklindeki bir bölgedir. Yüksek basınç altındaki atomizasyon gazlarının modellenen geometriye giriş noktası bu kısımdır. Sayısal model oluşturulurken lüle ucundaki çıkıntı mesafesi 5 mm olarak modellenmiştir. Şekil 5.48a’da çıkıntı mesafesi gösterilmiştir. Bu değer, toz boyutu üzerinde doğrudan etkisi olan önemli bir parametredir ve deneysel çalışmalarda kullanılan gerçek lüle çıkıntı mesafesini yansıtmaktadır. Modellenen lüle geometrisi yaklaşık 346000 adet üçgenimsi bağımsız hesaplama alanına ayrılmıştır.



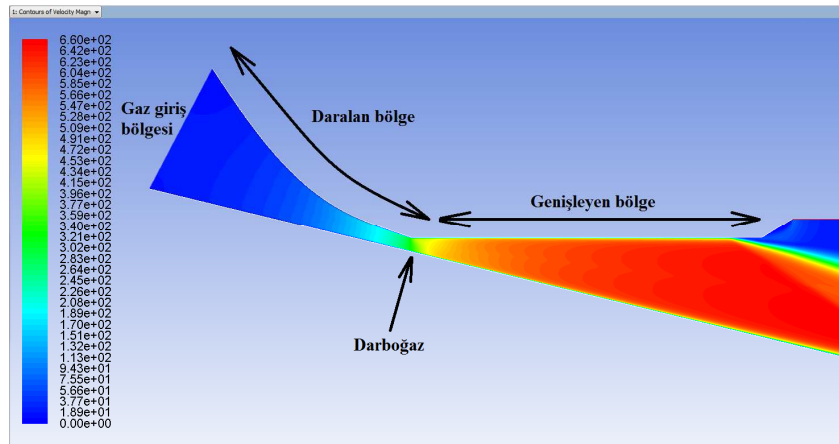
Şekil 5.47. Gambit programında oluşturulan ağ yapısı.

Lülenin en dar bölgesini oluşturan ve 0,2 mm boğaz açıklığına sahip olan gaz geçiş alanı Şekil 5.48b’de, 3 mm çapındaki içi boş bir silindir hâlinde olan metal akış borusu ise Şekil 5.48c’de gösterilmiştir.



Şekil 5.48. a) Lüle çıkıntı mesafesi, b) lüle boğazı, c) metal akış borusu.

Atomizasyon işlemi sırasında gerçekleşen parçalanma ve toz oluşumu mekanizmaları literatürde etraflıca işlenen konular arasındadır. Yapılan çalışmalar çoğu zaman atomizasyon işlemi esnasında çekilen fotoğraflardan veya yavaşlatılmış kamera kayıtları ile elde edilen görüntüler üzerinden yürütülmektedir. Hassas kameralar kullanılarak elde edilen detaylı görüntülerden atomizasyon mekanizmalarının işleyişi hakkında bir dizi çıkarımlar yapılmakta ve Şekil 5.49a'da görülen tarzdaki akış modelleri, deneysel sonuçlara dayalı olarak önerilmektedir (Ünal ve Kayalı, 2018). Bu tez çalışmasında Şekil 5.49b'de görüldüğü gibi 3 mm çaplı metal akış borusuna sahip yakından eşlemeli bir atomizasyon ünitesinde gerçekleşen atomizasyon mekanizmaları ve akış yönelimleri HAD yöntemleriyle araştırılmış, literatüre geçmiş önerilen modeller ile uyum sağlandığı gösterilmiştir.



Şekil 5.50. Daralan-geişleyen gaz atomizasyon lülesinde 2,0 MPa basınç altındaki hız kontürleri (Ünal ve Kayalı, 2018).

Parçalanma mekanizmalarının en yüksek verimde oluşabilmesi için atomizasyon gazlarının sıvı metal ile temas ettiği anda gazın mümkün mertebe yüksek hızda olması gerekir. Fakat atomizasyon gazlarının lüleden uzaklaştıkça genişleme potansiyelleri azalır ve hız kaybederler. Bu nedenle sıvı metal ile gazların ilk temas noktasının lüle çıkışına yakın tutulması istenir. Bununla beraber bu mesafenin çok yakın olması durumundaysa lüle ucunda pozitif basınç oluşumu meydana gelebilir. Lüle ucunda oluşacak pozitif basınç sıvı metalin aşağıya doğru akışını kısıtlayabilir ve hatta yukarı yönlü gaz akışlarına sebep olabilir. Ayrıca sıvı metal akış borusu ucunda sıvı metalin katılarak boruyu tıkayıp akışın durmasına da yol açabilir. Sıvı metal akışını ve atomizasyon verimini olumsuz yönde etkileyecek benzer durumları bertaraf etmek adına sıvı metal ile gaz temasının akış borusundan belirli bir mesafe sonra gerçekleştiği bazı düzenekler oluşturulmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus atomizasyon gazlarındaki hız düşüşünün verimi olumsuz yönde etkilemesinin önüne geçebilmektir (Ünal ve Kayalı, 2018).

Gaz atomizasyonu işleminin ana prensibi, ergitilmiş hâldeki sıvı metal kütesinin parçalanarak damlacıklar hâline getirilmesi ve katılaşmasının sağlanmasıdır. Bu işlem için öncelikle kararlı hâldeki sıvı metale sesüstü (hava, azot, helyum, argon vb.) gaz jetleri vasıtasıyla enerji aktarılır. Enerji aktarımı sayesinde enerji seviyesi artırılan sıvı metal kararsız hâle geçer ve gazla temas ettiği yüzeylerde dalgalanmalar meydana gelir. Oluşan dalgalanmalar sonucu sıvı metalin kalınlığı yer yer farklılaşır. Bu farklılaşma atomizasyon ünitesi boyunca hareketine devam etmekte olan sıvı metal yüzeyinde bir takım ayrılmalar oluşturur. Belirli bir noktadan sonra tamamen kararsız hâle geçmiş olan sıvı metalde yüzey gerilimlerinin de etkisiyle toparlanma başlangıçları görülür. Sıvı metal bütünlüğünü kaybeder ve bağımsız sıvı metal parçacıkları

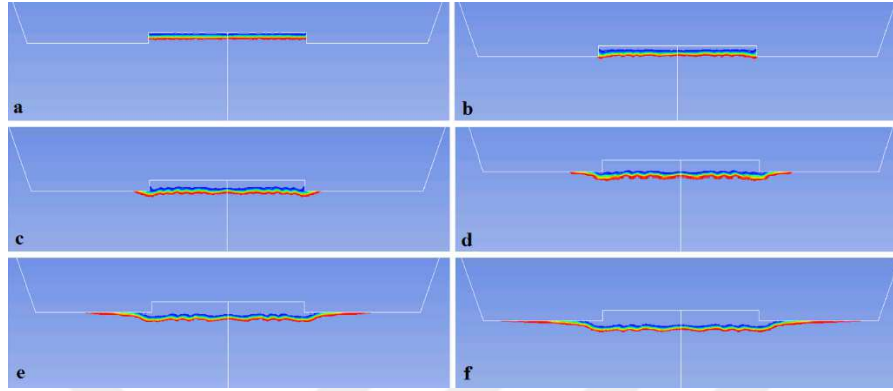
oluşmaya başlar. Oluşan bu parçacıklar uzun çubuklar veya pul şeklindeki ince tabakalar hâlinde olabilirler ve kütlelerinin yüzey alanlarına oranı göreceli olarak büyüktür. Bu nedenle, enerji aktarımının devam etmesi durumunda sıvı metalde gözlenen parçalanmalar da kolaylıkla devam eder ve küresel damlacıklar oluşur. Buraya kadar olan parçalanmalar birincil parçalanma olarak adlandırılırlar (Ünal ve Kayalı, 2018).

Yakından eşlemeli atomizasyon işleminde kullanılan gazların hızını parçalanma mekanizmalarının oluşmasını sağlamaya yeterli büyüklükteki değerlere ulaştırabilmek için yüksek basınçlı ortamda depolanan gazlar atomizasyon odası adı verilen atmosfer basıncı altındaki kapalı bölüme salınırlar. Salınım sonrasında gazlar aniden genişterek hız kazanırlar.

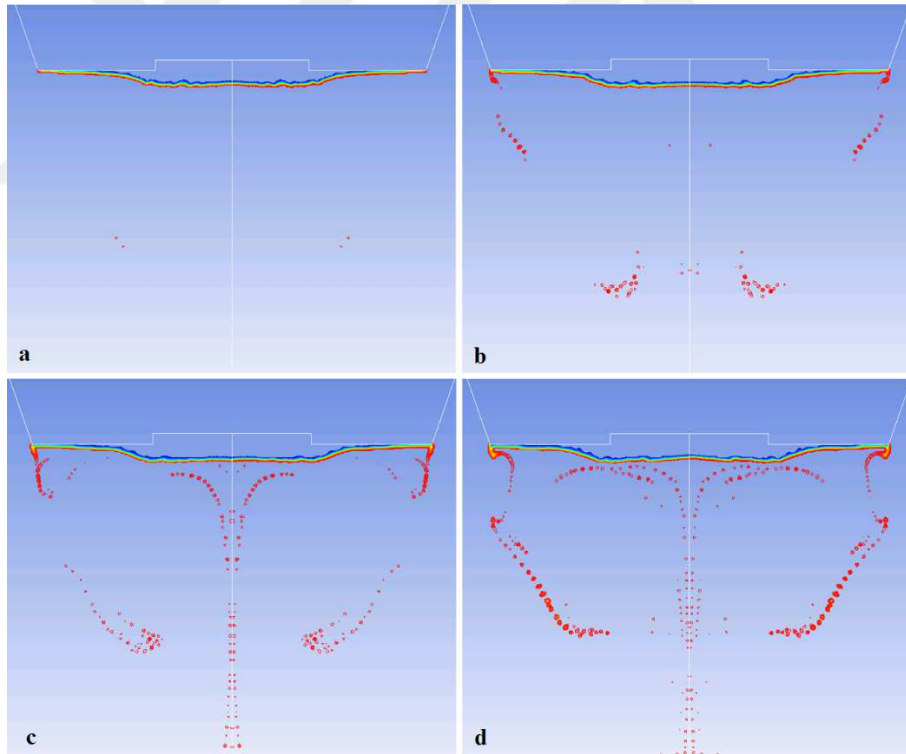
Ergitilmiş sıvı metalin metal akış borusu boyunca akışına yardımcı veya doğrudan sebep olan iki farklı etken bulunmaktadır. Bunlardan birincisi yüksek hızlı atomizasyon gazlarının lüle ucunda aniden genişmesi sonucu meydana gelen basınç düşüştür. Basıncın düşmesi lüle ucunda negatif basınç oluşumuna yol açar. Atmosfer basıncı altında bulunan sıvı metal, düşük basınçlı bölgeye doğru metal akış borusu boyunca hızlanarak akmak isteyecektir. Ancak, lüle ucunda negatif basınç oluşumu her koşulda gerçekleşen bir olgu değildir. Lüle tasarımı ve gaz basıncına göre değişiklik göstermekle birlikte bazı durumlarda basıncı yükseltecek etki yaratabilir. Lüle ucunda pozitif basınç oluşumunun belirli bir değere kadar kabul edilebilir olduğu söylenebilir. Yine de lüle ucunda negatif basınç oluşumu, atomizasyonunun süreklilik arz etmesinde garantör niteliğindedir. Bahsedilen etkilere ilave olarak akmaya yardım eden ikinci bir etken de yer çekimi kuvvetidir. Fakat yer çekimi kuvveti yukarı yönlü atomizasyon ünitelerinde olumsuz etkilere sahiptir (Ünal ve Kayalı, 2018).

Her iki etken yardımıyla metal akış borusu boyunca akışını tamamlayan ergitilmiş metal (Şekil 5.51a), metal akış borusunun atmosfere açık ucuna geldiğinde yeni bir etkiyle karşılaşır (Şekil 5.51b). Bu etki, literatürde toroidal vorteks olarak da adlandırılmış olan gaz geri dönüşüm bölgesindeki girdap oluşumunun bir sonucudur. Girdap hareketi, gaz geri dönüşüm bölgesinde hapsolan atomizasyon gazlarının daimi bir sirkülasyonuna yol açar. Sirkülasyonun lüle ucundaki yönü merkezden dışarıya doğrudur. Metal akış borusu ucuna gelen ergitilmiş sıvı metal öncelikle lüle ucunda bir santrifüj kuvvet varmışçasına lüle merkezinden dışarıya doğru harekete geçer (Şekil 5.51c, d, e, f) (Şekil 5.54a). Sıvı metalin lüle merkezinden dışarıya doğru kazandığı hızın büyüklüğü, gaz geri dönüşüm bölgesinde sirkülasyon hâlinde olan gazların akış hızıyla doğru orantılıdır. Gaz geri dönüşüm bölgesindeki gazların akış hızı ise atomizasyon gaz basıncı ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Radyal yönlü harekete geçmeden önce sadece dairesel

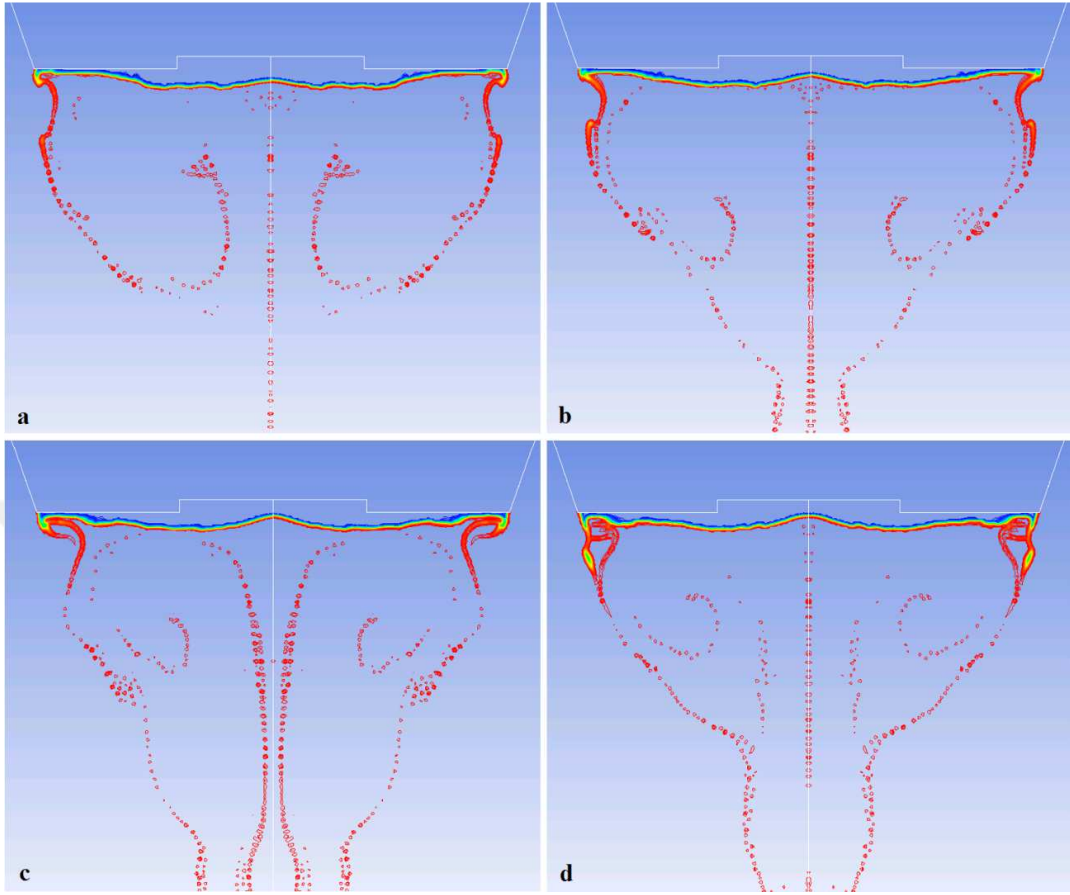
kesitli metal akış borusu içinde aksel yönde akmakta olan sıvı metal bundan böyle lüle ucu dış çap dairesine ulaşınca kadar ince bir tabaka hâlinde akış hareketi yapar (Ünal ve Kayalı, 2018).



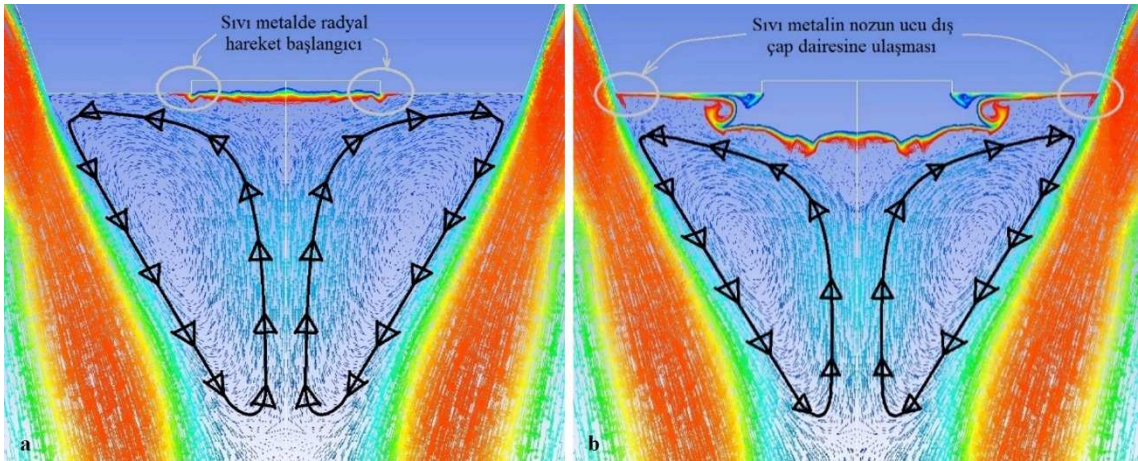
Şekil 5.51. Sıvı metalin a) düşey yönlü hareketi, b) metal akış borusu ucuna gelişi, c) radyal hareketinin başlangıcı d, e) radyal hareketin gelişimi f) lüle ucuna yaklaşması.



Şekil 5.52. a) Sıvı metalin radyal hareketini tamamlaması, b) toz oluşumlarının başlangıcı, c) oluşan ilk tozların gaz geri dönüşüm bölgesine girişi, d) toz oluşumunun sürekli hâle gelmesi.



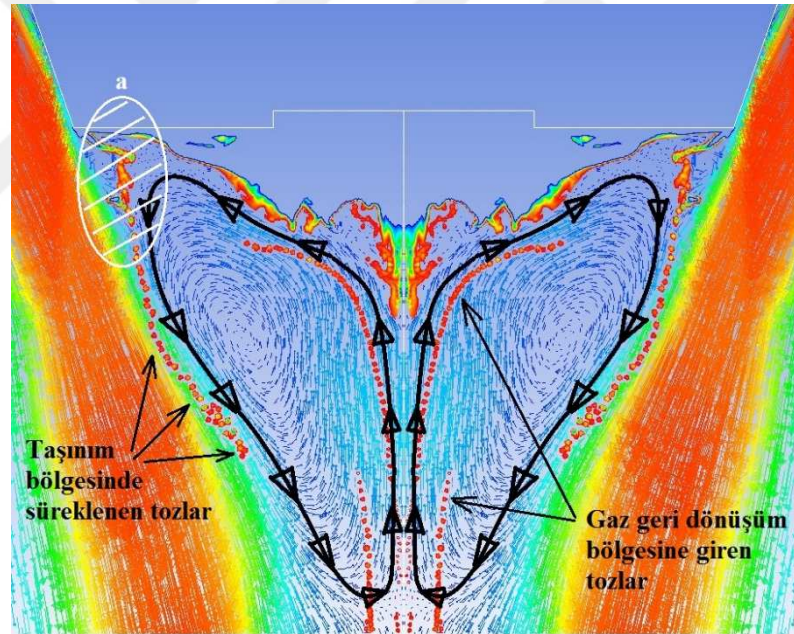
Şekil 5.53. 250 iterasyon aralıklarla elde edilen a) parçacık oluşumları-1, b) parçacık oluşumları-2, c) parçacık oluşumları-3, d) parçacık oluşumları-4.



Şekil 5.54. Sıvı metalin a) radyal hareketine başlaması ve toroidal vorteks, b) sıvı metalin lüle ucu dış çap dairesine ulaşması (Ünal ve Kayalı, 2018).

Şekil 5.54b’de görüldüğü gibi lüle ucu dış çap dairesine ulaşan sıvı metal bu noktadan itibaren çok büyük bir kesme kuvvetine maruz kalır (Şekil 5.52a). Çünkü bu kesme kuvvetini

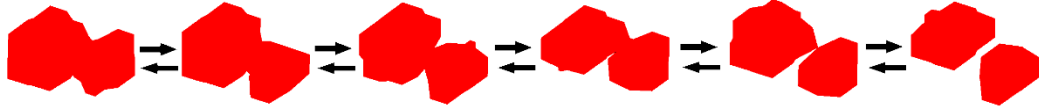
oluşturan gazların lüle ucuna gelene kadar kademeli olarak basıncı azalmış ve hızı sesüstü değerlere kadar yükselmiştir. Lüle ucu dış çap dairesinde ilk defa doğrudan atomizasyon gazı ile karşılaşan sıvı metalde birincil atomizasyon başlar (Şekil 5.52b). Birincil atomizasyon, ince plaka hâlindeki sıvı metali öncelikle dalgalı bir forma sokar, ardından ince uzun pullar hâline getirip parçalar hâlinde koparır. Kopan uzun ince pullar, tamamen boşlukta hareket etmeye başladıklarında atomizasyon gaz akışı doğrultusunda hızlanarak sürüklenirler (Şekil 5.52c, d). Sürüklenme şeklinde gerçekleşen taşınım hareketi atomizasyon odası boyunca devam eder. Hareketin belirli bir noktasından itibaren sıvı metal parçacıkları, yüzey geriliminin de etkisiyle kendi kütle merkezlerine doğru toparlanarak, yüzeylerinde oluşmaya başlayan ayrılmalar sonucu kendinden çok daha küçük plakalara (kirişlere) ve parçacıklara (damlacıklara) dönüşecektir. Bazı hâllerde, taşınım hâlinde başıboş sürüklenen parçacıklar gaz geri dönüşüm bölgesindeki sirkülasyona katılabilirler (Şekil 5.52c) (Şekil 5.55) (Ünal ve Kayalı, 2018).



Şekil 5.55. Gaz geri dönüşüm bölgesinde dolaşan ve taşınım bölgesinde sürüklenen tozlar (Ünal ve Kayalı, 2018).

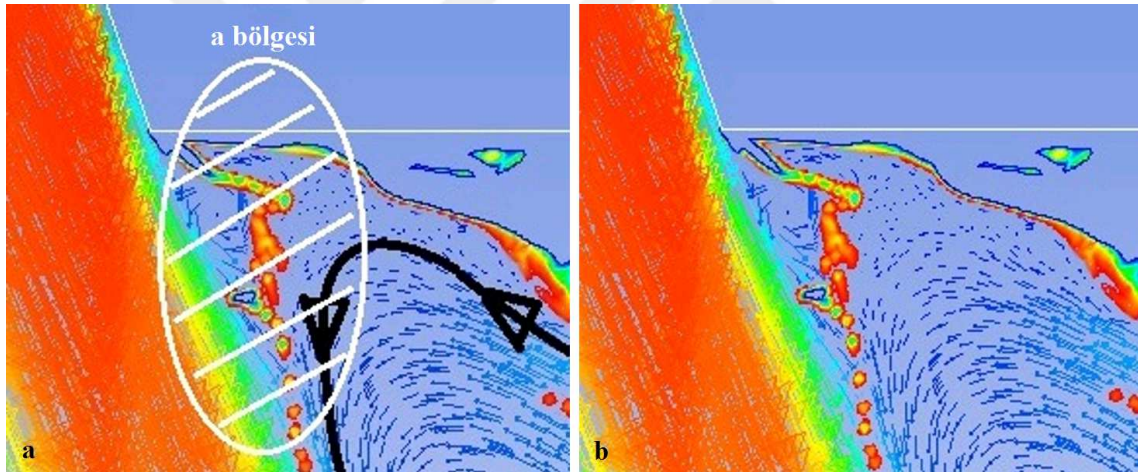
Oluşan plaka ve parçacıklar lüle ucundan uzaklaştıkları esnada yüksek hızlı atomizasyon gazlarının etkisiyle ikincil parçalanmaya maruz kalırlar (Şekil 5.53a, b, c, d). İkincil parçalanma sonrasında oldukça küçük boyutlara erişen parçacıklarda yüzey gerilimi kuvvetleri baskın hâle gelerek parçacıkların küresel veya elips şekilli olmalarına yol açar (Hermann, 2010). İkincil parçalanmalar sonucu nihai tozlar oluşur. Bazı durumlarda daha önce oluşmuş olan toz parçacıkları havada çarpışarak birleşmelere veya uydulaşmalara yol açabilirler. Şekil 5.56'da

silindirikleşen (kısa kiriş hâline gelen) bir yapının bölünerek iki ayrı toz oluşturması veya iki farklı tozun birleşerek tek bir toz hâline gelmesi şematik olarak gösterilmiştir. Burada ifade edilen parçalanma veya birleşme olayı tersinir olarak gerçekleşebilir (Ünal ve Kayalı, 2018).



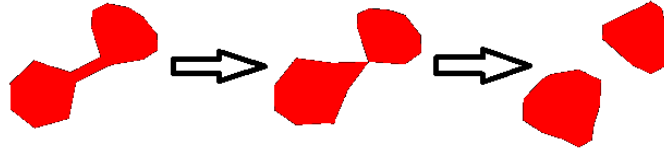
Şekil 5.56. Tozların parçalanma/birleşme mekanizması (Ünal ve Kayalı, 2018).

Şekil 5.55'te işaretlenen ve birincil parçalanmaları temsilen seçilen "a" bölgesinin yakından görünümü Şekil 5.57'de verilmiştir. Verilen şekilde lüle ucu dış çap dairesi üzerinde sıvı metal filminin kirişler ve damlacıklar oluşturması görülebilmektedir (Ünal ve Kayalı, 2018).



Şekil 5.57. Lüle dış çap dairesinde başlayıp gelişen birincil ve ikincil parçalanma olayı a) Şekil 5.55'te gösterilen işaretli bölge, b) işaretli görünüm (Ünal ve Kayalı, 2018).

Damlacıklar oluşurken sıklıkla karşılaşılan bir parçalanma mekanizması halter mekanizması olarak da adlandırılan bir oluşumdur (Şekil 5.58.). Bu olay, atomizasyon sırasında çubuk şekline dönüşmüş sıvı metalin iki ayrı damlacık oluşturmak üzere bölünürken adından da anlaşılacağı üzere halter şeklinde bir yapıya dönüşmesidir. Halter geometrisinin her iki ucu arasındaki bağlantıyı sağlayan incelmış sıvı metal kiriş, her iki uç tarafından kendilerine doğru çekilmek suretiyle koparılır. Kopma sonrası iki bağımsız toz tanesinin olduğu bu mekanizma ikincil parçalanmalar esnasında sıklıkla gerçekleşir (Ünal ve Kayalı, 2018).



Şekil 5.58. Toz oluşumunda sıkça karşılaşılan halter mekanizması (Ünal ve Kayalı, 2018).

Halter mekanizması ile parçalanmış bir toz tanesinin yeni oluşturduğu her iki elemanında tekrar halter mekanizması oluşturmaları beklenmez. Çünkü halter mekanizması oluşturan çubuk şeklindeki sıvı metal daha önce birçok kez parçalanmıştır. Başka bir deyişle halter mekanizmasına uğrayacak toz tanesinin ikincil parçalanma veya en erken birincil parçalanmanın son evrelerinde bulunduğu söylenebilir (Ünal ve Kayalı, 2018).

5.5. Toz Boyutlarının Hesaplanması

Toz boyutu tayinini HAD yöntemleri ile uygulayabilmek için öncelikle Gambit yazılımında lüle geometrisi oluşturulmuş, oluşturulan lüle ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. İki fazlı akış simülasyonu için programın Akışkan Hacmi (Volume of Fluid - VOF) yöntemi ve viskoz model olarak RSM (Reynolds Stress Model) modeli seçilerek atomizasyon işlemi modellenmiştir. HAD simülasyonlarından elde edilen sayısal sonuçlar kullanılarak parçacık boyutunun tayinini sağlamak üzere geliştirilen takip eden bölümlerde açıklanmıştır.

5.5.1. 0,5 MPa basınç altında ilk denemeler

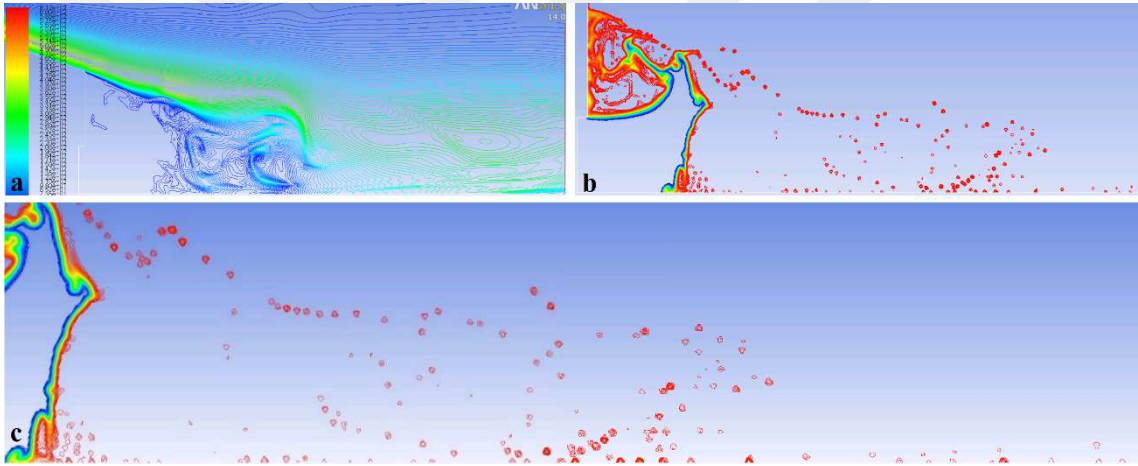
Toz boyutu tayinine yönelik HAD modelleme işlemlerine 0,5 MPa basınç altında başlanılmış daha sonra 0,5 MPa basınçlık artışlarla 1,0 MPa; 1,5 MPa; 2,0 MPa; 2,5 MPa; 3,0 MPa ve 3,5 MPa basınçlarda yapılan işlemler ile modellemeler tamamlanmıştır.

0,5 MPa başlangıç basınç değerinde modellenen lüle ile en yüksek gaz hızına ulaşıldıktan sonra sıvı fazın akışı gerçekleştirilmiştir. Sıvı fazlı akışta parçacık oluşumlarının tamamlandığı bir zaman diliminde Çizelge 5.5’de verilen 3 farklı zamanda (A, B ve C simülasyonu olarak adlandırılarak) alınan hız kontürleri ve toz oluşumları sırasıyla simülasyon A için Şekil 5.59’da, simülasyon B için Şekil 5.60’da, simülasyon C için Şekil 5.61’de verilmiştir.

Çizelge 5.5. 75 nano-saniye aralıklarla A-B-C simülasyonları.

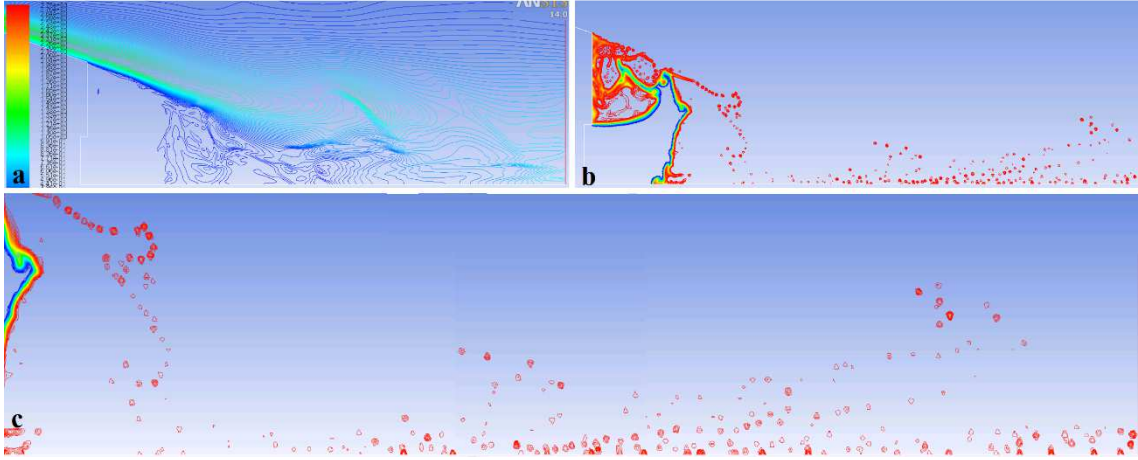
Simülasyon	Basınç (MPa)	İterasyon	Zaman (sn)
A	0,5	39000	0 (referans noktası)
B	0,5	39750	0,000075
C	0,5	40500	0,000150

Şekil 5.59a'da verilen A simülasyonu için simetri eksenini boyunca oluşan damlacıklar Şekil 5.59b'de gösterilmiştir. Oluşan damlacıkların detaylı olarak incelenebilmesi amacıyla yakından görünüşler elde edilmiştir. Şekil 5.59b'deki parçacıkların yakından görünümü Şekil 5.59c'de verilmiştir.



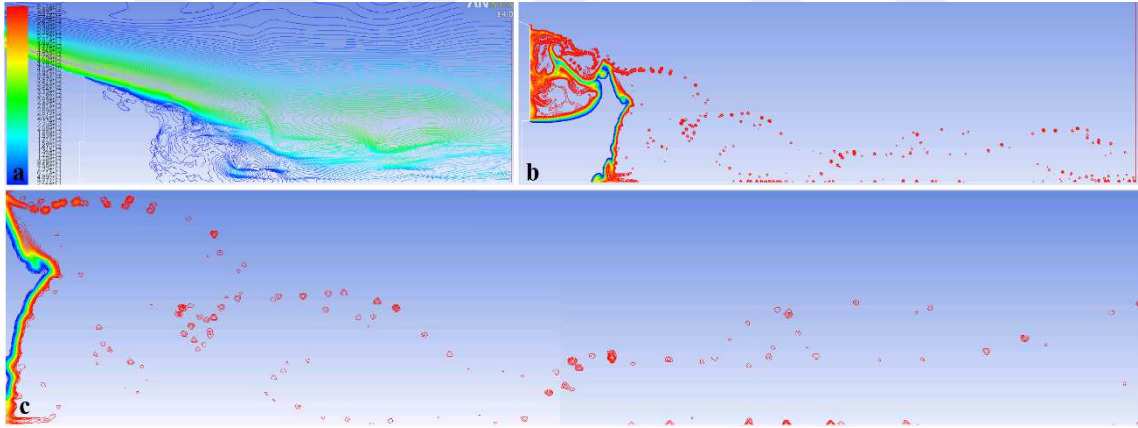
Şekil 5.59. Simülasyon-A a) hız kontürleri, b) toz oluşumları, c) büyütülmüş toz oluşumları.

Şekil 5.59'da gösterilen A simülasyonundan 0,000075 saniye sonra elde edilen B simülasyonuna ait hız kontürleri ve damlacık oluşumları Şekil 5.60'da verilmiştir. Şekil 5.60a'da gösterilen B simülasyonunda simetri eksenini boyunca oluşan damlacıklar Şekil 5.60b'de verilmiştir. Şekil 5.60b'de verilen modelleme anlık görüntüsü daha detaylı biçimde büyütülmüş olarak Şekil 5.60c'de gösterilmiştir.



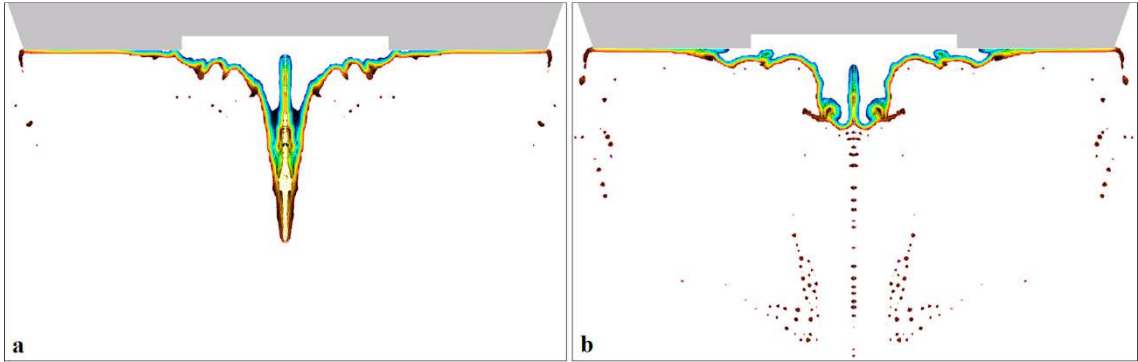
Şekil 5.60. Simülasyon-B a) hız kontürleri, b) toz oluşumları, c) büyütülmüş toz oluşumları.

Şekil 5.60'da gösterilen B simülasyonundan 0,000075 saniye sonra (A simülasyonundan ise 0,000150 saniye sonra) elde edilen C simülasyonuna ait hız kontürleri Şekil 5.61a'da ve damlacık oluşumları Şekil 5.61b'de verilmiştir. Şekil 5.61b'de verilen simetri eksenini boyunca oluşan damlacıklara yakından bakıldığında Şekil 5.61c'deki görüntü elde edilmektedir.



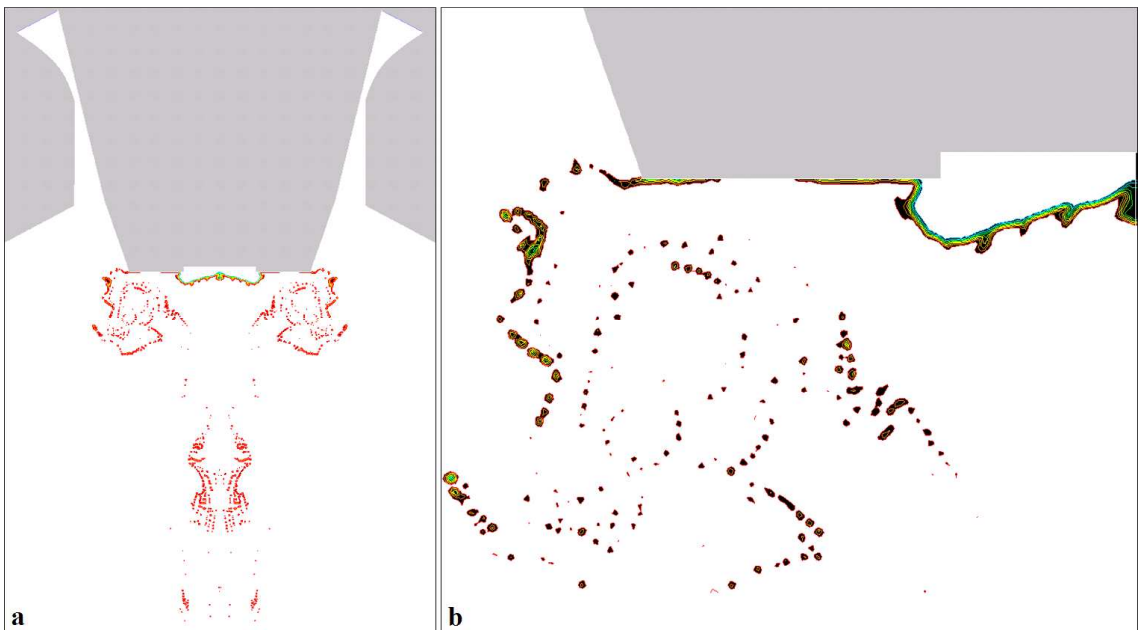
Şekil 5.61. Simülasyon-C a) hız kontürleri, b) toz oluşumları, c) büyütülmüş toz oluşumları.

Modelleme ile elde edilen sıvı metal filminin ve sıvı şeritlerin oluşumu, toz oluşumunun başlangıcı, geri basınç bölgesine giren tozların görünümü Şekil 5.62'de verilmiştir.



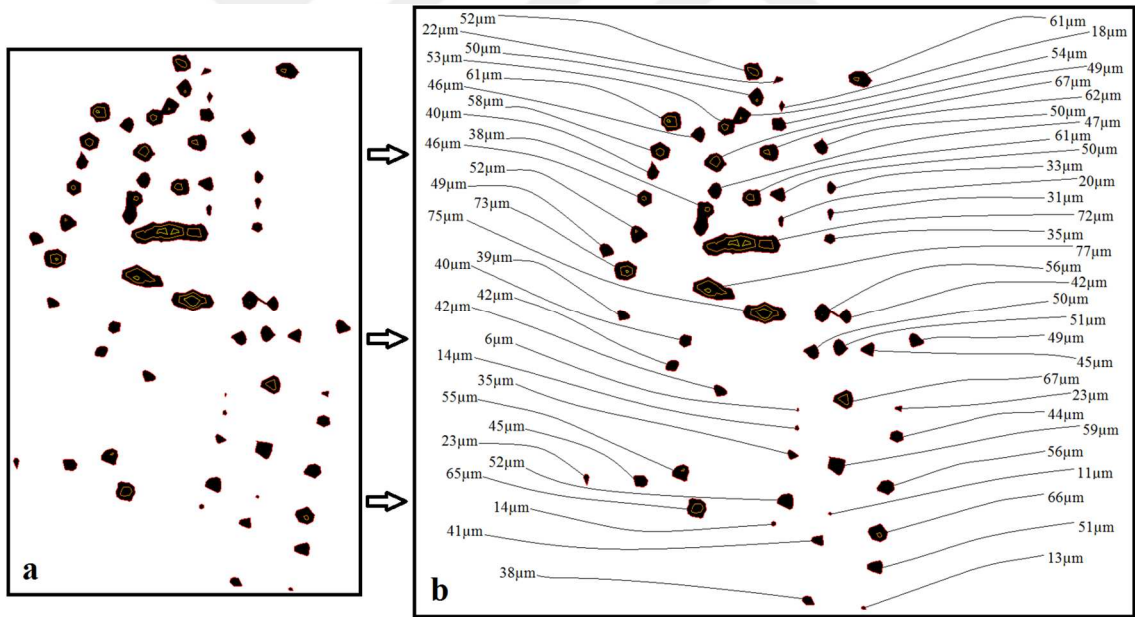
Şekil 5.62. a) Sıvı metal filminin ve sıvı şerit oluşumunun başlangıcı, b) toz oluşumunun başlangıcı ve geri basınç bölgesine tekrar giren tozlar.

Gaz atomizasyonda sıvı metale ne kadar çok enerji aktarılabilirse üretilen parçacıklar da o kadar küçük olur. Gaz ergiyik etkileşiminde sıvı demetinin çevresinde genişleyen gazlar basınç düşmesine ve sıvı demetinin parçalanmasına yol açar. Gaz basıncının düşmesi sıvı demetini lüleden çıktıktan sonra içi boş bir koni şekline getirir. İnce koni, hacmine göre yüzey alanının yüksek olması nedeniyle kararlı değildir. Genişleyen gazın kesme kuvvetleri ile sıvı parçalanmaya devam eder. Bu etki ile önce çubuk ve daha sonra küçük küresel parçacıklar oluşur. Şekil 5.63'te tüm lüle geometrisi boyunca toz oluşumları görülmektedir. Şekil 5.63a'da verilen tozlar, modele büyütülerek bakıldığında net bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.63b). Oluşan tozlar geri basınç nedeniyle toroidal vorteks bölgesine girmektedirler (Şekil 5.63b).



Şekil 5.63. a) Lüle geometrisi boyunca toz oluşumunun görünümü, b) lüle ucunda sirkülasyon hâlindeki tozlar.

Modelleme ile oluşan toz boyutlarının tespiti için oluşumunu tamamlayan tozlardan numune kesiti alınmıştır (Şekil 5.64a). Her bir damlacığa ait en kısa giriş boyu o parçacığın boyutu olarak değerlendirilmiştir. Ortalama toz boyutunun tayininde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri elekten geçirme yöntemidir. Toz parçacıkları farklı büyüklükteki eleklerden geçirildiklerinde her bir eleğin gözenek boşluğundan daha küçük kesit alanına sahip olan parçacıklar bir alttaki eleğe geçerler. Alttaki eleğin gözenek çapı üstteki elekten daha küçüktür. Üst elekten geçebilen bir parçacığın en küçük kesit alanı alt elek gözenek çapından daha büyük ise parçacık o elek üzerinde kalacaktır. Dolayısıyla parçacığın hangi boyut aralığında kalacağı, o parçacığın kesit alanındaki en kısa uzunluk tarafından belirlenir. Bu noktadan hareketle, HAD modelleme sonucunda ortaya çıkan parçacık görsellerinde en kısa giriş uzunluğu parçacık boyutu tayininde kullanılmıştır. Şekil 5.64b’de görülen numune olarak seçilmiş parçacıkların toz boyutları bu yöntemle tek tek ölçülmüştür ve şekil üzerinde parçacık boyutları rakamsal değerleri yazılmıştır. Şekildeki tozlara ait ortalama toz boyutu değeri 45,6 μm olarak hesaplanmıştır.

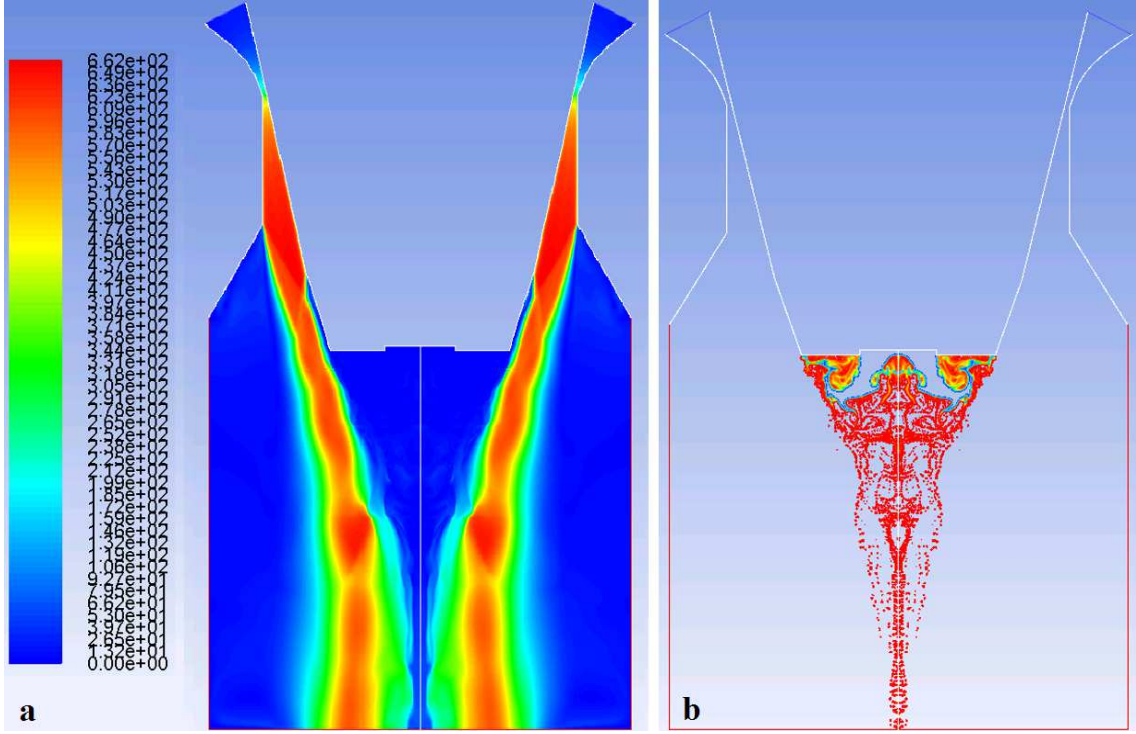


Şekil 5.64. a) Numune olarak seçilen oluşumunu tamamlamış tozlar, b) numune tozların boyutsal değerleri.

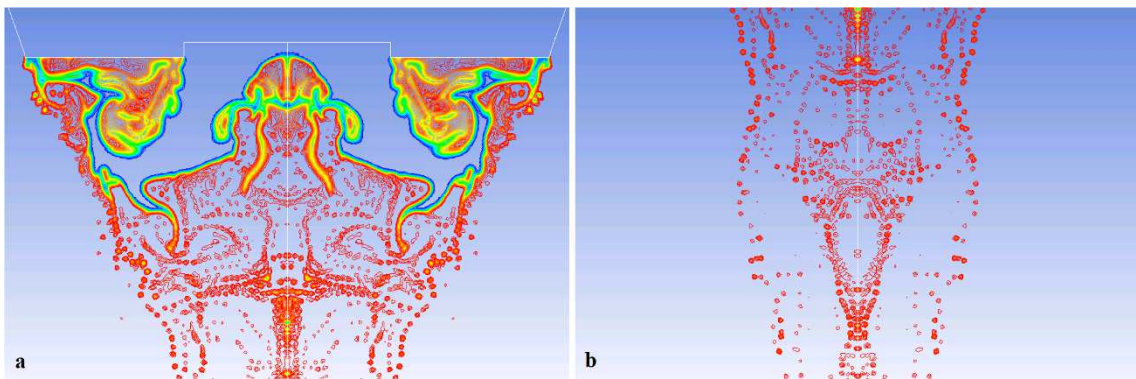
5.5.2. 2,5 MPa basınç altında detaylı toz boyutu çalışmaları

Toz boyutunun tayinine yönelik yapılan çalışmalar doğrultusunda 2,5 MPa basınç altında gaz akışının yeterli olgunluğa gelmesinin ardından, iki-fazlı sayısal çözüm elde edilmiştir. 2,5 MPa basınç altında oluşan hız kontürleri Şekil 5.65a’da görülmektedir. Şekil 5.65b’de ise; Şekil 5.65a’nın parçacık oluşumları görülmektedir. Şekil 5.65b’de görülen parçacıklar daha büyük

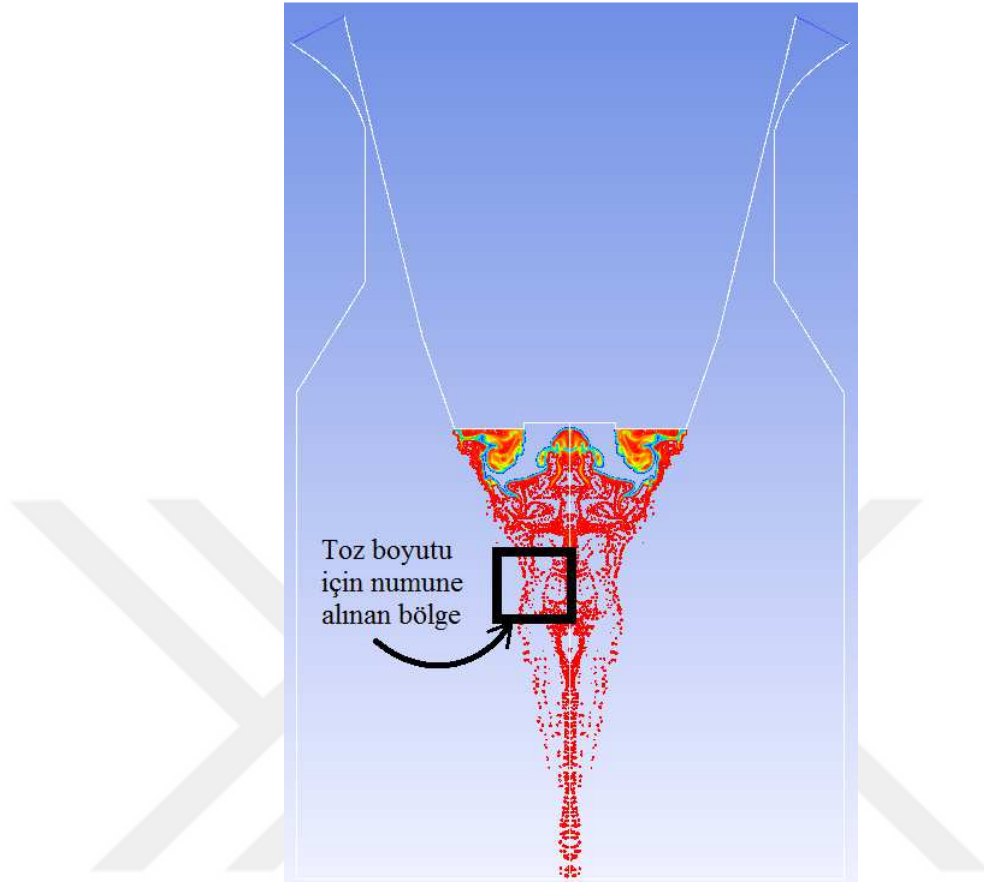
ölçekli yakınlaştırma ile incelendiğinde parçacık oluşumları net bir şekilde elde edilerek boyut hesabı yapılabilmektedir (Şekil 5.66.). Şekil 5.67’de parçacık boyutu hesaplanması için numune alınan bölge işaretlenmiştir.



Şekil 5.65. 2,5 MPa basınç altında a) hız kontürleri, b) damlacık oluşumu.

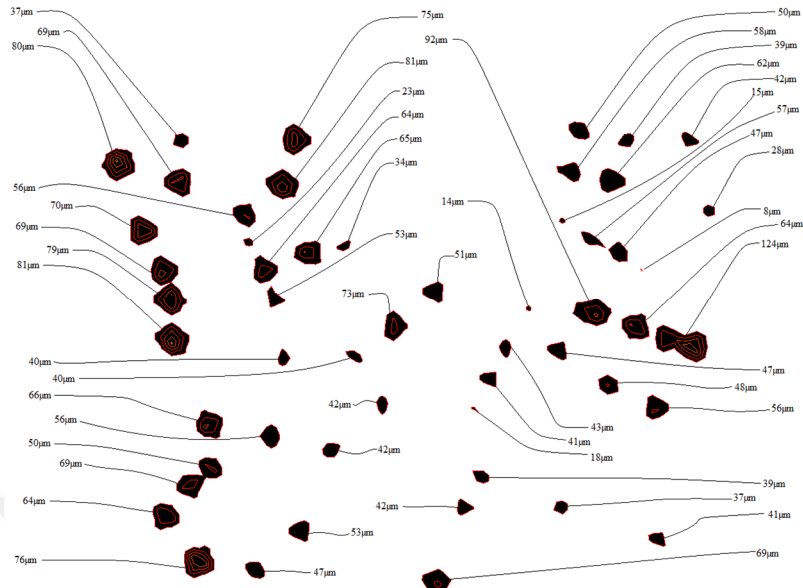


Şekil 5.66. 2,5 MPa basınç altında toz oluşumları a) yakın bölge, b) uzak bölge.



Şekil 5.67. 2,5 MPa basınç altında numune alınan bölge.

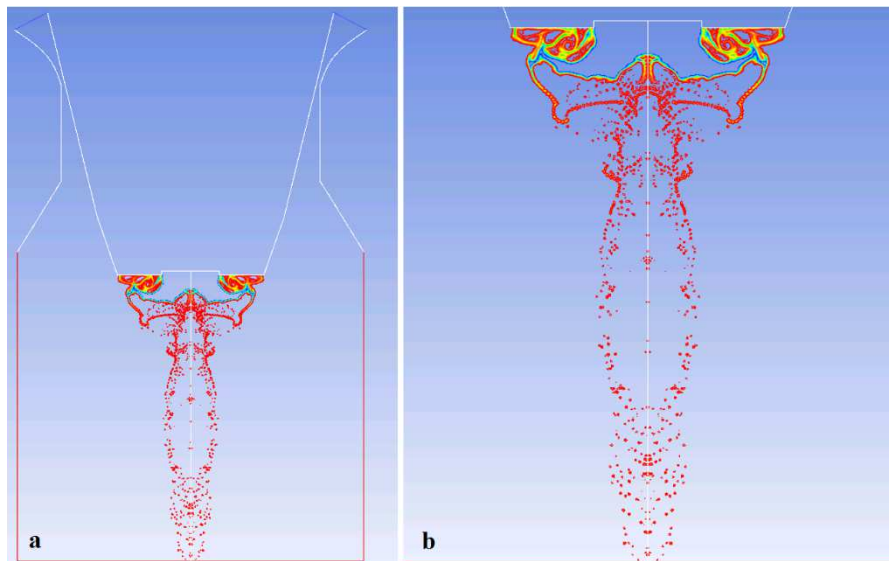
Şekil 5.67’de verilen tozların numune alınan bir bölgesine daha yakından bakıldığında Şekil 5.68’deki parçacık görüntüleri elde edilmektedir. Şekil 5.68’de görülen parçacık boyutları ölçülmüş ve ortalama toz boyutunun yaklaşık 53,3 μm olduğu bulunmuştur. Ancak, toz boyutunun hesaplanmasında yaygın bir yöntem olarak kullanılan küresel eş değer toz çapı formülü kullanılarak toz boyutları tekrar hesaplanmış ve ortalama toz boyutu yaklaşık 46,9 μm olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer, deneysel çalışmalar ile elde edilen toz boyutu değeri ile daha iyi uyum sağladığı görülmüştür. Bu nedenle çalışma kapsamında gerçekleştirilecek toz boyutu hesaplamalarında bu yöntem (eş değer küresel toz çapı yöntemi) kullanılacaktır. Eş değer küresel toz çapı yöntemi ile gerçekleştirilen hassas boyut hesabı Bölüm 5.5.3’te açıklanmıştır.



Şekil 5.68. 2,5 MPa basınç altında toz boyutları.

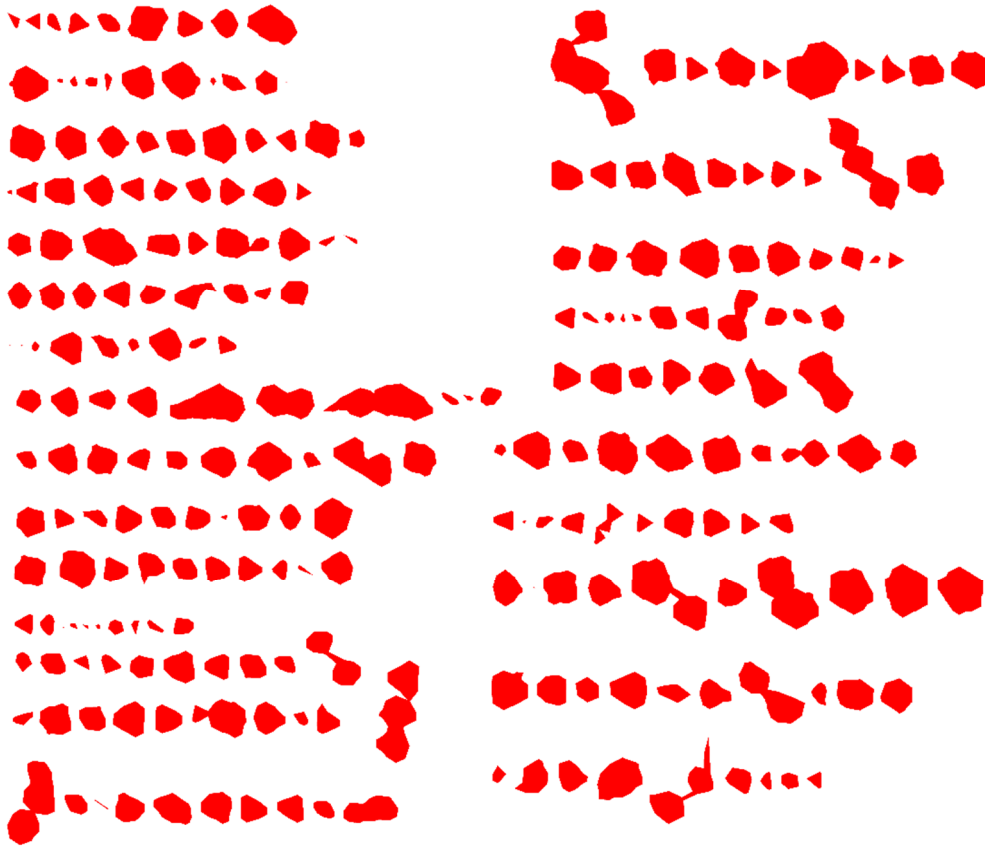
5.5.3. Hassas boyut hesabı

Tezin bu bölümünde 2,5 MPa basınç altında yapılan atomizasyon modelleme işlemi sonuçlarında elde edilen parçacıkların ortalama boyut değeri hesaplanmıştır. Şekil 5.69a ile Şekil 5.69b’de verilen tozlar 2,5 MPa basınç ile elde edilmiş olup atomizasyonun aynı anına aittir. Şekil 5.69b’de atomizasyon ünitesinin tümü gösterilmemiş, böylece tozların daha yakın bir görünümü elde edilmiştir.

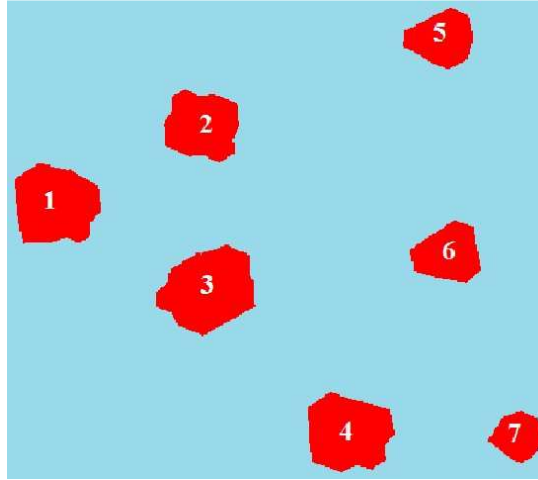


Şekil 5.69. 2,5 MPa basınç altında toz oluşumları a) tüm lüle, b) yakından görünüm.

Şekiller çok daha büyük ölçekte büyütülerek, oluşumunu tamamlamış olan toplam 245 adet tozdan alınan eş değer küresel çap değerleri hesaplanmıştır. Bunun için öncelikle iki boyutta görünümleri elde edilen toz parçacıklarının kapladıkları kesit alanları Adobe Photoshop yazılımı yardımıyla piksel cinsinden ölçülmüş, ölçülen değerler kullanılarak eş değer küresel çap değerlerine dönüştürülmüştür. Eş değer küresel çap değerlerinin hesaplanması Bölüm 4'te açıklanmıştır. 2,5 MPa basınç altında yapılan sayısal modellemelerden numune olarak alınan tozların geometrik şekilleri Şekil 5.71'de verilmiştir. Numune olarak seçilen ve Şekil 5.71'de gösterilen 7 adet parçacığın piksel kare cinsinden alanları ve eş değer küresel çap değerleri Çizelge 5.6'da verilmiştir. 245 adet damlacığın eş değer küresel çaplarına ait aritmetik ortalama ve geometrik ortalama değerleri bulunmuştur. Eş değer küresel çapların aritmetik ortalaması 50,01 μm , geometrik ortalaması ise 41,92 μm olarak hesaplanmıştır. Hesaplama kullanılan 245 adet toz tanesinin geometrisi Şekil 5.70'de görülmektedir. Görülen şekilde tüm tozların tek tek büyütülmüş hâli verilmiştir.



Şekil 5.70. 2,5 MPa basınç altında toz oluşumları.



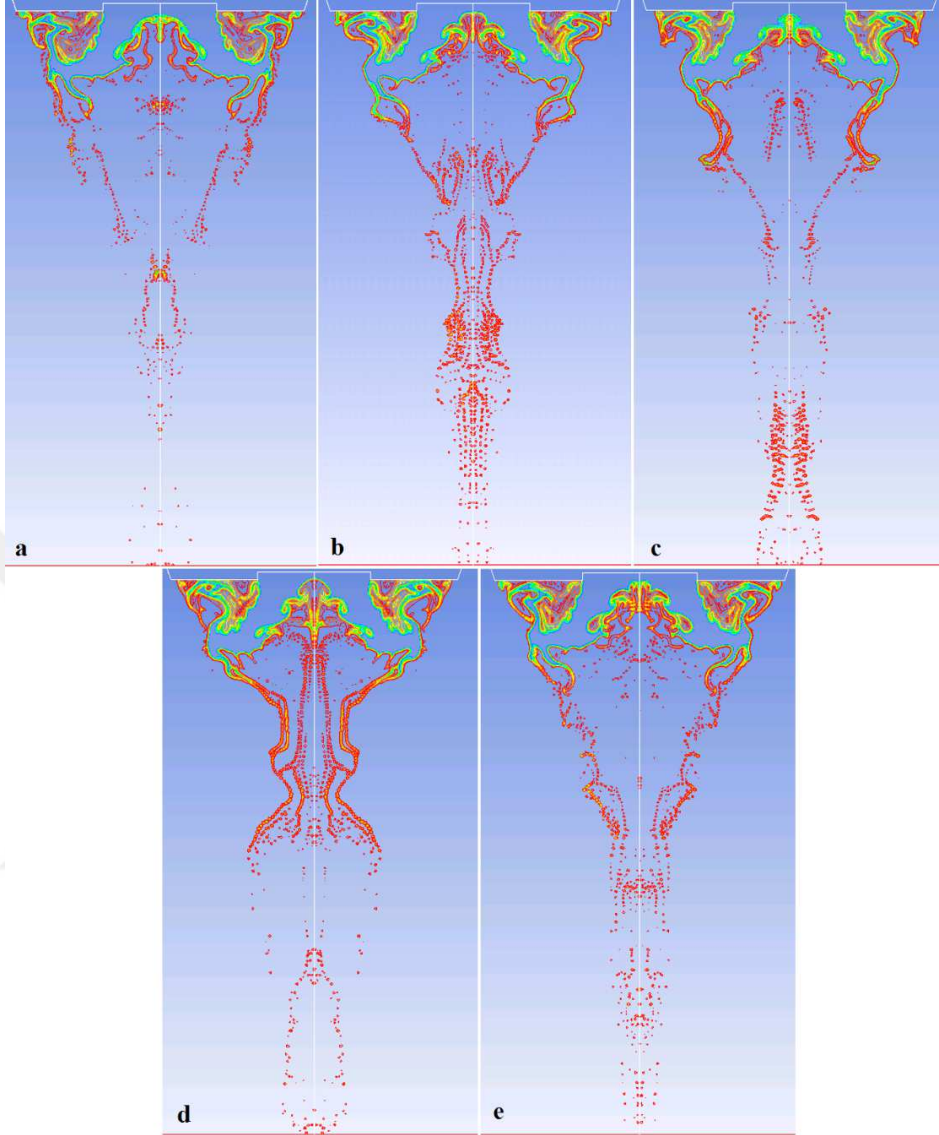
Şekil 5.71. Numune olarak seçilen tozlar (Ünal ve Kayalı, 2018).

Çizelge 5.6. Numune olarak seçilen tozların boyut değerleri (Ünal ve Kayalı, 2018).

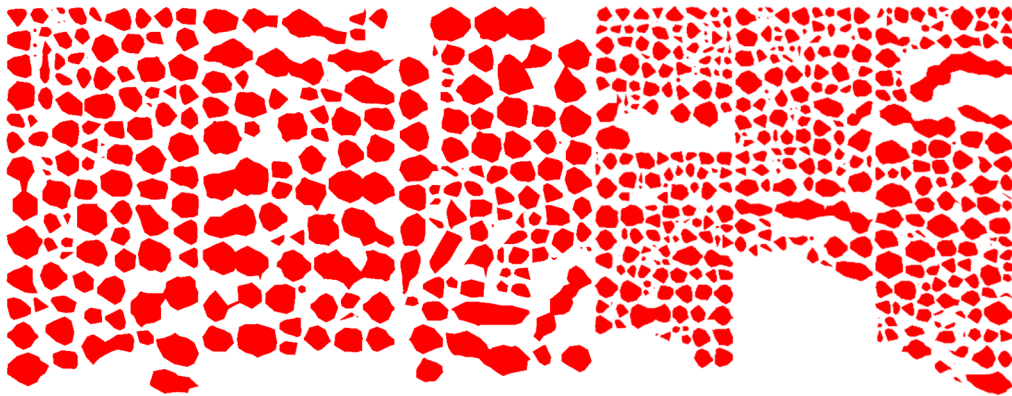
Toz Numarası	Toz Kesit Alanı (piksel kare)	Eş Değer Küresel Çap (μm)
1	2942	61
2	2244	53
3	3269	65
4	2823	60
5	1564	45
6	1648	46
7	1045	36

5.5.4. Toz boyutunun alınması

2,5 MPa basınç altında yapılan modellemelerde 0,000075 saniye zaman aralıklarıyla 5 farklı zamanda toz boyutu alınmıştır. Bu amaç için öncelikle her 5 farklı zamandaki tozların iki boyutlu olarak görüntüleri tek-tek kaydedilmiştir (Şekil 5.72a, b, c, d, e). Kaydedilen iki boyuttaki toz tanelerinin kapladıkları alanlar bilgisayar yardımıyla piksel cinsinden ölçülmüştür. Bulunan izdüşüm alanı değerleri kullanılarak eş değer küresel çap boyutları hesaplanmıştır. Hesaplama kullanılan tüm parçacıkların geometrisi Şekil 5.73'te görülmektedir.



Şekil 5.72. 2,5 MPa basınç altında toz boyutu alınan a) birinci, b) ikinci, c) üçüncü, d) dördüncü, e) beşinci numune.



Şekil 5.73. 2,5 MPa basınç altında oluşan tozlar.

5.5.5. Toz boyutu sonuçları

1,0 MPa; 1,5 MPa; 2,0 MPa; 2,5 MPa; 3,0 MPa ve 3,5 MPa basınçlar altında iki-fazlı sayısal çözümler tamandıktan sonra her bir basınç değeri için elde edilen toz parçacıklarının ortalama boyut değeri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bunun için sayısal modellemelerden elde edilen 3250 adet toz tanesinin eş değeri küresel toz çapı hesabı gerçekleştirilmiştir. Tüm basınç değeri için iki-fazlı simülasyon sonuçları EK-1'de verilmiştir. EK-1'de soldaki sütun iterasyon sayısını göstermektedir. Diğer sütunlarda her bir basınç değeri ve ilgili iterasyon adımı elde edilmiş olan iki-fazlı modelleme sonuçları verilmiştir. EK-1'de verilen görsellerin asıl amacı atomizasyonun olgunluk seviyesinin takibi olup bu görsellerde parçacık oluşumları görülememektedir. Parçacıkların görünür hâle getirildiği simülasyon sonuçları EK-2'de verilmiştir. EK-2'de her bir basınca ait seçilen iterasyon adımları diğer basınçlar için seçilenlerden farklılık göstermektedir. Bunun sebebi, basınç değişimi ile birlikte atomizasyonun olgunluğua erişme süresinin ve parçacık boyutu alma zamanının değişmesidir.

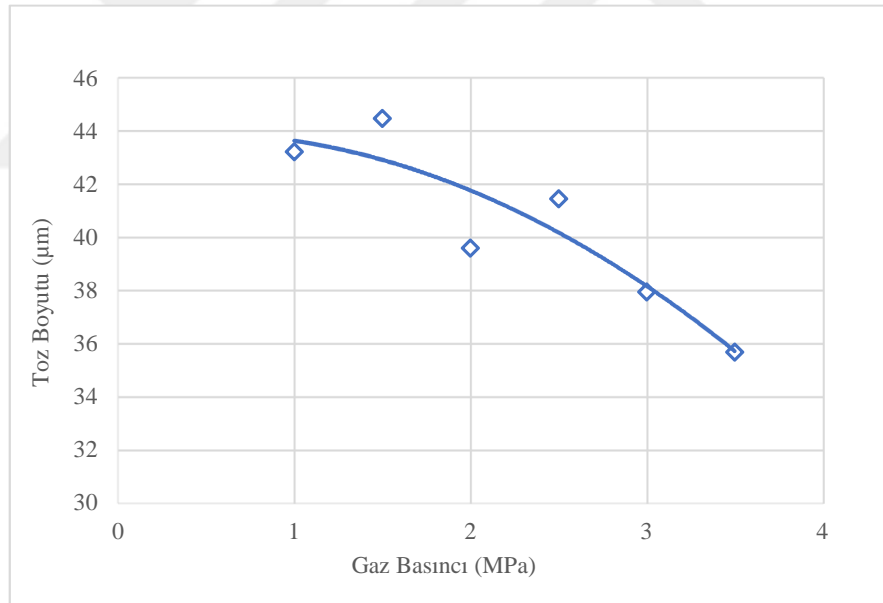
Hesaplamalar yapılırken birbirleri aralarında 250 iterasyon bulunan zaman aralıklarıyla seçim yapılmıştır. Tüm basınçlarda elde edilen toz boyutları Çizelge 5.7'de, artan gaz basıncına göre ortalama parçacık boyutu değişim eğrisi Şekil 5.74'te verilmiştir. Gaz basıncının toz boyutu üzerindeki etkileri incelendiğinde; toz boyutu 1,0 MPa basınçta 43,24 μm ; 1,5 MPa basınç altında 44,5 μm ; 2,0 MPa basınçta 39,61 μm ; 2,5 MPa basınç altında 41,47 μm ; 3,0 MPa basınçta 37,96 μm ve 3,5 MPa basınçta 35,69 μm olarak hesaplanmış, artan gaz basıncı ile birlikte ortalama parçacık boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir.

Çizelge 5.7. Toz boyutunun gaz basıncına göre değişimi.

Gaz Basıncı (MPa)	Toz Boyutu (μm)
1,0	43,24
1,5	44,50
2,0	39,61
2,5	41,47
3,0	37,96
3,5	35,69

Ünal'ın 2007 yılında yaptığı deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar (Ünal, 2007a) (Çizelge 5.8.) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle elde edilen sonuçlar (Çizelge 5.9.) verilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar farklı basınç değerlerinde elde edilmiş olmakla beraber aynı grafik üzerinde gösterilebilmektedirler. Sonuçların grafik gösterimi yoluyla

karşılaştırılmaları Şekil 5.75, Şekil 5.76, Şekil 5.77 ve Şekil 5.78’de gösterilmiştir. Şekil 5.77 ve Şekil 5.78’de toz boyutu eksenleri logaritmik olarak çizdirilmiştir. Deneysel veriler ile elde edilen boyut değişim eğrisi ile teorik veriler ile elde edilen boyut değişim eğrisi kıyaslandığında, eğriler arasında açısal farklılıklar olmakla beraber her iki eğrinin de basınç artışıyla birlikte azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Deneysel yollarla elde edilen boyut değişim eğrisi ile teorik yollarla elde edilen boyut değişim eğrileri arasındaki açısal farkın sebebi, teorik çalışmalarda ergiyik akışının sabit tutulmuş olmasıdır. Buna karşın deneysel çalışmalarda gaz basıncı yükseltildiğinde metal akış borusu ucundaki basınç artışı nedeniyle ergiyik akış miktarı genellikle azalmaktadır. Basınç değişimi ve gaz/metal kütle akış oranı değişimine göre parçacık boyutunun davranışı logaritmik eksenlerde gösterildiğinde değişim eğrilerinin doğrusal bir görünüm aldığı tespit edilmiştir (Şekil 5.77. ve Şekil 5.78.). Buna ilave olarak logaritmik eksenli gösterimde, deneysel ve teorik yöntemlerle elde edilen parçacık boyutu değişim eğrilerinin birbirlerine yaklaştığı görülmüştür.



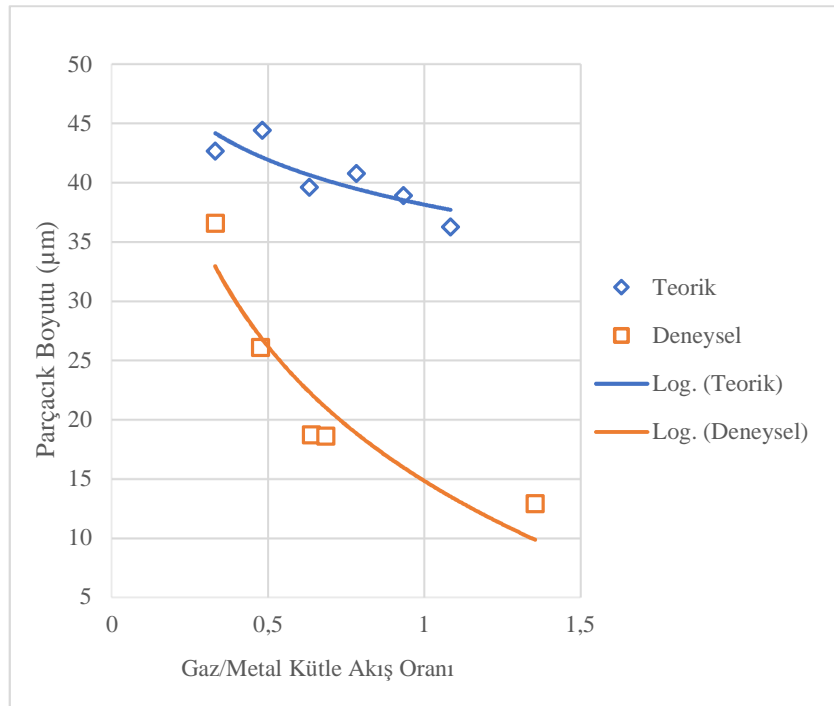
Şekil 5.74. Gaz basıncına göre toz boyutunun değişimi.

Çizelge 5.8. Toz boyutları, gaz basıncı ve akış oranları (deneysel) (Ünal, 2007a).

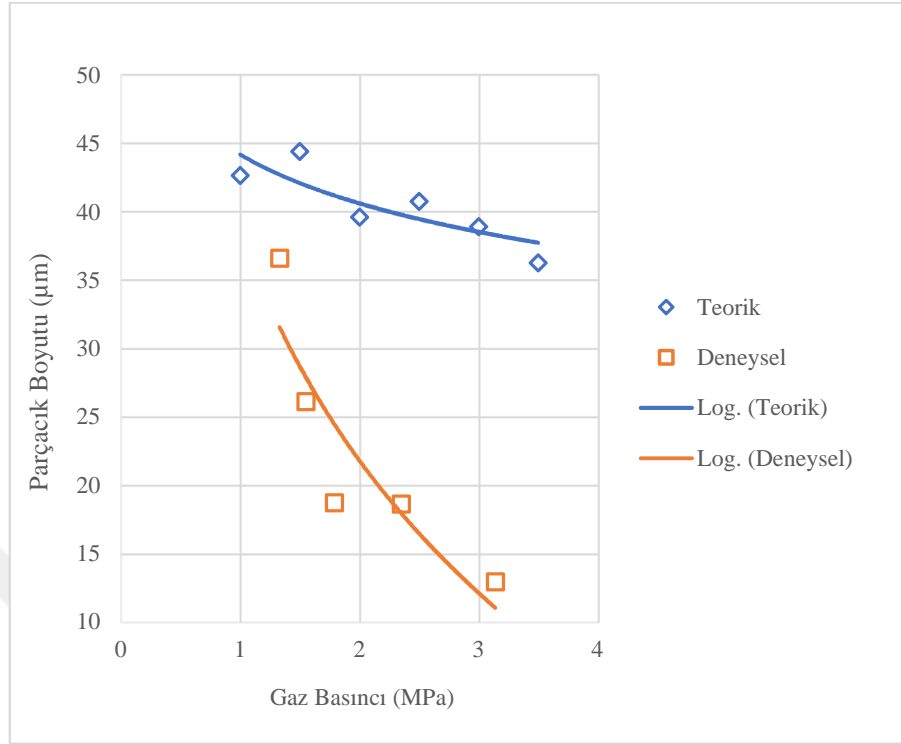
Deneyel Sonuçlar		
Gaz Basıncı (MPa)	Toz Boyutu (μm)	Gaz/Metal Kütle Akış Oranı
1,33	36,6	0,3296
1,55	26,1	0,4749
1,79	18,7	0,6376
2,35	18,6	0,6833
3,14	12,9	1,3548

Çizelge 5.9. Toz boyutları, gaz basıncı ve akış oranları (teorik).

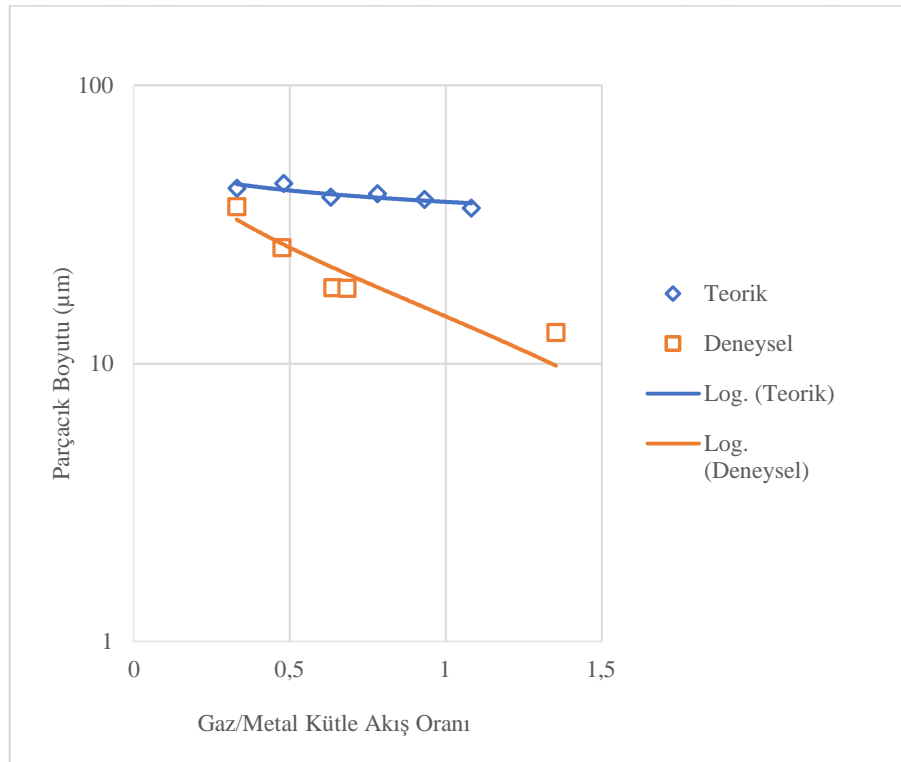
Teorik Sonuçlar		
Gaz Basıncı (MPa)	Toz Boyutu (μm)	Gaz/Metal Kütle Akış Oranı
1,0	43,24	0,3302
1,5	44,50	0,4807
2,0	39,61	0,6313
2,5	41,47	0,7820
3,0	37,96	0,9328
3,5	35,69	1,0836



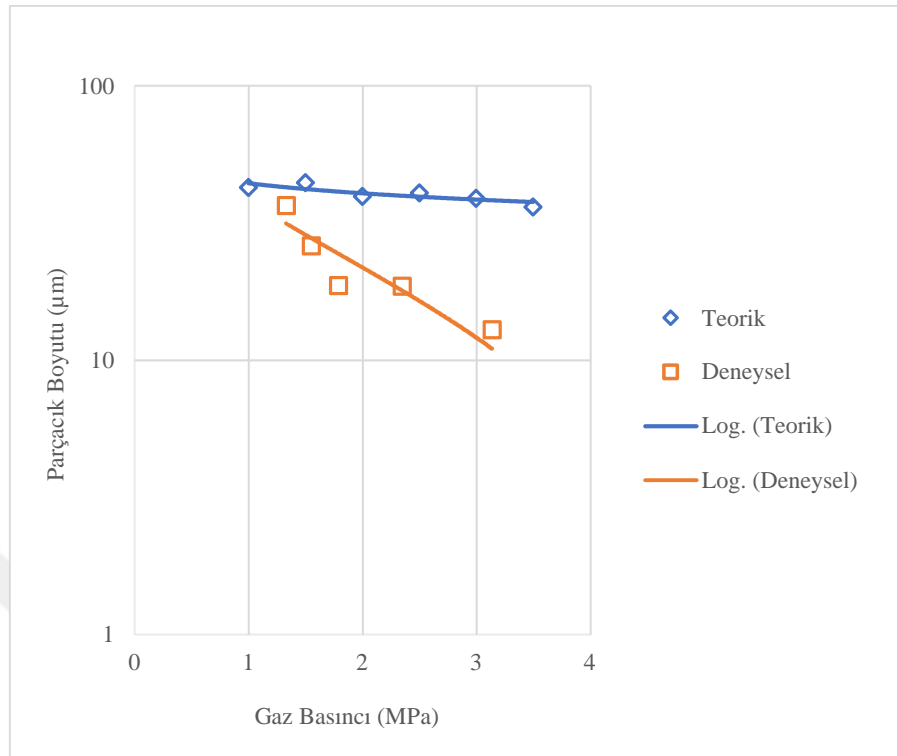
Şekil 5.75. G/M kütle akış oranına göre deneysel ve teorik toz boyutunun karşılaştırılması.



Şekil 5.76. Gaz basıncı - toz boyutu eğrileri.



Şekil 5.77. G/M kütle akış oranı - toz boyutu eğrilerinin logaritmik eksenlerde gösterimi.



Şekil 5.78. Gaz basıncı - toz boyutu eğrilerinin logaritmik eksenlerde gösterimi.

5.5.6. Boyut dağılımları

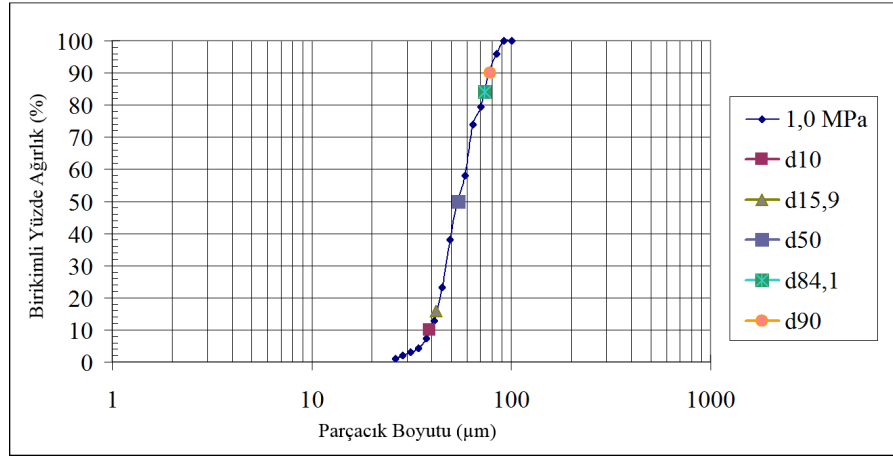
Sayısal modellemelerin tamamlanmasının ardından, ortalama toz boyutlarının belirlenebilmesi için sayısal modellerden elde edilen 3250 adet toz tanesinin eş değer küresel toz çapı hesabı yapılmıştır. Toz boyut verileri kullanılarak her bir basınç değeri altında elde edilen tozlara ait birikimli parçacık boyut dağılımı grafikleri, frekansa bağlı parçacık boyut grafikleri, toz dağılımlarına yönelik histogram ve toz dağılım eğrileri oluşturulmuştur.

Gaz atomizasyonu ile üretilen tozlara ait boyut dağılımının log-normal dağılım olarak adlandırılan ve toz üretiminde oluşması istenen bir dağılım şeklini göstermesi beklenmektedir. 1,0 MPa basınç altında elde edilen birikimli parçacık boyut dağılımı grafiği Şekil 5.79'da, toz dağılımına ait histogram Şekil 5.80'de; 1,5 MPa basınç altında elde edilen birikimli parçacık boyut dağılımı grafiği Şekil 5.81'de, toz dağılımına ait histogram Şekil 5.82'de; 2,0 MPa basınç altında elde edilen birikimli parçacık boyut dağılımı grafiği Şekil 5.83'te, toz dağılımına ait histogram Şekil 5.84'te; 2,5 MPa basınç altında elde edilen birikimli parçacık boyut dağılımı grafiği Şekil 5.85'te, toz dağılımına ait histogram Şekil 5.86'da; 3,0 MPa basınç altında elde edilen birikimli parçacık boyut dağılımı grafiği Şekil 5.87'de, toz dağılımına ait histogram Şekil 5.88'de; 3,5 MPa basınç altında elde edilen birikimli parçacık boyut dağılımı grafiği Şekil

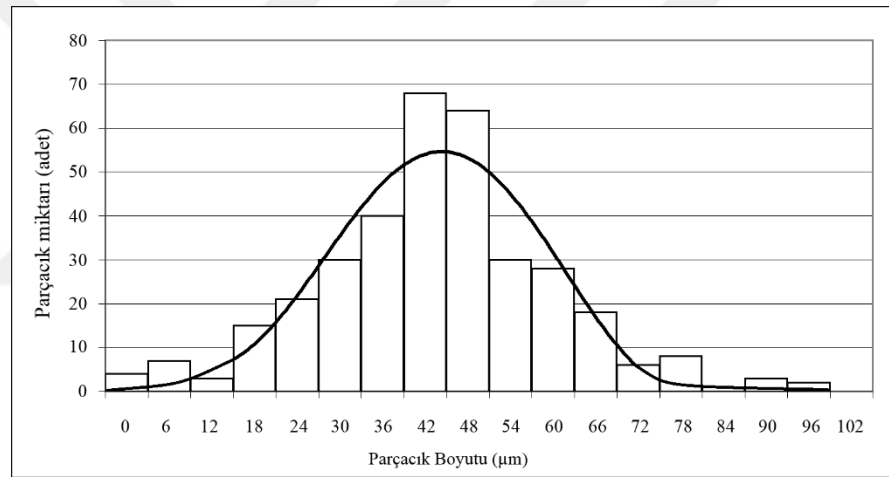
5.89’da, toz dağılımına ait histogram Şekil 5.90’da verilmiştir. Farklı basınçlarda elde edilen histogram grafikleri incelendiğinde dağılıma ait tepe (mod) değerlerinin, hesaplanan ortalama parçacık boyutu değerleri ile birbirine yakın değerler olduğu tespit edilmiştir. 1,0 MPa ile 1,5 MPa gibi nispeten düşük basınçlarda elde edilen dağılım grafiklerinden, dağılıma ait frekansların, yüksek basınçlarda elde edilen frekanslara göre daha düzensiz arttığı ve azaldığı görülmüştür. 3,5 MPa basınç altında elde edilen iri taneli boyutlardaki düzensiz frekansın; 3,5 MPa basınç altında oluşan ve iki-fazlı modelleme ile tespit edilen akış ayrılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Parçacık dağılımlarına ait frekans değerlerinin logaritmik ölçekte verildiği grafikler incelendiğinde parçacık dağılımlarının gaz atomize tozlardan beklenen log-normal yapıda olduğu görülmektedir. Şekil 5.79, Şekil 5.81, Şekil 5.83, Şekil 5.85, Şekil 5.87, Şekil 5.89’da verilen birikimli parçacık boyut dağılımı grafiklerinden ise dağılıma ait d_{10} , $d_{15,9}$, d_{50} , $d_{84,1}$ ve d_{90} değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler standart sapma hesabında kullanılmış olup takip eden başlıkta verilmiştir.

1,0 MPa basınç altında elde edile tozların frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyut grafiği Şekil 5.91’de, toz dağılım eğrisi Şekil 5.92’de; 1,5 MPa basınç altında elde edile tozların frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyut grafiği Şekil 5.93’te, toz dağılım eğrisi Şekil 5.94’te; 2,0 MPa basınç altında elde edile tozların frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyut grafiği Şekil 5.95’te, toz dağılım eğrisi Şekil 5.96’da; 2,5 MPa basınç altında elde edile tozların frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyut grafiği Şekil 5.97’de, toz dağılım eğrisi Şekil 5.98’de; 3,0 MPa basınç altında elde edile tozların frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyut grafiği Şekil 5.99’da, toz dağılım eğrisi Şekil 5.100’de; 3,5 MPa basınç altında elde edilen tozların frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyut grafiği Şekil 5.101’de, toz dağılım eğrisi Şekil 5.102’de verilmiştir.

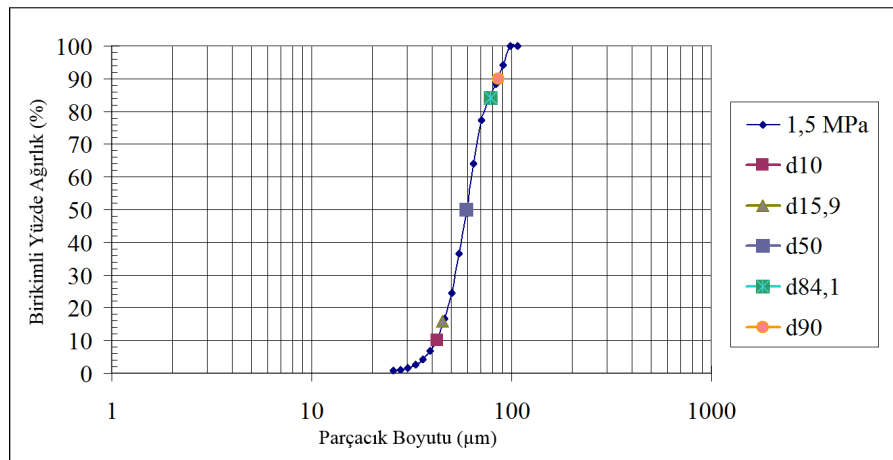
Birikimli toz ağırlıklarının toz boyutuna göre değişimleri logaritmik eksenlerde gösterilmiştir. Şekillerde verilen birikimli toz ağırlıklarının yüzdesel değişimi standart dışı bir elek kullanılarak hesaplanmıştır. Bunun için standart elek ölçüleri geometrik dizi kuralına uyularak daha hassas ölçülere getirilmiştir. Histogram grafiklerinde tozların sabit aralıklarla büyüyen elekler üzerinde kalan sayıları y-eksenlerinde gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde toz dağılımının log-normal adı verilen dağılıma çok yakın bir oluşum sergilediği görülmektedir.



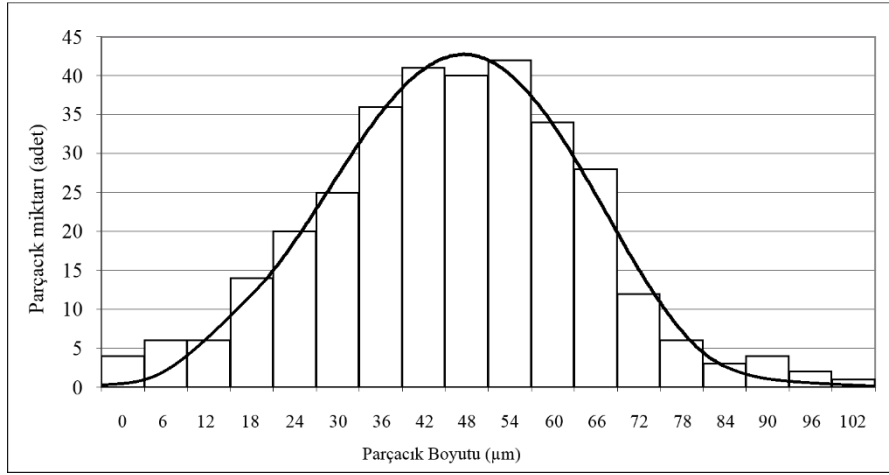
Şekil 5.79. 1,0 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı.



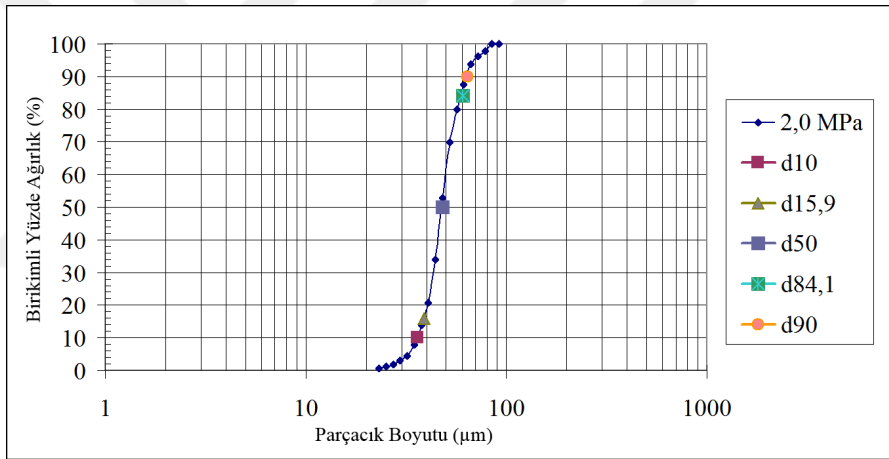
Şekil 5.80. 1,0 MPa basınç altında toz dağılımına ait histogram.



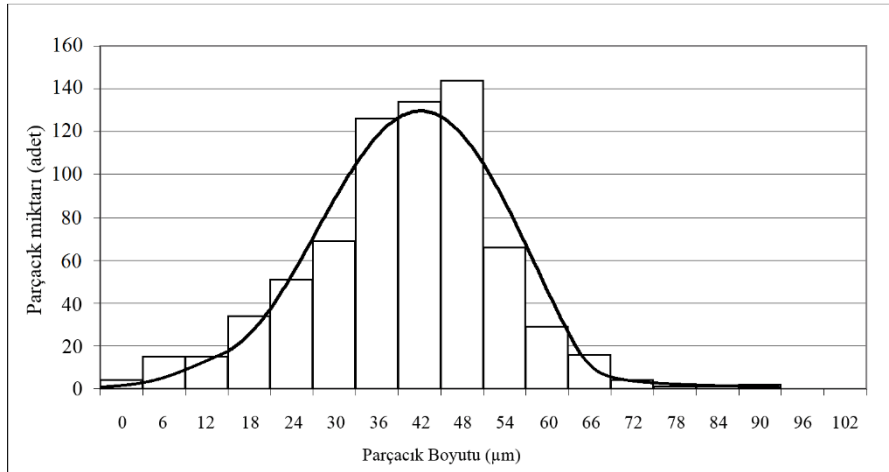
Şekil 5.81. 1,5 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı.



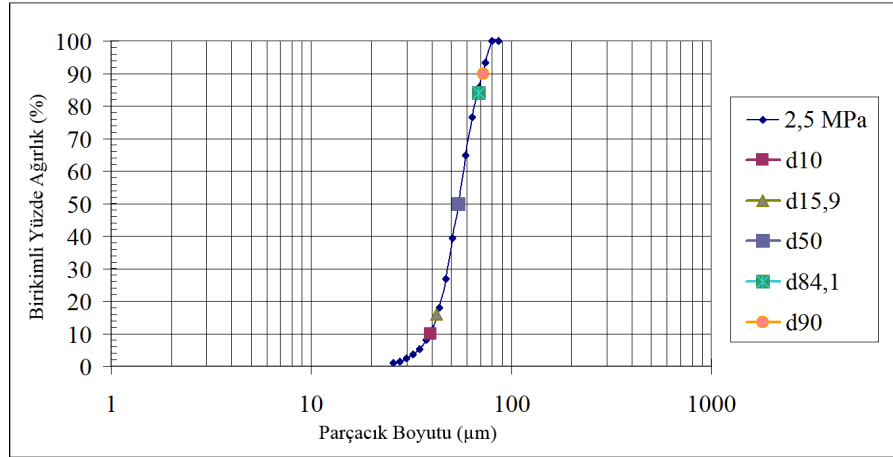
Şekil 5.82. 1,5 MPa basınç altında toz dağılımına ait histogram.



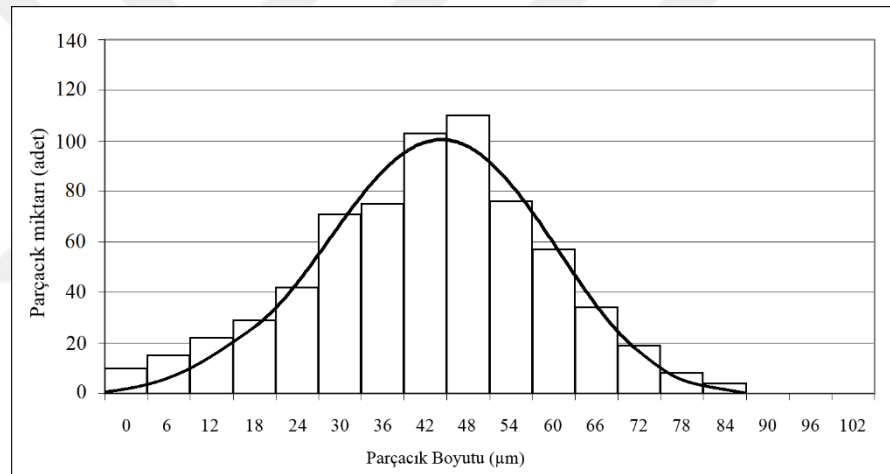
Şekil 5.83. 2,0 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı.



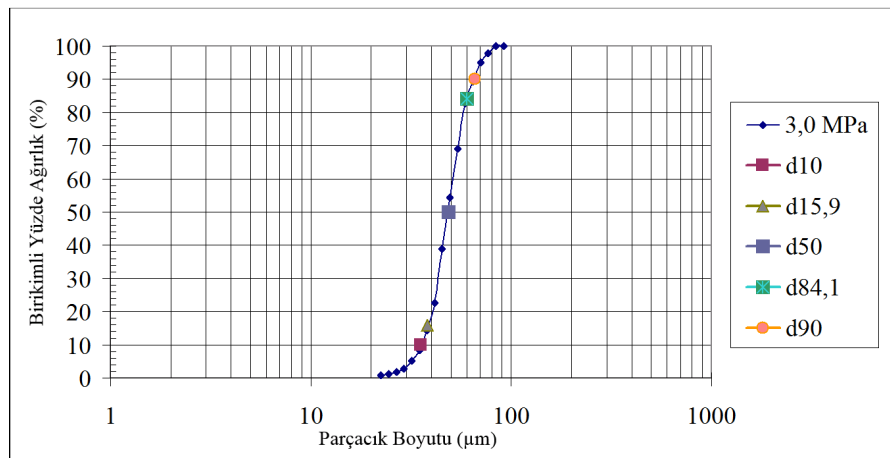
Şekil 5.84. 2,0 MPa basınç altında toz dağılımına ait histogram.



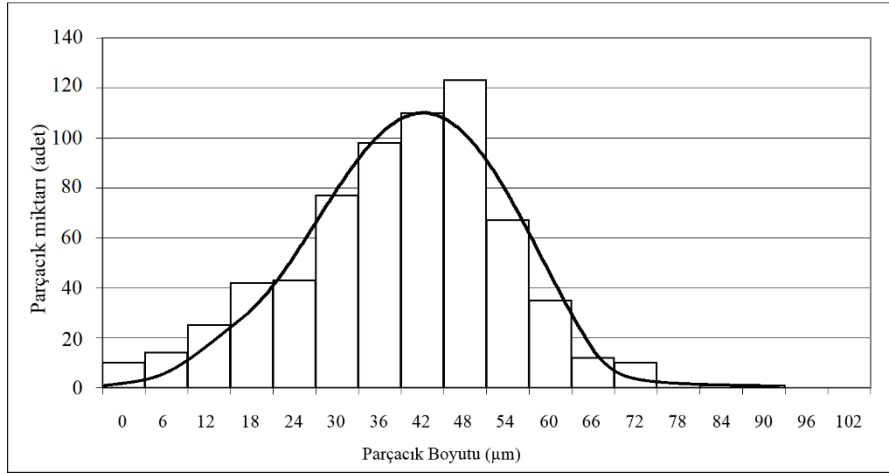
Şekil 5.85. 2,5 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı.



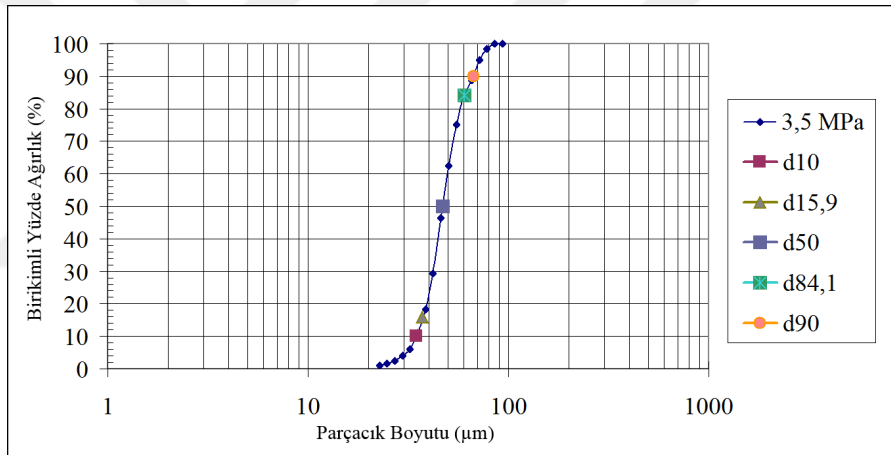
Şekil 5.86. 2,5 MPa basınç altında toz dağılımına ait histogram.



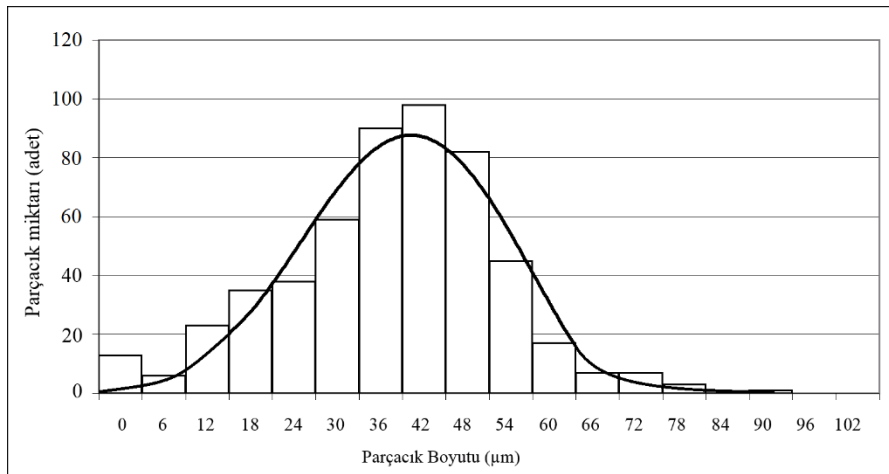
Şekil 5.87. 3,0 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı.



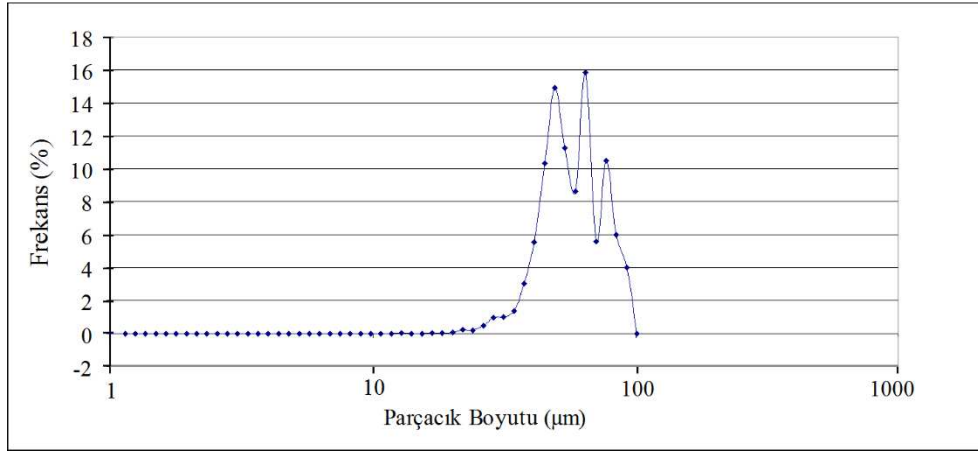
Şekil 5.88. 3,0 MPa basınç altında toz dağılımına ait histogram.



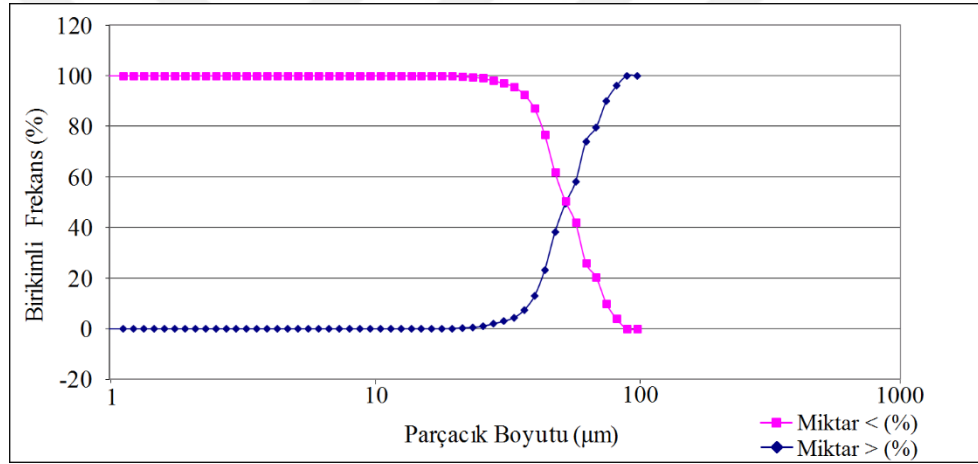
Şekil 5.89. 3,5 MPa basınç altında birikimli parçacık boyutu dağılımı.



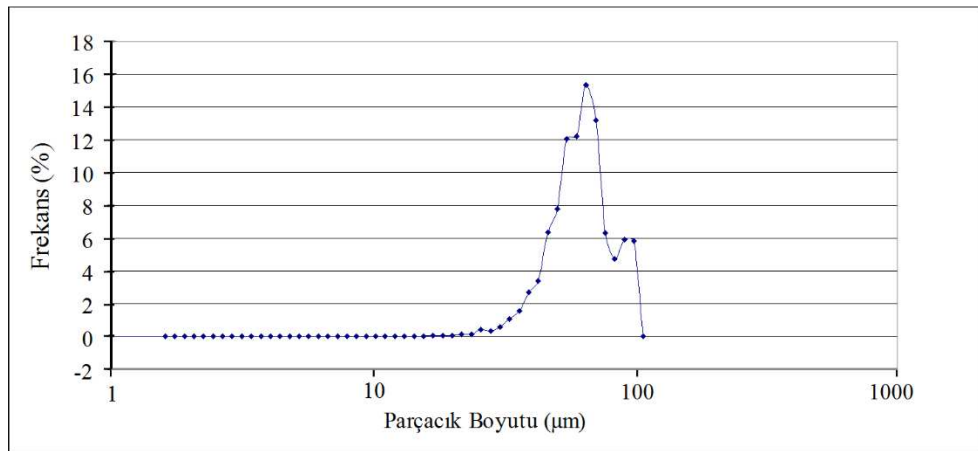
Şekil 5.90. 3,5 MPa basınç altında toz dağılımına ait histogram.



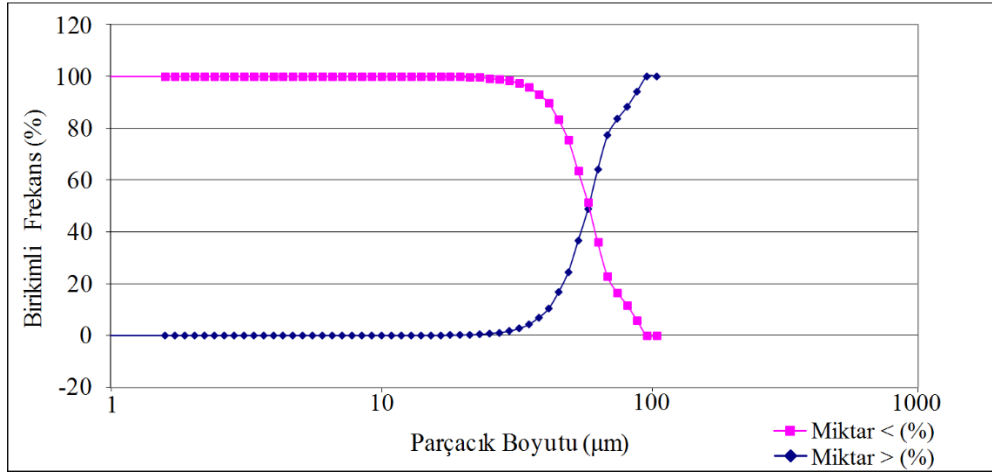
Şekil 5.91. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (1,0 MPa).



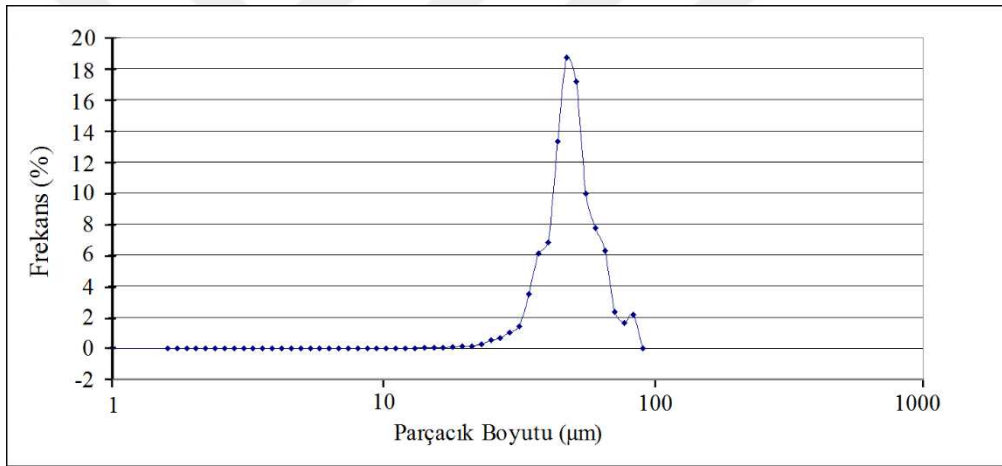
Şekil 5.92. 1,0 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi.



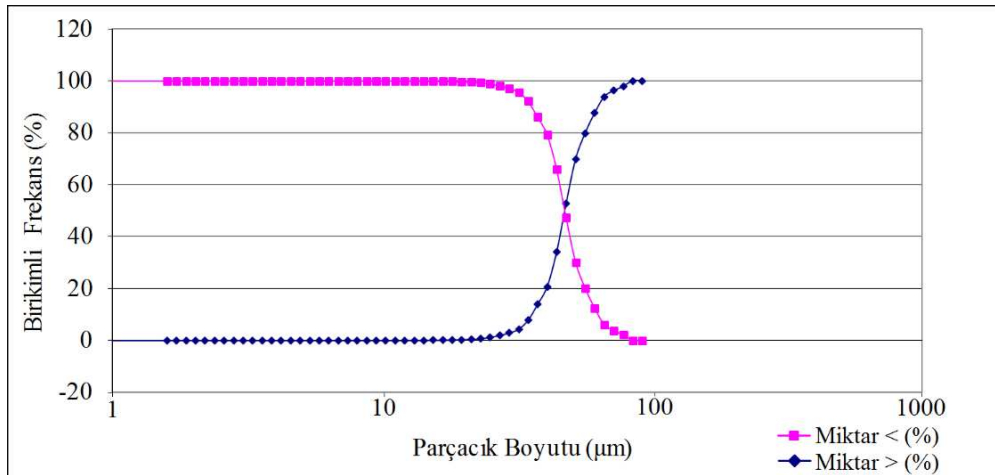
Şekil 5.93. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (1,5 MPa).



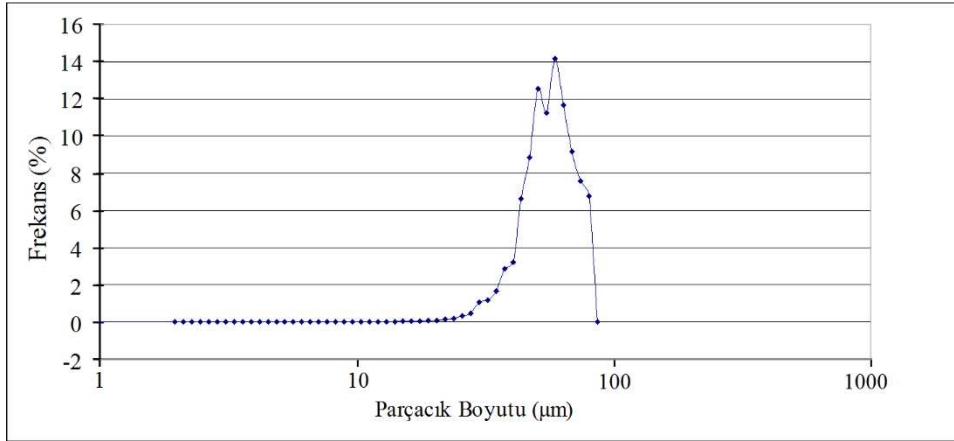
Şekil 5.94. 1,5 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi.



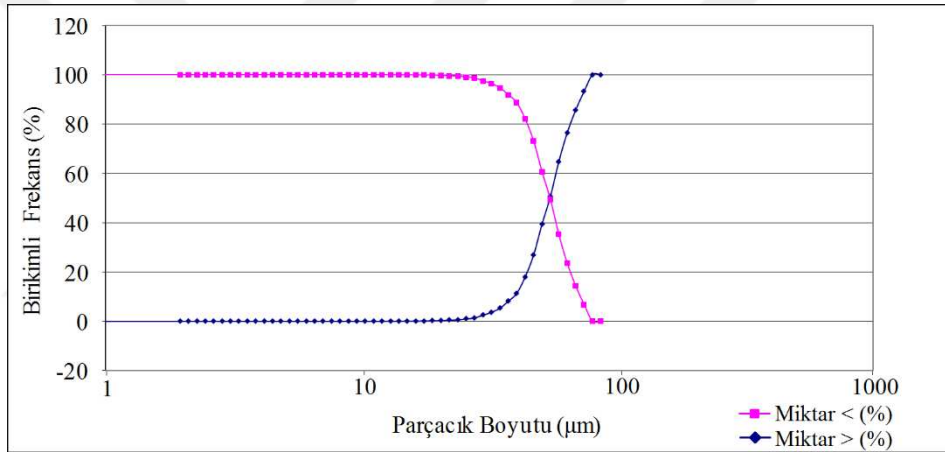
Şekil 5.95. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (2,0 MPa).



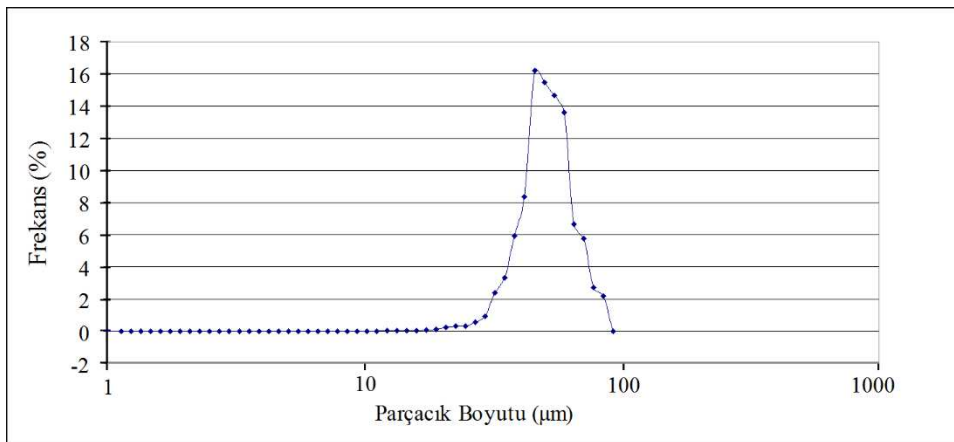
Şekil 5.96. 2,0 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi.



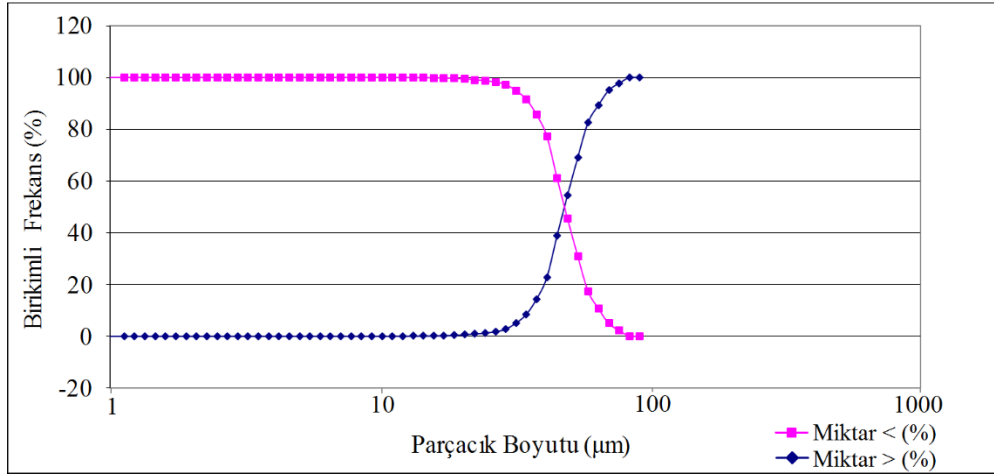
Şekil 5.97. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (2,5 MPa).



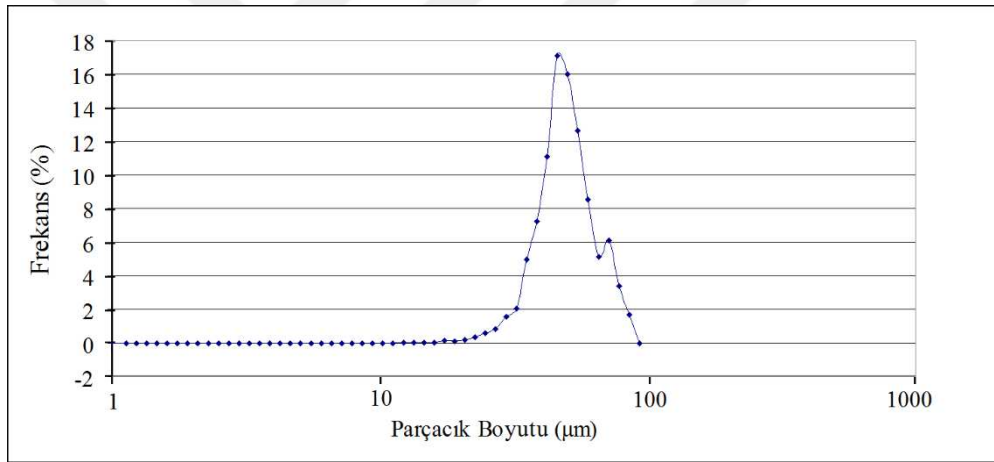
Şekil 5.98. 2,5 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi.



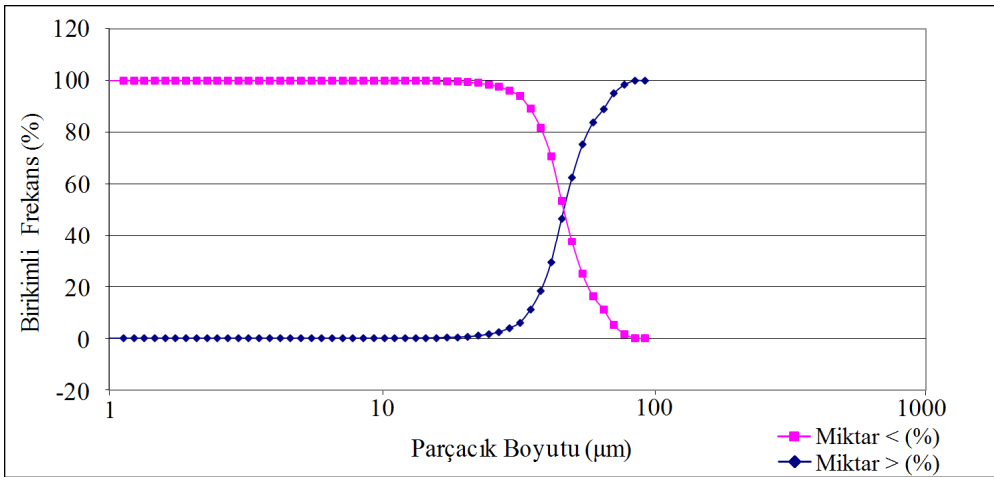
Şekil 5.99. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (3,0 MPa).



Şekil 5.100. 3,0 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi.



Şekil 5.101. Frekansa karşı logaritmik ölçekte parçacık boyutu (3,5 MPa).



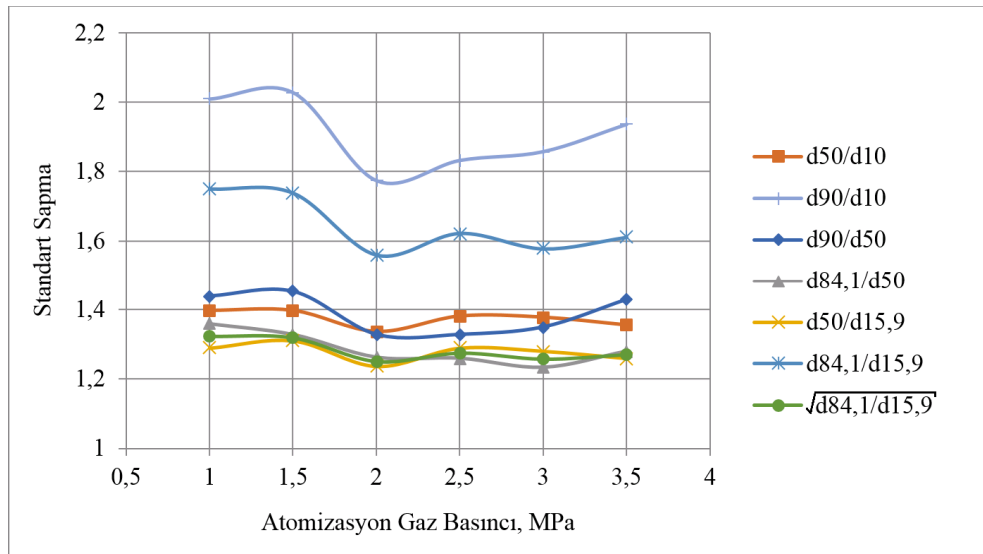
Şekil 5.102. 3,5 MPa basınç altında elde edilen toz dağılım eğrisi.

5.5.7. Standart sapma hesabı

Gaz atomizasyonu işleminde elde edilen parçacık boyut verileri kullanılarak standart sapma değerlerinin hesaplandığı literatüre geçmiş olan birbirinden farklı formüller mevcuttur. Bunlar genellikle ortalama toz boyutu olarak kabul edilen d_{50} boyutunun kullanıldığı formüllerdir. Bununla birlikte d_{50} değerinin hangi diğer verilerle oranlandığına bağlı olarak elde edilen standart sapma değerleri birbirinden farklılıklar göstermektedir. Literatüre geçmiş standart sapma hesabına yönelik bazı formüllerde ise d_{50} değeri hiç kullanılmamaktadır. Çizelge 5.10'da 6 farklı basınç değerinde elde edilen tozlara ait standart sapma değerlerinin farklı formülasyonlar ile hesaplanmış değerleri verilmiştir. Çizelge 5.10'da verilen standart sapma değerlerinin grafiksel olarak eğrilerle gösterimi Şekil 5.103'te verilmiştir.

Çizelge 5.10. Standart sapma değerleri.

Basınç (MPa)	d_{10}	$d_{15,9}$	d_{50}	$d_{84,1}$	d_{90}	$\left(\frac{d_{50}}{d_{10}}\right)$	$\left(\frac{d_{50}}{d_{15,9}}\right)$	$\left(\frac{d_{84,1}}{d_{50}}\right)$	$\left(\frac{d_{90}}{d_{10}}\right)$	$\left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)$	$\sqrt{\left(\frac{d_{84,1}}{d_{15,9}}\right)}$
1,0	38,8	42,1	54,2	73,6	78,0	1,40	1,29	1,36	2,01	1,44	1,32
1,5	42,5	45,3	59,3	78,7	86,1	1,40	1,31	1,33	2,03	1,45	1,32
2,0	36,0	38,9	48,1	60,7	63,8	1,34	1,24	1,26	1,78	1,33	1,25
2,5	39,4	42,3	54,5	68,6	72,3	1,38	1,29	1,26	1,83	1,33	1,27
3,0	35,4	38,1	48,8	60,1	65,8	1,38	1,28	1,23	1,86	1,35	1,26
3,5	34,7	37,3	47,0	60,1	67,1	1,36	1,26	1,27	1,94	1,43	1,27



Şekil 5.103. Standart sapmanın grafiksel değişimi.

Şekil 5.103'te görüldüğü gibi standart sapma değerleri farklı yöntemlerle hesaplanarak 1,2 – 2,1 aralığında olduğu bulunmuştur. Tüm hesaplama yöntemlerinde atomizasyon gaz basıncı 1,0 MPa değerinden 2,0 MPa değerine yükseltildiğinde standart sapmanın bir miktar küçüldüğü görülmüştür. Atomizasyon gaz basıncının 2,0 MPa ile 3,5 MPa aralığında olduğu durumlarda standart sapma değerlerinde belirgin bir değişiklik eğilimi görülmemiştir.

5.5.8. Viskozite değişimi

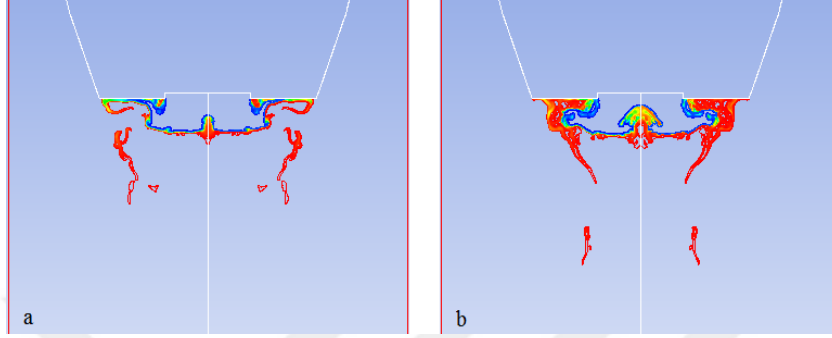
Gaz atomizasyonu işleminde etkili olan birçok parametre mevcuttur. Bu parametreler arasında atomizasyon işlemi üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametrelerden biri olan gaz basıncının etkisi 6 farklı basınç değerinde yapılan sayısal modellemeler ile gösterilmiştir. Toz boyutu üzerinde önemli bir etkiye sahip olan bir başka parametre ise ergimiş hâlde bulunan sıvı metalin viskozitesidir. Park vd., yaptıkları çalışmalarında yüksek kinematik viskoziteye bağlı olarak, farklı yollardan hesapladıkları ortalama parçacık boyutu değerlerindeki artışı göstermişlerdir (Park vd., 2009).

Viskozite değişiminin toz boyutu üzerindeki etkisini sayısal çözümleme ile gösterebilmek için yapılan modellemede 2,5 MPa basınç değeri atomizasyon gaz basıncı olarak seçilmiştir. Tez çalışmasında bu noktaya kadar modellenen sıvı metalin viskozite değeri ergitilmiş kalaya aittir. Sıvı metal viskozitesinin gaz atomizasyonu ile elde edilen toz boyutuna etkisini gösterilebilmek için ergitilmiş kalayın viskozite değeri yerine ergitilmiş demirin viskozite değeri yazılıma girilerek tekrar modelleme yapılmıştır. Sıvı metal viskozite değeri kalay için 0,00133 kg/m-s, demir için ise 0,00623 kg/m-s olarak ANSYS Fluent yazılımına girilmiştir (Echendu ve Anusionwu, 2011; Hildebrand ve Lamoreaux, 1976).

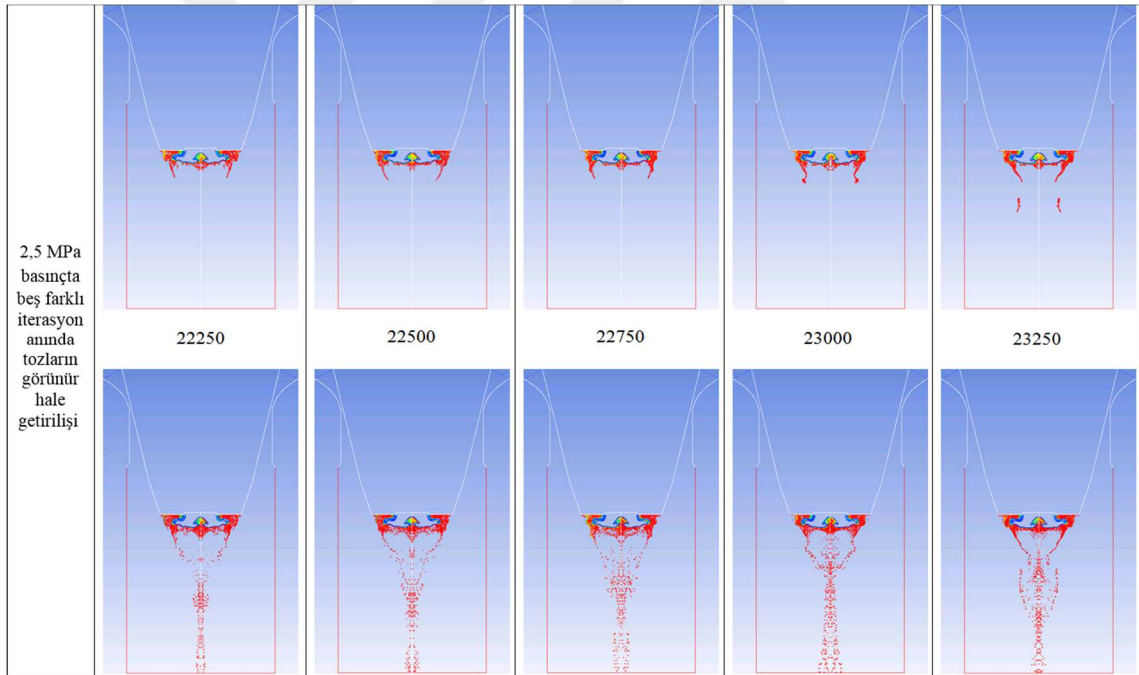
Yüksek ve düşük viskozite değerleri kullanılarak 2,5 MPa basınç altında gerçekleştirilen modellemelerin karşılaştırıldığı görseller EK-3'te verilmiştir. Yüksek viskoziteye sahip ergiyikte akmaya karşı gösterilen direncin daha fazla olması sayısal çözümleme ile atomizasyon oluşumunu geciktirmiştir. Atomizasyon gazları tarafından yüksek viskoziteli ergiyik metale uygulanan kinetik enerji transferi ve kesme kuvvetlerine karşı ergiyikte beklenen parçalanmalar daha zor gerçekleşmiş, dolayısıyla ince taneli parçacık elde etmek zorlaşmıştır ve tane boyutu artmıştır. Sıvı metal viskozitesi 0,00133 kg/m-s iken ortalama toz boyutu 41,47 µm, aynı şartlar altında sıvı metal viskozite değeri 0,00623 kg/m-s olduğunda ise ortalama toz boyutu 45,97 µm olarak hesaplanmıştır. Toz boyutunun alındığı beş farklı iterasyon Şekil 5.105'te gösterilmiştir.

Şekil 5.104a'da 0,00133 kg/m-s viskozite değerinde 19000 iterasyon sonrasında yeterli olgunluğa ulaşıldığı, Şekil 5.104b'de ise 0,00623 kg/m-s viskozite değerinde 23250 iterasyon

sonrasında yeterli olgunluğa ulaşıldığı görülmektedir. Aradaki 4250 iterasyonluk zaman farkı yüksek viskoziteye sahip ergiyiğin atomizasyon sırasında meydana gelen gaz akışları tarafından daha zor parçalanabildiğinin bir göstergesidir.



Şekil 5.104. Viskozite değerlerinin parçalanmaya etkisi a) 0,00133 kg/m-s, b) 0,00623 kg/m-s.



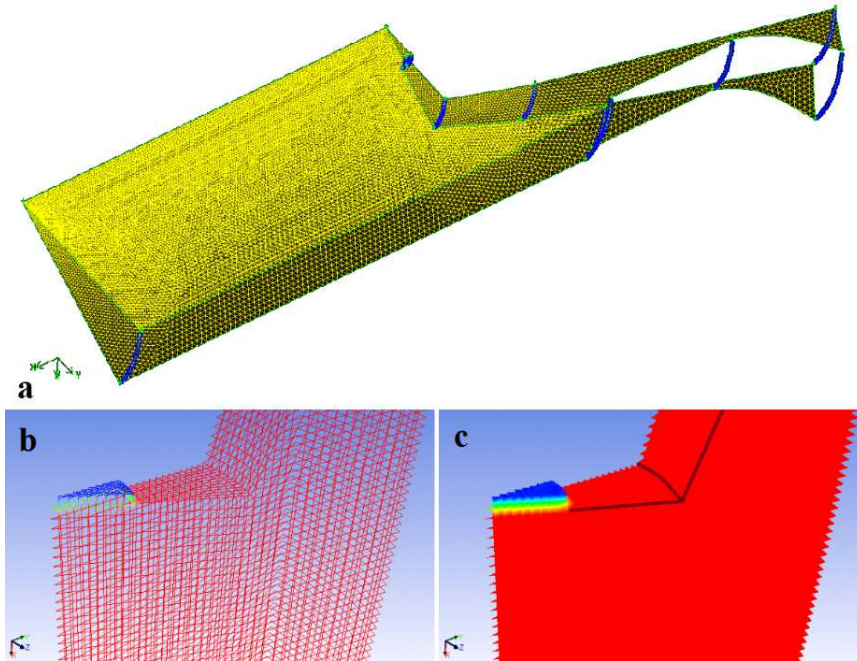
Şekil 5.105. Yüksek viskozitede elde edilen parçacıklar.

5.6. Gaz Atomizasyonu İşleminin 3B Modellenmesi

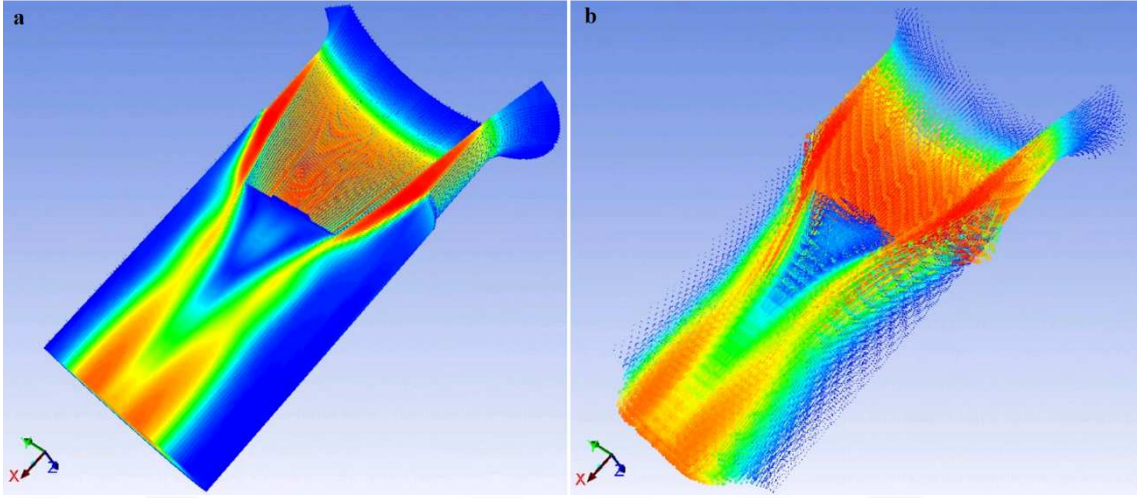
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen iki boyutlu sayısal çözümlerinin tamamlanmasının ardından geliştirilen yaklaşımın 3 boyutlu sayısal çözümlemede kullanılabilir olduğunun gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla lüle geometrisinin 3 boyutlu olarak Gambit

yazılımında oluşturulmasına ve ANSYS Fluent yazılımı aracılığıyla sayısal modellenmesine geçilmiştir.

Hesaplama akışkanlar dinamiği yöntemlerinin kullanıldığı mühendislik çalışmalarında oluşturulan sayısal modellerde hücre sayısı arttıkça hesaplama hassasiyeti artmaktadır. Ancak bilgisayar işlemcisinin hesaplama süresinin kısa tutulması açısından hücre sayısının en uygun değerde olacak şekilde düşük tutulması önemlidir. Bu nedenle yapılan çalışmalar genellikle 2 boyuta indirgenerek işlem tasarrufu sağlanır. Ancak 3 boyutlu modellemeler akış olaylarının daha detaylı incelenebilmesi doğrultusunda avantajlar sağlamaktadır. 3 boyutlu ağ yapısında zaman tasarrufu sağlamanın başlıca yolu lüle yapısının simetri özelliğinden yararlanarak 360 derecelik geometrinin tamamı yerine sınırlı açılarda (örneğin 0-30 derece arasının) modellenmesidir. Bu amaçla lüle geometrisinin 30 derecelik bir bölümü Gambit programında çizilerek ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 5.106a). 30 derecelik lüle parçası ergiyik akışını ve modelleme sonuçlarını değerlendirmek için yeterli büyüklüktedir (Şekil 5.106b, c). İşlem tasarrufu açısından başlangıç hücre sayısı fazla yüksek tutulmamış, elli bin mertebelerinde çalışılmıştır. Oluşturulan ağ yapısı ANSYS Fluent programında modellenerek sayısal olarak çözdürülmüştür. Sayısal çözümlemede öncelikle tek-fazlı olarak atomizasyon gazı simüle edilmiştir. 2,5 MPa basınç altında yapılan çalışmalara ait hız kontürleri (Şekil 5.107a) ve hız vektörleri (Şekil 5.107b) 3 boyutta kesiti alınmış lüle geometrisi üzerinde Şekil 5.107’de verilmiştir.

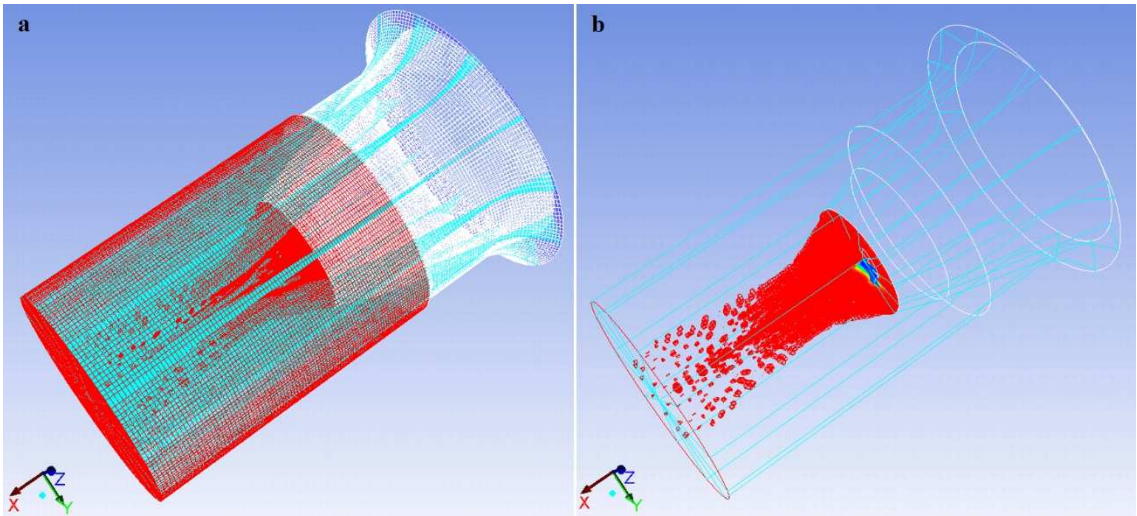


Şekil 5.106. 3 boyutlu modellemede a) 30 derecelik lüle kısmı, b) hesaplama hücreleri, c) sıvı metal akışı.

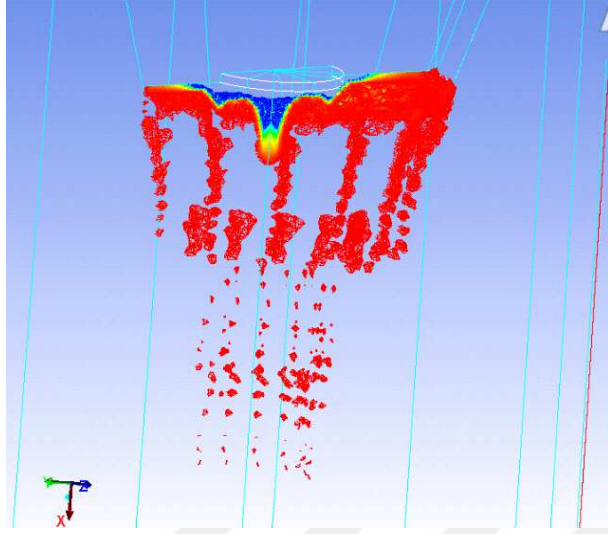


Şekil 5.107. Üç boyutlu modelleme ile elde edilen a) hız kontürleri, b) hız vektörleri.

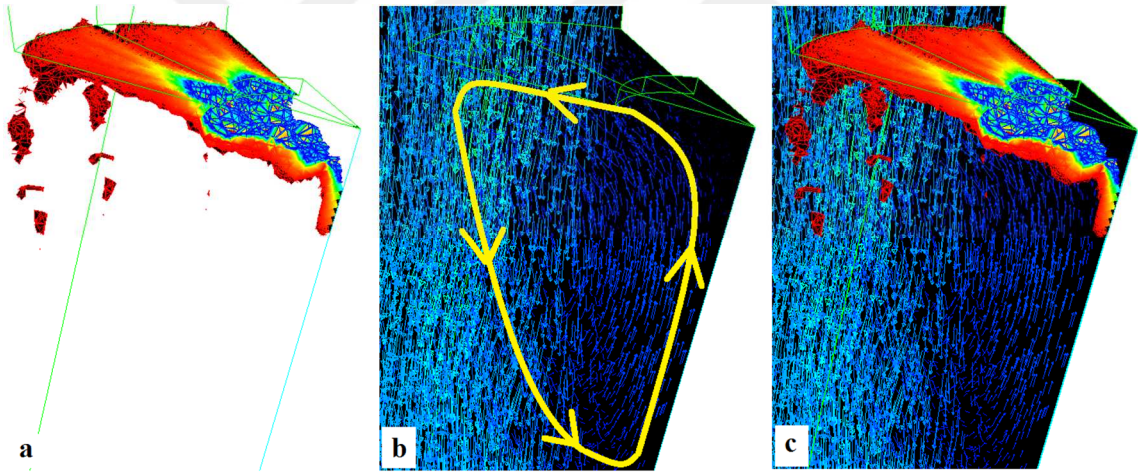
Üç boyutta tek-fazlı modellemenin ardından iki-fazlı modellemeye geçilmiştir. 2,5 MPa basınç altında iki-fazlı modelleme ile elde edilen atomizasyon oluşumu Şekil 5.108’de verilmiştir. Elde edilen parçacık oluşumları lülenin kesiti alınarak Şekil 5.109’da gösterilmiştir. Üç boyutlu modelde elde edilen ergiyik metalin sıvı filmi oluşturması Şekil 5.110a’da, toroidal vorteks oluşumu Şekil 5.110b’de, ergiyik metal ile birlikte atomizasyon gazının hareketi Şekil 5.110c’de görülmektedir. Üç boyutlu modellemenin iki-fazlı olarak gerçekleştirilebilmesi ve tane oluşumlarının gösterilebilmiş olması, tez çalışması kapsamında geliştirilen yaklaşımın gaz atomizasyonuna yönelik üç boyutlu sayısal çözümlerinde de kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 5.108. Üç boyutlu modellemede a) lüle hücre yapısı, b) sıvı faz ve parçalanmalar.



Şekil 5.109. Atomizasyon odasının kesit alınmış görüntüsü.



Şekil 5.110. 3B modellemede a) ergiyik, b) toroidal vorteks, c) atomizasyon.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada gaz atomizasyonu işleminin iki akışkanlı olarak modellenmesi hedeflenerek parçacık boyutunun sayısal modelleme ile elde edilebileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda gaz atomizasyonu işlemi iki akışkanlı olarak modellenmiş, HAD çözümlenmesi elde edilerek fazlar arası etkileşimler gösterilmiş, atomizasyon mekanizmaları açıklanmış ve toz boyutu tez kapsamında geliştirilen yeni bir yaklaşım ile elde edilmiştir. Geliştirilen yaklaşım ile sayısal çözümlenme 1,0 MPa; 1,5 MPa; 2,0 MPa; 2,5 MPa; 3,0 MPa ve 3,5 MPa basınç değerlerinde tekrarlanmış, gaz basıncının toz boyutu üzerindeki etkileri incelenmiş, elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Gaz atomizasyonu işleminde iki-fazlı modellemeye geçmeden önce ANSYS Fluent yazılımı ile tek-fazlı olarak sayısal çözümlenmeler yapılmış, ölçülen gaz tüketim miktarlarının ve gaz akış hızlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Lüle ucunda gaz geri dönüşüm bölgesi ve toroidal vortex oluşumları gösterilmiştir. Atomizasyon gaz basıncındaki artışın, belli bir değerden sonra gaz akış hızına etkisi olmadığı görülmüştür.

2. ANSYS Fluent yazılımının iki-fazlı akış çözümlenmelerinde kullanılan Akışkan Hacmi (VOF – Volume of Fluid) modeli ile gaz atomizasyonu işlemi iki-fazlı olarak modellenmiştir. Oluşturulan modelde, fazlar arası sınır takibi için “Quick” hesaplama şekli ile sayısal çözüme ulaşılmış, daha sonra Geometrik Yeniden Yapılandırma “Geometric Reconstruction” yaklaşımı ile toz parçacıkları görünür hâle getirilmiştir.

3. Atomizasyon gazının 1,0 MPa; 1,5 MPa; 2,0 MPa; 2,5 MPa; 3,0 MPa ve 3,5 MPa olduğu basınç değerlerinde iki-fazlı modelleme gerçekleştirilerek her bir basınç değeri için toz boyut verileri elde edilmiştir. Ortalama toz boyutu 1,0 MPa basınç altında 43,24 μm ; 1,5 MPa basınç altında 44,50 μm ; 2,0 MPa basınç altında 39,61 μm ; 2,5 MPa basınç altında 41,47 μm ; 3,0 MPa basınç altında 37,96 μm ve 3,5 MPa basınçta 35,69 μm olarak hesaplanmıştır. Artan basınçla birlikte ortalama toz boyutunun küçülme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

4. Toz boyut dağılım grafikleri oluşturulmuş, dağılımın gaz atomize tozlarda görülen log-normal dağılım şekli ile uyumlu olduğu görülmüştür.

5. Sıvı metal viskozitesinin toz boyutu üzerindeki etkisini gösterebilmek için 2,5 MPa basınç altında ergiyik viskozite artırılarak tekrar çözüm elde edilmiştir. Sıvı metal viskozitesi

0,00133 kg/m-s iken elde edilen ortalama toz boyutu 41,47 μm , aynı şartlar altında sıvı metal viskozite değeri 0,00623 kg/m-s olduğundaysa ortalama toz boyutu 45,97 μm olarak hesaplanmıştır. Ergitilmiş metaldeki yüksek viskozite değerlerinde parçalanmaların zorlaştığı ve bu durumun daha iri tanecikler elde edilmesine yol açacağı gösterilmiştir.

6. Standart sapma değerleri farklı yöntemlerle hesaplanarak 1,2 – 2,1 aralığında olduğu bulunmuştur. Atomizasyon gaz basıncının 1,0 MPa değerinden 2,0 MPa değerine yükseltildiğinde standart sapmanın bir miktar küçüldüğü görülmüştür.

7. Gaz atomizasyonu işleminde gerçekleşen gaz akış olayları ve parçacık oluşum mekanizmaları iki-fazlı sayısal modelleme ile açıklanmıştır. Atomizasyon sırasında sıvı fazda meydana gelen ayrılma ve birleşmeler sayısal modelleme ile gösterilmiştir.

8. Tez çalışması kapsamında iki-fazlı akışın iki boyutlu olarak modellenmesinde uygulanan sayısal çözümleme yaklaşımı, üç boyutlu olarak oluşturulan modelde denenmiş ve gaz atomizasyonunun üç boyutlu akış çözümlerinde uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

6.2. Öneriler

1. Yapılan çalışmada sıvı metal debisi sabit tutularak, atomizasyon gaz basıncı artışının parçacık boyutuna etkileri gösterilmiştir. Atomizasyon gaz basıncının sıvı metal akış debisi üzerindeki etkileri iki-fazlı modellemeye ilave edilerek parçacık boyutu tekrar elde edildiği takdirde deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar elde edilebilir.

2. Sıvı metal katılaşması modellenerek katı taneciklerin elde edilmesine yönelik bir yaklaşım geliştirilebilir.

3. Sıvı taneciklerin atomizasyon gazı içinde soğuma hızı modellenerek taneciklerin mikroyapılarının belirlenmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılabilir.

4. Farklı yoğunluk ve yüzey gerilimi değerleri kullanılarak değişen özelliklerin parçacık boyutlarına etkilerinin gösterildiği modelleme çalışmaları yapılabilir.

5. Üç boyutlu modelleme ile parçacık boyutu tayini ve atomizasyon mekanizmalarının incelenmesi yönünde çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aksoy, A., ve Ünal, R. (2006). Effects of Gas Pressure and Protrusion Length of Melt Delivery Tube on Powder Size and Powder Morphology of Nitrogen Gas Atomised Tin Powders. *Powder Metallurgy*, 49:4, 349-354.
- Allimant, A., Planche, M. P., Bailly, Y., Dembinski, L., ve Coddet, C. (2009). Progress in gas atomization of liquid metals by means of a De Laval nozzle. *Powder Technology*, 190, 79-83.
- Anderson, I. E., ve Terpstra, R. L. (2002). Progress Toward Gas Atomization Processing with Increased Uniformity and Control. *Materials Science and Engineering*, A326, 101-109.
- Annapragada, S. K. (2004). A Study of Production of Micronized Powders Using Decompressive Atomization Technology. Master's Thesis, Graduate School of The University of Wyoming, 2004.
- ANSYS, Inc. (2013a). *ANSYS Fluent Theory Guide*, Release 15.0.
- ANSYS, Inc. (2013b). *ANSYS Fluent Tutorial Guide*, Release 15.0.
- ANSYS, Inc. (2013c). *ANSYS Fluent Users Guide*, Release 15.0.
- Antipas, G. S. E. (2011). Liquid Column Deformation and Particle Size Distribution in Gas Atomization. *Materials Sciences and Applications*, 2011, 2, 87-96.
- Antipas, G. S. E. (2012). Gas Atomization of Aluminium Melts: Comparison of Analytical Models. *Metals*, 2012, 2, 202-210.
- Antipas, G. S. E. (2013). Review of Gas Atomisation and Spray Forming Phenomenology. *Powder Metallurgy*, 56:4, 317-330.
- ASM Handbook Committee (1998). *Powder Metal Technologies and Applications*, ASM Handbook, Cilt 7, ASM International.
- Aydın, M., ve Ünal, R. (2007). Laval Tipi Yeni Bir Nozul Tasarımı ile Metal Tozu Üretimi ve Üretim Değişkenlerinin Etkisinin İncelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (1) 69-76.
- Aydın, Ö., ve Ünal, R. (2011). Experimental and Numerical Modeling of the Gas Atomization Nozzle for Gas Flow Behavior. *Computers & Fluids*, 42 (2011) 37-43.
- Bhatt, Y. A. (2010). Numerical Simulation of a Liquid Jet Atomization and Break-Up using ANSYS-CFX 12.0. Master's Thesis, Embry-Riddle Aeronautical University, 2010.
- Bierbrauer, F., ve Phillips T. N. (2008). The Numerical Prediction of Droplet Deformation and Break-up Using the Godunov Marker-Particle Projection Scheme. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 56, 1155-1160.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bremont, N., ve Villermaux, E. (2006). Atomization by Jet Impact. *Journal of Fluid Mechanics*, 549, 273-306.

Chekifi, T. (2018). Computational Study of Droplet Breakup in a Trapped Channel Configuration Using Volume of Fluid Method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 59 (2018) 118-125.

Chen, Y. M., Su, Y. H., Lin, R. W., ve Tsao, C. Y. A. (1998). Modelling of Atomization Rate during Gas Atomization. *Acta Meter*, Cilt 46, 1011-1023.

Cossali, G. E., Marengo, M., Santini, M., ve Watanabe, J. (2002). Secondary Droplet Atomisation From Single Drop Impact on Heated Surfaces. ILASS-Europe 2002, Zaragoza.

Czisch, C., ve Fritsching, U. (2008). Atomizer Design for Viscous-melt Atomization. *Materials Science and Engineering A*, 477 (2008) 21-25.

Desantes, J. M., Margot, X., Pastor, J. M., Chavez, M., ve Pinzello, A. (2009). CFD-Phenomenological Diesel Spray Analysis under Evaporative Conditions. *Energy & Fuels*, 23, 3919-3929.

Deshpande, S. S. (2014). A Computational Study of Multiphase Flows. Doctoral Dissertation, University of Wisconsin-Madison, 2014.

Deshpande, S. S., Anumolu, L., ve Trujillo, M. F. (2012). Evaluating the Performance of the Two Phase Flow Solver InterFoam. *Computational Science & Discovery*, 5 (2012) 014016 (36s).

Dumouchel, C., Blaisot, J. B., Bouche, E., Menard, T., ve Vu, T. (2015). Multi-scale Analysis of Atomizing Liquid Ligaments. *International Journal of Multiphase Flow*, 73, 251-263.

Echendu, O. K., ve Anusionwu, B. C. (2011). An Investigation of the Viscosities of Various Groups of Liquid Metals. *The African Review of Physics*, 6:0005.

Eggers, J., ve Villermaux, E. (2008). Physics of Liquid Jets. *Reports on Progress in Physics*, 71 (2008) 036601 (79s).

Faeth, G. M., Hsiang, L. P., ve Wu, P. K. (1995). Structure and Breakup Properties of Sprays. *International Journal of Multiphase Flow*, 21, 99-127.

Firmansyah, D. A., Kaiser, R., Zahaf, R., Coker, Z., Choi, T. Y., ve Lee, D. (2014). Numerical Simulations of Supersonic Gas Atomization of Liquid Metal Droplets. *Japanese Journal of Applied Physics*, 53, 05HA09 (2014).

Fritsching, U., ve Uhlenwinkel V. (2012). Hybrid Gas Atomization for Powder Production. Intechopen.

Gao, S., ve Fritsching, U. (2010). Study of Binary In-flight Melt Droplet Collisions. *Materials Science & Engineering Technology*, 2010, 41, No. 7, 547-554.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Garcia, J. A., Lozano, A., Alconchel, J., Calvo, E., Barreras, F., ve Santolaya J. L. (2017). Atomization of Glycerin with a Twin-fluid Swirl Nozzle. *International Journal of Multiphase Flow*, 92 (2017) 150-160.

Gavory, C., Abderrahmen, R., Bordes, C., Chaussy, D., Belgacem, M. C., Fessi, H., ve Briançon, S. (2014). Encapsulation of a Pressure Sensitive Adhesive by Spray-cooling: Optimum Formulation and Processing Conditions. *Advanced Powder Technology*, 25, 292-300.

German, R. M. (2007). Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları: 05, Ankara.

Gui, N., Yan, J., Li, Z., ve Fan, J. (2014). Direct Numerical Simulation of Confined Swirling Jets. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Cilt 28, Sayı 1-2, 76-88.

Güleşen, M., Ünal, R., ve Kuşhan, M. C. (2011). Farklı Geometrilere Sahip Gaz Atomizasyonu Nozul Performanslarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Karşılaştırılması. 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition. 278-287.

Güleşen, M. (2013). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Gaz Atomizasyonu Nozulunun Modellenmesi ve Toz Üretimine Deneysel Araştırılması, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Günther, A., Lampa, A., Fritsching, U., Schröder, J., Kleinhans, A., Gaukel, V., Schuchmann, H. P., Loth, J. M., Petermann, M., ve Wirth, K. E. (2016). Benchmarking of Gas-Assisted Atomization Systems for Liquid Disintegration. *Chemical Engineering Technology*, 39, No. 4, 699-707.

Hede, P. D., Bach, P., ve Jensen, A. D. (2008). Two-fluid Spray Atomisation and Pneumatic Nozzles for Fluid Bed Coating/agglomeration Purposes: A Review. *Chemical Engineering Science*, 63 (2008) 3821-3842.

Hermann, M. (2010). A Parallel Eulerian Interface Tracking/Lagrangian Point Particle Multi-Scale Coupling Procedure. *Journal of Computational Physics*, 229, s. 745-759, 2010.

Herrmann, M. (2014). A Dual Scale Volume-of-fluid Approach for Modeling Turbulent Phase Interface Dynamics. Center for Turbulence Research Proceedings of the Summer Program 2014, 69-78.

Hildebrand, J. H., ve Lamoreaux, R. H. (1976). Viscosity of Liquid Metals: An Interpretation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Cilt 73, No. 4, s. 988-989.

Hrubecky, H. F. (1953). Studies in Efficiency of the Air-Stream Atomization Phenomena. Doctoral Dissertation, Iowa State College, 1953.

Ishimoto, J., Ohira, K., Okabayashi, K., ve Chitose, K. (2008). Integrated Numerical Prediction of Atomization Process of Liquid Hydrogen Jet. *Cryogenics*, 48, 238-247.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jadidi, M., Moghtadernejad, S., ve, Dolatabadi, A. (2015). A Comprehensive Review on Fluid Dynamics and Transport of Suspension/Liquid Droplets and Particles in High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray. *Coatings*, 2015, 5, 576-645.
- Jiang, G., Henein, H., ve Siegel, M. W. (1988). Intelligent Sensors for Atomization Processing of Molten Metals and Alloys. Master's Thesis, Tech. Report. CMU-RI-TR-88-6, June 1988. Intelligent Sensors Laboratory. The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, USA.
- Jiang, L. (2014). Investigation of Atomization Mechanisms and Flame Structure of a Twin-Fluid Injector for Different Liquid Fuels. Doctoral Dissertation, The University of Alabama, 2014.
- Jing, L., ve Xu, X. (2010). Direct Numerical Simulation of Secondary Breakup of Liquid Drops. *Chinese Journal of Aeronautics*, 23, 153-161.
- Keskin, Ö. (2009). Kare Kesitli Mini Kanallarda İki Fazlı Akışın İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2009.
- Kim, H. J., Suh, H. K., Park, S. H., ve Lee, C. S. (2008). An Experimental and Numerical Investigation of Atomization Characteristics of Biodiesel, Dimethyl Ether, and Biodiesel-Ethanol Blended Fuel. *Energy & Fuels*, 22, 2091-2098.
- Kim, T. S., ve Chae, H. J. (2008). Consolidation of Gas Atomized Mg Alloy Powders. *Reviews On Advanced Materials Science*, 18 (2008) 769-772.
- Kleinhans, A., Georgieva, K., Wagner, M., Gaukel, V., ve Schuchmann, H. P. (2016). On the Characterization of Spray Unsteadiness and its Influence on Oil Drop Breakup during Effervescent Atomization. *Chemical Engineering and Processing*, 104, 212-218.
- Kottala, S. (2011). Numerical Simulation of Slinger Atomization and Comparison with other Investigator's Experimental Results. Master of Science Degree in Mechanical Engineering. The University of Toledo.
- Kumar, V., Joshi, S., Schuetze, J., Braun, M., ve Sami, M. (2013). Modeling Primary Atomization. ILASS Americas, 25th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Pittsburgh.
- Lasheras, J. C., Villermaux, E., ve Hopfinger, E. J. (1997). Break-up and Atomization of a Round Water Jet by a High-speed Annular Air jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 357, 351-379.
- Leon, G. P. (2016). Numerical Modeling of Molten Metal Powder Production. Master's Thesis, North Carolina A&T State University, 2016.
- Li, X. (1989). A Study of Liquid Spray-Mechanism of Atomization Droplet Size Velocity and Temperature Distribution with Ambient Air Motion. Doctoral Dissertation, Northwestern University, 1989.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Li, X., ve Fritsching, U. (2017). Process Modeling Pressure-Swirl-Gas-Atomization for Metal Powder Production. *Journal of Materials Processing Technology*, 239, 1-17.
- Lujia, L., Yingjie, L., ve Lipeng, L. (2015). Atomization Mechanism of a Charged Viscoelastic Liquid Sheet. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28, 403-409.
- Manesh, N. S., Johnson, M., Muralidhara, M. K., Muralidhara B. K., ve Ramachandra, C. (2003). Modeling of Droplet Dynamic and Thermal Behaviour during Spray Deposition. *Bulletin of Materials Science*, Cilt 26, No. 3, April 2003, s. 355-364.
- Martinez, S. N. (2014). Large Eddy Simulation of Spray Atomization with a Probability Density Function Method. *International Journal of Multiphase Flow*, 63, 11-22.
- Mates, S. P. (1999). Gas Atomization of Molten Metal. Doctoral Dissertation, The Pennsylvania State University, 1999.
- Mates, S. P., ve Settles, G. S. (2005). A Study of Liquid Metal Atomization Using Close-coupled Nozzles. *Atomization and Sprays*, 15, 1-22.
- Mi, J. (1996). Numerical Simulation of Gas Dynamics in the High Pressure Gas Atomization Process. Doctoral Dissertation, Graduate School of Clemson University, 1996.
- Miyashiro, S., Mori, H., ve Takechi, H. (2001). Developmental Study of Supersonic Air Assist Four-Fluid Spray Nozzles. ILASS-Europe 2001, Zurich, 2-6 September 2001.
- Milvik, M., Stähle, P., Schuchmann, H. P., Gaukel, V., Jedelsky, J., ve Jicha, M. (2015). Twin-fluid Atomization of Viscous Liquids: The Effect of Atomizer Construction on Breakup Process, Spray Stability and Droplet Size. *International Journal of Multiphase Flow*, 77 (2015) 19-31.
- Morakotjinda, M., Fakpan, K., Yotkaew, T., Tosangthum, N., Krataithong, R., Daraphan, A., Siriphol, P., Wila, P., Vetayanugul, B., ve Tong Sri, R. (2010). Gas Atomization of Low Melting-Point Metal Powders. *Chiang Mai Journal of Science*, 2010; 37(1).
- Motamam, S., Mullis, A. M., ve Cochrane, R. F. (2012). Use of Computational Modelling For Investigation the Effect of Melt Delivery Nozzle Tip Length on Gas Flow Separation in Supersonic Gas Atomization. ICLASS 2012, 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, Germany. September 2-6, 2012.
- Motamam, S., Mullis, A. M., Cochrane, R. F., McCarthy, I. N., ve Borman, D. J. (2013). Numerical and Experimental Modelling of Back Stream Flow During Close-Coupled Gas Atomization. *Computers & Fluids*, 88, 1-10.
- Mullis, A. M., McCarthy, I. N., ve Cochrane, R. F. (2011). High Speed Imaging of the Flow during Close-coupled Gas Atomization: Effect of Melt Delivery Nozzle Geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, September 2011.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ouyang, H., Chen, X., ve Huang, B. (2006). Influence of Melt Superheat on Breakup Process of Close-coupled Gas Atomization. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17 (2007) 967-973.
- Özbilen, S. (1999). Satellite Formation Mechanism in Gas Atomised Powders. *Powder Metallurgy*, 42:1, 70-78.
- Panao, M. R. O., ve Radu, L. (2013). Advanced Statistics to Improve the Physical Interpretation of Atomization Processes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 40, 151-164.
- Park, H., Yoon, S. S., ve Heister, S. D. (2005). A Nonlinear Atomization Model for Computation of Drop Size Distributions and Spray Simulations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 48:1219-1240.
- Park, S. H., Kim, H. J., Suh, H. K., ve Lee, C. S. (2009). A Study on the Fuel Injection and Atomization Characteristics of Soybean Oil Methyl Ester (SME). *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 108-116.
- Park, S. W., ve Reitz, R. D. (2009). A Gas Jet Superposition Model for CFD Modeling of Group-hole Nozzle Sprays. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 1193-1201.
- Pawlowski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings* (Second Edition). John Wiley & Sons, Ltd, 6.
- Persson, F., Eliasson, A., ve Jönsson, P. (2012). Prediction of Particle Size for Water Atomised Metal Powders: Parameter Study. *Powder Metallurgy*, 55, 45,53.
- Press, L. B., Ochowiak, M., ve Woziwodzki, S. (2010). Atomization of PEO Aqueous Solutions in Effervescent Atomizers. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. Cilt 31, Sayı 4, August 2010, Pages 651-658.
- Rahman, M. A. (2011). Scaling of Effervescent Atomization and Industrial Two-Phase Flow. Doctoral Dissertation, University of Alberta, 2011.
- Ray, D. K. (1971). A Model Study of Liquid Atomization. Master's Thesis, University of Ottawa, 1971.
- Raynal, L., ve Harter, I. (2001). Studies of Gas-liquid Flow through Reactors Internals Using VOF Simulations. *Chemical Engineering Science*, 56 (2001) 6385-6391.
- Rivero, C., Nogareda, J., Martin, M., Valle, E. M. M., ve Galan, M. A. (2013). CFD Modeling and its Validation of Non-Newtonian Fluid Flow in a Microparticle Production Process Using Fan Jet Nozzles. *Powder Technology*, 246, 617-624.
- Salvador, F. J., Romero, J. V., Rosello, M. D., ve Jaramillo, D. (2015). Numerical Simulation of Primary Atomization in Diesel Spray at Low Injection Pressure. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Cilt 291, 1 January 2016, Pages 94-102.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Schwenck, D., Ellendt, N., Bühner, J. F., Hofmann, P., ve Uhlenwinkel, V. (2016). A Novel Convergent-Divergent Annular Nozzle Design for Close-coupled Atomization. European Powder Metallurgy Association, 2016.

Seong, B., Hwang, S., Jang, H. S., Lee, H., Kim, J., Nguyen, V. D., Cho, D. H., Lin, L., ve Byun, D. (2017). A Hybrid Aerodynamic and Electrostatic Atomization System for Enhanced Uniformity of Thin Film. *Journal of Electrostatics*, 87 (2017) 93-101.

Sescu, C. (2011). Experimental and Computational Study on Liquid Atomization by Slinger Injector. Doctoral Dissertation, The University of Toledo, 2011.

Shavit, U. (2001). Gas-liquid Interaction in the Liquid Breakup Region of Twin-fluid Atomization. *Experiments in Fluids*, 31, 550-557.

Shukla, P., Mandal, R. K., ve Ojha, S. N. (2001). Non-equilibrium Solidification of Undercooled Droplets during Atomization Process. *Bulletin of Materials Science*, Cilt. 24, No. 5, October 2001, s. 547-554.

Siemens (2011). Operating Instructions, Coriolis Flowmeters Sitrans F C Mass 2100 Di 1.5 (03/2011); 14, 38.

Sofuoglu, M. A., Erbaş, M., Uslan, İ., ve Bıyıkoglu, A. (2013). Development of a Swirl Nozzle for Powder Technology. Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE 2013. November 15-21, 2013, San Diego, California, USA.

Sovani, S. D., Sojka, P. E., ve Lefebvre, A. H. (2001). Effervescent Atomization. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27 (2001) 483-521.

Srivastava, V. C., ve Ojha, S. N. (2006). Effect of Aspiration and Gas-melt Configuration in Close Coupled Nozzle on Powder Productivity. *Powder Metallurgy*, 49:3, 213-218.

Steinmetz, A. D. (2011). Investigation of a Novel Passivation Technique for Gas Atomized Magnesium Powders. Master of Science, Iowa State University.

Suh, H. K., ve Lee, C. S. (2008). Effect of Cavitation in Nozzle Orifice on the Diesel Fuel Atomization Characteristics. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29, 1001-1009.

Thompson, J. S., Hassan, O., Rolland, S. A., ve Sienz, J. (2016). Predicting the Effect of Operational Parameters on the Particle Size Distribution of Powders Produced by an Industrial Close-Coupled Gas Atomiser. World Powder Metallurgy 2016 Conference Paper.

Tomar, G., Fuster, D., Zaleski, S., ve Popinet, S. (2010). Multiscale Simulations of Primary Atomization. *Computers & Fluids*, 39, 1864-1874.

Trinh, H. P. (2004). Modeling of Turbulence Effect on Liquid Jet Atomization. Doctoral Dissertation, The University of Alabama in Huntsville, 2004.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ünal, A. (1989). Liquid Break-Up in Gas Atomization of Fine Aluminum Powders. *Metallurgical Transactions B*, Cilt 20B, February 1989-61.
- Ünal, A. (1998). Influence of Nozzle Geometry in Gas Atomisation of Rapidly Solidified Aluminium Alloys. *Materials Science and Technology*, October 1988, Cilt 4.
- Ünal, R. (1995). Gaz Atomizasyonu ile Metal Tozu Üretimi Değişkenlerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- 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. (2007a). Improvements to Close Coupled Gas Atomisation Nozzle for Fine Powder Production. *Powder Metallurgy*, 50, 66-71.
- Ünal, R. (2007b). Investigation on Metal Powder Production Efficiency of New Convergent Divergent Nozzle in Close Coupled Gas Atomisation. *Powder Metallurgy*, 50:4, 302-306.
- Ünal, R., ve Aydın, Ö. (2008). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Yöntemi ile Gaz Atomizasyon Nozulu Modellenmesi. TUBİTAK Proje Raporu, Proje No: 107M189.
- Ünal, R., ve Kayalı, Y. E. (2018) Gaz Atomizasyonu ile Metal Tozu Üretiminde Toz Boyutunun Sayısal Çözümleme ile Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33:3 (2018) 1135-1144.
- Varga, C. M., Lasheras, J. C., ve Hopfinger, E. J. (2003). Initial Breakup of a Small-Diameter Liquid Jet by a High-Speed Gas Stream. *Journal of Fluid Mechanics*, 497, 405-434.
- Wagner, C., Luidold, S., Antrekowitsch, H., ve Rimmer, K. (2010). Application of a New Gas Atomization System for Alloys and Chalcogenides. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, 2010, Cilt 1., 2.19-2.33.
- Wang, D., Ling, X., Peng, H., Cui, Z., ve Yang, X. (2016). Experimental Investigation of Ligament Formation Dynamics of Thin Viscous Liquid Film at Spinning Disk Edge. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55, 9267-9275.
- Xu, Q. (2000). Fundamental Mechanisms of Microstructural Evolution during Spray Forming. Doctoral Dissertation, University of California, Irvine, 2000.
- Xu, Q., Cheng, D., Trapaga, G., Yang, N., ve Lavernia, E. J. (2002). Numerical Analyses of Fluid Dynamics of an Atomization Configuration. *Journal of Material Research*, Cilt 17, No. 1, Jan 2002.
- Yan, M., Wang, J. Q., Schaffer, G. B., ve Qian, M. (2011). Solidification of Nitrogen-Atomized Al₈₆Ni₆Y_{4.5}Co₂La_{1.5} Metallic Glass. *Journal of Material Research*, Cilt 26, No. 7, Apr 14 2011.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yao, S. (2013). Liquid Breakup and Atomization of Pressure Jet and Swirl Atomizers. Doctoral Dissertation, North Carolina State University, 2013.

Yoshida, H., Igushi, T., Yamamoto, T., ve Masuda, H. (2011). Theoretical Calculation of Fundamental Uncertainty Region Based on the Maximum and/or the Minimum Size in the Preparation of Standard Reference Particles for Particle Size Measure. *Advanced Powder Technology*, 22, 43-49.

Yu, X. L., Zhao, M. Q., ve Zhao, G. Y. (2004). Influence of Atomising Gas Pressure on 63A Solder Powder in Supersonic Atomisation. *Powder Metallurgy*, 47:2, 200-204.

Zaremba, M., Weiß, L., Maly, M., Wensing, M., Jedelsky, J., ve Jicha, M. (2017). Low-pressure Twin-fluid Atomization: Effect of Mixing Process on Spray Formation. *International Journal of Multiphase Flow*, 89 (2017) 277-289.

Zeoli, N. (2011). Multiphase Modelling of the Characteristics of Close Coupled Gas Atomization, Doctoral Dissertation, Aston University, 2011.

Zeoli, N., ve Gu, S. (2006). Numerical Modelling of Droplet Break-up for Gas Atomisation. *Computational Materials Science*, 38, 282-292.

Zeoli, N., ve Gu, S. (2008). Computational Validation of an Isentropic Plug Nozzle Design for Gas Atomisation. *Computational Materials Science*, 42, 245-258.

Zeoli, N., Tabbara, H., ve Gu, S. (2011). CFD Modeling of Primary Breakup during Metal Powder Atomization. *Chemical Engineering Science*, 66 (2011) 6498-6504.

Zhao, H., Liu, H. F., Xu, J. L., Li, W. F., ve Cheng, W. (2012). Breakup and Atomization of a Round Coal Water Slurry Jet by an Annular Air Jet. *Chemical Engineering Science*, 78, 63-74.

Zhao, H., Xu, J. L., Wu, J. H., Li, W. F., ve Liu, H. F. (2015). Breakup Morphology of Annular Liquid Sheet with an Inner Round Air. *Chemical Engineering Science*, 137 (2015) 412-422.

Zhao, W., Cao, F., Ning, Z., Zhang, G., Li, Z., ve Sun, J. (2012). A Computational Fluid Dynamics (CFD) Investigation of the Flow Field and the Primary Atomization of the Close Coupled Atomizer. *Computers and Chemical Engineering*, 40, 58-66.

Zhao, X. M., Xu, J., Zhu, X. X., ve Zhang, S. M. (2009). Effect of Atomization Gas Pressure Variation on Gas Flow Field in Supersonic Gas Atomization. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(10): 3046-3053.

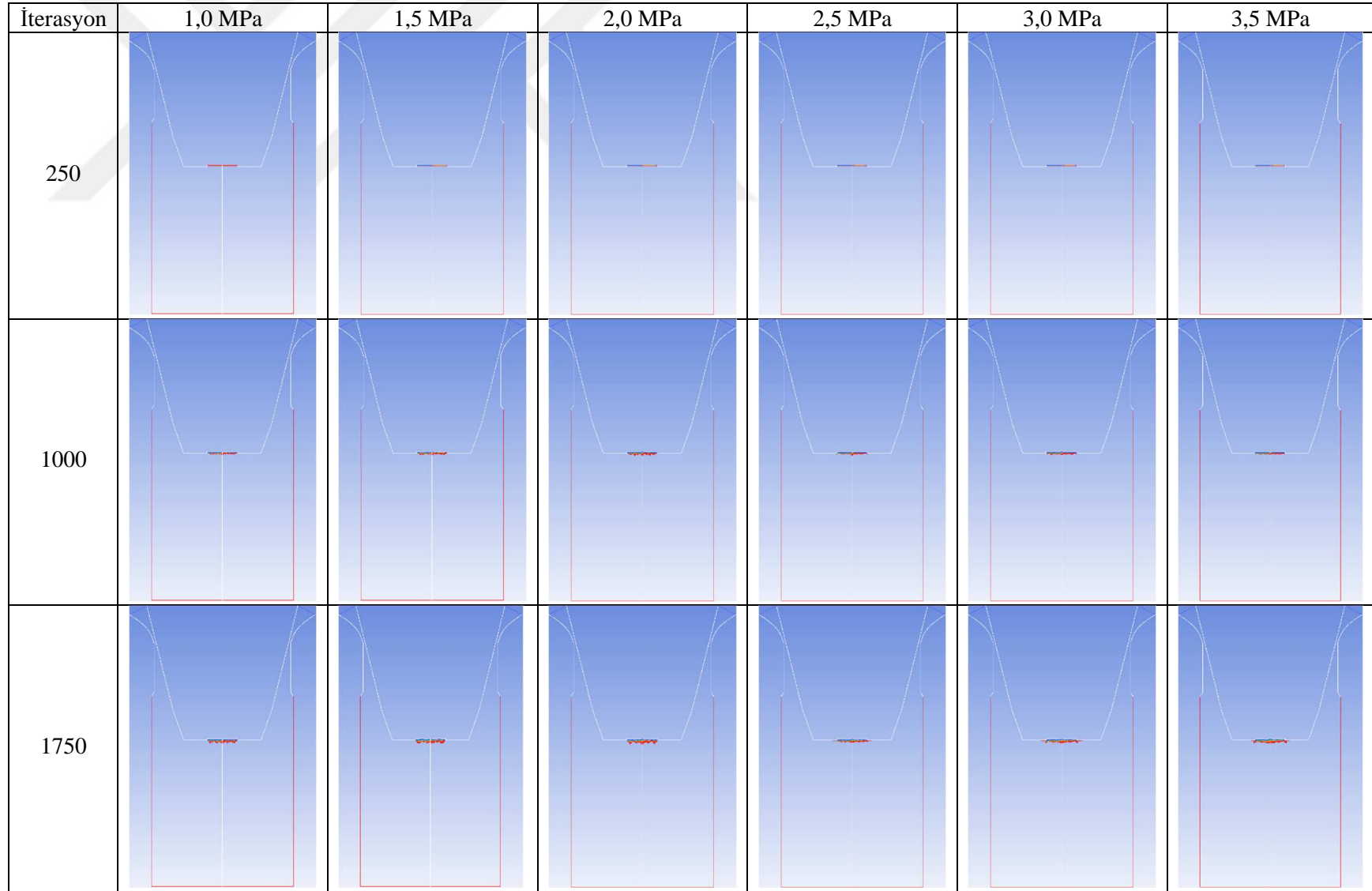
Zheng, B., Lin, Y., Zhou, Y., ve Lavernia, E. J. (2009). Gas Atomization of Amorphous Aluminum Powder: Part II. Experimental Investigation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, Cilt 40B, December 2009.

Zhou, Y. (1999). An Investigation of Droplet Behavior during Spray-Based Manufacturing Processes. Doctoral Dissertation, University of California, Irvine, 1999.

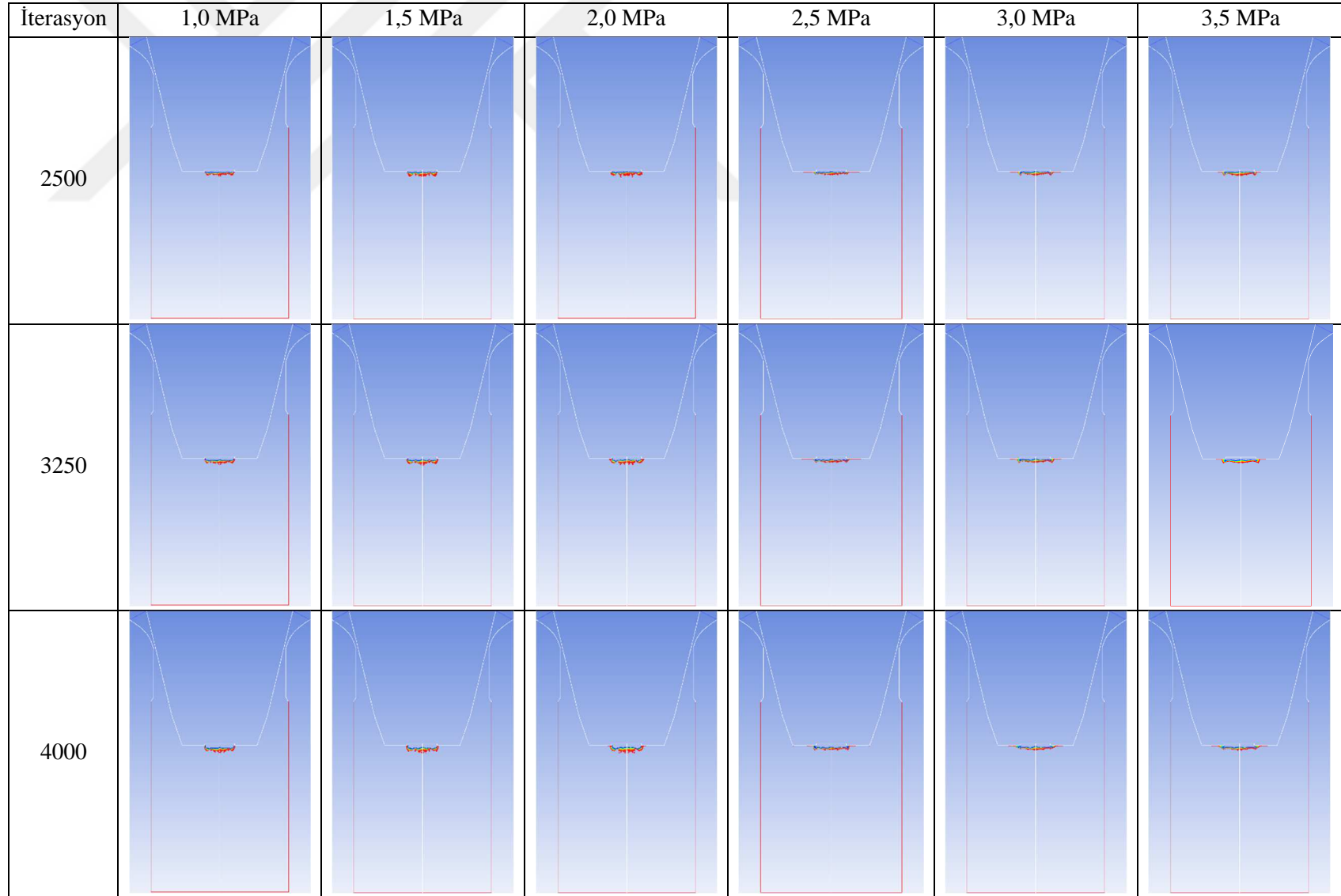


EKLER

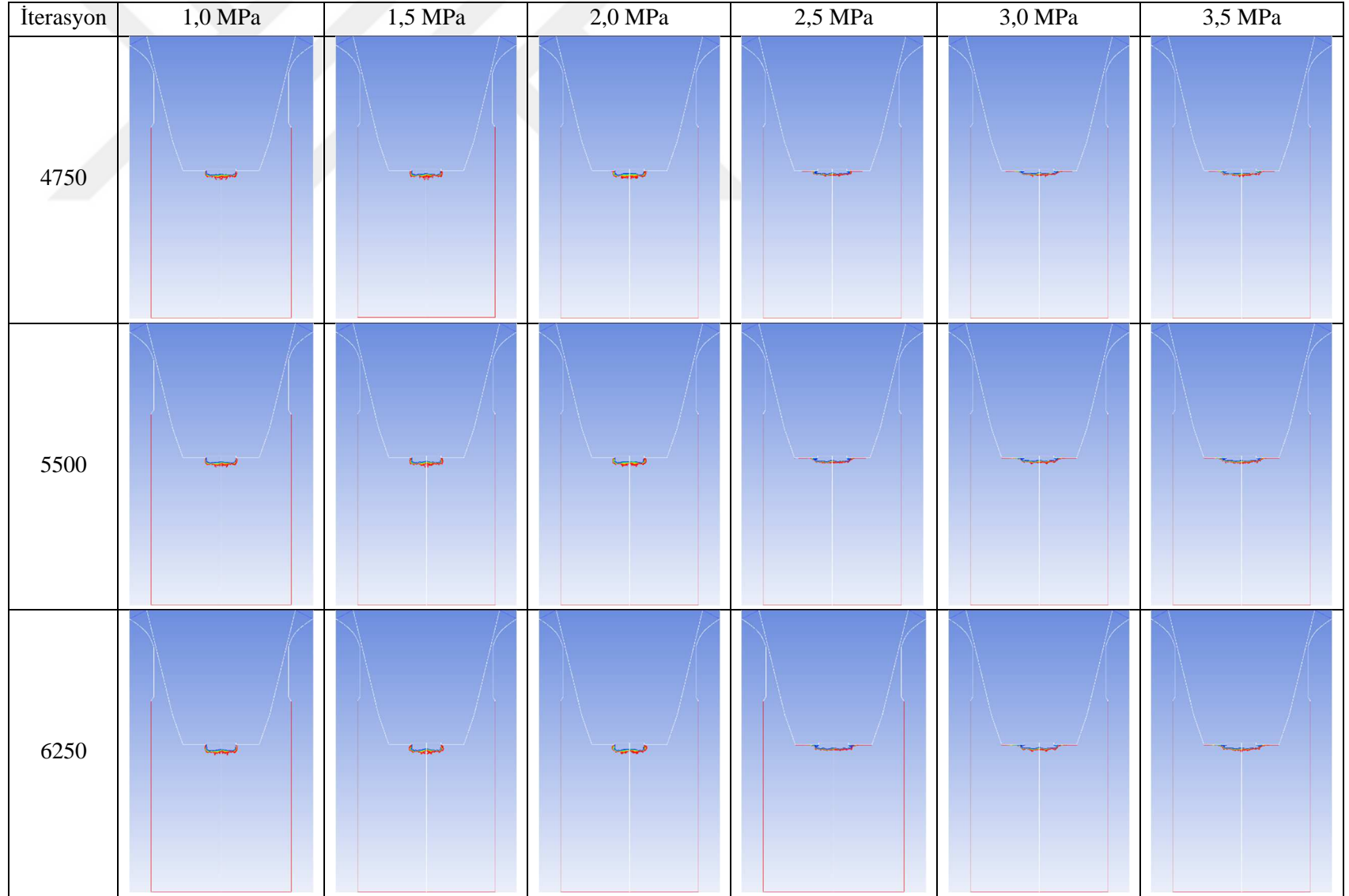
EK-1 Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).



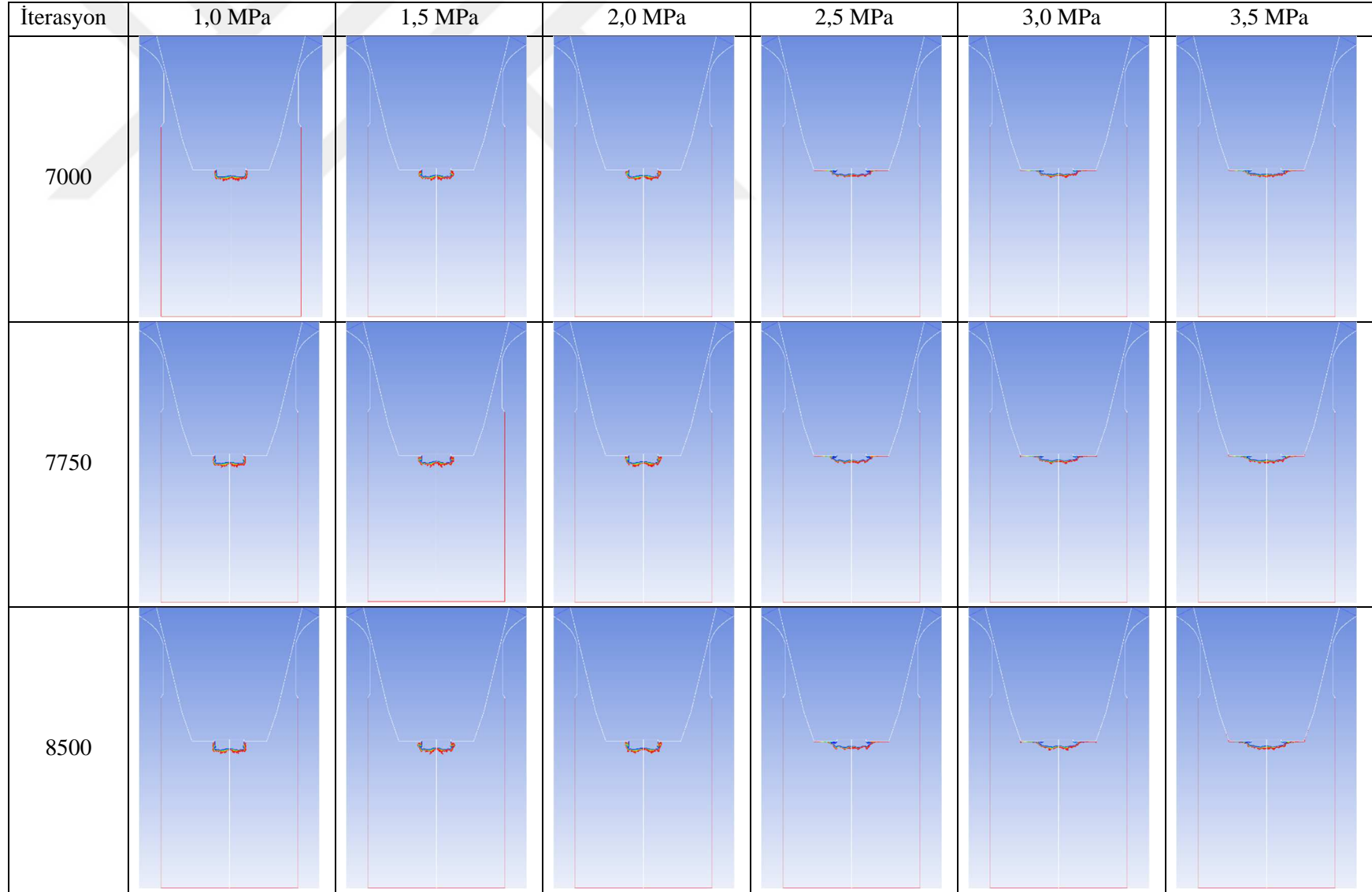
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).



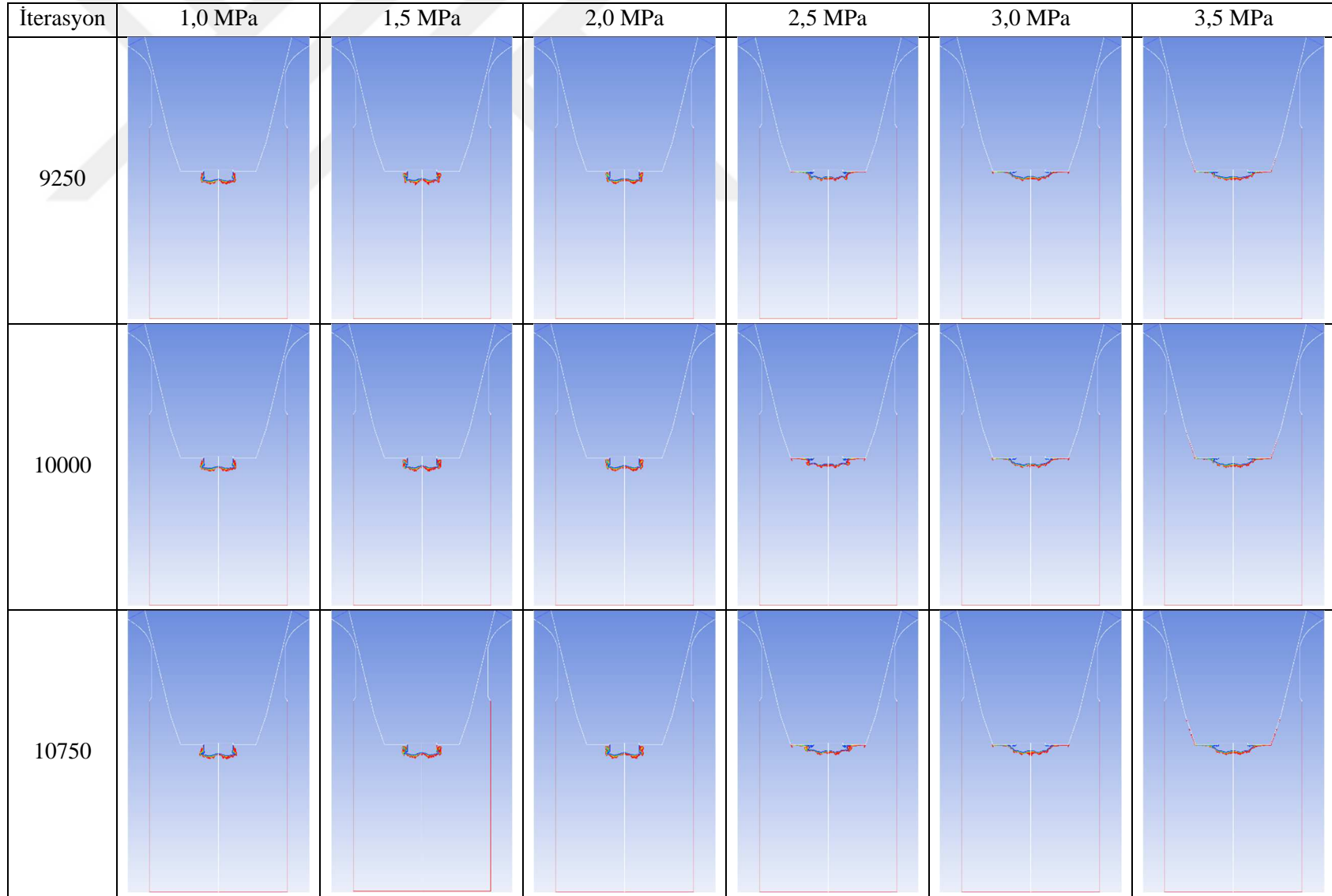
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).



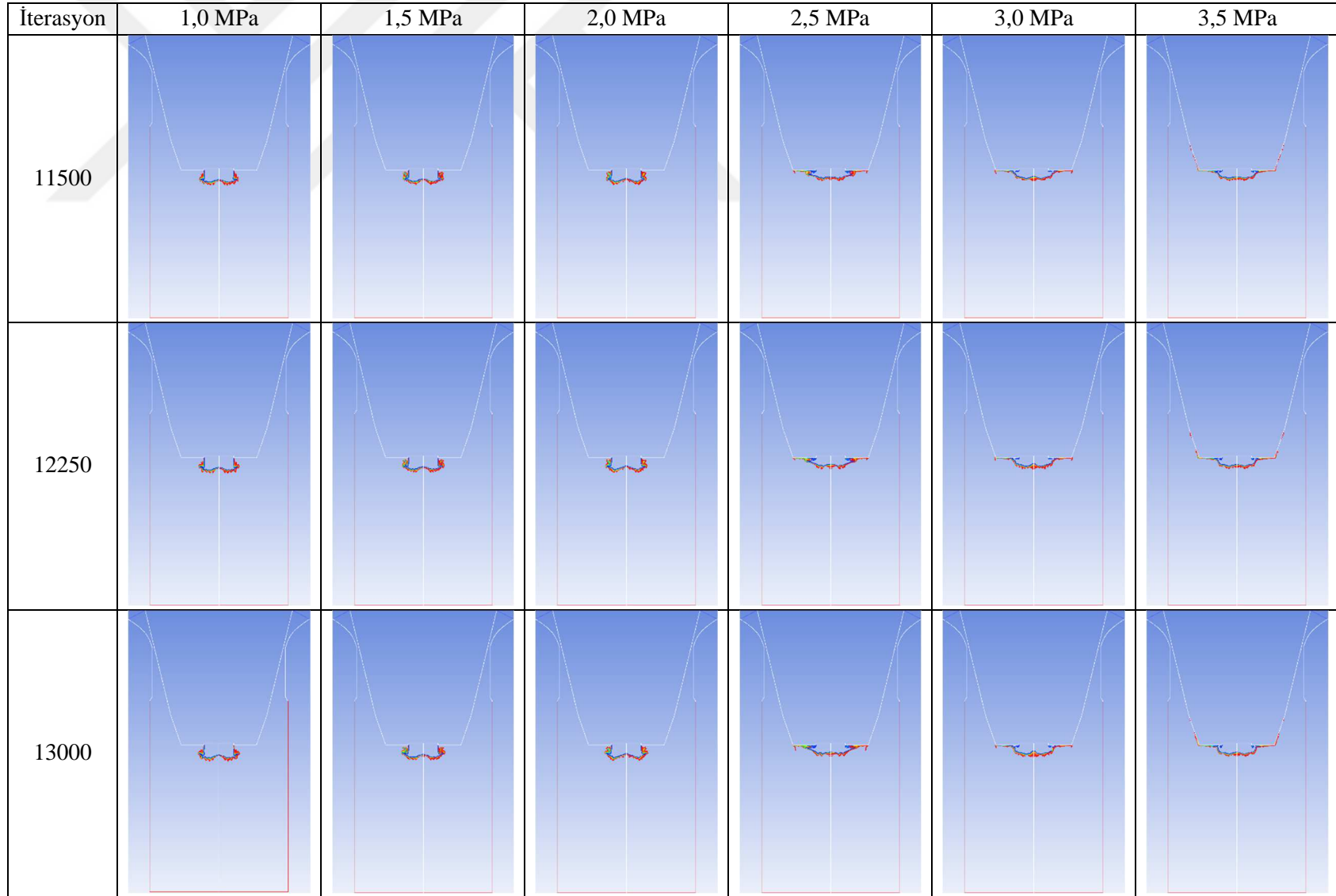
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).



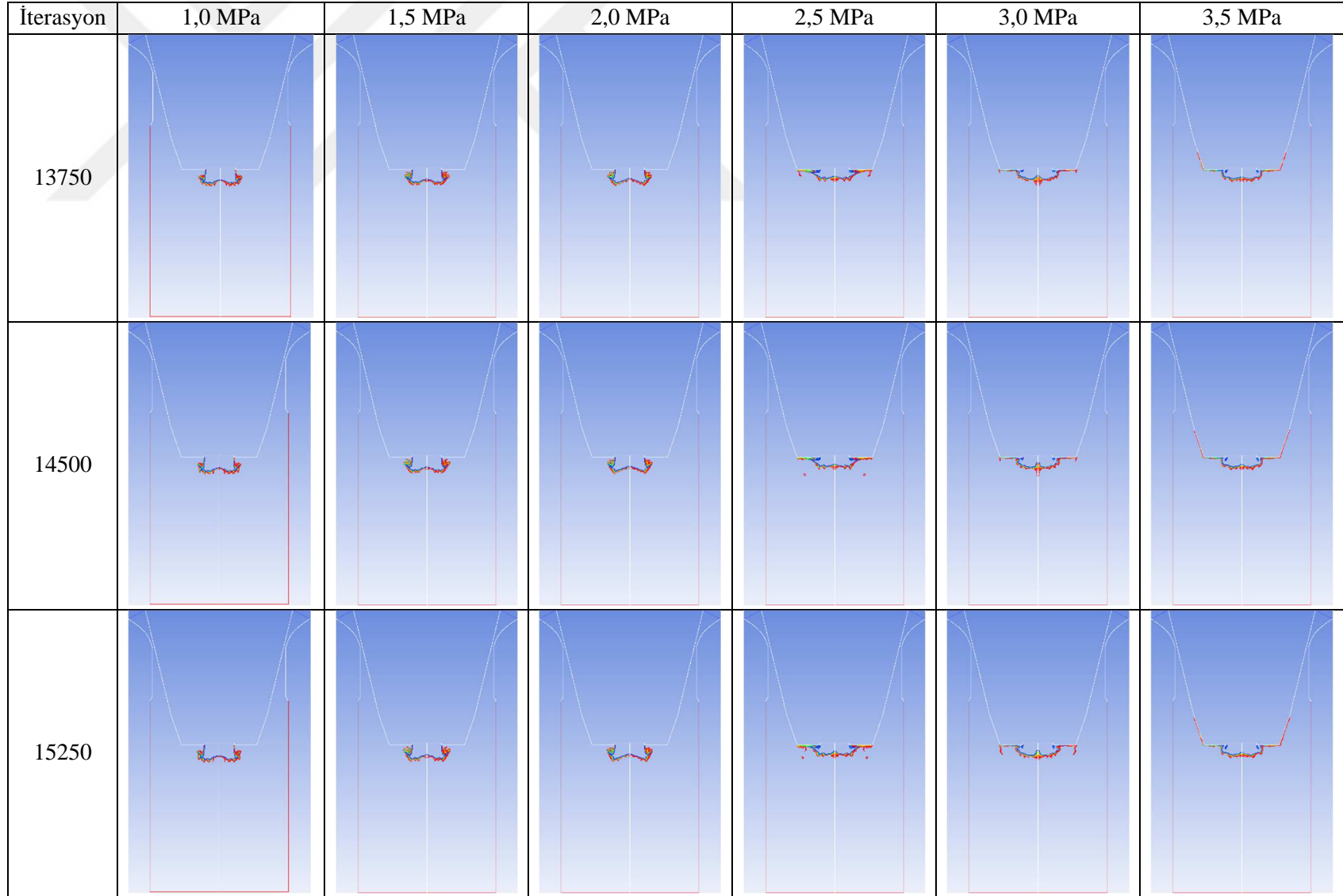
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).



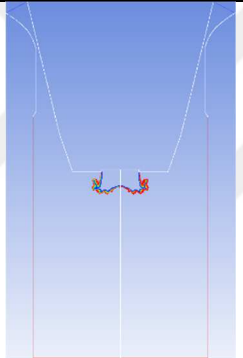
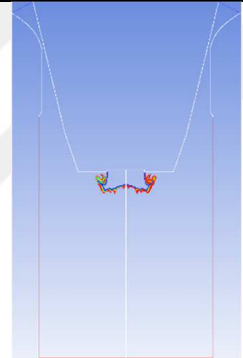
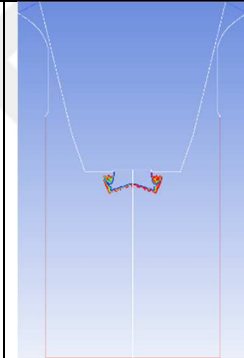
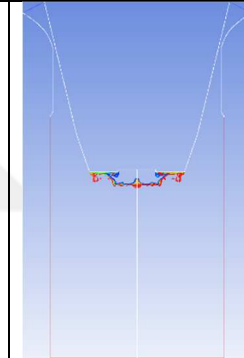
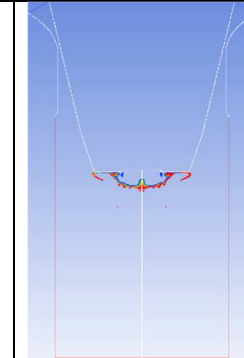
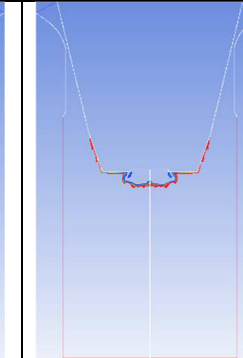
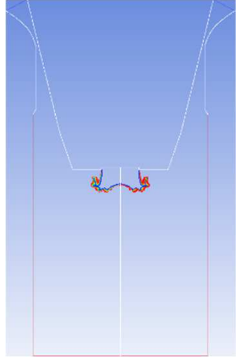
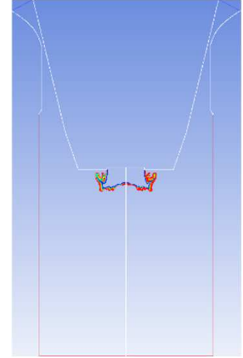
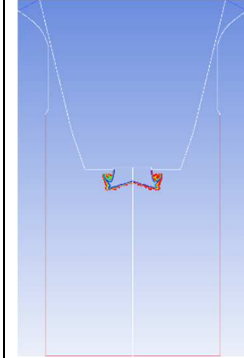
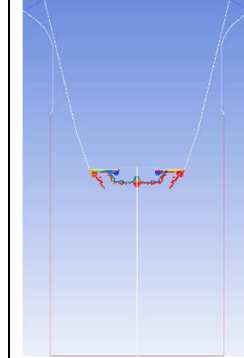
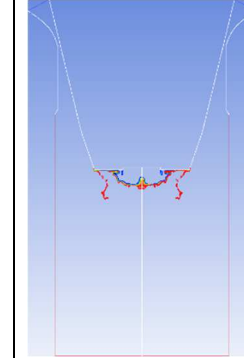
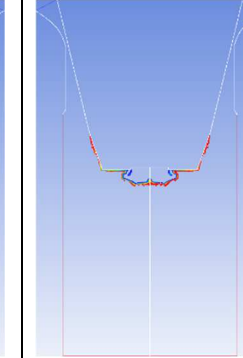
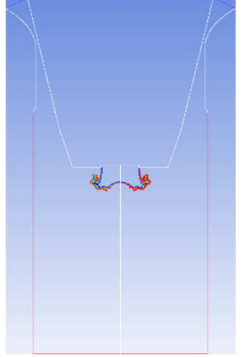
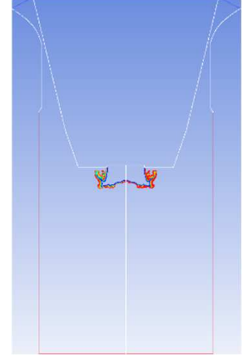
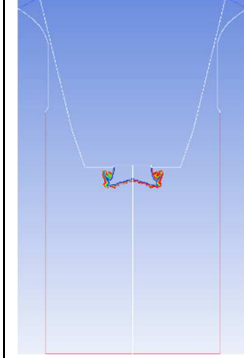
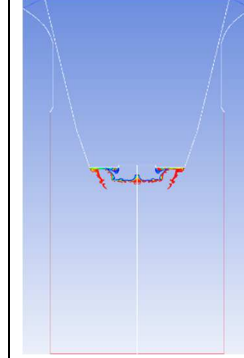
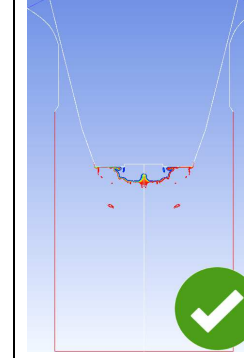
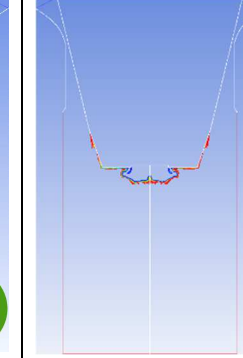
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).



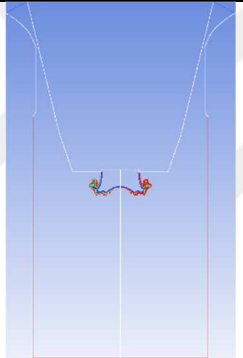
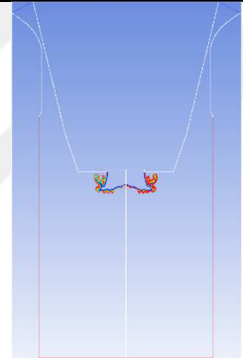
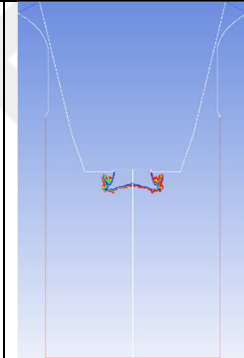
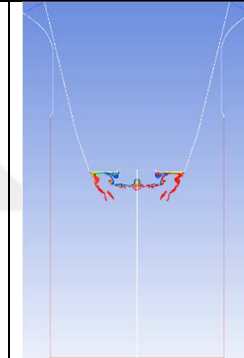
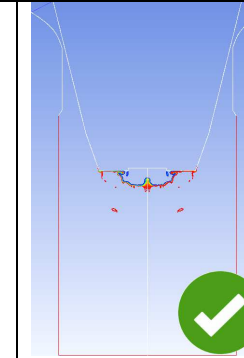
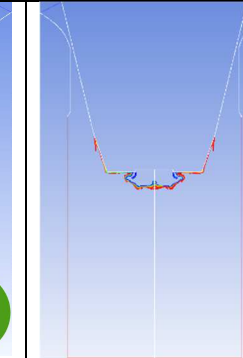
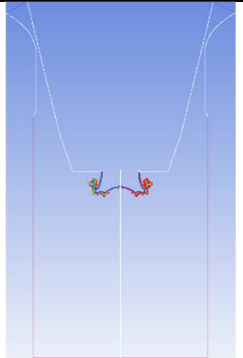
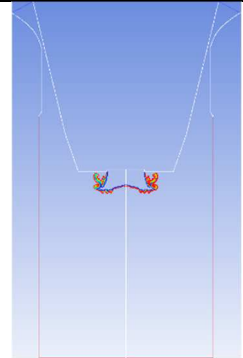
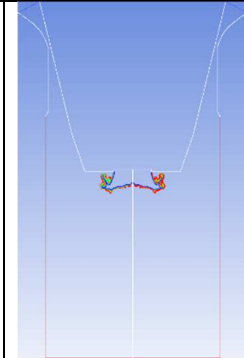
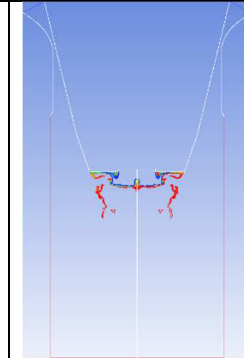
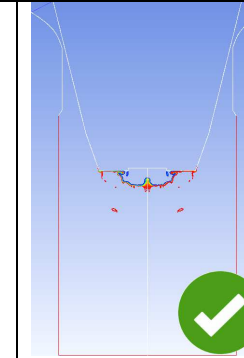
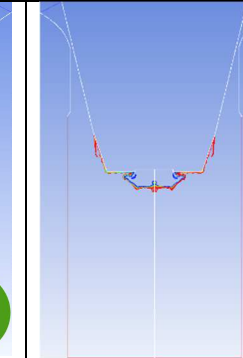
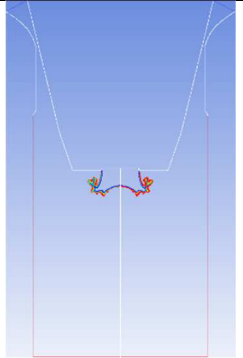
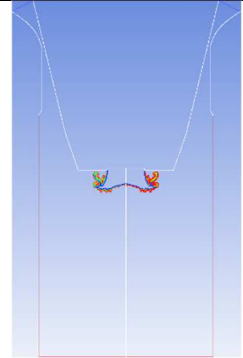
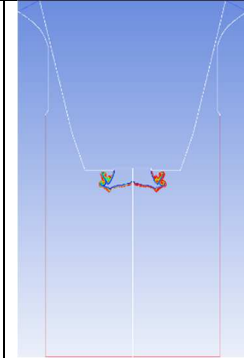
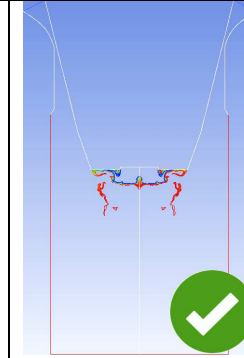
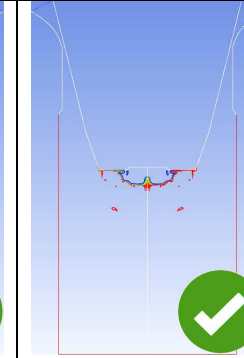
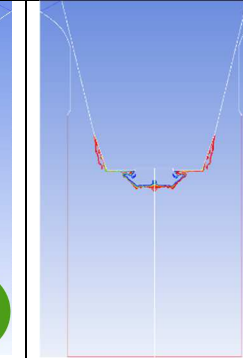
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).



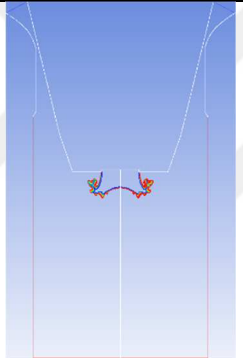
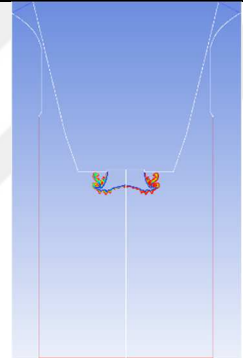
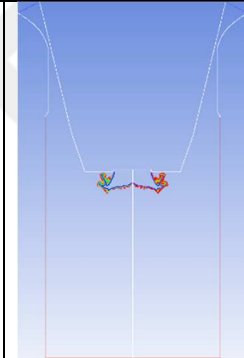
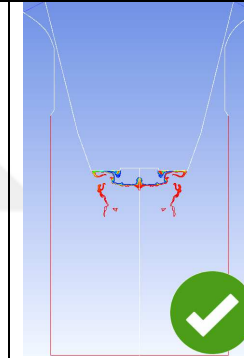
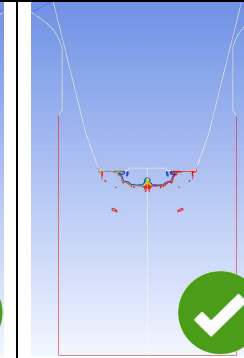
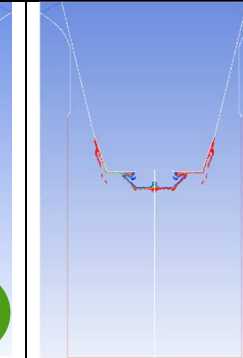
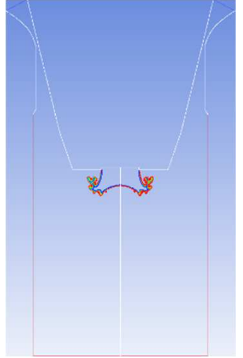
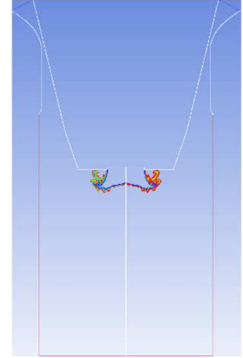
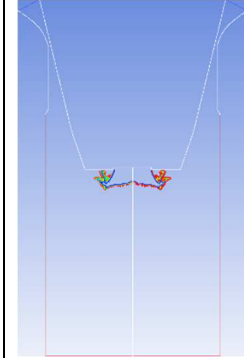
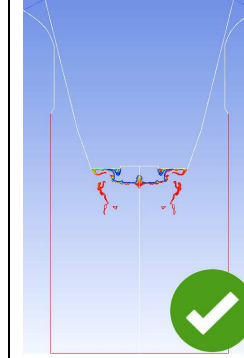
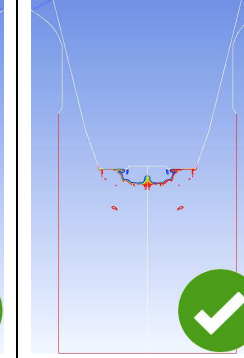
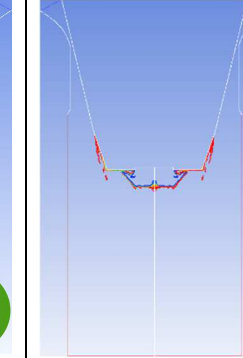
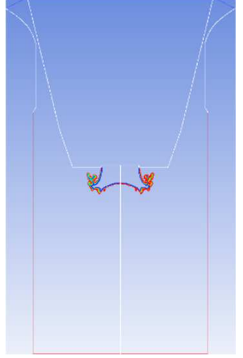
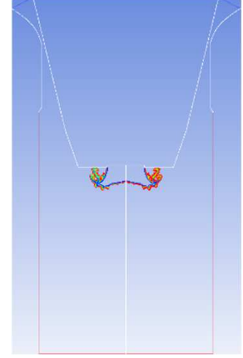
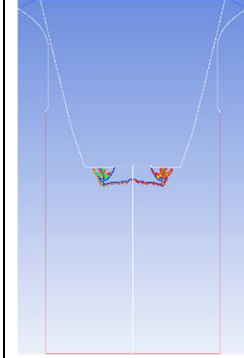
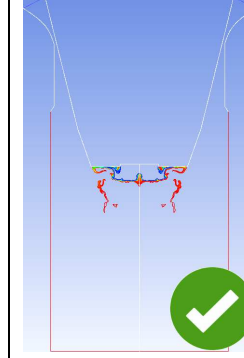
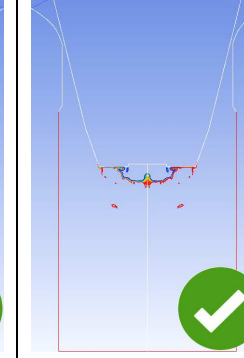
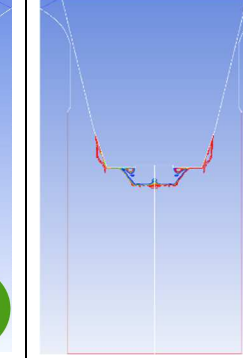
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).

İterasyon	1,0 MPa	1,5 MPa	2,0 MPa	2,5 MPa	3,0 MPa	3,5 MPa
16000						
16750						
17250						

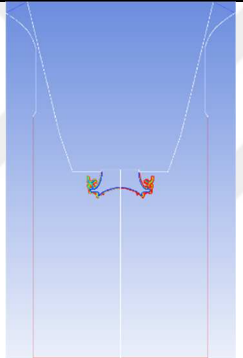
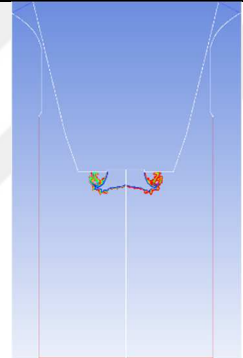
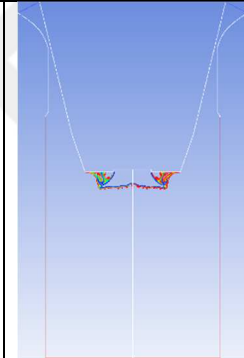
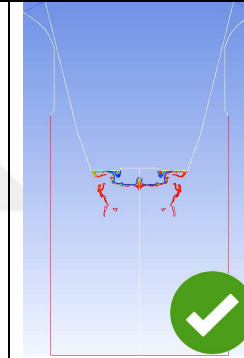
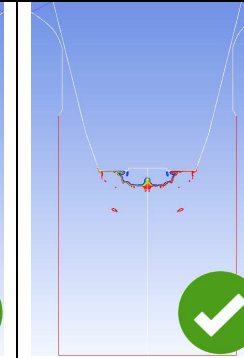
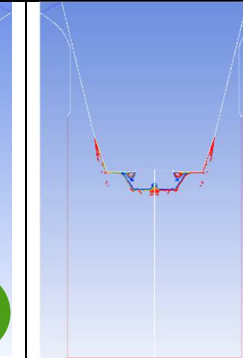
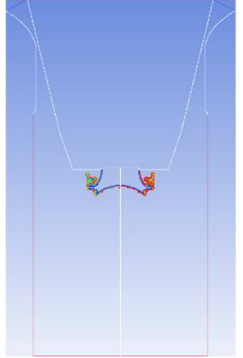
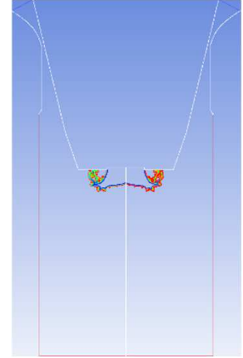
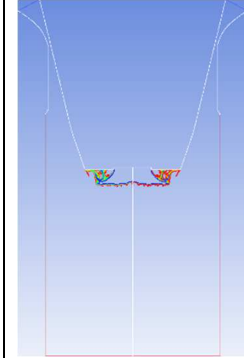
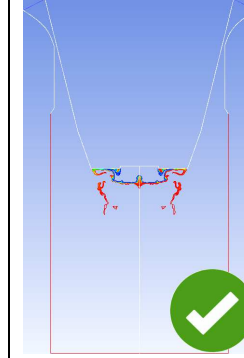
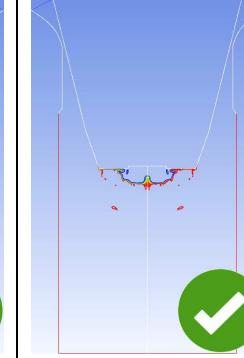
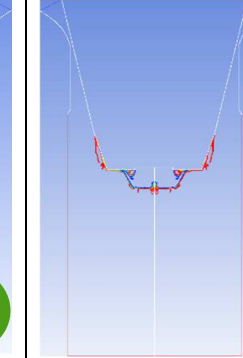
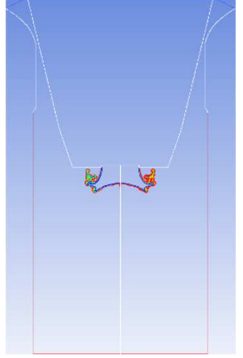
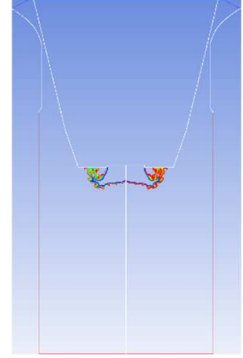
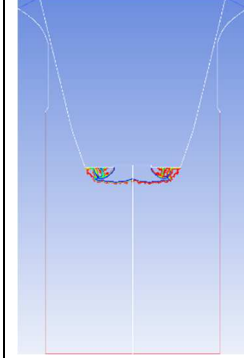
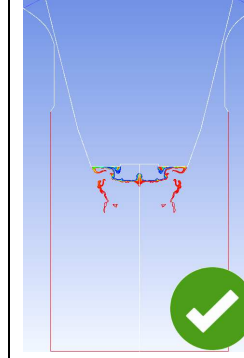
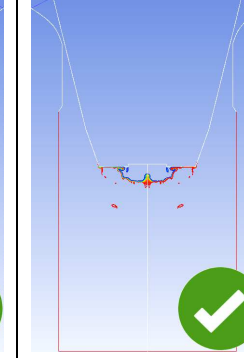
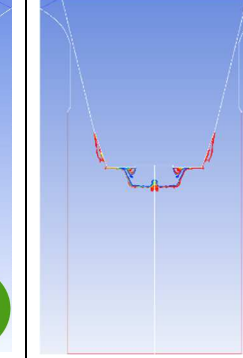
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).

İterasyon	1,0 MPa	1,5 MPa	2,0 MPa	2,5 MPa	3,0 MPa	3,5 MPa
18000						
19000						
19500						

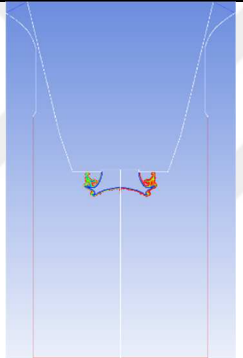
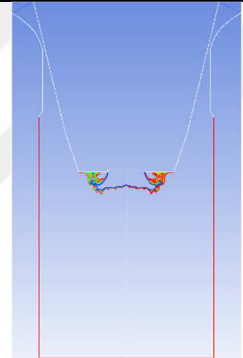
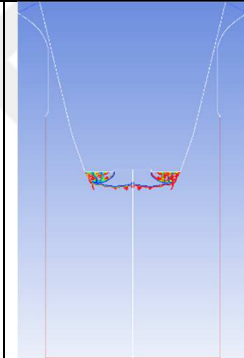
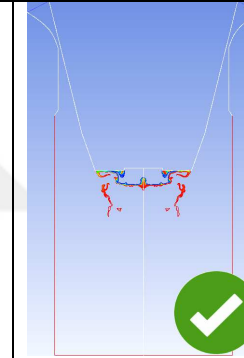
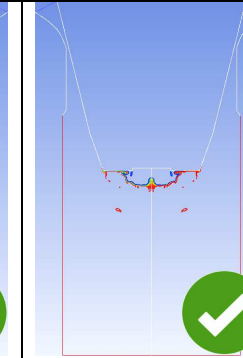
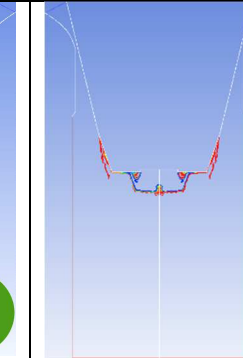
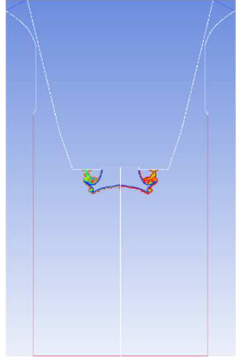
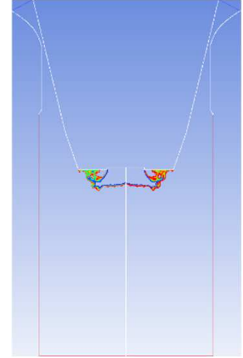
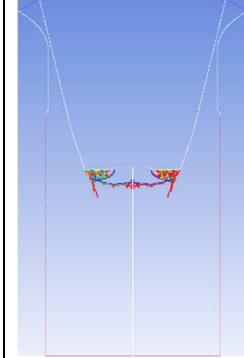
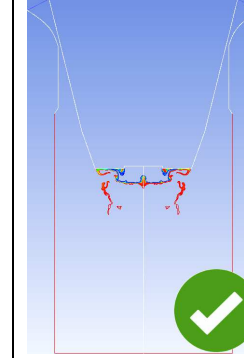
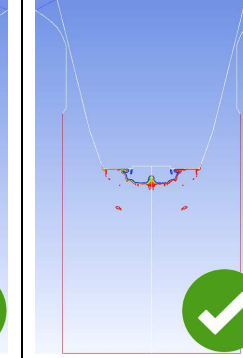
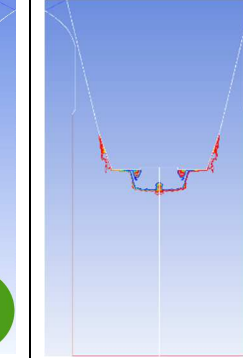
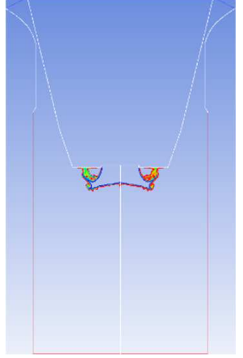
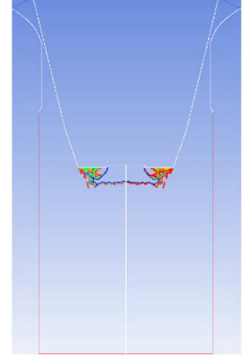
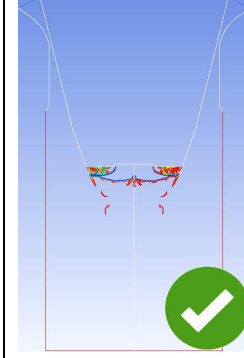
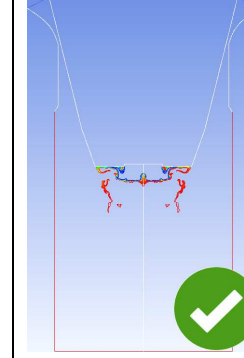
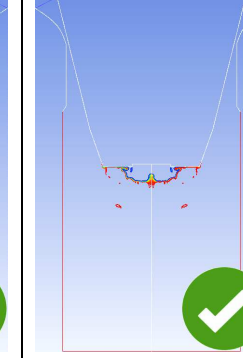
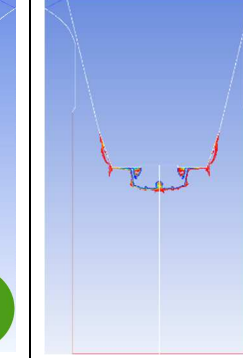
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).

İterasyon	1,0 MPa	1,5 MPa	2,0 MPa	2,5 MPa	3,0 MPa	3,5 MPa
20000						
20750						
21500						

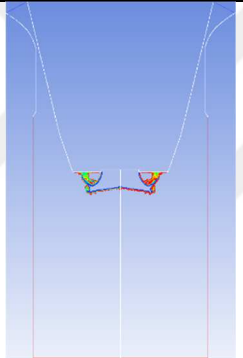
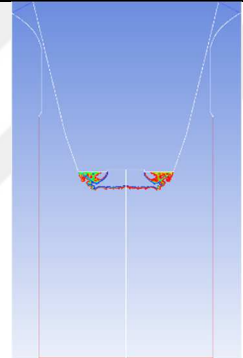
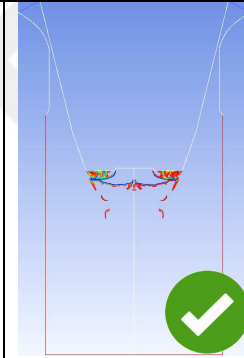
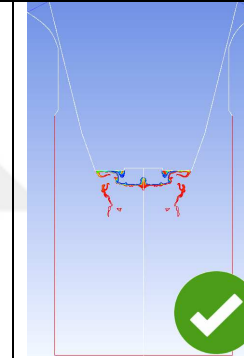
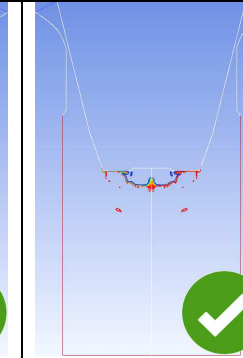
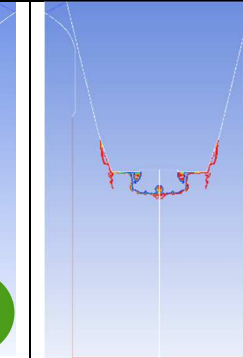
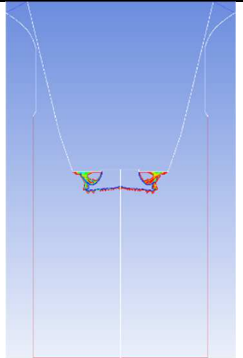
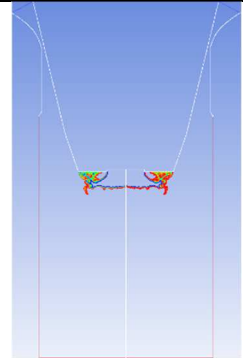
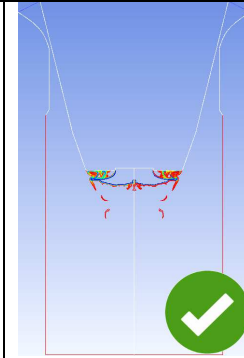
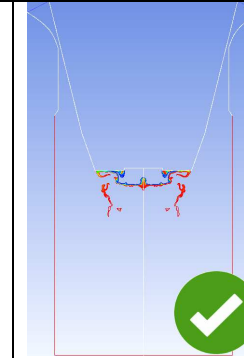
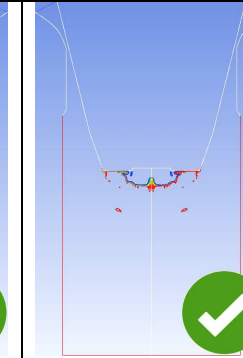
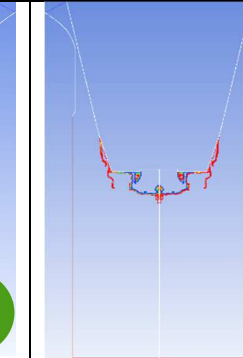
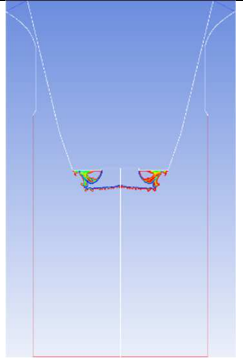
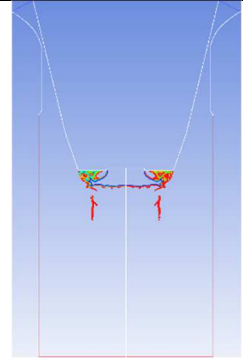
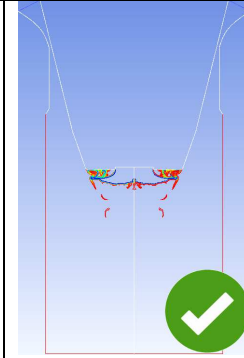
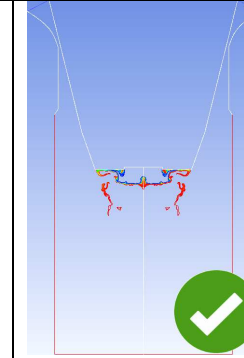
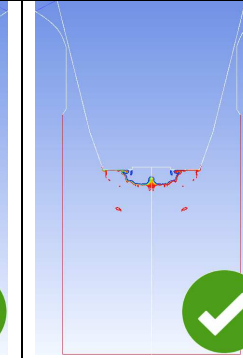
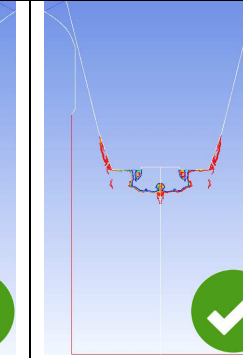
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).

İterasyon	1,0 MPa	1,5 MPa	2,0 MPa	2,5 MPa	3,0 MPa	3,5 MPa
22250						
23000						
23750						

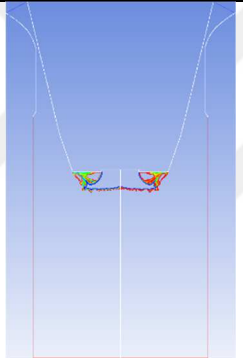
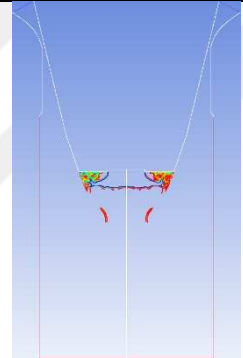
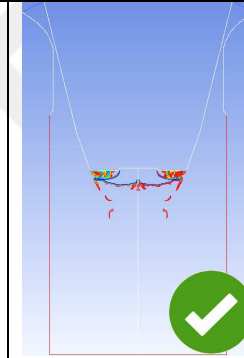
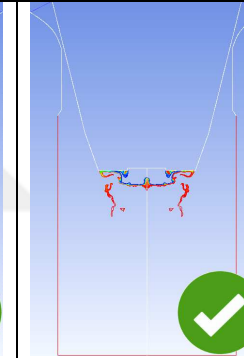
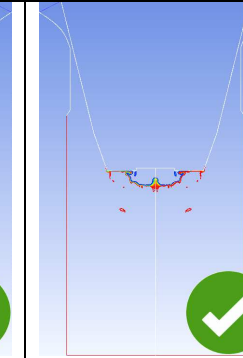
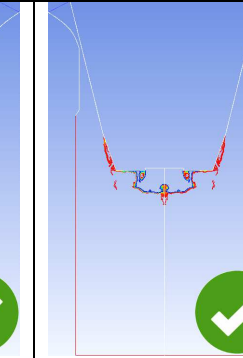
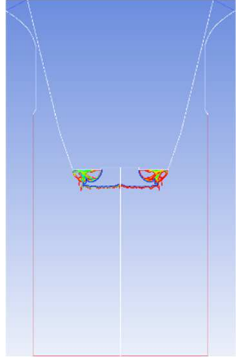
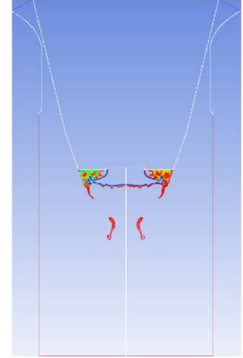
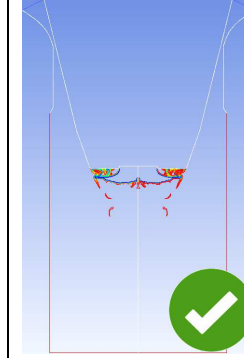
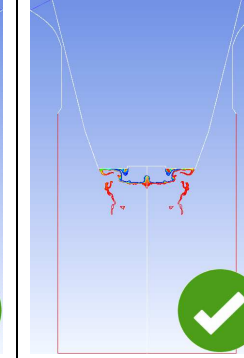
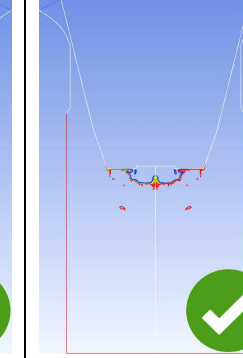
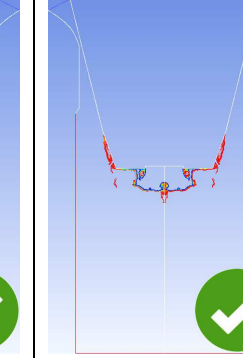
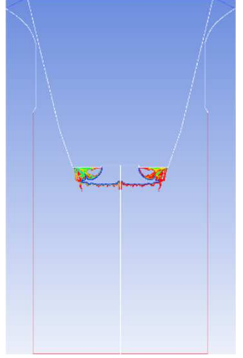
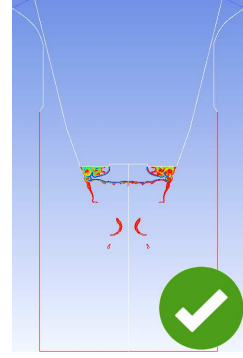
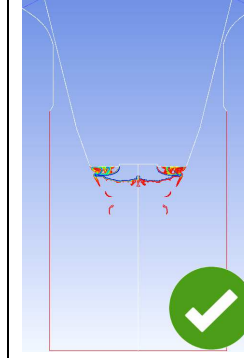
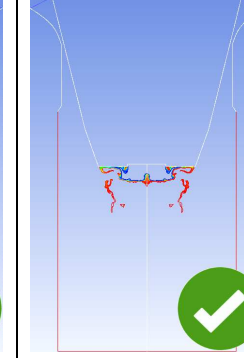
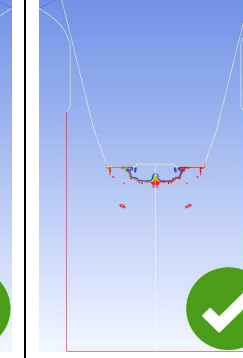
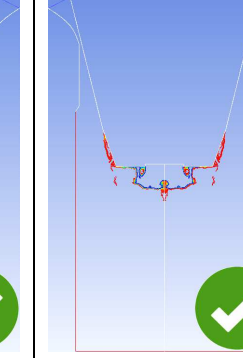
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).

İterasyon	1,0 MPa	1,5 MPa	2,0 MPa	2,5 MPa	3,0 MPa	3,5 MPa
24500						
25250						
26250						

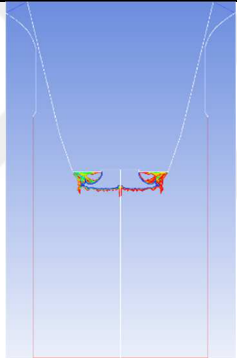
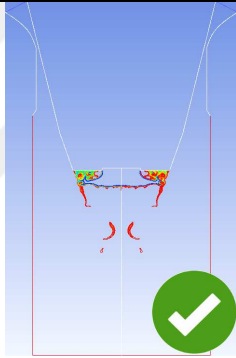
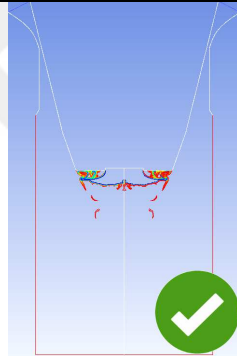
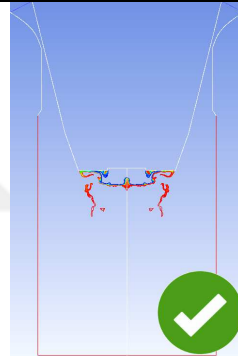
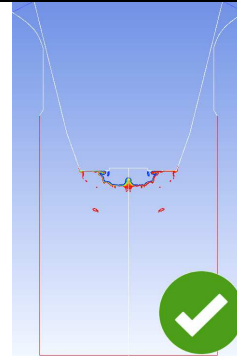
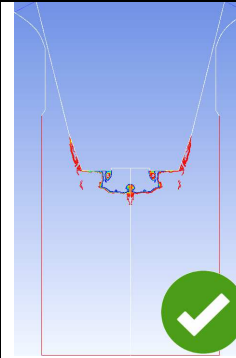
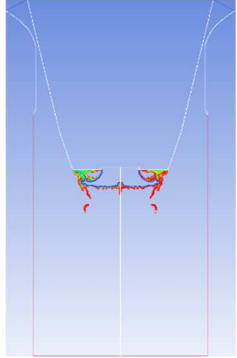
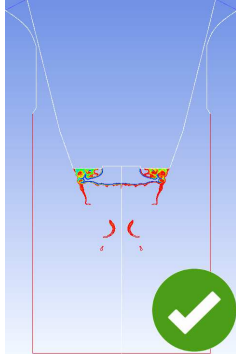
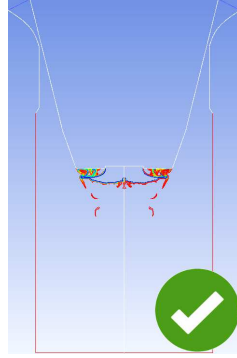
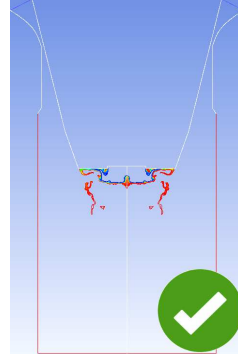
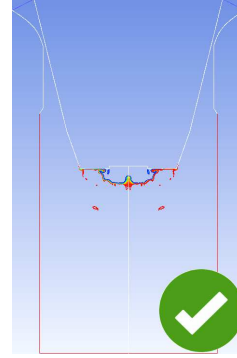
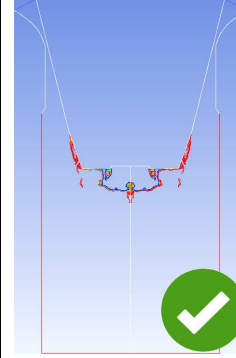
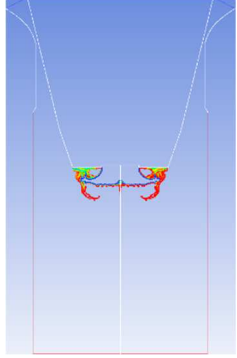
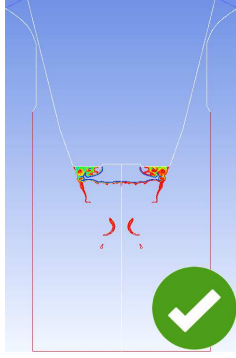
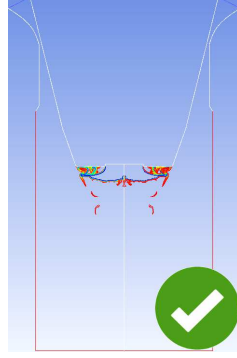
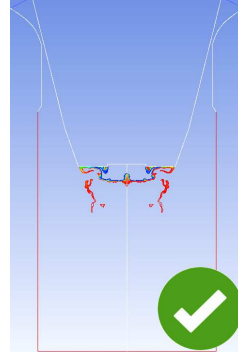
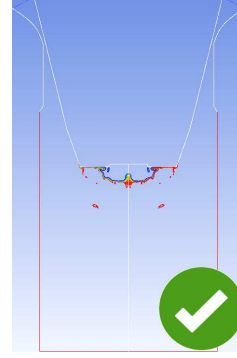
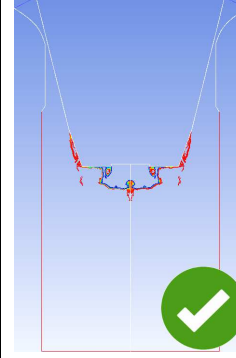
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).

İterasyon	1,0 MPa	1,5 MPa	2,0 MPa	2,5 MPa	3,0 MPa	3,5 MPa
27000						
27750						
28250						

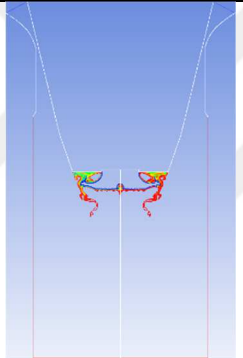
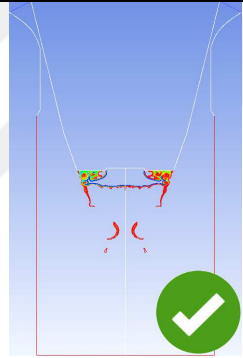
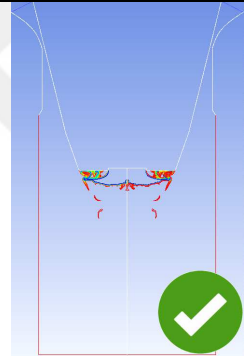
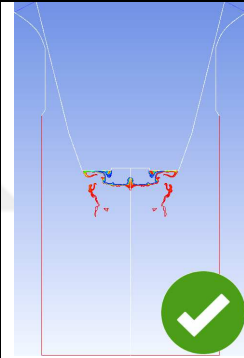
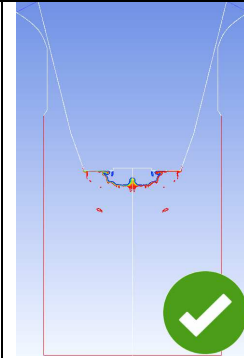
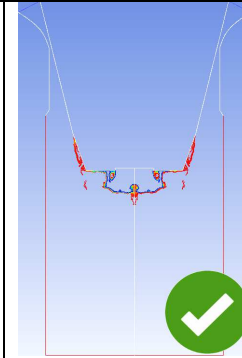
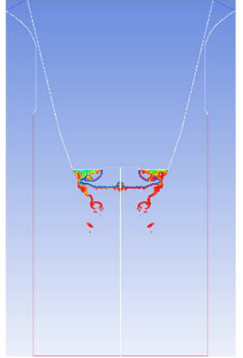
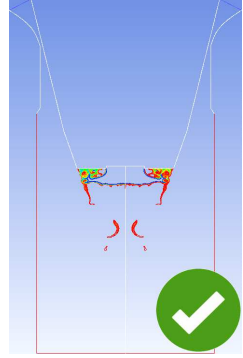
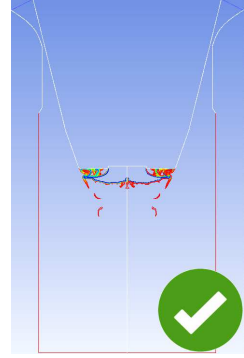
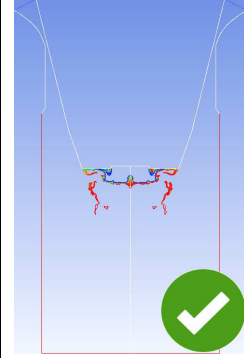
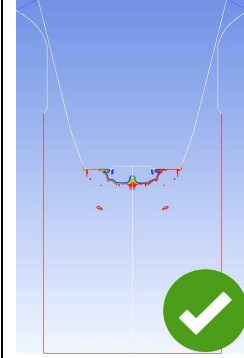
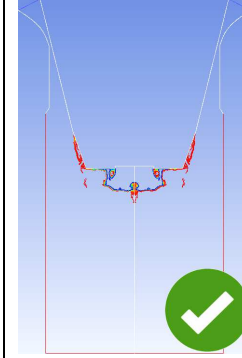
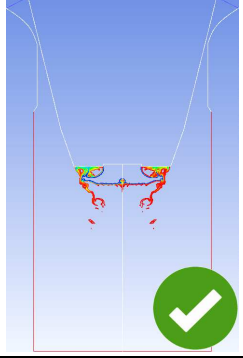
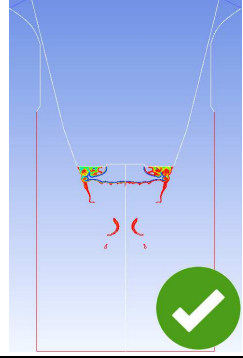
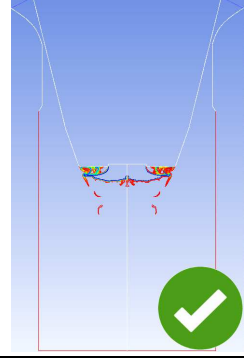
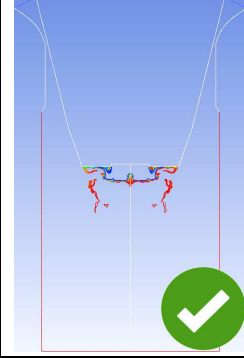
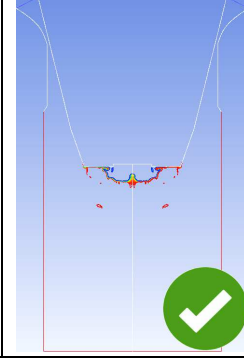
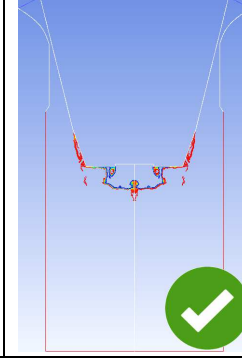
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).

İterasyon	1,0 MPa	1,5 MPa	2,0 MPa	2,5 MPa	3,0 MPa	3,5 MPa
28750						
29250						
29750						

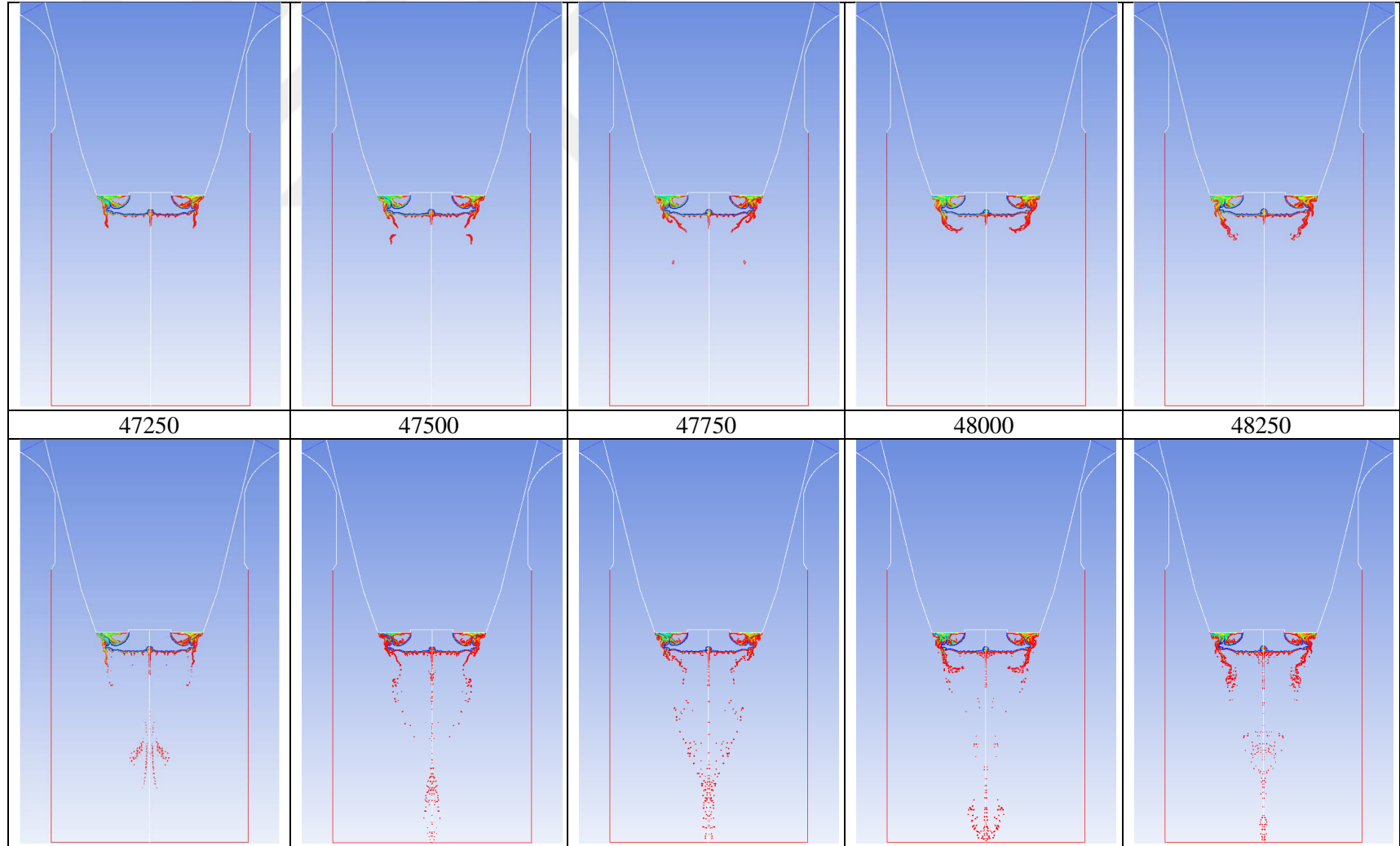
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).

İterasyon	1,0 MPa	1,5 MPa	2,0 MPa	2,5 MPa	3,0 MPa	3,5 MPa
30000						
30500						
31000						

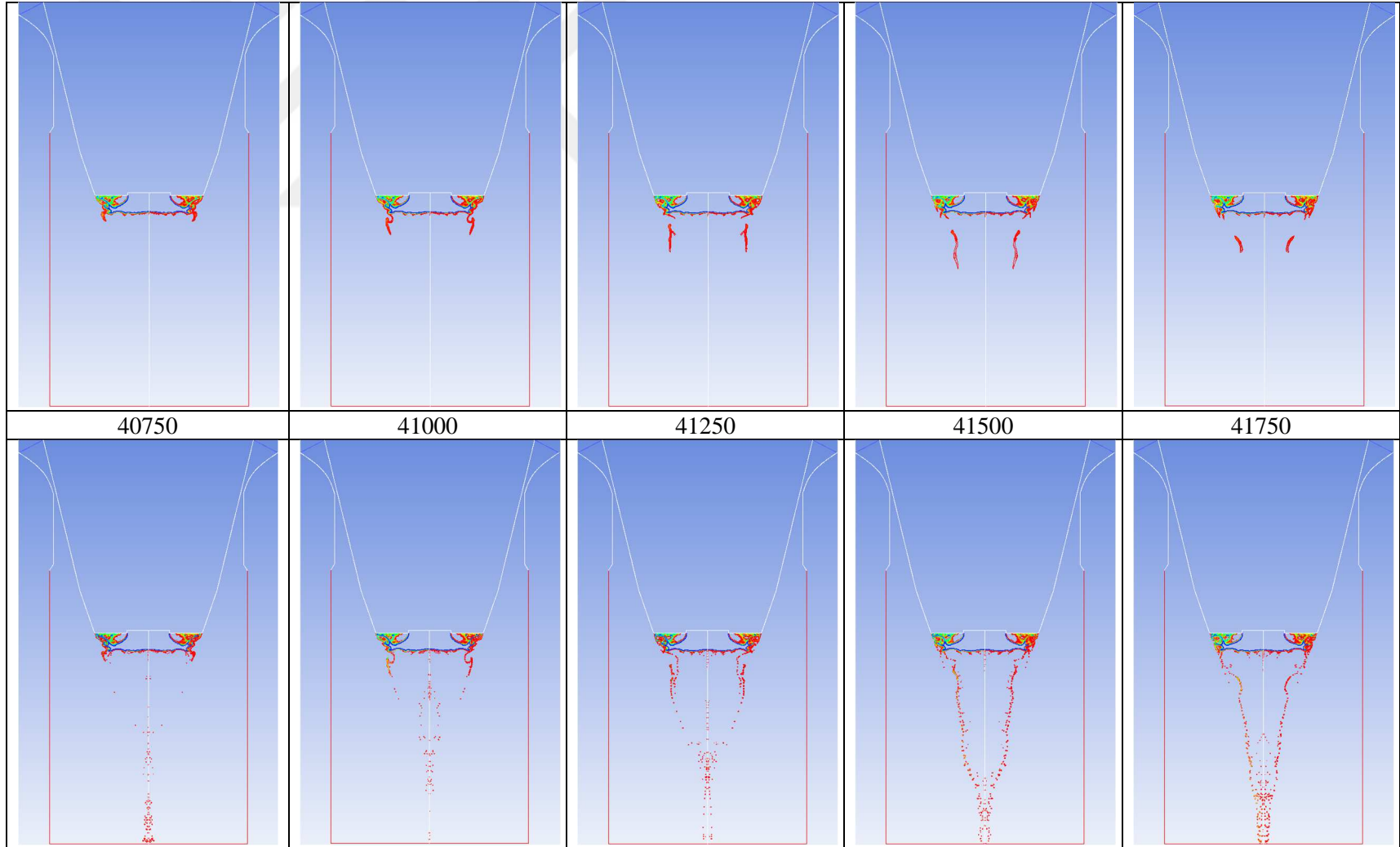
EK-1 (Devam) Gaz atomizasyon modeli (1,0 – 3,5 MPa).

İterasyon	1,0 MPa	1,5 MPa	2,0 MPa	2,5 MPa	3,0 MPa	3,5 MPa
31500						
32000						
32250						

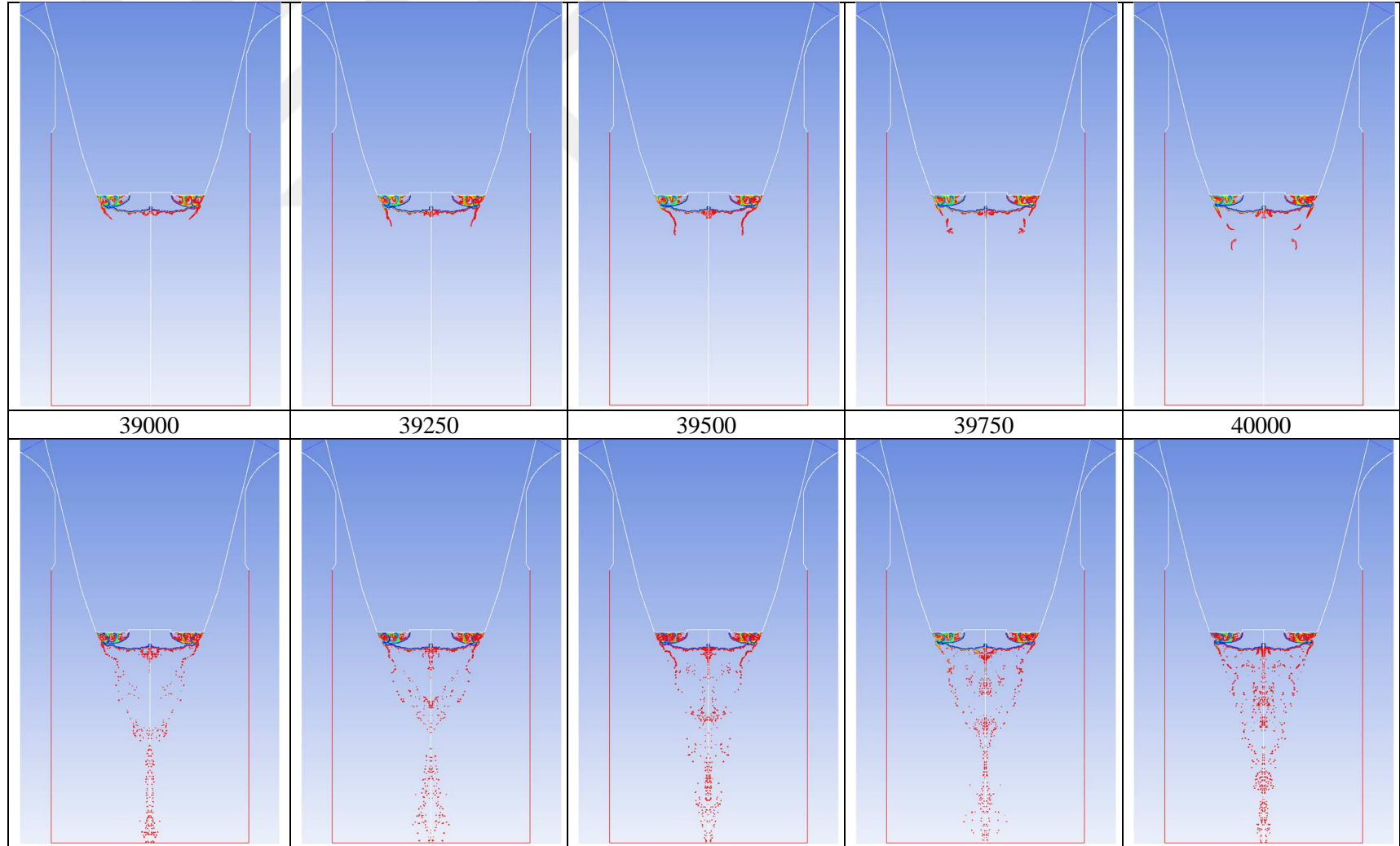
EK-2 1,0 MPa basınç altında parçacıkların elde edilmesi.



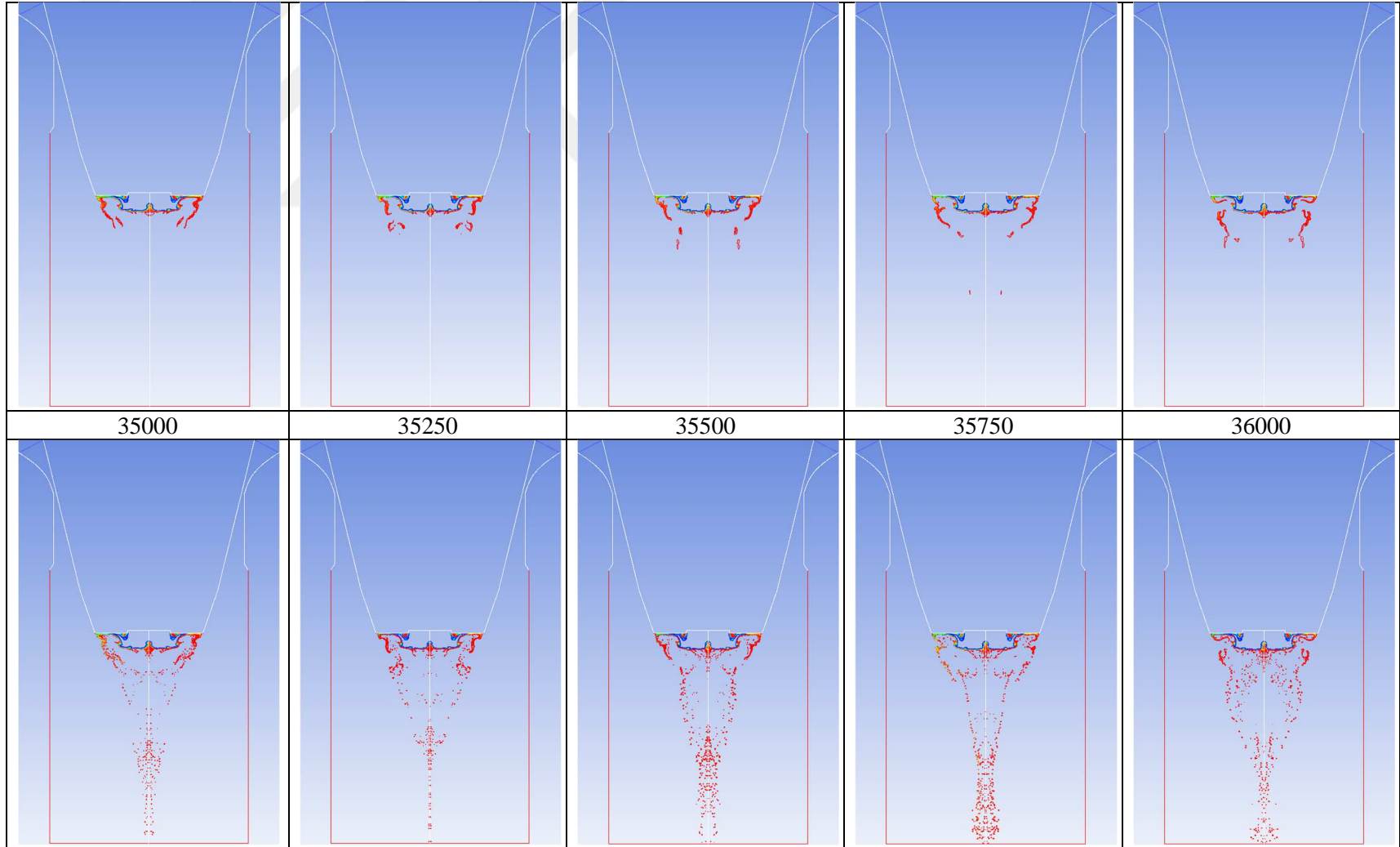
EK-2 (Devam) 1,5 MPa basınç altında parçacıkların elde edilmesi.



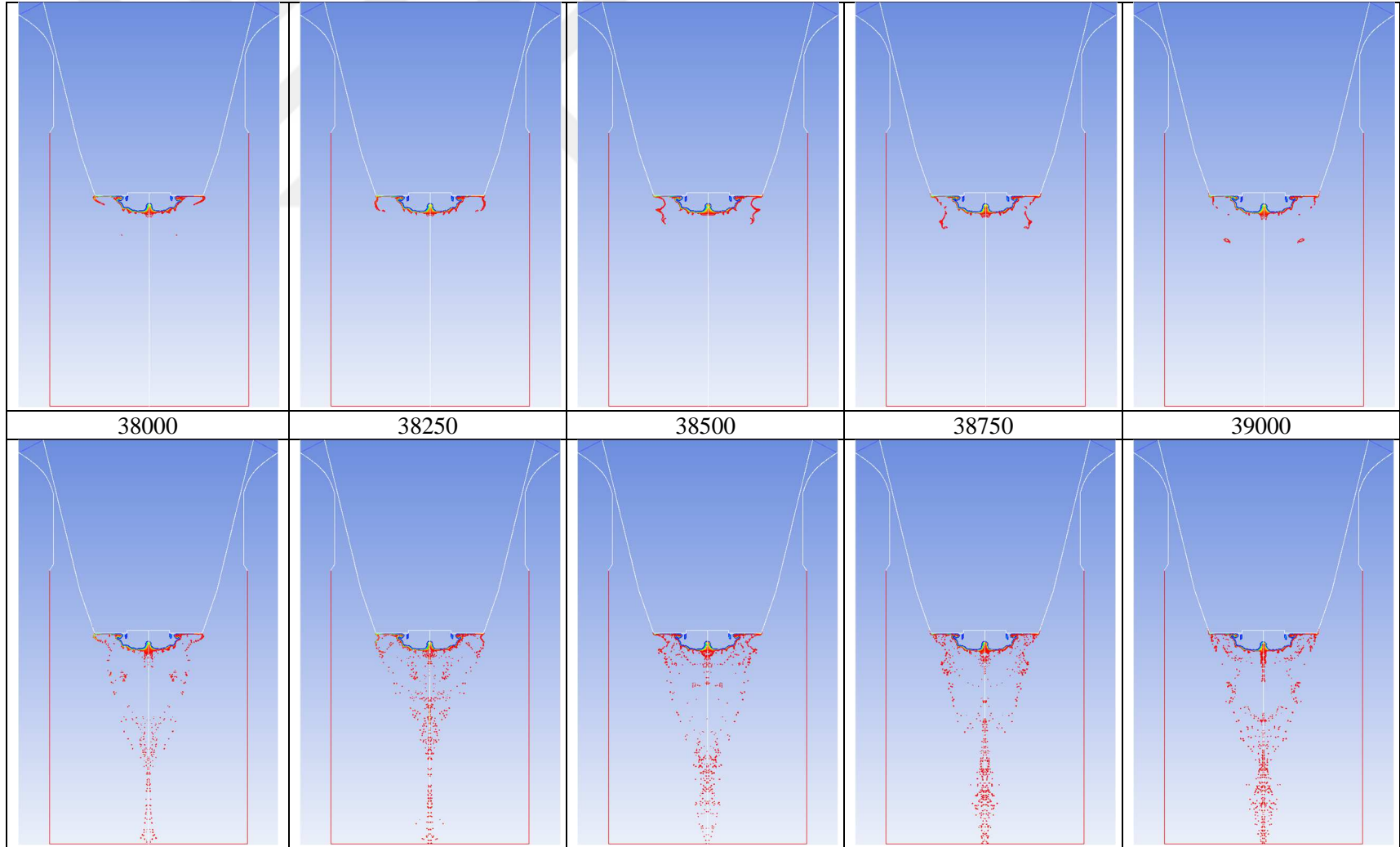
EK-2 (Devam) 2,0 MPa basınç altında parçacıkların elde edilmesi.



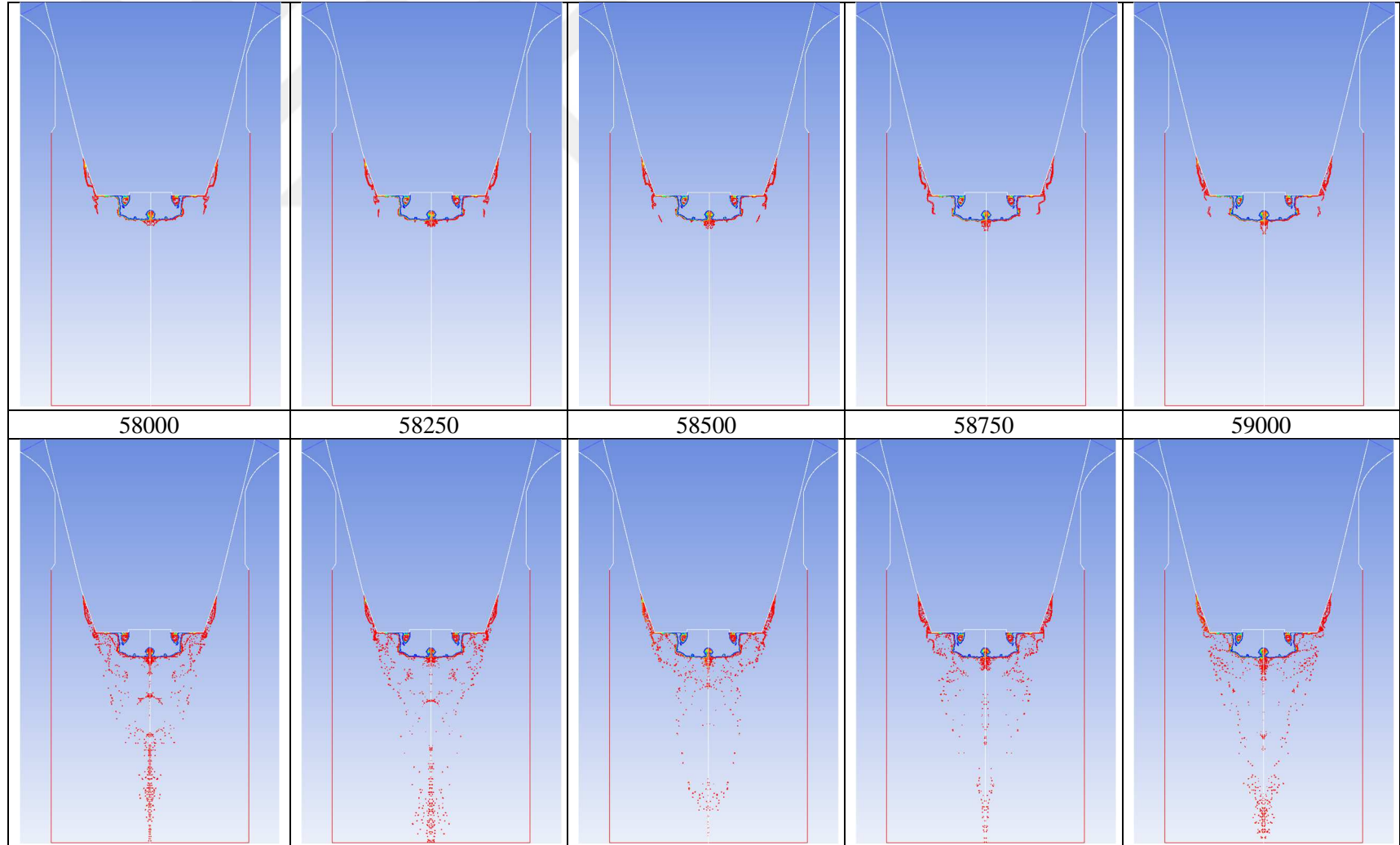
EK-2 (Devam) 2,5 MPa basınç altında parçacıkların elde edilmesi.



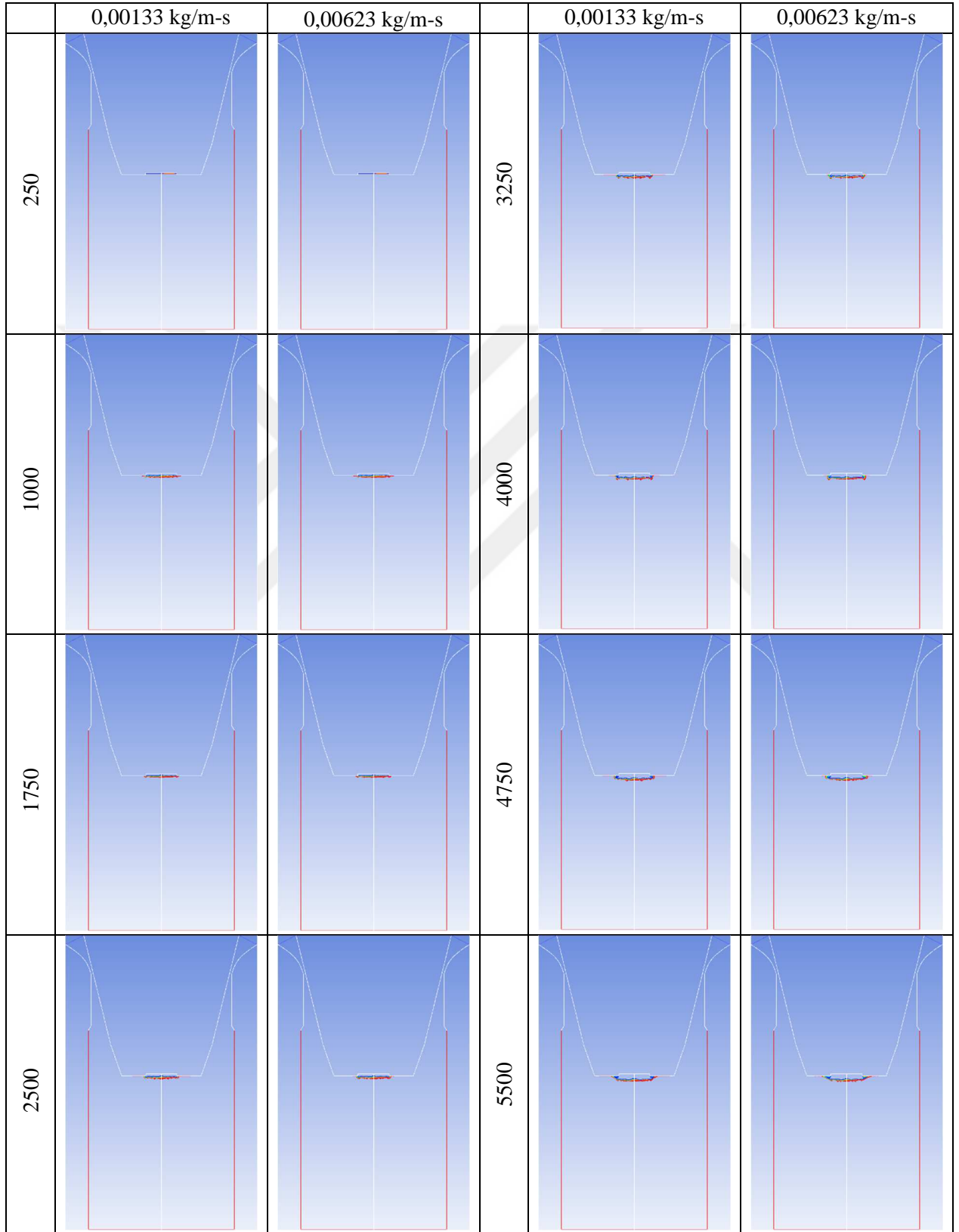
EK-2 (Devam) 3,0 MPa basınç altında parçacıkların elde edilmesi.



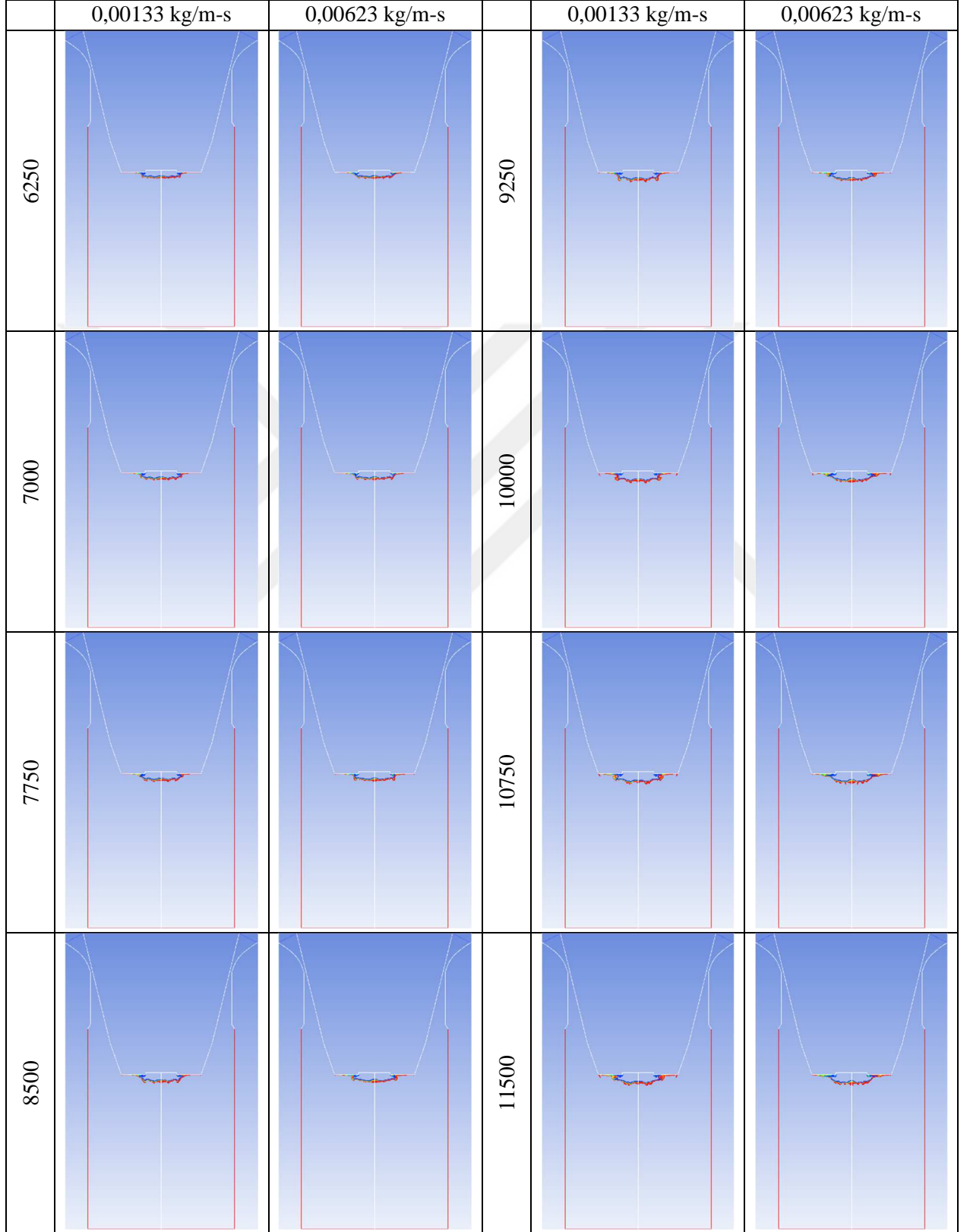
EK-2 (Devam) 3,5 MPa basınç altında parçacıkların elde edilmesi.



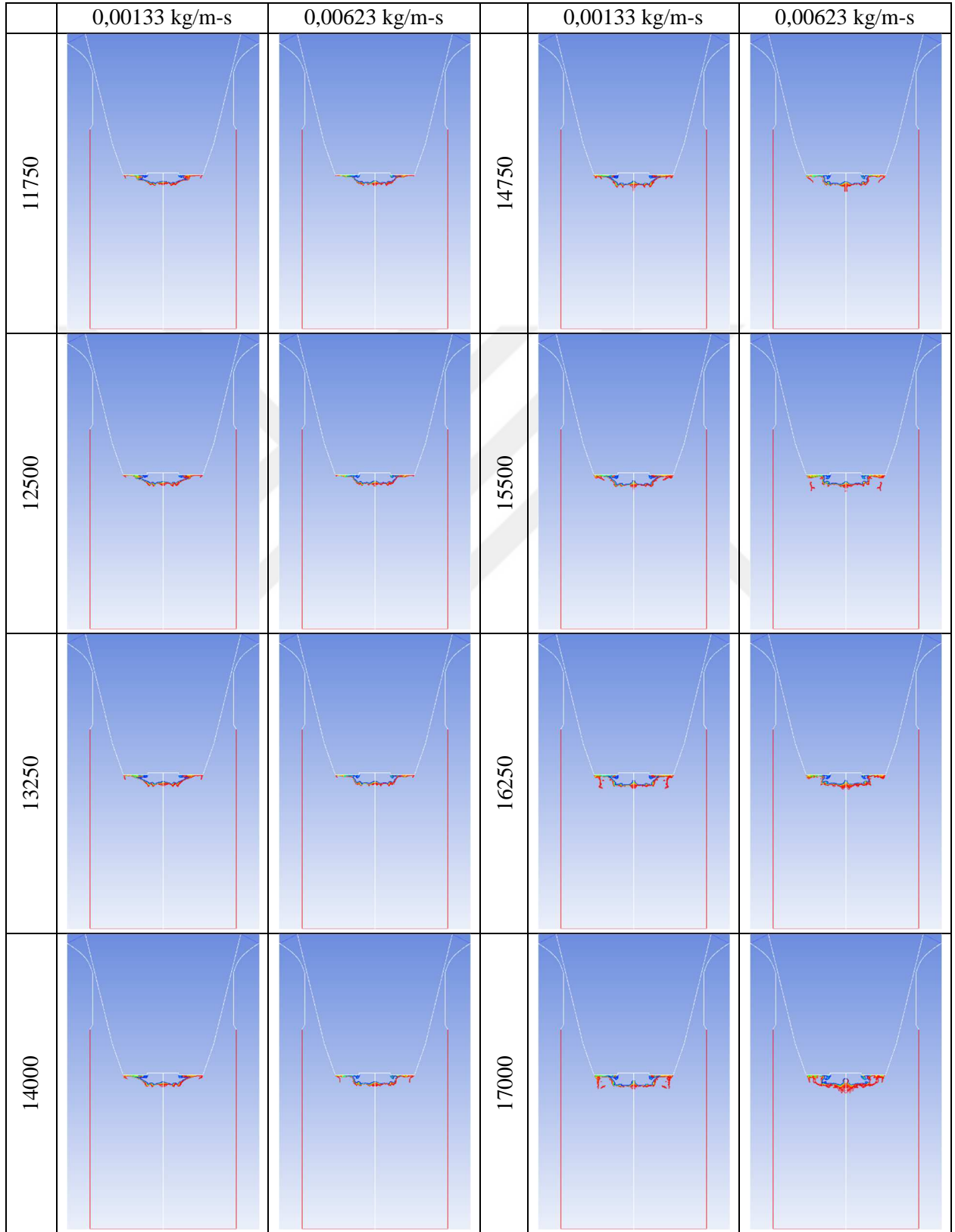
EK-3 Düşük ve yüksek viskozitede atomizasyonun karşılaştırılması (2,5 MPa).



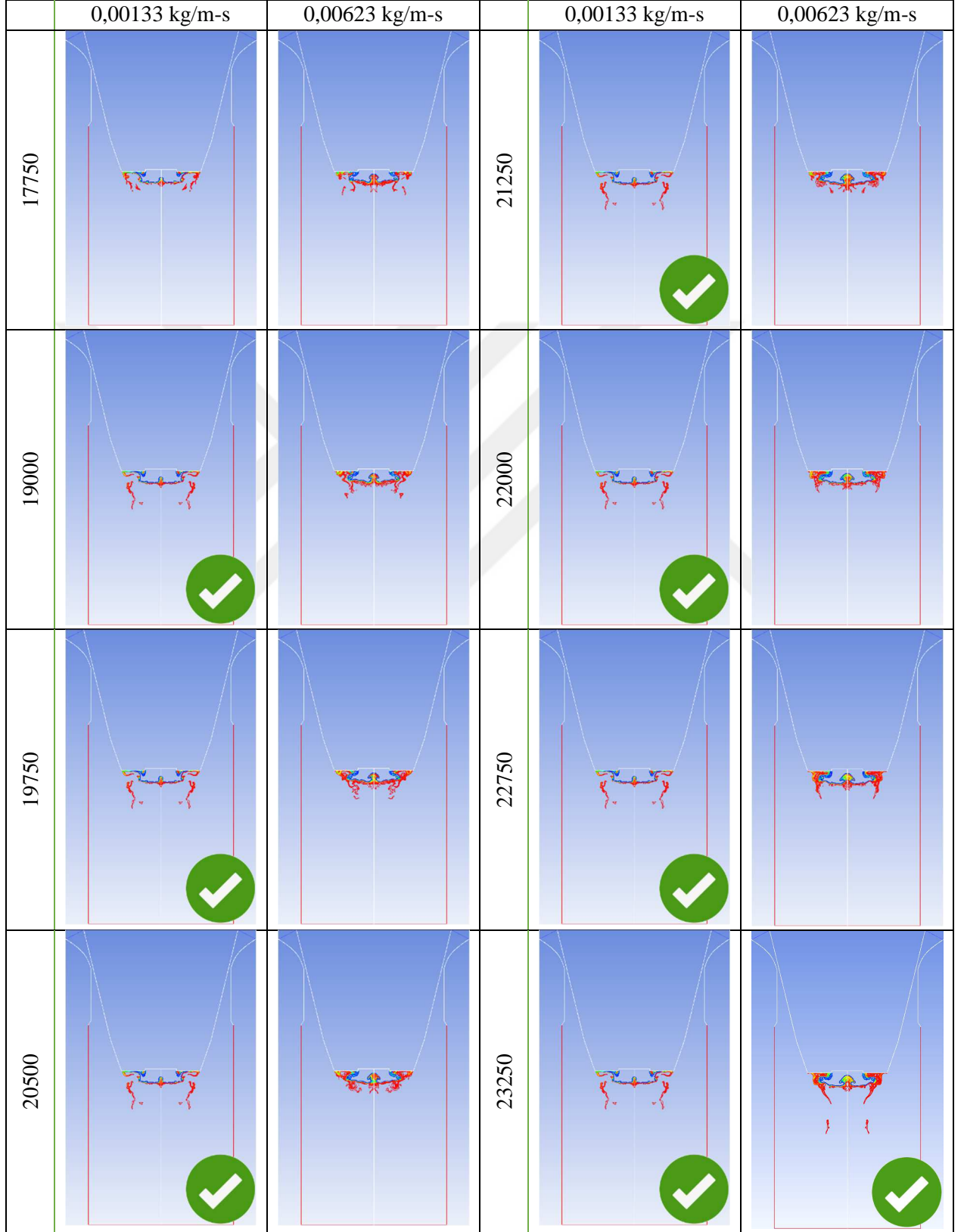
EK-3 (Devam) Düşük ve yüksek viskozitede atomizasyonun karşılaştırılması (2,5 MPa).



EK-3 (Devam) Düşük ve yüksek viskozitede atomizasyonun karşılaştırılması (2,5 MPa).



EK-3 (Devam) Düşük ve yüksek viskozitede atomizasyonun karşılaştırılması (2,5 MPa).



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Kayalı, Yunus Emre
Doğum tarihi, yeri : 1984, Eskişehir
E-posta : yunusemrekayali@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi	2019
Yüksek lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	2009
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	2006
Lise	Eskişehir Kılıçoğlu Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Kuruluş	Görev
2013-2019	1'inci Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü	Mühendis
2008-2013	EÜAŞ Seyitömer Termik Santrali	Mühendis

Yabancı Diller

İngilizce

Akademik Yayınlar

Ünal, R. ve Kayalı, Y. E. (2018). Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretiminde toz boyutunun sayısal çözümleme ile belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33:3, 1135-1144.

Kayalı, Y. E. (2017). F-35A uçak olayı ve kaza analizi. Hava Kuvvetleri Komutanlığı 2017 Yılı Havacılık Emniyeti Yönetim Sistemi (HEYS 2017) Sempozyumu, 12-13 Nisan 2017, Ankara, 313-329.